

柴油机试验

阎允祥 编
张传伟



机械工业出版社

本书以国家标准为依据，介绍了柴油机试验用的主要测试设备、仪器的构造、工作原理和使用，还介绍了拟定试验方案、进行性能试验、绘制特性曲线、分析试验结果的方法以及根据特性曲线选用柴油机等方面的内容。

本书供柴油机有关技术人员参考。

柴 油 机 试 验

闵光泽 张传铎 编

•

中国农业机械出版社出版

北京市海淀区阜成路东钓鱼台乙七号

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

新华书店经售

•

850×1168 $1/32$ 开 11 $3/8$ 印张 299 千字

1984年12月北京第一版 · 1984年12月北京第一次印刷

印数：0,001—7,500 定价：1.80 元

统一书号：15216·216

前 言

柴油机试验是研究柴油机工作过程和考核产品质量的基本方法之一，它在柴油机的科研、生产、维修和使用中都起着很重要的作用。

通过试验可以检查出厂产品是否达到设计所要求的动力性能、经济性能指标；根据试验结果，可以正确地选择、合理地使用柴油机。这对于充分发挥柴油机的功率、降低油耗、节约能源具有十分重要的现实意义。

本书以国家标准为依据，介绍了柴油机试验用的主要测试设备、仪器的构造、工作原理和使用，还介绍了拟定试验方案、进行性能试验、绘制特性曲线、分析试验结果的方法以及根据特性曲线选用柴油机等方面的内容。

本书在编写过程中，得到一些大专院校、工厂的大力支持和帮助，提供了有关的试验数据和原始资料，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有缺点和错误，殷切地希望读者批评指正。

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 内燃机的特点、分类和型号.....	1
一、内燃机的特点	1
二、内燃机的分类	2
三、我国内燃机型号的编制规则	2
第二节 柴油机的主要性能指标.....	3
一、指示性能参数	3
二、有效性能参数	6
三、机械效率 η_m 和有效热效率 η_e	10
第三节 柴油机试验的目的和分类.....	16
一、柴油机试验的目的	16
二、试验的分类	16
三、柴油机试验的测量项目	18
第二章 柴油机功率、转速和耗油率的测量	20
第一节 功率的测量	20
一、功率测量的原理和测功器的分类	20
二、水力测功器	22
三、电力测功器	33
四、测力机构	50
第二节 转速的测量.....	55
一、离心式转速表	55
二、磁性转速表	57
三、闪光测频仪	58
四、定时转速表	60
五、晶体管数字式转速计	62
第三节 燃油消耗率的测定.....	67

一、称量法	67
二、容积法	69
三、油耗-转速的自动测量	71
第三章 压力和温度的测量	90
第一节 压力的测量	90
一、液体玻璃管压力计	91
二、弹簧管压力表	96
三、膜片式压力表	97
四、电热式压力表	98
五、最大压力表	100
第二节 温度的测量	101
一、玻璃管温度计	103
二、压力式温度计	105
三、杆状固体温度计	106
四、电热式温度计	107
五、热电偶高温计	108
第四章 示功图的测录	125
第一节 示功器	27
一、机械式示功器	127
二、气电式示功器	130
三、电子式示功器	133
第二节 示功图的整理和计算	138
一、由 p - V 图求平均指示压力 p_i	138
二、由 p - φ 图求平均指示压力 p_i	140
三、由 p - φ 图直接计算 p_i 值	142
第五章 流量的测定	151
第一节 柴油机进气量的测定	151
一、基本概念	152
二、皮托管测速计	155
三、节流式流量计	162
四、层流流量计	177
五、旋进型旋涡流量计	178

