



21世纪

高等学校精品规划教材

内燃机课程设计

高文志 主 编

李明海 袁文华 副主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

李俊卿于1935年春，随陈鹤良由南平赴，朱家已逃往南平县署乘其隙内附在朱家并不
 久亦因陈鹤良被陈鹤良所杀，逃往已往南平县署乘其隙内附在朱家并不
 李俊卿于1935年春，随陈鹤良由南平赴，朱家已逃往南平县署乘其隙内附在朱家并不
 李俊卿于1935年春，随陈鹤良由南平赴，朱家已逃往南平县署乘其隙内附在朱家并不

高等学校精品规划教材

内燃机课程设计

圖 5 (C) (b) 的變態

高文志 主 编
李明海 袁文华 副主编

内 容 提 要

本书主要介绍内燃机课程设计的目的与要求,并将内燃机构造、原理与设计的内容有机结合,阐述了内燃机设计过程中的热力过程计算与分析、曲轴轴系及配气机构动力学计算与分析、典型零部件的受力与强度分析、内燃机主要零部件的结构及设计要点。书中的2100T柴油机整机纵横剖面图、各个零部件的工程图可以作为课程设计的参考图纸。

本书紧密联系工程实际,特别适用于本科生综合工程训练教学环节,也可作为动力工程类、汽车工程类专业本科生内燃机课程设计指导书,还可作为动力机械工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

内 燃 机 课 程 设 计 / 高文志主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 8
21世纪高等学校精品规划教材
ISBN 978-7-5084-7773-2

I. ①内… II. ①高… III. ①内燃机—课程设计—高等学校—教材 IV. ①TK4-41

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第159380号

书 名	21 世纪高等学校精品规划教材 内燃机课程设计
作 者	高文志 主编 李明海 袁文华 副主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 10 印张 237 千字
版 次	2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	20.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

前 言

内燃机作为一种高效、轻便的动力机械，在汽车、农业机械、工程机械、铁路机车、舰船等领域应用广泛。它的保有量在动力机械中居首位，在人类生活中占有非常重要的地位，特别是在我国汽车工业高速发展的今天，其重要性尤为突出。

在全国设有内燃机专业方向的高校中，很多都安排“内燃机课程设计”这一实践性教学环节，旨在通过课程设计使学生应用、巩固、丰富、提高所学内燃机专业知识，加深对所学理论知识的理解，获得与专业有关的实践经验，培养学生的实践能力和专业技能。但是，有关内燃机实践教学类教材不多，不能满足内燃机课程设计教学的需求。

内燃机专业方向毕业的学生中，大部分到企业从事内燃机的设计开发工作，学校应该给学生进行该方面研究开发锻炼的机会，本书就是为这个目的而编写的。编写组由3所高校的教师组成，从事内燃机设计开发工作多年，希望能编写一本能适应内燃机课程设计需要的教材。

本书共8章，第1章为绪论，介绍内燃机设计开发的要求及开发流程；第2章为内燃机工作过程计算与分析，其目的是确定内燃机气缸内的气体压力、温度、动力性能及经济性能，为参数选取和动力及机械强度计算奠定基础；第3章为内燃机的平衡计算与分析，主要阐述曲轴轴系的动力学分析方法；第4章为内燃机的机体、缸盖与气缸套，主要讲述机体、缸盖与缸套的设计要点；第5章为活塞、连杆与曲轴，讲述活塞、连杆与曲轴的设计要点；第6章为配气机构设计，阐述内燃机配气系统中凸轮轴的凸轮型线种类及具体设计方法，配气机构的动力学分析方法；第7章为燃油供给系统设计；第8章为2100T柴油机主要技术参数及图纸，系统地反映了各个零件的尺寸与结构及各个零件的装配位置，使学生对发动机的整体结构及设计细节有一个全面的了解。上述内容中，第2~8章，每章内容都可以作为课程设计的一个专题，可以分组分专题进行，每组完成一个专题，最终形成一台整机的设计方案。

本书第1、3、4、5、8章由天津大学高文志编写；第6、7章由大连交通大学李明海编写；第2章由邵阳学院袁文华编写。

本书在编写过程中参考了大量著作、资料、样本、说明书及科技文献，在此向有关人员表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥和错漏之处，恳请读者批评指正。

