

# 上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

## 学士学位论文

BACHELOR'S THESIS



论文题目：客船元件模型信息描述方案及  
元件模型自动审核方法

学生姓名：曹金浩

学生学号：517010910021

专    业：交通运输(国际航运)

指导教师：宋元斌

学院(系)：船舶海洋与建筑工程学院

# 上海交通大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文《客船元件模型信息描述方案及元件模型自动审核方法》，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：曹金浩

日期：2021 年 05 月 24 日

# 上海交通大学

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：曹金浩

指导教师签名：宋元斌

日期：2021 年 05 月 24 日

日期：2021 年 05 月 24 日

## 客船元件模型信息描述方案及元件模型自动审核方法

### 摘要

我国的高技术远洋客船的设计起步较晚,目前主要使用国外 CAD 软件,然而国外的商品化船舶设计软件只提供了软件二次开发接口,并不开放底层的数据模型,因此信息的交互共享存在困难。高技术客船的设计规模巨大、专业多、分包单位多,更加离不开协同设计,而元件库是实现三维协同设计的基础库,但是目前的船舶设计软件中仍缺少面向高技术远洋客船的统一元件库,也缺少船舶元件的信息模型定义标准。对于不同的设计软件,不同的规范标准,不同的工作流程,需要采用统一的信息模型格式实现产品设计数据的交换,也就是解决客船协同设计背后的互操作性困难。为了解决这些问题,本文首先基于本体论的“流分配”思想,对 5 万多个元件进行分类,然后为了实现互操作性,应用本体论的方法对客船元件进行分析和总结后,可以将其抽象为一组概念与概念之间的关系,也就是客船元件模型信息描述方案,即信息模型,独立于具体的数据交换协议和计算机实现方式,不依赖具体的 CAD 软件和数据库软件。紧接着提出了元件模型信息建模 7 步法,即建模法则。然后,基于无代码化编程思想开发出了应用这种信息模型和建模法则的软件,并且到上海某船厂进行实际测试,元件建模时间缩短了 4 倍,更重要的是打破了行业壁垒,使得普通画图人员不需要具备计算机编码能力就可以快速建模。为了进一步提高建模速度和准确程度,基于序贯二次规划设计了参数化装配,可以快速调整物体位置和保持物体联动。最后,将软件生成的信息模型导出为新定义的数据格式文件,然后对这类文件进行自动审核。

**关键词:** 互操作性, 信息模型, 本体论, 无代码化编程, 序贯二次规划

# INFORMATION MODELING AND AUTOMATIC REVIEW FOR PASSENGER SHIP COMPONENTS

## ABSTRACT

Domestic high-tech ocean passenger ship design started late. Shipyards in China mainly use foreign CAD software. Foreign commercial ship design software only provides software secondary development interface and not show the underlying data model. So, it is difficult for information exchange. The design scale of high-tech passenger ships is huge. There are many specialties and subcontractors. So, it is necessary to have the support of design collaboration tools. Component library is the basic library for achieving 3D collaborative design. However, the current ship design software is still lack of standard components library for high-tech ocean passenger ship and information model definition standard for ship components. Different design software, different specifications and standards, and different workflow require the use of unified information model schema to realize the exchange of product design data, which is the delimma of interoperability for collaboration. To solve these problems, based on the flow distribution thought of ontology, this thesis has classified more than 50000 components. And then to achieve interoperability, ontology is used to analyze and summary the passenger ship components, which can be abstracted as a set of concepts and the relationship between the concepts, namely information model schema for passenger ship component. Information model is independent of the specific data exchange protocol and computer implementation, not dependent on specific CAD software and database software. Then, a 7-step method for component information modeling is proposed, which is called modeling principle. Then, based on codeless programming thought, this thesis develops a software using both the information model and the modeling principle. In several tests in a shipyard in Shanghai, the average component modeling time can be shortened 4 times. More importantly, it can break the industry barriers. The general drawing designers can model rapidly, who do not need to have the ability for computer code. To further improve the speed and accuracy of modeling, a parametric assembly is designed based on sequential quadratic programming, which can quickly adjust the object position and keep the object linkage. Finally, the information model generated by the software is exported as a newly defined data format file, which is automatically reviewed.

**Key words:** Interoperability, Information Model, Ontology, Codeless Programming, Sequential Quadratic Programming

## 目录

第一章 研究背景.....	1
1.1 船舶设计软件的交互困难.....	1
1.2 信息模型标准的缺失.....	2
1.3 多方协同设计的困难.....	3
1.4 本章小结.....	4
第二章 文献综述.....	5
2.1 互操作性.....	5
2.2 信息模型.....	5
2.3 本体论.....	6
2.4 无代码化编程.....	6
2.5 本章小结.....	7
第三章 信息模型理论.....	8
3.1 相关理论.....	8
3.2 互操作性.....	8
3.3 信息模型表述方案.....	10
3.4 本体论.....	11
3.4.1 流分配.....	11
3.4.2 本体复用.....	13
3.4.3 领域收缩.....	14
3.5 本章小结.....	14
第四章 客船元件模型信息描述方案.....	15
4.1 元件层级关系.....	15
4.1.1 文件组织结构.....	15
4.1.2 元件.....	15
4.1.3 零件.....	16
4.1.4 基本图元.....	16
4.1.5 属性.....	18
4.2 布尔运算.....	18
4.3 局域坐标系.....	18
4.4 颜色.....	19
4.5 贴图.....	20
4.6 元件模型信息建模 7 步法.....	21
4.7 本章小结.....	21
第五章 软件开发.....	22
5.1 软件功能.....	22
5.2 基本图元.....	22
5.3 布尔运算.....	23
5.4 原始参数.....	23

5.5 派生参数.....	24
5.6 基于参数化装配的局域坐标系生成.....	26
5.6.1 参数化装配概念.....	26
5.6.2 序贯二次规划简介.....	26
5.6.3 序贯二次规划应用.....	27
5.7 工程属性.....	29
5.8 实际案例.....	30
5.8.1 客船管系元件闸阀.....	30
5.8.2 客船电气元件变压器.....	30
5.8.3 二维工程图.....	31
5.9 本章小结.....	31
第六章 元件模型自动审核方法.....	32
6.1 完备性检查.....	32
6.1.1 基于正则表达式的键值对审核.....	32
6.1.2 基于文档对象模型的 XML 审核.....	32
6.2 语法检查.....	33
6.2.1 基于正交矩阵的三维变换矩阵审核.....	33
6.2.2 基于数据类型的基本图元参数审核.....	35
6.3 本章小结.....	36
第七章 研究结论.....	37
7.1 总结.....	37
7.2 展望.....	37
参考文献.....	38
谢辞.....	41

## 第一章 研究背景

### 1.1 船舶设计软件的交互困难

我国高技术远洋客船的设计起步较晚。2009 年，我国政府公布了《船舶工业调整和振兴规划》和《船舶工业技术进步和投资改造方向（2009-2011）》，希望推动高技术、高难度、高附加值的三高船舶研发<sup>[1]</sup>。2019 年，我国政府公布了《智能船舶发展行动计划（2019—2021 年）》，进一步推动智能化船舶的发展，建立船舶行业的标准规范体系，重点在于核心技术的突破<sup>[2]</sup>。2018 年 11 月 6 日，中船集团、美国嘉年华集团和意大利芬坎蒂尼集团签订高技术远洋客船建造合同，标志着中国首艘具有世界先进水平的高技术远洋客船开始实质性设计建造<sup>[3]</sup>。目前，我国造船厂普遍使用国外船舶建模软件，例如瑞典的 TRIBON<sup>[4]</sup>、芬兰的 Napa<sup>[5]</sup>、澳大利亚的 MAXSURF<sup>[6]</sup>、西班牙的 FORAN<sup>[7]</sup>、美国的 CADDSS<sup>[8]</sup>、AutoCAD<sup>[9]</sup> 和 Intergraph Smart 3D<sup>[10]</sup>等。

国外船舶建模软件只提供了软件二次开发接口，不开放底层的数据模型。不触及软件内核的二次开发，一旦使用国外软件，便不可避免地使用软件的专有数据格式，例如\*.dwg、\*.sat 等。因此，我国造船厂始终处于被动地位。2006 年，有学者提出，不使用 Tribon 数据库，而使用 Oracle 关系型数据库存储 Tribon 模型数据，从而实现更方便地读取数据和提高 Tribon 二次开发深度<sup>[11]</sup>。但是 Tribon 只符合欧盟的船舶建模标准，不符合我国的船舶建模标准。因此，需要按照我国规定的标准，对数据进行对等转换。虽然把 Tribon 模型数据转移到 Oracle 数据库，但是制图审图依旧依赖 Tribon。2011 年，黄金锋<sup>[12]</sup>和 2015 年，李遵伟等<sup>[13]</sup>对 Maxsurf 进行了类似的二次开发，但是同样不能脱离 Maxsurf。近 10 年，国际形势紧张，一旦国外软件公司限制软件使用权，历史数据将无法读取和迁移，未来数据将无法和现有框架关联。

目前的船舶设计软件中仍缺少面向高技术远洋客船的元件库。元件库是实现三维协同设计的基础库。如图 1-1 所示，中船尝试在 Intergraph Smart 3D（鹰图）上建立客船专有元件库，尽管 IT 部门在鹰图上进行了深度二次开发，基于参数化建模的思想，设计了 DEF 语言用以搭建元件库。但是 DEF 语言归根结底是计算机编码过程，普通画图人员难以参与元件库建库过程，只能在 IT 部门完成元件三维建模之后才可以将元件进行集成，也就是批量导入鹰图软件。因此，建立元件库的过程，除了处理体量较大的问题外，还需要打破计算机行业的壁垒，重要思想就是无代码化编程 Codeless Programming。



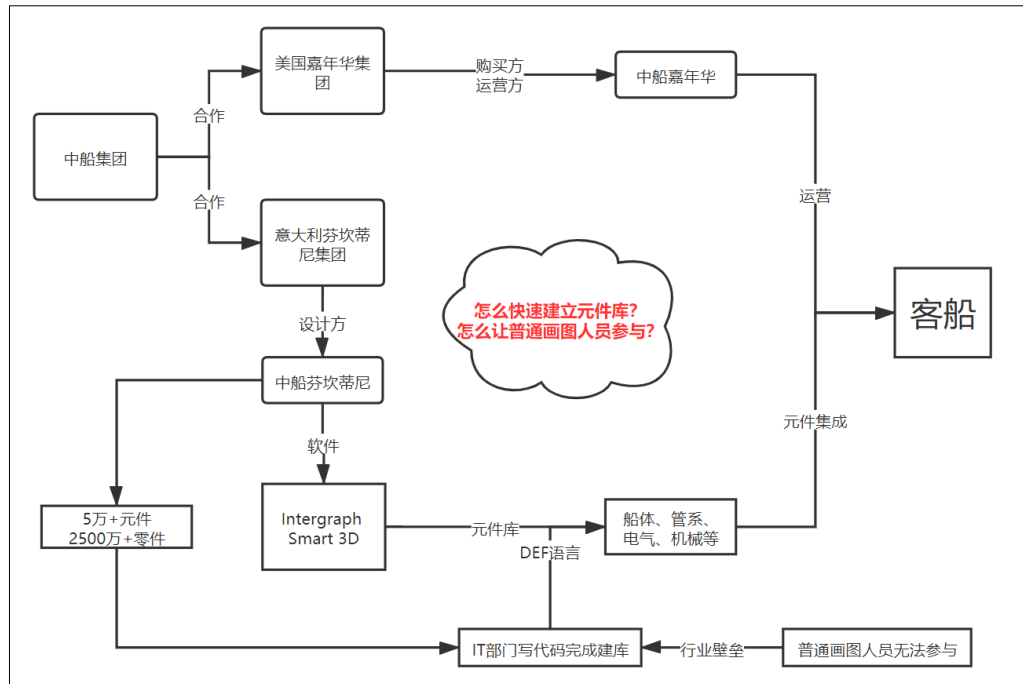


图 1-1 元件库搭建困难

## 1.2 信息模型标准的缺失

描述元件模型的信息定义标准是船舶设计 CAD 软件实现国产化的基础性工作。信息模型 **Information Model (IM)** 是独立于具体的数据交换协议和计算机实现方式, 不依赖具体的 CAD 软件和数据库软件。**IM** 是在概念 (本体论) 层面描述所设计的系统, 是对设计或将建造的设施中的元素 (实体) 的描述, 是对所设计的设施系统 (子系统) 中各种实体间关系的描述, 还可以描述领域的规则。**IM** 方案一般在行业内是有标准的并且是开源的。数据模型 **Data Model (DM)** 是更加具体的, 与具体的软件或计算机系统下的具体实现有关, 许多的商业软件虽然提供了 **API** 接口对其内部的数据库进行访问, 但是软件中的数据库仍旧是一个 “黑箱”。

建筑行业早早地定义了领域内的信息模型 BIM<sup>[14]</sup>, BIM 是“设施物理和功能特性的数字表达, BIM 是一个共享的知识资源, 是一个分享有关这个设施的信息, 为该设施从概念到拆除的全寿命周期中的所有决策提供可靠依据的过程, 在项目不同阶段, 不同利益相关方通过在 BIM 中插入、提取、更新和修改信息, 以支持和反映各自职责的协同工作”<sup>[15]</sup>。确切地说, 一个信息模型可以衍生出多个不同的数据模型, 虽然 IM 和 DM 的目的不同, 但是二者之间在数据文件上经常有交叉。因此, 需要有明确的标准加以限定。IM 的一个重要功能是描述系统要素之间的关系, 企业经常用 IM 的内容来限定 DM 的数据内容范围。

建筑行业的 BIM, 可以按照 IFC 的数据模型格式应用到 Rhinoceros、Revit 等具体的 CAD 软件<sup>[16]</sup>。电力行业也参考 BIM 设计了属于自己的信息模型 GIM<sup>[17]</sup>。而船舶行业一直在围绕着 DM 层面进行转换, 即具体软件进行开发, 例如直接在 TRIBON、Napa 和鹰图之间进行数据交换。2005 年, 陈海斌提出, 在 TRIBON 和 CADDS 之间交换船体造型数据的方法<sup>[18]</sup>。2009 年, 何胜强提出, 在 TRIBON 和 Catia、CADDS 之间交换船体造型数据的方法<sup>[19]</sup>。二次开发慢慢从单一软件转向软件间交互。2012 年, 一种中立的数据格式的概念被明确提出, 作为连接 Catia 和 TRIBON 的桥梁, 使得 Catia 模型数据可以导入 TRIBON 进行建模分析<sup>[20]</sup>。这种方法, 开发了一种类似于文本文件的简单数据格式, 可以实现数据的软件间交互。

从而可以脱离某一个特定的软件，不再非 TRIBON 或 Catia 不可。但是，DM 在不同的 CAD 软件中格式差别大，实现转换的过程中容易出错，且脱离了具体的软件，便没有了操作生态。因此，有必要提出船舶信息模型 Ship Information Model (SIM)，从船舶设计来说，IM 模型可以根据所选用的 CAD 平台自动转化为 CAD 数据模型。在不同的软件之间进行交换时，不同的 CAD 平台可以参照相同的标准，即信息模型定义标准，可以转化为符合自己要求的 CAD 数据模型。如图 1-2 所示，SIM 的提出可以参照建筑行业的 BIM 和电力行业的 GIM。

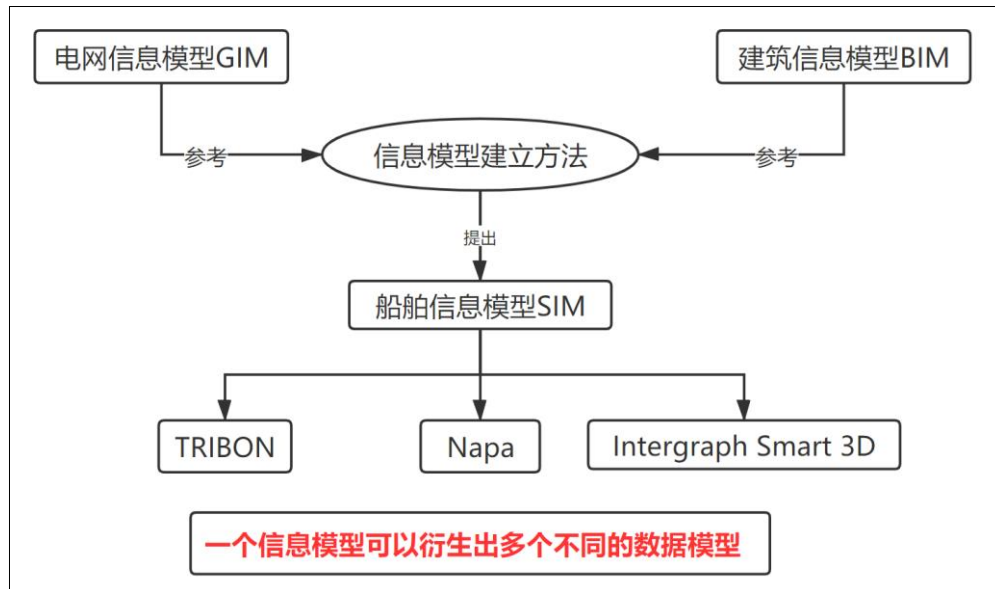


图 1-2 船舶信息模型标准空白

### 1.3 多方协同设计的困难

高技术客船的设计规模巨大、专业多、分包单位多，因此必须有设计协同工具的支持。建造大型客船是一项极为庞大且复杂的系统性工程，一艘大型客船由约 2500 万个零件组成，是波音飞机的 10 倍，是复兴号高铁的 13 倍，光是设计图纸和资料，就有 15 万页，差不多 2.1 吨重，涉及的核心供应商就有几百家，全部供应商更是有几千家，堪称比建造航母还要复杂。大型客船的建造极其复杂，且对建造质量要求很高，虽然单个零部件不难生产，但把它们集成组装在一起，却是极其复杂的过程。预计 2023 年将正式交付运营的国产大型高技术客船差不多有 70 个公共区域，每一个区域又有数量繁多的系统，需要完全配合才能保证正常。简单地说，就像在玩一个 2500 万块的超大积木，怎么梳理复杂的逻辑关系，一块不多一块不少又严丝合缝，是最大的难点。高技术客船涉及排放控制技术、船体线型设计技术、结构优化技术、减阻降耗技术、高效推进技术、能源回收利用技术、可再生能源利用技术、自动化技术、计算机技术、网络通信技术、物联网技术等，多专业协同工作才可以实现船舶制造、航线规划、船舶驾驶、航行姿态调整、设备监控、装卸管理、生产运营等。

