

# 柴油机数字化研发环境构建技术研究

XXGC-KK-05-05/002-2020

---

## 知识模型化定义规范

---

上海交通大学

# 知识模型化定义规范

编 制

校 核

审 查

标准审查

审 定

批 准

## 版本说明页

[illegible]

## 目 次

1 范围 .....	1
2 引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
3.1 柴油机知识模型 .....	1
3.2 知识组件 .....	1
3.3 白箱知识 .....	1
3.4 灰度知识 .....	2
3.5 原理知识 .....	2
3.6 数据知识 .....	2
3.7 经验知识 .....	2
3.8 知识属性 .....	3
3.9 知识输入 .....	3
3.10 知识输出 .....	3
3.11 知识处理逻辑模型 .....	3
4 知识模型化定义及要求 .....	3
4.1 知识模型化定义原则 .....	3
4.2 知识模型化要素定义方法 .....	3
4.2.1 白箱知识模型化 .....	4
4.2.2 数据知识模型化 .....	4
4.2.3 经验知识模型化 .....	5
5 知识模型化定义实例说明 .....	5
5.1 油耗计算模型 IPO 表 .....	5
5.2 分析原理和模型 .....	5
5.2.1 计算平均有效压力、活塞平均速度 .....	5

5.2.2	根据摩擦损失公式，计算摩擦损失和机械效率.....	6
5.2.3	指示热效率.....	7
5.2.4	根据机械效率，指示热效率得到有效燃油消耗率.....	15
5.3	输入定义.....	15
5.4	输出定义.....	15
5.5	实现过程定义.....	15
5.6	油耗知识模型实现效果.....	17
6	总结.....	19

## 图表目录

图 1 知识模型化定义流程 .....	4
图 2 理想涡轮增压 Miller 循环热力过程图 .....	8
图 3 压缩过程压力重构曲线 .....	11
图 4 重构得到的缸压曲线 .....	14
图 5 原始缸压和重构的缸压对比 .....	14
图 6 油耗计算流程图 .....	16
图 7 实验测得的缸压图 .....	18
图 8 实验测得的 $\log p$ - $\log V$ 图 .....	18
图 9 某机型实验测得的缸压和重构得到的缸压对比图 .....	19
表 1 油耗计算知识模型 IPO 表 .....	5
表 3 理想循环计算得到的指示热效率 .....	10
表 6 模型输入参数 .....	17
表 7 数据模型得到的数据 .....	17
表 8 计算结果和实验值的对比 .....	19
附表 1 内燃机性能设计知识术语定义 .....	20
附表 2 知识模型输入定义表 .....	21
附表 3 知识模型输出定义表 .....	21

# 知识模型化定义规范

## 1 范围

本标准规定了柴油机知识模型化的定义内容及要求。

本标准适用于柴油机知识模型化的定义。

## 2 引用文件

柴油机参数字典定义。

## 3 术语和定义

引用文件中界定的以及下列术语和定义适用于本规范。部分详细的发动机术语定义见附表 1。

### 3.1 柴油机知识模型

柴油机知识是关于柴油机设计、性能计算等等一切有关发动机的经验以及理论的总和，而柴油机知识模型是对柴油机知识进行归纳，将其表达为数学、语言、数据等模型的形式。

根据产品研发的实际需求，将知识组件化。将柴油设计过程中的数据、原理、方法和经验，用定量化的公式和模型去表示，并且这些公式和模型能够用代码来实现。

### 3.2 知识组件

知识组件是研发流程提供丰富功能的基本单元，包括公式计算，CAD 操作，CAE 操作、数据库操作、DLL 调用、Web 服务调用、脚本调用、命令执行、文件解析等，可以是一个简单的计算公式，也可以是包含了复杂业务流程和数据交互的知识包。

### 3.3 白箱知识

机理清楚，可以用理论直接描述的知识，也叫显性知识(Explicit knowledge)，人们可以通过口头传授、教科书、参考资料、期刊杂志、专利文

献、视听媒体、软件和数据库等方式获取，也可以通过语言、书籍、文字、数据库等编码方式传播，也容易被人们学习。

### 3.4 灰度知识

相对于白箱知识，机理完全不清楚，无法完全用理论描述的知识，需要在现有机理研究的基础上进一步深入研究。

### 3.5 原理知识

原理性知识是指发动机性能仿真分析相关的基本原理：如热力循环基本原理、进排气流动基本原理、涡轮增压器基本原理，仿真算法原理等。

### 3.6 数据知识

数据知识是内燃机性能设计过程中产生的数据总和。可以分为：

设计数据：包括发动机的结构数据（三维数模、图纸、总体尺寸等数据）；性能设计数据，如总体性能参数、压气机性能数据、涡轮性能数据、放排限值等。

仿真数据：性能仿真所涉及的模型及模型参数、模型计算结果等

试验数据：开展整机性能试验得到的试验数据如：油耗率、进排气压力、进排气温度等循环平均参数；以及随曲轴转角变化的测量参数，如缸压和进排气压力波。

运维数据：在发动机使用过程中的相关性能测试参数。

### 3.7 经验知识

除了数据知识和原理知识外，经验知识也是非常重要的知识，而且也是比较难以获取的知识，对发动机的设计开发有至关重要的影响。

经验知识是一些非结构化的知识，贯穿发动机开发的全过程，并且散落于文献、报告、开发人员头脑中，难以形成完整的经验知识系统，并有效的加以利用。经验知识的一个例子为“车用增压柴油机的油耗率大概为 210g/kWh 左右”。这些经验知识一般比较模糊，而且可能会随着技术的进步而不断变化。