编者

2010年1月

目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 内燃机课程设计的目的与要求	1
1.2 内燃机的设计要求	1
1.3 内燃机的主要结构尺寸	5
1.4 内燃机的开发流程	6
1.5 内燃机课程设计的内容	10
第 2 章 内燃机工作过程计算与分析	11
2.1 柴油机工作过程的数学描述	11
2.2 $\frac{dQ_b}{d\varphi}$ 、 $\frac{dQ_w}{d\varphi}$ 、 $\frac{dm_e}{d\varphi}$ 、 $\frac{dm_a}{d\varphi}$ 、 $\frac{dV}{d\varphi}$ 、 U 及 C_v 的确定	14
2.3 柴油机性能参数的计算	17
2.4 输入的柴油机主要技术参数	18
2.5 计算结果	18
第 3 章 内燃机的平衡计算与分析	21
3.1 曲柄连杆机构的受力分析	21
3.2 曲轴的平衡分析	25
第 4 章 内燃机的机体、缸盖与气缸套	35
4.1 机体的结构及设计要点	35
4.2 气缸盖的结构及设计要点	39
4.3 气缸套的结构及设计要点	40
第 5 章 活塞、连杆与曲轴	42
5.1 活塞结构	42
5.2 活塞材料	43
5.3 活塞的结构设计	44
5.4 连杆的结构设计	47
5.5 曲轴的结构设计	49

第 6 章 配气机构设计	56
6.1 配气机构的总体设计要求与概述	56
6.2 配气机构的总体布置	57
6.3 凸轮机构运动学和凸轮型线设计	59
6.4 内燃机配气机构的动力学	72
6.5 气门组的结构设计	76
6.6 气门传动组的设计	80
第 7 章 燃油供给系统设计	84
7.1 燃油供给系统的概述及主要性能指标	84
7.2 喷油泵	85
7.3 出油阀	97
7.4 喷油器	113
第 8 章 2100T 柴油机主要技术参数及图纸	123
8.1 2100T 柴油机主要技术参数	123
8.2 2100T 柴油机参考图纸	123
参考文献	152

第1章 绪论

1.1 内燃机课程设计的目的与要求

内燃机课程设计是十分重要的实践性教学环节,通过课程设计,使学生了解内燃机设计的程序和方法;掌握结构设计的基本理论、辅助系统设计及零部件的配套、选型基本原则;了解内燃机中热能转变为机械功的基本规律,研究内燃机的进气、压缩、混合气形成和燃烧、膨胀和排气等过程,掌握提高内燃机动力性、经济性的途径,为内燃机设计、选型、正确使用和改进打下基础。

通过内燃机专业课程设计使学生应用、巩固、丰富、提高所学内燃机专业知识,加深对所学理论知识的理解,获得与专业有关的实践经验,培养学生的实践能力和专业技能。学生针对某个具体的课程设计内容,边做边学,锻炼独立进行内燃机设计开发的能力。

通过内燃机专业课程设计,应该能够达到以下基本教学要求。

(1) 掌握内燃机设计的基本要求和方法,了解内燃机现代设计理论和方法的基本内容和实际应用。

(2) 能正确分析内燃机各主要零件所受载荷的大小和性质,掌握其工作特点和设计要求,掌握基本尺寸和结构的确定原则及计算方法,了解有关的新技术和发展趋势。

(3) 掌握内燃机的平衡概念和分析方法及其改善途径。

(4) 掌握内燃机对润滑、冷却和起动系统的基本要求,了解各零部件的主要性能,并能正确地评价和选用。

(5) 熟悉内燃机工作过程,掌握各参数对工作过程的影响,掌握提高内燃机动力性、经济性的措施。

(6) 熟悉内燃机的性能指标及内燃机特性与匹配。

1.2 内燃机的设计要求

1.2.1 功率和转速

使用者对内燃机首要的要求是应该能够在规定转速下发出所要求的功率。转速和功率的具体数值是根据用途来确定的,因而在设计任务书中总是作为原始数据而给定的。

为了标明内燃机在使用中可以发出的功率,生产厂在铭牌上标注机器的标定功率。按GB 1105.1—87的规定,内燃机的功率可按以下4种不同情况进行标定,所生产的内燃机应该能够在规定的条件下可靠地发出所标定的功率。