客船的建造过程由多家分包单位共同完成，供应商更是几千家。但是，目前的船舶设计软件并没有针对高技术客船提供专门的设计协同 (Collaboration) 工具。我国的船舶企业虽然有能力制造各项零部件，但却不了解给船厂供货需要符合什么标准，申请什么证书。而且大型客船在投入使用后会停靠国外的多个港口，这就必须满足其他国家的标准和要求，而我们在这些方面尚无任何建造经验。如图 1-3 所示，将不同的分包商统筹组织，最简单的办法是使用同一个设计软件，按照统一的标准进行设计和建造。但这是不现实的，鹰图的使用费

加上设计图纸高达 3000 万，这就导致只有少数大型国企可以使用，小分包商根本承担不了如此高额的费用。这也就意味着，船厂和中小企业的合作基础无法实现，那么为保证客船按时正常建造，只能将不同软件的设计模型进行集成。因此，不同的行业或不同的分包商，有着不同的设计软件、不同的规范标准、不同的工作流程，实现产品设计数据的交换非常困难。实现设计协同的一个重要支撑是互操作性（Interoperability）。互操作性需要采用相同的建模标准，也就是统一的信息模型格式。

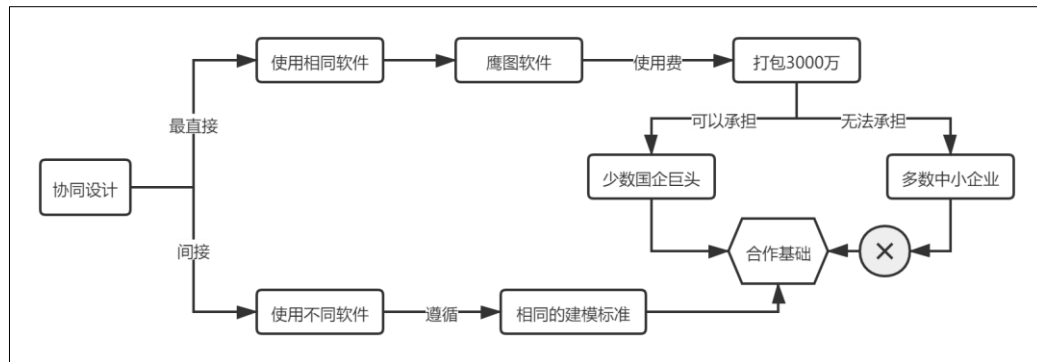


图 1-3 协同设计困难

## 1.4 本章小结

本章介绍了我国高技术客船三维建模碰到的三个难题，船舶设计软件的交互困难、信息模型标准的缺失和多方协同设计的困难，涉及到四个重要概念，分别是互操作性、信息模型、本体论和无代码化编程，如图 1-4 所示。

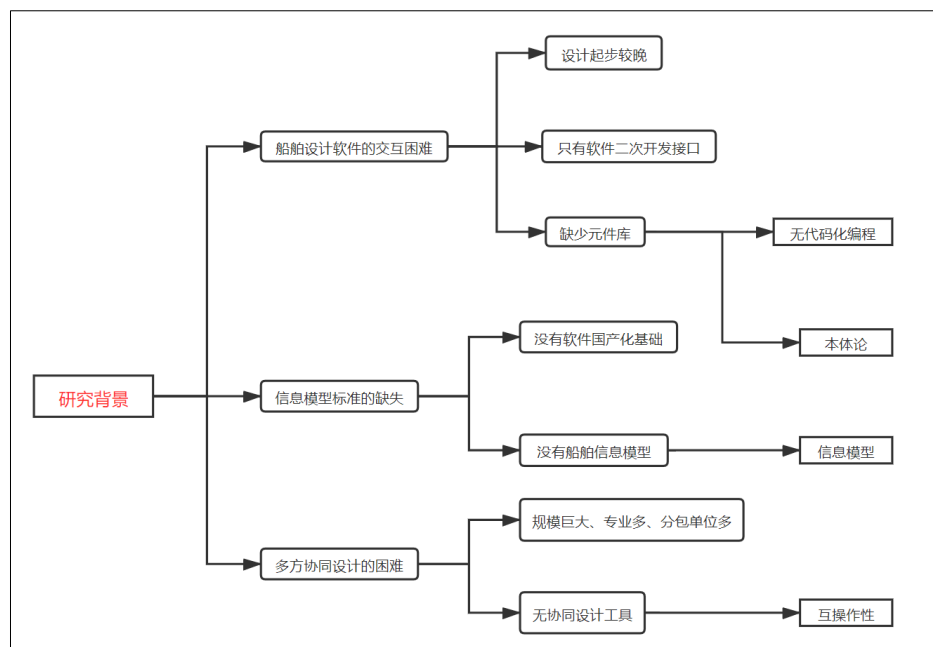


图 1-4 研究背景总结

## 第二章 文献综述

### 2.1 互操作性

电气与电子工程师协会 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 对互操作性 (Interoperability) 是这样定义的: “两个或多个系统或组成部分之间交换信息以及对所已经交换的信息加以使用的能力”。互操作性应用非常广泛。Mahda Noura 等介绍了物联网的互操作性, 即提高不同供应商的多个物联网平台协同工作的能力, 最终实现不同物联网供应商之间的无缝资源共享<sup>[21]</sup>。T. Hardjono 等提出一个可互操作区块链系统的设计理念, 使用互联网体系结构的设计理念作为确定关键设计原则的基础, 强调互操作性是区块链系统生存性和可管理性的一个关键需求, 使得区块链体系结构的公共组件可以开始标准化, 从而降低开发成本, 实现更高层次的互操作性<sup>[22]</sup>。M. Lehne 等认为大多数医疗数据缺乏互操作性, 数据存储孤立的数据库、不兼容的系统和专有软件中, 难以交换、分析和解释。互操作性可以促进人工智能和大数据、医疗通信、研究和国际合作领域的数字转换, 以改善全世界患者的健康和福祉<sup>[23]</sup>。Marina Muller 等认为从设计到施工, 从运维到拆除, BIM 所支持的生命周期中的高效互操作性允许更好的整体管理, 并帮助用户提高项目的可持续性。这种互操作性不仅考虑数据, 还应该考虑工作流程和指南等, 避免信息丢失, 提高可持续性<sup>[24]</sup>。互操作性分为语法互操作性和语义互操作性。M. Jelokhani-Niaraki 等提出多准则决策分析 Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) 工具和 GIS 的集成可以通过互操作性实现, 这些工具可以交换相关信息以解决特定问题。通过提供一个可互操作的框架, 在 GIS 和 MCDA 服务之间交换具有明确含义的环境数据, 为环境决策做出了重大贡献, 可以将环境决策支持系统的范式从应用于特定程序转变为语义互操作框架<sup>[25]</sup>。

就软件而言, 互操作性是用来描述不同的程序借助于同一套交换格式来交换数据, 读写相同文件格式以及采用相同协议的能力。Huahui Lai 等认为异构软件之间的一对一交互已经导致了大量的数据接口、不同的数据格式和低效的协作。随着 BIM 在建筑项目中的普及, 基于行业基础类 IFC 的数据交换可以在异构 BIM 软件之间进行。然而, 互操作性问题经常发生在使用 IFC 进行双向数据交换的过程中。互操作性问题产生的根本原因是由于领域知识的差异, 软件工具很难较好地解释其他领域对象, 而且软件工具有不同的方法来表示相同的几何、性质和关系, 从而导致模型数据不一致<sup>[26]</sup>。Priss Uta 提出了 FcaStone 软件的 FCA 文件格式转换和互操作性, 讨论了 FCA 的互操作性问题, 即在将 FCA 工具连接到其他工具时遇到的困难, 号召 FCA 社区开发某种标准的 FCA 交换格式, 它可以用于独立应用程序之间的数据交换, 也可以用于网络端数据交换<sup>[27]</sup>。互操作性在软件的应用就是提出一种数据交换标准, 不同的软件可以使用相同的标准进而解析成符合自己平台的数据格式。目前, 船舶建模软件多种多样, 当不同软件之间交换数据时, 必须设计数据接口。总之, 软件使用和集成的互操作性前提就是基于行业的统一标准。目前, 还没有针对船舶设计软件的统一标准, 这也是本文要提出和完成的一个内容。

### 2.2 信息模型

信息模型 Information Model (IM), 是一种用来定义信息常规表示方式的方法。通过 IM,



可以使用不同的应用程序对所管理的数据进行复用,变更和分享。信息模型不仅对实体进行建模,而且还描述了实体间的相关性。信息模型目前比较典型的是建筑信息模型 BIM, BIM 是“美国 Autodesk 公司在 2002 年提出的,已经在全球范围内得到业界的广泛认可,它可以帮助实现建筑信息的集成,从建筑的设计、施工、运行直至建筑全寿命周期的终结,各种信息始终整合于一个三维模型信息数据库中,设计团队、施工单位、设施运营部门和业主等各方人员可以基于 BIM 进行协同工作,有效提高工作效率、节省资源、降低成本、以实现可持续发展”。我国的对 BIM 应用非常广泛。牛博生提出可以将 BIM 技术引入到项目进度管理中来提高进度管理效率<sup>[28]</sup>。张健平提出可以将 BIM 技术和 4D 技术进行融合,实现建筑施工的优化及动态管理<sup>[29]</sup>。建筑信息模型的成功说明了信息模型在领域里的必要性。结合 BIM 的建立方法,国家电网提出了电网信息模型 GIM (Grid Information Model)。2013 年,盛等提出了电网信息模型 GIM 概念,并建立了以 GIM 为基础的智能电网信息模型共享平台<sup>[30]</sup>。GIM 与 BIM 有相同之处,都“集成每个元素全寿命周期内的信息,实现信息的高效、准确、全面的应用”。GIM 是一个比较成熟的电力行业信息模型,在此之前,还有主要针对能量管理系统对象提出的公共信息模型 CIM (Common Information Model)<sup>[31]</sup>。总之,国际上影响力较大的就是 BIM,而国内电网参考 BIM,依托地理信息系统 GIS,提出了 GIM。建筑业和电力业都是大型行业,提出信息模型对全寿命周期的管理有质的提升。而船舶行业,最复杂的莫过于高技术客船,兼顾机械、建筑和电力等诸多行业,因此更有必要提出船舶信息模型 SIM (Ship Information Model),弥补船舶领域信息模型标准的空白是本文的一个重点。

## 2.3 本体论

本体论 Ontology 是哲学术语,来源于希腊语,涵盖了早期哲学家对世界本原的追问<sup>[32]</sup>。本体论的核心在于是否存在,早期哲学家努力追寻着世界在本质上存在什么东西这一问题的答案,以及这个世界上存在哪些实体。随着近代科技革命的发展,本体论不光包含实实在在的物质,还包括意识、价值和规律等。本体论是概念化作为知识形式化表达的基础,是所关心领域中的对象、概念和其他实体,以及它们之间的关系<sup>[33]</sup>。由此,本体论可以表示为一个五元组,即词汇,概念,词汇到概念的映射,概念之间的关系和根节点概念<sup>[34]</sup>。简言之,“本体是已经存在的,本体是面向领域的概念化的描述,它是多个代理之间的概念及其关系的描述,被用于不同代理之间的知识共享、集成及重用”。G Arango 等提出领域建模的重要性,当数据量越来越大,软件变得越来越复杂日益,必须面对程序维护和重用性的问题<sup>[35]</sup>。J McCarth 提出哲学概念本体论和人工智能的逻辑理论构建活动之间存在重叠,也就是说构建逻辑理论的活动相当于构建一个本体来描述世界<sup>[36]</sup>。J F Sowa 等认为人们的常识就是从某个世界所获取的信息,因此要构建某个可能世界的本体,这个本体包含了世界的所有事物、以及它们之间的联系和相互影响的方式<sup>[37]</sup>。本体论更多应用于计算机领域,万捷认为基于关键字的搜索,往往会忽略其本身所含的语义内容,可以利用本体论的概念规范和语义丰富的特点,将检索要求扩充成语义集<sup>[38]</sup>。张凡提出了将本体论应用于基站建设工程进度管理研究,提出了从原系统数据库表结构出发构建初始本体的方法,该方法仍需大量的历史数据来不断扩充知识库,从而提升推理的准确性<sup>[39]</sup>。本体论还可以用来评估决策,例如应用于无人驾驶车辆的行为决策、处理道路交通应急预案等<sup>[40]</sup>。

## 2.4 无代码化编程

无代码化编程,就是一种创建应用的方法,它可以让设计人员使用最少的编码知识,甚

至不需要任何计算机编码能力,就可以快速开发应用程序。应用无代码化编程的思想最典型的是 LabVIEW 软件和 Matlab 软件的 Simulink 模块。LabVIEW 软件是基于图形化编程语言, LabVIEW 利用可视化技术建立人机界面,模块的界面生成和模块背后源代码的运算几乎可以做到同时进行,提供了大量的仪器面板中的控制对象,每个对象背后都有其复杂实现过程,但是普通业务人员可以跳过编码,注重控制对象之间的逻辑联系即可<sup>[41]</sup>。Simulink 和 LabVIEW 类似,都是一个基于模块的流程图环境,用于自动控制领域的仿真以及设计模型。Simulink 支持系统的整体设计、局部或整体优化仿真、单个模块图或组合模块的自动代码生成。Simulink 也提供了图形化的编辑界面、支持脚本的自定义模块库,初始模块库已经相当丰富,能够进行复杂系统的快速建模和仿真。无代码化编程从理论上来说,可以应用于各行各业,但是开发过程却很复杂。软件开发人员需要有一定的 CAD 基础,又需要较强的计算机编码能力。CAD 领域的无代码化编程目前做到商业化的以 Rhinoceros 的 Grasshopper 为典型。CAD 领域的低代码或无代码最重要的是参数化建模。2001 年,王峰等提出,参数化建模除了可以生成单个三维模型外,还可以为多个模型添加装配关系、生成二维图纸等<sup>[42]</sup>。2007 年,严婷提出,在通用的 CAD 系统中,普遍缺乏标准元件库,对于具有相同或相似形态的元件,可以提取出公共参数,实现元件的标准化和通用化。而且应该细化参数化建模,定义从基本的点、线、面通过拉伸、旋转等到实体的详细步骤<sup>[43]</sup>。2013 年,周玲提出,参数化建模不光可以应用于简单的装配体,还可以应用于复杂的城市三维场景建模<sup>[44]</sup>。严婷和周玲希望重复的建模过程可以被计算机语言替代,从而减少重复的人工劳动,而且改图时,只需要调整模型参数,极为便利。

