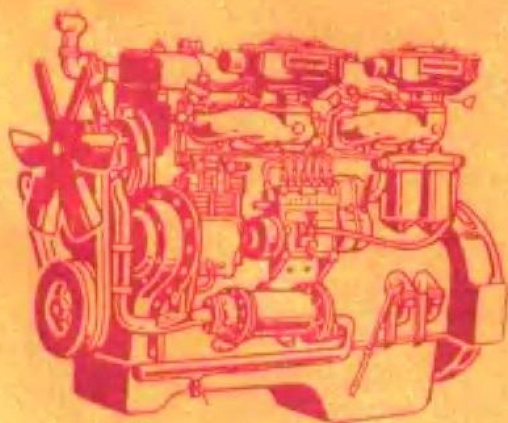


全国高等工业学校内燃机专业教学指导委员会推荐教材

# 内燃机设计

万欣 林大渊 主编



天津大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要论述内燃机设计的基本知识和理论,包括内燃机设计总论、内燃机动力学、主要零部件的结构设计以及内燃机辅助系统的设计方法,其中以水冷四冲程汽车拖拉机用内燃机为重点,兼及其它类型和用途的内燃机。

作为内燃机专业的教科书,本书从教学要求和学生水平出发,着重基本内容的讲解,贯彻“少而精”的原则,希望学生在有限的时间内掌握内燃机设计的基本知识和主要理论,文字上力求通俗易懂便于自学。

本书可作为大专院校内燃机专业“内燃机设计”课程的教材,也可供从事内燃机设计、研究、生产和使用等部门的技术人员参考。

## 内 燃 机 设 计

林大渊 主编

\*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

\*

开本: 787×1092毫米<sup>1/16</sup> 印张: 23 字数: 574千字

1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷

印数: 1—2500

ISBN 7-5618-0136-X

TH·8

定价: 3.80元

# 序

《内燃机设计》是高等学校内燃机专业的一门主课，万欣同志讲授该课多年，教学经验丰富，他以少而精的原则主编的《内燃机设计》讲义，经反复使用修改，1983年内部发行，深受学生欢迎，亦为一些兄弟院校所采用，反映取材适当、概念清晰、深入浅出、好教易学，可以作为高等院校内燃机专业的一本通用教材。

万欣同志毕生致力于内燃机专业教育事业，勤恳工作，治学严谨，曾翻译英、俄、日书刊多种。他在兼任《内燃机学报》编辑部主任期间，作出显著成绩。万欣同志不幸于1985年6月病逝。最近我校内燃机教研室设计组重新整理了这本讲义，由天津大学出版社正式出版并以誌纪念。

天津大学教授  
中国科学院学部委员 史绍熙

1988年12月

## 编者的话

本书主要作为内燃机专业《内燃机设计》课程的教学用书。其体系和内容是在我校长期教学实践基础上逐步形成的，并参照“高等学校内燃机专业课程研讨会”（81年7月）所拟定的《内燃机设计》课程教学大纲（80~100学时）中建议的要求作了修改。作为教科书，在编写中，力图做到：运用辩证唯物主义观点和理论联系实际的原则阐述内燃机设计的有关问题；从教学要求和学生水平出发，着重于基本内容的讲解，希望学生在有限时间内掌握内燃机设计中的基本知识和主要理论，贯彻“少而精”的原则；力求文字通俗易懂，便于学生自学。

目前内燃机设计工作正由半经验设计走向优化设计，一些现代设计理论应当在教科书中得到足够反映和及时向学生传授，但由于教学学时的限制，并考虑课程体系的大幅度变革仍需要经过一段时间的实践和完善，因此本书仍维持对内燃机设计基本内容讲授的体系不变，仅在内容和取材上部分作了更新。

对于新的课程内容，作为高一级的知识层次，我们已在《内燃机现代设计》的总题目下，陆续开出各门选修课供本专业学生选学。

本书适用于70~80学时的讲授，建议各章学时分配大致如下表所示（72学时）。

表 建议学时分配

章次	名称	学时数
1	内燃机设计总论	4
2	内燃机动力学	12
3	曲轴的扭转振动	6
4	内燃机轴承与润滑问题	6
5	曲轴	6
6	活塞	10
7	活塞环	
8	活塞销	
9	连杆组	3
10	机体、气缸盖、气缸套	8
11	配气机构	9
12	润滑系统	3
13	冷却系统	3
14	内燃机的起动	2

