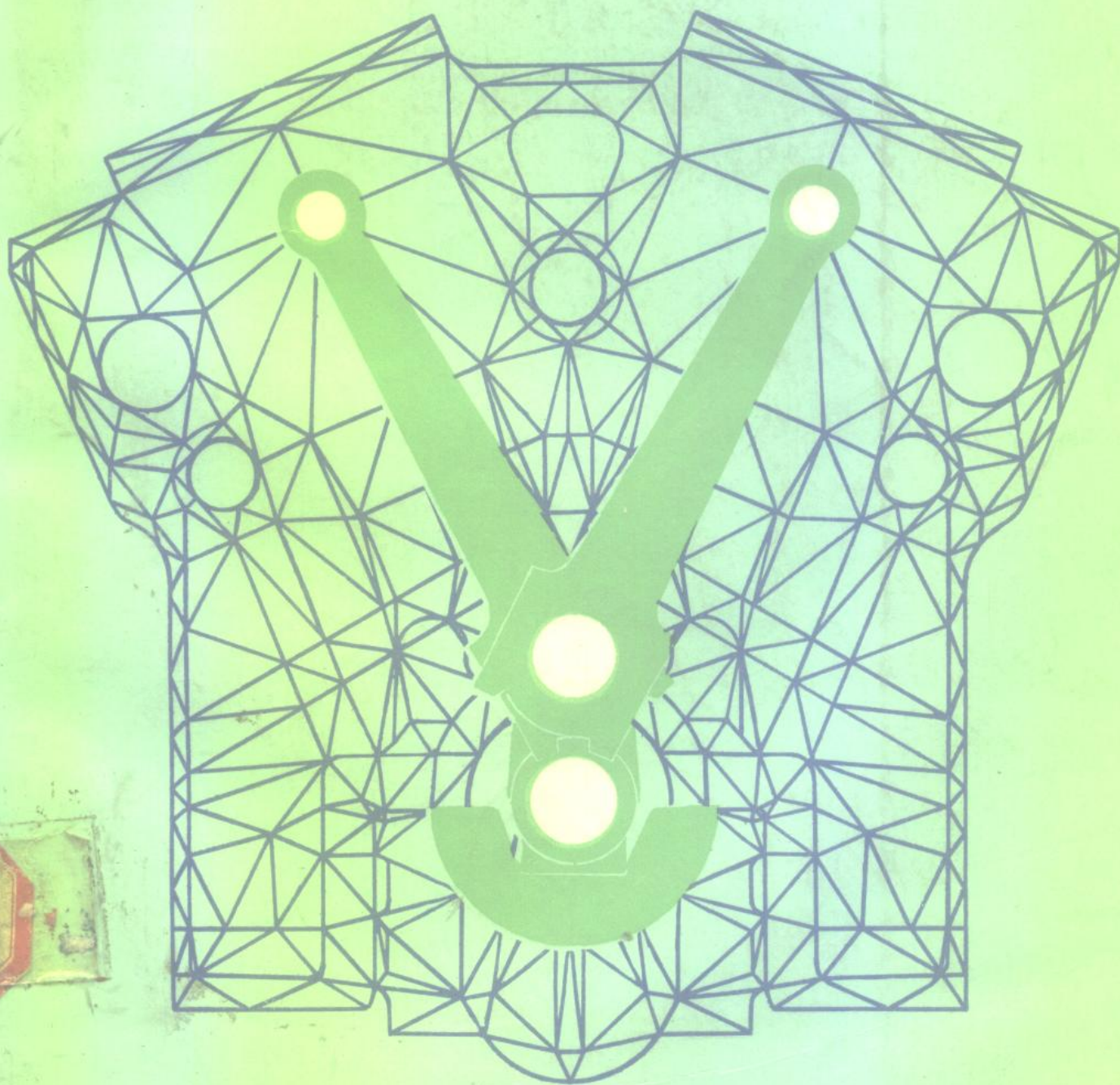


内燃机设计

NEIRANJI SHEJI

吴兆汉 汪长民 编
林桐藩 方 球



● 北京理工大学出版社 ●

345096

内 燃 机 设 计

吴兆汉 汪长民 林桐藩 方 球 编

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书根据内燃机教材编审委员会制定的《内燃机设计》教学大纲(讨论稿),按照“军民结合”的原则,在《车辆发动机动力学》和《车辆发动机设计》两书的基础上,参考了近年来国内外的新教材、新技术和新成果编写而成。

本书分为“内燃机设计总论”、“内燃机动力学”、“内燃机主要零部件设计”及“内燃机辅助系统设计”等四篇,内容方面包括四冲程与二冲程内燃机,水冷式与风冷式内燃机,增压与不增压的汽油机、柴油机等。书中还介绍了优化设计、可靠性设计、计算机辅助设计、系统工程法及有限元法等现代化的设计计算方法。

本书可作为内燃机专业本科生的专业课教材,也可供有关工程技术人员,如汽车、拖拉机和工程机械行业中的设计、使用维修人员参考,还可作为汽车专业的职大、函大等的教学参考书。

内 燃 机 设 计

吴兆汉 汪长民 编
林桐藩 方 球

*

北京理工大学出版社出版
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防科工委印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 27.25印张 673千字
1990年4月第一版 1990年4月第一次印刷
ISBN 7-81013-117-6/TH·18
印数: 1—2000册 定价: 5.70元