## 2.5 本章小结

本章对互操作性、信息模型、本体论和无代码化编程的相关内容进行了文献综述,确定了本文的主要研究内容,如图 2-1 所示。

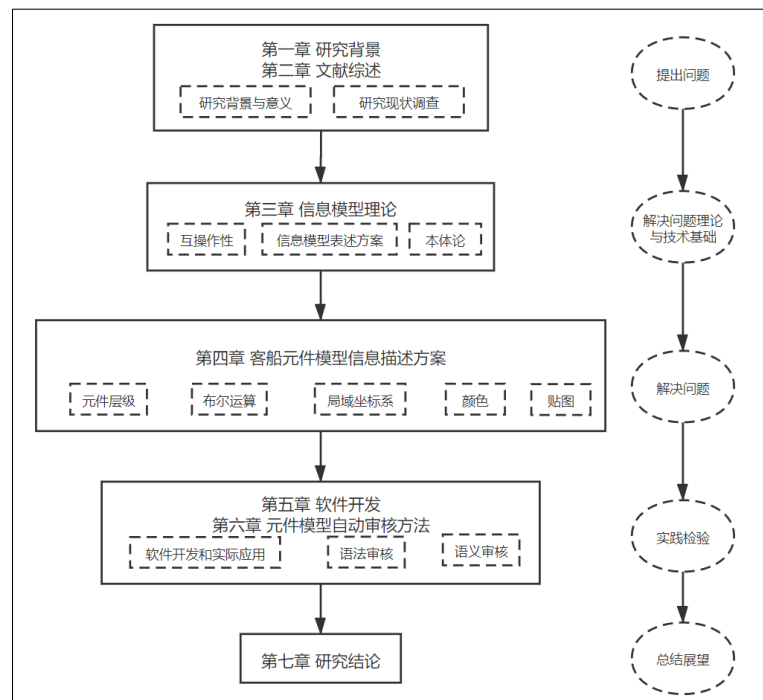


图 2-1 论文框架

## 第三章 信息模型理论

### 3.1 相关理论

本文相关理论如图 3-1 所示。互操作性 Interoperability 的第 3 级语义，提供通用的底层模型和数据编码，包括使用来自公共可用价值集和编码词汇表的标准化定义的数据元素，为用户提供共享的理解和意义。信息模型 Information Model 包含了语义互操作性 Semantic Interoperability。本体论 Ontology 是建立信息模型的基础理论。

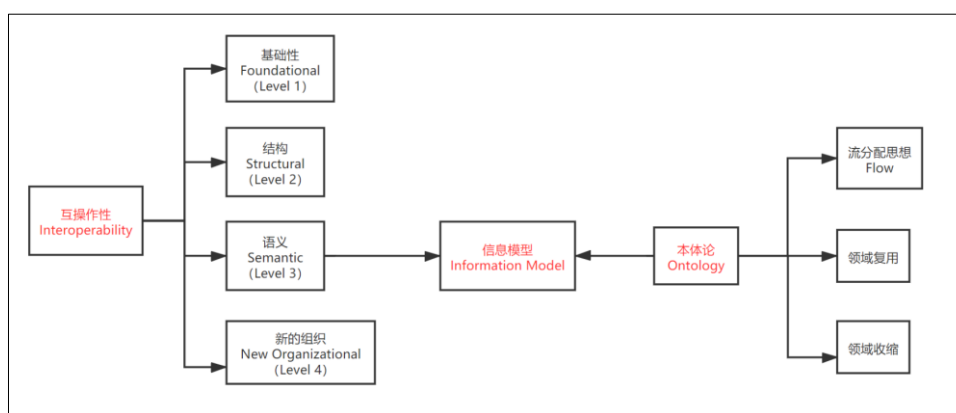


图 3-1 相关理论

### 3.2 互操作性

互操作性 Interoperability，根据医疗卫生信息与管理信息系统协会 Healthcare Information and Management Systems Society（HIMSS）的定义，互操作性是一种评判指标，用来评价不同的信息系统、不同的设备、不同的应用程序之间，访问、交换、集成和协作使用数据的能力。在组织内部和跨组织、区域和国家之间，能够提供及时无偏差的信息。要实现互操作性，存在很多障碍，例如不同的信息系统之间缺乏实施和集成的标准化、从竞争到利益共同体的转变。个体一般希望制定的标准尽可能符合自己能够触及和使用的系统，互操作性可以使多个个体组成的简单巨系统超越组织限制。互操作性分为 4 个级别，分别是基础性 Foundational、结构 Structural、语义 Semantic 和新组织 New Organizational。第一级别，基础互操作性，是为了解决不同系统和应用程序之间的双向连接问题，建立一个系统或者一个应用程序所需的互连需求，以安全地将数据传输到另一个系统或应用程序，并从另一个系统或应用程序接收数据。第二级别，结构互操作性，是为了定义统一的数据交换格式和数据传输协议。对于特定的数据交换格式，必须统一数据语法，对所有涉及的关键字进行完备解释。第三级别，语义互操作性，是为了提供通用的底层模型和数据编码，包括使用来自公共可用价值集和编码词汇表的标准化定义的数据元素，为用户提供共享的理解和意义。第四级别，新组织互操作性，不再仅仅考虑数据传输和共享，还要考虑数据安全性、是否合乎社会法律和道德要求、数据用途等，促进组织内部和组织之间的数据安全、数据公开和稳定的数据传输和共享。实现互操作性最终是为了充分利用信息和数据，为系统或应用程序运行提供保障和服务。

本文基于语义互操作性层级进行应用。首先，高技术客船的总设计方，例如中船，和分包商，例如机械类供应商、管道类供应商、建筑类供应商等，之间可以交换图形信息和非图形信息。此外，总设计方要确保分包商能够轻松地通过云端方式获取已有的建模信息，云端方式包括消息队列遥测传输（MQTT）、COAP 等通信协议。总设计方可以选择性地添加密钥，限制云端数据库的开放程度，例如存在较大竞争的分包商之间专有信息应酌情封闭。高技术远洋客船的三维建模软件在不断更新和发展，产生了越来越多的 CAD 平台和专有数据格式，总设计方应该集成已有 CAD 平台和数据格式来提供最佳的设计建模方式，中小企业往往难以承担高额的船舶专用设计软件使用费。大多数分包商都有许多不同的 CAD 建模平台，例如机械领域的 SolidWorks、管道领域的天正、建筑领域的 Revit 等。这些平台无法从一个系统向另一个系统提供对等数据，因为数据格式需要转换，而转换时标准难以统一，往往会丢失信息。例如从 Rhinoceros 的 \*.3dm 到 Revit 的 \*.ifc 是比较简单的，已有现成的商业化转换工具，但是新生的 IFC 文件无法处理复杂曲面，输出结果往往是一系列三角面近似。最典型的是，从 AutoCAD 的 \*.dwg 格式转换为 Intergraph Smart 3D 的 \*.sat 格式，尚无成熟工具。从非开源到非开源的转换远比开源格式之间的转换要难得多，与其反复研究数据接口转换，不如直接越过数据模型 Data Model 层级，对将要设计的新模型采用更高级的信息模型 Information Model。此时，分包商需要考虑两个问题，其一是历史数据到信息模型的转换，是选择二次重构或设计解析工具中转；其二是未来数据到信息模型的对应。

客船巨系统的信息交换对于提高建模效率和建模质量至关重要。互操作性在医药和建筑领域已经被广泛推广，只有各子系统能够协调统一，才可以有效控制工期、控制成本、把握质量、调控物资分配等。日本和韩国建造高技术远洋客船的失败案例，足以惊醒客船制造业，客船船体的三维建模只是决定成败的一方面，生活区域的内部装饰设计和提供高档奢侈品的供货商和服务商直接决定客船评级，另外供应链的连续性决定了施工进度和搁置停工成本。所有参与客船建造的分包商应该遵循一份统一的标准，不同的建模软件的具体数据格式可以抽象出相同的信息模型，从而改善总设计方和分包商之间的信息流动。但是，船舶领域的竞争远比建筑领域和电力领域激烈，总设计方之间的信息共享因利益分配和市场竞争问题而难以实现，简言之，高技术远洋客船信息模型会产生行业壁垒和轻微垄断，大体量的信息模型究竟会作为一种商品还是一种行业通用标准，取决于政策引导和调控。针对客船建造而言，分包商可以从多个总设计方的集成平台收集历史建模信息和调整反馈要求，并尽可能将全部信息合并到一个应用程序或软件中。分包商应该及时更新数据库系统，上传信息模型文件，以确保数据的共享。除此之外，客船的运营方应将实践经验在系统中及时反馈，例如元件尺寸调整、船舶电力系统布线调整、元件规范等等，以便分包商调整信息模型文件。互操作性对于数据格式转换的处理如图 3-2 所示。

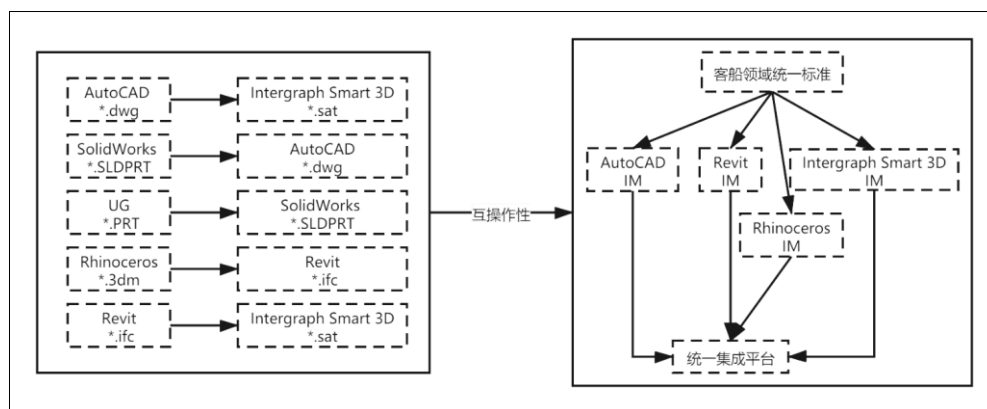


图 3-2 互操作性处理数据格式



### 3.3 信息模型表述方案

信息模型Information Model (IM) 总是和数据模型Data Model (DM) 相伴相生。信息模型是为了描述实体、属性、实体和属性的关系。数据模型，是信息模型的特殊化，也就是说同一个信息模型的数据模型随CAD平台变化而变化。例如，IM基于Intergraph Smart 3D的\*.sat SDK转换后的DM才可以被直接使用；基于Rhinceros的\*.3dm SDK转换后的DM才可以被直接使用；基于Industry Foundation Class的\*.ifc API转换后的DM才可以被直接使用等。数据模型会从记录拉伸旋转等建模过程、点线面形成过程等方面增大信息量。计算机图形学常用于构造实体的方法有Constructive Solid Geometry (CSG建模) 和Boundary Representation (BREP建模) 两大类。CSG建模就是将一个实体进行树状结构分解，一个复杂实体（根节点）可以被表示为多个简单实体（子节点）的聚合或布尔运算结果，例如长方体、球体、圆柱体、圆台体、圆环体等。BREP建模就是将一个实体进行曲面分解，一个复杂实体（曲面集合）可以被表示为多个曲面的无间隙聚合后形成的封闭空间，例如三角面、矩形面、六边形面、样条曲线面。CSG建模法可以准确记录简单实体的参数特征以及布尔运算过程，表示简洁，处理方便，可以与参数化建模有效结合。而且复杂实体携带的数据量较小，修改比较容易，而且转化为BREP建模。但是树状结构分解的最小体素为简单实体，无法直接获取简单实体的点线面信息，而且存在模糊处理，即边界条件过于复杂时，只能使用相近的简单实体进行替代，因此对体素种类要求较高。当涉及较多布尔运算时，对于边界条件的计算会加大结果显示时间。BREP建模法存储了较多的点线面信息，模型拟合精度更高，面可以无限分隔和逼近。但是BREP建模法以面成体，省略复杂实体的生成过程，无基本体的概念，无法提供关于实体生成的具体过程信息（记录建模过程），也无法记录组成复杂实体的基本元素的全部原始数据。此建模法不适用于参数化建模。计算机图形学构造属性以及实体和属性的方法较为统一，以键值对的形式进行添加和储存。本文建立船舶信息模型SIM，SIM分为两个部分，分别是图形信息和非图形信息。图形部分的实体生成方法选择CSG建模法，充分考虑了参数化建模，以充分记录复杂实体的生成过程。图形信息包括元件、零件、基本图元、布尔运算、局域坐标系、颜色和贴图等，非图形信息包括技术参数、材料信息、厂家信息和施工工艺等属性信息。具体阐述见第四章的客船元件模型信息描述方案。SIM基本思想如图3-3所示。

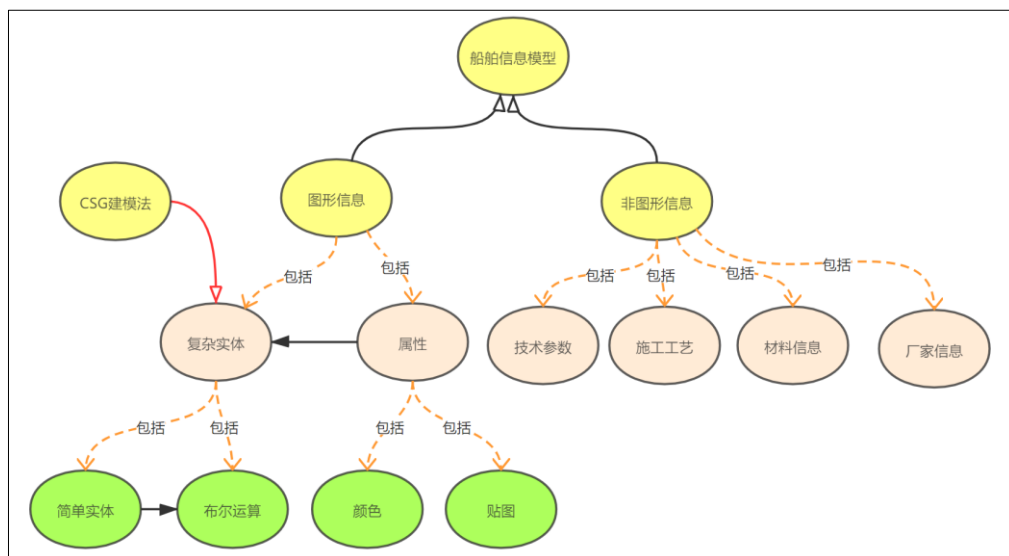


图 3-3 基于 CSG 建模法的船舶信息模型

### 3.4 本体论

#### 3.4.1 流分配

以客船管系工程为例，包括流体（水、气）、信号（流速、流量、纯度、温度、压强等）、信息（传感器、测压机、温度计、电流计、继电器、加热器等）三个专业工程，从本体论的角度分析，它们都属于配送系统，系统中配送的介质是流体，因此可以按照以下标准中进行分类。SIM 配送系统 SimDistributionSystem，把整个管系领域理解为以流体作为流通介质 Flow 的配送系统 SimDistributionSystem。如图 3-4 所示，其继承于 SimSystem，通过 SimRelServiceSpaces 关联 1 个或者多个空间结构，比如液体配送 SimLiquid 或者气体配送 SimGas。而 SimSystem 则继承于 SimGroup，每个 Group 可以包含多个子 Group，这种包含关系可以很好的将整个系统的组织关系描述的非常清楚。管系领域作为配送系统，应当理解为关联 SimLiquid 或者 SimSubLiquid 的一个系统。

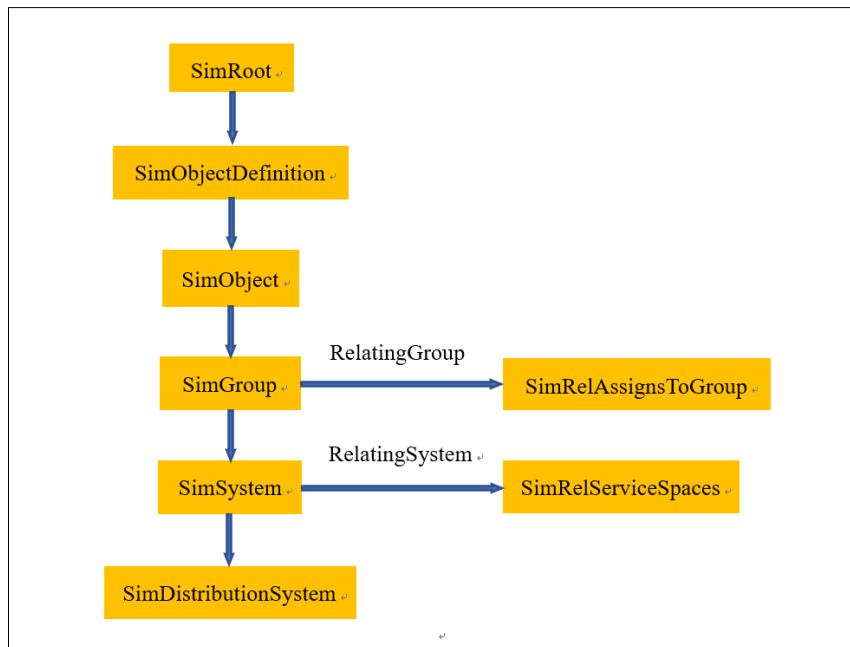


图 3-4 SimDistributionSystem 继承关系图

SIM 配送系统元素 SimDistributionElement，SimDistributionElement 作为 SIM 配送系统 SimDistributionSystem 中的元素，如图 3-5 所示，其被分为两大类，分别为流元素 SimDistributionFlowElement 与控制元素 SimDistributionControlElement。流元素按照功能分类，包含：SimDistributionChamberElement 表示可以被穿越和检查的构件，比如透气管、通风筒、人孔等；SimEnergyConversionDevice 表示能量转换设备，比如发电机，加热器，引擎，太阳能等；SimFlowController 表示流控制设备，比如阻尼器，开关，阀门，继电器等；SimFlowFitting 表示用于连接或者改变流转向的设备，比如弯头，三通管等；SimFlowMovingDevice 表示用于改变流速或用于流循环与运输的设备，比如压缩机，水泵，风扇等；SimFlowSegment 表示配送系统中的某部分流段。比如水管段，天然气管段、导管等；SimFlowStorageDevice 表示储能设备，比如天然气罐、电源，电容等；SimFlowTerminal 表示流终端设备，比如客舱和餐厅储水装置、水龙头、消防水池等；SimFlowTreatmentDevice 表示流处理设备，去除流中不符合要求或多余的部分。比如饮用水过滤器、生活污水处理器、