本书采用国家法定计量单位，专业名词术语力求做到符合国家标准或规范化。

本书由万欣先生主编，文世骐、程熙、刘桂莲参加编写。鉴于万欣病逝，本书修改工作由林大渊教授主持。各章修改工作的分工是：第1、2、3和5章——林大渊；第4、6、7、8、12章、编目和附录——程熙；第9和11章——刘桂莲；第10、13和14章——文世骐。

由于编者水平有限，不妥之处恳请专家和广大读者批评和指教。

编者 1988年12月

# 目 录

1. 内燃机设计总论 .....	( 1 )
1.1 前言 .....	( 1 )
1.2 内燃机的设计要求 .....	( 2 )
1.2.1 功率和转速 .....	( 2 )
1.2.2 内燃机的经济性 .....	( 5 )
1.2.3 内燃机外廓尺寸的紧凑性和质量 .....	( 6 )
1.2.4 内燃机设计的“三化”问题 .....	( 7 )
1.2.5 内燃机的可靠性及其它 .....	( 8 )
1.3 内燃机的主要结构尺寸和结构参数 .....	( 8 )
1.3.1 缸径和缸数 .....	( 9 )
1.3.2 比值 $S/D$ .....	( 9 )
1.4 内燃机的基本类型和典型构造 .....	( 10 )
1.4.1 汽油机 .....	( 10 )
1.4.2 高速柴油机 .....	( 18 )
1.4.3 中速和低速柴油机 .....	( 28 )
1.4.4 大功率柴油机 .....	( 34 )
1.5 内燃机技术设计的程序与方法 .....	( 35 )
1.6 主要零件设计中的基本问题 .....	( 36 )
2. 内燃机动力学 .....	( 40 )
2.1 活塞-曲柄机构的运动学 .....	( 40 )
2.1.1 活塞位移 $x$ .....	( 40 )
2.1.2 活塞速度 $v$ .....	( 41 )
2.1.3 活塞加速度 $a$ .....	( 42 )
2.2 活塞-曲柄机构中运动件的质量代换 .....	( 43 )
2.2.1 连杆的质量换算 .....	( 43 )
2.2.2 往复直线运动部分的质量 $m_1$ .....	( 44 )
2.2.3 不平衡回转部分的质量 $m_r$ .....	( 44 )
2.3 单缸内燃机的平衡 .....	( 45 )
2.3.1 往复惯性力 $P_j$ .....	( 45 )
2.3.2 往复惯性力的平衡 .....	( 46 )
2.3.3 离心惯性力 $P_r$ 及其平衡 .....	( 46 )
2.4 多缸内燃机的平衡 .....	( 47 )
2.4.1 离心惯性力及力矩的平衡 .....	( 47 )
2.4.2 直列式内燃机上一级往复惯性力及力矩的平衡 .....	( 50 )
2.4.3 直列式内燃机上二级往复惯性力及力矩的平衡 .....	( 53 )
2.4.4 V型内燃机往复惯性力及力矩的平衡 .....	( 54 )
2.5 着火次序问题 .....	( 56 )

