

# 柴油机数字化研发环境构建技术研究

XXGC-KK-05-04-04/186-2021

---

APP 软件开发和定制报告

---

上海交通大学

# APP 软件开发和定制报告

编 制

校 核

审 查

标准审查

审 定

批 准



## 目 次

1 引言 .....	1
2 引用文件 .....	1
3 交付产品 .....	1
3.1 知识模型及其开发报告 .....	1
3.2 实验报告 .....	3
3.3 程序及其开发报告和测试报告 .....	3
3.4 服务 .....	6
3.5 验收标准 .....	6
3.6 最后交付期限 .....	6
4 所需工作概述 .....	6
5 实时整个软件开发活动的计划 .....	7
5.1 软件开发过程 .....	8
5.1.1 需求分析 .....	9
5.1.2 软件系统设计 .....	9
5.1.3 知识模型的开发 .....	11
5.1.4 软件的编码与测试 .....	11
5.1.5 软件应用 .....	11
5.1.6 项目总结 .....	11
5.2 软件开发总体计划 .....	11
5.2.1 软件开发方法 .....	11
5.2.2 软件产品标准 .....	12
6 实时详细软件开发计划 .....	15
6.1 知识模型的开发 .....	15
6.2 软件开发环境的搭建 .....	19

6.3 软件框架的构建.....	19
6.4 界面开发.....	20
6.5 计算代码的编写.....	21
6.5.1 输入的处理.....	21
6.5.2 文件输出.....	22
6.6 软件的测试.....	22
7 项目进度表.....	24
8 培训.....	25
9 风险管理.....	26

## 图表目录

图 1 总体方案及技术路径 .....	8
图 2 软件构架 .....	20
图 3 使用 Qt Quick 开发的软件界面 .....	20
图 4 软件测试流程 .....	24
表 1 所需交付的知识模型及其开发报告 .....	2
表 2 所需交付的实验报告及其内容 .....	3
表 3 所需交付的程序及其开发报告和测试报告 .....	4
表 4 输入参数在内存中的存储数据结构 .....	21
表 5 ParameterTable 类定义的方法及其说明 .....	22
表 6 项目总体进度表 .....	25
表 7 后期培训计划 .....	26

# APP 软件开发和定制报告

## 1 引言

为了构建一个柴油机数字化研发环境，需要将柴油机的开发知识以文档和程序的形式表现出来。本报告详细记录了柴油机数字化研发环境的构建过程。其内容主要包括满足客户需求所需交付的产品，为了完成本项目需进行的工作，实时整个软件开发的初步计划、开发方法和产品依据的标准，详细的软件开发过程描述等。

## 2 引用文件

- [1] 柴油机数字化项目任务书
- [2] 内燃机学. 周龙保
- [3] 内燃机性能仿真与优化. 刘永长
- [4] Internal Combustion Engine Fundamentals 2nd Edition. JOHN B. HEYWOOD
- [5] C++ primer plus. Stephen Prata
- [6] C++程序设计. 谭浩强
- [7] 柴油机设计手册 1~7 册
- [8] Qt on Android 核心编程. 安晓辉
- [9] Qt Quick 核心编程. 安晓辉

## 3 交付产品

### 3.1 知识模型及其开发报告

查阅程序、文档、论文等资料，总结并开发出以下知识模型，撰写相应的开发报告：

表 1 所需交付的知识模型及其开发报告

知识模型	对应报告
油耗计算知识模型	油耗计算知识模型开发报告
功率计算知识模型	功率计算知识模型开发报告
理想循环知识模型	理想循环知识模型开发报告
综合性能知识模型	综合性能预测知识模型开发报告
能量平衡知识模型	能量平衡知识模型开发报告
放热率分析知识模型	放热率分析知识模型研究报告
排气温度知识模型	排气温度知识模型研究报告
加速加载性能计算模型	柴油机加速加载性能评估知识模型开发报告
单增压匹配知识模型	单增压器匹配知识模型开发报告
两级增压知识模型	两级增压匹配知识模型开发报告
相继增压知识模型	相继增压匹配知识模型开发报告
进排气三通损失知识模型	进排气三通损失知识模型开发报告
脉冲排气系统设计知识模型	脉冲排气系统设计知识模型开发报告
MPC 排气系统设计知识模型	MPC 排气系统设计知识模型开发报告
MIXPC 排气系统知识模型	MIXPC 排气系统设计知识模型开发报告
柴油机活塞曲柄连杆运动学分析知识模型	柴油机活塞曲柄连杆运动学分析知识模型开发报告
柴油机活塞曲柄连杆动力学分析知识模型	柴油机活塞曲柄连杆动力学分析知识模型开发报告
轴承载荷知识模型	轴承载荷知识模型开发报告
曲拐刚度分析知识模型	曲拐刚度分析知识模型开发报告
曲轴疲劳强度分析知识模型	曲轴疲劳强度分析知识模型开发报告



接触副微动疲劳分析知识模型	接触副微动疲劳分析知识模型开发报告
接触副微动磨损分析知识模型	接触副微动磨损分析知识模型开发报告
轴系扭转振动分析知识模型	轴系扭转振动分析知识模型开发报告

### 3.2 实验报告

为了验证所开发的知识模型的正确性，需要在发动机台架上开展相关的实验，得到相应的发动机实验数据，完成实验数据的记录和实验报告的撰写。需要完成的实验报告和实验报告的内容如下：

表 2 所需交付的实验报告及其内容

实验报告	实验报告内容
油耗计算知识模型实验报告	记录发动机在不同工况下的燃油消耗率
功率计算知识模型实验报告	开展功率测量实验，记录不同类型的发动机标定点功率大小。
综合性能预测知识模型试验报告	开展全工况下发动机整机性能实验，记录测试工况的综合性能参数。
放热率分析知识模型试验报告	开展发动机缸压测量实验，缸内压力随曲轴转角的变化数据。
排气温度预测知识模型试验报告	开展发动机标定工况下的排气温度测试实验。
柴油机接触副微动磨损知识模型实验报告	开展柴油机接触副微动磨损实验