如何有效利用这些知识，是提高知识模型化程度的关键问题之一。

### 3.8 知识属性

知识属性包括知识名称、编码、类别、版本、开发者、所有者、功能说明、使用条件

### 3.9 知识输入

知识输入是对知识模型中的各种输入类型进行定义，明确输入方式、单位、参数名称、参数类型等属性。知识模型输入属性表见附表 2

### 3.10 知识输出

知识输出是对知识模型中各种输出类型进行定义，明确输入方式、单位、参数名称、参数类型等属性。知识模型输出属性表见附表 3

### 3.11 知识处理逻辑模型

知识处理逻辑模型是用理论和数学（统计、大数据等）的方法将其进行逻辑描述和定量表达。

## 4 知识模型化定义及要求

### 4.1 知识模型化定义原则

完整性原则：柴油机知识模型应包含知识输入、知识输出和知识处理逻辑三部分，每个部分的属性完整，不能遗漏。

可执行性原则：知识处理逻辑与知识输入、知识输出具有逻辑顺承关系，即知识输入通过知识处理逻辑，获得知识输出。

通用性和重用性原则：知识模型可用于简化或解决某类设计、计算、仿真或实验问题。具有通用性和重用性。

### 4.2 知识模型化要素定义方法

知识模型化是将物理现象抽象成物理模型、再转化为数学模型的过程，结合大数据分析和简化机理建模方法，进行柴油机知识模型开发。其流程图如图 1 所示：

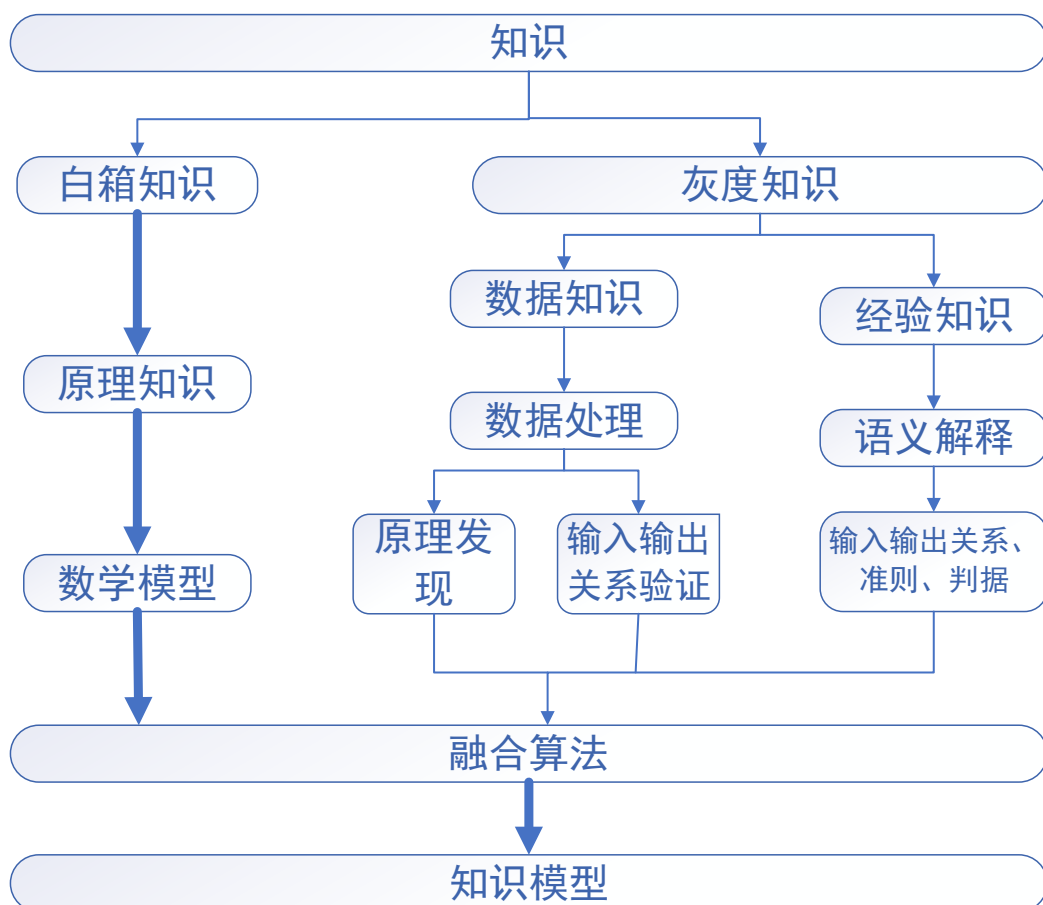


图 1 知识模型化定义流程

#### 4.2.1 白箱知识模型化

1) 将柴油机研发过程涉及的产品物理现象抽象成物理模型(或指标)，此步完成的规则为所有有关发动机的信息皆抽象为物理量。

2) 用理论和数学方法将其进行逻辑描述和定量表达。

3) 提取各种参数计算公式、关联关系、迭代步骤、精度控制、调节系数取值等。

4) 对数据接口，知识展示方式、评估判别方式等进行统一定义，包括应用场景和运行模式涉及定义，功能设计定义，适用范围和运行条件定义，业务逻辑和数据处理流程设计定义，输入输出定义等等。

#### 4.2.2 数据知识模型化

1) 对数据进行整理，确定输入数据和输出数据。

2) 用统计方法对数据之间的关系进行分析，寻求数据之间的规律。

3) 根据输入输出关系, 建立统计关系式。

4) 根据建立的统计关系, 针对原理模型进行两方面改进: 改进原理模型的基本原理和基本公式; 将统计关系嵌入到原理模型中, 改进原理模型的待定系数。

#### 4.2.3 经验知识模型化

1) 对经验知识进行梳理并分类

2) 采用语义分析方法, 将经验表述数字化、定量化

3) 对于关系型经验, 将其定量化为经验表达式, 嵌入到机理模型中

4) 对于判断型经验, 将其定量化为经验判据, 嵌入到机理模型中, 作为设计的选择依据之一。

### 5 知识模型化定义实例说明

下面以油耗计算知识模型为例, 详细论述机理模型和数据模型的耦合的过程。

#### 5.1 油耗计算模型 IPO 表

表 1 油耗计算知识模型 IPO 表

输入参数	输出参数	处理方法
气缸数	燃油消耗率	数据和机理结合的油耗计算模型
缸径		
压缩比		
冲程		
标定转速		
标定功率		

#### 5.2 分析原理和模型

##### 5.2.1 计算平均有效压力、活塞平均速度

平均有效压力可由下式计算:

$$P_{me} = \frac{120 \times P_e \cdot \tau}{10^2 \cdot \pi D^2 \cdot S \cdot n \cdot i} \quad (1)$$