第二节 机油、冷却水的耗量和流量的测定·····	180
一、机油消耗量的测定·····	180
二、机油和冷却水流量的测定·····	184
第六章 排气烟度的测定和废气分析·····	187
第一节 烟度测定·····	187
一、烟度计的种类、构造和工作原理·····	188
二、排气烟度的一般测定方法·····	193
三、我国的排气烟度标准及其测定方法·····	194
第二节 废气分析·····	198
一、奥氏气体分析仪·····	198
二、红外线气体分析仪·····	204
第七章 柴油机试验间·····	207
一、对试验间的要求·····	207
二、试验间的组成·····	208
三、设备、仪器的安装·····	213
四、试验间的发展前景·····	215
第八章 试验方法·····	217
第一节 试验前的准备·····	217
一、仪器和物资的准备·····	217
二、柴油机的准备·····	219
三、技术文件的准备·····	224
第二节 试验的一般方法和试验结果的整理·····	235
一、试验的程序和方法·····	235
二、试验结果的整理·····	237
第三节 功率标定以及非标准大气状况下 功率和耗油率的校正·····	242
一、功率的标定·····	242
二、功率和耗油率的大气校正·····	243
第九章 性能试验·····	248
第一节 柴油机的特性·····	248
一、柴油机的工况·····	248

二、柴油机的特性	250
第二节 柴油机的特性曲线及制取方法	251
一、调整特性	251
二、负荷特性	254
三、速度特性	258
四、调速性能	263
五、推进特性	270
六、万有特性	274
七、空转特性	283
八、工作稳定性试验和热平衡试验	284
九、各缸工作均匀性试验和机械效率的测定	290
第三节 特性曲线的作用	297
一、特性曲线可以作为评定柴油机性能的依据	297
二、特性曲线可以作为正确选择柴油机的参考	298
三、特性曲线可以作为合理使用柴油机的指导	299
附录 I 国家标准《内燃机台架试验方法》	313
附录 II 内燃机功率及燃油消耗率换算方法	330
附录 III 关于新的单位制	343

第一章 概 述

自然界蕴藏着丰富的能量，风能、水能、热能、电能、光能、各种燃料的化学能、原子能和太阳能等都是可以被利用的能源。随着生产的发展，人们在生产实践中，发明和研制了各种各样复杂的机器和装置，利用这些能源为人类造福。

柴油机是一种能量转换的机器。它能将燃料（柴油）的化学能，通过燃烧释放出热能，再将热能转变为机械能，而被人们所利用。

在设计、制造和使用柴油机的时候，我们总是希望燃料燃烧得越完全越好，从而使释放的热量尽可能的多些；而且还要设法使热能尽可能多地变为机械能，这样就可以用较少的燃料而获得较大的动力，以充分利用燃料，节约能源。

柴油机试验，就是用科学试验的方法来揭示柴油机内部的变化规律，找出提高其动力性（功率大）、经济性（耗油省）、可靠性（故障少）、耐久性（寿命长）、运转性（起动容易、振动小、无噪音、排污少）等性能的途径。

第一节 内燃机的特点、分类和型号

一、内燃机的特点

柴油机是一种内燃机，它是由一定的机构和系统使燃料燃烧放热，工质膨胀作功而实现能量转换，完成工作循环的。

内燃机的主要特点是燃料的燃烧和能量的转换都是在发动机气缸内部进行的。内燃机与其它利用热能的动力机比较，有以下较为突出的优点，如重量轻、体积小、功率范围宽广、耗油少等。也就是说内燃机单位气缸工作容积所发出的功率大，单位功率的重量轻。而且单机功率范围很宽广，最小的仅为0.5马力，

最大的可以达到 48000 马力，能满足各种不同用途的需要。耗油少是因为有效热效率高，柴油机一般为30%左右，增压柴油机可以达到46%。即燃烧100公斤的柴油，其中有 30~46公斤 所发出的热量可转化为动力，因而经济性较好。

内燃机也有一些缺点，如结构较复杂；对燃料的质量和加工精度要求较高以及排出的废气中含有一些有害的成分，会造成对环境的污染等。这些是需要改进的。

二、内燃机的分类

内燃机的分类方法很多，根据燃烧燃料的不同，可分为柴油机、汽油机及其它燃料发动机。根据燃料着火方式不同，可分为压燃式和点燃式发动机；柴油机是靠气缸内的高温高压使柴油自燃着火的，故称为压燃式发动机。汽油机则是靠高压电火花点火而燃烧的，故称为点燃式发动机。根据完成一个工作循环的行程数不同，可分为四行程和二行程发动机。根据气缸数目的多少，可分为单缸、双缸、多缸发动机。根据气缸的排列型式，可分为直列式、卧式、V型等发动机。根据冷却方式不同，可分为水冷和风冷发动机。