前 言

本书根据原内燃机教材编审委员会1983年长春会议上所提出的内燃机专业培养出的学生应当“基础好些、专业宽些、适应性强些”的精神，以及原机械委提出的“军民结合”的原则，参照原内燃机教材编审委员会制定的《内燃机设计》教学大纲（讨论稿）编写。鉴于有关船舶、机车院校中专设了内燃机专业，所以本书仅介绍汽车、拖拉机、坦克、工程机械及农用内燃机的设计原理和方法，内容上包括四冲程与二冲程内燃机，水冷式与风冷式内燃机，增压与不增压的汽油机、柴油机等。

内燃机设计是机械工程中众多学科综合应用的过程，特别需要有热力学、流体力学、理论力学、材料力学、材料及机械制造工艺学、机械原理及机械零件等基础知识，以及内燃机构造、内燃机原理和内燃机制造工艺学等专业知识，本书将介绍如何把这些课程中的知识应用到内燃机的设计中来。

本书的特点是有关内燃机设计的基础知识较全面：①内燃机总体设计和一些现代设计方法，如优化设计、可靠性设计、系统工程法及计算机辅助设计等均有介绍。②增强了内燃机零件强度计算方面的基础知识，特别是有限元法的基本原理及其应用。③在结构设计方面，着重介绍选型方法与一些新型的结构。④考虑到进、排气系对车用内燃机，特别是对坦克内燃机具有的重要性，所以在辅助系统设计中增加了“进、排气系”一章，其中还介绍了自净式排气净化装置的内容。

为了精选内容，节省篇幅，避免与“机械零件”、“内燃机构造”等课程不必要的重复，本书将内燃机滑动轴承设计与曲轴组设计合并为一章，其中仅扼要介绍内燃机滑动轴承设计的特点，不详细介绍有关的润滑理论及其计算等。

本书按各部分内容的特点，分为“内燃机设计总论”、“内燃机动力学”、“内燃机主要零部件设计”及“内燃机辅助系统设计”等四篇，每篇开始扼要地介绍了该篇的主要内容，以便学习时先有一般的了解。

本书内容以汪长民主编的《车辆发动机动力学》和吴兆汉主编的《车辆发动机设计》（国防工业出版社，1981年、1982年先后出版）为基础，总结了两书出版后我们使用中的教学经验，并参考了苏联、美国、联邦德国和日本等国新出版的内燃机设计教材和参考书，以及国内有关院校的教材和手册等，考虑到目前我国内燃机工业部门对人材的需要和90年代工业发展水平及现代内燃机方面的新技术、新成果等，根据前述精神原则编写而成。

为了照顾各校内燃机专业课程设置上的不同情况，本书内容取材上较为全面，各院、校可根据课程设置及教学时数，选择所需的教学内容。例如设置了“有限元原理及应用”课程时，可不讲授本书的第三章；设置了“内燃机曲轴系统扭转振动”课程时，可不讲授本书的第六章。

本书由吴兆汉教授主编，汪长民教授、林桐藩副教授、方球副教授合编。本书的第一、二、十、十二、十三、十四及十五章由吴兆汉编写；第四、五、六章由汪长民编写；第三章及第

七、八、九、十章中关于有限元法的内容由林桐藩编写；第七、八、九、十一章由方球编写。全书由蔡正卿副教授审阅。

由于编审者水平有限，书中难免有不当之处，欢迎读者批评指正。

编者

1989年3月

目 录

第一篇 内燃机设计总论

第一章 内燃机的设计要求、设计指标与一般设计方法	1
第一节 内燃机的设计要求	1
第二节 内燃机的设计指标	4
第三节 内燃机的设计试制过程	10
第四节 内燃机的一般设计方法	13
第二章 内燃机的总体设计	25
第一节 总体设计的任务	25
第二节 内燃机的选型	25
第三节 内燃机主要结构参数的确定	34
第四节 总体布置	37
第三章 内燃机零件的强度计算基础	39
第一节 内燃机零件的机械负荷和热负荷	39
第二节 弹性力学基本公式	40
第三节 有限元法简介	49
第四节 零件热状态的有限元计算	69
第五节 内燃机零件的强度评定	77

第二篇 内燃机动力学

第四章 内燃机曲柄连杆机构受力分析	84
第一节 概述	84
第二节 中心曲柄连杆机构运动学	85
第三节 偏心曲柄连杆机构运动学	91
第四节 主副连杆式曲柄连杆机构运动学	92
第五节 曲柄连杆机构运动零件的质量换算	97
第六节 中心曲柄连杆机构中的作用力和力矩	100
第七节 偏心曲柄连杆机构中的作用力和力矩	104
第八节 主副连杆式曲柄连杆机构中的作用力和力矩	105
第九节 作用在曲轴轴颈和轴承上的力	107
第十节 多缸内燃机的总扭矩	116
第十一节 曲轴旋转的不均匀性与飞轮惯量的确定	117
第五章 内燃机的平衡	120
第一节 概述	120
第二节 单缸内燃机的平衡	120
第三节 单列式多缸内燃机的平衡	123
第四节 单列式多缸内燃机平衡分析的复数解析法与图解法	131
第五节 V形两缸内燃机的平衡	136

第六节 V形多缸内燃机的平衡	140
第七节 内燃机的内部平衡	151
第八节 内燃机的理论平衡与实际平衡	152
第六章 内燃机曲轴系统的扭转振动	156
第一节 概述	156
第二节 轴系的当量换算	156
第三节 轴系的自由振动	165
第四节 轴系的强迫振动与共振	175
第五节 消减轴系扭转振动的措施	195

