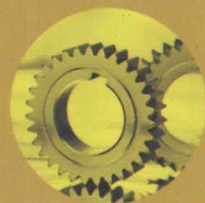
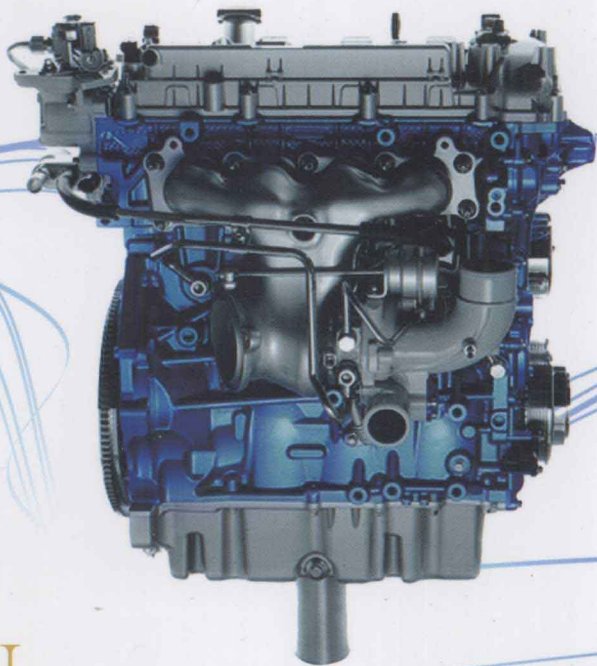


“十二五”地方工科院校汽车工程专业实用型系列规划教材

现代内燃机 设计技术



雷艳 ● 编著



XIANDAI
NEIRANJI
SHEJI JISHU

北京工业大学出版社

“十二五”地方工科院校汽车工程专业实用型系列规划教材

现代内燃机设计技术

雷 艳 编著

北京工业大学出版社

内 容 简 介

本书是一本内燃机设计教材,主要介绍了内燃机设计的基本理论和方法。内燃机设计需要综合多门学科的知识,包括热力学、流体力学、工程力学、机械原理等基础知识。本书一共分为10章,内容包括内燃机设计总论、内燃机动力学、内燃机总体设计、内燃机主要零部件设计以及内燃机辅助系统设计。同时,由于现代计算机技术的不断发展,现代内燃机设计中普遍运用了CAD/CAE/CAM技术。本书介绍了许多现代设计方法在内燃机设计中的应用,介绍了目前常用的CAE设计及计算软件,并介绍了这些软件在内燃机主要零部件设计中的应用。本书可作为内燃机专业本科生的专业课程教材,也可供相关工程技术人员参考,同时可作为汽车专业的专科生等的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代内燃机设计技术/雷艳编著. —北京:北京工业大学出版社, 2011. 11

“十二五”地方工科院校汽车工程专业实用型系列规划教材
ISBN 978-7-5639-2824-8

I. ①现… II. ①雷… III. ①内燃机-设计-高等学校-教材
IV. ①TK402

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第168420号

“十二五”地方工科院校汽车工程专业实用型系列规划教材 现代内燃机设计技术

编 著:雷 艳

责任编辑:王轶杰

出版发行:北京工业大学出版社

(北京市朝阳区平乐园100号 100124)

010-67391722(传真) bgdcbs@sina.com)

出 版 人:郝 勇

经销单位:全国各地新华书店

承印单位:徐水宏远印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:11.25

字 数:285千字

版 次:2011年11月第1版

印 次:2011年11月第1次印刷

标准书号:ISBN 978-7-5639-2824-8

定 价:20.00元

版权所有 翻印必究

(如发现印装质量问题,请寄本社发行部调换 010-67391106)

序

当今的内燃机作为主要的热能动力装置依然得到广泛的应用，以不同种类和使用目的及条件，在小到 1 kW，大到 10 000 kW 的广阔范围内使用。在我国仅汽车发动机，2010 年产量就超过 1 900 万台，发动机的品种也不断增加。国内外有关内燃机的书已经很多，可为以内燃机为对象作毕业设计的大学生、刚从事设计工作的技术人员提供内燃机设计方法的很少。为这些内燃机设计和研究人员服务，使他们更好地发挥创新性，就是《现代内燃机设计技术》这本书的使命和价值所在。