海水淡化处理器等。以上只是通过功能的分类派生的流元素 SimDistributionFlowElement 的子类，每个子类还可以派生更低层级的设备子类。在客船中的具体对应如表 3-1 所示。

表 3-1 流元素按照功能分类

概念（类）	举例
SimDistributionChamberElement	客船舱室横向可穿孔舱壁
SimFlowStorageDevice	封闭式蓄水池
SimEnergyConversionDevice	加热器、冷凝器
SimFlowTreatmentDevice	吸入滤网、粗水滤器
SimFlowSegment	客船舱室之间饮用水管、卫生水管
SimFlowMovingDevice	水泵
SimFlowController	阀门
SimFlowFitting	弯头
SimFlowTerminal	水龙头

配送控制构件类 SimDistributionControlElement 包含各类控制器，包括：SimActuator 表示驱动装置，用于提供动力，将电能、波浪能等能量转化为某种动力；SimController 表示控制装置；SimAlarm 表示警报装置，用于系统发生异常及时给出警示信号；SimUnitaryControlElement 表示单一控制装置，例如恒温装置、恒湿装置等；SimFlowInstrument 表示流测量装置，用于读取或显示配送过程中流或流段之间的测量值的设备，例如压力计，温度计，速度计等；SimSensor 表示流体参数传感器，用于测量流体的密度、流体的粘度、牛顿流体及非牛顿流体、绝热指数及等熵指数、可压缩流体的压缩系数、流速比（马蒲数）、雷诺数等。在客船中的具体对应如表 3-2 所示。以上是 SIM 对客船管系工程的元件分类，客船其他领域应与此类似，基于流进行填充和拓展。

表 3-2 控制元素按照功能分类

概念（类）	举例
SimActuator	电动机
SimController	水闸
SimAlarm	漏水警报器
SimUnitaryControlElement	加热器
SimFlowInstrument	温度计
SimSensor	密度传感器

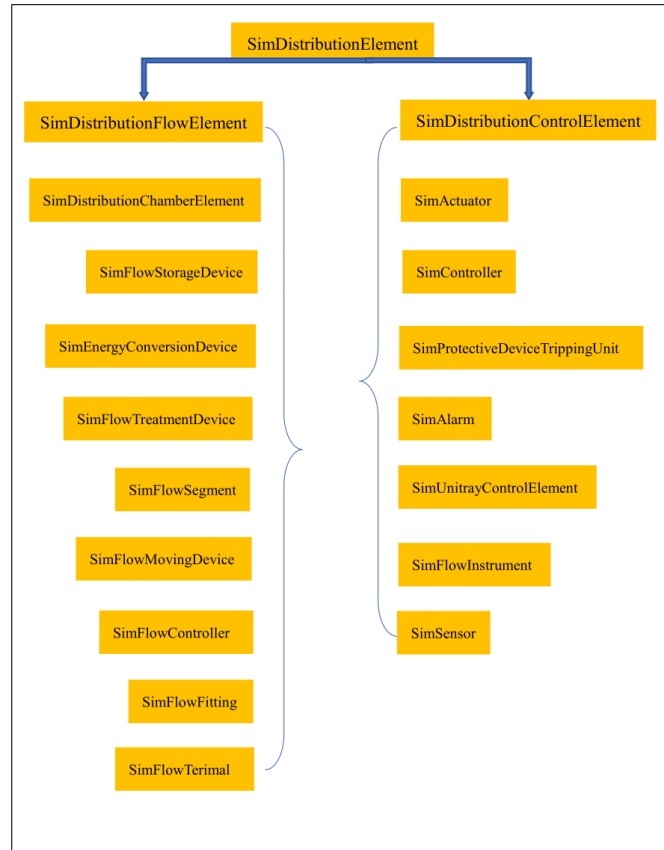


图 3-5 SimDistributionElement 子类

### 3.4.2 本体复用

从本体论的角度来看，SIM 是基于船舶，尤其是客船领域的，用于描述客船要素，要素之间关系以及要素组合后所实现功能的一个知识库模型。根据客船设计的专业特点，其专业要素主要集中的领域为实体模型领域，考虑构建本体论知识模型中的一个本体重用的原则<sup>[45]</sup>，因此，建议在不创建新的领域的情况下，尽可能的去拓展和复用。SIM 提倡尽可能复用，但复用并非只针对元件，还包括基本图元、零件以及零件的组合物。以客船管系为例，图 3-6 中总共存在 319 个零件，而零件的组合物却只有 5 种，分别对应图中五种颜色。通过对 5 个组合体的复用，同样可以达到 319 个零件零散摆放的效果，这就是本体论的领域复用。SIM 定义模型时，既包括实模型，也包括虚模型，总会首先遍历 CAD 空间已有模型，存在相同几何形态的模型会被多次引用。当然，除模型外，SIM 还声明了属性的复用。无论是属性还是模型，其唯一性来源于自身的通用唯一识别码 UUID 或者全局唯一变量 GUID。

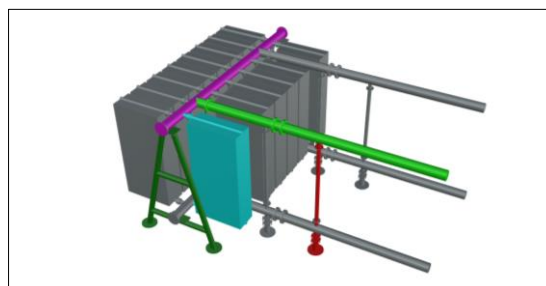




图3-6 本体论领域复用

### 3.4.3 领域收缩

除领域复用外，本文还进行了领域收缩。SIM 标准中所有的元件只能派生于二维截面 Cross Section，二维截面通过拉伸 Extrude 和旋转 Revolve 产生元件，当元件无法通过拉伸和旋转产生时，便选用三角面模型 Face Set。表 3-3 中枚举了 10 种常见的二维截面名称及其图示。当然，二维截面还可任意生成，利用直线和弧线进行组合。

表3-3 二维截面

序号	二维截面名称	二维截面图示
1	三角形 Triangulated	
2	菱形 ArbitraryClosed	
3	梯形 ArbitraryClosed	
4	矩形 Rectangle	
5	圆形 Circle	
6	环形 CircleHollow	
7	C 形 CShape	
8	H 形 HShape	
9	L 形 LShape	
10	T 形 TShape	

## 3.5 本章小结

本章介绍了信息模型基本理论，包括互操作性、信息模型表述方案和本体论。

## 第四章 客船元件模型信息描述方案

### 4.1 元件层级关系

#### 4.1.1 文件组织结构

CAD 装配树对应\*.spart 压缩文件，\*.spart 压缩文件包含 prj 文件夹、part 文件夹、geo 文件夹；prj 文件夹包含\*.prj 文件和\*.att 文件，part 文件夹包含\*.part 文件和\*.att 文件；geo 文件夹包含\*.geo 文件和\*.att 文件。\*.prj 文件只能引用\*.part 文件和\*.att 文件；\*.part 文件可以引用\*.part 文件、\*.geo 文件和\*.att 文件；\*.geo 文件可以引用\*.geo 文件和\*.att 文件。文件组织结构如图 4-1 所示。

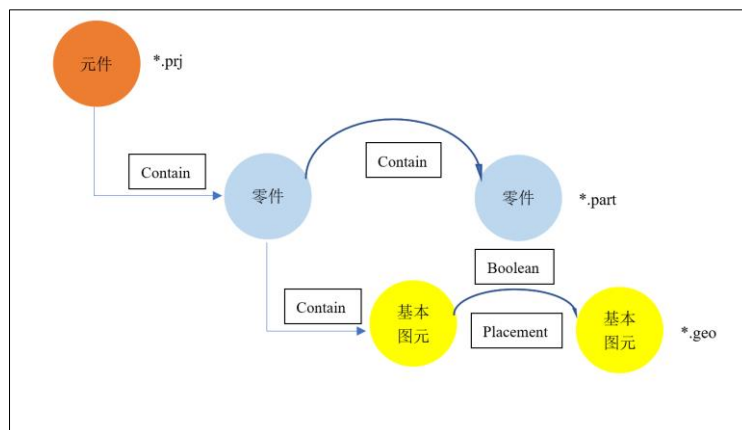


图 4-1 文件组织结构

#### 4.1.2 元件

元件Project，又称元件簇。例如，流控制设备SimFlowController之一，阀门元件簇包括球阀，针型阀，闸阀和蝶阀等。流终端设备SimFlowTerminal之一，水龙头元件簇包括单联式、双联式和三联式等。元件项目文件数据格式为\*.prj，\*.prj不能同级引用，数据格式定义如表4-1所示。

表4-1 \*.prj数据格式

字段	规定
A=B	A 为键，B 为值
attribute=xxxxxxxx-xxxx-xxxx-xxxx-xxxxxxxxxxxxx.att	引用属性文件
part=xxxxxxxx-xxxx-xxxx-xxxx-xxxxxxxxxxxxx*.part	引用零件文件
matrix=x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x	三维变换矩阵
attribute=0d5b2b96-373b-4a3d-affc-e21489e64b15.att	
part=e9d8112e-9f3f-4756-8616-dc1b710189ac.part	
matrix= 1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1	

#### 4.1.3 零件

零件Part。例如，流循环设备SimFlowMovingDevice之一，水泵元件簇之一，叶片泵包含转子、定子、叶片和配油盘。流控制设备SimFlowController之一，阀门元件簇之一，闸阀包含阀体、阀盖、阀座、启闭件、驱动机构、密封件和紧固件等。零件项目文件数据格式为\*.part，\*.part可以同级引用，数据格式定义如表4-2所示。

表4-2 \*.part数据格式

字段	规定
A=B	A 为键，B 为值
attribute=xxxxxxxx-xxxx-xxxx-xxxx-xxxxxxxxxxxxx.att	引用属性文件
part=xxxxxxxx-xxxx-xxxx-xxxx-xxxxxxxxxxxxx*.part	引用零件文件
geometry=xxxxxxxx-xxxx-xxxx-xxxx-xxxxxxxxxxxxx*.geo	引用基本图元文件
matrix=x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x	三维变换矩阵
attribute=2e0c8db6-3a21-42c6-9321-046e2b2daf21.att	
part=037598d9-f61f-492c-b589-70d3dcfabd9b.part	
matrix= 1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1	
geometry=0beb9eb8-ad92-405a-b6bb-45b566d33a63.geo	
matrix= 1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,100,0,0,1	

#### 4.1.4 基本图元

基本图元Geometry，又称图元。每个图元由一组参数（≤16）描述。图元分为简单图元和复杂图元。简单图元包括长方体、球体、圆柱体、圆台体、圆环体、椭圆环体、矩形环体、椭球体、四棱台体、偏心圆台体、偏心四棱台体、倒角方形垫片、圆形垫片、台形垫片等，简单图元枚举如表4-3所示。

表4-3 简单图元

中文名称	英文名称	参数
长方体	Box	L, W, H
球体	Sphere	R
圆柱体	Cylinder	R, H
圆台体	TruncatedCone	TR, LR, H
圆环体	Ring	R, DR
椭圆环体	EllipticRing	DR, L, W
矩形环体	RectangularRing	DR, R, L, W
椭球体	Ellipsoid	LR, WR
四棱台体	Table	TL1, TL2, LL1, LL2, H
偏心圆台体	EccentricTruncatedCone	TR, LR, H, XOFF, YOFF
偏心四棱台体	OffsetRectangularTable	UL, UW, LL, LW, H, XOFF, YOFF
倒角方形垫片	SquareGasket	L1, W1, L2, W2, H, Rad, ChamferType
圆形垫片	CircularGasket	OR, IR, H, Rad
台形垫片	TableGasket	TR, OR, IR, H, Rad

复杂图元包括 C 型钢、T 型钢、L 型钢、双 C 型钢、方形钢管、矩形钢管、圆形钢管、平钢、等边双角钢、不等边双角钢、端子板、斜切圆柱体等，复杂图元枚举如表 4-4 所示。



表4-4 复杂图元

中文名称	英文名称	参数
C型钢	BeamChannel	b, h, d, t, T
T型钢	TSteel	B, h, t1, t2, T
L型钢	LSteel	b, h, T, t, TT
双C型钢	DoubleChannelSteel	h, b, d, d1, T
方形钢管	SquareSteelTube	b, t, R, T
矩形钢管	RectangularSteelTube	b1, b2, t, T
圆形钢管	RoundSteelTube	D, d, T
平钢	FlatSteel	X, Y, Z
等边双角钢	equilateralDoubleAngleSteel	b, r, r1, b1, T
不等边双角钢	UnequalAngleSteel	b1, b2, b3, b4, b5
端子板	TerminalBlock	W, T, CL, L, R, BL, CN, RN, CS, RS, Phase
斜切圆柱体	ObliqueCylinder	R, H, Angle1, Angle2
导线	Wire	StartCoord, EndCoord, StartVector, EndVector, Sag, D

基本图元文件数据格式为\*.geo, \*.geo 可以同级引用, 数据格式定义如表 4-5 所示。最低级别\*.geo 文件采用 XML 描述。正则表达式是一种文本模式, 包括普通字符和特殊字符。特殊字符, 又称元字符, 是具有特殊语义的字符, 包括“^\$. \*+?=!:|\/()[]{} ”。这些字符不是按照字符的直接量进行匹配, 如果要匹配这些具有特殊含义的字符直接量, 需要在这些字符前面加反斜杠(\)转义, 例如我想匹配一个\$直接量, 需要写成\$, 否则就是匹配一个结尾位置。普通字符是除特殊字符之外的所有字符, 包括所有大写[A-Z]和小写字母[a-z]、所有数字[0-9]和一些其他符号。

表4-5 \*.geo数据格式

字段	规定
A=B	A 为键, B 为值
attribute=xxxxxxxx-xxxx-xxxx-xxxx-xxxxxxxxxxxxx.att	引用属性文件
geometry=xxxxxxxx-xxxx-xxxx-xxxx-xxxxxxxxxxxxx*.geo	引用基本图元文件
matrix=x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x	引用变换矩阵
<pre> &lt; Entity ID="1" Visible="True"&gt;   &lt;Sphere R="20" /&gt;   &lt;TransformationMatrix3D Value="1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1" /&gt;   &lt;RGB R="128" G="128" B="128" /&gt; &lt;/ Entity &gt; &lt; Entity ID="2" Visible="True"&gt;   &lt;Box L="400" W="400" H="600" /&gt;   &lt;TransformationMatrix3D Value="1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,800,0,0,1" /&gt;   &lt;RGB R="0" G="255" B="255" /&gt; &lt;/ Entity &gt; </pre>	



### 4.1.5 属性

属性 Attribute，包括技术参数、材料信息、厂家信息和施工工艺等。属性文件数据格式为\*.att，\*.att 只能被\*.prj、\*.part、\*.geo 文件引用，数据格式定义如表 4-6 所示。

表 4-6 闸阀\*.att 数据格式

字段	规定
A=B	A 为键，B 为值
名称	不锈钢法兰闸阀-Z41W/H
驱动方式	电动
结构形式	弹性楔式单闸板
设计规范	GB/T 12234
结构长度	GB/T 12221
连接法兰	JB/T 79
试验与检验	JB/T 9092
压力-温度	GB/T 9131
产品标识	GB/T 12220

## 4.2 布尔运算

布尔运算 Boolean，包括两个基本图元、一个基本图元和一个布尔运算结果、两个布尔运算结果之间的交集 Common、并集 Fuse、补集 Cut。

## 4.3 局域坐标系

局域坐标系的实现依赖齐次坐标变换矩阵，又称三维变换矩阵 Transformation Matrix 3D，如表 4-7 所示，允许使用的矩阵包括恒等变换、平移变换、反射变换和旋转变换，不允许使用比例变换、错切变换和投影变换。在装配树对应的\*.spart 压缩包中，所有的三维变换矩阵都需要转换为左螺旋结构化矩阵。在\*.prj、\*.part、和非最低级别\*.geo 中引用格式为“matrix=x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x”，在最低级别\*.geo 文件，即 XML 文件中引用格式为“<TransformationMatrix3D Value="x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x,x" />”。

表4-7 三维变换矩阵表

变换名称	变换意义	三维变换矩阵	左螺旋结构化矩阵
恒等变换	$\begin{cases} x' = x \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1
平移变换	$\begin{cases} x' = x + m \\ y' = y + n \\ z' = z + h \end{cases}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ m & n & h & 1 \end{bmatrix}$	1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,m,n,h,1
YOZ反射变换	$\begin{cases} x' = -x \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	-1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1