(1) 15min 功率。内燃机允许连续运转 15min 的标定功率。它适用于汽车、摩托车等用途的功率标定。

(2) 1h 功率。内燃机允许连续运转 1h 的标定功率。它适用于工业拖拉机、工程机械、内燃机车、船舶等用途的功率标定。

(3) 12h 功率。内燃机允许连续运转 12h 的标定功率。它适用于农用拖拉机、内燃机车、内河船舶等用途的功率标定。

(4) 持续功率。内燃机允许长期连续运转的标定功率。它适用于船舶、电站、农业排灌动力用途的功率标定。

当同一种内燃机用于不同用途时,工厂可以相应地进行不同的标定,并设法限制内燃机在超过标定值的情况下工作,以保证工作的可靠性和防止其他性能指标的恶化。

内燃机的有效功率 P 可按下式计算

$$P = \frac{p_e i V_h n}{30 \tau} \quad (\text{kW}) \quad (1-1)$$

$$= 0.7854 \times 10^{-3} \times \frac{p_e C_m i D^2}{\tau} \quad (\text{kW})$$

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} S \quad (1-2)$$

式中 p_e ——平均有效压力, MPa;

i ——气缸数;

V_h ——气缸工作容积, L;

n ——转数, r/min;

D ——气缸直径, mm;

S ——活塞行程, mm;

τ ——冲程数, 四冲程机 $\tau=4$, 二冲程机 $\tau=2$;

C_m ——活塞平均速度, $C_m = \frac{Sn}{30} \times 10^{-3} \quad (\text{m/s})$ 。

当其他条件相同时, p_e 高则 P 大。由于 $p_e = p_i \eta_m$ (这里 p_i 为平均指示压力, η_m 为内燃机的机械效率), 所以提高 p_e 须提高 p_i 和 η_m 着手。要想提高 p_i 就须解决两个方面的问题: 一是如何使更多的空气充入气缸, 并使更多的燃料能在气缸内有效地燃烧; 二是如何使内燃机的零件能够在随 p_i 而增高的燃烧温度工况下可靠地工作。

机械效率 η_m 反映了内燃机在运转过程中本身的机械功损失。它包括吸气和排气的泵吸损失、零件作相对滑动时的摩擦功损失和驱动辅助机构所消耗的机械功。汽车用内燃机各部分机械损失所占的大约百分比见表 1-1。

表 1-1

汽车用内燃机各部分机械损失所占百分比

损 失	汽油机	柴油机
活塞、活塞环和气缸的摩擦功	44.0	50.0
连杆大头轴承和主轴承	22.0	24.0
换气	20.0	14.0
驱动气门机构	8.0	6.0
驱动油泵、水泵、燃油泵等	6.0	6.0
总 计	100.0	100.0

对于柴油机来说,采用废气涡轮增压是大幅度提高平均有效压力 p_e 的有效措施。由式 (1-1) 可看出,当其他条件相同时,转速 n 越高内燃机的功率也越大。转速 n 与内燃机极限功率之间的关系如图 1-1 所示。

在理想情况下,如果每循环中充入气缸的工作气量(用充量系数表示)和燃烧的有效程度都保持为 100% 不变,则当内燃机的转速提高时,机器所发出的指示功率 p_i 将成比例地直线上升。实际上,由于气体在进气和排气管路中流动时管路对流动都有阻力,当转速增加时,随着气体流速的增大,流动阻力也随之增大,结果使充入气缸的工作气体减少,再加上转速高时燃烧情况可能恶化,从而使得内燃机实际发出的指示功率将按曲线 p_i 变化。随着转速的增加机件的机械功损失也很快增加,如曲线 p_m 所示。内燃机可能发出的有效功率是 $p = p_i - p_m$ 。所以,当内燃机的转速提高到某一数值 n_d 时将会出现 $p_i = p_m$ 的情况,此时内燃机的机械效率 $\eta_m = 0$,所有指示功率都消耗于本身的机械功损失上,则有效功率等于零。一台内燃机在空车(不带负荷)情况下加大油门空转时就是这种情况。为了使设计的内燃机能够输出有效功率,并使之具有可以采纳的有效燃料消耗率,其机械效率 $\eta_m = \frac{p}{p + p_m}$ 应不小于 0.6,这就从工作过程的角度确定了内燃机的最高工作转速,如图 1-1 中的 $n_{\max}$ 所示。