本书就遵循这一意图，在内燃机设计理论基础上，以常见的典型内燃机为例，具体叙述了有关确定设计方案的方法、总布置的确定、主要零件的设计方法，并运用现代的计算软件进行设计举例说明。对润滑系、冷却系、电器装置等主要发动机附件在设计时所必须考虑的问题，在相关章节也做了叙述。

就内燃机设计而言，不可单纯模仿，而应将理论知识和实践经验进行有效的结合。这一协调的结果形成设计者有血有肉的具体体现，最后在图纸上面表达出设计者的意愿。作者在这里将多年教学实践进行了归纳总结，形成了这部教材，希望能为从事内燃机工程和汽车专业的师生和相关技术人员提供参考，不断补充完善现代内燃机设计技术，为提高我国的内燃机设计水平做出贡献。

北京工业大学老教授协会会长
周大森

前 言

随着社会的进步，现代内燃机技术不断向前发展。在此背景下，作者针对热能与动力工程专业本科生的专业课程教学编写了本书，以作为内燃机设计课程教材。本书适用于热能与动力工程专业的本科生教学，主要介绍了内燃机设计的基本理论、原则和方法。

本书共分为 10 章，对内燃机设计总论、内燃机动力学、内燃机总体设计、内燃机主要零部件（曲轴组、活塞组、连杆组、机体和气缸盖）设计、配气机构设计、进排气系统设计以及内燃机辅助系统设计分别进行了介绍。

本书不仅介绍了传统的内燃机结构及其设计要点，而且也介绍了近年来出现的新型的内燃机结构。在介绍传统的设计理论、设计原则的同时，本书对现代内燃机设计中常用的 CAE 技术进行了介绍，并对 CAE 技术在一些零部件设计中的应用进行了说明。

本书各章的内容独立性相对较强，使用者可以根据自身的需求重点阅读相关章节。

编者在编写本书的过程中，得到了北京工业大学原副校长周大森教授的大力支持。周大森教授对本书的编写内容提出了宝贵的意见，在此作者表示真挚的感谢，同时还要感谢北京工业大学出版社。

主要符号表

符 号	名 称	符 号	名 称
a	加速度	L_0	气缸中心距
A	面积；重叠度	P_e	有效功率
A_m	平均时间-截面值	P_L	升功率
B, b	宽度	P_V	单位体积功率
C_m	活塞平均速度	p_{me}	平均有效压力
C	刚度	R, r	半径
D	气缸直径	R_x, R_y	载荷力
d	直径	S	活塞行程
E	材料弹性模量	t	活塞环径向厚度；时间；温度
e	偏心量	τ	冲程数；剪切应力
F	力	V	体积
F_g	气体作用力	V_h	气缸工作容积或活塞排量
F_j	往复惯性力	v	速度
F_r	旋转惯性力	W_σ	抗弯断面模数
F_N	侧压力	x	位移
F_a	曲柄臂离心力	y	位移
F_b	平衡重离心力	Z	支反力
G	内燃机净质量	ω	角速度
f	影响系数	ρ	密度；曲率半径
g_w	比质量	μ_M	扭矩储备系数
H, h	高度	μ_n	转速适应性系数
h_t	气门升程	μ	总适应性系数
I_G	转动惯量	δ	系数；活塞顶厚度；间隙距离
i	气缸数	λ	连杆比
J	梁的截面惯性矩	θ	角度
k	相对偏心量	α	曲轴转角；角度

符 号	名 称	符 号	名 称
L, l	长度	β	角度；连杆摆角
M_e	扭矩	γ	角度；关节角
m	质量	φ	轴颈重叠系数
n	发动机转速	ξ	系数
ψ_f	丰满系数	σ_n	名义弯曲应力

