



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

内燃机设计

袁兆成 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



上海汽车工业教育基金会资助项目

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

内 燃 机 设 计

主 编 袁兆成
参 编 方 华 苏 岩
主 审 刘巽俊 钱耀义



机械工业出版社

本书讲述内燃机设计的基本理论、原则和方法。全书共分 11 章，内容包括内燃机曲柄连杆机构动力学、曲轴扭转振动理论、内燃机平衡的分析方法与平衡措施、配气凸轮的设计和机构动力学分析、主要零部件的设计原则、冷却与润滑系的设计参数选取原则等，在各章节中都结合现代设计理论、手段和工具的发展介绍了现代设计方法的应用。

本书为热能与动力工程专业本科生教材，也可供从事内燃机设计、制造和开发的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

内燃机设计/袁兆成主编. —北京: 机械工业出版社, 2008. 7
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 24277 - 2

I. 内… II. 袁… III. 内燃机 - 设计 - 高等学校 - 教材 IV. TK402

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 091828 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 蔡开颖 版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉
封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦
北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)
2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 12.25 印张 · 300 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-24277-2
定价: 23.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话: (010) 88379713
封面防伪标均为盗版

前 言

本书根据当前热能与动力工程专业本科生在学习内燃机专业课时缺乏内燃机设计教材,同时也是为了适应内燃机新结构、新设计技术的发展以及新材料、新工艺的应用现状而编写的。本书适用于热能与动力工程专业内燃机专业方向的本科生教学,主要介绍车用内燃机设计的基本方法和设计原则,内燃机各系统的运动学和动力学。内容包括曲柄连杆机构运动学、受力分析,内燃机平衡分析,内燃机曲轴系统扭转振动,配气凸轮设计方法、配气机构运动学和动力学,主要零部件设计,辅助系统主要参数确定原则等。在各部分内容中结合了各种现代设计方法的应用和作者长期从事内燃机设计研究的实际工作体会和经验。

由于课时有限,本书对一些内容只作了概括性的介绍,适合于课堂教学。有关的详细内容请参阅其他参考资料。

本书由袁兆成主编,其中第六章由方华编写,其余各章由袁兆成编写,全书的大部分插图由苏岩进行整理。刘巽俊教授和钱耀义教授担任主审,他们对本书进行了认真审阅并提出了宝贵的意见。

本书除得到机械工业出版社的大力协助和资助外,还获得上海汽车工业教育基金会的项目资助,在此一并表示真挚的感谢。

作者

本书主要符号表

符 号	名 称	符 号	名 称
a	活塞加速度	P_L	升功率
A	面积, 活塞顶投影面积	Q	热量
A_m	断面积	r	曲柄半径
A_f	气门开启通过断面积 (时间断面)	S	行程
C	刚度, 曲柄连杆机构往复惯性力, 常数	S_0	活塞环自由端距
C_0	机构刚度	T	绝对温度, 振动周期
C_s	弹簧刚度	v	速度
d	直径	v_m	活塞平均速度
D	气缸直径	V	体积
D_1	曲轴主轴颈直径, 风扇轮叶内径	V_h	单缸工作容积
D_2	连杆轴颈直径, 风扇轮叶外径, 曲轴销直径	W	机械功
e	偏心距, 轴的柔度	x	活塞运动位移
E	弹性模量	Z	气缸数
F_j	往复惯性力	α	曲轴转角, 曲柄转角, 过量空气系数, 攻角
F_r	旋转惯性力	β	连杆摆角, 材料膨胀系数
F_k	径向力	γ	V型发动机气缸轴线夹角, 气门锥角
F_t	切向力	δ	壁厚, 发动机运转不均匀系数
g_e	燃油消耗率	ε	压缩比, 轴颈在轴承中的偏心率, 平衡系数, 过量平衡率
g_m	机油消耗率	η_i	指示热效率
G	切变模量	η_m	机械效率
h	挺柱、气门升程	η_v	充气效率
H	升程, 高度, 活塞总高度	η_V	容积效率
H_u	燃料低热值	θ	凸轮工作段半包角
i	摇臂比	λ	连杆比
I	断面惯性矩, 转动惯量	μ	转矩不均匀系数, 流量系数, 适应性系数
l	长度	ξ	阻尼系数, 盈亏功系数
l_0	理论空气量	ρ	凸轮曲率半径, 密度
l_v	气门杆长度	σ	应力
m	质量	τ	冲程数, 切应力
m'	活塞组质量	φ_c	凸轮转角
m_1	连杆往复部分质量	$\varphi_{e1}, \varphi_{e2}$	配气相位排气提前角和滞后角 (曲轴转角)
m_2	连杆旋转部分质量	$\varphi_{i1}, \varphi_{i2}$	配气相位进气提前角和滞后角 (曲轴转角)
M	转矩或弯矩	ϕ	包角
n	发动机转速	Φ	热流量
n_c	凸轮轴转速	ψ_F	比时间断面
p	压力	ψ_{Fm}	凸轮型线丰满系数
p_{me}	平均有效压力	ω	角速度, 圆频率
P_e	有效功率, 标定功率	ω_e	固有频率
P_i	指示功率		