第三篇 内燃机主要零部件设计

第七章 活塞组	201
第一节 活塞组的工作情况与设计的要求	201
第二节 活塞结构设计	203
第三节 活塞计算	215
第四节 活塞销	217
第五节 活塞环	220
第六节 有限元法在活塞计算中的应用	230
第八章 连杆组	236
第一节 连杆组的工作情况与设计的要求	236
第二节 连杆的结构型式	236
第三节 连杆的结构设计	238
第四节 连杆材料与强化工艺	243
第五节 连杆螺栓	243
第六节 连杆强度计算	243
第七节 有限元法在连杆计算中的应用	251
第九章 曲轴组与轴承	255
第一节 曲轴组的工作情况与设计的要求	255
第二节 曲轴的结构型式	257
第三节 曲轴的结构设计	258
第四节 曲轴的材料与毛坯工艺	265
第五节 曲轴的疲劳强度计算	267
第六节 提高曲轴疲劳强度的工艺措施	271
第七节 曲轴轴承	272
第八节 有限元法在曲轴计算中的应用	282
第十章 曲柄连杆机构的固定件	286
第一节 概述	286
第二节 机体	286
第三节 气缸套	300
第四节 气缸盖	308
第五节 气缸盖衬垫	317
第六节 固定件的计算	319
第七节 有限元法在固定件计算中的应用	322

第十一章 配气机构与驱动机构	334
第一节 概述	331
第二节 配气机构的型式与气门布置	332
第三节 凸轮机构运动学与凸轮外形设计	335
第四节 配气机构受力分析	347
第五节 气门弹簧	350
第六节 配气机构其它零件的结构设计	354
第七节 二冲程内燃机的换气机构	363
第八节 驱动机构	368

第四篇 内燃机辅助系统设计

第十二章 进、排气系	374
第一节 进、排气系的工作情况与设计的要求	374
第二节 进、排气系的布置	375
第三节 进、排气系的主要机件	378
第十三章 润滑系	388
第一节 润滑系的工作情况与设计的要求	388
第二节 润滑系型式的选择	388
第三节 润滑系的布置	389
第四节 润滑系的主要设计参数	391
第五节 润滑系的主要机件	393
第十四章 冷却系	402
第一节 冷却系的工作情况与设计的要求	402
第二节 冷却系型式的选择	402
第三节 冷却系的布置	404
第四节 冷却系的主要设计参数	407
第五节 冷却系的主要机件	409
第十五章 起动系	419
第一节 起动系的工作情况与设计的要求	419
第二节 起动系型式的选择	419
第三节 起动系的主要设计参数	421
第四节 辅助起动装置和低温起动设备	423
参考书目	424

第一篇 内燃机设计总论

内燃机设计必须根据具体用途，从内燃机的设计要求和设计指标出发，按照一定的设计试制过程及方法进行。在设计工作中，最重要的是总体设计，即首先进行正确选型、确定主要结构参数与总布置；然后进行主要零部件与辅助系统的具体设计。本篇主要介绍汽车、拖拉机、坦克、工程机械及农用内燃机的设计要求、设计指标、设计试制过程与一般设计方法，以及内燃机零件强度计算的基础知识。

第一章 内燃机的设计要求、设计指标 与一般设计方法

第一节 内燃机的设计要求

总的说来，所有内燃机的设计都应该满足使用和制造方面的一系列要求。这些要求是：动力性能应满足使用要求；燃油及机油消耗率要低；工作应安全可靠，寿命要长；外形尺寸要小，重量应轻；工作适应性要好；起动应迅速可靠；使用维修应简便；排放污染要少，噪声应小；工艺性应好，制造应方便；造价应低廉，等等。

事实上，一台内燃机要满足上述所有要求是很困难的，因为其中有些要求是相互矛盾的。例如，要求内燃机重量轻，就与要求内燃机使用寿命长是有矛盾的。因为要内燃机重量轻，必须提高内燃机的工作强度，这样必然加速了零件的磨损，降低了使用寿命。又如，为了设计重量轻的内燃机，就必须采用优质材料及保证高度的制造精确性，这样就增加了制造成本，提高了造价。同时随着内燃机具体用途的不同，这些要求的重要性也不相同。因此，必须根据内燃机的具体用途，在保证主要设计要求的前提下，尽量满足其它要求。以下分别讨论对于汽车、拖拉机、坦克、工程机械及农用内燃机的主要设计要求。

一、汽车、拖拉机及坦克等车用内燃机的设计要求

车用内燃机是车辆的“心脏”，车辆性能的好坏，在很大程度上决定于内燃机的优良与否。对坦克来说尤其是这样。坦克是一种既能进攻消灭敌人，又能防御进攻，从而保存自己的战斗车辆。它的内燃机与汽车、拖拉机的相比有共同性，又有特殊性。在车用内燃机中，对坦克内燃机的设计要求最为严格，其中主要设计 requirements 是：

(1) 应有良好的动力性，以保证坦克具有良好的机动性。

(2) 外形尺寸及整个动力装置的体积应小，以便相应地减小坦克尺寸，有利于提高坦克的机动性，或相应地加大坦克的战斗部分空间，从而可以更多地携带弹药和燃油。在内燃机

外形尺寸中，高度尺寸相对来说更为重要。高度尺寸小，则整个坦克高度可降低，因而可减小被炮火命中的可能性，以及原子弹爆炸后冲击波的影响。

(3)重量应轻，特别是对于超轻型、轻型坦克的内燃机，这点尤为重要，因为内燃机重量的减小，就可以适当减轻坦克的总重量。

(4)工作应安全可靠。坦克内燃机是在战斗条件下工作的，一定要保证工作安全可靠。这不仅要求内燃机的结构可靠，保险期尽可能长，在保险期内应保证不发生停车故障，而且还要求所用燃油和材料在作战时起火的可能性小。

