

# 柴油机数字化研发环境构建技术研究

XXGC-KK-05-02-04/001-2020

---

项目研究 2020 年度 1 季度阶段性总结报告

---

上海交通大学

# 项目研究 2020 年度 1 季度 阶段性总结报告

编    制

校    核

审    查

标准审查

审    定

批    准

版本说明页



## 项目研究 2020 年度 1 季度阶段性总结报告

### 1 一季度工作任务

2020 年第 1 季度工作目标如下：

1. 柴油机 APP 软件开发和定制需求分析
2. 柴油机 APP 软件开发和定制方案编制
3. 撰写项目研究 2020 年 1 季度阶段性总结报告

### 2 APP 软件开发和定制需求分析

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、分析发动机工作效率。这便是本项目所要达到主要目的。

一般来说，发动机设计有动力性能要求、环境性能要求、燃料经济性要求、工作可靠性和使用耐久性能要求。为了满足动力性能要求，在设计发动机时要估计发动机能发出的最大功率，而这又受到发动机的机械强度约束，表现为平均有效压力不能过大。为了估计发动机热力循环的最大热效率，建立理想循环理论热力模型快速计算发动机对燃料热量的利用率。为了满足燃料经济性要求，建立模型计算发动机的油耗，通过优化各类参数达到最好的经济性能。

现阶段发动机的小型化增压技术越来越受到重视，而内燃机增压器的匹配是研发发动机的一个难点，通过建立排气温度计算模型能够估计涡轮所能利用的最大能量，同时编写整机性能计算程序，实现整个全工况下性能预测和优化，是发动机优化设计的强有力工具。

### 3 APP 软件开发和定制方案编制

#### 3.1 总体技术方案

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。

#### 3.2 柴油机研发知识模型研究的技术方案

为了开展新知识模型化研究，需要搭建相关的试验台架，结合试验研究发掘新知识新规律，结合已有知识，建立新知识模型。并根据台架试验结果对新知识模型进行改进和验证。

对现有柴油机台架进行改造，搭建柴油机综合性能测试实验台，可以开展综合性能评估试验、燃烧放热率和燃烧特性试验。改造现有增压试验台架，搭建两级增压试验台，可开展可调两级增压试验研究。搭建排气三通流动实验台，可开展排气热力参数及流场测试研究。

在柴油机试验台架上开展柴油机综合性能试验，获得较多的关于功率、油耗、进气压力随工况的变化规律数据。开展燃烧放热规律测试研究，建立多工况的燃烧放热规律数据集。在可调两级增压试验台架上，开展匹配及调节研究，获得性能匹配数据。

在性能测试台架上开展加速加载性能试验，获得加速加载过程发动机增压压力、转速、扭矩等参数随时间的变化规律，获得瞬态加速加载测试性能数据集。

根据综合性能、燃烧放热、加速加载、排气三通流通特性等试验结果，结合已有的模型和试验数据，分析总结规律，结合热力循环、热流体流动等理论，建立适用于先进柴油机的分析评估模型。

针对发动机结构、摩擦磨损相关知识，进一步开展在发动机热机械条件下的材料特性试验研究，为微动磨损知识、微动疲劳知识等模型提供材料特性数据支持。

#### (1) 柴油机总体性能知识模型开发

##### ● 油耗计算知识模型开发

收集整理从基于经验公式到基于工作循环的不同复杂程度的油耗计算方法，从易用性和准确度综合考虑，建立预测模型，并通过工作过程试验，对模型进行验证和改进。

##### ● 功率计算知识模型开发

收集整理从基于经验公式到基于工作循环的不同复杂程度的功率计算方法，从易用性和准确度综合考虑，建立预测模型，并通过工作过程试验，对

模型进行验证和改进。

- 理想循环计算知识模型开发

根据热力学基本定律，建立柴油机理想循环分析模型，获得柴油机理想性能极限。

- 能量平衡分析知识模型开发

收集柴油机能量平衡分析的不同方法，结合柴油机台架试验，建立柴油机能量平衡分析模型。

- 放热率分析知识模型开发

根据实测的缸压数据，研究放热率计算的方法，并建立放热率计算知识模型

- 排气温度预测知识模型开发

排气温度是发动机运行可靠性的一个重要指标。开发排气温度分析的知识模型，并开展整机排气温度测试，对模型进行改进验证

- 柴油机加速加载性能评估知识模型开发

结合柴油机热力循环、涡轮增压器理论，建立柴油机加速加载性能评估知识模型，结合加速加载性能试验，对模型进行验证和迭代更新

- 综合性能预测知识模型开发

结合柴油机热力循环、涡轮增压器理论，建立综合性能预测知识模型，并通过柴油机综合性能试验，对模型进行验证和迭代更新

## (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

### 3.3 柴油机工具软件开发及定制的技术方案

在柴油机专业 APP 软件开发和测试规范指导下，应用柴油机研发工具软件池管理系统，开发不同专业的 APP 软件，对形成的知识模型进行程序化，构成功能独立、运行独立、数据独立的 APP 软件群。

定制开发的柴油机专业化 APP 工具软件，可以采用不同的开发语言，最终程序以执行代码的方式嵌入开发平台。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。