此外，还可以根据内燃机的转速高低、起动方法、增压情况及用途的不同等情况来进行分类。

三、我国内燃机型号的编制规则

我国已将内燃机产品名称和型号编制规则制定成国家标准，适用于各种类型活塞式内燃机。

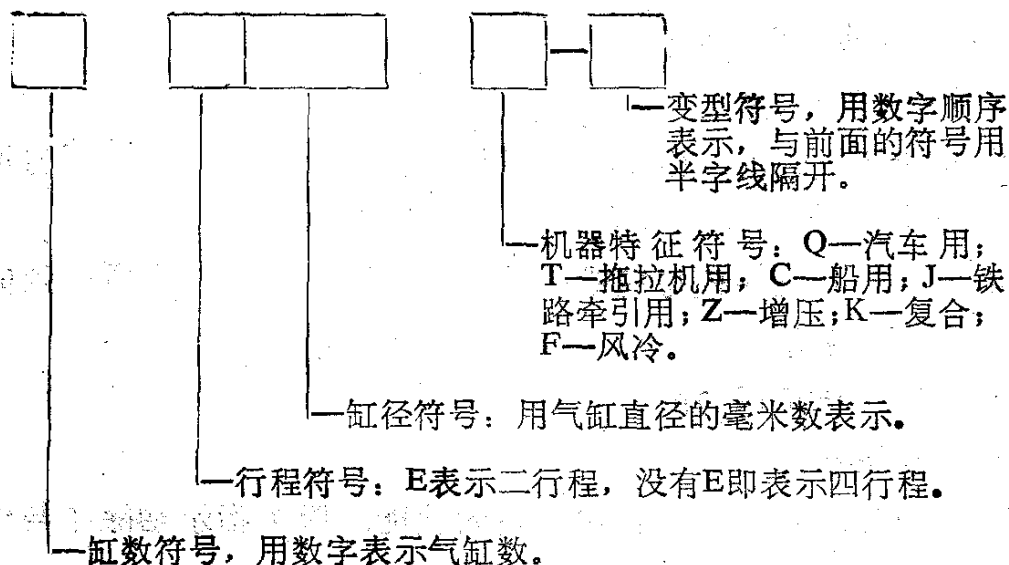
产品名称按所用的主要燃料命名，例如：柴油机、汽油机、煤气机等。

内燃机型号由下页表中几部分组成：

现将型号举例如下：

295 柴油机——表示二缸，四行程，缸径95毫米，水冷，通用式柴油机。

4115T-1柴油机——表示四缸，四行程，缸径115毫米，水冷，拖拉机用柴油机，第一种变型产品。



第二节 柴油机的主要性能指标

柴油机最主要的性能, 是动力性和经济性。所谓动力性, 就是柴油机所能发出功率的大小, 它表示能量转换“量”的多少。所谓经济性, 就是柴油机发出一定功率时, 所消耗柴油的数量, 它表示能量转换“质”的优劣。表征柴油机性能指标的参数有两种, 即指示性能参数和有效性能参数。

一、指示性能参数

用来表明柴油机气缸内工作循环的好坏、能量转换完善程度的一些性能参数叫做指示性能参数。主要包括指示功 L_i 、指示功率 N_i 、平均指示压力 p_i 和指示热效率 η_i 等。

1. 指示功 L_i

在说明指示功的概念前, 先来看什么叫“做功”。例如: 从水井中提水, 一桶水需要20公斤的力才能提起来, 如果只用15公斤的力去提, 肯定是提不起来的。或者用20公斤的力将水桶提着不动。上述两种情况, 虽然都用了力, 但并没有做功。只有用20公斤的力, 并将水桶提起一段距离, 才算作了功。因此, 功应该等于作用力与物体沿着作用力的方向所走过距离的乘积。

$$\text{即} \quad L = p \times S \quad (\text{公斤} \cdot \text{米}) \quad (1-1)$$

式中 L ——功(公斤·米);

p ——作用力(公斤);