目 录

前言	
本书主要符号表	
第一章 内燃机设计总论	1
第一节 内燃机设计的一般流程	1
第二节 内燃机的主要设计指标	3
第三节 内燃机的选型	9
第四节 内燃机主要参数的选择	11
第五节 现代内燃机设计与技术的发展	19
思考及复习题	20
第二章 曲柄连杆机构受力分析	21
第一节 曲柄连杆机构的运动学	21
第二节 曲柄连杆机构中的作用力	27
思考及复习题	35
第三章 内燃机的平衡	36
第一节 平衡的基本概念	36
第二节 旋转惯性力的平衡分析	37
第三节 单列式内燃机往复惯性力的平衡分析	42
第四节 双列式内燃机往复惯性力的分析	48
思考及复习题	55
第四章 曲轴系统的扭转振动	56
第一节 扭转振动的基本概念	56
第二节 扭转振动系统自由振动计算	56
第三节 强迫振动与共振	60
第四节 曲轴系统的激发力矩	63
第五节 曲轴系统的强迫振动与共振	66
第六节 扭转振动的消减措施	68
第七节 扭振的现代测试分析方法	71
思考及复习题	74
第五章 配气机构设计	75
第一节 配气机构的形式及评价	75
第二节 配气机构运动学和凸轮型线设计	79
第三节 配气机构动力学	86
第四节 凸轮轴及气门驱动件设计	90
第五节 可变配气机构	99
思考及复习题	105
第六章 曲轴飞轮组设计	106
第一节 曲轴的工作情况、设计要求和材料选择	106
第二节 曲轴的结构设计	107
第三节 曲轴的疲劳强度校核	110
第四节 提高曲轴疲劳强度的结构措施和工艺措施	112
第五节 飞轮的设计	115
思考及复习题	117
第七章 连杆组设计	118
第一节 连杆的设计	118
第二节 连杆螺栓的设计	124
第三节 提高螺栓疲劳强度的措施	126
第四节 连杆的强度计算方法	127
思考及复习题	127
第八章 活塞组设计	128
第一节 活塞设计	128
第二节 活塞的结构设计	131
第三节 活塞环设计	140
思考及复习题	148
第九章 内燃机滑动轴承设计	149
第一节 轴承的工作条件和材料要求	149
第二节 轴瓦的结构设计	151