### 3.3 程序及其开发报告和测试报告

将开发出的知识模型编成软件的形式用于计算，将开发过程和软件测试过程记录于报告中，所需交付的程序如下：

表 3 所需交付的程序及其开发报告和测试报告

软件	开发报告	测试报告
油耗计算 APP 软件及程序源代码	油耗计算 APP 软件开发报告	油耗计算 APP 软件测试报告
功率计算 APP 软件及程序源代码	功率计算 APP 软件开发报告	功率计算 APP 软件测试报告
理想循环分析 APP 软件及程序源代码	理想循环分析 APP 软件开发报告	理想循环分析 APP 软件测试报告
综合性能预测 APP 软件及程序源代码	综合性能预测 APP 软件开发报告	综合性能预测 APP 软件测试报告
能量平衡分析 APP 软件及程序源代码	能量平衡分析 APP 软件开发报告	能量平衡分析 APP 如那件测试报告
放热率分析 APP 及程序源代码	放热率分析 APP 开发报告	放热率分析 APP 测试报告
排气温度预测 APP 及程序源代码	排气温度预测 APP 开发报告	排气温度预测 APP 测试报告
柴油机加速加载性能评估 APP 及程序源代码	柴油机加速加载性能评估 APP 开发报告	柴油机加速加载性能评估 APP 测试报告
进排气三通损失 APP 及程序源代码	进排气三通损失 APP 开发报告	进排气三通损失 APP 测试报告
柴油机单增压匹配 APP 及程序源代码	柴油机单增压匹配 APP 开发报告	柴油机单增压匹配 APP 测试报告
柴油机相继增压匹配 APP 及程序源代码	柴油机相继增压匹配 APP 开发报告	柴油机相继增压匹配 APP 测试报告

柴油机相继增压匹配 APP 及程序源代码	柴油机相继增压匹配 APP 开发报告	柴油机相继增压匹配 APP 测试报告
脉冲排气系统 APP 及程序 源代码	脉冲排气系统 APP 开发 报告	脉冲排气系统 APP 测试 报告
MPC 排气系统设计 APP 及程序源代码	MPC 排气系统设计 APP 开发报告	MPC 排气系统设计 APP 测试报告
MIXPC 排气系统设计 APP 及程序源代码	MIXPC 排气系统设计 APP 开发报告	MIXPC 排气系统设计 APP 测试报告
柴油机活塞曲柄连杆运动 学分析 APP 及程序源代码	柴油机活塞曲柄连杆运 动学分析 APP 开发报告	柴油机活塞曲柄连杆运 动学分析 APP 测试报告
柴油机曲柄连杆机构动力 学计算 APP 及程序源代码	柴油机曲柄连杆机构动 力学计算 APP 开发报告	柴油机曲柄连杆机构动 力学计算 APP 测试报告
轴承载荷分析 APP 及程序 源代码	轴承载荷分析 APP 开发 报告	轴承载荷分析 APP 测试 报告
柴油机曲拐刚度分析 APP 及程序源代码	柴油机曲拐刚度分析 APP 开发报告	柴油机曲拐刚度分析 APP 测试报告
曲轴疲劳强度分析 APP 及 程序源代码	曲轴疲劳强度分析 APP 开发报告	曲轴疲劳强度分析 APP 测试报告
接触副微动磨损分析 APP 及程序源代码	接触副微动磨损分析 APP 开发报告	接触副微动磨损分析 APP 测试报告
接触副微动疲劳分析 APP 及程序源代码	接触副微动疲劳分析 APP 开发报告	接触副微动疲劳分析 APP 测试报告
轴系扭转振动分析 APP 及 程序源代码	轴系扭转振动分析 APP 开发报告	轴系扭转振动分析 APP 测试报告

### 3.4 服务

对各个报告和软件计划提供以下服务：

课堂培训：以讲课形式对客户进行培训，使其能够正确使用软件。

免费咨询：客户可以在工作时间向技术人员提出问题并获得解答，对报告或程序有疑问的地方免费咨询。

软件维护：获取软件使用中的问题，提供补丁程序。

### 3.5 验收标准

对产品的验收标准如下：

- 1) APP 软件数量 23 个；
- 2) 标定点油耗计算精度 95%；
- 3) 标定点功率计算精度 95%；
- 4) 曲柄连杆机构动力学计算 APP 工具软件与商用软件对比误差小于 5%；
- 5) 柴油机轴承载荷计算和商用软件对比误差小于 1 %；
- 6) 扭转振动计算 APP 与商用软件对比误差小于 3%；

### 3.6 最后交付期限

按照每年每季度的最后一个月（即 3 月、6 月、9 月、12 月）为阶段性节点、每年 6 月中旬为年度中期节点、每年 12 月中旬为年底审查主要节点，完成阶段性技术指标，每个节点的 15 日前参研单位负责人对课题的工作进行阶段性的总结，并总牵头单位技术负责人提交项目总结报告，交付随时间节点的研究成果交付物。本项目的最终交付时间为 2022.12.25。

## 4 所需工作概述

- 1) 软件需求分析。明确每个软件的功能、软件的模块组成、软件所达到的计算性能等等。

- 2) 开展知识模型化工作。确定软件需要之后，查找相关论文、程序和报告等等，建立该软件实现所需功能所依据的原理的知识模型，并撰写知识模型报告。
- 3) 开展以知识模型验证为目的的发动机台架实验。记录下实验数据，并验证知识模型的正确性。
- 4) 程序代码的编写。在知识模型验证正确的基础上，编写能实现相应功能的计算代码。
- 5) 代码测试。代码测试内容包括：测试代码运行无故障，不会出现异常终止情况；测试对不同的输入，程序能够计算出正确的结果。测试完成后撰写程序的测试报告。
- 6) 交付材料。准备验收材料，组织项目总结和验收工作。
- 7) 报告的改进以及程序的优化。后续若存在交付的报告或者程序问题，用户可以向技术人员提出改进意见，技术人员对相关材料进行优化改进。

## 5 实时整个软件开发活动的计划

研究的技术途径如图 1 所示。首先将研发知识分类，分成已有知识和需开发的知识，对已有知识，将其进行逻辑描述和定量表达，使其模型化。

对于需开发的新知识，通过部件试验及台架试验研究、历史数据收集、理论分析将新知识定量化和模型化。

模型化的知识主要分为两类：性能类（包括增压和进排气）和结构类。由于需模型化的知识数量较大，根据各程序独立的思想，可以多人员同时独立并行研究，进行建模。建模过程可以充分利用已有资源，在已有模型的基础上更新。