续表4-7

变换名称	变换意义	三维变换矩阵	左螺旋结构化矩阵
XOZ反射变换	$\begin{cases} x' = x \\ y' = -y \\ z' = z \end{cases}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$1,0,0,0,0,-1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1$
XOY反射变换	$\begin{cases} x' = x \\ y' = y \\ z' = -z \end{cases}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,-1,0,0,0,0,1$
绕X轴旋转	$\begin{cases} x' = x \\ y' = y\cos\theta - z\sin\theta \\ z' = y\sin\theta + z\cos\theta \end{cases}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$1,0,0,0,0,\cos\theta,\sin\theta,0,0,-\sin\theta,\cos\theta,0,0,0,0,1$
绕Y轴旋转	$\begin{cases} x' = x\cos\theta + z\sin\theta \\ y' = y \\ z' = -x\sin\theta + z\cos\theta \end{cases}$	$\begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\cos\theta,0,-\sin\theta,0,0,1,0,0,\sin\theta,0,\cos\theta,0,0,0,0,1$
绕Z轴旋转	$\begin{cases} x' = x\cos\theta - y\sin\theta \\ y' = x\sin\theta + y\cos\theta \\ z' = z \end{cases}$	$\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\cos\theta,\sin\theta,0,0,-\sin\theta,\cos\theta,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1$




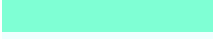
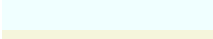
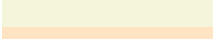









## 4.4 颜色

颜色RGB，R表示红色通道值，G表示绿色通道值，B标志蓝色通道值，满足：






















$$\begin{cases} integer\ 0 \leq R(Red) \leq 255 \\ integer\ 0 \leq G(Green) \leq 255 \\ integer\ 0 \leq B(Blue) \leq 255 \end{cases} \quad (4-1)$$

常用颜色RGB如表4-8所示。

表4-8 常用颜色对照表

颜色空间图示	颜色空间名称	RGB 十六进制	RGB 十进制
	aliceblue	#f0f8ff	240,248,255
	antiquewhite	#faebd7	250,235,215
	aqua	#00ffff	0,255,255
	aquamarine	#7fffd4	127,255,212
	azure	#f0ffff	240,255,255
	beige	#f5f5dc	245,245,220
	bisque	#ffe4c4	255,228,196
	black	#000000	0,0,0
	blanchedalmond	#ffebed	255,235,205
	blue	#0000ff	0,0,255
	blueviolet	#8a2be2	138,43,226
	brown	#a52a2a	165,42,42
	burlywood	#deb887	222,184,135
	cadetblue	#5f9ea0	95,158,160
	chartreuse	#7fff00	127,255,0

续表4-8

颜色空间图示	颜色空间名称	RGB 十六进制	RGB 十进制
	chocolate	#d2691e	210,105,30
	coral	#ff7f50	255,127,80
	cornflowerblue	#6495ed	100,149,237
	cornsilk	#fff8dc	255,248,220
	crimson	#dc143c	220,20,60
	cyan	#00ffff	0,255,255
	darkblue	#00008b	0,0,139
	darkcyan	#008b8b	0,139,139
	darkgoldenrod	#b8860b	184,134,11
	darkgray	#a9a9a9	169,169,169
	darkgreen	#006400	0,100,0
	darkkhaki	#bdb76b	189,183,107
	darkmagenta	#8b008b	139,0,139
	darkolivegreen	#556b2f	85,107,47
	darkorange	#ff8c00	255,140,0
	darkorchid	#9932cc	153,50,204
	darkred	#8b0000	139,0,0
	darksalmon	#e9967a	233,150,122
	darkseagreen	#8fbc8f	143,188,143
	darkslateblue	#483d8b	72,61,139
	darkslategray	#2f4f4f	47,79,79

## 4.5 贴图

贴图包括纹理贴图 Texture Mapping、凹凸贴图 Bump Mapping 和法线贴图 Normal Mapping。无论哪种贴图，在文件层级都表现为\*.jpg、\*.png、\*.bmp、\*.tiff 等等。贴图是一种视觉效果，实体表面的细节与所选取的光照方式密切相关。纹理贴图是在多边形三维骨架上附着一些平面贴图，这些平面贴图立体感直接决定了纹理贴图的实际效果。纹理贴图的真实感较差，例如无法生动形象地表现出元件或零件表面的凹凸起伏，即使是实际可以产生视差的平面贴图，在 CAD 三维空间中因摄像机的位置差异也会产生不同程度的失真。凹凸贴图在纹理贴图的基础之上进行改进，在平面或曲面首先映射一层纹理贴图，然后继续添加纹理，这两层纹理贴图包含的内容一致，但是在实体表面的附着位置相互错开，错开程度由 CAD 三维空间的光源位置决定。当光源或摄像机位置发生变化时，两层纹理贴图之间的错开程度（相对位置）也随之发生变化。凹凸贴图可以在场景中使用很少的多边形的情况下取得较好的效果，资源占有少<sup>[46]</sup>。凹凸贴图的存储方法基本上有两种，一种是高度图，一种是使用更广泛的法线贴图。凹凸贴图可以不需要纹理贴图的颜色值，可以只储存高度值，例如在去掉颜色后的灰度图中，颜色越亮的地方就越凸起。这也就是凹凸贴图的高度图。法线贴图在计算机图形学中使用极为广泛，它不需要储存任何高度值，只需要储存表面的实际法线，法线集合就是法线图。然后可以将含有法线的凹凸纹理和经过插值的光源向量在每个象素点结合起来<sup>[47]</sup>，将法向量的分量使用 RGB 三原色编码的方式进行记录<sup>[48]</sup>。如图 4-2 所示，左

侧的纹理贴图立体感较差，右侧的法线贴图有极强的立体感。

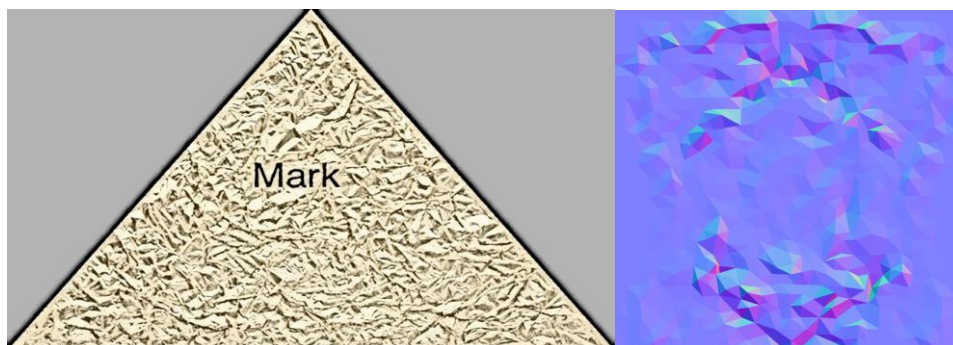


图 4-2 纹理贴图和法线贴图

## 4.6 元件模型信息建模 7 步法

首先确定基本图元的原始参数，即需要人工输入或数据库导入的数据；然后确定基本图元的派生参数，即由原始参数经过函数变换或复杂公式变换得到的参数，通常体现在基本图元之间的尺寸关联和位置关联；进而生成基本图元模型；接着根据元件层级关系确定装配树，即文件组织架构的具体实现；调整基本图元的位置，也就是利用局域坐标系进行平移和旋转等；然后对基本图元进行布尔运算，包括交集、并集和补集；最后确定非图形信息。

## 4.7 本章小结

本章定义了客船元件模型信息描述方案，提出了元件模型信息建模的通用 7 步法。

## 第五章 软件开发

### 5.1 软件功能

“复杂度同力一样不会消失，也不会凭空产生，它总是从一个物体转移到另一个物体或一种形式转为另一种形式”。软件实现了无代码化，打破了行业壁垒，复杂度从画图人员（业务部门）转移到开发人员（IT 部门），因此，画图人员只需要掌握 CAD 制图知识，不需要掌握编程语言。可以极大地提高元件建模速度，而且导出的信息模型文件可以实现跨软件、跨平台共享，避免了数据模型层级的直接转换。而且，软件实现了参数化装配，将物体之间的联动用一系列参数描述，制图改图极为方便。

### 5.2 基本图元

如图 5-1 所示，FlowCode 定义了 14 个简单图元模块。

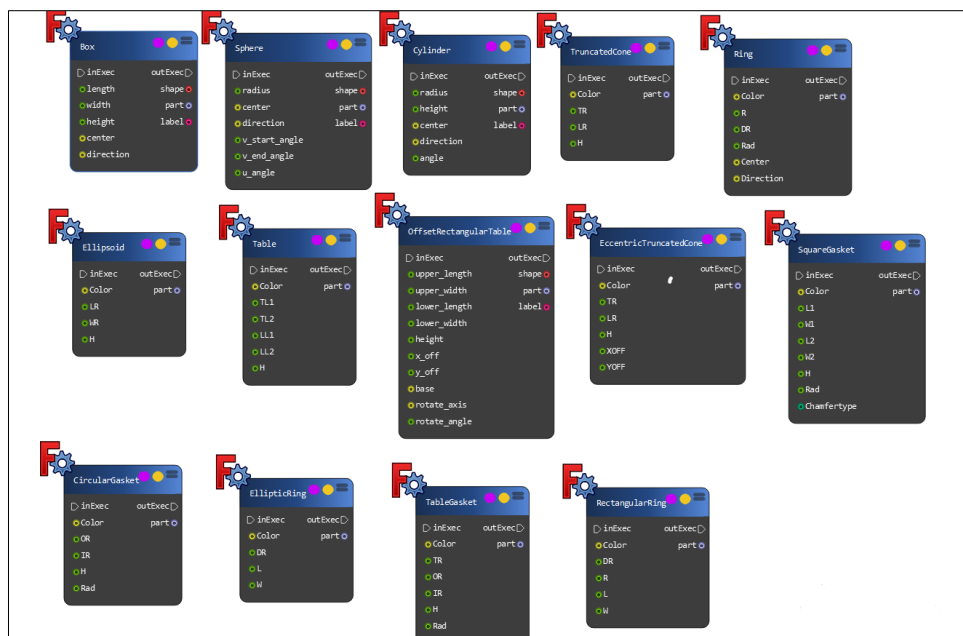


图5-1 简单图元模块

如图 5-2 所示，FlowCode 定义了 13 个复杂图元模块。



图5-2 复杂图元模块

### 5.3 布尔运算

如图 5-3 所示，FlowCode 定义了 1 个布尔运算模块。

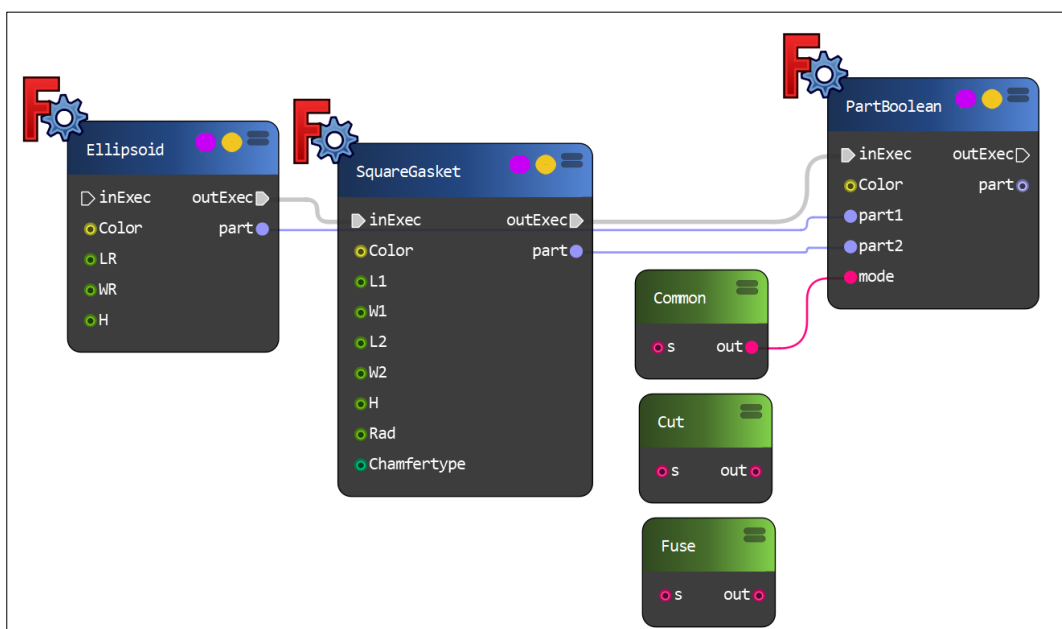


图5-3 布尔运算模块

### 5.4 原始参数

原始参数是需要在界面输入（输入框）或从外部导入（Graph Database Neo4j 数据库等）

的参数。如图 5-4 所示，FlowCode 定义了 8 个原始参数模块。原始参数类型包括整型 Int（-1, 0, 1 等）、字符型 String（".obj", "ChamferType"等）、浮点型 Float（-1.0, 0.0, 1.0 等）、布尔型 Bool（True, False）、实体型 Part（ID\_XXXXXXXX\_XXXX\_XXXX\_XXXX\_XXXXXXXXXXXX）、流程型 Exec（inExec, outExec）、向量型 Vector（FreeCAD.Vector(0,0,0), FreeCAD.Vector(10,10,10)等）、数组型 Array（[1,2,3,4,5], [100,200,300,400]等）。



图 5-4 原始参数模块

## 5.5 派生参数

派生参数是原始参数直接（从输出端子到输入端子的连线）或间接连接（从输出端子到数学运算模块到输入端子的连线）的参数。当数学运算是四则运算（add, subtract, multiply, divide）和基本初等函数运算（sin, cos, tan, arcsin, arccos, arctan, sqrt, power, exp, log10），如图 5-5 所示，FlowCode 定义了 14 个简单派生参数模块。





图5-5 简单派生参数模块

当数学运算是多参数或基本初等函数的多复合时，如图 5-6 所示，FlowCode 定义了 1 个复杂派生参数模块（表达式求值模块）。表达式求值模块名称是 Eval，输入端子包括字符型 Expression、浮点型 x、浮点型 y（浮点型端子可以根据需要动态增加、动态删除、动态改变端子名称、动态改变端子类型），输出端子包括浮点型 out，布尔型 result。表达式求值模块需要使用数据结构栈 Stack<sup>[49]</sup>。以加、减、乘、除、括号、乘方为例解析表达式求值模块实现过程。首先确定常规运算符优先级，括号>乘方>乘=除>加=减，然后将常规运算符和 Python 运算符对应。接着建立两个数据结构栈 Stack 来储存计算临时结果，一个是运算符栈 stackOfOperator，一个是 stackOfNumber，然后给表达式添加虚拟头节点和虚拟尾节点来简化边界情况判断<sup>[50]</sup>。当某个运算符优先级较低时，运算符栈保持压栈状态，当某个运算符优先级较高时，运算符栈保持出栈状态。

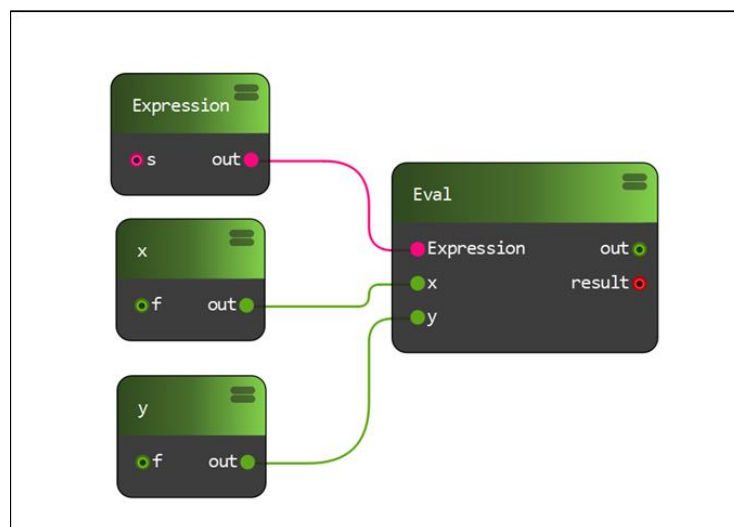


图5-6 表达式求值模块



## 5.6 基于参数化装配的局域坐标系生成

### 5.6.1 参数化装配概念

客船元件模型信息描述方案提出利用三维变换矩阵来描述局域坐标系。三维变换矩阵包含了 16 个数字，需要以逗号分隔，当画图人员在界面输入时，容易出错，一方面是输入格式错误，一方面是矩阵乘法计算结果错误。因此，FlowCode 引入了机械领域（SolidWorks、UG 等）的装配概念，使得画图人员只需要确定需要装配的零件 Part 和零件装配关系 Constraint，不需要画图人员进行矩阵乘法运算和手动输入局域坐标系。以 SolidWorks 为例，在设计三维装配体时，首先用户在软件界面选择需要装配的零件，然后点击软件界面按钮添加某种装配关系（点点重合、面面平行等）<sup>[51]</sup>。但是，机械领域的装配有两点需要改进：其一是零件三维建模过程和添加装配过程相互独立；其二是无法准确描述添加装配过程。FlowCode 提出参数化装配概念，可以实现边建模边装配，修改零件几何尺寸或空间位置不会破坏原有装配关系；可以准确描述添加装配过程，对需要装配的零件编号（Part1、Part2 等），对零件的点线面编号（Point1、Point2、……、Point8 等；Edge1、Edge2、……、Edge12 等；Plane1、Plane2、……、Plane6 等）。如图 5-7 所示，FlowCode 定义了 3 个点线面编号模块。