目 录

第 1 章 内燃机设计总论	1
1.1 内燃机的设计要求	1
1.1.1 车用内燃机的设计要求	1
1.1.2 工程机械内燃机的设计要求	2
1.1.3 农用机械内燃机的设计要求	2
1.2 内燃机的设计指标	3
1.2.1 内燃机动力性指标	3
1.2.2 内燃机经济性指标	6
1.2.3 内燃机紧凑性指标	7
1.2.4 内燃机可靠性及耐久性指标	7
1.2.5 内燃机低公害指标	8
1.2.6 其他指标	10
1.3 内燃机设计的一般程序	10
1.4 现代内燃机设计与技术的发展	12
1.4.1 新结构、新材料、新技术、新工艺的应用	12
1.4.2 现代设计与分析方法	13
第 2 章 内燃机动力学	17
2.1 曲柄连杆机构运动学	18
2.1.1 中心曲柄连杆机构运动学	18
2.1.2 偏心曲柄连杆机构运动学	20
2.1.3 主副连杆式曲柄连杆机构运动学	22
2.2 曲柄连杆机构中运动零件的质量换算	25
2.2.1 连杆组(平面运动部分)的质量换算	25
2.2.2 活塞组(往复直线运动部分)的质量换算	25
2.2.3 曲柄组(不平衡旋转部分)的质量换算	26
2.3 曲柄连杆机构中的作用力	27
2.3.1 往复惯性力	27
2.3.2 旋转惯性力	27
2.3.3 气体作用力	27
2.3.4 作用在活塞上的合成力	27
2.3.5 活塞上的合成力的分解和传递	28
2.4 轴颈与轴承载荷图	29

2.4.1 连杆轴颈和连杆大头轴承的载荷图	30
2.4.2 主轴颈和主轴承的载荷图	31
2.4.3 轴颈和轴承的磨损图	33
第3章 内燃机总体设计	34
3.1 内燃机的选型	34
3.1.1 汽油机、柴油机、代用燃料发动机	35
3.1.2 二冲程、四冲程内燃机	35
3.1.3 增压与非增压内燃机	36
3.1.4 水冷式和风冷式内燃机	36
3.1.5 气缸数及气缸排列方式	37
3.1.6 混合动力	38
3.2 内燃机主要结构参数的确定	39
3.2.1 活塞行程与气缸直径的比值	39
3.2.2 曲柄半径与连杆长度的比值	40
3.2.3 气缸中心距与气缸直径的比值	40
3.3 内燃机的总体布置	41
3.4 计算机辅助工程在内燃机设计中的应用	41
第4章 曲轴组设计	44
4.1 曲轴的工作条件与设计要求	44
4.2 曲轴的结构类型与材料	45
4.2.1 曲轴的结构类型	45
4.2.2 曲轴的材料	46
4.3 曲轴的结构设计	46
4.3.1 曲轴轴颈	47
4.3.2 曲柄臂	48
4.3.3 平衡重	49
4.3.4 润滑油通道	49
4.3.5 曲轴两端与轴向止推	50
4.4 曲轴的疲劳强度校核	51
4.4.1 分段法	51
4.4.2 连续梁法	54
4.5 提高曲轴疲劳强度的结构措施和工艺措施	56
4.5.1 结构措施	56
4.5.2 工艺措施	58
4.6 有限元法在曲轴计算中的应用	60
第5章 活塞组设计	62
5.1 活塞组的工作条件与设计要求	62
5.2 活塞的结构类型与材料	64
5.3 活塞的结构设计	65
5.3.1 活塞头部	66

5.3.2 活塞销座和活塞销	68
5.3.3 活塞裙部	72
5.3.4 活塞环	74
5.4 有限元法在活塞计算中的应用	80
第6章 连杆组	82
6.1 连杆组的工作条件与设计的要求	82
6.2 连杆的材料	83
6.3 连杆的结构类型	83
6.4 连杆的结构设计	85
6.4.1 连杆长度 l	85
6.4.2 连杆小头	85
6.4.3 连杆杆身	87
6.4.4 连杆大头	88
6.4.5 连杆螺栓	91
6.4.6 有限元方法在连杆计算中的应用	94
第7章 机体和气缸盖设计	95
7.1 机体设计	95
7.1.1 机体的工作条件及设计要求	95
7.1.2 机体的结构类型	97
7.1.3 机体的设计要点	98
7.1.4 CAE 技术在机体设计中的应用	102
7.2 气缸和气缸套设计	103
7.2.1 气缸套的工作条件与设计的要求	103
7.2.2 气缸套的结构类型	104
7.2.3 气缸套的材料	105
7.2.4 增加气缸耐磨性的措施	106
7.2.5 气缸套穴蚀产生的主要部位	107
7.2.6 穴蚀产生的机理和减轻气缸套穴蚀的措施	107
7.3 气缸盖设计	109
7.3.1 气缸盖的工作条件与设计的要求	109
7.3.2 气缸盖的结构类型	109
7.3.3 气缸盖的材料	110
7.3.4 气缸盖的主要尺寸	110
7.3.5 气缸盖的冷却	111
7.3.6 CAE 分析在气缸盖设计中的应用	112
第8章 配气机构设计	114
8.1 配气机构的工作情况与设计的要求	114
8.2 配气机构的类型	114
8.3 气门机构的通过能力	116
8.3.1 气门通过能力的评价	116