S ——距离(米)。

在柴油机气缸内, 由于柴油燃烧, 使气体膨胀, 燃气压力推动活塞而作功。

指示功就是柴油机每完成一个工作循环, 在气缸内所得到的有用功。用 L_i 表示。

2. 平均指示压力 p_i

指示功虽然反映了柴油机一个工作循环中所获得的有用功的数量, 但它却不能比较两台柴油机的性能。因为指示功除了与气缸内能量转换的效果有关外, 还与气缸工作容积有关。如果两台柴油机指示功相等, 但气缸工作容积大小不同, 显然, 它们热功转换的效果是不一样的。气缸工作容积小的就一定比气缸工作容积大的好些。因此, 需要引用平均指示压力来进行评述。

平均指示压力就是柴油机一个工作循环中, 每单位气缸工作容积所得到的指示功。用 p_i 表示:

$$p_i = L_i / V_h \quad (1-2)$$

式中 p_i ——平均指示压力;

L_i ——柴油机一个工作循环的指示功;

V_h ——气缸工作容积。

上式中, 常用的单位: L_i 为公斤·米; V_h 为升(即分米³); p_i 为公斤/厘米²。为了得到统一的单位, 将1公斤·米=100公斤·厘米, 1升=1000厘米³代入上式, 则:

$$p_i = \frac{1}{10} \frac{L_i}{V_h} \quad (\text{公斤/厘米}^2) \quad (1-3)$$

式(1-2)可改写为 $L_i = p_i \cdot V_h$, 即指示功等于平均指示压力与气缸工作容积的乘积。因此, 指示功可以看成是一个假设不变的平均压力, 作用在活塞顶上, 而且使它推动活塞所作的功与实际上气缸内不断变化的燃气压力所作的功相等, 则这个假设的平均压力就是平均指示压力。

需要指出的是, p_i 虽然叫做平均指示压力, 但其物理意义并

不是压力，而是单位气缸工作容积所得到的指示功。

平均指示压力 p_i 是表示柴油机动力性的一个很重要的参数，其值的大小表明了工作循环质量的好坏及气缸工作容积利用率的高低。 p_i 值越高，说明柴油机所得到的指示功越大，能量转换的效果越好，气缸工作容积的利用率越高。

3. 指示功率 N_i

仅仅只根据出力的大小，尚不能全面衡量干活的多少，还必须要看速度的快慢。例如，有两台拖拉机，运输相等重量的货物至同一地点。甲车一天可运三趟，乙车一天只能运两趟。显然，这两台拖拉机虽然载重相同，运输距离也相等，但做功多少却不一样。甲车速度快，所用的时间少，单位时间里作的功就比乙车多些。单位时间做功的多少，就是做功的速率，叫做功率。

$$\text{功率} = \frac{\text{功}}{\text{时间}} = \frac{\text{力} \times \text{距离}}{\text{时间}} = \text{力} \times \text{速度}$$

$$\text{即：} \quad N = \frac{L}{t} = \frac{P \times S}{t} = Fv \quad (1-4)$$

式中 N ——功率(公斤·米/秒)；

P ——作用力(公斤)；

v ——速度(米/秒)。

在物理学上，把每秒钟将75公斤重的物体移动1米远的距离定为1马力。

$$\text{即} \quad 1 \text{ 马力} = 75 \text{ 公斤} \cdot \text{米/秒} \quad (1-5)$$

对于柴油机来说，单位时间内所作的指示功叫做指示功率。

用 N_i 表示。

由式(1-3)知：单缸柴油机每循环所作的指示功为 $L_i = 10p_i \cdot V_h$ ，则多缸柴油机每循环所作的指示功为：

$$L_i = 10p_i V_h i \text{ (公斤} \cdot \text{米)} \quad (1-6)$$

式中 i ——气缸数。

若柴油机曲轴转速为 n 转/分，因曲轴每转一转，活塞移动两个行程，所以每秒钟活塞移动的行程数为 $2n/60$ 。四行程发动机

曲轴旋转两转，活塞移动四个行程，完成一个工作循环，作功一次。而二行程发动机曲轴旋转一转，活塞移动两个行程完成一个工作循环，作功一次。设 τ 为每循环的行程数，即四行程发动机 $\tau = 4$ ，二行程发动机 $\tau = 2$ 。则柴油机每秒钟所完成的工作循环数，即作功次数应为：