式中：

$P_{me}$ ：平均有效压力（bar）；

$P_e$ ：有效功率(kW)；

$D$ ：气缸直径(m)；

$S$ ：气缸冲程(m)；

$n$ ：柴油机转速（r/min）；

$i$ ：气缸数；

$\tau$ ：柴油机冲程数。

平均有效压力是表征发动机强化程度的指标之一，反应了一台发动机对容积的利用程度效率。

活塞平均速度：

$$C_m = \frac{S \cdot n}{30} \quad (2)$$

式中：

$C_m$ ：活塞平均速度（m/s）；

$S$ ：气缸行程（m）；

$n$ ：发动机转速（r/min）。

活塞平均速度是反应发动机强化指标的重要参数之一，它表明了发动机转速的提高将受到结构尺寸的制约的实质。活塞平均速度与发动机机械损失平均压力、惯性力、热负荷及噪声等密切相关。一般认为，汽油机的活塞平均速度不超过 15m/s，柴油机的活塞平均速度不超过 13m/s，但随着内燃机技术的不断发展，目前活塞平均速度有进一步提高的趋势。

### 5.2.2 根据摩擦损失公式，计算摩擦损失和机械效率

根据经验公式，四冲程增压柴油机平均机械损失压力可以由缸径、活塞平均运动速度和平均有效压力来估算：

$$P_m = D^{-0.2} (0.00855C_m + 0.0789P_{me} - 0.214) \quad (3)$$

式中:

$P_m$ :平均机械损失压力(MPa);

$C_m$ : 活塞平均速度 (m/s);

$P_{me}$ : 平均有效压力 (MPa);

$D$ : 气缸直径(m);

估算出机械损失之后, 机械效率可以近似地由下式估算:

$$\eta_m = \frac{P_{me}}{P_{me} + P_m} \quad (4)$$

式中每项的含义和单位与(3)式相同

### 5.2.3 指示热效率

指示热效率是影响油耗计算准确度的主要因素, 因其影响因素多, 难以用一个准确的公式来计算实际循环的指示热效率值。一般发动机的指示热效率范围如下:

表 2 一般发动机指示热效率的范围 (来源《内燃机学》 周龙保)

发动机类型	$\eta_{it}$
四冲程柴油机	0.41 ~ 0.48
二冲程柴油机	0.40 ~ 0.48
四冲程汽油机	0.25 ~ 0.40
二冲程汽油机	0.19 ~ 0.27

在文献[1]中推导了计算涡轮增压理想循环热效率和平均指示压力的公式, 其主要计算过程和计算公式如下:

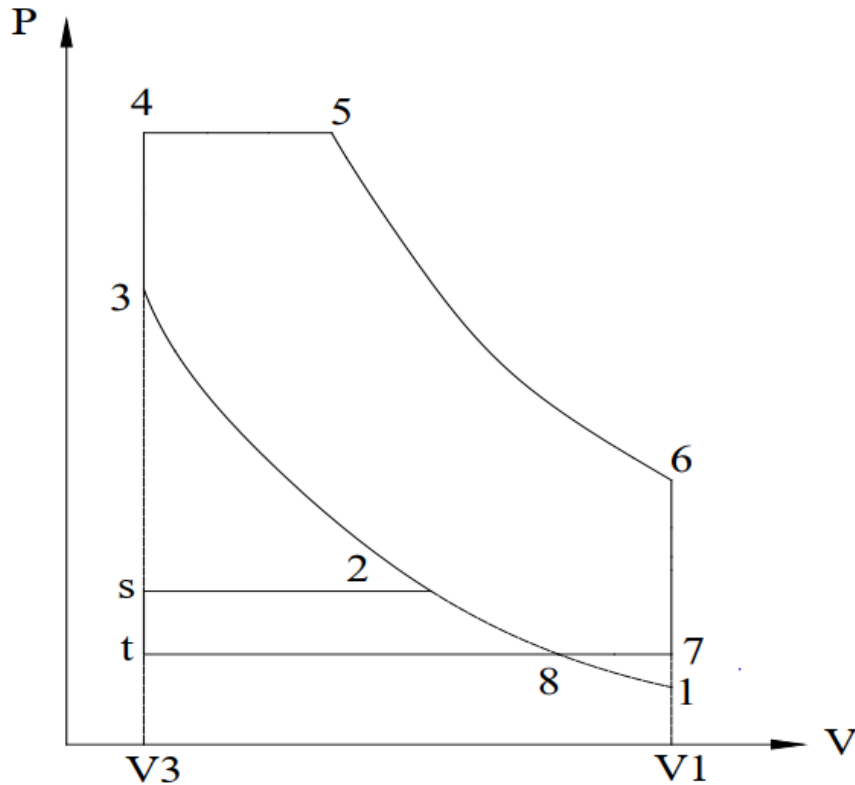


图 2 理想涡轮增压 Miller 循环热力过程图

Miller 循环的热力过程如图 2 所示，压气机将空气压缩到 s 点状态，发动机进气过程为 s-2，在 2 点进气门就已经关闭（这与理想 Otto 循环和 Diesel 循环不同，后两者都是在活塞下止点关闭进气门），然后气缸内的气体经过膨胀过程 2-1，再经过压缩过程 1-3，然后分别经过定容吸热 3-4 和定压吸热 4-5 过程，再等熵膨胀 5-1，定容放热 6-7，最后排气 7-8-t。从图中可以看出 Miller 循环经过两个等熵膨胀过程 2-1 和 5-6，一个等熵压缩过程 1-3。但是从经过膨胀过程 2-1 再经过压缩过程 1-2 气体又回到 2 点的状态，相当于没有压缩气体，只有 2-3 过程才是有效的压缩过程，定义有效压缩比：

$$\varepsilon_e = \frac{V_2}{V_3} \quad (5)$$

以区分与几何压缩比  $\varepsilon = \frac{V_1}{V_3}$ ，且两者之间的关系为  $\varepsilon > \varepsilon_e$ 。