第三节 轴心轨迹 154
思考及复习题 157

第十章 机体与气缸盖的设计 158

第一节 机体设计 158

第二节 气缸与气缸套设计 166

第三节 气缸盖设计 170

思考及复习题 175

第十一章 内燃机的润滑和冷却系统 ... 176

第一节 润滑系统 176

第二节 冷却系统 178

思考及复习题 186

参考文献 187

第一章 内燃机设计总论

第一节 内燃机设计的一般流程

内燃机的开发设计是一项非常复杂的工作，一般有以下几个阶段组成。

一、产品开发计划阶段

此阶段由下述环节组成：

(1) 确定任务 主要是根据市场需要（进行必要性、可行性论证）和法规需要来确定，这个环节应该是在企业产品规划中确定，有长期规划，也有短期规划。

(2) 组织设计人员 根据任务挑选合适人选，做到人员结构合理、技术结构合理。

(3) 调查研究

1) 访问用户，调查市场对欲开发产品的要求和技术需求。

2) 了解制造厂的工艺条件、设备能力以及配件供应情况。

3) 收集同类先进产品的资料，包括性能参数、结构方案。

4) 确定参考样机。现在没有从零开始的产品设计，一般都是在某个参考机型的基础上进行改进设计。

(4) 确定基本性能参数和结构形式 主要是通过同类型机型对比、经验公式计算、热力学计算、动力学计算和整机一维模型仿真分析进行确定。

(5) 拟订设计任务书

1) 说明开发该产品的原因、主要用途、适用范围等。

2) 说明内燃机的主要设计参数和要达到的技术指标。

① 形式（汽或柴）、气门数、直立或卧式、燃烧室形式。

② 总排量。

③ 标定功率 P_e 、标定转速 n 、最大扭矩 M_{emax} ，最大扭矩转速 $n_{M_{emax}}$ 。

④ 冲程数 τ （4 或 2）、气缸直径 D 、行程 S 。

⑤ 气缸排列方式（直列、V 型）。

⑥ 排污指标（噪声、废气）。

⑦ 燃油消耗率 g_e （ $g/kW \cdot h$ ）。

⑧ 平均有效压力 p_{me} 。

⑨ 活塞平均速度 v_m 。

⑩ 机油消耗率 g_m （ $g/kW \cdot h$ ）。

⑪ 冷却方式（水冷或风冷）。

⑫ 大修期、保用期，一般大修期是保用期的 2 倍。

⑬ 重量和外型尺寸，与用途有关（大型车、小型车、固定式）。

3) 主要结构及零件参数，如燃烧室、压缩比、燃油供应方式、配气机构、润滑系统、冷却系统、起动系统、零部件（活塞、连杆、曲轴飞轮、机体气缸盖）。

4) 产品系列化和变型、强化的可能性。

设计任务书是一个简单的设计任务描述, 其中的某些指标还要在设计中调整。在设计完成之后, 还要编写比较详细的设计说明书, 对所设计的发动机进行总体和分部分描述, 对主要参数的选取进行说明。设计说明书是企业产品的重要技术档案资料。

二、设计实施阶段

此阶段是把设计计划付诸实施的阶段, 包括:

1. 总布置设计及零部件设计

确定总体方案之前, 一般先要拟订几种方案, 进行多方案讨论、分析和比较。经过反复修改后得出初步方案, 随即进行下面的工作程序。

1) 内燃机总布置设计, 三维实体造型和虚拟装配。确定主要零部件的允许运动尺寸、结构方案、外形图(图 1-1)。

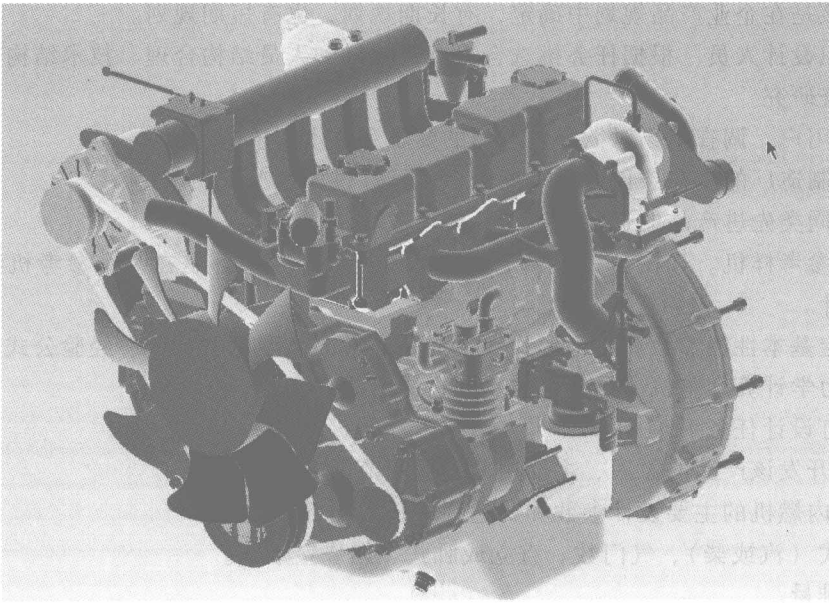


图 1-1 整机设计三维总装图

2) 按照企业标准编制零部件图样目录。

3) 进行部件三维图细致设计, 绘制零部件工作图、整机纵横剖面图。

2. 主要零部件和单缸机的试制(现在单缸机的试制往往省略)

3. 系统及零部件的理论分析、虚拟试验以及系统标定

该阶段主要进行曲轴、连杆、活塞销等受力零部件的理论强度校核, 零件疲劳强度试验; 配气凸轮、机构零部件设计, 配气机构动力学计算评价; 平衡系统的设计计算; 气道流动仿真评价; 燃烧仿真评价; 配气相位优化; 冷却水温度场分布; 冷却系统、润滑系统、起动系统的参数设计; 发动机燃料供给系统设计(包括电控系统设计与匹配)。

4. 单缸机试验(可省略)

该阶段主要考证各个系统参数是否满足设计要求, 获取必要的资料。

三、产品试制检验阶段

1. 试制多缸机样机

在总体设计和零部件强度理论计算之后，就可进行多缸机的施工设计。此阶段决定零部件的加工精度和工艺处理规范、部件结构调整。

2. 多缸机试验

此阶段要进行整机磨合、性能调整、电控系统标定、性能试验、耐久试验、可靠性试验、配套试验和扩大用户试验。

四、改进与处理阶段

1. 样机鉴定与改进

在总结了单缸机试验、多缸机试制、样机性能试验和用户配套试验的基础上，往往要进行多方面的综合改进和进一步的试验观察，然后由企业或者地方主管部门组织新产品鉴定。鉴定时设计和试制单位需要提供的主要文件有：

- 1) 设计任务书。
- 2) 内燃机研发试制总结。
- 3) 内燃机动力性、经济性、耐久性、排放特性、噪声水平等性能试验报告。
- 4) 内燃机生产产量成本盈亏分析。
- 5) 市场需求预测分析。
- 6) 用户使用报告。