工具软件的开发遵循软件开发流程，确定软件需求，软件架构、开发语言、变量数据接口定义。

#### (1) 柴油机总体性能知识软件类开发和定制

- 油耗分析知识软件开发和定制

软件需求：预测发动机的油耗

输入：设计目标参数、用途等

输出：油耗率等

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

#### ● 功率分析知识软件开发和定制

软件需求：预测发动机功率

输入：设计目标参数、用途等

输出：发动机功率

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

#### ● 理想循环分析知识软件开发和定制

软件需求：预测发动机的极限性能

输入：设计目标参数、用途等

输出：发动机理想功率、热效率等参数。

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

#### ● 综合性能分析知识软件开发和定制

软件需求：根据发动机的主要结构和工况参数预测评估发动机的综合性能

输入：转速扭矩等工况参数、缸径、冲程等结构参数

输出：综合性能参数（油耗、缸压、进气压力、排气温度等）

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

#### ● 能量平衡分析知识软件开发和定制

软件需求：根据发动机的主要结构和工况参数预测评估发动机的能量分配

输入：转速扭矩等工况参数、缸径、冲程等结构参数

输出：输出功率、摩擦功、缸内传热、排气管传热、废气能量等能量流向的分配比例

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

#### ● 放热率分析知识软件开发和定制

软件需求：根据缸压测量数据进行放热率分析

输入：设计目标参数、用途、发动机结构和工况参数、缸压

输出：燃烧放热率曲线

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

#### ● 排气温度分析知识软件开发和定制

软件需求：预测排气温度评估发动机的热负荷

输入：设计目标参数、用途、结构参数和工况

输出：涡轮前排气温度

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

#### ● 柴油机加速加载性能评估知识软件开发和定制

软件需求：计算发动机的加速加载性能并评估

输入：设计目标参数、用途、发动机的主要结构参数

输出：加速加载时间

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

### (2) 柴油机增压及进排气系统知识软件类开发和定制

#### ● 单增压器匹配分析知识软件开发和定制

软件需求：能够对单增压器系统进行匹配

输入：发动机设计目标参数、用途等

输出：匹配的涡轮增压器参数（流量、压比要求）

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

#### ● 两级增压匹配分析知识软件开发和定制

软件需求：对两级增压系统进行匹配

输入：发动机设计目标参数、用途等

输出：匹配的涡轮增压器参数（流量、压比要求）

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

#### ● 相继增压匹配分析知识软件开发和定制

软件需求：对相继增压系统进行匹配和分析

输入：设计目标参数、用途等

输出：增压器的流量、压比等

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

#### ● 进排气三通损失分析知识软件开发和定制

软件需求：对排气管三通的压力损失进行计算分析

输入：排气管三通的结构

输出：排气管三通的流量损失系数

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

#### ● 脉冲排气系统设计知识软件开发和定制

软件需求：根据发动机的设计参数和用途，确定脉冲排气系统的关键尺

寸

输入：柴油机设计目标参数、用途等

输出：脉冲排气系统管系连接方式、总管直径、支管直径、总管支管夹角。

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

### ● MPC 排气系统设计知识软件开发和定制

软件需求：根据发动机的设计参数和用途，确定 MPC 排气系统的关键尺寸

输入：柴油机设计目标参数、用途等

输出：MPC 排气系统管系连接方式、总管直径、支管直径、支管缩口率、总管缩口率、总管支管夹角。

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

### ● MIXPC 排气系统设计知识软件开发和定制

软件需求：根据发动机的设计参数和用途，确定 MIXPC 排气系统的关键尺寸

输入：柴油机设计目标参数、用途等

输出：MIXPC 排气系统管系连接方式、总管直径、支管直径、总管支管夹角、支管缩口率、总管缩口率、脉冲转换器缩口率。

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

## (3) 柴油机结构知识软件类开发和定制

### ● 活塞曲柄连杆机构运动学分析软件开发和定制

软件需求：对活塞曲柄连杆机构的运动规律进行计算

输入：柴油机活塞曲柄连杆机构的结构参数、发动机性能参数

输出：活塞曲柄连杆机构的运动规律（位移、速度、加速度）

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

- 曲柄连杆机构动力学分析软件开发和定制

软件需求：对曲柄连杆机构进行力学分析

输入：柴油机活塞曲柄连杆机构的结构参数、发动机性能参数

输出：活塞曲柄连杆机构的受力（载荷）

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

- 轴承载荷分析软件开发和定制

软件需求：计算柴油机的主轴承载荷

输入：设计目标参数、用途、受力运动件的结构、运行参数

输出：主轴承载荷随曲轴转角的变化规律

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

- 轴系扭转振动分析软件开发和定制

软件需求：轴系扭转振动分析和评价

输入：轴系结构参数、发动机运行参数

输出：轴系振动特性

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

- 曲拐刚度分析软件开发和定制

软件需求：计算发动机的曲拐刚度

输入：曲轴结构参数

输出：柴油机曲拐刚度

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

- 曲轴疲劳分析软件开发和定制

软件需求：曲轴的疲劳及安全系数分析

输入：曲轴结构、发动机工况参数

输出：曲轴疲劳安全系数

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

- 接触副微动磨损分析软件开发和定制

软件需求：发动机轴瓦过盈、螺栓连接面的微动磨损分析

输入：过盈、螺栓连接的力边界参数、材料表面特性、工况参数

输出：微动磨损量

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定

- 接触副微动疲劳分析软件开发和定制

软件需求：发动机轴瓦过盈、螺栓连接面的微动疲劳分析

输入：过盈、螺栓连接的力边界参数、材料表面特性、工况参数

输出：微动疲劳寿命

开发语言：不限定，以执行代码形式导入数字研发平台

数据接口：接口定义根据数字研发平台需求统一确定