2.6	关于内燃机平衡问题的小结	( 57 )
2.7	活塞-曲柄机构的受力分析	( 57 )
2.7.1	气体压力 $P_z$	( 58 )
2.7.2	力的分析	( 58 )
2.8	飞轮	( 61 )
2.9	轴颈与轴承载荷图	( 64 )
2.9.1	连杆轴颈和连杆大头轴承的载荷图	( 65 )
2.9.2	主轴颈和主轴承的载荷图	( 66 )
2.9.3	轴颈与轴承的磨损图	( 68 )
3.	曲轴的扭转振动	( 70 )
3.1	现象	( 70 )
3.2	无阻尼自由振动	( 70 )
3.2.1	单质量系统	( 70 )
3.2.2	双质量系统	( 74 )
3.2.3	多质量系统	( 75 )
3.3	有阻尼的自由扭转振动	( 78 )
3.3.1	阻尼	( 78 )
3.3.2	扭摆的有阻尼自由扭转振动	( 79 )
3.4	有粘性阻尼的强制振动	( 80 )
3.4.1	强制扭振的运动方程式	( 80 )
3.4.2	强制振动的共振	( 81 )
3.4.3	强制振动运动方程的矢量图	( 82 )
3.4.4	扭摆中干扰力矩的作功	( 84 )
3.5	曲轴的扭转振动	( 85 )
3.5.1	干扰力矩的简谐分析	( 85 )
3.5.2	内燃机的临界转速	( 87 )
3.5.3	干扰力矩谱量的矢量图	( 88 )
3.5.4	多质量系统中简谐力矩的作功	( 89 )
3.5.5	多质量系统共振时的振幅	( 92 )
3.6	扭转振动的测量	( 93 )
3.6.1	扭振仪	( 93 )
3.6.2	扭振仪的理论基础	( 94 )
3.6.3	曲轴的扭振图和共振图	( 96 )
3.7	减振措施	( 97 )
4.	内燃机轴承与润滑问题	( 99 )
4.1	摩擦	( 99 )
4.1.1	干摩擦	( 99 )
4.1.2	流体摩擦	( 100 )
4.1.3	临界摩擦	( 100 )
4.1.4	实际的摩擦状态	( 100 )
4.2	轴承材料	( 101 )

4.3 轴瓦的构造	(103)
4.4 液力润滑	(107)
4.4.1 粘度	(107)
4.4.2 承载油膜的形成	(107)
4.5 轴承的设计	(109)
4.5.1 轴承的基本尺寸参数	(109)
4.5.2 轴承承载油膜中的油压分布	(110)
4.5.3 进油口位置和供油压力的选择	(111)
4.5.4 轴承相对宽度 $b/d$ 的选择	(113)
4.5.5 轴承相对间隙 $\psi$ 的选择	(114)
4.5.6 轴颈的换算角速度 $\omega_{re}$	(115)
4.5.7 轴承的特性数 $S_s$	(116)
4.6 轴承的计算	(117)
4.6.1 计算步骤	(117)
4.6.2 内燃机轴承的计算	(118)
5. 曲轴	(121)
5.1 总述	(121)
5.2 曲轴的强度计算	(123)
5.2.1 曲轴的受力分析	(123)
5.2.2 静力计算	(124)
5.2.3 疲劳计算	(124)
5.2.4 疲劳计算中有效应力集中系数 $K'$ 的确定	(127)
5.2.5 其他方法	(131)
5.3 曲轴的结构设计	(131)
5.3.1 曲轴的典型结构	(131)
5.3.2 曲拐的基本尺寸	(134)
5.3.3 提高曲拐疲劳强度的结构措施	(136)
5.3.4 润滑油道的安排	(138)
5.3.5 曲轴平衡重的设计	(140)
5.3.6 曲轴的两端	(143)
5.3.7 曲轴的止推	(146)
5.4 曲轴的毛坯与材料	(147)
6. 活塞	(149)
6.1 活塞的工作情况和设计要求	(149)
6.2 活塞材料、毛坯及热处理	(152)
6.2.1 对活塞材料的要求	(152)
6.2.2 活塞用材料——铝合金	(152)
6.2.3 活塞的毛坯及热处理	(155)
6.3 活塞的结构设计	(156)
6.3.1 活塞头部	(156)
6.3.2 活塞销座	(162)