$$\frac{2n}{60\tau} = \frac{n}{30\tau} \quad (1-7)$$

由式(1-6)和式(1-7)可求出柴油机每秒钟所作的指示功，即指示功率 N_i ：

$$N_i = L_i \times \frac{n}{30\tau} = \frac{10p_i V_h i n}{30\tau} \quad (\text{公斤} \cdot \text{米/秒})$$

根据式(1-5)将单位换算成马力，则上式为：

$$N_i = \frac{10p_i V_h i n}{30 \times 75 \times \tau} = \frac{p_i V_h i n}{225\tau} \quad (\text{马力}) \quad (1-8)$$

式中 N_i ——指示功率(马力)；

p_i ——平均指示压力(公斤/厘米²)；

V_h ——单缸工作容积(升)；

i ——气缸数目；

n ——柴油机转速(转/分)；

τ ——行程数。

二、有效性能参数

柴油机是通过曲柄连杆机构将活塞的往复运动转换为曲轴的旋转运动对外作功的。因此，只有从飞轮上输出出来的功，才是可供利用的实际有效功。从柴油机输出轴直接测得的性能参数叫做有效性能参数。这些参数表明了整个柴油机工作的性能指标。

1. 扭矩 M 。

柴油机的动力是以旋转的方式输送出来驱动其它工作机械的，如作为拖拉机、汽车、船舶的发动机或用来带动水泵、发电机等都是转动的方式传递动力的。

欲使轴转动，就不仅要用力，而且这个力到转轴中心必须要

有一段距离，如图1-1a所示。不论 P_1 力多大，轴都不会转动。只有将力的作用点移至 P_2 ，才能使轴转动起来。从转动中心到力的作用点间的垂直距离叫做力臂。使轴转动的这个“扭力”就叫做扭矩。即 扭矩=力×力臂，如图1-1b。