建立的模型程序化，程序化需要在数字化研发平台框架下进行。开发的各个程序相互独立，数据的调用通过运行支撑环境进行。一些工具软件需要借助于商用软件的计算结果，为了在研发环境中对其进行调用，需开发中间处理程序。

对数据接口进行详细定义，确定接口数据文件类型、内容、数据格式及调用方式。详细定义后，工具软件的开发过程各自独立，可以并行开展。采用的开发语言不限，最终程序以执行代码的方式嵌入开发平台。而源代码和相应的编译工具则以数据库中数据的形式存放在研发平台源代码库、编译工具库中。对源代码的更新是通过对代码库的更新实现。而对执行代码的更新需要在研发平台环境下，运行执行代码更新功能，调用相应的编译工具，生成执行代码。这些属于研发平台的代码管理更新功能。

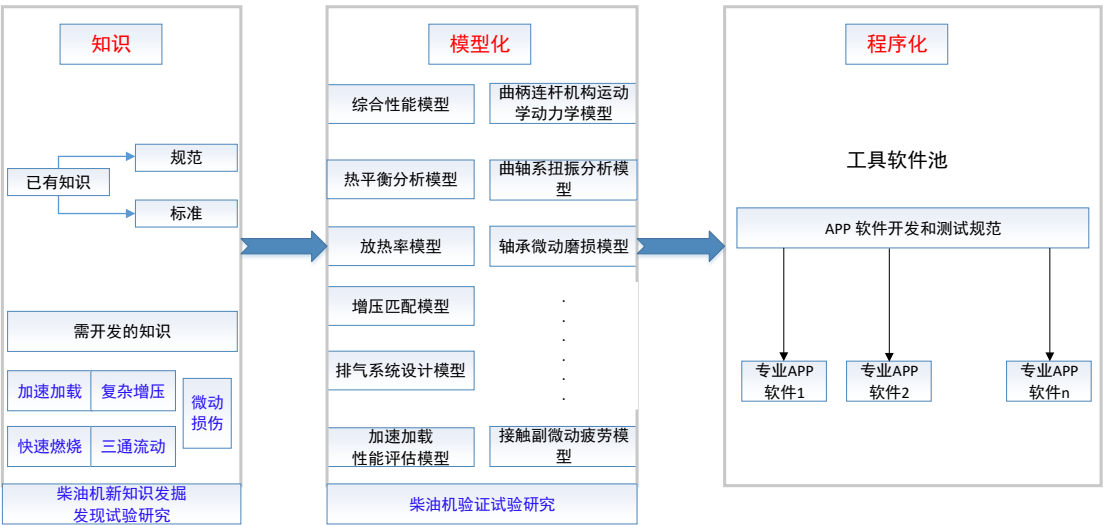


图 1 总体方案及技术路径

5.1 软件开发过程

需求开发阶段，以用户的语言进行描述，让用户和开发团队对于需求达成一致的理解，形成系统要具有的功能。系统设计阶段，结合用户对系统环境、开发语言以及运行的网络硬件等要求，确定开发工具等，对应用系统关系进行架构性设计，通过需求阶段对用户的分析归类，用图的方式描述出用

户和各子系统或模块的全局视图，以及和其他系统的关系。

概要设计中除了高层架构设计，还需要设计网络拓扑图，以及系统部署图。概要设计比较重要的还有就是子系统、模块进行合理的划分。模块的名称很大程度上会成为用户的主要菜单，如何从用户的角度去取比较清楚的子系统和模块是很重要的。

代码开发和单元测试阶段，把模块进行合理划分，把项目总体计划的代码开发测试阶段划分为多个时间段，每个时间段都包括代码开发、单元测试和集成测试，这个阶段还需要对需求变更进行跟踪控制，如果需求有变更，那么要把需求文档、设计文档都重新跟上。

测试工作是项目的重要的环节，需要确定测试目标、测试方法，并编写测试用例。

文档工作在项目开发中也占有重要位置，它记录整个开发过程，是用户、团队成员相互沟通的形式之一，也是软件开发的重要成果。

### 5.1.1 需求分析

发动机在开发初期大部分参数都无法得到，这就需要借鉴以往发动机的数据。在原有数据的基础上优化、改进以达到自己的设计需求，用计算机辅助设计来计算发动机性能，能大大提高发动机设计的效率。对不同的设计目的，需采用不同的计算模型，例如对优化燃烧、减少排放，就需要采用燃烧模型，对优化内燃机增压系统，就需要对增压系统进行匹配。针对不同的目的编写不同的发动机计算工具，能显著提高设计、分析发动机效率。这便是本项目所要达到的目的。

### 5.1.2 软件系统设计

完成对整个软件系统的分析设计，对开发方式、图形界面、计算模型、数据接口进行定义，对系统功能各模块进行详细设计、定义数据总体结构、编码命名规范。

软件的开发首先基于发动机的基本原理和现有机型的大量数据库，另外还需要大量查找相关论文，了解最新、最准确的计算方式，而不是用旧的、不准确的模型。有些计算无法直接表示为公式，而必须借鉴已知发动机的数据库。

根据性能分析软件的特点，拟把软件分为前处理、求解器和后处理等子系统。前处理子系统建立模型图、设置参数、进行模型预处理、生成模型文件和输入接口文件。求解器读取输入接口文件，完成计算过程后，把需要保存的结果存储在输出接口文件中。后处理子系统读取输出接口文件，并进行输出的图形化显示、处理和保存。

前处理和后处理采用相同的编程语言，用来保证前后处理界面风格的统一，本项目采用 Qt 作为界面的开发工具；编程语言采用面向对象的 C++ 编程语言。

Qt 是一个由 Qt Company 开发的跨平台 C++ 图形用户界面应用程序开发框架，支持在 Linux、Windows 等多个平台开发，开发语言为 C++，Qt 满足一次开发可以将源代码和图形界面编译到多个平台使用，避免了为了适应多个平台多次开发的繁琐过程，所以本软件拟采用 Qt 开发界面。使用 Qt 作为界面开发的软件优势如下：

