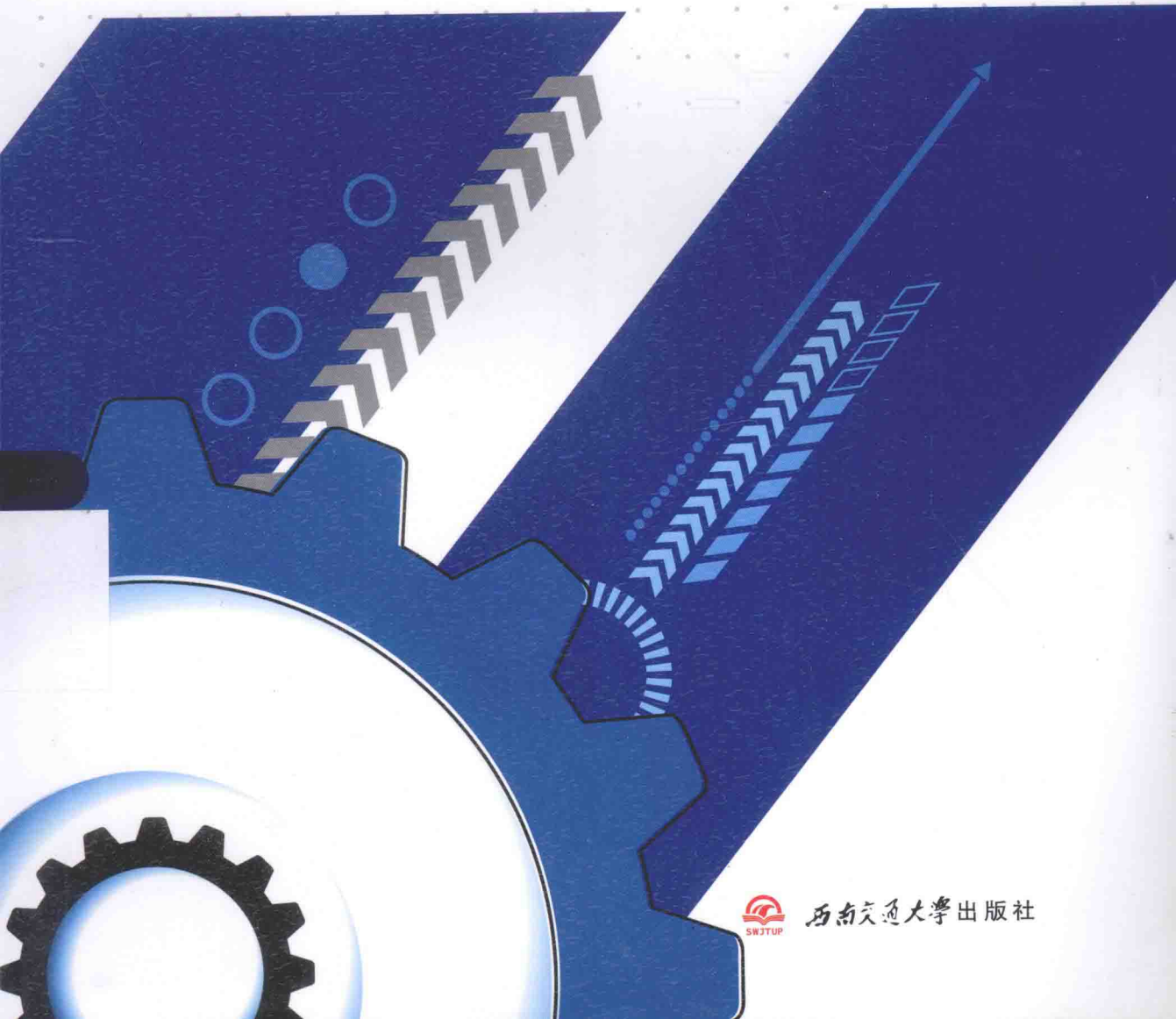


21世纪普通高等院校规划教材——机械工程

NEIRANJI YUNYONG

内燃机运用

林在犁 黄 琪 / 主编



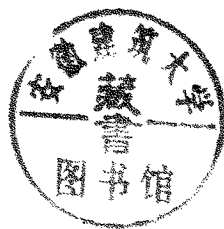
西南交通大学出版社

21 世纪普通高等院校规划教材——机械工程

内 燃 机 运 用

主 编 林在犁 黄 琪

副主编 贺泽龙 徐妙侠



西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

内燃机运用 / 林在犁, 黄琪主编. — 成都: 西南
交通大学出版社, 2015.8

21 世纪普通高等院校规划教材. 机械工程

ISBN 978-7-5643-4146-6

I. ①内… II. ①林… ②黄… III. ①内燃机—高等
学校—教材 IV. ①TK4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 188312 号

21 世纪普通高等院校规划教材——机械工程

内燃机运用

主编 林在犁 黄琪

责任编辑 李芳芳
特邀编辑 李庞峰
封面设计 墨创文化

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区交大路 146 号)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 成都蓉军广告印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印 张 14.75