上述实现 Miller 循环的方式为进气门关,另一种实现方法为进气门晚关,即在进气行程结束时,推迟进门的关闭,让活塞将一部分气体推回进气管,再关闭进气门,开始等熵压缩过程。

对上图表述的涡轮增压 Miller 循环,其 BMEP 可以通过下式计算:

$$BMEP = p_0 \pi_K \left\{ \frac{[(\lambda-1) + k\lambda(\rho-1)] \frac{\varepsilon_M^k}{\varepsilon-1} - \frac{\lambda \rho^k \left(\frac{\varepsilon_M}{\varepsilon}\right)^k \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}{k-1} + \frac{k}{k-1} \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon-1} + \left(1 - \frac{\pi_T}{\pi_K}\right) - \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \right\} \quad (6)$$

指示热效率:

$$\eta_{it} = 1 - \frac{\frac{\lambda \rho^k}{\varepsilon^{k-1}} + (\kappa-1) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_M^k} - \frac{\kappa}{\varepsilon_M^{k-1}} - (\kappa-1) \left(1 - \frac{\pi_T}{\pi_K}\right) \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon_M^k}}{(\lambda-1) + k\lambda(\rho-1)} \quad (7)$$

其中:

$$\lambda \text{ 为预混燃烧比, } \lambda = \frac{p_4}{p_3} = \frac{R_p Hu}{\phi c_v \varepsilon_M^{k-1} T_2} + 1,$$

$$\rho \text{ 为扩散燃烧比, } \rho = \frac{V_5}{V_4} = \frac{Hu(1-R_p)}{kHuR_p + \phi \varepsilon_M^{k-1} c_p T_2} + 1$$

增压器压比和涡轮的膨胀比之间的关系:

$$\pi_T = \left( 1 - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_M} \right)^{k-1} \frac{\pi_K^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\lambda \rho^k \eta_{TK}} \right)^{-\frac{k}{k-1}} \quad (8)$$

通过理想循环算出来的指示热效率的结果如表 3 所示,可以看出,使用理想循环计算的指示热效率远远大于实际循环的热效率(30%的误差),因此采用理想循环来计算油耗显然偏小,显然是达不到 95%的精度。

表 3 理想循环计算得到的指示热效率

进气压力/ $10^5 \text{ Pa}$	压缩比	理论循环	$p_{\max}/\text{MPa}$	$T_{\max}/\text{K}$	IMEP/MPa	$\eta_i(\%)$
1.0	17	定容	15.7	3079.6	1.04	67.8
		混合	7.0	2592.9	0.98	63.6
		定压	5.3	2496.9	0.93	60.3
2.0	17	定容	31.4	3079.6	2.08	67.8
		混合	12.0	2537.1	1.90	61.9
			14.0	2592.9	1.96	63.6
		定压	10.6	2496.9	1.85	60.3
2.5	16	混合	14.0	2516.6	2.35	61.1
			16.0	2564.0	2.40	62.5
		定压	12.1	2472.1	2.28	59.2
3.0	16	混合	16.0	2500.8	2.79	60.5
			18.0	2540.3	2.85	61.9
			20.0	2579.8	2.90	63.0
		定压	14.6	2472.1	2.73	59.2
	15	混合	20.0	2587.8	2.89	62.7
3.5	15	混合	20.0	2527.6	3.29	61.2
			22.0	2563.7	3.34	62.2

因此我们需要对理想循环计算指示热效率的过程做出改进，来提高指示热效率的计算精度，然而现阶段的计算缸内压力曲线都需要求解微分方程，虽然该过程能够很好地反应缸内工作过程，但是由于其输入参数多，求解耗时，难以满足简单计算油耗的要求。因此本文研究出一种全新的通过很少的输入重构涡轮增压柴油机的缸压曲线的方法，再由缸压曲线计算指示功和指示热效率。本方法对缸压进行分段重构，将重构过程分为以下几步：

### ● 压缩过程

压缩过程和膨胀过程均采用多变过程来重构：

$$pV^n = \text{Const} \quad (9)$$

对于大多数燃料来说，多变指数取值范围为 $1.3 \pm 0.05$ ，通常膨胀过程的多变指



数要大于压缩过程，这是因为膨胀过程温度更高，传热量更大，计算时可取压缩过程  $n=1.3$ ，膨胀过程  $n=1.33$ 。以进气门关闭时刻的状态为参考点，则压缩过程的压力和温度可以通过下式计算：

$$p_c(\theta) = p_{ivc} \left( \frac{V_{ivc}}{V(\theta)} \right)^{k_c}, T_c(\theta) = T_{ivc} \left( \frac{V_{ivc}}{V(\theta)} \right)^{k_c-1} \quad (10)$$