6.3.3	活塞裙部	(166)
6.3.4	活塞结构尺寸的统计	(171)
6.3.5	活塞的表面处理	(172)
6.3.6	活塞的加工和装配	(173)
7.	活塞环	(175)
7.1	气环的作用、工作条件和设计要求	(175)
7.1.1	气环的作用	(175)
7.1.2	活塞环的工作条件及损坏情况	(177)
7.1.3	活塞环的设计要求	(178)
7.2	活塞环的材料	(178)
7.3	气环的设计	(179)
7.3.1	活塞环的断面形状	(179)
7.3.2	切口形状	(182)
7.3.3	活塞环的结构尺寸	(183)
7.3.4	活塞防漏部的设计及与活塞环的配合	(184)
7.3.5	活塞环的应力计算和制造尺寸的确定	(188)
7.3.6	活塞环的表面覆层	(193)
7.3.7	等压环和非等压环	(195)
7.3.8	活塞环的加工	(196)
7.4	油环的设计	(197)
7.5	活塞环的组合	(202)
8.	活塞销	(206)
8.1	活塞销的工作条件和材料	(206)
8.2	活塞销的结构和尺寸	(206)
8.3	活塞销的计算	(208)
8.4	活塞销的加工和装配	(210)
9.	连杆组	(212)
9.1	总述	(212)
9.2	连杆的结构型式	(213)
9.2.1	并列连杆	(213)
9.2.2	主副连杆(又称关节式连杆)	(213)
9.2.3	叉形连杆	(214)
9.3	连杆小头	(214)
9.4	连杆杆身	(217)
9.5	连杆大头	(220)
9.6	连杆螺栓	(223)
9.6.1	连杆螺栓的强度验算	(224)
9.6.2	提高螺栓疲劳强度的措施	(226)
9.7	有限元法在连杆计算中的应用	(227)
9.7.1	计算模型的选择与网格的划分	(171)
9.7.2	载荷的处理	(166)



9.7.3 计算结果整理	(229)
10. 机体、气缸盖、气缸套	(230)
10.1 机体	(230)
10.1.1 总述	(230)
10.1.2 设计要点	(231)
10.1.3 密封机油的问题	(235)
10.2 气缸盖	(237)
10.2.1 几种柴油机气缸盖的结构	(238)
10.2.2 减小气缸盖温度应力的问题	(239)
10.2.3 气缸盖进排气道的布置	(241)
10.2.4 气缸盖变形问题	(241)
10.2.5 气缸盖主要尺寸	(242)
10.3 气缸套	(243)
10.3.1 气缸套结构	(243)
10.3.2 气缸套与气缸盖接合面的密封	(244)
10.3.3 气缸套产生磨损的原因及提高气缸套耐磨性的措施	(246)
10.3.4 湿气缸套的穴蚀问题	(249)
10.4 风冷内燃机的气缸体和气缸盖	(251)
10.4.1 气缸体的结构特点	(251)
10.4.2 气缸盖的结构特点	(252)
11. 配气机构	(257)
11.1 配气机构的总体布置	(259)
11.1.1 气门的布置	(259)
11.1.2 凸轮轴的布置及驱动	(260)
11.2 凸轮机构	(262)
11.2.1 总述	(262)
11.2.2 圆弧凸轮外廓及平面挺柱的运动规律	(262)
11.2.3 凸轮缓冲曲线的设计	(266)
11.2.4 函数凸轮的设计	(268)
11.3 气门机构运动质量的换算	(270)
11.4 高速内燃机气门机构的动力学	(273)
11.4.1 现象	(273)
11.4.2 气门机构的动力学模型	(273)
11.5 气门组的结构设计	(276)
11.5.1 气门的设计	(276)
11.5.2 气门座	(281)
11.5.3 气门导管	(282)
11.5.4 气门旋转机构	(283)
11.6 气门弹簧的设计	(284)
11.6.1 气门弹簧的作用	(284)
11.6.2 气门弹簧特性参数的确定	(284)