(5)燃油及机油的消耗率应低。燃油和机油消耗率低，不仅具有经济上的意义，更主要的是具有战术上的意义。燃油及机油消耗率小时，携带同样数量的燃油及机油，坦克行驶半径就可以增大；而当行驶半径一定时，油箱体积则可缩小，从而能减小坦克外形尺寸或增加携带弹药的数量。此外，油料消耗率低，还可以减轻战时运输工作的负担。

(6)工作适应性较强，即要求内燃机能在高原、高温、严寒、风砂等各种地域正常工作，并且还应当适应潜渡、涉水、倾斜运转等要求。此外，最好还能采用几种不同燃油工作，以便就地取材，简化后勤供应。

(7)起动能好。内燃机的起动能好坏，直接影响坦克投入战斗的准备时间。因此，要求坦克在任何情况下（包括气温在零下40℃时）都能保证迅速可靠的起动。

此外，由于坦克的使用、维修是在比较困难的条件下进行的，因此，要求坦克内燃机的使用、维修尽可能简便。为了保证一定批量的生产，坦克内燃机的结构工艺性也要好一些。选材可以好一些，但也尽可能不要过于特殊，这样便于战时组织生产。坦克内燃机的使用寿命，虽然可以不像汽车、拖拉机的要求那样长，但也要略高一些，最好能与坦克的大修期相同。

在坦克内燃机的主要设计要求中，在保证良好动力性的前提下，外形尺寸、整个动力装置体积与工作可靠性之间的矛盾是最主要的。要使坦克内燃机外形尺寸、整个动力装置的体积小，会受到工作可靠性的限制。在这对矛盾中，外形尺寸小与整个动力装置的体积小是矛盾的主要方面。坦克内燃机设计的中心任务，就是在保证足够功率与可靠性的前提下，外形尺寸尽可能小。

应当指出，各种类型坦克内燃机有共同的设计要求，也有各自不同的要求。在设计时必须按坦克的具体用途，细致而深入地分析坦克对内燃机的要求，明确各个要求的重要性。例如，对坦克内燃机共同的主要要求之一是重量轻，但由于坦克类型的不同，对重量轻要求的重要程度也就不一样。对中、重型坦克来说，坦克内燃机的重量只占坦克总重量的3~6%，因此，重量轻不是很主要的问题。而对轻型和超轻型坦克来说，由于坦克总重量小，内燃机的重量占坦克总重量比例较大，重量小就变得较为重要。设计中，次要要求，必须服从主要要求。

在设计坦克内燃机时，还必须考虑到军用与民用、平时与战时结合的问题，从而扩大内燃机的使用范围。这无论从国防生产或国民经济来看，其意义都十分重大，但必须分清主次，在保证满足坦克要求的前提下，采取适当的措施。例如，通过降低内燃机的转速与供油量来降低功率，以延长使用寿命；部分零件（如曲轴箱）改用价格较低的材料；改变附件或缸数等以满足民用的要求，当然，不能为了满足民用要求而影响对坦克内燃机的主要要求。

汽车的用途与坦克不同，它是用来载人或运货的。汽车内燃机的使用特点是：经常需要

在较大的范围内变速和变负荷，并且起动和加速频繁。因此，在要求具有良好的动力性能的前提下，起动应迅速可靠。为了增大汽车车厢内面积的利用率，也要求内燃机的外廓尺寸和重量尽可能小一些，但不如对坦克内燃机的要求那么高。对载重汽车来说，内燃机长度应尽可能小一些，以保证不侵占装载面积；宽度应考虑能装在车架大梁之间（对附件的布置也必须注意到这一点）；当驾驶员座位布置在内燃机上方时，还要求内燃机的高度尽量小一些。由于一般汽车（除小轿车外）是长期工作的，为了考虑运转的经济性，必须考虑其整个使用寿命的总支出，即包括初次成本、燃油和机油支出、保养、配件、修理、折旧等一切费用。其中燃油支出项目最大，其次是维修费用，最小的项目是内燃机的制造成本。因此，对汽车内燃机来说，不能片面追求造价低，必须尽可能降低各种负荷下的燃油消耗率，提高可靠性，降低维修费用。在边远地区行驶的汽车，对其内燃机可靠性的要求尤为重要，因为在中途损坏，不易找到配件和熟练修理工。经常在城市行驶的公共汽车、小轿车以及小型载重汽车等，则对其内燃机的振动、噪声、排放污染等，要求尽量小。另外，对汽车内燃机的使用寿命要求尽量长，零部件结构的工艺性要好，制造应方便，并适于大量生产。

拖拉机的用途与汽车不同。它是用来带动农具或其它机械的。拖拉机的内燃机其使用特点是：经常在大负荷下工作，而且常短期超载；经常在野外流动作业，环境条件较差。因此对它的主要要求是：有一定的功率储备以适应短期超载；结构刚度大，耐振动；能防水、防尘；燃料和机油消耗率应小，所用油料价格要低，操作维修要简便，使用寿命应长，结构上适于大量生产，制造费用应低廉。

二、工程机械内燃机的设计要求

工程机械种类繁多，通常分为挖掘机械、铲土运输机械、工程起重机械、压实机械、钢筋混凝土机械、路面机械、凿岩机械及风动机械等八类。这些机械使用地域广阔，气候差异甚大，使用条件随配套机械而不同。对于工作环境恶劣、承受冲击力和急剧的变速、变负荷以及经常超负荷下工作的挖掘机械、铲土运输机械等，一般采用专门设计的内燃机；对于其它工作条件较好的工程机械，如压路机等，则多用汽车、拖拉机内燃机经变型后使用。