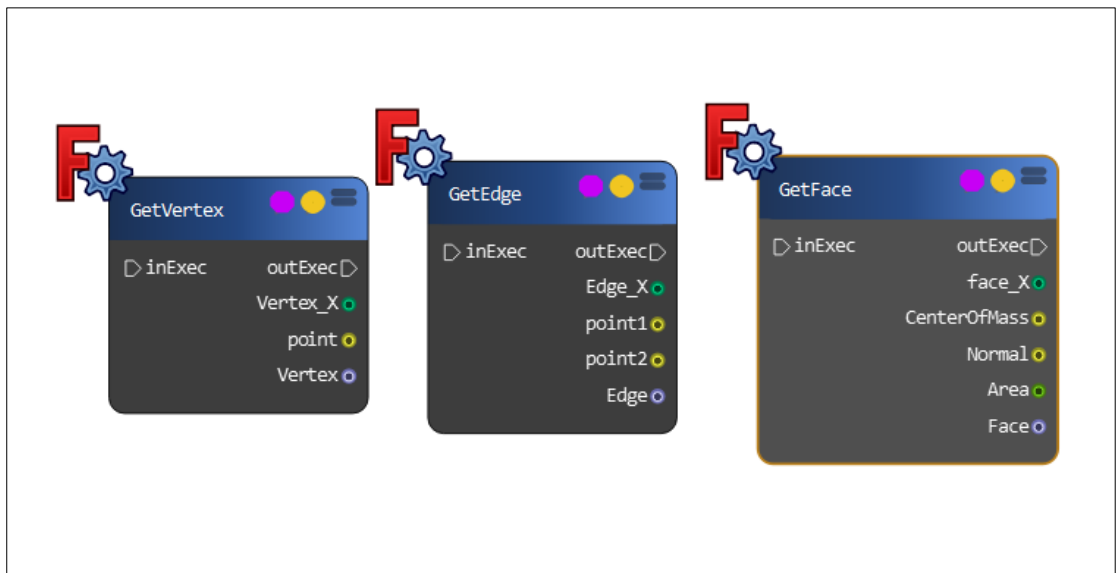


图 5-7 点线面编号模块

### 5.6.2 序贯二次规划简介

序贯二次规划 SQP（Sequential Quadratic Programming）是在某个近似解  $x^k$  处，将原非线性规划问题  $Q_1$  化为二次规划问题  $Q_2$ <sup>[52]</sup>。

$$Q_1 \quad \min \quad f(x) \quad (5-1)$$

$$\text{s.t.} \quad g_i(x) \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5-2)$$

$$h_j(x) \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, l) \quad (5-3)$$

$$Q_2 \quad \min \quad \nabla f(x)^T \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T Q^k \Delta x \quad (5-4)$$

$$\text{s.t.} \quad g_i(x^k) + \Delta x^T \nabla g_i(x^k) \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5-5)$$

$$h_j(x^k) + \Delta x^T \nabla h_j(x^k) \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, l) \quad (5-6)$$

$Q^k$  是拉格朗日函数在点  $x^k$  处的赫森矩阵  $\nabla_x^2 L$  的近似<sup>[53]</sup>。二次规划问题的目标函数和约束条件均为二次。求解二次规划问题得到最优解  $x^{k+1}$ ，作为原非线性规划问题的一个新近似解。如果  $x^{k+1}$  和  $x^k$  充分接近，即满足：

$$|x^{k+1} - x^k| = \sum_{i=1}^n (x_i^{k+1} - x_i^k)^2 \leq \varepsilon \quad (5-7)$$

则以  $x^{k+1}$  为最优解；否则，以  $x^{k+1}$  代替  $x^k$  构造新的二次规划问题继续进行迭代。

当约束条件全部为等式约束时，存在非线性规划问题  $Q_1$ 。

$$Q_1 \quad \min \quad f(x) \quad (5-8)$$

$$\text{s.t.} \quad h_j(x) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, l) \quad (5-9)$$

$Q_1$  存在最优解的条件为

$$\nabla f(x) - \lambda^k \nabla h(x) = 0 \quad (5-10)$$

$$h_j(x) = 0 \quad (5-11)$$

即

$$E_1 = \frac{\partial f(x)}{\partial x_1} - \sum_{j=1}^l \lambda_j \frac{\partial h_j(x)}{\partial x_1} = 0 \quad (5-12)$$

$$E_2 = \frac{\partial f(x)}{\partial x_2} - \sum_{j=1}^l \lambda_j \frac{\partial h_j(x)}{\partial x_2} = 0 \quad (5-13)$$

...

$$E_n = \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} - \sum_{j=1}^l \lambda_j \frac{\partial h_j(x)}{\partial x_n} = 0 \quad (5-14)$$

$$E_{n+1} = h_1(x) = 0 \quad (5-15)$$

$$E_{n+2} = h_2(x) = 0 \quad (5-16)$$

...

$$E_{n+l} = h_l(x) = 0 \quad (5-17)$$

此非线性方程组包含  $n+1$  个方程和  $n+1$  个变量，若存在解  $x^*$ ，则  $x^*$  必为原问题的最优解。将非线性规划问题化为二次规划问题  $Q_2$ 。

$$Q_2 \quad \min \quad \nabla f(x)^T \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T Q^k \Delta x$$

$$\text{s.t.} \quad h_i(x^k) + \Delta x^T \nabla h_i(x^k) \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, l)$$

其拉格朗日函数为：

$$L = \nabla f(x)^T \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T Q^k \Delta x - (\lambda^{k+1})^T (h(x^k) + \nabla h(x^k)^T \Delta x) \quad (5-18)$$

在 SQP 算法中，不直接取  $x$  作为新的近似点，而是以  $\Delta x$  作为搜索方向，通过一维搜索求步长  $\alpha$  来确定下一个迭代点，即

$$x^{k+1} = x^k + \alpha \Delta x \quad (5-19)$$

矩阵  $Q^k$  不直接取广义拉格朗日函数的二阶偏导数矩阵，通常取  $Q^0 = E$ ， $E$  为单位矩阵。

### 5.6.3 序贯二次规划应用

参考 SolidWorks 和 UG 软件提供的三维装配约束关系，FlowCode 定义了 12 种约束关系，即 12 个欠约束，如表 5-1 所示。欠约束的组合可能会产生达到预期装配效果的完全约束和破坏原有装配关系的过约束。过约束（无最优解）、完全约束（有且仅有一个最优解）和欠约束（有多个最优解），可以转化为运筹学非线性规划问题  $Q_1$  求解。如图 5-8 所示，FlowCode 定义了 12 个参数化装配模块。

表5-1 约束关系

约束名称	模块名称	约束类型
点点重合	PointPointCoincident	欠约束，仍可旋转
点在线上	PointOnEdge	欠约束，仍可平移可旋转
点在面上	PointOnPlane	欠约束，仍可平移可旋转
面面重合	PlanePlaneCoincident	欠约束，仍可平移可旋转
面面成角	PlanePlaneAngular	欠约束，仍可平移
面面平行	PlanePlaneParallel	欠约束，仍可平移可旋转
边边重合	EdgeEdgeCoincident	欠约束，仍可平移
边边平行	EdgeEdgeParallel	欠约束，仍可平移
边面成角	EdgePlaneAngular	欠约束，仍可平移可旋转
边面垂直	EdgePlaneVertical	欠约束，仍可平移可旋转
边面重合	EdgePlaneParallel	欠约束，仍可平移可旋转
中心重合	CenterCenterCoincident	欠约束，仍可旋转

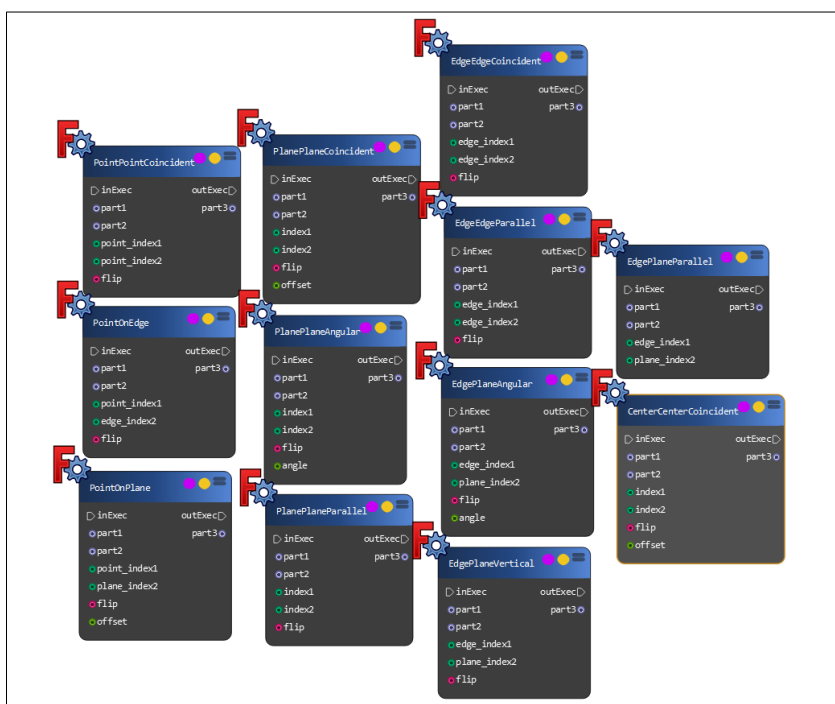


图 5-8 参数化装配模块

过约束、完全约束和欠约束可以转化为以一系列等式为约束条件的非线性规划问题  $Q_1$ 。以三个零件之间的面面平行 PlanePlaneParallel 为例，如图 5-9 所示，零件 3 (Part3) 的红色面 (Plane1) 需要和零件 1 (Part1) 的红色面 (Plane) 平行，零件 3 (Part3) 的绿色面 (Plane2) 需要和零件 2 (Part2) 的绿色面 (Plane) 平行。将此装配问题抽象为如下非线性规划问题  $Q_1$ 。以  $Part1\_Plane=[0, 1, 0]$ ,  $Part2\_Plane=[-1, 0, 0]$ ,  $Part3\_Plane1=[-\sqrt{2}/2, -\sqrt{2}/2, 0]$ ,  $Part3\_Plane2=[\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2, 0]$  为例，利用 SQP 得到最优解，即  $[x_0, x_1, x_2, x_3]=[0, 0, 1, 45]$ ，即零件 3 (Part3) 需要以原点为旋转中心，以 Z 轴为旋转轴，旋转 45 度。

$$\min \quad f(x) = x_3 \quad \text{最小旋转角度 (5-20)}$$

$$\text{s.t.} \quad |\cos(\angle Part3\_Plane1', Part1\_Plane)| = 1 \quad \text{法线平行 (5-21)}$$

$$|\cos(\angle Part3\_Plane2', Part2\_Plane)| = 1 \quad \text{法线平行 (5-22)}$$

$$x_0 * x_0 + x_1 * x_1 + x_2 * x_2 = 1$$

单位向量 (5-23)

$$-1 \leq x_0 \leq 1$$

X 方向分量 (5-24)

$$-1 \leq x_1 \leq 1$$

Y 方向分量 (5-25)

$$-1 \leq x_2 \leq 1$$

Z 方向分量 (5-26)

$$-180 \leq x_3 \leq 180$$

旋转角度 (5-27)

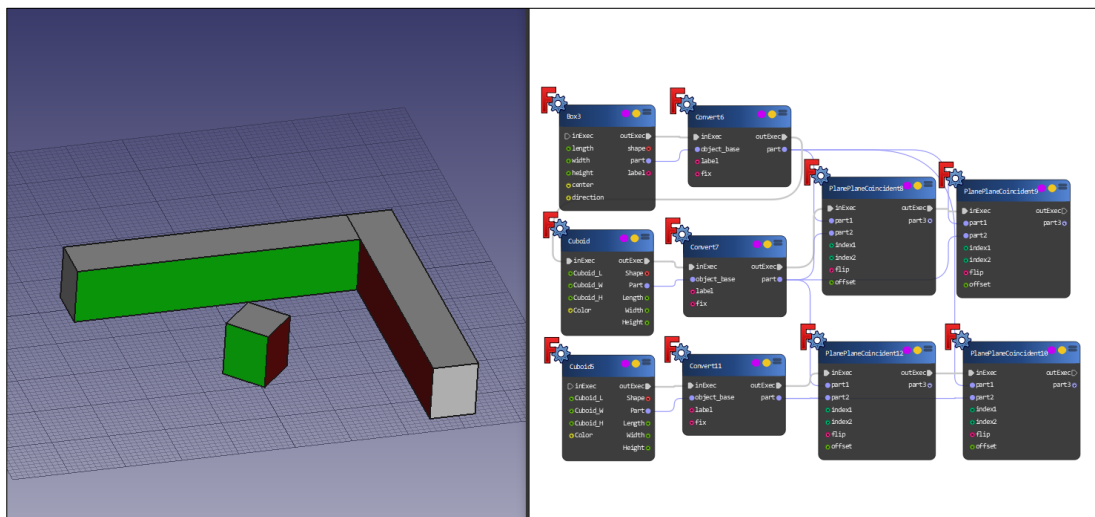


图 5-9 三个零件之间的面面平行

## 5.7 工程属性

如图 5-10 所示, FlowCode 定义了 1 个工程属性模块 (DynamicPinBaseArray 模块)。TXTParseToList 模块输入端子字符型 Path ("C:\FlowCode\2e0c8db6-3a21-42c6-9321-046e2b2daf21.att"), 需要输入属性文件\*.att 绝对路径; 输出端列表型 List 是一系列键值对字符串, 例如: ["品牌=台松", "型号=5IK60GN", "安装形式=安装形式", "颜色分类=减速电机", "齿面硬度=硬齿面", "布局形式=同轴式", "级数=其他"]。DynamicPinBaseArray 模块输入端子列表型 Data 继承自 TXTParseToList 模块, 输出端子根据 Data 自动生成品牌、型号等一系列字符型端子 (键为端子名称, 值为端子值)。

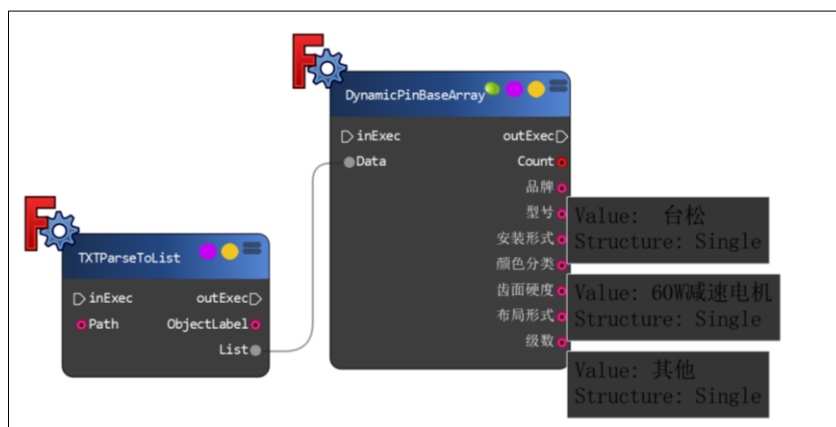


图 5-10 工程属性模块

## 5.8 实际案例

### 5.8.1 客船管系元件闸阀

如图 5-11 所示, FlowCode 使用了原始参数模块、简单派生参数模块、简单图元模块、平移模块、旋转模块, 完成了客船管系元件闸阀的三维建模。闸阀包括 15 个零件, 每个零件包括 1 个基本图元, 即 12 个圆柱体, 1 个圆台体, 1 个球体, 1 个圆环体。