### 1. 优良的跨平台特性

Qt 支持下列操作系统:MicrosoftWindows95/98，MicrosoftWindowsNT，Linux，Solaris，SunOS，HP-UX，DigitalUNIX(OSF/1，Tru64)，Irix，FreeBSD，BSD/OS，SCO，AIX，OS390，QNX 等等。

### 2. 面向对象

Qt 的良好封装机制使得 Qt 的模块化程度非常高，可重用性较好，对于用户开发来说是非常方便的。Qt 提供了一种称为 signals/slots 的安全类型来替代 callback，这使得各个元件之间的协同工作变得十分简单。



### 3. 丰富的 API

Qt 包括多达 250 个以上的 C++ 类，还提供基于模板的 collections, serialization, file, I/O device, directory management, date/time 类。甚至还包括正则表达式的处理功能。

除此之外还包括，支持 2D/3D 图形渲染，支持 OpenGL，大量的开发文档和对 XML 的支持等。

#### 5.1.3 知识模型的开发

完成柴油机知识模型化的规范定义，将柴油机知识模型化分为知识概述、术语定义、模型 IPO 表、模型的原理和模型的实现过程程序框图几部分，后续的具体知识模型定义都是在此规范上进行的。

#### 5.1.4 软件的编码与测试

根据软件的系统架构，进行前处理、求解器、后处理的代码编程和测试。为了避免错误积累，采用边开发边测试的基本模式，对每个模块都进行单独测试，系统联调及系统测试，对系统处理逻辑、例外处理能力、容错能力等进行大规模的测试，对发现的问题进行彻底纠正。

#### 5.1.5 软件应用

开发的软件首先在两台实验机上试运行，两台发动机的运行参数先通过实验获得，然后用软件计算其性能，对比分析实验和计算结果的误差以验证软件的准确性。

#### 5.1.6 项目总结

根据项目结题要求，对项目研发过程进行总结备案，以利于项目经验的积累和后续改进。

### 5.2 软件开发总体计划

#### 5.2.1 软件开发方法

现在流行的软件的开发方法主要有：结构化方法、面向数据结构的软件

开发方法、面向问题的分析方法、原型化方法、面向对象的软件开发方法以及可视化开发方法。结构化方法的主要观点是采用自顶向下、逐步求精及模块化的程序设计方法；使用顺序、选择和循环三种基本控制结构构造程序。面向对象设计方法以对象为基础，利用特定的软件工具直接完成从对象客体的描述到软件结构之间的转换。面向对象设计方法的应用解决了传统结构化开发方法中客观世界描述工具与软件结构的不一致性问题，缩短了开发周期，解决了从分析和设计到软件模块结构之间多次转换映射的繁杂过程。面向对象设计方法和结构化方法目前仍是两种在系统开发领域相互依存的、不可替代的方法。

本软件项目开发过程中，使用面向对象的设计方法和自顶向下的结构化设计方法相结合的方法。首先采用结构化设计方法，根据需求将程序分成几个大的功能模块，然后对每个功能模块逐步细化。在确定主要的程序框架和功能模块后，采用面向对象的程序设计方法，通过把类、对象、属性、操作作为最基本的构件来构造发动机的性能分析模型。根据发动机部件组成和性能仿真的特点，建立不同的类，形成建模、设计、实现等各个级别的可复用性的基础，并从类中实例化不同的对象。

在开发过程中，为了降低开发风险，采用迭代增量式的开发方法。首先根据现有模型，进行第一轮的开发，得到第一个简化版本；随着关键模型的研究深入，对研发版本中的相应模块进行改进和升级，不断推出更新版本，直至整个模型研发结束，软件升级到最后的版本，通过不断升级，改正先前版本的问题和不足。这样的开发方式，可以显著降低开发风险。

### 5.2.2 软件产品标准

#### (1) 格式标准

采用 C++ 的标准语言格式

#### (2) 首部注释标准

标明代码的版本号、编制时间、代码的作用；代码实现功能所采取的方法（模型、算法）；程序的基本结构；程序变量的说明（意义、输入、输出、局部、全局等）

### （3） 其他注释标准

注释行数大于 30%

### （4） 变量、参数、程序包、过程和文档等的命名约定

#### ➤ 类型和常量命名

类、常量、结构、枚举和 `typedef` 标识符用“大驼峰法”拼写：大写类型和常量名中每个单词的首字母可以使这些单词更为清晰。第一个单词首字母大写则为区分类型和变量（或者函数）提供了保证。用名词命名复合类型，用复数名词命名集合类型。

#### ➤ 函数命名

函数名用“小驼峰法”拼写：函数中的一个单词全小写而其它单词首字母大写。用动词命名函数，用 `is`、`set` 和 `get` 命名访问函数或者赋值函数。

#### ➤ 变量和参数的命名

变量和函数参数用“小驼峰法”拼写。用名词命名变量。用前缀或者后缀区别成员变量和其它变量，如 MFC 中的 `m_work`。

为函数全部参数命名：在函数的声明和实现中，应该试用同一个规则为所有参数命名。如果函数参数未试用，可以使用 `static_cast<>` 将参数转换为 `void` 类型，以消除编译器“未使用参数”的警告。例如：

```
class MyClass{
public:
    MyClass (float meaningfulName);
    //...
}
```

```

MyClass :: (float meaningfulName) {
    static_cast<void> (meaningfulName);
    //...
}

```

➤ 函数参数和作为其赋值对象的成员变量应有相同名字

```

class Customer{
public:
    Customer (const string& name);
private:
    string name_;
};
Customer::Customer (const string& name) :name_(name){
}

```

➤ 文件命名

文件名要全部小写，可以包含下划线（\_）或短线（-），按项目约定来。

可接受的文件命名：

```

my_useful_class.cc
my-useful-class.cc
myusefulclass.cc

```

C++文件以.cpp 结尾，头文件以.h 结尾。通常，尽量让文件名更加明确。

定义类时文件名一般成对出现，如 foo\_bar.h 和 foo\_bar.cc，对应类 FooBar。

内联函数必须放在.h 文件中，如果内联函数比较短，就直接放在.h 中。如果代码比较长，可以放到以-inl.h 结尾的文件中。对于包含大量内联代码的类，可以有三个文件：

```

url_table.h        // The class declaration.
url_table.cc       // The class definition.