2. 小批量生产和扩大用户试验

内燃机是一个十分复杂的技术系统，涉及水、油、气的流动与密封，工质燃烧、做功与传热，机械传动等多个复杂的物理和化学过程，用户的要求和使用工况变化非常大，因此必须经过小批量生产和逐步扩大用户使用试验，经过严密的设计和严格的生产工艺调整，才能最终进行正式商业化生产。

关于内燃机设计的“三化”要求：

(1) 产品系列化 它是指基本尺寸相同，不同的排列、缸数、增压度，以满足不同需求。

(2) 零部件通用化 它是指同一系列的主要零件能够通用，以减少开发成本。

(3) 零件设计标准化 它是指按照国家标准、行业标准或企业标准设计，提高设计图样和资料的可读性和交流性，便于技术交流，同时也起到减少生产和采购成本的作用。

“三化”可以提高产品的质量，减少设计成本，组织专业化生产，提高劳动生产率，便于使用、维修和配件供应。

总之，内燃机的设计与开发是一个相当复杂的过程。一个型号产品往往要经过几年的设计与开发周期才能得以完善。

第二节 内燃机的主要设计指标

一、动力性指标

1. 有效功率 P_e

有效功率 P_e (kW) 的计算公式为

$$P_e = \frac{p_{me} V_h Z n}{30\tau} = 0.785 \frac{p_{me} v_m Z D^2}{\tau} \quad (1-1)$$

式中, p_{me} 为平均有效压力 (MPa); v_m 为活塞平均速度 (m/s); V_h 为单缸工作容积 (L); Z 为气缸数; n 为转速 (r/min); D 为气缸直径 (mm); τ 为冲程数, 四冲程 $\tau=4$, 二冲程 $\tau=2$ 。

可见, 有效功率 P_e 受到上面各参数的影响。在设计转速和结构参数基本确定下来之后, 影响有效功率的主要参数就是平均有效压力。平均有效压力的表达式为

$$p_{me} = \eta_i \eta_v \eta_m \frac{H_u \rho_s}{\alpha l_0} \quad (1-2)$$

式中, η_i 为指示热效率; η_v 为充气效率; η_m 为机械效率; H_u 为燃料低热值, ρ_s 为进口状态下空气密度; l_0 为理论空气量; α 为过量空气系数。

从式 (1-2) 可以看出, 影响平均有效压力, 也就是影响有效功率的关键参数是指示热效率、气缸充气量 ($\eta_v \rho_s / \alpha$) 和机械效率 η_m , 因此应该主要从这几方面入手来提高有效功率。后面要讲到提高 p_{me} 的具体措施。在初始设计阶段, 可以由表 1-6 根据内燃机类型和用途初步确定平均有效压力值范围, 进而确定内燃机的标定功率。

2. 转速 n

提高内燃机的转速可以使功率提高, 因而使单位功率的体积减小、重量减轻。但是转速的提高会导致以下问题:

- 1) 惯性力增加, 导致机械负荷增加, 平衡、振动问题突出, 噪声增加。
- 2) 工作频率增加, 导致活塞、气缸盖、气缸套、排气门等零件的热负荷增加。
- 3) 摩擦损失增加, 机械效率 η_m 下降, 燃油消耗率 g_e 增加, 磨损寿命变短 (主要由 v_m 增加所致), 一般高速发动机采用短行程, 以降低活塞平均速度。
- 4) 进排气系统阻力增加, 充气效率 η_v 下降。

柴油机由于其混合气形成速度和燃烧速度比较慢的原因, 转速不会太高。转速在 1000r/min 以上为高速, 600~1000r/min 为中速, 600r/min 以下为低速。汽油机的转速范围很宽, 小缸径汽油机可以达到 10000r/min, 一般轿车用汽油机转速可达到 6000r/min 左右。汽油机的最大缸径受到爆燃的限制, 一般不超过 100mm。同样原因, 大缸径汽油机的转速也不高。

各种用途的内燃机转速范围见表 1-1。

表 1-1 各种用途的内燃机转速范围

[单位: (r/min)]

用途	柴油机	汽油机
汽车	1500~5000	2500~6500
工程机械与拖拉机	1500~2800	2000~3600
内燃机车、发电机组	900~1500	2800~3600
摩托车、摩托艇		5000~10000
中小型农用动力	1200~3000	3000~6000
船舶 (高速)	1000~2000	1500~2500
船舶 (低速)	300~850*	