其中进气门关闭时刻的温度取决于新鲜进气的温度、残余废气的温度和残余废气系数，通过下式估算：

$$T_{ivc} = T_{im}(1-x_r) + x_r T_r \quad (11)$$

其中  $T_{im}$  为进气管内的温度， $x_r$  为残余废气系数， $T_r$  为残余废气温度。

由式(10)可以作出压缩过程的压力重构的曲线，如图 3 所示

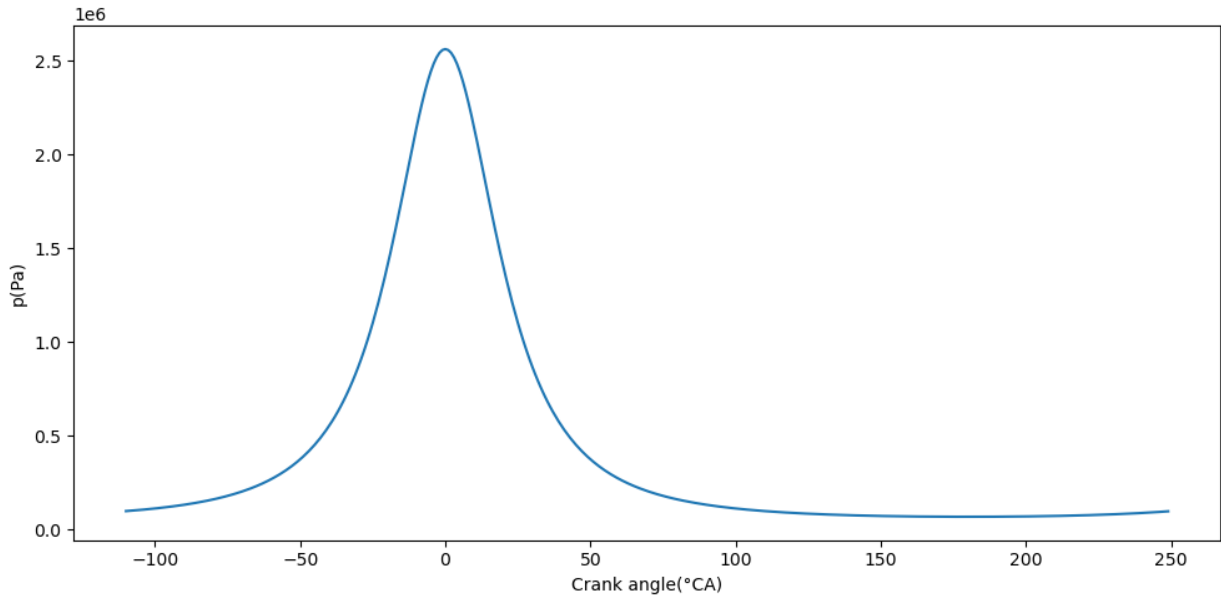


图 3 压缩过程压力重构曲线

#### ● 燃烧阶段

对于理想的 Diesel 循环，放热过程看作一个等容和等压的放热过程，在等容阶段有：

$$m_f H u dx = u m_f dx + m du = u m_f dx + (m_3 + m_f x) c_v dT \quad (12)$$

将上式两边同除以燃油质量，移项后得到：

$$\frac{dT}{dx} = \frac{Hu - u}{c_v(\phi + x)} \quad (13)$$

常微分方程(13)中  $u = u(T, x)$ ,  $c_v = c_v(T, x)$ ，即比热力学能和定容比热都是温度和已燃分数的函数，初始条件为  $x = 0, T = T_3$ 。

对于等压放热过程可以列出微分方程：

$$m_f H u dx = h m_f dx + (m_3 + m_f x) c_p dT \quad (14)$$

分离变量后有：

$$\frac{dT}{dx} = \frac{Hu - h}{c_p(\phi + x)} \quad (15)$$

式(15)的初始条件为  $x = R_p, T = T_4$ 。解常微分方程(13)和(15)就可以得到燃烧后的温度。

### ● 膨胀过程

膨胀过程也可以看作一个多变过程，求得燃烧终点的温度后可以重构出膨胀过程的压力曲线：

$$p_e(\theta) = p_5 \left( \frac{V_5}{V(\theta)} \right)^{k_e}, T_e(\theta) = T_5 \left( \frac{V_5}{V(\theta)} \right)^{k_e - 1} \quad (16)$$

### ● 燃烧阶段压力重构

燃烧阶段的缸内压力曲线采用 Wiebe 函数插值的方法对压缩阶段和膨胀阶段的缸压进行插值，Wiebe 函数为：

$$PR(\theta) = \begin{cases} 0, & \theta < \theta_{SOC} \\ 1 - e^{-0.698 \left( \frac{\theta - \theta_{SOC}}{\Delta \theta} \right)^{m+1}}, & \theta \geq \theta_{SOC} \end{cases} \quad (17)$$

重构后的缸压：

$$p(\theta) = (1 - PR(\theta)) p_c(\theta) + PR(\theta) p_e(\theta) \quad (18)$$

经以上过程重构出来的缸压曲线如图 4 所示，将重构得到的缸压和原来的缸压曲线对比一下，如图 5 所示，发现吻合良好。对重构后的缸压曲线进行积分就能够得到该循环的指示功，用指示功除以燃料燃烧释放的能量就能够得到发动机的指示热效率。

然而，该模型中还需要很多的调节参数才能完成重构缸压的过程，如过量空气系数、燃烧效率、多变指数等等，这些参数均需要在数据库中或者用数据模型来求解，对于不同类型、不同年代采用不同技术的发动机，这些参数都是不同的，但是类型一致的发动机这些参数都是相近的，对数据库中的发动机进行分类，采用数据模型来预测这些参数是数据模型和机理模型耦合的关键点。