对专用的工程机械内燃机的主要要求，除了与拖拉机内燃机相同的之外，还要求能够在斜坡上安全作业，在寒带工作应能保证起动，在热带工作应不产生过热，并能适应高原工作。在城市作业，特别是在坑道作业的工程机械的内燃机，还要求其排放污染少、噪声小。

三、农用内燃机的设计要求

农用内燃机的用途广泛，常与排灌机械（水泵、喷灌机、深井泵）、水田作业机械（插秧机、拔秧机、机耕船）、田间作业机械（收割机、播种机、联合收割机）、农副产品加工机械（饲料粉碎机、碾米机、磨面机）、植保机械（喷粉机、喷雾机）、场上作业机械（脱粒机、扬场机）以及农田基本建设机械（开沟机、打井机）等配套使用。除了与农副产品加工机械配套使用的内燃机以及一些与深井泵配套使用的内燃机在室内使用外，与其它农用机械配套的内燃机大多在风砂尘扬、雨淋日晒或泥水冲溅等恶劣条件下工作，有些是在负荷经常变化，甚至经常短期超负荷下工作。因此，农用内燃机的主要设计要求随配套机械而不同。一般要求是：结构简单，使用维修方便，适合农村使用条件；造价低廉，使用寿命长，燃油及机油消耗率低，并能使用低质燃料，以降低农用成本；机体刚性好，外露部件应紧固牢靠，

以防止在农村的频繁移动中碰撞损坏、松动或遗失；对于在灰尘大的条件下使用的农用内燃机，要求有高效率的滤清器；对于经常短期超载情况下使用的农用内燃机，也要有一定的功率储备。

综上所述，各种内燃机有共同的设计要求，也有各自不同的主要设计要求，在设计时要考虑共同的设计要求，更要根据所设计内燃机的具体用途考虑其不同的要求。

第二节 内燃机的设计指标

汽车、拖拉机、坦克、工程机械及农用内燃机的主要设计指标通常有下列几项。

一、动力性指标

内燃机的动力性指标是指内燃机的标定功率、标定转速、活塞平均速度、平均有效压力及扭矩，这些指标是根据与之配套的使用要求而确定的。

1. **标定功率** 一台内燃机的功率，根据不同的使用要求，可以作出不同的标定，根据我国国家标准（GB1105-74）规定，有以下四种：

（1）十五分钟功率 指内燃机允许连续运转十五分钟的最大有效功率。适用于汽车、摩托车、摩托艇等的功率标定。

（2）一小时功率 指内燃机允许连续运转一小时的最大有效功率。适用于工业拖拉机、工程机械、内燃机车及船舶等内燃机的功率标定。

（3）十二小时功率 指内燃机允许连续运转十二小时的最大有效功率。适用于农用拖拉机、农业排灌、工程机械、内燃机车及内河船舶等内燃机的功率标定。

（4）持续功率 指内燃机允许长期连续运转的最大有效功率。适用于船舶等内燃机的功率标定。

由此，汽车内燃机功率是按照十五分钟功率标定的；工业拖拉机内燃机功率是按照一小时功率标定的；农业拖拉机内燃机功率是按照十二小时功率标定的；至于坦克内燃机的功率标定，国标上还没有作出明确规定，目前我国有关工厂基本上参照十五分钟功率和一小时功率标定。工程机械内燃机功率是按照一小时功率标定，而农用内燃机则随具体配套机械的不同，按照十二小时功率或持续功率标定。

现代主战坦克内燃机的标定功率在380~600kW左右，坦克的吨功率为10.5~17kW；而研制中的主战坦克内燃机的标定功率有的高达1104kW，坦克的吨功率高达21.86kW。

现代汽车内燃机，为了满足在较大的范围内变速、变负荷以及要求具有良好的加速性，一般汽车吨功率为4.4~51.5kW，其中重型载重汽车吨功率一般为4.4~7.4kW，而中、轻型汽车、特别是小轿车吨功率可高达51.5kW，甚至更大。汽车内燃机的标定功率一般在15~370kW左右，个别矿山用载重汽车内燃机的标定功率达到900kW左右。

拖拉机内燃机的标定功率是根据拖拉机具体用途而确定的。手扶、小履带及小四轮拖拉机内燃机一般在2.2~8.8kW左右；大型轮式拖拉机内燃机一般在58~88kW左右；履带式拖拉机一般在25.7~88.3kW左右。

一般工程机械内燃机的标定功率在14.7~58.9kW左右。由于目前工程规模不断扩大，建设周期要求缩短，因此需要高工效的工程机械。工程机械正向着大型化、高速化、高功率化方

向发展。如单斗挖掘机容量已达 8m^3 ，功率为 588.8kW 。推土机已有88吨级产品，功率为 467.4kW ；120吨刮土机的功率达到 515.2kW 。目前 $368\sim 736\text{kW}$ 的工程机械内燃机已屡见不鲜， 736kW 的工程机械内燃机也已正在生产中。

农用内燃机的标定功率随配套机具而不同，一般从 1.18kW 到 110.4kW 的都有。

2. 标定转速和活塞平均速度 内燃机的标定转速和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。活塞平均速度也是决定内燃机高速性的指标 \ominus 。提高内燃机的标定转速与活塞平均速度是提高内燃机单位体积功率的有效措施之一。但是随着转速提高，单位时间内气缸所完成的工作循环的次数增加了，这会使零件的受热程度加剧，而且噪声增大；随着活塞平均速度的增加，作用于曲柄连杆机构零件的惯性力增加，加速磨损，特别是活塞环和气缸套的磨损加剧，这将缩短使用寿命；此外，由于提高了配气机构中的气流速度而增加了阻力。因此，在结构设计时，经常用活塞平均速度作为指标。通常采用短冲程而提高转速，使活塞平均速度在不至于过高的情况下来提高内燃机的单位体积功率。