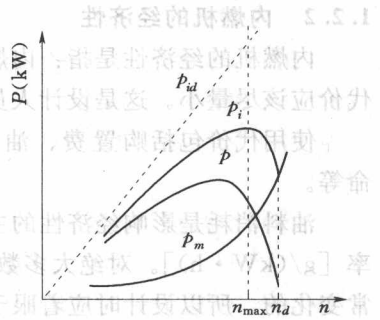


图 1-1 内燃机功率与转速关系

内燃机的各个零件应该保证能够在这个最高工作转速下长期可靠的运转。应该了解,随着转速的提高,单位时间内气缸所完成的工作循环次数增加,它使零件所承受的机械负荷和热负荷增加,并且由于机件之间相互摩擦的线速度增加,机件所承受的磨损也随着加剧,因此必须采取相应的措施保证零件能在这样的条件下可靠工作。内燃机的最低稳定转速也是受到限制的。

内燃机的工作转速范围应适合动力装置的要求。驱动交流发电机的内燃机,其转速应使发电量具有规定的频率,即

$$n = 60 \frac{f}{z}$$

式中 f ——交流电的频率,我国的标准频率规定为 50Hz;

z ——发电机磁极的对数。

如果所设计内燃机的最高转速为 2800r/min,并与有两对磁极的发电机配套,而内燃机只能在 1500r/min 的转速下工作,不但内燃机的潜力不能发挥,而且机组也比较笨重。否则,就必须选择工作转速为 3000r/min 的内燃机,并与具有一对磁极的发电机配套。

此外,为了保持所发电流的频率恒定,还应该使内燃机的转速不随发电机负荷的变化而改变。特别是当发电机的负荷有突然大幅度变化时,内燃机的转速不应有大的波动。这些可以通过安装定速调速器来解决。

对于汽车、拖拉机和工程机械来说,要求内燃机的最大扭矩点出现在尽量低的转速下。

1.2.2 内燃机的经济性

内燃机的经济性是指：内燃机的使用价值应该尽量大，而为使用内燃机所必须付出的代价应该尽量小。这是设计人员应该争取的重要目标之一。

使用代价包括购置费、油料消耗、使用中的工作强度、维护修理费用以及使用寿命等。

油料消耗是影响经济性的主要部分。内燃机的燃油消耗率通常是指标定工况时的油耗率 $[g/(kW \cdot h)]$ 。对绝大多数使用情况来说，内燃机的工况不论是功率还是转速都是经常变化的，所以设计时应着眼于使得通常工况下的油耗率为最低。

现代内燃机的操纵是比较简单的，但维护和修理却需要技术，偏僻地区，维护与修理常常成为难题。针对这种情况，在设计现代的，尤其是大批量生产的内燃机时，如何简化维护与修理工作，也是应该考虑的重要内容。最理想的情况是做到能够废除维护，或者把必须的维护工作缩减成只是定期检查润滑系统或冷却系统。

所谓内燃机的使用寿命可以有不同的定义，即：

- (1) 无需进行第一次维护的累积使用时间。
- (2) 到必须取出活塞进行小修之前的累积使用时间。
- (3) 到必须将机器拆散进行大修之前的累积使用时间。
- (4) 直到机器进行了几次大修之后必须报废的累积使用时间。对于车用内燃机也可用行驶里程来代替时间。

另外，应设法使内燃机的修理工作简单易行。

1.2.3 内燃机的紧凑性

紧凑性指标是用来表征发动机总体结构紧凑程度的指标，通常用比容积和比质量衡量。

- (1) 比容积。发动机外廓体积与其标定功率的比值称为比容积。
- (2) 比质量。发动机的干质量与其标定功率的比值称为比质量。干质量是指未加注燃油、机油和冷却液的发动机质量。

比容积和比质量越小，发动机结构越紧凑。

1.2.4 内燃机的可靠性

工作可靠是内燃机应该具有的起码性能，否则其他性能都将无从谈起。

所谓工作可靠，是指机器在规定的条件范围内，运转时不因出现故障或由于零件损坏而被迫停车。在使用条件下，一旦发生这种停车事故有可能给生产，甚至生命和财产带来重大损失。

作为生产厂对用户的一种保证，常常规定出保证期，即在规定的期限内，机器可以无故障运转的最低累积时数。应该指出，此保证期只是机器能够确保可靠工作时数的下限。影响可靠性的因素是多方面的，如结构、工艺和材料等。机器内部清洗不净，残留有型砂和铁末，以及其他意想不到的事都可能是出现事故的根源。