字 数 365 千

版 次 2015 年 8 月第 1 版

印 次 2015 年 8 月第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5643-4146-6

定 价 29.80 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

《内燃机运用》一书是编者集多年的高校专业教育及生产实践之经验，在认真调查研究、充分反映我国内燃机使用、维修发展现状的基础上编写而成的。本书在这次出版前已作为校内教材使用多年，并经过多次修改，是多位老、中、青教师辛勤劳动的成果。

在本书的编写过程中，我们力求体现以下特色：

第一，注重知识的系统性。

《内燃机运用》基本覆盖了内燃机从产品出厂到产品报废（或大修前）的整个过程，是内燃机按需选购、合理使用、正确维护、适度修理的技术集成。“内燃机运用”的提法在我国还不多见，其知识体系并不完善，编者在理论和实践方面参考了大量资料，吸取了有关书籍的精华，形成了以“内燃机按需选购、合理使用、正确维护、适度修理”的知识体系；同时也搭建起了具有一定特色的内容体系。

第二，突出知识的实用性。

学习的目的是为了了解决实际问题，基于这一认识，本书特别注重理论联系实际，突出各种理论分析方法的实用性和可操作性；以理论适度、够用为原则，把烦琐的理论问题通俗化，以求提高学习者解决实际问题的能力。由于内燃机的使用涉及诸多行业，在编写过程中尽量兼顾大、中、小型内燃机及其在不同行业的运用。

本书共十章，分别是内燃机安全运转、内燃机技术保养、内燃机诊断技术、内燃机常见故障分析、内燃机的检查调整、内燃机的合理匹配、内燃机在特殊条件下的使用、内燃机的排污与净化、内燃机的噪声与控制、内燃机的运行材料。

本书适合作为技术应用型高校本科、专科相关专业的教学用书；也可作为内燃机使用、维护、修理等部门专业技术人员自学与提高用书；还可作为广大内燃机爱好者合理使用、正确维护内燃机、掌握内燃机故障诊断方法的自学用书。

本书由重庆科技学院林在犁、黄琪任主编，贺泽龙、徐妙侠任副主编。参加本书编写的还有本教研室全体教师，热动专业 2011 级和 2013 级的部分同学也参加了本书的录入、资料整理工作。

本书在编写过程中参考并引用了许多文献资料，为此谨向相关作者表示衷心的感谢！本书的编写还得到了诸多同行专家、朋友乃至家人的帮助和支持，在此一并致谢！同时，由于编者水平有限，书中难免会有不当之处，恳请同行专家及广大读者批评指正。

作 者

2015 年 6 月

目 录

绪 论	1
0.1 内燃机的基本结构	1
0.1.1 内燃机的基本名词术语	1
0.1.2 内燃机的总体构造	2
0.1.3 内燃机的分类与型号编制	4
0.2 内燃机的工作原理	6
0.2.1 四冲程内燃机工作原理	6
0.2.2 二冲程内燃机工作原理	10
0.2.3 不同工作原理的内燃机比较	12
0.2.4 内燃机技术状况的评定	12
0.3 内燃机技术管理	15
0.3.1 内燃机技术管理的基本概念	15
0.3.2 内燃机的技术经济定额管理	16
0.3.3 内燃机技术档案	18
0.3.4 内燃机运用效能管理	19
第 1 章 内燃机安全运转	22
1.1 内燃机选购与安装	22
1.1.1 内燃机选购	22
1.1.2 内燃机安装	23
1.2 内燃机启动	23
1.2.1 内燃机启动前的准备工作	23
1.2.2 内燃机的启动操作	24
1.3 内燃机运转	25
1.3.1 内燃机初期运行	25
1.3.2 内燃机正常工作运行	25
1.4 内燃机停机	26
1.4.1 内燃机正常停机	26