8.3.2 气门直径与气门最大升程的关系	118
8.4 配气凸轮机构运动学和凸轮型线的设计	118
8.4.1 圆弧凸轮外廓及平底挺柱的运动规律	119
8.4.2 凸轮缓冲段的设计	122
8.4.3 函数凸轮的设计	124
8.5 高速内燃机配气机构动力学	127
8.5.1 气门实际运动规律	127
8.5.2 配气机构单质量动力学模型	127
8.5.3 凸轮型线动力修正	129
8.6 气门组设计	130
8.6.1 气门的设计	130
8.6.2 气门座与气门导管设计	133
8.7 配气机构中的驱动件设计	135
8.7.1 凸轮轴设计	135
8.7.2 挺柱设计	137
8.7.3 推杆设计	139
8.7.4 摇臂设计	139
8.7.5 气门弹簧设计	140
8.8 气门与活塞组排气行程上止点是否相碰的计算	141
8.9 可变配气机构	142
8.9.1 不连续可变配气机构	143
8.9.2 连续可变气门升程机构 CVVL (Continuous Variavle Valve Lift)	144
第9章 进排气系统设计	147
9.1 进、排气系统的工作条件与设计的要求	147
9.2 进、排气系统的布置	148
9.3 进、排气系统的主要部件设计	148
9.3.1 空气滤清器	148
9.3.2 进、排气歧管设计	150
9.3.3 消声器的设计	151
第10章 内燃机辅助系统设计	152
10.1 润滑系统设计	152
10.1.1 润滑系统的分类及特点	152
10.1.2 润滑系统机油散热量和机油流量的确定	153
10.1.3 润滑系统的主要元件的设计、选取	155
10.2 冷却系统设计	158
10.2.1 冷却系统的设计要求	158
10.2.2 冷却系统的主要零部件结构及参数的确定	160
10.2.3 冷却系统的调节	165
参考文献	169

第 1 章 内燃机设计总论

作为车辆心脏的内燃机，目前是应用最为广泛的热机之一。自发明以来，内燃机不断进步，应用于内燃机的各种技术也在突飞猛进地发展，特别是进入 21 世纪以来，随着科技的迅猛发展，同时伴随着世界范围内对能源和环保问题的高度关注，无论是在动力性能、经济性能方面，还是在排放性能方面，对内燃机都提出了更多、更高的要求。现代社会对内燃机提出的高性能、高效率、低能耗、低排放的要求，需要依靠先进合理的设计方法和生产水平来满足。

内燃机设计技术的发展无疑对提高现代内燃机性能有着不可忽视的作用。现代内燃机设计旨在设计出先进的、能满足更高要求、更高标准的新型内燃机。

1.1 内燃机的设计要求

内燃机设计是一项复杂的工程。内燃机设计应满足使用和制造方面的要求，如要有强劲的动力性能，同时保持经济的燃油消耗率和较低的有害物排放水平，噪声小；运转安全可靠，使用寿命长；体积、质量尽可能小；能迅速可靠地起动，具有良好的适应性；工艺性好，易于加工制造以保证质量，等等。由于这些要求中有的是相互冲突的，内燃机难以满足所有的要求；同时，内燃机的应用范围、用途不同，对性能的要求也不尽相同。因此，在内燃机设计阶段，要充分考虑其实际用途，有针对性地进行设计。