发电机组内燃机受电网频率和磁极对数的限制, 转速 n (r/min) 应为

$$n = 60 \frac{f}{p} \quad (1-3)$$

式中, f 为电网频率 (Hz), 一般为 50Hz; p 为发电机磁极对数。

3. 最大转矩 M_{emax} 及最大转矩转速 $n_{M_{emax}}$

内燃机的标定功率和标定转速确定以后,其标定转速下的转矩 ($N \cdot m$) 就表示为

$$M_e = \frac{P_e}{n} \times \frac{30000}{\pi} = \frac{P_e}{n} \times 9549.3 = \frac{31.83 p_{me} Z V_h}{\tau} \quad (1-4)$$

式中, P_e 为标定功率 (kW); n 为标定转速 (r/min); p_{me} 为平均有效压力 (MPa); Z 为气缸数; V_h 为单缸工作容积 (L); τ 为冲程数。

实际上内燃机给出的转矩指标都是最大转矩 M_{emax} , 而不是标定转速下的转矩 M_e 。 M_{emax} 对应的转速为 $n_{M_{emax}}$, 小于标定转速 n 。

汽车、拖拉机、工程机械和农用动力用内燃机等除对功率和转速有要求外,还要求具有一定的转矩储备,以克服短时间的外界阻力。表征转矩储备的参数为转矩储备系数,又称为转矩适应性系数,表示最大转矩与标定转速下转矩的比值,即

$$\mu_M = \frac{M_{emax}}{M_e} > 1 \quad (1-5)$$

标定工况转速和最大转矩转速之比称为转速适应性系数,即

$$\mu_n = \frac{n}{n_{M_{emax}}} > 1 \quad (1-6)$$

总适应性系数 $\mu = \mu_M \mu_n$ 随用途不同而有不同的要求。各种动力装置对内燃机适应性系数的要求见表 1-2, 可以根据表中所列系数初步确定最大转矩 M_{emax} 及对应转速 $n_{M_{emax}}$ 。

表 1-2 各种动力装置对内燃机适应性系数的要求

动力装置	汽油机			柴油机		
	μ_M	μ_n	μ	μ_M	μ_n	μ
汽车	1.1 ~ 1.25	1.5 ~ 2	1.65 ~ 2.5	1.05 ~ 1.2	1.1 ~ 1.25	1.1 ~ 1.25
工程机械	1.2 ~ 1.45	1.6 ~ 2	1.9 ~ 2.9	1.15 ~ 1.4	1.6 ~ 2	1.85 ~ 2.8
拖拉机	1.2 ~ 1.3	1.6 ~ 2	1.9 ~ 2.6	1.15 ~ 1.25	1.6 ~ 2	1.85 ~ 2.5

二、经济性指标

内燃机的经济性指标主要指燃油消耗率指标,即每千瓦小时的燃料消耗重量。对于固定工况使用的内燃机是指标定功率时的燃油消耗率。对变工况使用的内燃机,则一般是指外特性曲线上的最低油耗率。如说某内燃机的最低油耗率,则是指万有特性上最低油耗率而言。当然,万有特性上低油耗区越宽广,则变工况使用的内燃机的使用经济性也越好。

1. 燃油消耗率 g_e [(g/kW·h)]

降低 g_e 的措施主要有提高指示效率 η_i 和机械效率 η_m 。一般车用内燃机燃油消耗率为:

车用汽油机 250 ~ 380g/(kW·h)

车用柴油机 200 ~ 260g/(kW·h)

现在出现的缸内直喷汽油机,燃油消耗率理论上可以达到 200g/kW·h 甚至更低。内燃机的经济性是内燃机设计师和使用者永远追求的目标。

2. 机油消耗率 g_m [g/(kW·h)]

机油的价格远高于燃料油,希望使用中消耗量尽量少,而且要求在两个保养期之间不要添加机油,一般车用内燃机机油消耗率为 1.3 ~ 2.6g/(kW·h)。

三、可靠性、耐久性指标

1. 可靠性

可靠性是指在规定的运转条件下,规定的时间内,具有持续工作,不会因为故障而影响正常运转的能力。对于可靠性高的内燃机应在保证期内不发生停车故障和需要更换主要或非主要零件的故障。

以下各零件被规定为主要零件:机体(包括机座、曲轴箱)、油底壳、曲轴、齿轮、凸轮轴、传动链、传动带、油泵凸轮轴、气缸盖、缸套、活塞、连杆、连杆轴瓦、连杆螺栓、活塞销、进排气门及座圈、气门弹簧、摇臂、调速器弹簧、调速器飞块和销子、机油泵齿轮、活塞环、油泵柱塞偶件、出油阀偶件、喷油器。

2. 耐久性

耐久性是指从开始使用起到大修期的时间。内燃机的大修期一般决定于缸套和曲轴磨损到达极限尺寸的时间(小时数),此时内燃机不能继续正常工作,使用中的对外表现通常为:内燃机起动困难甚至无法起动、排气冒蓝烟、机油消耗量明显加大、动力性明显下降、内燃机工作噪声变大等。