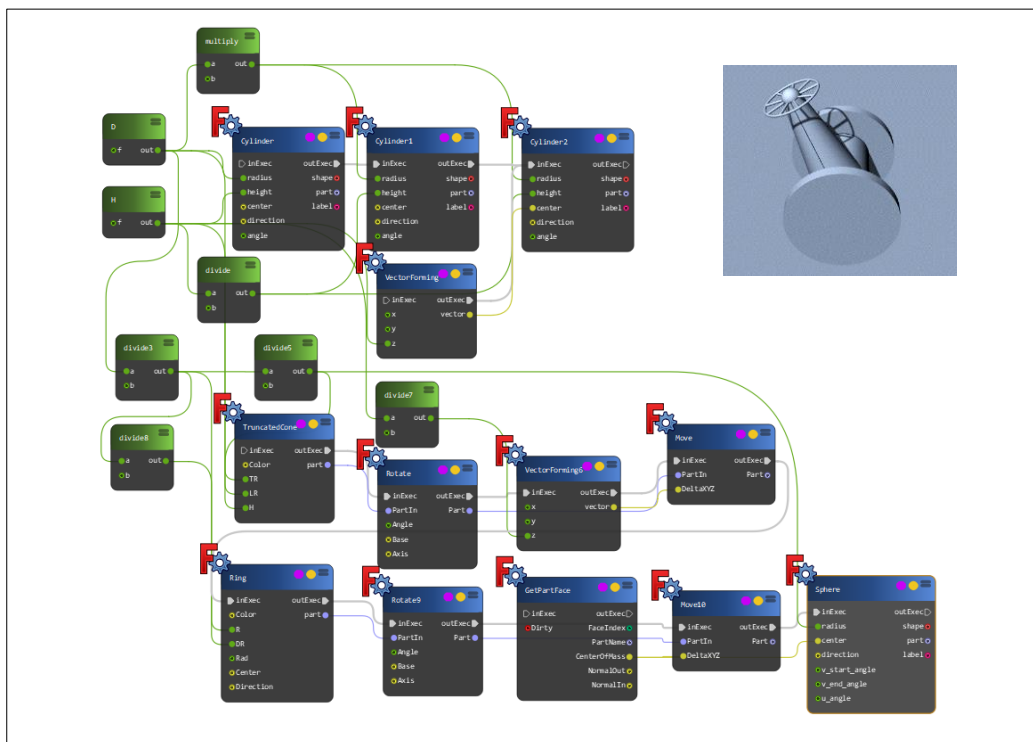


图 5-11 FlowCode 闸阀建模过程

### 5.8.2 客船电气元件变压器

如图 5-12 所示, FlowCode 软件使用了原始参数模块、简单派生参数模块、复杂派生参数模块、简单图元模块、复杂图元模块、平移模块、旋转模块、阵列模块、镜像模块、点线面编号模块、参数化装配模块、布尔运算模块和工程属性模块, 完成了客船电气元件变压器的三维建模。变压器包括 171 个零件, 总共 582 个基本图元。

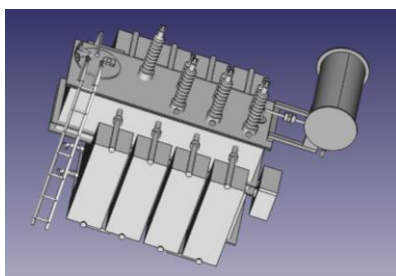


图 5-12 FlowCode 变压器建模过程

### 5.8.3 二维工程图

如图 5-13 所示，FlowCode 定义了 6 个投影模块（将三维模型图转为二维工程图）。包括：正视图 FrontView；左视图 LeftView；俯视图 TopView；正二轴测图 IsoView；任意视图 RandomView；正、左、俯、正二轴测组合图 CommonView。

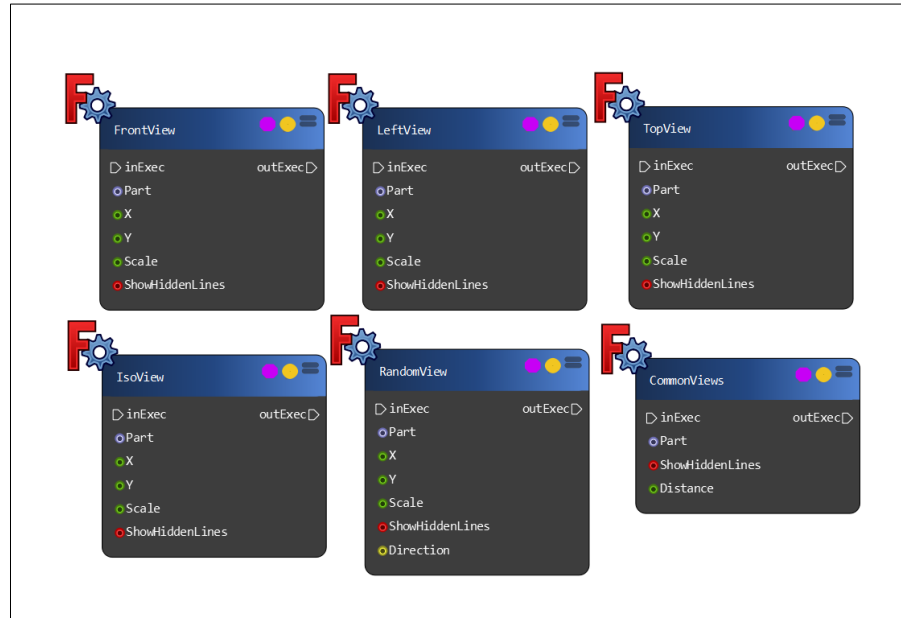


图 5-13 投影模块

如图 5-14 所示，FlowCode 软件使用了获取零件模块、投影模块，完成了元件三维模型图的自动出图。

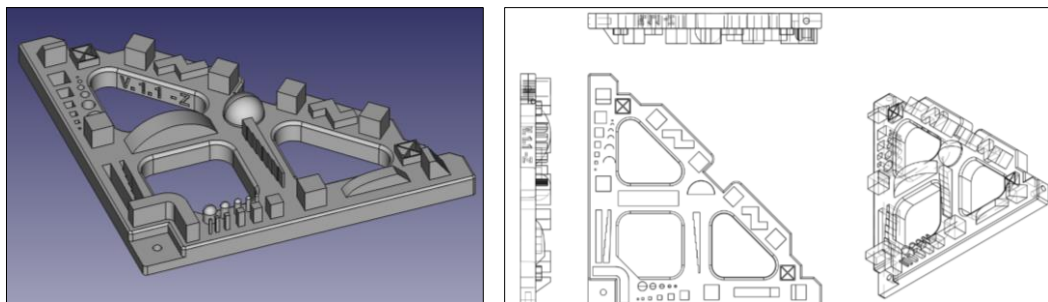


图 5-14 FlowCode 自动出图

## 5.9 本章小结

本章介绍了 FlowCode 软件的开发。



## 第六章 元件模型自动审核方法

### 6.1 完备性检查

#### 6.1.1 基于正则表达式的键值对审核

本文基于正则表达式 Regular Expression (Regex) 对\*.spart 压缩文件（不包括最低级别\*.geo 文件）进行完备性检查。正则表达式包括字符串的匹配、替换、分割和检验。将\*.prj 文件、\*.part 文件、非最低级别\*.geo 文件和\*.att 文件的每一行视为一个字符串（键值对），检验字符串是否符合规则。键值对审核流程示意图如图 6-1 所示。审核内容包括，元件项目文件\*.prj、被引用的零件文件\*.part、基本图元文件\*.geo、属性文件\*.att 文件名是否符合XXXXXXXX-XXXX-XXXX-XXXX-XXXXXXXXXXXX。被引用的零件文件\*.part、基本图元文件\*.geo、属性文件\*.att 是否存在。元件项目文件\*.prj 引用的属性文件\*.att 是否缺少关键项，例如文件名、时间、中国国家标准代号等。

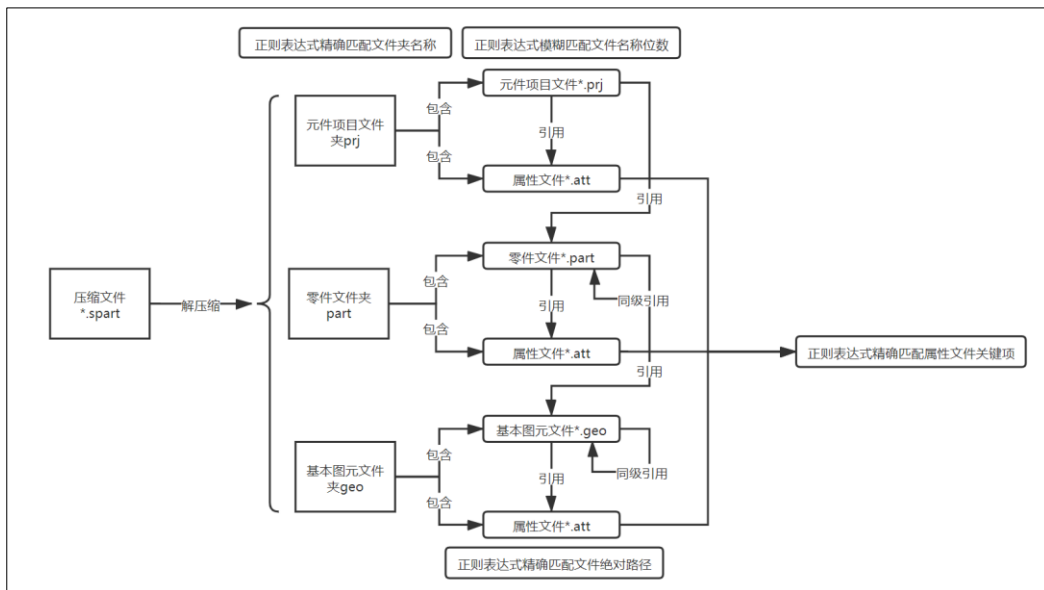


图 6-1 键值对审核流程

#### 6.1.2 基于文档对象模型的 XML 审核

本文基于文档对象模型 Document Object Model (DOM) 对最低级别\*.geo 文件（XML 文件）进行完备性检查。XML 审核流程示意图如图 6-2 所示。审核内容包括，基本图元参数是否缺少，例如长方体 Box 必须包含三个参数 L, W, H。布尔运算参数是否缺少，例如补集 Cut 必须包含三个参数 Type, Entity1, Entity2。三维变换矩阵参数是否缺少，当 Entity 节点表示布尔运算时，三维变换矩阵可以省略。颜色参数是否缺少，必须包含三个参数 R, G, B，当 Entity 节点表示布尔运算时，颜色可以省略。

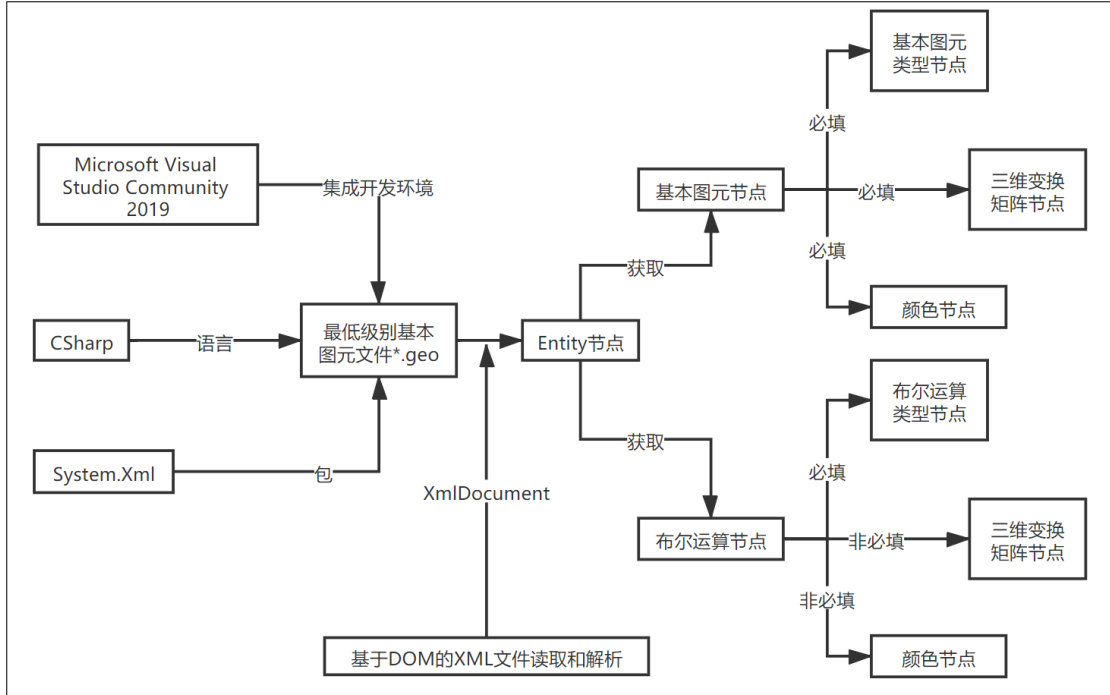


图 6-2 XML 审核流程

## 6.2 语法检查

### 6.2.1 基于正交矩阵的三维变换矩阵审核

本文基于正交矩阵对三维变换矩阵（TransformationMatrix3D 或 matrix）进行语法检查。 $A$  为  $n$  阶实矩阵， $A^T$  为  $A$  的转置矩阵， $E$  为  $n$  阶单位矩阵，如果满足  $A \cdot A^T = E$  或  $A^T \cdot A = E$ ，则称  $A$  称为正交矩阵。若  $A$  为正交矩阵，则满足以下条件： $A^T$  是正交矩阵； $A^T$  的各行是单位向量且两两正交； $A^T$  的各列是单位向量且两两正交。若  $A$ 、 $B$  均为正交矩阵，则  $AB$  同样为正交矩阵<sup>[54]</sup>。正交矩阵对向量  $X$  进行正交变换，不会改变向量  $X$  的范数 Norm 或欧拉长度 Euclidean Length；正交矩阵对向量  $X$ 、 $Y$  进行正交变换，不会改变向量  $X$ 、 $Y$  的内积<sup>[55]</sup>。

在元件项目文件\*.prj、零件文件\*.part、基本图元文件\*.geo 中，三维变换矩阵只能为恒等变换、平移变换、旋转变换、反射变换或上述变换的组合，不能为比例变换、错切变换、投影变换或包含上述变换的组合。本文之所以限定三维变换矩阵类型，是因为后三种变换会改变基本图元的二维截面类型。例如，使用比例变换，球体会变为椭球体，二维圆面会变为二维椭圆面。三维变换矩阵审核流程示意图如图 6-3 所示。

- 1) 对于恒等变换  $A$  及其转置矩阵  $A^T$ ，满足  $A \cdot A^T = E$ ，即恒等变换是正交矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A \cdot A^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-1)$$

- 2) 对于旋转变换  $A$  及其转置矩阵  $A^T$ ，满足  $A \cdot A^T = E$ ，即旋转变换是正交矩阵。



$$A(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A(y) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A(z) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

$$A(x)^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A(y)^T = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A(z)^T = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

$$A \cdot A^T = A(x) \cdot A(x)^T = A(y) \cdot A(y)^T = A(z) \cdot A(z)^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

3) 对于反射变换 A 及其转置矩阵  $A^T$ ，满足  $A \cdot A^T = E$ ，即反射变换是正交矩阵：

$$A(x) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A(y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

$$A(x)^T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A(y)^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A(z)^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-6)$$

$$A \cdot A^T = A(x) \cdot A(x)^T = A(y) \cdot A(y)^T = A(z) \cdot A(z)^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-7)$$

4) 对于平移变换 A，根据矩阵加法性质进行分解，得到恒等变换  $A_1$  和一般矩阵  $A_2$ ， $A_1$  是正交矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ a & b & c & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & b & c & 0 \end{bmatrix} \quad (6-8)$$

5) 对于复合变换 A，根据矩阵加法性质进行分解，得到一般矩阵  $A_1$  和一般矩阵  $A_2$ ，若  $A_1$  是正交矩阵，则复合变换 A 是恒等变换、旋转变换和反射变换的组合。



图 6-3 三维变换矩阵审核流程

### 6.2.2 基于数据类型的基本图元参数审核

本文基于数据类型对基本图元参数进行语法检查。如表 6-1 所示，以端子板 TerminalBlock 为例，当最低级别\*.geo 文件（XML 文件）子节点名称是 TerminalBlock 时，参数的取值范围和类型需要严格对应。

表 6-1 端子板基本图元参数

参数	名称	取值范围	类型	备注
L	长度	$L > 0$	浮点型	底面中心为原点 L 为 Z 轴方向 W 为 X 轴方向 T 为 Y 轴方向
W	宽度	$W > 0$	浮点型	
T	厚度	$T > 0$	浮点型	
CL	倒角边长	$CL > 0$	浮点型	
CS	孔列间距	$CS > 0$	浮点型	
RS	孔行间距	$RS > 0$	浮点型	
R	孔半径	$R > 0$	浮点型	
CN	开孔列数	$CN > 1$	整型	
RN	开孔行数	$RN > 1$	整型	
BL	孔行距底边距离	$BL > 0$	浮点型	

基本图元参数审核流程示意图如图 6-4 所示。需要预先将所有基本图元（简单图元和复杂图元）的参数表转换为一系列键值对字典 Dict，以参数为键，以名称、取值范围、类型组成的列表为值。