有许多事故隐患甚至需要经过长期反复的实际运转才能逐个地发现和排除，因此积累经验是很重要的。

内燃机应该能够迅速而且可靠地起动，这也是一项重要性能。内燃机运转时所产生的

振动和噪声应该尽量小。内燃机的排气对大气的污染应该尽量小。经过百年来人们的不断努力，今日的内燃机已优于早期。与此同时，上述各项要求的水准也相应提高了，而且还提出了新的要求，例如关于排放与噪声方面的要求。

当着手设计一台具体的内燃机时，若想使之完美无缺地满足所有要求，也是不可能的，必须是有重点和有所侧重，否则就无从下手。正是由于这一原因，内燃机也就出现了机型上的差别，四冲程与二冲程、汽油机与柴油机、高速机与低速机、大型机与小型机、重型机与轻型机以及水冷机与风冷机等。

1.3 内燃机的主要结构尺寸

内燃机的主要尺寸包括：气缸直径 D 、活塞行程 S （或曲柄半径 R ）、连杆长度 l 和缸心距 L_c 等；主要结构参数包括：行程缸径比 S/D 、连杆比 $\lambda = R/l$ 、缸心距缸径比 L_c/D 、气缸数 i 和气缸夹角 ϕ 等。

当所设计内燃机的标定功率 p 和转速 n 确定之后，根据估计的 p_e 值由式（1-1）可得所必需的总工作容积 iV_h 。在估计 p_e 值时，一方面应考虑自己技术力量所可以达到的数值，另一方面也应留有余地。应该注意，标定功率并不是机器所能发出的极限功率。

1.3.1 缸径和缸数

确定缸数 i ，除了考虑内燃机动力学和曲轴的扭转振动方面的问题之外，还应注意以下问题。

- (1) 汽油机，由于燃烧过程的特点，气缸直径不能过大，一般不大于 120mm。
- (2) 压缩点火式内燃机，同样由于燃烧过程的特点，气缸直径不能过小，一般应不小于 85mm。
- (3) 当缸径 D 确定后，根据关于 S/D 值的选择可确定行程 S ，从而确定了一个气缸的活塞排量。
- (4) 缸径越大则一个气缸的往复运动部分的质量就越大，惯性力将限制转速的提高。
- (5) 缸数少则机器结构简单，但结构就越不紧凑，运转中的振动大且平稳性差。

1.3.2 比值 S/D

对于高速柴油机来说 S/D 值在 0.9~1.15 范围内，中速柴油机为 1~1.25，低速柴油机则为 1.6~2.2。汽油机的 S/D 值则在 0.8~1.2 范围内。

S/D 值小，则行程 S 比较短。转速高的内燃机，采用小 S/D 值的原因主要是 D 值较大可以方便气门的安排， S 值小则当活塞平均速度 C_m 一定时可以提高转速 n 。

活塞平均速度 C_m 是个重要参数。由式（1-1）可以看出， C_m 也是与内燃机的 P 值有关的参数。由于 C_m 直接关系活塞相对于气缸壁的滑动速度，从而也就直接关系到内燃机的寿命和工作可靠性。此外， C_m 越高，则活塞作往复运动的惯性力也越大，而且 C_m 越高，则换气时流过气门的气体平均流速也越高。所有这些都限制了采用过高的 C_m 值。

由内燃机的使用寿命和工作可靠性考虑，现代各类内燃机的最高 C_m 许用值（m/s）如下所示：

高速运输用内燃机 10.0~12.5 (13.5)

要求使用寿命长的高速内燃机	8.0~10.5
中速柴油机	7.0~8.5
低速柴油机	4.0~6.5

C_m 选得过低是不恰当的。首先是对于具有给定工作容积的内燃机来说,所发出的功率将过小,即每升工作容积所能发出的功率 p 将过低,这是不利的;其次, C_m 过低对于像活塞环和气缸壁这样的摩擦副,由于在摩擦表面间不能建立起有效的润滑油膜而使磨损加剧。

所以对于转速低的内燃机来说必须采用大的 S/D 值。

在具体选择 S/D 值时,还应注意尽量使气缸的散热面积与气缸容积之比为最小,便于燃烧室的设计以及使整台内燃机的尺寸最为紧凑。

有的系列产品,一种缸径,却有两种行程。这样做有的是要通过加长活塞行程使所设计的内燃机多发出一些功率,有的则是要通过减短活塞行程来使转速提高,却不使 C_m 增大太多。