1.4.2 内燃机紧急停机	26
1.5 内燃机使用误区	27
第2章 内燃机技术保养	31
2.1 内燃机保养制度与劳动组织	31
2.1.1 内燃机保养制度	31
2.1.2 内燃机保养的劳动组织	32
2.2 内燃机保养工艺	33
2.2.1 例行保养	33
2.2.2 一级技术保养	34
2.2.3 二级技术保养	34
2.2.4 三级技术保养	35
第3章 内燃机诊断技术	36
3.1 内燃机故障及其成因	36
3.1.1 内燃机故障及分类	36
3.1.2 内燃机故障变化规律	36
3.1.3 内燃机故障的征象	37
3.1.4 内燃机故障形成的原因	38
3.2 内燃机故障的诊断方法	39
3.2.1 直观诊断法	41
3.2.2 仪器设备诊断法	42
3.3 内燃机性能检测	42
3.3.1 内燃机台架性能试验	42
3.3.2 内燃机主要性能检测参数	44
3.4 内燃机故障诊断的一般原则	44
第4章 内燃机常见故障分析	47
4.1 内燃机启动困难	47
4.1.1 故障现象和原因	47
4.1.2 故障诊断方法与步骤	47
4.2 内燃机功率不足	49
4.2.1 故障现象和原因	49
4.2.2 故障诊断方法与步骤	49
4.3 内燃机异响	49
4.3.1 故障类型和影响因素	49
4.3.2 故障诊断方法与步骤	52

4.4 内燃机排烟异常	62
4.4.1 故障类型	62
4.4.2 故障诊断方法与步骤	62
4.5 内燃机机构系统故障分析	64
4.5.1 曲柄连杆机构故障分析	64
4.5.2 配气机构故障分析	69
4.5.3 润滑系统故障分析	72
4.5.4 冷却系统故障分析	76
4.5.5 涡轮增压器故障分析	79
4.6 内燃机电控系统常见故障分析	81
4.6.1 汽油机电控系统常见故障分析	81
4.6.2 柴油机电控系统常见故障分析	86
第5章 内燃机的检查调整	89
5.1 配合间隙的检查调整	89
5.1.1 活塞与气缸的配合间隙检查调整	89
5.1.2 活塞销配合间隙的检查调整	91
5.1.3 连杆轴承和主轴承的检查调整	91
5.1.4 活塞环安装间隙的检查调整	92
5.1.5 气门杆与气门导管的检查调整	95
5.1.6 摇臂与摇臂轴配合间隙的检查调整	95
5.2 定位间隙的检查调整	96
5.2.1 曲轴轴向定位间隙的检查调整	96
5.2.2 凸轮轴轴向定位间隙的检查调整	96
5.3 工作间隙的检查调整	97
5.3.1 气门间隙的检查调整	97
5.3.2 火花塞电极间隙的检查调整	100
第6章 内燃机的合理匹配	101
6.1 内燃机与汽车的合理匹配	101
6.1.1 匹配的基本要求与特点	101
6.1.2 匹配的方法与程序	102
6.2 内燃机与工程机械的合理匹配	115
6.2.1 匹配的特点与原则	115
6.2.2 匹配的方法与程序	121

6.3 内燃机与船舶的合理匹配	128
6.3.1 匹配的特点与基本要求	128
6.3.2 匹配的方法与程序	133
6.4 内燃机与农业机械的合理匹配	136
6.4.1 农用柴油机的使用和技术要求	136
6.4.2 农用柴油机的总体匹配设计	140
6.5 内燃机与发电机的合理匹配	146
6.5.1 匹配的特点与原则	146
6.5.2 匹配的方法与程序	147
第 7 章 内燃机在特殊条件下的使用	148
7.1 内燃机走合期的使用	148
7.1.1 走合期的特点	148
7.1.2 走合期的使用	149
7.1.3 走合期的维护保养	150
7.2 内燃机在低温条件下的使用	150
7.2.1 内燃机在低温条件下的使用特点	150
7.2.2 内燃机在低温条件的使用	153
7.3 内燃机在高温条件下的使用	155
7.3.1 内燃机在高温条件下的使用特点	155
7.3.2 内燃机在高温条件的使用	156
7.4 内燃机在高原地区的使用	157
7.4.1 内燃机在高原地区条件下的使用特点	157
7.4.2 内燃机在高原地区条件的使用	159
第 8 章 内燃机的排污与净化	161
8.1 内燃机排污的危害	161
8.1.1 有害排放的种类	161
8.1.2 有害排放的危害	161
8.2 内燃机排污的形成	163
8.2.1 内燃机排污的形成机理	163
8.2.2 内燃机排污形成的影响因素	168
8.3 内燃机排污的控制	172
8.3.1 内燃机机内净化技术	172
8.3.2 内燃机机外净化技术	174