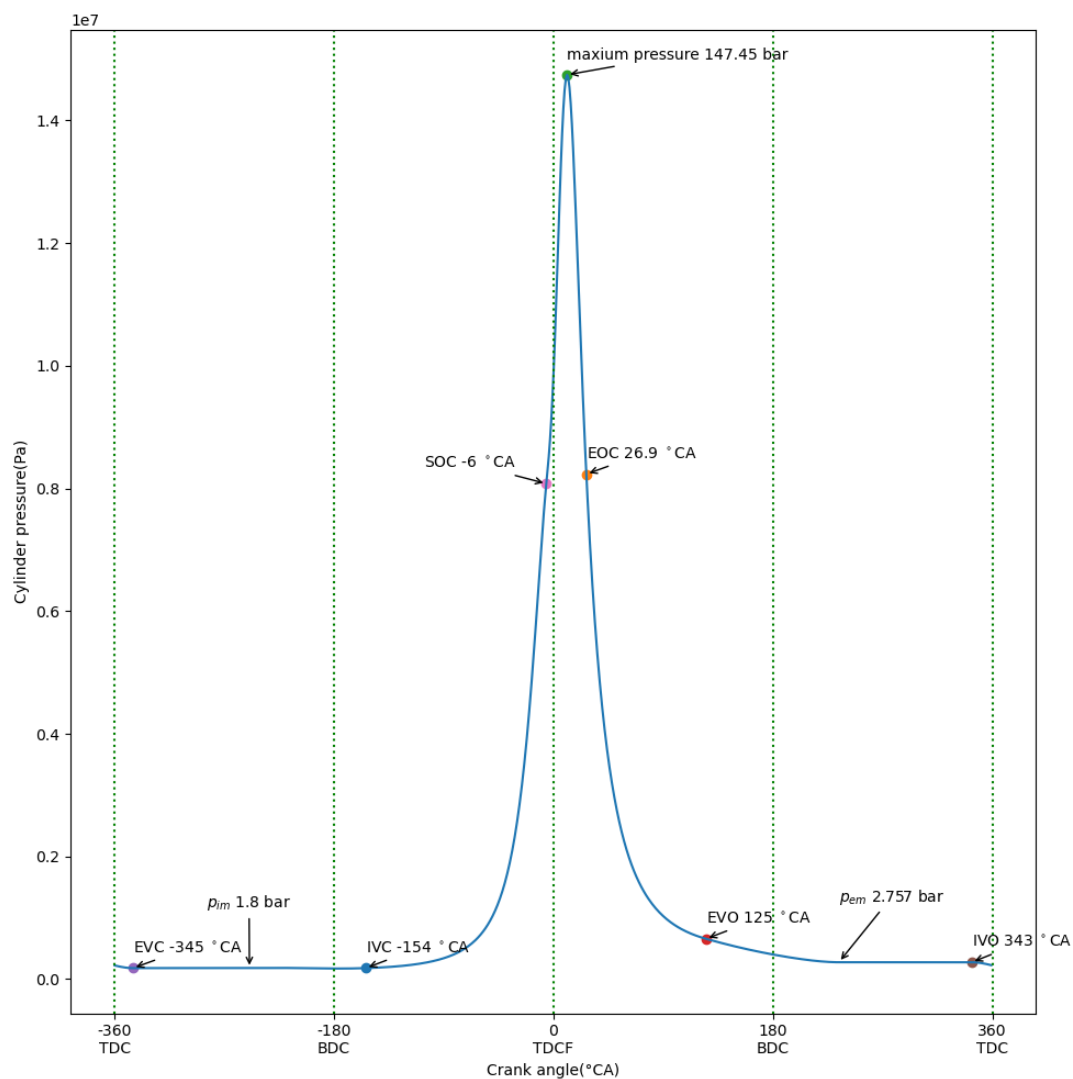


图 4 重构得到的缸压曲线

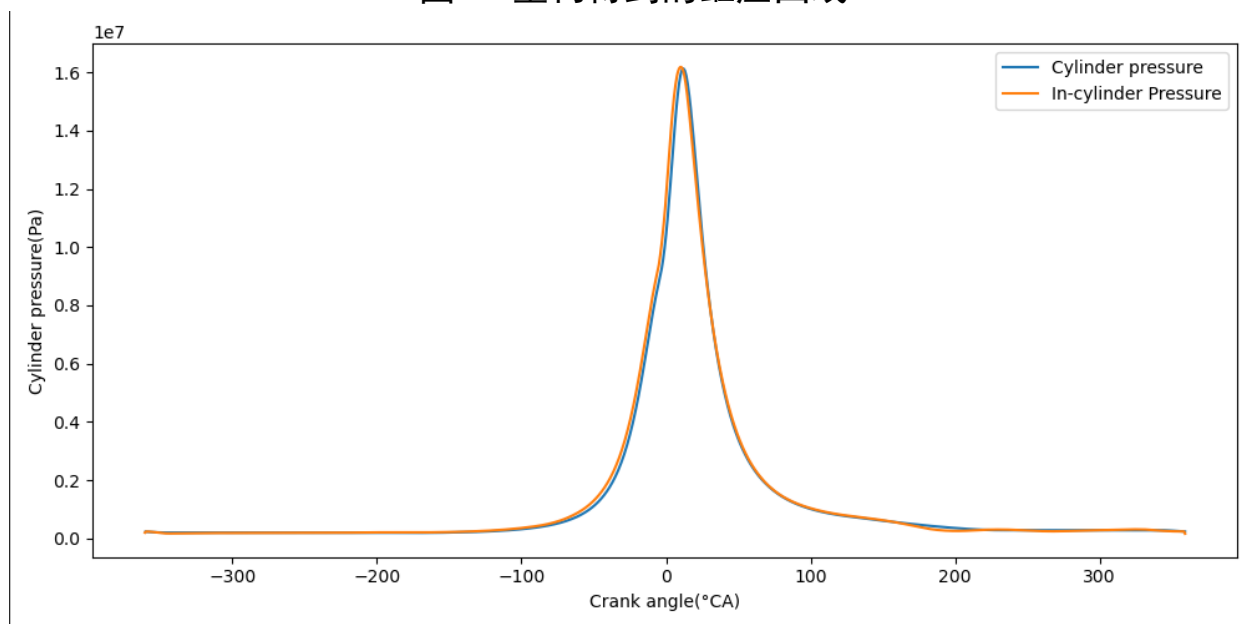


图 5 原始缸压和重构的缸压对比

#### 5.2.4 根据机械效率，指示热效率得到有效燃油消耗率

有效燃油消耗率和上述求得的指示热效率和机械效率之间的关系：

$$b_e = \frac{3.6 \times 10^6}{Hu \cdot \eta_i \eta_m} \quad (19)$$

(19) 式中  $b_e$  有效燃油消耗率  $[g/(kW \cdot h)]$ ， $Hu$  为柴油的低热值  $Hu = 43070 kJ/kg$ 。

#### 5.3 输入定义

表 4 发动机油耗计算知识模型输入定义表

输入量	类型	单位	格式	说明
气缸数	数值	$mm$	-	
缸径		$mm$		
压缩比		/		
冲程		$mm$		
标定转速		$r/min$		
标定功率		$kW$		