```

`url_table-inl.h` // Inline functions that include lots of code.

## ➤ 通用原则

名字应该有实际意义；使用读者熟悉的名字；避免在名字中使用数字，避免依靠数字区分名字；避免使用过长的名字，实体的名字应该准确描述其用途，名字过长首先应该考察实体的设计和用途，而不是直接换个短的名字，必要时要重构实体；保留元音字母——使用完整单词；不要依靠大小写区分名称，C++对大小写敏感，但是依靠大小写区别易混淆；类型或常量名中第一个单词使用了缩写，则只大写该缩写词的首字母，如果缩写词紧跟其它单词之后这个更重要。

## 6 实时详细软件开发计划

### 6.1 知识模型的开发

#### (1) 柴油机总体性能知识模型开发

##### ● 油耗计算知识模型开发

研究油耗计算方法，完成油耗计算知识模型报告，该模型由功率、转速和基本的尺寸参数计算发动机在该工况下的有效燃油消耗率，该模型的基本原理为由经验公式计算指示热效率和机械效率，而有效燃油消耗率是这两者的函数，有效燃油消耗率可以由指示热效率和机械效率求得。

##### ● 功率计算知识模型开发

发动机的功率计算基于发动机的尺寸参数和发动机的类型，查找资料，统计多种类型发动机的平均有效压力范围，平均有效压力与发动机排量的乘积得到发动机功率范围。在此基础上完成发动机功率计算知识模型的定义和知识模型报告的撰写。

##### ● 理想循环知识模型开发

发动机的理想循环包括多种，在知识模型的研究中，选取卡诺循环、增压混合加热循环以及增压柴油机米勒循环作为研究对象，推导不同循环的热

效率计算公式，将推导的过程和柴油该模型计算热效率的程序框图记录在理想循环知识模型的开发报告中。

- 综合性能分析知识模型开发

柴油机综合性能分析是最为复杂、输入输出参数最多的模型，该模型的开发是基于发动机容积法，即将发动机进排气管和气缸看作一个个容积，容积内的物理量只随时间变化，由基本的物理定律建立微分方程，求解计算发动机性能参数的模型。该模型包括发动机各个模块的子模型，如 Wiebe 燃烧模型、气缸传热模型、流动模型、容积变化模型、涡轮增压器模型等。撰写的综合性能开发报告详细描述发动机的各个子模型及各个模型结合起来的发动机整体模型的求解方法。

- 能量平衡分析知识模型开发

发动机的能量平衡分析运用能量守恒定律，分析进出发动机的能量流动及其分布状况，并且研究发动机的运行和设计参数对能量分布的影响，进而达到提高能量利用的目的。发动机的能量平衡知识模型开发也是基于能量守恒和转化定律来推导的，在能量平衡知识模型开发报告中，将燃料燃烧所释放的能量分为做功、冷却水带走的能量、排气带走的能量和其它未计损失。

- 放热率分析知识模型开发

由实测示功图计算燃油燃烧的放热率，是研究燃烧过程的一种有效方法。真实的放热规律对燃烧过程不仅能做出定性的说明，而且能够提供定量的估计，是诊断燃烧的一种有效手段。同时，根据放热率也可以分析一些设计参数对燃烧过程的影响，如供油规律、喷油提前角、滞燃期、燃烧持续期、燃烧放热速度等。综合考虑放热率、最高爆发压力和压力升高率，提出理想的放热率曲线，使实际放热过程与其逼近，用以改进和组织燃烧。柴油机放热率计算知识模型研究报告根据缸内工作过程缸压变化来计算缸内的放热过程，计算时需要先知道缸内的初始成分，燃烧过程缸内成分不断发生变化，同时

温度也不断变化。

- 排气温度预测知识模型开发

增压器匹配计算中，排温模型是影响计算的重要模型之一。目前，柴油机排温计算模型有几种，包括苏联奥尔林教授介绍的与空气混合前后叠加的排温算法;建立在排气管孤立系统的能量方程上的排温算法;利用发动机扫气的热平衡关系整理;顾宏中教授的排温计算模型;由热力学第一定律能量流入流出推导;苏联工程师西姆从热平衡方程角度介绍的排温计算方法，即热力学第一定律的修正模型。在以上列举的几种排温预测模型中，虽然表示形式不同，但都是从热平衡方程出发，通过能量守恒定律来求取，所不同的只是建立热平衡方程时所假设的孤立系统不同，同时在计算公式中会涉及不同的系数选择问题。前两种方法涉及到的不确定参数较多，并且每个参数的计算都会产生一定误差，从而计算得到的结果的可信度不高;而第三种方法一般适用于有进气管压力波数据的情况，此项数据较难得到，最后三种计算模型具有输入参数少、预测较准确等特点，在实际涡轮增压器匹配计算中应用较多。本项目采用顾宏中教授的排温计算模型来预测柴油机的排气温度，该模型适用于在标定点的排气温度的计算，排温计算模型开发报告中详细描述采用该模型的计算过程，画出排气温度的计算流程图。