1.1.1 车用内燃机的设计要求

车用内燃机性能是影响车辆性能的关键因素，车用内燃机设计要围绕车辆的功能和使用性能来展开。其主要设计要求如下：

(1) 动力性能。内燃机应保持强劲的动力性能以保证车辆的动力性。同时，车辆的功能在载人或载货时运行工况会发生较大变化，出现频繁的起动、加速、停车，这就要求作为车辆的主要驱动装置的内燃机能满足较大范围内的速度以及负载的变化。

(2) 燃油经济性。全球能源危机问题日益严峻，对车用内燃机的燃油消耗提出了更高的要求。现代内燃机设计要尽可能地降低各种负荷工况下的燃油消耗量。

(3) 排放性能。21 世纪最主要的两大问题聚焦在能源和环保方面，社会对车辆的尾气排放问题高度关注，这也对内燃机的设计提出了低排放的高要求，同时要求噪声尽可能小。

(4) 结构。内燃机的外形尺寸尽可能小，结构要紧凑，便于安装和维修；质量要尽可能小，满足节能要求。

(5) 使用性能。要求车用内燃机的使用寿命尽量长，零部件结构的工艺性好，易于加工制造，适于大批量生产，同时保证较低的制造成本；要有良好的可靠性和安全性；便于维修、维护。

1.1.2 工程机械内燃机的设计要求

工程机械是指用于工程建设的施工机械的总称。工程机械种类繁多,广泛用于建筑、水利、电力、道路、矿山、港口和国防等工程领域,主要分为挖掘机械、铲土运输机械、工程起重机械、压实机械、桩工机械、钢筋混凝土机械、路面机械、凿岩机械及其他工程机械(如架桥机、风动机械)。这些工程机械的功能、应用范围各不相同,可以在不同地域、不同气候条件下使用,因此其设计要求也不同。对于工作环境恶劣,承受冲击力和急剧变速、变负荷的,而且时常运行在超负荷工况下的挖掘机械、铲土运输机械,需专门设计内燃机。对于其他工作条件较好的工程机械,如压路机等,可使用经车用内燃机改型后的工程机械内燃机。

1.1.3 农用机械内燃机的设计要求

农用机械是指为农业生产、农副产品加工、农田建设、农业运输和各种农业设施提供原动力的机械,这类机械用途广泛。农用机械在农业中应用可提高劳动生产率,减轻劳动强度,增强农作物抵御自然灾害的能力,帮助农民及时地完成各项农事作业,对农作物产量的提高具有显著作用。

农用内燃机经常在尘土飞扬、雨淋日晒、泥水冲溅的环境中工作,且用于某些作业(如收割、脱粒等)时负荷变化大,有时短期超载;农业生产的季节性强,在抗旱排涝或农忙季节时,内燃机往往连续工作8 h以上(甚至数日),且工作地点远离城镇,维修和配件供应等条件较差。因此,农用内燃机的一般设计 requirements 是:可靠性好,使用寿命长,选择配套功率应以12 h持续功率为准,并能适应短期超载;能使用廉价燃料或农村易于获取的燃料(如煤气、沼气等);机体刚性好,连接坚固可靠,机械结构简单,易于维修;低温起动性能好;空气、燃油和机油滤清器的净化能力强;能一机多用,在不同农事季节能配备不同的农具,还能兼作船用或陆用运输动力。