四、质量、外形尺寸指标

质量、外形尺寸是评价设计的紧凑性和金属利用程度的指标。不同用途的内燃机对质量和外形尺寸指标的要求不尽相同。比如汽车发动机要求质量和外形尺寸都要小,而工程机械和拖拉机则可稍大一些。不管怎样,设计紧凑、质量轻总是内燃机设计追求的目标。

衡量内燃机质量的指标是比质量(kg/kW): m/P_e ,内燃机的比质量范围见表1-3。

表 1-3 内燃机的比质量范围 (单位: kg/kW)

用途	柴油机	汽油机
汽车用	4~6	1~2.5
小型农用	单缸 16~26	2~8
	多缸 5.5~16	1.5~6
工程机械用	4~7	1~4
机车	3.4~7.5	
船用	13.5~19	

衡量内燃机外形尺寸紧凑性的指标是体积功率(kW/m^3): $P_v = P_e/V$ 。

五、低公害指标

1. 噪声

内燃机的噪声,主要来自燃烧噪声、气体流动噪声和机械噪声三个方面。目前我国仅有对柴油机的噪声限值,还没有针对汽油机的噪声限值。现在主要是通过对整车噪声的限制(表1-4)来间接限制发动机的噪声。按照国家标准,内燃机的噪声测量按照9点法进行。在进行内燃机噪声测定时,一般要在消声室里进行,也可以在混响室里进行,但是要尽量消除外部噪声源,并且进行背景噪声修正。内燃机的噪声大小用声压级 L_p (dB)来表示,一般还要对测量数据进行各种计权处理,仿照人耳的听力,一般采用A计权。所以在噪声数据上所见到的噪声单位多用dBA或者dB(A)来表示。

对于燃烧噪声来讲,主要取决于缸内气压的压力升高率。一切有利于缩短滞燃期和减少该期间燃油注入量或者可燃混合气生成量的措施,都有利于降低燃烧噪声,比如增压、分段喷射、推迟喷油提前和减小点火提前角等。降低压缩比也是很见效的措施,一般与增压同时采用,否则会降低内燃机的动力性。

表 1-4 我国目前实行的汽车加速通过噪声限值

汽车分类	噪声限值/dB (A)	
	第一阶段	第二阶段
	2002. 10. 1 ~ 2004. 12. 30 期间生产的汽车	2005. 1. 1 以后 生产的汽车
M ₁	77	74
M ₂ (总质量 ≤ 3.5t), 或 N ₁ (总质量 ≤ 3.5t): 总质量 ≤ 2t 2t < 总质量 ≤ 3.5t	78	76
	79	77
M ₁ (3.5t < 总质量 ≤ 12t), 或 M ₂ (总质量 > 12t): P < 75kW 75kW ≤ P < 150 kW P ≥ 150kW	82	81
	86	83
	88	84

注: 1. M₁、M₂ (总质量 ≤ 3.5t) 和 N₁ 类汽车装用直喷式柴油机时, 其限值增加 1dB (A)。

2. 对于越野汽车, 其总质量 > 2t 时: 如果 P < 150kW, 其限值增加 1dB (A); 如果 P ≥ 150 kW, 其限值增加 2dB (A)。

3. M₁ 类汽车, 若其变速器前进挡多于 4 个, P > 150kW, P 与总质量之比大于 75kW/t, 并且用第三挡测试时其尾端的速度大于 61km/h, 其限值增加 1dB (A)。

对于气体流动噪声, 主要是通过进排气消声器来控制。机械噪声主要是通过合理设计风扇结构参数和合理控制风扇转速来达到控制目的。在中重型货车和大客车上, 当接近发动机标定转速时, 风扇噪声往往成为主要噪声源, 因此对风扇噪声的控制应进一步重视。机械噪声, 包括活塞拍击和气缸压力引起的机体表面振动与油底壳表面振动噪声、气门落座冲击和传动件运动撞击振动噪声等。这方面的研究也已经比较深入, 主要是通过优化机体机构、采用整体式主轴承座、复合材料油底壳、液压挺柱、优化凸轮型线、非金属材料传动件、齿轮减振等措施来降低内燃机机械振动噪声。对于轿车发动机, 由于发动机舱被隔离, 传到车外的噪声一般能够降低 20dB(A) 左右, 所以对于 74dB(A) 的整车加速通过噪声限值, 在考虑 7.5m 远的测点距离后, 通常要求发动机本身的噪声在 103dB(A) 以下。

2. 有害气体排放

汽车的排放, 就是内燃机的排放, 说到汽车对于环境和空气的污染, 实际上主要是内燃机的排放污染。当前全世界都对汽车的污染问题十分重视, 都根据本国本地区的实际情况制定了相应的汽车排放法规。因此, 在设计内燃机时, 尤其在设计车用内燃机时, 一定要根据本地施行的法规, 制定合适的设计方案。表 1-5 是欧洲汽车尾气排放标准, 我国的排放法规基本上是参照欧洲标准制定的。