#### 5.4 输出定义

表 5 发动机油耗计算知识模型输出定义表

输出量	类型	单位	格式	说明
燃油消耗率	数值	$kg/(kW \cdot h)$		

#### 5.5 实现过程定义

根据以上分析过程，采用 C 语言编程实现油耗计算的过程，计算的流程图如图 6 所示。

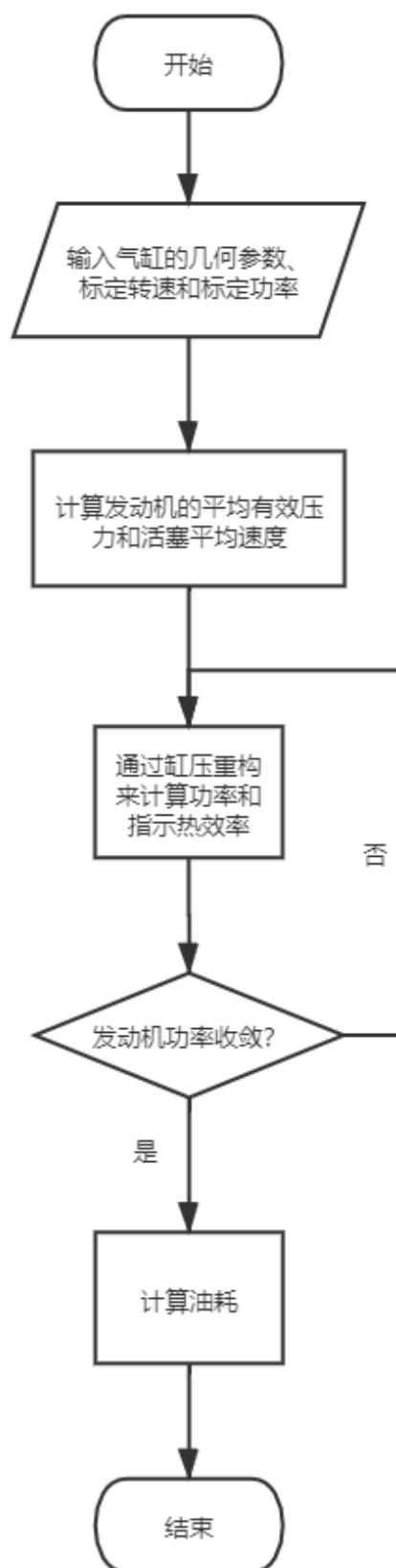


图 6 油耗计算流程图

## 5.6 油耗知识模型实现效果

下面在一台发动机上验证以上机理和数据耦合的模型的计算效果，模型的输入参数见表 6：

表 6 模型输入参数

输入参数	值
缸径	108mm
冲程	130mm
压缩比	18
转速	1500rpm
功率	127.4kW
气缸数	6

采用数据模型得到的数据见表 7：

表 7 数据模型得到的数据

数据库中数据	值
过量空气系数	1.63
充量系数	0.85

图 7 展示了实验测得的缸压随曲轴转角的变化关系图，图 8 展示了对缸压和气缸容积取对数画出的图像，该图中还将进气门关闭到燃烧始点、燃烧终点到排气门打开的两段曲线用最小二乘进行线性拟合，直线的斜率代表该段的多变指数，在图中均已经注明。