几种典型的内燃机如图1.1~图1.5所示。

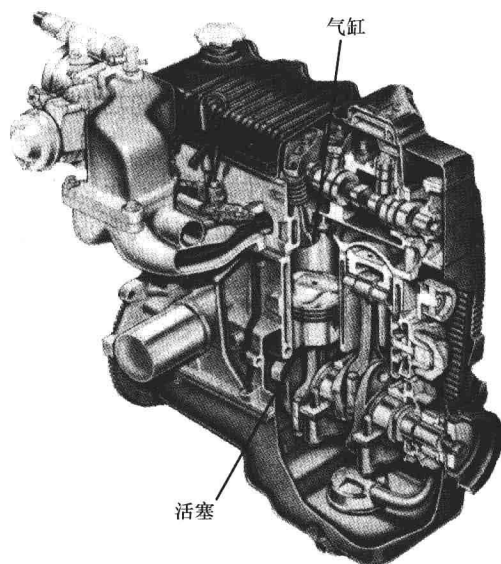


图 1.1 四缸汽油机

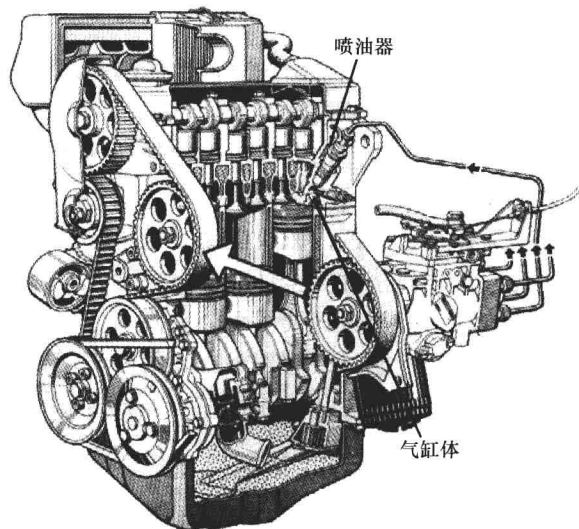


图 1.2 四缸柴油机

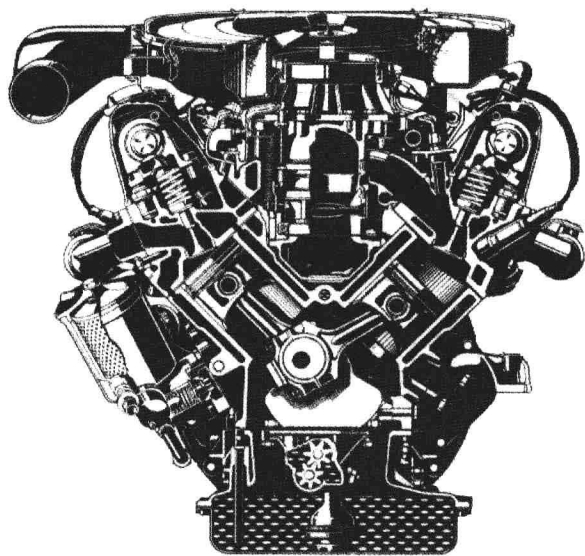


图 1.3 V形凸轮轴顶置发动机

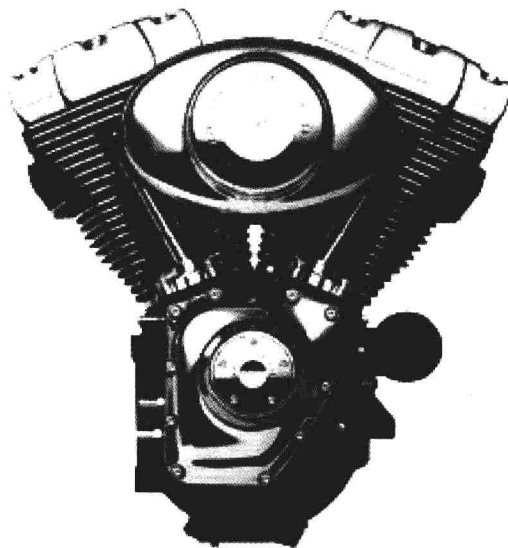


图 1.4 摩托车发动机

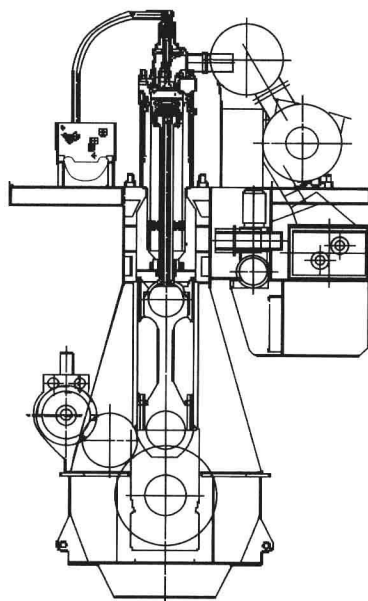


图 1.5 船用柴油机

1.2 内燃机的设计指标

1.2.1 内燃机动力性指标

1. 功率

按照国标 GB 1105.1—1987 的规定，内燃机的功率可按 4 种不同情况进行标定，即：

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

(2) 1 h 功率。内燃机允许连续运行 1 h 的标定功率, 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 h 功率。内燃机允许连续运行 12 h 的标定功率, 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, 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发出功率的下限。