11.6.3	气门弹簧的设计	(286)
11.6.4	气门弹簧的共振	(287)
11.7	气门机构中驱动件的设计	(288)
11.7.1	凸轮轴	(288)
11.7.2	挺柱	(290)
11.7.3	推杆	(291)
11.7.4	摇臂	(291)
11.7.5	气门与活塞的碰撞校核	(293)
12.	润滑系统	(295)
12.1	机油	(295)
12.1.1	机油的使用性能	(295)
12.1.2	机油添加剂	(296)
12.1.3	国产机油品种	(297)
12.1.4	机油牌号的选用	(297)
12.1.5	机油的换油期	(298)
12.2	内燃机的润滑系	(299)
12.2.1	湿式和干式曲轴箱润滑系	(299)
12.2.2	机油散热量和机油流量的确定	(301)
12.2.3	机油泵实际流量的决定	(302)
12.2.4	机油的工作压力和温度	(303)
12.2.5	油底壳机油容量	(303)
12.2.6	曲轴箱通风	(304)
12.3	润滑系主要元件的设计或选用	(305)
12.3.1	机油泵	(305)
12.3.2	机油滤清器	(310)
12.3.3	机油冷却器	(317)
13.	冷却系统	(321)
13.1	水冷系主要部件结构及其参数的确定	(321)
13.1.1	水泵	(321)
13.1.2	散热器的结构与计算	(325)
13.1.3	风扇	(328)
13.1.4	内燃机水冷系统的流量计算	(335)
13.2	水冷系的温度调节	(336)
13.2.1	百叶窗	(337)
13.2.2	改变风扇转速	(337)
13.2.3	节温器	(339)
13.3	高温水冷系	(340)
13.4	空气冷却系	(341)
13.4.1	空气冷却系设计要求	(341)
13.4.2	散热片的结构与设计要求	(341)
13.4.3	风冷内燃机散热片的验算步骤	(342)
13.4.4	导流罩	(344)

13.4.5 空冷系的温度调节.....	(345)
14. 内燃机的起动.....	(347)
14.1 内燃机实现起动的条件.....	(347)
14.2 内燃机的低温起动.....	(349)
14.3 各种起动方法.....	(349)
附录1 本书使用的法定计量单位名称、符号及换算.....	(352)
附录2 常用单位换算简表.....	(354)
学习参考书目.....	(356)

# 1 内燃机设计总论

## 1.1 前言

人类在不断提高生产力以改善生活条件的斗争过程中，不但学会了使用工具以扩大手脚的功能，而且随着生产工具的不断改进，也在持续不断地搜寻自身体力以外的动力用来驱动生产率日益提高、所需动力日益增大的生产工具。在经历了以奴隶、畜力以及简单的风力和水力机械作为动力的漫长岁月后，1784年改良的蒸汽机的发明引起了第一次工业革命，人类从此开始找到了能够充分地提供机械动力以满足生产需要的动力机械。

动力机械是一种将可以利用的其他形式的能转换成机械能，用以驱动工作机械做功的机械。动力机械与被驱动装置一起所构成的具有特定用途的装置谓之动力装置。

随所用能源种类和工作原理的不同有各种不同的动力机械。内燃机是热动力机械（热机）的一种，它是将燃料在机器内部进行燃烧所释放出的热能转换成机械能的机械。

内燃机——主要是指往复式内燃机。它是目前应用最广泛的一种热机。它具有体积小、移动灵便、效率高和操纵使用方便等特点。

我国的“四化”建设正在突飞猛进地发展，对各种型式内燃机的需要量是巨大的。我国具有丰富的石油资源，而且内燃机还有燃用其他种类燃料的可能性，就更使内燃机在我国有极其广泛的应用基础。

本书着重讨论“内燃机设计”中的有关问题。

设计就是创新。设计内燃机就是要创造出具有现代水平的、更能满足使用要求的、前所未有的新型内燃机。在这里智慧和思维起着重要的作用。应该说，一种优秀设计的产生是人类智慧和思维劳动的又一新结晶。你要做出人类智慧的新结晶，就必须先继承并借鉴人类至今已有的智慧结晶；你就必须对现在已有的内燃机先有一个深刻的了解，否则你甚至说不清楚你所谓的新型究竟新在那里。这是一个艰苦的学习过程，不但要从书本和文献中学习，而且要对现有的样机进行广泛、深入的分析研究。

为了使所设计的内燃机在性能上明显地优于现有内燃机，必须有相应的新方案和新措施。这些新的东西主要来自客观世界，即各种现代技术和理论、各种试验和测试结果以及各种机型实样及其使用经验等在人头脑中的反映。它是这些原始资料在人脑中经过综合分析、判断推理加工后的成果。