## (2) 柴油机增压及进排气系统知识模型开发

- 单增压器匹配知识模型开发

结合增压器匹配原理，建立单增压器匹配知识模型。

- 两级增压匹配知识模型开发

结合增压器匹配原理，建立两级增压匹配知识模型，并在两级增压试验台上开展模型验证研究。

- 相继增压匹配知识模型开发

结合增压器匹配原理，建立相继增压匹配知识模型。

- 进排气三通损失知识模型开发

根据流体力学原理、三通高速流动损失测试，建立三通损失系数知识模型。

- 脉冲排气系统设计知识模型开发

结合一维流动工作过程计算模型、三通损失试验，建立脉冲系统设计知识模型

- MPC 排气系统设计知识模型开发

结合一维流动工作过程计算模型、三通损失试验，建立 MPC 系统设计知识模型

- MIXPC 排气系统设计知识模型开发

结合一维流动工作过程计算模型、三通损失试验，建立 MIXPC 系统设计知识模型

### (3) 柴油机结构知识模型开发

- 活塞曲柄连杆机构运动学知识模型开发

运用曲柄连杆机构运动基本原理，建立活塞曲柄连杆机构运动学知识模型

- 曲柄连杆机构动力学知识模型开发

运用曲柄连杆机构动力学基本原理，建立活塞曲柄连杆机构运动学知识模型

- 轴承载荷知识模型开发

运用柴油机设计基本原理，建立轴承载荷知识模型



- 轴系扭转振动知识模型开发

结合现有轴系扭振分析方法，建立适合柴油机轴系的扭转振动知识模型

- 曲拐刚度分析知识模型开发

结合有限元方法、经验计算方法，建立柴油机曲轴刚度分析知识模型

- 曲轴疲劳分析知识模型开发

结合有限元方法、经验设计方法，建立柴油机曲轴疲劳分析知识模型

- 接触副微动磨损分析知识模型开发

结合有限元方法、微动磨损模型、材料和部件的微动磨损试验，建立柴油机接触副微动磨损知识模型

- 接触副微动疲劳分析知识模型开发

结合有限元方法、微动疲劳理论，建立柴油机接触副微动疲劳分析知识模型

## 6.2 软件开发环境的搭建

软件工程环境就是指支持软件产品开发、维护和管理软件系统。本软件开发的软件工程环境和工具如下：

软件文档编制：Word；

项目管理工具：Project；

软件开发绘图工具：Visio；

数据库设计工具：Power Designer；

面向对象软件设计工具：Rational Rose；

软件开发集成环境：Qt。

## 6.3 软件框架的构建

本软件的主要构架和数据交换过程如图 2 所示，软件采用键盘和 CSV 文

件两种输入方式，输入的数据可以通过键盘直接在界面上输入，或者作为一个 CSV 文件读取到界面上；界面与计算内核之间的数据交换是由数据交换文件来实现的，界面输入传递给内核后，内核开始计算；若计算过程无异常则计算完成，生成一个结果文件，并将其储存在当前目录，程序读取生成的结果文件并将其展示在界面上，完成双向的数据交互。

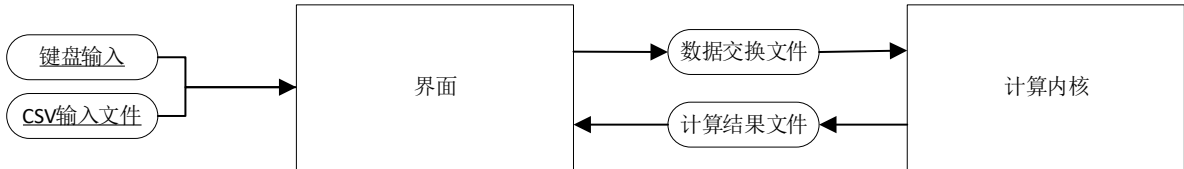


图 2 软件构架

6.4 界面开发

软件的界面使用 Qt Quick 设计,Qt Quick 是 Qt 4.7 中推出的一项新技术。Qt Quick 是一种高级用户界面技术，使用它可轻松地创建供移动和嵌入式设备使用的动态触摸式界面和轻量级应用程序。以一款放热率计算软件为例。

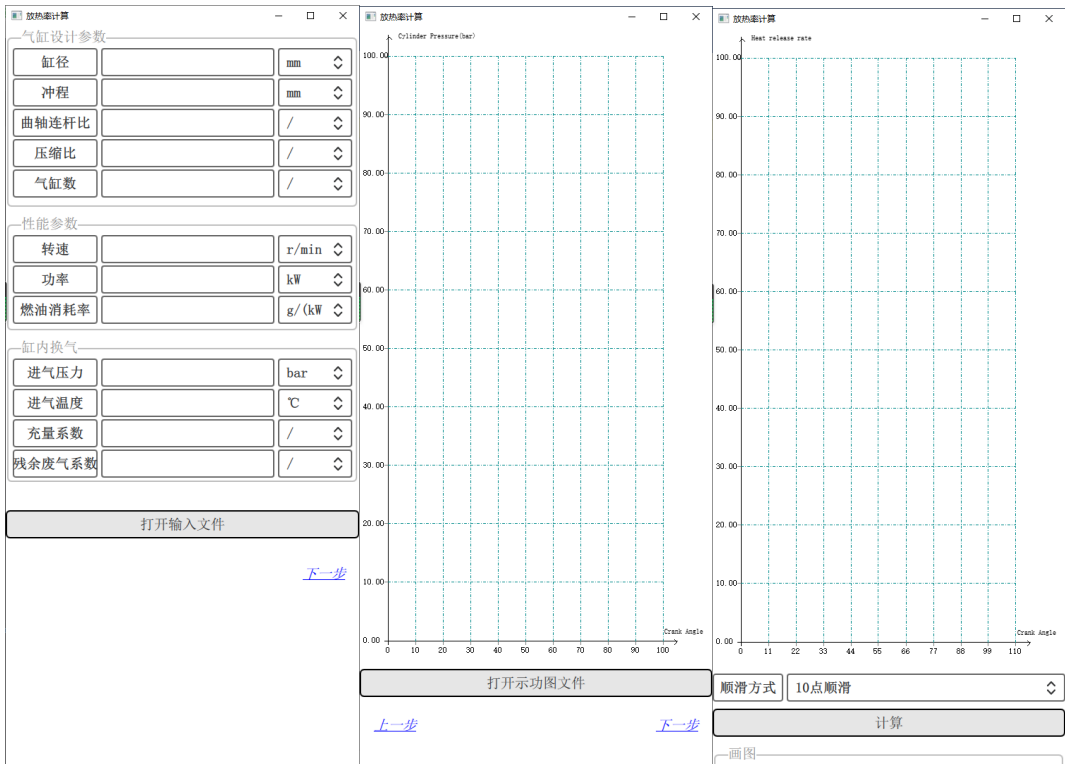


图 3 使用 Qt Quick 开发的软件界面

使用 Qt Quick 开发的放热率计算 APP 界面如图 3 所示，由于输入过程比

较繁琐，为方便用户使用，采用上一步下一步的方式将界面分解为三部分：第一部分为气缸设计参数、性能参数等标量参数的输入，输入完成后按下一步按钮，程序先会检查输入的数据是否合法（完整且无误），若输入的数据合法则跳到示功图输入界面，否则跳出报错窗口，不进入下一步；第二部分为示功图输入窗口，由于示功图的输入数据达到上千行，所以采用文件的格式输入较为方便，点击打开示功图按钮，弹出文件对话框，当选择示功图数据文件之后，程序自动画出示功图，方便用户检查示功图是否有误；第三部分为计算和展示窗口，选择示功图的顺滑方式，点击计算按钮，计算完成后点击画图画出放热率曲线，点击打开结果文件系统自动打开计算得到的结果文件，默认打开的程序为 Excel 表格，以方便后续的画图和结果数据的使用环节。