内燃机的有效功率 P_e 按以下公式进行计算:

$$P_e = \frac{p_{me} i V_h n}{30\tau} \quad (1.1)$$

式中: p_{me} 为平均有效压力, MPa; i 为气缸数; V_h 为一个气缸的工作容积或活塞排量, $V_h = \frac{\pi D^2 S}{4}$, D 为气缸直径, mm, S 为活塞行程, mm; n 为转速, r/min; τ 为冲程数, 四冲程机 $\tau=4$, 二冲程机 $\tau=2$ 。

现代汽车内燃机由于其使用范围的不同, 对标定功率的要求也不同。为了满足在较大范围内的变速变负荷良好的加速性能, 一般中、轻型汽车标定功率为 15~370 kW, 汽车内燃机的标定功率随汽车的载重量增加而增加, 个别矿山用载重汽车内燃机的标定功率约为 900 kW。

升功率 P_L 是指在标定工况下发动机每升气缸工作容积所发出的有效功率, 它是从功率方面衡量发动机气缸工作容积利用程度的一个指标。

内燃机的升功率 P_L 按以下公式进行计算:

$$P_L = \frac{P_e}{i V_h} \quad (1.2)$$

将式 (1.1) 代入式 (1.2), 可得

$$P_L = \frac{p_{me} n}{30\tau} \quad (1.3)$$

可见, 升功率是从发动机有效功率的角度对气缸工作容积的利用率作总的评价。升功率是评定一台内燃机整机动力性能和强化程度的重要指标之一。升功率越大, 发动机的强化程度越高, 发出一定有效功率的发动机尺寸越小。因此, 不断提高升功率以获得更强化、更轻巧、更紧凑的发动机一直是内燃机设计者的奋斗目标。

目前内燃机的 p_{me} 和 P_L 的范围如表 1.1 所示。

表 1.1 内燃机 p_{me} 和 P_L 的范围

内燃机类型	p_{me}/MPa	$P_L/(\text{kW} \cdot \text{L}^{-1})$
农用柴油机	0.60~0.80	8.80~14.70
汽车用柴油机	0.65~1.00	11.00~25.80
强化高速柴油机	1.00~2.90	15.00~40.00

续表

内燃机类型	p_{me}/MPa	$P_L/(\text{kW} \cdot \text{L}^{-1})$
固定船用中速柴油机	0.60~2.50	3.70~7.35
四冲程摩托车用汽油机	0.78~1.20	51.80~88.00
四冲程小客车用汽油机	0.65~1.20	40.00~70.00
四冲程载货汽车用汽油机	0.60~0.70	22.00~25.80
二冲程小型风冷汽油机	0.40~0.65	18.40~73.50

2. 内燃机转速与活塞平均速度

内燃机的标定转速与活塞平均速度是内燃机在标定功率时的转速和活塞平均速度。活塞平均速度是决定内燃机高速性能的指标。当其他条件相同时，转速越高内燃机功率越大，提高内燃机转速是提高内燃机单位体积功率的有效方法之一，可以使产生单位功率的内燃机的体积减小、质量减小。随着转速的上升，单位时间内气缸所完成的工作循环的次数相应增加，这使得内燃机零部件的机械负荷以及热负荷增加，并且由于转速增高使得运动件的惯性力增加，机件间相互摩擦的线速度增加，摩擦阻力增加，加速磨损，这将缩短零部件的使用寿命；此外，转速升高要求配气机构中的气流速度相应增大，导致阻力增加；同时转速的提高使得内燃机的平衡振动问题更为突出，噪声加大。因此，在结构设计时经常使用活塞平均速度作为一个指标，采取相应的措施保证零部件能在高速工况的条件下可靠工作。现代汽车内燃机的标定转速一般为 2 000~4 000 r/min，高速内燃机为 5 000~6 000 r/min。

内燃机中的惯性力、摩擦磨损等不仅与转速有关，同时与活塞行程相关，即与活塞的平均速度有关。因此内燃机的高速性可按活塞平均速度分为 3 类：高速内燃机，活塞平均速度一般为 9~15 m/s；中速内燃机，活塞平均速度一般为 6~9 m/s；低速内燃机，活塞平均速度一般为 4~6 m/s。