最后，为了检验其实际效果，除了进行各种估算之外，最终还必须通过试制样机的各种试验和实际使用的考验。

总起来说，设计是人类在认识世界和改造世界中反复进行的一种重要步骤。人们在搜寻外界动力的过程中，基于对自然规律的认识创造出了内燃机这一客观实体。人们在运用这一客观实体改造客观世界的过程中，认识又有了深化，于是，产生进一步创造出更好的内燃机的思想。把这种思想用图形以及其他手段完整的表达出来的过程就是我们所谓的内燃机设计。

计, 然后进一步通过加工与制造形成新的实体。如此循环反复, 以至无穷。自从1876年德国人Nicolaus A. Otto 制出最初的四冲程火花点火式煤气机和1898年Rudolf Diesel 制出压缩点火式内燃机以来, 经过了百余年的这种循环反复, 内燃机已发展到了今天的水平。根据近年来国际上有关著名公司与集团集中力量进行研究与竞争的情况来看, 为了使人类能够具有更好的这种动力机械, 这种循环反复还必须继续下去。我们的任务就是也加入这个循环反复的行列, 并在马克思列宁主义思想的指导下作出更大的成绩, 使我国的内燃机科学技术迅速跻身于先进国家之列, 并竞相媲美。

内燃机设计是一项复杂的工作。内燃机是一种结构复杂的机器, 它的许多零件是在经受高温、高应力和剧烈摩擦的苛刻条件下工作的。这就使设计人员必须掌握相当宽广的有关理论与技术知识才能正确地进行设计。此外, 内燃机又是用途十分广泛, 小至航模, 大至万吨远洋巨轮都有它的踪迹。为了使所设计的内燃机能更好地发挥作用, 就不能不对相应的动力装置也有所了解。此外, 设计人员还必须熟悉有关制造工艺、维护修理; 甚至市场信息等等。

“内燃机设计”课中所必须包括的内容是十分广泛而且庞杂的。作为“内燃机设计”课的教科书, 不能不考虑学生用于学习本课程的时间和精力都是有限的, 因此在内容安排上必须十分精练, 而且充分注意教学用书所必须具有的特点。

课程安排是力图在有限的篇幅里多讲解一些设计思想方面的问题, 即尽量介绍思路和设计中的思想方法、典型的结构形式和大致的尺寸比例范围等。不主张在课程中讲授过多的结构实例和具体方案, 因为内燃机本身是在发展变化着的, 新技术在不断地涌现, 特别是当今的内燃机设计, 正由经验设计向优化设计发展, 学是学不完的。我们更希望学生在以后的工作中有能力根据具体的工作任务和要求进行具体的调查、分析和研究, 探索自己的具体解决方法。

教材中的有些内容将另安排选修课, 以便有条件和有兴趣的学生能有选择地进行更深入的学习。但这些内容在本书中并不删除, 并按每一学生都必须有所了解的最低限度的深度保留下来。

## 1.2 内燃机的设计要求

### 1.2.1 功率和转速

作为动力机械, 使用者对内燃机第一位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GB1105.1—87的规定, 内燃机的功率可按四种不同情况进行标定, 所产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, 即:

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

(2) 1小时功率——内燃机允许连续运转1小时的标定功率。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) 12小时功率——内燃机允许连续运转12小时的标定功率。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。

在设计内燃机时，标定功率应该只是内燃机实际可以发出功率的下限。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（如排气冒烟等）的恶化。

内燃机的有效功率 $P$ 可按下式计算：

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

$$= 0.7854 \times 10^{-3} \cdot \frac{p_e \cdot C_m \cdot i \cdot D^2}{\tau} \quad (\text{kW}) \quad (1-2)$$