现代主战坦克内燃机的标定转速在 $2000\sim 26000\text{r/min}$ 之间，活塞平均速度在 $9.75\sim 12.8\text{m/s}$ 之间。研制中的主战坦克内燃机的活塞平均速度有的高达 13.43m/s 。现代汽车内燃机的标定转速在 $2000\sim 3000\text{r/min}$ 之间（个别小排量、短冲程汽车内燃机的标定转速达到 4400r/min ），活塞平均速度一般在 $7.5\sim 12.5\text{m/s}$ 之间。现代拖拉机内燃机的标定转速在 $1500\sim 2500\text{r/min}$ 之间，活塞平均速度一般在 $5\sim 9\text{m/s}$ 之间。现代工程机械内燃机的标定转速在 $1500\sim 2600\text{r/min}$ 之间，活塞平均速度在 $7\sim 11\text{m/s}$ 之间。农用内燃机标定转速范围较大，为 $400\sim 6000\text{r/min}$ ，其中磨面机内燃机的标定转速较低，一般在 $400\sim 700\text{r/min}$ 之间，而小型植保机械内燃机的标定转速较高，一般为 $3000\sim 6000\text{r/min}$ 。农用内燃机的活塞平均速度为 $5\sim 8.5\text{m/s}$ 。

3. 平均有效压力 内燃机在标定功率时的平均有效压力是表示内燃机整个工作过程完善性和热力过程强烈程度的重要参数之一。它决定于混合气形成的方法、燃料的种类、混合气形成的过程、燃烧过程与换气过程的质量、机械效率、进气压力和温度以及内燃机的冷却方式与冲程数等。提高平均有效压力是目前提高内燃机单位体积功率的有效措施。目前内燃机提高平均有效压力的方法，除了改善混合气形成过程、燃烧过程和换气过程质量以及减少内燃机的机械损失等之外，对于柴油机来说，最主要的是通过增压的办法。由于提高平均有效压力的同时，必须解决一系列技术上的困难问题，因此，平均有效压力的大小在一定程度上反映了所设计内燃机的先进程度。

现代汽车、拖拉机和坦克内燃机在标定功率时的平均有效压力一般在 $0.5\sim 0.9\text{MPa}$ 之间，研制中的主战坦克内燃机有的已高达 3.2MPa 。工程机械内燃机一般在 $0.7\sim 0.8\text{MPa}$ 之间。农用内燃机则在 $0.5\sim 0.7\text{MPa}$ 之间。

4. 扭矩 内燃机的标定功率和标定转速确定之后，在标定工况下的扭矩也就确定了。但，汽车、拖拉机、坦克、工程机械和部分农用内燃机除对功率和转速有要求外，还要求具有一定的扭矩储备，即具有较好的扭矩特性。

\ominus 通常按照活塞平均速度 C_m 值将内燃机分为三类： $C_m < 6\text{m/s}$ 称为低速内燃机； $C_m = 6\sim 9\text{m/s}$ 称为中速内燃机； $C_m > 9\text{m/s}$ 称为高速内燃机。随着内燃机的发展和机型、用途的不同，低、中、高速并无严格区别。例如有时又用内燃机的标定转速的高低来划分：转速在 300r/min 以下的称为低速内燃机；转速在 $300\sim 1000\text{r/min}$ 之间的称为中速内燃机；转速在 1000r/min 以上的称为高速内燃机。

扭矩特性一般用扭矩储备系数（又称扭矩适应性系数） K_m 和转速适应性系数 K_n 及两者的乘积——总适应系数 K 来表示，即

$$K_m = \frac{\text{最大扭矩}}{\text{标定工况时的扭矩}} = \frac{M_{e\max}}{M_e}$$

$$K_n = \frac{\text{标定转速}}{\text{最大扭矩时的转速}} = \frac{n_e}{n_{Me\max}}$$

$$K = K_m K_n$$

扭矩适应性系数愈大，内燃机适应外界阻力变化的能力愈强。对车辆来说，这样可以减少换挡次数，减轻驾驶员的疲劳程度。转速适应性系数愈大，则工作愈稳定，对车辆来说，可以减少机械传动变速箱的排挡数，从而简化传动结构。

现代各种内燃机的适应性系数的范围如表1-1所示。

表1-1 各种内燃机的适应性系数的范围

用途	内燃机类型 适应性系数	汽 油 机			柴 油 机		
		K_m	K_n	K	K_m	K_n	K
坦 克					1.07~1.19	1.07~1.56	1.35~1.86
汽 车		1.1~1.25	1.5~2	1.65~2.5	1.05~1.2	1.5~2	1.6~2.4
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
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

二、经济性指标

内燃机的经济性指标是指生产成本、运转中的消耗（主要指燃油和机油的消耗）以及维修费用等，对此，通常都是以燃油消耗率和机油消耗率，特别是以燃油消耗率作为内燃机经济性的主要指标。

1. **燃油消耗率** 内燃机的燃油消耗率是随运转工况的不同而变化的，一般常以标定工况时每千瓦有效功率每小时所消耗的燃油的克数作为衡量指标（有的采用外特性最低的燃油消耗率作为衡量指标）。燃油消耗率主要与内燃机的工作过程、燃烧室结构以及机械效率等有密切关系。