各种用途的内燃机转速范围如表 1.2 所示。

表 1.2 各种用途的内燃机转速范围

r · min⁻¹

用 途		柴油机	汽油机转速
汽车		1 500~5 000	2 500~6 500
工程机械与拖拉机		1 500~2 800	2 000~3 600
摩托车、摩托艇		—	5 000~10 000
中小型农用动力		1 200~3 000	3 000~6 000
船舶	高速	1 000~2 000	1 500~25 000
	低速	300~850	—

3. 扭矩

内燃机的标定功率和标定转速确定后，其标定转速下的扭矩可由下式确定：

$$M_e = \frac{P_e}{n} \times \frac{30\,000}{\pi} = \frac{P_e}{n} \times 9\,549.3 = \frac{318.31 p_{me} i V_h}{\tau} \quad (1.4)$$

式中： P_e 为有效功率，kW； n 为标定转速，r/min。

汽车、拖拉机、工程机械和农用动力机械对内燃机除了有功率和转速方面的要求外，还

要求内燃机具有一定的扭矩储备，即具有较好的扭矩特性，以克服短时间内的外界阻力。表征扭矩储备的参数为扭矩储备系数 μ_M ，也称扭矩适应性系数，表示最大扭矩与标定转速下扭矩的比值，即

$$\mu_M = \frac{M_{emax}}{M_e} > 1 \tag{1.5}$$

标定工况转速与最大扭矩条件下转速之比称为转速适应性系数 μ_n ，即

$$\mu_n = \frac{n}{nM_{emax}} > 1 \tag{1.6}$$

μ_M 越大，内燃机适应外界阻力变化的能力越强，对车辆而言可以减少换挡的次数，减少驾驶员的疲劳程度。 μ_n 越大，则工作越稳定，对车辆而言可以减少机械传动变速箱的排挡数，简化传动结构。扭矩适应性系数与转速适应性系数的乘积为总适应性系数 $\mu = \mu_M \mu_n$ ， μ 随用途不同而有所不同。现代各种内燃机的适应性系数如表 1.3 所示。

表 1.3 各种内燃机的适应性系数范围

动力装置	汽油机			柴油机		
	μ_M	μ_n	μ	μ_M	μ_n	μ
汽车	1.10~1.25	1.50~2.00	1.65~2.50	1.05~1.20	1.10~1.25	1.10~1.25
工程机械	1.20~1.45	1.60~2.00	1.90~2.90	1.15~1.40	1.60~2.00	1.85~2.80
拖拉机	1.20~1.30	1.60~2.00	1.90~2.60	1.15~1.25	1.60~2.00	1.85~2.50

1.2.2 内燃机经济性指标

内燃机的经济性指标主要是指燃油消耗率指标，即每千瓦小时的燃油消耗量。内燃机的燃油消耗率随运转工况的变化而不同，主要与内燃机的工作过程、燃烧室结构以及机械效率等密切相关。降低燃油消耗率的途径有二：一是提高内燃机的指示效率，如改善燃烧、减少散热损失等；二是提高机械效率，如减少机械损失等。

对于固定工况使用的内燃机，其经济性指标是指标定功率时的燃油消耗率；对于变工况使用的内燃机，其经济性能指标一般是指外特性曲线上的最低燃油消耗率。一般所说某内燃机的最低油耗率是指万有特性上的最低油耗率。万有特性上低油耗区越宽广，则对于变工况使用的内燃机的使用经济性越好。

各种动力装置用内燃机的燃油消耗率范围如表 1.4 所示。

表 1.4 各种动力装置用内燃机的燃油消耗率范围 $g \cdot (kW \cdot h^{-1})^{-1}$

动力装置	柴油机燃油消耗率	汽油机燃油消耗率
汽车、拖拉机	210~260(直喷式)	300~350
	240~270(分隔式燃烧室)	
中小功率农用内燃机	230~270	270~400
工程机械	220~260	270~350
内燃机车	210~240(高速)	—
	204~225(中速)	
船用中速柴油机(发电)	200~220	—