第 9 章 内燃机的噪声与控制	176
9.1 内燃机噪声概述	176
9.1.1 内燃机噪声的分类	176
9.1.2 内燃机噪声的计算与检测	176
9.2 燃烧噪声	177
9.2.1 燃烧噪声机理	177
9.2.2 气缸压力的频谱特性	178
9.2.3 气缸压力频谱与噪声的关系	179
9.2.4 燃烧噪声的影响因素	180
9.2.5 降低燃烧噪声的方法	181
9.3 机械噪声	183
9.3.1 活塞敲击噪声	183
9.3.2 配气机构噪声	185
9.3.3 供油系统噪声	186
9.3.4 齿轮传动噪声	186
9.3.5 轴承噪声	187
第 10 章 内燃机的运行材料	188
10.1 内燃机燃料	188
10.1.1 汽油	188
10.1.2 柴油	195
10.1.3 代用燃料	201
10.2 内燃机润滑油	207
10.2.1 内燃机润滑油的分类	207
10.2.2 内燃机润滑油的使用性能	213
10.2.3 内燃机润滑油的选用	216
10.3 内燃机冷却液	220
10.3.1 内燃机冷却液的性能要求	220
10.3.2 内燃机冷却液的选用	221
参考文献	225

绪 论

内燃机的发明，至今已有 130 多年的历史。若把蒸汽机的发明认为是第一次动力革命；那么内燃机的问世当之无愧是第二次动力革命，因为它不仅是动力史上的一次大飞跃，而且其应用范围之广、数量之多也是当今任何一种别的动力机械无法相提并论的。随着科技的发展，内燃机在经济性、动力性、可靠性等诸多方面都取得了惊人的进步，为人类做出了巨大贡献。

内燃机是热机的一种，它是将燃料与空气的混合气在气缸内燃烧，并依靠燃料燃烧时的燃气膨胀力推动活塞对外做功的机器。内燃机在气缸内实现了两个能量转换，即燃料的化学能通过燃烧转变为热能和热能通过膨胀转变为机械能。

0.1 内燃机的基本结构

0.1.1 内燃机的基本名词术语

内燃机在运用中常用到以下结构术语（见图 0-1）。

（1）上止点。如图 0-1 所示，活塞在气缸中上下运动一个来回，曲轴旋转一周。活塞顶端离曲轴旋转中心最远处，称为上止点。

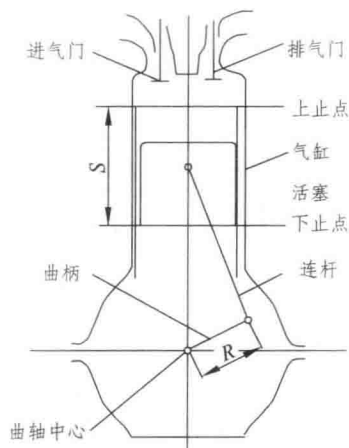


图 0-1 往复活塞式内燃机示意图

（2）下止点。活塞顶端离曲轴中心最近处，称为下止点。

（3）活塞行程 (S)。上、下止点间的距离称为活塞行程，用 S 表示。连杆轴颈中心到曲轴旋转中心的距离 R 为曲柄半径；对于气缸中心线通过曲轴中心线的内燃机来说， $S=2R$ 。

(4) 燃烧室容积 (V_c)。当活塞位于上止点时, 活塞顶以上的气缸容积称为燃烧室容积, 也称为压缩容积, 用 V_c 表示。

(5) 气缸工作容积 (V_h)。活塞从一个止点到另一个止点所扫过的气缸容积称为气缸工作容积, 用 V_h 表示。

$$V_h = \frac{\pi D S}{4 \times 10^6} \quad (0-1)$$

式中, D 为气缸直径, mm; S 为活塞行程, mm。

(6) 气缸总容积 (V_a)。当活塞位于下止点时, 活塞顶上方的气缸容积称为气缸总容积, 用 V_a 表示。

(7) 内燃机排量 V_L 。内燃机所有气缸工作容积的总和称为内燃机排量, 用 V_L 表示。

$$V_L = i V_h \frac{\pi D^2 S i}{4 \times 10^6} \quad (0-2)$$

式中, i 为气缸数; V_h 为气缸工作容积, L。

(8) 压缩比 (ε)。气缸总容积与燃烧室容积之比称为压缩比, 用 ε 表示。

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{(V_h + V_c)}{V_c} = 1 + \frac{V_h}{V_c} \quad (0-3)$$