现代汽车、拖拉机、坦克和工程机械汽油机在标定工况时的燃油消耗率一般在265~340 g/kW·h之间，柴油机在标定工况时的燃油消耗率一般在215~270g/kW·h之间。农用汽油机在标定工况时的燃油消耗率一般在270~400g/kW·h之间，柴油机在标定工况时的燃油消耗率在220~260g/kW·h之间。

2. **机油消耗率** 内燃机的机油消耗率，是以内燃机在标定工况时每千瓦小时所消耗的机油量的克数来表示。它与活塞的密封性以及轴承的设计有密切关系。

现代内燃机在标定工况时的机油消耗率一般在0.8~4g/kW·h之间。

三、紧凑性指标

内燃机的紧凑性指标，通常是指内燃机的重量和外形尺寸指标。它是评价内燃机结构紧凑性和金属材料利用程度的一个指标。各种类型内燃机对重量和外形尺寸指标的要求不同：

坦克和汽车内燃机对重量和外形尺寸的要求都是尽量小，而拖拉机、工程机械和一般农用机械内燃机则可以稍大一些。

衡量内燃机重量的指标是比重量 g_w ，即

$$g_w = \frac{G}{N_e} \quad (\text{kg/kW})$$

式中 G —— 内燃机的净重，即不包括燃油、机油、冷却水以及其它不直接装在内燃机本体上的附属设备的重量，单位为 kg ；

N_e —— 内燃机的标定功率，单位为 kW 。

现代坦克柴油机的比重量一般在 $1.5 \sim 3 \text{kg/kW}$ 之间，研制中的主战坦克柴油机的比重量已小到 1.17kg/kW 。汽车柴油机的比重量一般在 $3.5 \sim 8 \text{kg/kW}$ 之间，而汽车汽油机的比重量则在 $1 \sim 3 \text{kg/kW}$ 之间。拖拉机与工程机械柴油机的比重量一般在 $4 \sim 15 \text{kg/kW}$ 之间。农用柴油机的比重量一般在 $7.6 \sim 20.4 \text{kg/kW}$ 之间。

衡量内燃机外形尺寸的指标是单位体积功率 N_v ，即

$$N_v = \frac{N_e}{V} \quad (\text{kW/m}^3)$$

式中 N_e —— 内燃机的标定功率，单位为 kW ；

V —— 内燃机的外形体积，即内燃机的长、宽、高的乘积，单位为 m^3 。

单位体积功率 N_v 可以写成为

$$N_v = \frac{N_e}{V_H} \frac{V_H}{V} = N_e k \quad (\text{kW/m}^3)$$

由上式可见，单位体积功率决定于升功率 N_e 以及内燃机总排量 V_H 与其外形体积 V 的比值 k ($k = V_H/V$ ，其单位为 L/m^3 ， k 称为总布置紧凑性系数)。这说明了要提高单位体积功率，除了必须提高升功率外，还应该尽量提高总布置结构的紧凑性。内燃机的结构紧凑性，除了与内燃机主要机构的结构、布置方案直接有关外，并与附件的大小和布置有很大关系。所以设计时不仅要注意内燃机主要机构的结构布置的紧凑性，还应该注意研制结构尺寸小而性能好的附件。

单位体积功率对一般内燃机的设计不是十分重要，但它是坦克内燃机设计的一个十分重要的设计指标。现代主战坦克的水冷式柴油机的单位体积功率一般在 $300 \sim 370 \text{kW/m}^3$ 之间，总布置紧凑性系数在 $9.49 \sim 30.6 \text{L/m}^3$ 之间。研制中的主战坦克水冷式柴油机的单位体积功率有的高达 1114kW/m^3 。现代主战坦克的风冷式柴油机的单位体积功率（包括冷却系附件）在 $83.7 \sim 232.9 \text{kW/m}^3$ 之间，紧凑性系数在 $5.6 \sim 12.38 \text{L/m}^3$ 之间。

四、可靠性与耐久性指标

内燃机的可靠性是指内燃机在设计规定的使用条件下，具有持续工作、不致因故障而影响内燃机正常工作的能力。在我国，可靠性指标通常是以在保证期（有的称为保险期）内不停车故障次数、停车故障次数以及更换主要零件和非主要零件的数目来表示。

主要零件系指：气缸盖、活塞、活塞环、活塞销、连杆、连杆轴瓦、连杆螺钉、曲轴、机体、曲轴箱、凸轮轴、进排气门、气门弹簧、摇臂、调速器弹簧、调速器飞锤和销子、高压泵凸轮轴与柱塞精密副、出油阀偶件、机油泵齿轮、驱动齿轮、增压器等。其它零件则为非主要零件。

现代汽车、拖拉机、工程机械内燃机的保证期一般在1500~2000摩托小时之间，坦克柴油机的保证期一般在350~500摩托小时之间。农用柴油机的保证期为出厂后一年内保证使用1500摩托小时，汽油机为500摩托小时。

对于汽车、拖拉机、工程机械和农用内燃机，在保证期内应保证不更换主要零件；对于坦克柴油机，则要求在保证期内不发生停车故障。

近年来，根据可靠性理论，对内燃机这类可修复产品，通常采用可靠度、维修度、有效度、故障率、修复率、平均故障间隔或平均无故障时间 MTBF (即 Mean Time Between Failures)、平均修复时间 MTTR (即 Mean Time To Repair)、可靠寿命、使用寿命等作为衡量可靠性的指标。但是，在目前除个别国家外，一般还只采用保证期中的故障情况以及使用寿命作为衡量内燃机可靠性指标，并以使用寿命作为衡量内燃机耐久性的指标。