1.4 内燃机的开发流程

1.4.1 满足用户需要

在设计开发一款新的发动机之前,必须首先明确用户的需要和所要投放的市场需要。应该清楚所要设计的发动机是做什么用的,是多种用途还是单一用途?用户期待的性能如何?尽管用户不能细致地描述他们期待的性能,但是他们清楚所使用的产品性能是否已满足了他们的要求。性能指标包括有效功率、有效功率和最大扭矩之间的转速范围、在这一转速范围内扭矩的增高量、扭矩曲线与车辆传动系统的匹配以及瞬态响应速度等性能。

应该了解用户的进一步需求和期望是什么。例如,耐久性、燃料消耗、发动机重量、保养间隔、保养要求等。

设计者应该清楚哪些指标对用户来说最重要?用户的期望值是多少?为了使开发的产品具有市场竞争力,应该满足什么样的成本目标?与竞争者相比,产品有哪些优势?开发商应该分析研究市场的发展趋势,将来功率要求、设计要求及价格的走势。

1.4.2 初步的热力过程计算

根据用户需要,首先选择燃烧系统。选择柴油机还是汽油机?压燃式柴油机在燃油经济性、扭矩升高率和耐久性方面具有优势,而汽油机具有高功率密度、轻质量和低成本等优点,汽油机更容易满足严格的排放标准。

在确定了用户与市场所期待的性能指标后,必须预先进行初始的性能分析,确定能满足功率与转速要求的发动机排量。通过分析使燃料完全燃烧所需的空气量来确定发动机的排量,同时也要初步估算发动机的燃油效率和容积效率。还要把自然吸气发动机结构与小排量的装有涡轮增压器或机械增压器的发动机进行比较。

在进行排量估算时需要与发动机的结构分析紧密结合,除了总排量外,还需要选定气缸数、缸径与行程,这些初步设计既影响发动机的结构设计也影响发动机的性能特性。

1.4.3 机械计算

前面提到的性能分析和外形设计确定了发动机的气缸数、缸径和行程。这些参数将决定发动机的外形。很多发动机的外形结构取决于发动机的用途。发动机的外廓尺寸多大？是否到达最小化？例如，如果为了满足车辆空气动力学要求，使高度最小化很可能是最重要的。如果发动机是用于摩托车，宽度可能是关键。在决定气缸数和结构时，以上这些问题以及发动机的平衡、成本、复杂性、转速和可保养性都必须考虑。

1.4.4 概念设计

在设计的初级阶段确定了缸心距、机体高度等关键尺寸，这些尺寸将影响发动机的设计和耐久性，发动机这些关键尺寸的确定应着眼于优化设计，因为这些尺寸对工作载荷大小、载荷合理分布及提高发动机的耐久性都有十分重要的影响。例如，缸心距影响曲轴长度、刚度、主轴承和连杆轴承的承压面积，也影响缸盖螺栓间距与气缸垫密封，影响机体结构及主轴承螺栓和缸盖螺栓的载荷分布，影响冷却水套设计、冷却液流通面积、冷却液在机体与缸盖之间的热传递。这里只列举了缸心距这个例子，类似的还有机体高度、凸轮轴位置及其他的设计尺寸。设计者要与进行初始结构设计及振动噪声分析的工作人员紧密配合来完成发动机设计的最优化。

在概念设计阶段还要确定缸盖和机体的材料，这将影响发动机的设计。例如，选用铝作为曲轴箱的材料，就要选用压铸的铝油底壳以提高结构刚度。

1.4.5 热力过程分析

开发一款新的发动机，缩短开发周期减小成本的基础工作是应用计算工具提前对发动机的性能进行分析，采用有效的分析工具对发动机的燃烧室和进排气系统进行优化。发动机工作过程模拟的一维模型通常用来开发进排气系统。配气系统的凸轮型线、进排气门的开启和关闭时刻可以用这种模型优化。如果采用机械增压或涡轮增压器，也可以用一维模型对增压系统进行性能分析。在概念设计阶段也可以用多维 CFD 模型对涡轮增压器进行分析。

目前，有多维模型用于燃烧过程分析和燃烧室设计，可以对燃烧室的几何形状、火花塞的位置、喷油器的位置及喷雾的几何形状等进行优化，同时也可以估算活塞和缸盖的几何形状。可以研究进气过程中产生的空气运动和诱导的涡流或紊流。