压缩比表示活塞由下止点移动到上止点过程中气缸中气体被压缩的程度。

0.1.2 内燃机的总体构造

单缸往复式活塞式内燃机基本结构示意图如图 0-2 所示, 它主要由气缸盖、气缸体、活塞、连杆、曲轴、排气门和进气门等组成。

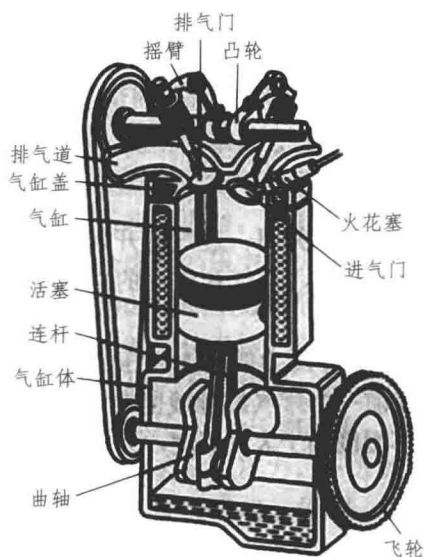


图 0-2 单缸往复式活塞式内燃机基本结构示意图

气缸体内有一个圆筒形气缸，活塞装在气缸内，活塞通过连杆与曲轴相连接，构成曲柄连杆机构。活塞在气缸内做上下往复运动，通过连杆推动，曲轴做旋转运动。

气缸体上有气缸盖，气缸盖、气缸和运动的活塞构成了一个容积变化的空间，在此进行燃料的燃烧和气体的膨胀。为了吸入新鲜空气和排除废气，在气缸盖上设有进气门和排气门，由曲轴通过传动机构驱动。

实际上内燃机是极其复杂的机器。为实现由燃料化学能到机械能的转换，并且达到优异的性能指标，内燃机一般采用多个气缸，所以只具备基本结构是不够的，必须包含许多机构和系统，且随发动机的用途、生产厂家和生产年代的不同而千差万别。但就其总体构造而言，内燃机都是由机体组、曲柄连杆机构、配气机构、进排气系统、燃料供给系统、冷却系统、润滑系统、启动系统和有害排放物控制装置组成。另外，汽油机还包括点火系统；增压发动机还有增压系统。

1. 机体组

机体组主要包括气缸体、气缸盖、曲轴箱等。机体组是内燃机各机构、各系统装配的基体，它的许多部位还是曲柄连杆机构、配气机构、进排气系统、燃油供给系统、冷却系统、润滑系统的组成部分。

2. 曲柄连杆机构

曲柄连杆机构是发动机的主要运动机构，由活塞、活塞环、活塞销、连杆、曲轴和飞轮等组成；其功能是将活塞的往复运动转变为曲轴的旋转运动，同时将作用于活塞上的力转变为曲轴对外输出的转矩。

3. 配气机构

配气机构的作用是根据每一气缸内的工作和发火次序的要求，定时地开启和关闭各气缸的进、排气门，以便新鲜可燃混合气（汽油机）或空气（柴油机）及时进入气缸，并把燃烧生成的废气及时排除气缸。配气机构主要由气门组和气门传动组（包括凸轮轴、挺柱、推杆、摇臂轴、摇臂和正时齿轮等）组成。

4. 进、排气系统

进、排气系统的作用是将新鲜空气或可燃混合气分配到各气缸中，并汇集燃烧后的废气，经消声器排到大气中；它由空气滤清器、进气歧管、排气歧管和排气消声器等组成。

5. 燃料供给系统

汽油机燃料供给系统的作用是将汽油和空气按一定比例混合成可燃混合气，并供入气缸。它由汽油箱、输油泵、汽油滤清器和汽油喷射系统组成。

柴油机燃料供给系统的作用是适时适量地将柴油以一定压力通过喷油器直接喷入气缸，使柴油在缸内形成混合气并燃烧做功。它由柴油箱、输油泵、柴油滤清器、高压油泵、喷油器、调速器等组成。

6. 冷却系统

冷却系统的主要作用是将内燃机的受热零件，如气缸盖、气缸、气门等的热量及时散发到大气中，以保证内燃机在适宜的温度下工作。冷却介质一般为水或空气。水冷式内燃机的冷却系统一般由水泵、水套、节温器、散热器、冷却风扇等组成。

7. 润滑系统

内燃机润滑系统的主要作用是将润滑油送入运动零件的摩擦表面，以减少摩擦副的摩擦和磨损，并带走摩擦生成的热量和金属屑。润滑系统的主要部件有机油泵、机油滤清器、机油道、机油冷却器等。

8. 点火系统

汽油机点火系统的作用是按时产生足够强的电火花，以点燃气缸内被压缩的混合气。现代汽油机的点火系统一般由传感器、微机控制器、点火控制器、火花塞、点火线圈等组成；传统汽油机的点火系统由点火线圈、分电器、火花塞、电源、点火开关和高压导线等组成。