式中  $p_e$ ——平均有效压力 (MPa)；

$i$ ——气缸数；

$V_h$ ——一个气缸的工作容积或活塞排量 (L)；

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \quad (1-3)$$

$n$ ——转速 (r/min)；

$D$ ——气缸直径 (mm)；

$S$ ——活塞行程 (mm)；

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

$C_m$ ——活塞平均速度，

$$C_m = \frac{S \cdot n}{30} \times 10^{-3} \quad (\text{m/s}) \quad (1-4)$$

当其他条件相同时， $p_e$ 高则 $P$ 大。由于 $p_e = p_i \cdot \eta_m$ （这里 $p_i$ ——平均指示压力； $\eta_m$ ——内燃机的机械效率），所以提高 $p_e$ 须从提高 $p_i$ 和 $\eta_m$ 着手。要想提高 $p_i$ 就须解决两方面的问题：一是如何充入气缸更多的空气，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可靠地在随 $p_i$ 而增高的燃烧压力和燃烧温度的工况下可靠地工作。

机械效率 $\eta_m$ 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。下表所示是汽车用内燃机各部分机械功损失所占的大约百分比：

单位：%

损 失	汽 油 机	柴 油 机
活塞、活塞环和气缸间的摩擦功	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
驱动机油泵、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。

各类内燃机已经达到的 $p_e$ 值及将来（10~15年内）有可能达到的（括号中的数值）数值范围（MPa）如下表所示：

	$p_e$ (MPa)
汽油机	1~1.5
交流发电机组用柴油机	0.9~1.05(1.25~1.5)
内燃机车与中速船用柴油机	1.0~2.0(3.0~4.0)
轻型高速柴油机	1.2~1.8(2.5~3.0)
二冲程低速柴油机	1.2~1.5(2.0)

由式（1-1）还可看出，当其他条件相同时，转速 $n$ 愈高内燃机的功率也愈大。图1-1示出了转速 $n$ 与内燃机极限功率之间的关系。

在理想情况下，如果每循环中充入气缸的工作气体量（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；再加上当转速高时燃烧情况可能恶化，从而使得内燃机实际可能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。内燃机所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 $n_j$ 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 $\eta_m = \frac{P}{P + P_m}$

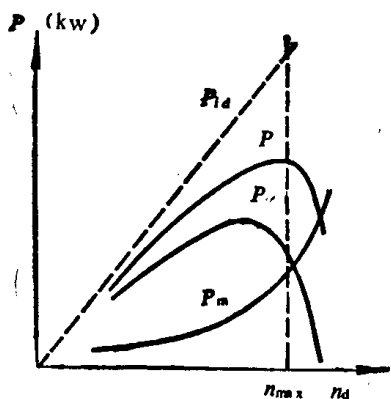


图1-1 内燃机功率与转速关系

不应小于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 $n_{max}$ 。

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，随着转速的增高，单位时间内气缸所完成的工作循环的次数增加了，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了，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，其转速应使所发电流具有规定的频率，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，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的大幅度变化时，内燃机的转速不应有大的波动。这些可以借安装调速器来解决。

装有废气涡轮增压器的内燃机需要设法解决调速上的困难。这是由于当内燃机的负载突然加大时，如不采取特别的措施，增压器的转速却不能立即增加，使得要在滞后几秒甚至十几秒之后充入气缸的空气量才能得到相应的增加。这就使这类柴油机所能达到的 $p_e$ 值受到了限制。

在大型船舶上，当柴油机是用传动轴直接联接螺旋桨时，为了使它有较高的推进效率，转速一般为110~130r/min。

对于机械传动的汽车、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。最大扭矩与标定功率时扭矩的比值谓之扭矩适应性系数 $\mu_m$ 。最大扭矩时的转速与标定功率时的转速之比谓之转速适应性系数 $\mu_n$ 。 $\mu_m$ 愈大， $\mu_n$ 愈小，则车辆行驶中必须换档的次数就可愈少。对于汽油机来说一般 $\mu_m = 1.25 \sim 1.35$ ， $\mu_n = 0.45 \sim 0.55$ ；对于柴油机来说一般 $\mu_m \leq 1.15$ ， $\mu_n = 0.55 \sim 0.7$ 。

### 1.2.2 内燃机的经济性

内燃机的经济性包括：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、使用中的劳动强度、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常用工况下的油耗率为最低。