发动机的性能分析贯穿于整个发动机开发过程中。通过把模拟分析与试验结果进行对比，对模型及参数进行修正后，用模拟模型可以快速估算并判断设计改善与否，帮助指导设计向哪个方向改变。发动机投产后，进一步的改进工作也需要模拟工具的支持。

1.4.6 机械分析

在发动机开发中，除了性能分析，各种机械结构分析工具在确定设计方向也是必不可少的。有限元和边界元技术用于估算在机械载荷和热负荷作用下零部件的疲劳极限和耐久性，也可估算气缸盖螺栓、连杆轴承盖和主轴承盖螺栓预紧载荷以及气缸垫密封性等。动力学模拟技术用于分析凸轮轴及配气系统，分析曲轴或凸轮轴的扭转振动。CFD 技术用于分析冷却液的流动，实现冷却液的流动路径最佳化，并分析水套的布置情况。流体计算也可用于开发润滑系统。

尽管详细的结构分析增加了开发初期的时间和资源投入，但从整个开发过程来看，还

是会大大缩短开发周期和降低开发成本的。因为制造与设计成本随时间的增加而增加,在发动机制造前通过模拟分析改进设计当然会减小成本。一旦发动机开始制造再改变设计则会大大增加开发成本。

在整个发动机开发过程中必须不断维护性能分析模型,如果结构设计发生改变,性能分析模型也应作相应变化。可以用发动机试验来确定边界条件,提高模型的精确性。在发动机开发过程中,或投入生产后,很快对发动机性能进行正确估算,从而提出改进措施。在发动机零部件或辅助系统开发过程中,性能分析、结构设计和模型建立等工作是并行的。

1.4.7 声学特性分析

对于车辆用的发动机,越来越关注噪声、振动及舒适性。在设计与安装过程中,诸多因素都会影响到发动机的振动与噪声。发动机的结构特征将决定哪些力平衡,哪些力不平衡,能够传递给车辆的不平衡力的幅值与频率大小。气缸体和气缸盖的结构将影响噪声向其他零件的传递以及气缸体与气缸盖本身表面的声辐射。因此要进行模态分析,确定使噪声传递与辐射放大的临界频率。通过模态分析,改变设计来降低振动幅值,使振动的固有频率远离发动机的常用工作转速。用于噪声、振动及舒适性分析的模型与性能分析模型同样重要。

1.4.8 制造加工

当发动机的结构尺寸确定后,开始考虑产品的铸造、锻造和加工过程,也要考虑装配线的设计、质量控制程序、试验要求、设备的购买与安装等。

根据前期的市场调研,确定生产容量和设计寿命,这会影响加工过程设计。发动机的大部分零部件通过专业工具加工,这将大大增加生产效率并降低单件的加工成本,然而会增加加工投入。要求很多尺寸和设计特性在加工制造过程中就要确定,如果进行再改造,成本非常高。

1.4.9 细节设计

细节设计包括从外形设计到尺寸与公差设计,完善整个设计过程的细节,包括确定制造过程、材料及质量控制过程的技术参数。

细节设计的另一个重要方面是技术文件准备、零件供应商的确定,每一个供应商都应具有自己的零件编号与跟踪系统。新发动机可能使用一些市场上现有的零件,但大部分是新开发的零件。发动机的每个零件都需要以各种方式跟踪,包括成本、产品目录和装配线上的供应跟踪,以及投入市场后的售后服务零部件的供应跟踪。

1.4.10 模拟试验

在不断提高性能分析能力过程中,采用试验验证和进一步完善分析模型的方法十分重要。在产品样机加工前,通常进行模拟试验,这种试验是采用已有的发动机,换用新开发的主要零部件,代替计划开发的样机进行试验。例如,采用已有发动机的曲轴箱,而活塞、气缸盖和进排气系统改用新设计的,这可以把进排气系统和燃烧系统开发安排在零部件开发过程中,随着分析工具的不断完善,模拟试验会逐渐减少,从而降低开发成本。

1.4.11 零部件试验

零部件开发与耐久性验证。下一个阶段任务是对加工完成后的零部件或辅助系统进行

试验, 尽管这种试验比理论分析所需要的费用高, 但是所需费用远远低于发动机试验。零部件试验的核心任务是开发能精确模拟发动机主要零部件承受的载荷试验。当零部件的安装和边界条件确定后, 可以对零部件施加高于发动机工作频率的载荷, 在发动机开发过程中, 很多零部件在试验前就已经进行很好地优化了。