使用寿命是指内燃机从开始使用到第一次大修前累计运转的小时数，或车辆行驶的公里数。内燃机的大修期一般决定于气缸套和曲轴磨损到达规定极限的时间（即此时内燃机不能继续正常工作）。

现代柴油机气缸套和曲轴轴颈的最大允许磨损极限如表1-2所列(表中： D ——气缸内径， D_1 ——曲轴主轴颈外径， D_2 ——曲轴曲柄销外径)。

表1-2 现代柴油机气缸套与曲轴轴颈最大允许的磨损极限

名 称	气缸套内径(mm)			曲轴主轴颈		曲柄颈销	
	50~100	100~200	200~400	极限磨损	椭圆度	极限磨损	椭圆度轴
允许极限磨损值	$(\frac{1}{500} \sim \frac{1}{200}) D$	$\frac{1}{800} D$	$\frac{1}{400} D$	$\frac{1}{800} D_1$	$\frac{1}{1250} D_1$	$\frac{1}{800} D_2$	$\frac{1}{1250} D_2$

现代载重汽车柴油机的使用寿命一般在 $(30 \sim 60) \times 10^4 \text{km}$ (约7500~15000h) 之间，工程机械柴油机的使用寿命一般在6000~15000h之间，农用柴油机的使用使命一般在6000~8000h之间，坦克柴油机的使用寿命一般在500~1000h之间。有些坦克柴油机其大修期是规定的，即所谓强制大修，以保证其更高的可靠性。

五、适应性指标

内燃机的适应性指标是指适应不同地理条件、不同气候条件的工作能力以及适应多种燃料的能力。

适应不同地理条件的能力，通常是指内燃机适应高原工作的能力、适应风砂泥泞等恶劣环境的能力以及在倾斜路面运转所能达到的坡度等。对于坦克内燃机来说，还指内燃机适应潜渡、涉水等能力。一般要求坦克与工程机械内燃机能够在前、后倾斜 $30^\circ \sim 40^\circ$ 和侧向倾斜 $20^\circ \sim 35^\circ$ 的情况下正常工作，而汽车、拖拉机一般只要求能在前、后倾斜 $20^\circ \sim 30^\circ$ 和侧向倾斜 20° 左右的情况下正常工作。

适应不同气候的工作能力，是指内燃机在高温地区不会过热，在高寒地区能够迅速启动。汽车、拖拉机、坦克和工程机械内燃机一般要求能够在正负 40°C 气温范围内良好地工作。

适应多种燃料的能力，是指内燃机能够使用柴油、汽油、煤油等不同的燃料来工作。现代坦克内燃机一般要求能用不同燃料工作，以便能够就地取材，简化后勤供应。

六、运转性指标

内燃机的运转性指标，主要是指操纵使用是否方便，运转是否平稳，起动性与加速性的好坏以及噪声与排放污染的情况等。

操纵使用方便，指使用人员不需要很特别的专门技能，即可容易地操作，而且维护保养方便。

运转平稳是指内燃机平衡良好，振动小。

起动性好，即指内燃机起动迅速可靠，一般内燃机要求在 -5°C 气温下不附加任何辅助装置就能顺利起动，而在更低的温度下（低到 -40°C ）利用一些辅助装置也能迅速起动。

内燃机加速性的好坏，一般是以内燃机从惰转加速到全负荷的时间长短来表示。对于车用内燃机，这个时间要求愈短愈好。目前汽车、拖拉机、坦克和工程机械内燃机，一般在5~10s之间就可以从惰转达到全负荷。

噪声对人体有害。国际标准组织（ISO）提出，为保护听力，每天工作8h，容许的噪声为90dB(A)，工作时间减少一半，容许值可提高5dB(A)，在任何情况下不允许超过115dB(A)。现代内燃机的噪声一般为85~110dB(A)，通常汽油机噪声较柴油机低。目前各国为了减少城市汽车噪声的危害，都规定有汽车内燃机噪声的允许值，一般规定不超过90dB(A)，有的国家比较严格，规定不超过75dB(A)或80dB(A)。

为了防止大气污染，很多国家对汽车内燃机排放出的废气中的有害成份都有明确限制。从目前已有的各种汽车内燃机排放标准来看，都是以本国大气质量标准为依据，不同国家情况不同，对汽车排放的要求也不同，采取对汽车内燃机排放的限制也各不相同。总的说来，汽车数量众多、城市大气污染严重的国家，限制汽车内燃机的排放标准也就愈严格。目前有三个主要的汽车内燃机排放标准，即美国联邦标准、日本标准和欧州经济委员会（ECE）标准。我国的汽车内燃机排放标准制订工作，已于1980年开始着手进行。初步制订了《汽油机怠速时CO、HC排放浓度限值》、《柴油机自由加速烟度排放》和《汽车柴油机全负荷烟度排放》等国家标准，如表1-3、1-4和1-5所列。前一标准适用于四冲程汽油机，不包括海拔

表1-3 汽油机怠速时一氧化碳（CO）、碳氢化合物（HC）排放浓度限值（GB3842-83）

项 目	类 别	限 值
CO	新生产车	$\leq 5\%$ ，进口车 $\leq 4.5\%$
	在用车	$\leq 6\%$
HC	新生产车	$\leq 2500\text{ppm}$ ，进口车为1000ppm
	在用车	3000

表1-4 柴油机自由加速烟度排放标准（GB3843-83）

项 目	类 别	限值（波许单位）
烟 度	新生产车、进口车	$\leq R_b 5.0$
	在用车	$\leq R_b 6.0$