另一方面，对于利用率高的内燃机来说，油耗率对经济性的关系极大；但对于利用率低的内燃机，例如应急备用电站，则应追求起动方便、可靠，而油耗率就不是十分重要的问题了。

据报道<sup>①</sup>，自从出现所谓石油危机以来，国际上出现了研制节油型内燃机的热潮。船用中速柴油机，在节油工况下的油耗率已降至约165g/(kW·h)；船用低速柴油机，最低记录已达158g/(kW·h)，此时的有效效率 $\eta_e$ 已接近50%。

一般车用内燃机的有效效率 $\eta_e$ 和油耗率 $g_e$ 如下表所示：

内燃机类别	$\eta_e(100)\%$	$g_e(g/kW \cdot h)$
汽油机	0.25~0.33	271~299
高速柴油机	0.35~0.40	197~231

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，包括减少所规定的维护工作量并使工作简易化和延长使用说

<sup>①</sup>船用柴油机简报，1982年12月。



说明书规定的相邻两次维护之间的时间间隔等。最理想的情况是作到能够废除维护，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。

对于设计者来说，努力延长定义（2）的寿命，甚至使定义（2）的寿命与定义（3）的寿命一致起来是一个应该努力的目标。同时，也应努力延长定义（3）的寿命，后者即通常所说的内燃机寿命。

另外，应设法使内燃机的修理工作简单易行。

随着机器自动化的发展，劳动生产率的提高，而修理工作的生产率总是偏低，所以在小功率内燃机领域已日趋向于无大修的寿命期。

### 1.2.3 内燃机外廓尺寸的紧凑性和质量

在许多种动力装置中，为了能有更多的有用空间，希望内燃机本身占用的空间缩至最小，即要求内燃机的设计紧凑。内燃机外的紧凑性可定义为

$$\delta = \frac{iV_h}{LBH} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中  $L$ 、 $B$  和  $H$  分别为内燃机外廓的长、宽和高。

当总活塞排量  $iV_h$  一定时，缸数  $i$  和气缸的排列方式（直列、V型、W型、X型、星形排列等等，如图1-2所示）对  $\delta$  值有很大影响。另外，零件和总成的安排以及附属设备，如空气滤清器、增压器、空气冷器以及管路等的合理布置，也对  $\delta$  值的大小具有重要影响。

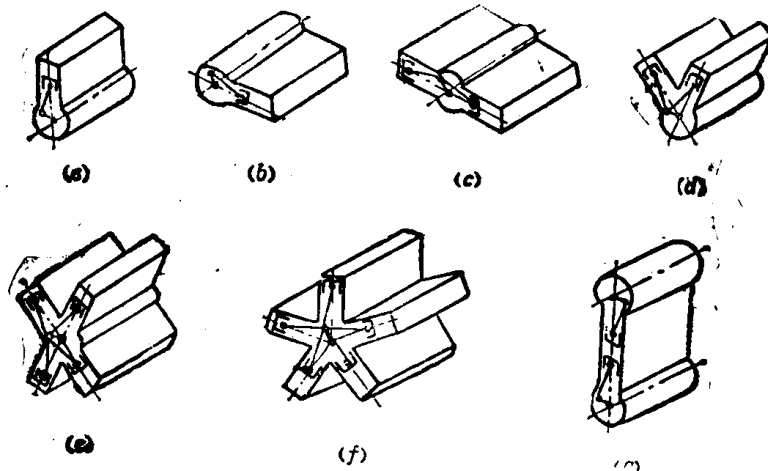


图1-2 内燃机的气缸排列

单缸机的  $\delta$  值很小，只可达 0.3~0.5%；直列式内燃机安排得好时， $\delta = 1 \sim 1.2\%$ ，V型机有的可超过 2%。如不考虑增压系统所占空间，则采用更为复杂的气缸排列方式，可使  $\delta$  值达到 4~5%。

设计时，一方面设法使各部分的安排紧凑，另一方面也应注意到加工、装配、维护和修理上的可能和便利。

车用内燃机和移动式内燃机，质量小（即重量轻）是一个追求目标。质量小在某种程度