9. 启动系统

启动系统是利用发动机以外的能源使发动机开始运转，常用的电启动系统由蓄电池、直流电动机、传动机构、控制机构等组成。

综上所述，往复式活塞式内燃机的组成如表 0-1 所示。

表 0-1 内燃机的组成

内燃机总体构造	
两大机构	曲柄连杆机构
	配气机构
五大系统	燃料供给系统
	润滑系统
	冷却系统
	启动系统
	点火系统（汽油机）

0.1.3 内燃机的分类与型号编制

1. 内燃机的分类

常用的往复式活塞式内燃机的分类方法如下。

1) 按燃料分类

内燃机按使用燃料不同分为煤气机、汽油机、柴油机（包括各种代用燃料）等。

2) 按一个工作循环的行程数分类

内燃机按一个工作循环的行程数分为四冲程内燃机、二冲程内燃机。

3) 按燃料着火方式分类

内燃机按燃料着火方式不同分为压燃式内燃机、点燃式内燃机。

4) 按冷却方式分类

内燃机按冷却方式不同分为水冷式内燃机、风冷式内燃机。

5) 按进气方式分类

内燃机按进气方式不同分为自然吸气式内燃机、增压式内燃机。

6) 按气缸数目分类

内燃机按气缸数目多少分为单缸内燃机、多缸内燃机。

7) 按气缸排列方式分类

内燃机按气缸排列方式不同分为直列式内燃机、V 型内燃机、水平对置式内燃机、卧式内燃机等。

8) 按转速或活塞平均速度分类

内燃机按转速或活塞平均速度分为高速内燃机（标定转速高于 1 000 r/min 或活塞平均速度高于 9 m/s）、中速内燃机（标定转速 600 ~ 1 000 r/min 或活塞平均速度 6 ~ 9 m/s）、低速内燃机（标定转速低于 600 r/min 或活塞平均速度低于 6 m/s）。

9) 按用途分类

内燃机按用途不同分为农用、汽车用、工程机械用、拖拉机用、铁路机车用、船用及发电用等内燃机。

2. 内燃机的型号编制

我国内燃机名称和型号编制规则国家标准（GB 725—91）的主要内容如下：

（1）内燃机产品名称均按所采用的燃料命名，例如：柴油机、汽油机、煤气机、沼气机、双（多种）燃料发动机等。

（2）内燃机型号由阿拉伯数字、汉语拼音字母和 GB 1883 中关于气缸布置所规定的象形字符号组成。

（3）内燃机型号由 4 部分组成。

① 首部：包括产品系列代号、换代标志符号和地方、企业代号（由制造厂根据需要自选相应字母表示，但需经行业标准化归口单位核准、备案）。

② 中部：由缸数符号、气缸布置形式符号、冲程符号和缸径符号组成。

③ 后部：由结构特征符号和用途特征符号组成。

④ 尾部：包括区分符号。当同一系列产品因改进等原因需要区分时，由制造厂选用适当符号表示；后部与尾部可用“-”分隔。

（4）型号表示方法，如图 0-3 所示。

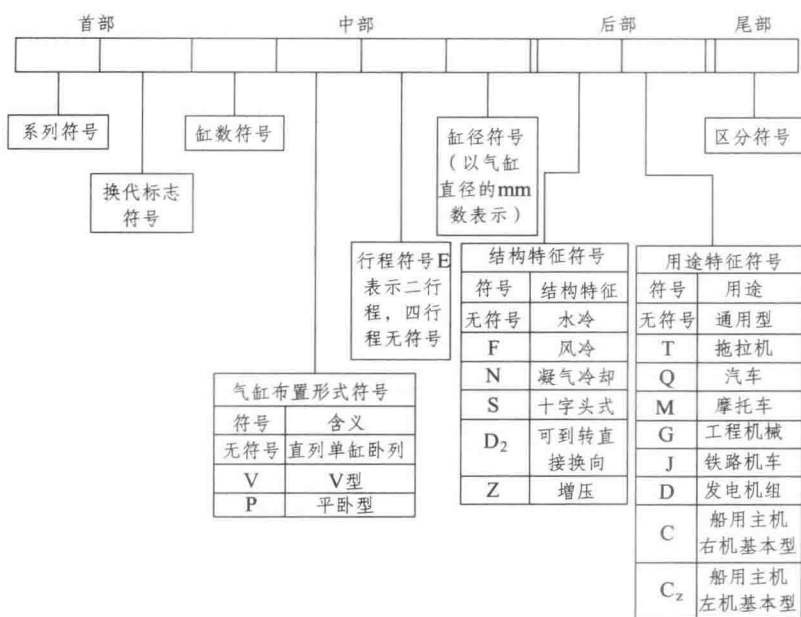


图 0-3 型号表示方法

(5) 型号举例:

① 汽油机。

a. 1E65F——单缸、二冲程、缸径为 65 mm、风冷、通用型。

b. EQ6100-1——6 缸、直列、四冲程、缸径为 100 mm、水冷，区分符号 1 表示第一种变型产品（EQ 为第二汽车制造厂代号）。

c. BN492QA——4 缸、直列、四冲程、缸径为 92 mm、水冷、汽车用，区分符号 A 表示变型产品（BN 为北京内燃机厂代号）。

② 柴油机。

a. LL480Q——4 缸、直列、四冲程、缸径为 80 mm、水冷、汽车用（LL 为华源莱动股份有限公司代号）。

b. 10V120FQ——10 缸、“V”型气缸排列、四冲程、缸径为 120 mm、风冷、汽车用。

c. 12VE230ZC_z——12 缸、“V”型气缸排列、二冲程、缸径为 230 mm、水冷、增压、船用主机左机基本型。

0.2 内燃机的工作原理

0.2.1 四冲程内燃机工作原理

1. 四冲程汽油机工作原理

四冲程往复活塞式汽油机在 4 个活塞行程内进行进气、压缩、做功和排气 4 个过程，完

成燃料的化学能到曲轴旋转机械能的转换，如图 0-4 所示。

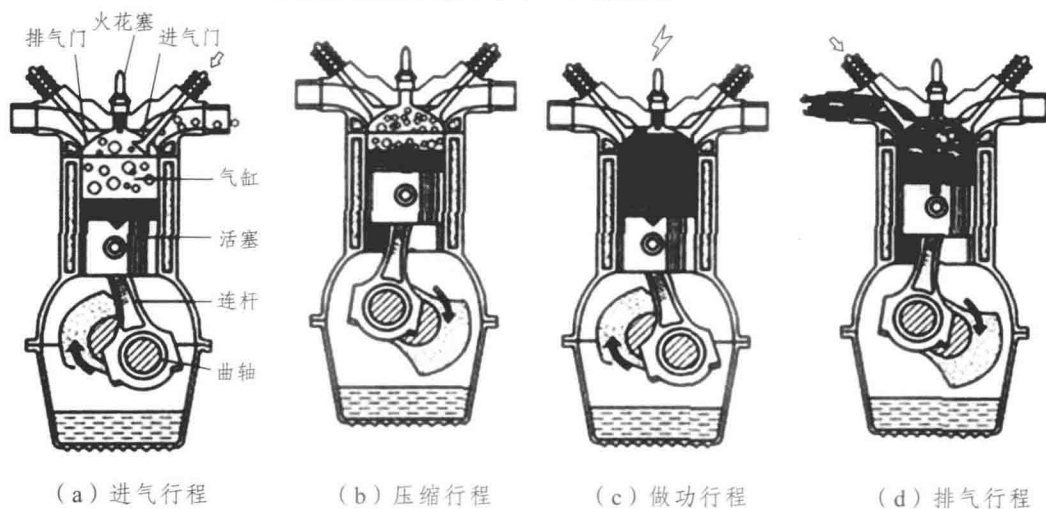


图 0-4 四冲程往复活塞式汽油机的工作原理示意图

1) 进气行程

活塞在曲轴的带动下由上止点移至下止点，此时排气门关闭，进气门开启。在活塞移动过程中，气缸容积逐渐增大，气缸内形成一定的真空吸力，空气和汽油的混合气通过进气门进入气缸，并在气缸内进一步混合均匀。如图 0-4 (a) 所示。

因为进气系统有阻力，所以在进气结束时气缸内的气体压力低于大气压力，为 $0.08 \sim 0.09 \text{ MPa}$ 。由于进气门、气缸壁、活塞等的高温零件以及前一个排气过程残留在气缸内的高温废气对混合气的加热，致使在进气结束时气缸内的气体温度高于大气温度，为 $320 \sim 380 \text{ K}$ 。

2) 压缩行程

进气行程结束后，曲轴带动活塞由下止点移向上止点，这时进、排气门均关闭，随着活塞移动，气缸容积不断减小，气缸内的混合气体被压缩，其压力和温度同时升高。当活塞到达上止点时，气缸内气体的压力为 $0.8 \sim 1.5 \text{ MPa}$ 、温度为 $600 \sim 750 \text{ K}$ 。如图 0-4 (b) 所示。

压缩气体有利于混合气的迅速燃烧并可提高内燃机的热效率。一般压缩比 $\varepsilon=7 \sim 10$ ， ε 太大容易发生不正常燃烧。

3) 做功行程

当压缩行程结束时，安装在气缸盖上的火花塞产生电火花，将气缸内的可燃混合气点燃，火焰迅速传遍整个燃烧室，同时放出大量热量，这时进、排气门仍然关闭，燃烧气体的压力和温度迅速升高，高压气体推动活塞由上止点移向下止点，并通过连杆推动曲轴旋转做功。如图 0-4 (c) 所示。