1.4.12 样机试制

通过初期的理论分析, 完成整机设计后, 试制一台或一组样机。根据计算机形成的零件数模进行铸造, 由钢毛坯加工曲轴、连杆和凸轮轴。这些样机大部分用于性能和可靠性分析, 有一些可能应用于车辆, 有时几个样机同时制造, 以便比较进一步优化后的样机性能, 有时利用最新的样机进行场地试验以便让用户评价。

样机制造, 特别是后期的样机制造, 也提供了对制造与装配工艺的研究机会, 可以发现一些不容易装配的设计, 并提出合适的改进方案, 以克服发动机生产上的困难。

1.4.13 性能与排放试验

性能与排放试验是在发动机样机上进行, 样机试验取决于早期性能分析的精确性与细致程度, 取决于模拟试验提出的发动机改进方向。发动机开发过程中, 一个永恒的课题是不断提高发动机开发前期的分析能力, 使性能与排放试验工作最小化, 并使燃烧和性能收益最佳。

试验与最佳化过程可以在发动机实验台、底盘测功机或道路试验中完成, 特别是应用在车辆上的发动机, 其性能开发与最优化的还包括发动机与变速器匹配的最优化。

1.4.14 功能与耐久性试验

发动机性能试验验证了前期模拟分析与模拟试验, 由于有前期的性能分析与模拟试验, 因此减少了性能试验工作, 并在性能试验中降低了资源消耗, 减少了试验成本。大部分发动机制造商还设计了质量认证程序, 设计各种稳态和循环试验来估算某些特殊零件的耐久性。尽管当前趋于用理论分析与台架试验相结合的方法来估算发动机的耐久性, 但是有些耐久性考核还是要通过试验完成, 甚至有部分试验还需要在车上进行。

1.4.15 NVH 试验

发动机样机试验的另一个重要方面是关于噪声、振动与舒适性 (NVH) 试验。NVH 试验也是基于前期的模型分析基础上, 随着模型的不断完善, 试验所需的资源会越来越少。

NVH 试验是在半消声试验室中进行, 测量发动机周围各点的声压级。发动机的模态试验以及零部件对噪声的影响试验将在发动机动力台架上进行, 同时也要进行车辆的自由声场试验。

1.4.16 加工

发动机开发过程中一个关键环节是加工。在这过程中, 产品加工线将被确定, 在加工过程中不能有太大的设计变动。

1.4.17 预生产

在产品大规模投产前, 必须进行小批量的发动机生产, 保证在发动机装配过程中没有问题, 提供用于场地试验、顾客评价的发动机, 保证排放和噪声满足法规要求。

1.4.18 大规模投产 发动机开发的最终标志是产品投放市场。在仔细跟踪授权信息，并得到用户支持的情况下，产品生产量逐渐上升。

在大规模生产过程中继续进行发动机开发，但主要强调产品改善和降低成本，并尝试把新开发的发动机应用于其他车辆上，对发动机进行性能改进以提高市场潜力。例如，对发动机升级和性能改进，以便用于运动型或高性能轿车上等。

1.5 内燃机课程设计的内容

内燃机课程设计可以按分组专题形式进行，内燃机的设计包括机械分析、热力学分析、工作过程模拟、NVH分析与计算等多项内容。课程设计既可以是以内燃机原理课程为主的发动机工作过程模拟，通过工作过程模拟，分析发动机的各主要结构参数（缸径、行程、缸径行程比、配气相位、进排气管结构等）对发动机性能的影响规律，从而通过模拟计算优化发动机的主要结构参数，使发动机的性能达到最佳；也可以是以内燃机设计为主要内容的课程设计，例如，发动机的动力学分析、曲柄连杆机构的结构设计与分析、发动机整机结构分析及纵横剖面图的绘制等。

学时分配建议见表1-2。

表 1-2 学时分配建议表

编号	名 称	学时分配 (周)	编号	名 称	学时分配 (周)
1	内燃机热力过程分析	4	5	机体结构设计	4
2	内燃机动力学计算	3	6	缸盖结构设计	4
3	配气机构设计与动力学分析	4	7	发动机整机纵横剖面图绘制	4
4	曲柄连杆机构设计	4			