六、制造、使用、维护指标

内燃机首先要求好用 (包括前面五项指标), 能满足各种性能的要求, 同时也要求使用方便 (操纵性好, 起动性好)、好修和好造。

操纵性好是指使用者不需要特别的专门技能, 即可顺利进行操作, 而且在运行中不需要经常进行特别的调整就能维持稳定的运转工况。有些大型内燃机还要求如水温、机油温度和压力等能自动报警、自动停车等。

起动性好是指冷车起动迅速可靠，对于船用、固定式及机车柴油机一般要求在 -5°C 以上环境温度下能顺利起动。对汽车、拖拉机、中小型移动电站及农用柴油机则要求在 -5°C 甚至更低的气温条件下，不附加任何辅助装置能顺利起功。

为了使内燃机便于维护保养、好修、好造，应使各调整部位便于接近，结构简单合理，工艺性良好。

表 1-5 欧洲汽车尾气排放标准

欧 I、欧 II					
总质量 < 2.5t ≤6 人		欧 I, 1995 年底之前		欧 II, 1995 ~ 2000 年	
		汽油	柴油 IDI + DI	汽油	柴油 IDI DI
转鼓试验台排 放测试 g/km	CO	2.72 (3.16)	2.72 (3.16)	2.2	1.0 1.0
	HC + NO _x	0.97 (1.13)	0.97 (1.13)	0.5	0.7 0.9
	PM		0.14 (0.18)		0.08 0.10
	蒸发量	2.0g/t	—	2.0g/t	—
欧 III、欧 IV					
总质量 < 2.5t ≤6 人		欧 III, 2000 ~ 2005 年		欧 IV, 2005 年底起施行	
		汽油	柴油	汽油	柴油
转鼓试验台排 放测试 g/km	CO	2.3	0.64	2.2	0.5
	HC + NO _x		0.56		0.3
	HC	0.2		0.1	
	NO _x	0.15	0.5	0.08	0.25
	PM	—	0.05		0.025
	蒸发量	2.0g/t	—	2.0g/t	—

注：表中蒸发量是指每吨汽车质量蒸发的燃油量 (g/t)，IDI 指非直喷柴油机，DI 指直喷柴油机。

对于汽车、拖拉机、工程机械和农用内燃机，其共同点都是大量生产，功率范围和结构布置比较相近。在结构设计和总布置设计时，许多考虑都是共同的。都要求尽可能采用一般钢材，零部件的工艺性要好，要适合于大量生产。它们的附属系统（如供油系、起动机、滤清器、散热器、水泵等）往往都是专业化生产的。这就更严格地要求应符合“三化”的规定。对汽车、拖拉机、工程机械和农用内燃机，所有要求可概括为：

- 1) 高的动力性能。功率、转矩、使用转速范围，均适合于工作机械的需要。
- 2) 高的燃料经济性。汽车发动机还必须注意部分负荷和不稳定工况下的经济性，还要求燃油经济区尽可能宽，这在混合动力中尤为重要。
- 3) 高的工作可靠性和足够的使用寿命。现代较先进的内燃机寿命指标大致为：
 - 汽车内燃机 大于 40 ~ 80 万 km；
 - 拖拉机及农用内燃机 6000 ~ 10000h；
 - 工程机械内燃机 10000 ~ 28000h。

4) 对于汽车内燃机，还要求尽量低的振动和噪声，也就是所说的 NVH (Noise Vibration and Harshness) 性能。

第三节 内燃机的选型

目前,在汽车、拖拉机、工程机械、内燃机车、船舶、农用动力和小型发电机组装置中占统治地位的还是往复式内燃机。这是由于内燃机技术的发展和它固有的优点所决定的。往复式内燃机的主要优点是效率高、结构紧凑、机动性好因而应用极广。往复式内燃机本身也有一些难以克服的缺点:结构比较复杂,使制造修理困难;有大量的摩擦表面,使用寿命受到限制;往复机构固有的旋转不均匀和产生较大的往复惯性力,引起整机振动等。因此人们在发展往复式内燃机的同时,也在寻求其他形式的动力机械。例如,燃气轮机具备结构简单、紧凑轻巧、零件较少、其部件数量约为活塞式内燃机的1/5、摩擦副数约为活塞式内燃机的1/6、牵引性能好等优点,但是燃料经济性差,特别是在部分负荷时更加明显。此外,由于燃气轮机噪声大、寿命短、加速性能差、制动困难,加上涡轮叶片需要较多的耐热合金(镍、铬、钴、钨)等严重缺点而暂时还得不到推广。转子发动机具有结构简单、尺寸小、重量轻等明显的优点,现在日本马自达公司已经推出使用转子发动机的小轿车。但由于密封上所存在的困难,在可靠性、排放性和寿命等使用性能上还暂时赶不上往复式内燃机。