在做功行程中，燃烧气体的最大压力可达 $3.0 \sim 6.5 \text{ MPa}$ 、最高温度可达 $2200 \sim 2800 \text{ K}$ ，随着活塞向下止点移动，气缸容积不断增大，气体压力和温度逐渐降低。当做功行程结束时，压力为 $0.35 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 、温度为 $1200 \sim 1500 \text{ K}$ 。

4) 排气行程

活塞到达下止点前后，排气门开启，进气门仍然关闭，燃烧后的废气靠其自身压力从排气道喷出，随后曲轴通过连杆带动活塞由下止点移向上止点，将废气继续挤出气缸。当活塞

到达上止点时，排气行程结束，排气门关闭。图 0-4 (d) 所示。

当排气行程结束时，在燃烧室内尚残留少量废气，称为残余废气。因为排气系统有阻力，所以残余废气的压力比大气压力略高，为 $0.105 \sim 0.12 \text{ MPa}$ 、温度为 $900 \sim 1100 \text{ K}$ 。

将气缸内的气体压力随气缸容积（或曲轴转角）的变化关系绘成曲线，能直观地显示气缸内气体压力的变化过程，这种曲线称作示功图，如图 0-5 所示。借助示功图，可以深入理解和掌握内燃机的工作状况，在如图 0-5 所示的示功图上，曲线 ra 表示进气行程中气缸内气体压力的变化，曲线 ac 为压缩行程，曲线 czb 表示做功行程，曲线 br 代表排气行程；大气压力线上方的点表示正压力，下方的点表示负压力。

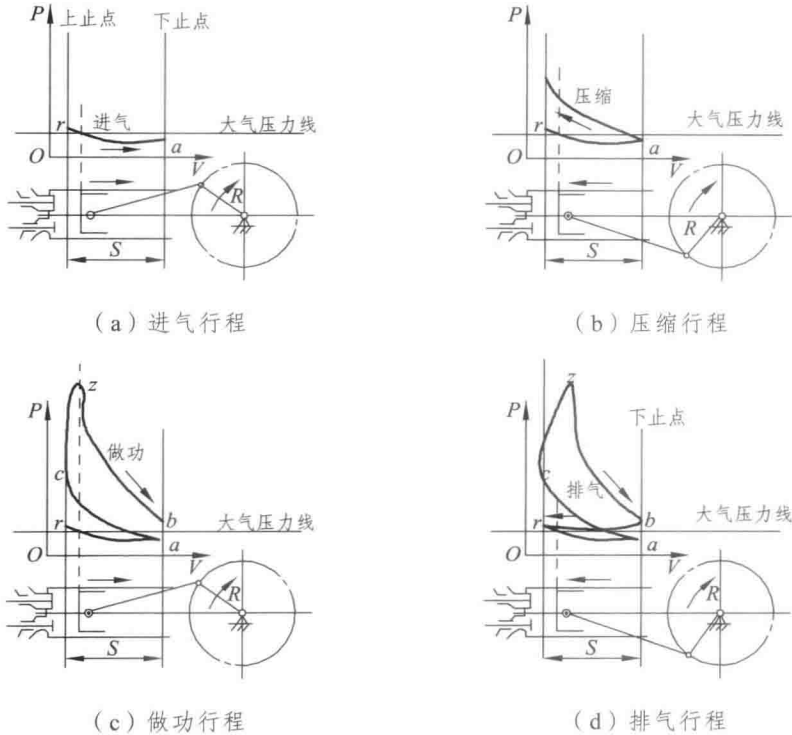


图 0-5 四冲程汽油机的示功图

综上所述，经过进气、压缩、做功和排气 4 个行程，汽油机便完成一次能量转换过程，周而复始地重复这个过程，即可连续输出动力，每一个能量转换过程称为内燃机的一个工作循环。在一个工作循环中，曲轴旋转两周，活塞在上、下止点间往复运动 4 个行程（一个活塞行程曲轴转 180° ），所以称为四冲程内燃机。在一个工作循环中，只有做功行程产生动力，其他 3 个行程要消耗动力，做功行程做的功比其他 3 个行程的耗功大得多，一般在曲轴上安装转动惯量较大的飞轮或采用多缸内燃机，靠飞轮惯性和多个气缸按一定的工作顺序依次做功来维持运转，并改善曲轴旋转的不均匀性。

在实际进气过程中，进气门早于上止点开启，迟于下止点关闭；在排气过程中，排气门早于下止点开启，迟于上止点关闭；即进、排气过程所占的曲轴转角均超过 180° 。进气门早开晚关是为了减少进气过程所消耗的功和增加进入气缸内的混合气量。排气门早开晚关是为了减少排气过程的能耗和残余废气量。减少残余废气量，会相应地增加进气量。