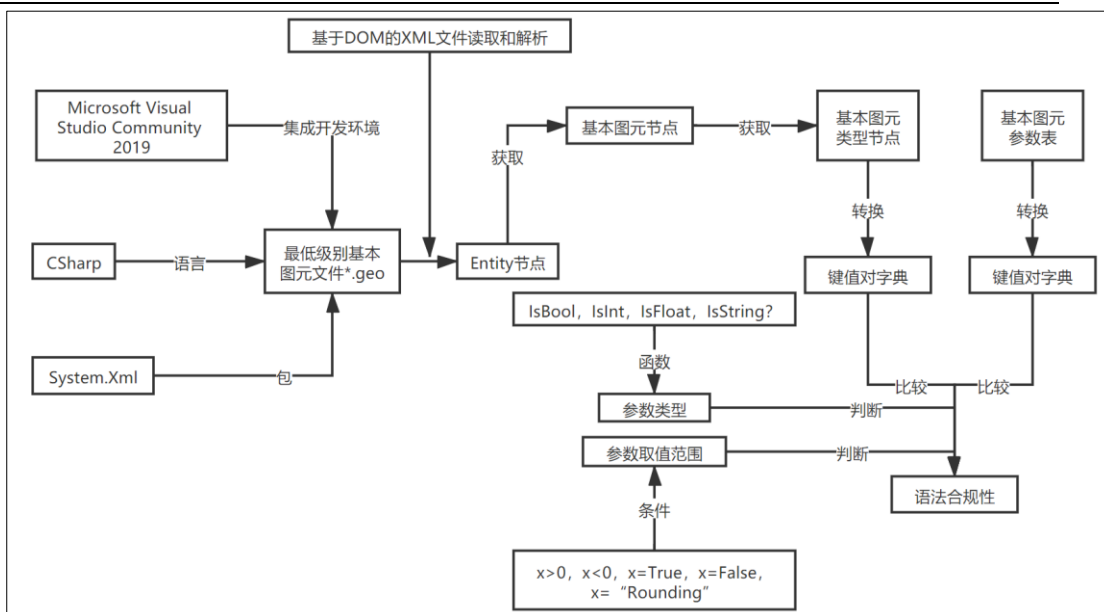


图 6-4 基本图元参数审核流程

### 6.3 本章小结

本章介绍了完备性审核和语法审核两个自动审核方法，完备性审核包括基于正则表达式的键值对审核和基于文档对象模型的 XML 审核，语法审核包括基于正交矩阵的三维变换矩阵审核和基于数据类型的基本图元参数审核。

## 第七章 研究结论

### 7.1 总结

高技术远洋客船存在协同设计困难，而协同设计的一个重要支撑是元件库的互操作性。本文提出了元件模型信息描述方案，也就是船舶信息模型 SIM，以解决跨软件、跨平台的数据格式交换问题。为了验证描述方案的可行性，本文开发了 FlowCode 信息模型构建软件并提出了元件模型自动审核方法。经船厂验证，船舶信息模型可以有效解决协同设计问题，加快建模速度，解决软件间信息交互问题。

### 7.2 展望

一般的自动审核方法包括完备性检查、语法检查和语义检查。本文完成了完备性检查和语法检查，没有完成语义检查。语义检查是按照以自然语言描述的客船领域行业规范对客船局部或整体进行检查。例如，检查“钢结构件的总重量是多少”、“应力集中区域的开孔尺寸是多少”等。本文认为可以利用自然语言处理和深度学习将行业规范转换为 Neo4j 的 Cypher 查询语言，预先构建客船领域知识图谱，结合二者进行语义检查。本文开发了 FlowCode，调用了开源 CAD/CAE 工具 FreeCAD。除了 FreeCAD，FlowCode 还可以调用 Maya 和 3D MAX。但是，这些 CAD 工具都不是我国开发的，希望国内 CAD 行业可以有更大的进步。

## 参考文献

- [1] 刘郑国.《船舶工业调整和振兴规划》推动我国成为世界造船强国和海洋强国[J]. 经济,2009(11):22-31.
- [2] 工业和信息化部、交通运输部、国防科工局关于印发《智能船舶发展行动计划(2019—2021年)》的通知[J]. 科学中国人,2019(02):36-41.
- [3] 费英杰. 中国首艘国产豪华邮轮建造项目花落外高桥造船[J]. 船舶标准化与质量,2016(05):44.
- [4] 王懂意. 船舶设计建造专家系统——TRIBON 介绍[J]. 造船技术,1996(01):36-40+22+47.
- [5] 王彩莲. 浅谈船舶应用软件 NAPA[J]. 船舶,2004(03):58-60.
- [6] 徐田甜. MAXSURF 软件在计算机辅助船舶设计与建造领域的应用[J]. 船舶工业技术经济信息,2001(02):18-23.
- [7] 张凯,谢承福,涂跃红,邓爱民. FORAN 软件在船舶总体设计中的应用[J]. 中国舰船研究,2009,4(04):76-80.
- [8] 向成军,李彩霞. CADD5 在船体外壳 3D 曲面设计中的应用[J]. 机械,2008,35(11):27-28+32.
- [9] 朱佳文,肖鹏安,韩海荣. 基于 AutoCAD 和 PDM 的船舶总图数字化设计方法研究[J]. 制造业自动化,2017,39(08):131-133+153.
- [10] 钱嘉楠,周超,刘伟盛,张海峰. 基于 Intergraph Smart 3D 的邮轮电缆自动敷设功能优化开发[J]. 船舶工程,2020,42(01):23-27.
- [11] 姚竞争. TRIBON 模型的数据抽取及二次开发[D]. 哈尔滨工程大学,2006.
- [12] 黄金锋. 船舶设计系统 MAXSURF 的二次开发技术[J]. 中国水运(下半月),2011,11(10):78-80.
- [13] 李遵伟,陈建涛,王艳龙,王侨,王桂云. 基于 Maxsurf 二次开发的船体型值表建立方法[J]. 船舶工程,2015,37(S1):206-209.
- [14] 何清华,钱丽丽,段运峰,李永奎. BIM 在国内外应用的现状及障碍研究[J]. 工程管理学报,2012,26(01):12-16.
- [15] 2015 National Institute of Building Sciences buildingSMART alliance. National BIM Standard – United States Version 3[R]. 2015.
- [16] Junjie Huang, Jia Wang, Xiaoping Zhou. Research on Cross Platform Model Display Technology of BIM[A]. 中国自动化学会智能自动化专业委员会.2017 中国智能自动化会议(CIAC 2017)论文集[C]. 中国自动化学会智能自动化专业委员会:中国自动化学会智能自动化专业委员会,2017:9.
- [17] 王志英,张诗军,邓琨. 统一电网信息模型在南方电网的应用[J]. 电力系统自动化,2014,38(05):127-130+135.
- [18] 陈海斌. TRIBON 与 CADD5 间船体造型数据交换研究[D]. 大连理工大学,2006.
- [19] 何胜强. 船体结构数据交换研究[D]. 哈尔滨工程大学,2009.
- [20] 倪海参. 主流船舶设计 CAD 软件间船体结构数据交换方法的研究[D]. 上海交通大学,2012.
- [21] Noura, M.,Atiquzzaman,M.Gaedke,M. Interoperability in Internet of Things: Taxonomies and

- Open Challenges[J]. Mobile Netw Appl,2019,24:796-809.
- [22] T. Hardjono,A. Lipton,A. Pentland. Toward an Interoperability Architecture for Blockchain Autonomous Systems[J]. IEEE Transactions on Engineering Management,2020,67:1298-1309.
- [23] M. Lehne,J. Sass,A. Essenwanger,Josef Schepers,Sylvia Thun. Why digital medicine depends on interoperability[J]. NPJ Digital Medicine,2019,2.
- [24] Marina Muller,Filipe Esmanioto,N. Huber,E. Loures,O. C. Junior. A systematic literature review of interoperability in the green Building Information Modeling lifecycle[J]. Cleaner Production,2019,223:397-412.
- [25] Jelokhani-Niaraki, M.,A. Sadeghi-Niaraki,Soo-Mi Choi. Semantic interoperability of GIS and MCDA tools for environmental assessment and decision making[J]. Environ. Model. Softw,2018,100: 104-122.
- [26] Lai, Huahui,X. Deng. Interoperability analysis of IFC-based data exchange between heterogeneous BIM software[J]. Civil Engineering and Management,2018,24: 537-555.
- [27] Priss Uta. FcaStone-FCA file format conversion and interoperability software. 2008.
- [28] 牛博生. BIM 技术在工程项目进度管理中的应用研究[D]. 重庆大学,2012.
- [29] 张建平. 基于 BIM 和 4D 技术的建筑施工优化及动态管理 [J]. 中国建设信息,2010(02):18-23.
- [30] 盛大凯,郗鑫,胡君慧,吴志力,齐立忠. 研发电网信息模型(GIM)技术,构建智能电网信息共享平台[J]. 电力建设,2013,34(08):1-5.
- [31] 刘崇茹,孙宏斌,张伯明,董越,辛耀中. 基于 CIM XML 电网模型的互操作研究[J]. 电力系统自动化,2003(14):45-48+74.
- [32] 李善平,尹奇韡,胡玉杰,郭鸣,付相君. 本体论研究综述 [J]. 计算机研究与发展,2004(07):1041-1052.
- [33] M R Genesereth,N J Nilsson. Logical Foundations of Artificial Intelligence[M]. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1987.
- [34] Zhou Zhenyong,Gu Zhengchao,Shi Jiaoying. Research on integrated design techniques for injection mold runner system[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2000,12(1): 6~10.
- [35] G Arango,G Williams,N Iscoe. Domain modeling for software engineering[C]. Austin, Texas:ACM Press,1991.
- [36] J McCarthy. Circumscription — A form of non-monotonic reasoning[J]. Artificial Intelligence,1980,5(13):27-39.
- [37] J F Sowa. Conceptual Structures: Information Processing in Mind and Machine.Reading[C]. MA:Addison Wesley,1984.
- [38] 万捷,滕至阳. 本体论在基于内容信息检索中的应用[J]. 计算机工程,2003(04):122-123+152.
- [39] 张凡. 基于本体论的基站建设工程进度管理研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院人工智能学院),2018.
- [40] 黄璐. 基于本体论的无人驾驶车辆场景评估与行为决策方法研究[D]. 中国科学技术大学,2019.
- [41] 连海洲,赵英俊. 基于 LabVIEW 技术的虚拟仪器系统[J]. 自动化博览,2001(03):23-25.
- [42] 王峰,俞新陆. 产品级三维参数化设计系统的研究与开发[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2001(11):1012-1018.
- [43] 严婷. 基于 UG 的三维参数化标准件库的研究与开发[D]. 华中科技大学,2007.



- [44] 周玲. 基于参数化技术的数字城市三维建模方法[D]. 浙江大学,2013.
- [45] 毛郁欣. 面向大规模本体重用的子本体模型研究[D]. 浙江大学,2008.
- [46] 戴雯,卢章平,戴立玲. 基于凹凸贴图的文物纹理重建技术研究[J]. 计算机应用与软件,2010,27(01):237-240+285.
- [47] 薛守良,苏鸿根. 一种凹凸贴图新算法[J]. 计算机应用与软件,2004(07):85-86.
- [48] 红岩. 最新 3D 特效技术环境映射凹凸贴图[J]. 世界计算机周刊,1999(31):10.
- [49] 郭晓颖,陈勇涛,叶中华,陶慧杰. 基于堆栈的四则运算总结及优化[J]. 数码世界,2017(12):683.
- [50] 李橙,丁国栋. 栈在表达式求值中的应用[J]. 电脑知识与技术,2014,10(34):8156-8157+8164.
- [51] 赵盼,张燕,薛峰,李健. 基于 SolidWorks 二次开发的零件三维参数化设计及装配[J]. 科学技术与工程,2010,10(07):1674-1679.
- [52] 薛毅. 求解 Minimax 优化问题的 SQP 方法[J]. 系统科学与数学,2002(03):355-364.
- [53] 石国春. 关于序列二次规划(SQP)算法求解非线性规划问题的研究[D]. 兰州大学,2009.
- [54] 贾书伟. 行(反)正交矩阵性质的研究[D]. 西华大学,2012.
- [55] 戴立辉,王泽文,刘龙章. 正交矩阵的若干性质[J]. 华东地质学院学报,2002(03):267-269.

## 谢辞

大一，难忘五十米蹬腿四十次的蛙泳；难忘和室友用马可和安琪拉双排的反向上分；难忘大力出奇迹的斯洛克六连击；难忘到处捡球的网球课；难忘什么都没有看到的光学实验；难忘多到离谱的高数作业。大一暑假，参加了再湘遇支教团，去了湖南怀化，回忆满满。大二，难忘支教团两周一次的聚餐，难忘致远湖边的半夜烧烤。大二暑假，开始了敲代码的生活，实现了经济独立。大三，难忘通宵 Debug 的劳累，敲坏了几个鼠标，难忘一月一次的南京东路的韩国烤肉。大四，去参观了药企、船企、海洋研究所、核动力所，长了见识。

从 Python 到 C++ 到 C# 的计算机编程语言学习，从 Flow Based Programming 到 Grasshopper 的无代码化编程，从 FreeCAD 到 Rhinoceros 的参数化建模，从 PyQt5 到 Socket 到 Regular Expression 的数据可视化、传输和匹配，从 TXT 到 IFC 到 XML 到 SPART 的数据格式解析，从 Object Oriented Programming 到 Functional Programming 的编程范式转变，从 Natural Language Interface To Database 到 Graph Database Neo4j 的数据库建立，从写作方法到答辩技巧，从大创到发明专利到论文，大学学到了很多。

首先，感谢我的导师，宋元斌老师，入门时手把手教我 Debug，教我查文献看资料，教我写英文论文，教我做数据格式解析器，教我临场答辩技巧，甚至教我做漂亮的 PPT，Word 排版，事无巨细，帮我确定目录，每章写什么，怎么写，写多少字，图片格式，表格格式，逻辑性等等，后期帮我改论文，看错别字。感谢导师！我觉得我们实验室的师兄师弟们，都很和气，有问题相互帮助，作业“薪火相传”，不需要固定开组会，一起听讲座，交流心得，大四上学期，学 Grasshopper 和 NLP 都是跟着两位师兄慢慢积累经验的。

然后，感谢我的家人，不给我压力，不催着我找工作，不催着我考研究生，让我自由发展，自由摸索。虽然，回家次数越来越少，有时候一个月才打一次电话，但是总是有人挂念，甚好。

感谢我的女朋友，王梓萌，我一点都不遗憾没有在最好的时光遇见你，因为遇见你之后最好的时光才开始。谈恋爱挺麻烦的，以后就麻烦你了。

交大，来也匆匆，去也匆匆，再会。

# INFORMATION MODELING AND AUTOMATIC REVIEW FOR PASSENGER SHIP COMPONENTS

Domestic high-tech passenger ship design falls behind German, Italy and Finland. Firstly, ship 3D modeling software localization still has a long way to go. Foreign commercial ship design software like Tribon (\*.dwg and \*.dxf), Napa (Path Command), Maxsurf (\*.msd), Foran (\*.dwg), AutoCAD (\*.dwg), Intergraph Smart 3D (\*.sat) and so on only provide secondary development interface for domestic shipyards. The underlying data model (DM) is closed. Therefore, shipyards need to purchase the software framework at a high price and unify the standards and habits when modeling through secondary development. Foreign software is lack of high-tech passenger ship component library. The high-tech passenger ship industry has no information model (IM) schema for components, like BIM in Architecture and GIM in State Grid. Component library is important for collaborative design. The information model schema for passenger ship component is fundamental for domestic software localization. Secondly, the scale of high-tech ship is huge with many professions and subcontractors. It is necessary to own collaborative design tools. However, foreign software does not provide collaborative design tools for passenger ship. Interoperability is important for collaborative design. Different design software, different specifications and standards and different workflow require the use of unified information model schema to realize the exchange of product design data.

There are mainly four relatively mature theory, Interoperability, Information Model, Ontology and Sequential Quadratic Programming. Interoperability has four levels. The level 3, semantic interoperability provides common underlying model and data coding, including the use of standard data from available value sets and coding vocabularies and provide users with shared understanding and meaning. The information model contains semantic interoperability. Ontology is the basic theory of information model. The software which can apply the information model is developed in the way of codeless programming. Sequential quadratic programming is an important algorithm used in software development.

To sum up, this thesis puts forward the method of component classification, especially in piping and the electrical system. The information model schema of passenger ship component is proposed in this thesis. Besides, this thesis proposes a principle in 7 steps for passenger ship component information modeling. Based on the information model and modeling principle, the component information modeling software is developed, which named FlowCode. Using FlowCode, an information model for a component can be finished more efficiently and precisely. FlowCode is built under codeless programming for general designers not programmers with code ability like Python or C Language. In practice, during some experiments and tests in a shipyard in Shanghai, it is difficult for designers to adjust the choosing object and keep the object linkage. Therefore, the concept of parametric assembly based on sequential quadratic programming is applied in FlowCode. Then, the information model of a component is converted into a new data format suffixed with spart.

For further research, there are three aspects in this thesis that need to be improved. Firstly, general automatic review approach includes completeness check, syntax check and semantic check. This thesis has completed the completeness check and syntax check but has not completed the semantic check. Semantic check is to check the passenger ship partially or completely according to the industry specifications and standards, which are listed in Chinese natural language. In this thesis, it is suggested that the industry specifications and standards can be converted into Cypher command of Neo4j by natural language processing (NLP) and deep learning. Secondly, this thesis has not completed mapping in FlowCode. Mapping mainly includes normal mapping, bump mapping and texture mapping. The same to attribute file (\*.att), the file (\*.jpg, \*.png, \*.tiff, \*.bmp etc.) for mapping should also be referenced by component file (\*.prj), part file (\*.part) and geometry file (\*.geo). Thirdly, in this thesis, FlowCode is developed based on FreeCAD for 3D model output, which is an open source CAD or CAE tool. In addition to FreeCAD, FlowCode can also make connection with Maya and 3D MAX. However, these CAD tools are not developed in our country. I hope that the domestic CAD industry can make more progress.