## 6.5 计算代码的编写

### 6.5.1 输入的处理

在处理输入文件时定义一个 `ParameterTable` 类来储存输入的数据，该类内的 `table` 指针指向一个线性表，线性表的每一个元素为一个结构，用来储存参数名称、参数的单位和参数值。

表 4 输入参数在内存中的存储数据结构

参数 1	参数 1 单位	参数 1 数值
参数 2	参数 2 单位	参数 2 数值
参数 3	参数 3 单位	参数 3 数值
...	...	...

在 `ParameterTable` 类初始化时，给定读取的文件名，默认文件名为“Input.csv”，读取完成后，将参数的单位化为国际标准单位，方便进行下一步的运算。`ParameterTable` 类还定义一系列的方法，例如为将输入参数赋值给变量，在 `ParameterTable` 类定义一个方法 `search(string index)`，该方法接受参数名称，返回 `table` 表格内对应的参数值，若 `table` 表格内不存在该参数，则报告异常。

`ParameterTable` 类的方法及其说明如下：

表 5 ParameterTable 类定义的方法及其说明

方法	说明
<code>bool readInFile(QString filename, QString startIn, int row);</code>	用于读取文件内容，输入文件名，表名称和表的行数，若读取成功则返回 <code>true</code> 。一个文件中可能存在多个表，用表名标识一个表的开始，同时用表行数来控制表读取的停止。表内的参数顺序可以交换，但是参数名称和参数个数均为程序给定。
<code>double searchValue(QString index2);</code>	用于搜索参数值，输入参数名，返回参数值。
<code>bool writeToFile(QString filename, QString tablename, QStringList data, int mode);</code>	用于得到的结果写入文件中，输入文件名、表名、字符串和输入模式， <code>mode=0</code> 时将文件内容删除重新写入， <code>mode=1</code> 时在文件末尾添加内容。
<code>void set_unit();</code>	用于单位转化，为方便用户输入，界面上的参数单位通常不是国际单位，将参数值用于计算时通常先要将其化为国际单位。

### 6.5.2 文件输出

文件输出同样使用一个 `ParameterTable` 类，将计算得到的结果一一填入表格中，使用 `ParameterTable` 类内的写入文件方法，该方法输入希望写入的文件名，调用该方法时在当前目录下生成一个存储结果的文件。

## 6.6 软件的测试

界面测试主要包括以下几个方面：

### 1) 界面测试

现代软件都是基于图形化的操作界面，如果界面操作存在 `Bug` 问题，则可能使软件在操作过程中出现闪退报错等现象。界面测试内容包括界面的滑动功能、选择控件选择功能、按钮功能和显示功能。确保在所有界面功能可操作。

### 2) 输入测试

输入测试主要测试的是从 `Qt` 界面到 `C++` 的数据传输功能，在界面上输入运行所需要的参数，测试数据是否正确传输到内核中，或者打开文件，测试

文件输入是否正确填写到界面上并传输到计算内核中。

### 3) 输出测试

输出测试主要包含源码计算测试和从 C++ 到 Qt 界面的数据传输，即计算的内容正确展示在界面上，还需检查输出文件内数据的正确性。

### 4) 报错测试

软件运行过程中，会有很多其他的情况导致程序不能继续运行或导致计算出错，在这种情况下，软件应给出报错提示。本软件的报错系统主要包含两部分：一、输入报错。错误的输入信息会导致计算结果出错，或使内部计算过程不能收敛。二、计算报错。当内部的计算程序出现不可预料的错误时，软件会终止计算程序，并给出错误信息。