近年来出现的其他动力形式,如混合动力(Hybrids)、燃料电池(Fuel Cell)等具有较大的潜力,混合动力主要的目的是节油,节省使用成本。世界各地都已经有了混合动力汽车产品问世,混合动力还在港口吊车等设备上受到重视。但是由于成本、关键技术等原因,距离大面积推广使用还有相当长的时间。燃料电池是最具有环保前景、效率最高、不使用石化燃料的下一代动力,但是由于催化剂成本太高、氢气制取技术不够成熟以及燃料电池本身的一些技术问题还没有得到彻底解决,因此在短时间里还没有代替往复式内燃机的可能。

一、柴油机、汽油机或气体燃料发动机

现在广泛使用的内燃机主要是柴油机、汽油机和气体燃料发动机。在设计内燃机时首先碰到的问题就是选择什么内燃机。这主要依靠两方面来决定:

- 1) 内燃机本身的技术经济特点和市场需求。
- 2) 地区或国家对环境和能源应用分布的要求。

下面主要从内燃机本身的技术经济特点来叙述。

1. 柴油机的优点

- 1) 燃料经济性好。
- 2) 因为没有点火系统,所以工作可靠性和耐久性好。
- 3) 可以通过增压、扩缸来增加功率。
- 4) 防火安全性好,因为柴油挥发性差。
- 5) CO和HC的排放比汽油机少。

2. 汽油机的优点

- 1) 空气利用率高,转速高,因而升功率高。化油器式的过量空气系数 α 较高,在1.1左右,电控喷射要求 $\alpha=1$ 。
- 2) 因为没有柴油机喷油系统的精密偶件,所以制造成本低。

3) 低温起动性、加速性好, 噪声低。

4) 由于升功率高, 最高燃烧压力低, 所以结构轻巧, 比质量小 (一般汽油机只有柴油机重量的一半)。

5) 不冒黑烟, 颗粒排放少。

目前来讲, 汽油机和柴油机由于燃料和工作方式的不同, 各自的优点和缺点正好是相对应的。即, 柴油机的优点正好是汽油机的缺点, 反之亦然。

3. 气体燃料发动机的特点

气体燃料发动机主要使用压缩天然气 (Compressed Natural Gas, CNG)、液化天然气 (Liquified Natural Gas, LNG)、液化石油气 (Liquified Petroleum Gas, LPG)。

1) 可进行汽油/LPG、汽油/天然气切换 (Bi-fuel 两用燃料) 或天然气/柴油混合 (Dual Fuel 双燃料), 也可以单独使用。

2) 辛烷值超过 100, 单独使用时可以提高压缩比以保证功率不损失。

3) 排放指标比较低, 不冒黑烟。

4) 一般情况下使用经济性较好, 价格也比汽油便宜。

5) 可以节省石油资源。

6) 燃料供给采用多点电控喷射才能使混合气比较均匀。

一般, 6t 以上用柴油机, 3~6t 混用, 3t 以下用汽油机居多, 燃气则有较宽的使用范围。但是燃气汽车续驶里程短, 大部分地区加气站不如汽油、柴油加油站分布广泛, 所以燃气汽车多用于城市公交车、城市出租车。

使用其他代用燃料 (氢气、醇类、醚类和生物柴油) 的发动机, 都是在汽油、柴油发动机基础上改造的。

二、冲程数

(1) 四冲程内燃机 四冲程内燃机使用可靠, 工作柔和, 耐磨, 经济性好, 指标稳定, 生产、使用经验丰富; 主要在汽车、拖拉机、坦克、柴油发电机组上应用, 现在由于排放和经济性的要求提高, 摩托车上也越来越多使用四冲程发动机了。

(2) 二冲程内燃机 二冲程内燃机单位时间内工作循环多一倍, 实际功率输出大 50%~70%, 体积小, 重量轻, 结构简单, 但经济性差。回流扫气二冲程发动机结构很简单, 因此二冲程小型汽油机在摩托车、摩托艇、喷雾机和割草机等小型动力装置上应用很广。由于二冲程功率密度大, 现在对于二冲程发动机的研究仍然很多, 也取得了很大进展。

三、水冷、风冷

(1) 水冷方式 内燃机的机体和气缸盖内部铸有水套, 内燃机的散热量主要由循环水带走。水冷方式的特点如下:

1) 冷却均匀, 效果好。

2) 充气效率 η_v 大, 平均有效压力 p_{me} 大。

3) 由于水的比热容大, 受外界影响比较小。

4) 由于有水套隔离, 向外辐射的噪声低。

(2) 风冷方式 气缸盖和机体外表面铸有散热片, 没有水套, 靠空气流动带走内燃机的散热量。

1) 散热不好, 热负荷高, 喷油嘴易堵塞, 机油易变稀, 磨损大。