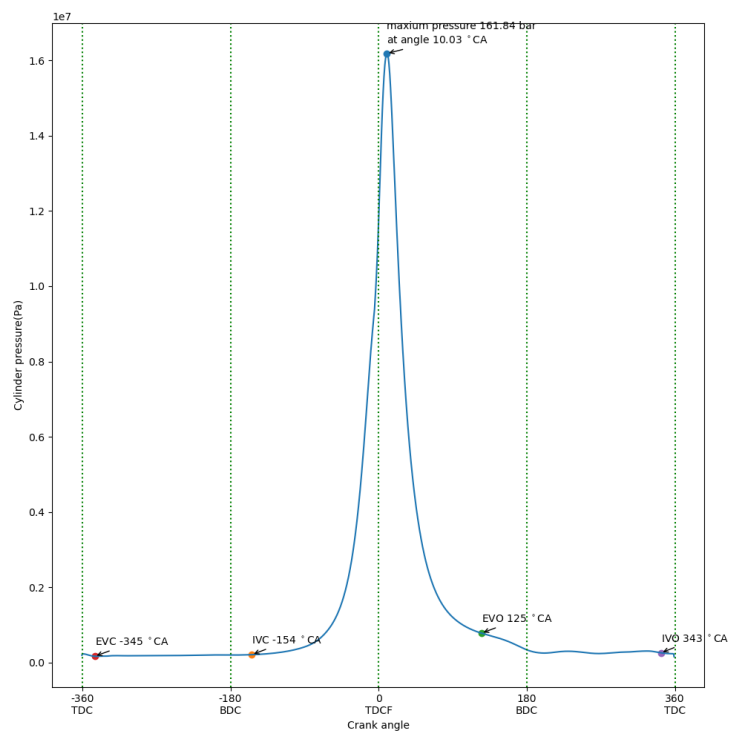


图 7 实验测得的缸压图

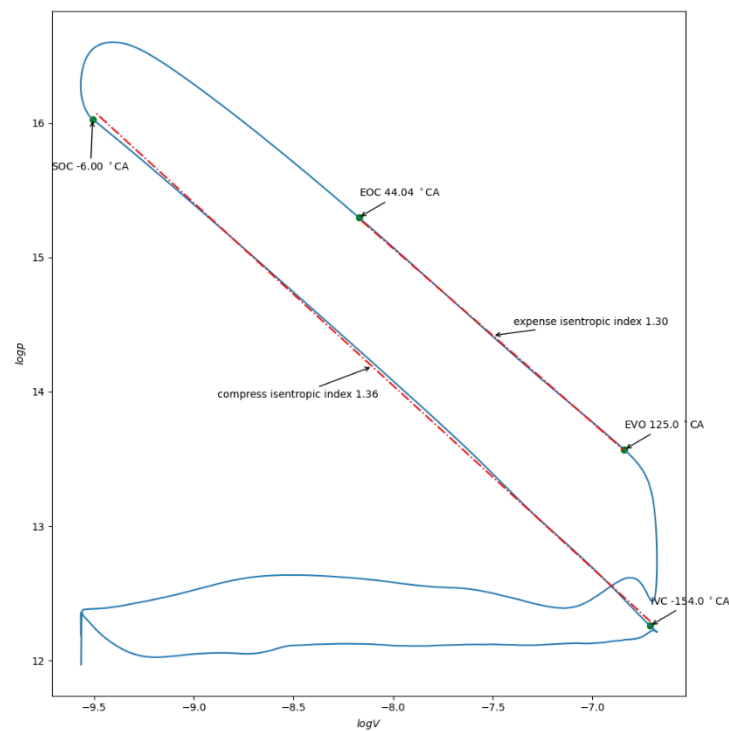
图 8 实验测得的  $\log p$ - $\log V$  图

图 9 展示了实验测得的缸压和采用数据和机理耦合模型重构得到的缸压的对比图。



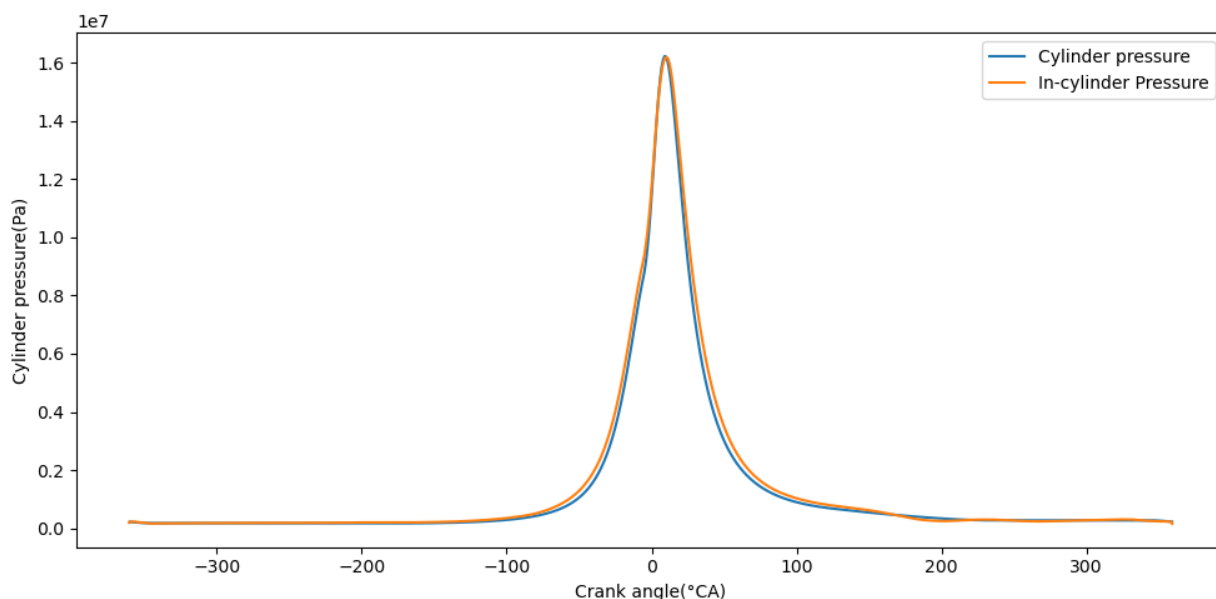


图 9 某机型实验测得的缸压和重构得到的缸压对比图

表 8 展示了使用该模型计算得到的油耗和实验测得的油耗的对比结果，可以看出，改进后模型能够准确的预估发动机的油耗。

表 8 计算结果和实验值的对比

计算油耗值	实验油耗值	误差
210.0	213.5	1.6%

## 6 总结

本规范定义了知识模型化的过程，明确了模型化过程所需的流程：知识概述、术语定义、模型 IPO 表、分析原理和模型、输入定义、输出定义和实现过程定义。阐述了知识获取和知识表示的方法，利用知识结构化和非结构化的存储形式储存知识，构建了内燃机性能设计知识模型的数据库。突破了机理和数据耦合的关键技术要求。对通过本规范，可以将知识模型化的过程标准化，便于分工协作和 APP 软件的开发。

附表 1 内燃机性能设计知识术语定义

编号	名称	定义
1	指示功	内燃机完成一个工作循环工质向活塞传递的有用功
2	平均指示压力	单位气缸容积一个循环所做的指示功
3	指示功率	内燃机单位时间内所做的指示功
4	指示热效率	发动机实际循环指示功与所消耗的燃料热量的比值
5	指示燃油消耗率	单位指示功的耗油量
6	曲轴输出功率	转矩与旋转角速度的积
7	平均有效压力	可以看作一个假想的、平均不变的压力作用在活塞顶上，使活塞移动一个行程所做的功等于每循环所做的有效功
8	升功率	在额定工况下，发动机每升气缸容积所发出的有效功率
9	有效热效率	实际循环的有效功与所消耗燃料热量的比值
10	有效燃油消耗率	单位有效功的耗油量。
11	机械效率	有效功率与指示功率之比
12	充量系数	发动机的实际进气量与进气管状态下充满发动机工作容积时气体的质量之比

附表 2 知识模型输入定义表

输入量	类型	单位	格式	说明
标定功率	数值	kW	—	
标定转速		r/min		
最大扭矩		Nm		
最大扭矩转速		r/min		
气缸数				
增压器个数				
缸径		mm		
冲程		Mm		
标定点总过量空气系数				
最大扭矩点总过量空气系数				

输入量：输入的参数的名称。

参数类型：与参数名称对应，参数类型包括数值、文本、角度、逻辑等。

参数单位：与参数名称对应的参数单位，如:mm、MPa、r/min、mm<sup>3</sup>等。

格式：针对非手动输入。需要明确输入文件的格式。

说明：输入参数的简要描述。

附表 3 知识模型输出定义表

输入量	类型	单位	格式	说明
标定点增压压比	数值	—	—	
最大扭矩点增压压比		—		
最大扭矩点涡轮膨胀比		—		
标定点涡轮膨胀比		—		
最大扭矩点涡轮功率		kW		
标定点涡轮功率		kW		
最大扭矩点涡轮当量流通面积		cm <sup>2</sup>		
标定点涡轮当量流通面积		cm <sup>2</sup>		

输入量：输入的参数的名称。

参数类型：与参数名称对应，参数类型包括数值、文本、角度、逻辑等。

参数单位：与参数名称对应的参数单位，如:mm、MPa、r/min、mm<sup>3</sup> 等。

格式：针对非手动输入。需要明确输入文件的格式。

说明：输入参数的简要描述。