软件测试的流程如图 4 所示，测试完成后形成测试报告。

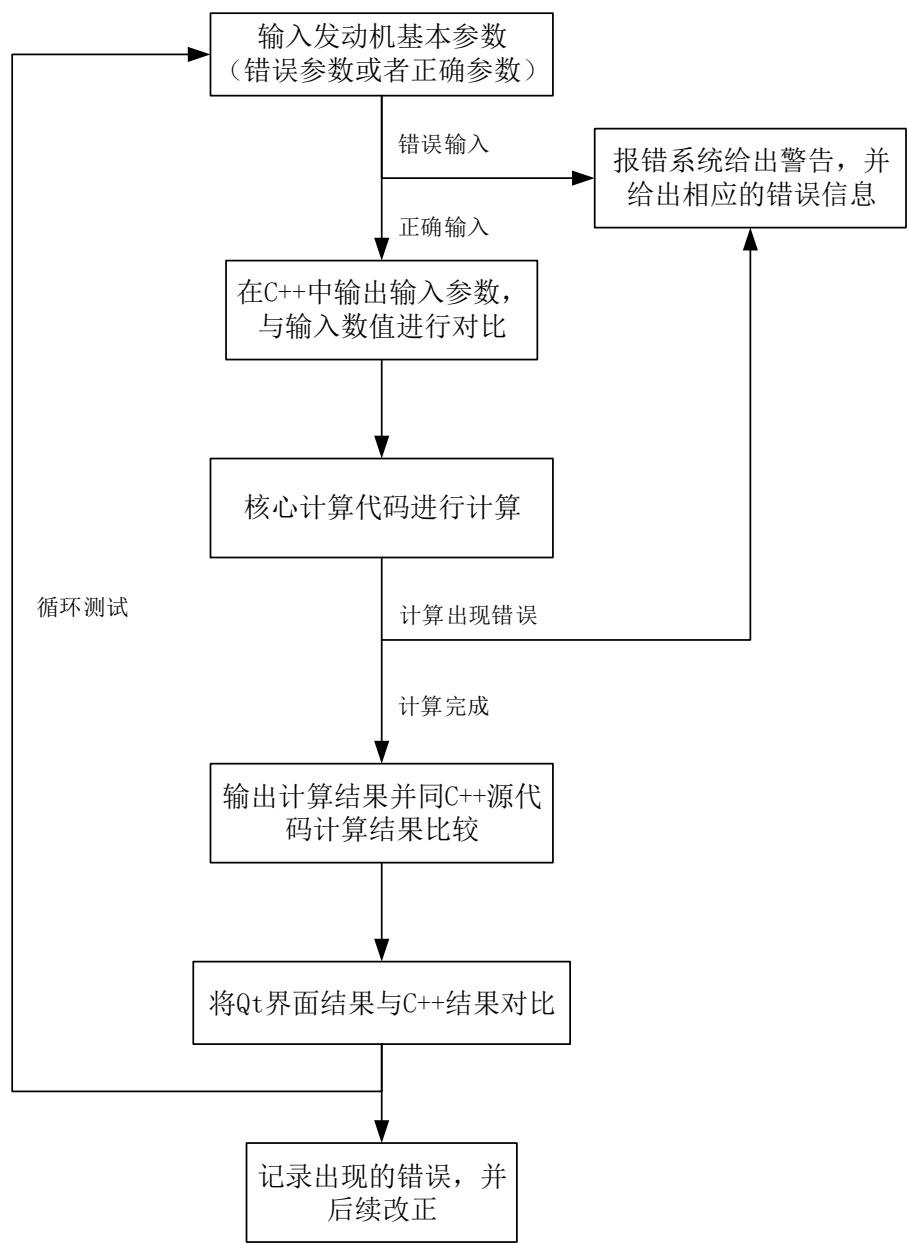


图 4 软件测试流程

7 项目进度表

知识模型开发和软件开发的进度表如表 6 所示：

表 6 项目总体进度表

项目	开始日期	列1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
柴油机总体性能知识模型的研发和建立																																							
功率计算知识模型开发	3/25/2020	3																																					
理想循环计算知识模型开发	3/25/2020	3																																					
综合性能预测知识模型开发	3/25/2020	3																																					
能量平衡分析知识模型开发	3/26/2020	4																																					
放热率分析知识模型开发	3/27/2020	4																																					
排气温度预测知识模型开发	3/27/2020	3																																					
柴油机加速加载性能评估知识模型开发	3/28/2020	3																																					
柴油机总体性能工具软件开发及定制																																							
油耗分析知识软件开发和定制	3/28/2020	3																																					
功率分析知识软件开发和定制	3/28/2020	3																																					
理想循环分析知识软件开发和定制	3/28/2020	3																																					
综合性能分析知识软件开发和定制	3/31/2020	6																																					
能量平衡分析知识软件开发和定制	3/31/2020	6																																					
放热率分析知识软件开发和定制	3/31/2020	6																																					
排气温度分析知识软件开发和定制	4/3/2020	3																																					
柴油机增压系统知识模型的研发和建立																																							
单增压器匹配知识模型开发	4/9/2020	4																																					
两级增压匹配知识模型开发	4/6/2020	4																																					
相继增压匹配知识模型开发	4/6/2020	4																																					
进排气三通损失知识模型开发	4/9/2020	4																																					
脉冲排气系统设计知识模型开发	4/12/2020	5																																					
MPC排气系统设计知识模型开发	4/12/2020	6																																					
MIXPC排气系统设计知识模型开发	4/12/2020	6																																					
柴油机增压系统工具软件开发及定制																																							
单增压器匹配分析和软件开发和定制	4/15/2020	5																																					
两级增压匹配分析和软件开发和定制	4/15/2020	5																																					
相继增压匹配分析和软件开发和定制	4/15/2020	6																																					
进排气三通损失分析和软件开发和定制	4/15/2020	4																																					
脉冲排气系统设计分析和软件开发和定制	4/15/2020	5																																					
MPC排气系统设计知识软件开发和定制	4/15/2020	3																																					
MIXPC排气系统设计知识软件开发和定制	4/15/2020	3																																					
柴油机结构知识模型的开发和建立																																							
活塞连杆机构运动学知识模型开发	####	5																																					
曲柄连杆机构动力学知识模型开发	####	3																																					
轴承载荷知识模型开发	####	5																																					
轴系扭转振动知识模型开发	####	4																																					
曲柄刚度分析知识模型开发	####	5																																					
曲轴疲劳分析知识模型开发	####	4																																					
接触副微动磨损分析知识模型开发	####	6																																					
接触副微动疲劳分析知识模型开发	####	4																																					
柴油机结构计算软件开发和定制																																							
活塞连杆机构运动学知识软件开发	4/23/2020	5																																					
曲柄连杆机构动力学知识软件开发	4/23/2020	4																																					
轴承载荷知识软件开发	4/23/2020	6																																					
轴系扭转振动知识软件开发	4/23/2020	4																																					
曲柄刚度分析知识软件开发	4/23/2020	5																																					
曲轴疲劳分析知识软件开发	4/23/2020	7																																					
接触副微动磨损分析知识软件开发	4/23/2020	3																																					
接触副微动疲劳分析知识软件开发	4/23/2020	7																																					

8 培训

完成软件的交付之后，技术人员需要对软件的使用和原理进行培训，培

训的主要计划如表 7 所示

表 7 后期培训计划

编号	培训内容	培训人员
1	各个知识模型建立过程	软件总体设计人员 软件详细设计人员
2	面向对象分析及对象创建过程	软件详细设计人员 关键模型开发人员
3	Qt 编程语言及 Qt 界面设计	软件详细设计人员 关键模型开发人员
4	数据结构及数据库	软件详细设计人员 关键模型开发人员
5	软件测试	软件测试人员

## 9 风险管理

本项目的技术措施、关键技术的解决途径明晰，采用先开发模型，后实验验证的模式，保证了开发的知识模型的正确性。在软件开发过程中，先对开发的软件在多台发动机上进行标定和验证工作，保证软件计算的正确性。界面和计算程序耦合完成后进行测试，形成专业的测试报告，保证界面和计算程序耦合成功。同时，技术人员不断改进和修正问题，因此项目不存在很大的技术风险。