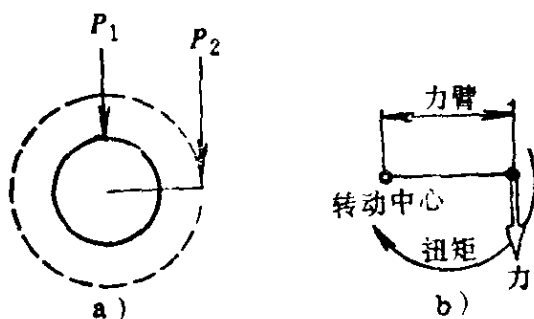


图1-1 扭矩示意图

图1-2为扭力扳手上的扭矩示意图。当用扭力扳手来拧紧气缸盖螺母时，力的作用点在手柄上，扳手的长度为力臂，则拧紧螺

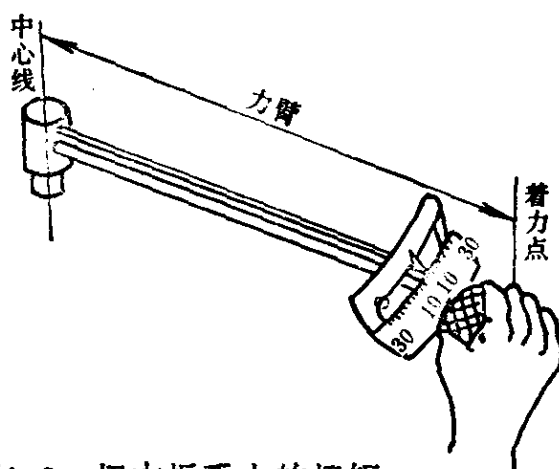


图1-2 扭力扳手上的扭矩

母的力就为扭力。其扭矩值可直接从指针在刻度板上的位置读出。

在柴油机中，燃料燃烧所产生的高压燃气作用在活塞顶上，通过连杆将力传到曲轴的连杆轴颈上，使曲轴绕其中心线旋转而产生扭矩。如图1-3所示。

柴油机可以输出来的扭矩叫做有效扭矩 M_e 。

$$M_e = P \cdot l (\text{公斤} \cdot \text{米}) \quad (1-9)$$

式中 M_e ——输出扭矩(公斤·米)；

P ——作用力(公斤)；

l ——力臂(曲轴半径)(米)。

柴油机输出扭矩的大小，表明机器可以克服旋转阻力矩的大

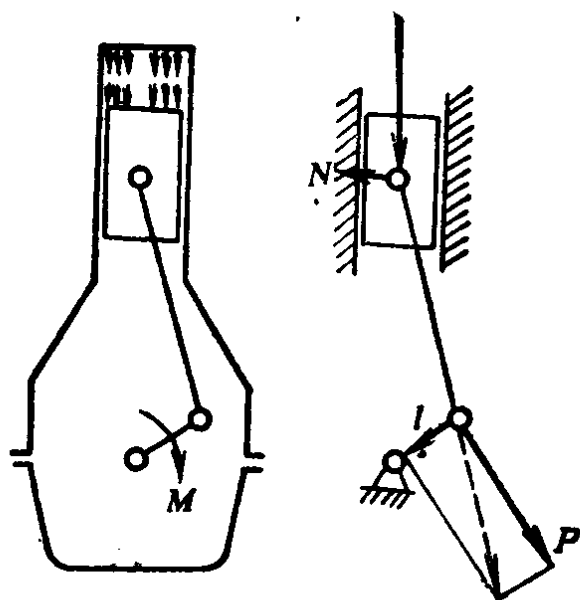


图1-3 曲轴上的扭矩

小。阻力矩就是柴油机的负荷，与输出扭矩大小相等、方向相反。如果柴油机不带负荷，即飞轮上不施加任何阻力矩时，其扭矩是发挥不出来的。

柴油机扭矩的大小，可以用测功器直接测量出来。

2. 转速 n

转速就是柴油机转动的速度，用曲轴每分钟的转数（转/分）表示。

对于作匀速直线运动的物体，速度 $=\frac{\text{距离}}{\text{时间}}$ 。对于作匀速圆周运动的物体，所走过的距离不是直线，而是一个圆周。圆的一周为360度，也叫 2π 弧度。故物体旋转的快慢，要用角速度来衡量，它是单位时间里所转过的角度。用弧度/秒表示。

如已知柴油机转速为 n 转/分，则旋转角速度为

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ (弧度/秒)} \quad (1-10)$$

因为作用在活塞上的力是周期性变化的，所以输出扭矩也是周期性变化的。但由于柴油机具有一个质量很大的飞轮，有较大的惯性；同时多缸发动机作功顺序间隔均匀，虽然扭矩不均匀，但引起曲轴旋转角速度的变化不大，仍可维持稳定运转。因

此, 可以看成是以等角速度旋转, 故可近似地认为曲轴是作匀速转动的。在工程上所研究的柴油机转速, 是在一段时间(如1分钟)内的平均转速, 故可用每分钟曲轴转过的转数(转/分)表示。

3. 有效功率 N_e 。

柴油机输出的净功率, 即从飞轮上所得到的功率, 叫做有效功率, 用 N_e 表示。单位为马力。有效功率是单位时间内所输出的有效功。由式(1-4)知, 作匀速直线运动的物体, 其功率等于力和速度的乘积。而作匀速圆周运动的物体, 其功率就应等于扭矩和角速度的乘积。即

$$N_e = M_e \omega \quad (\text{公斤} \cdot \text{米/秒}) \quad (1-11)$$

将式(1-10)中 ω 值代入式(1-11)

$$\text{得} \quad N_e = M_e \times \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi M_e n}{60} \quad (\text{公斤} \cdot \text{米/秒}) \quad (1-12)$$

由式(1-5)即可将单位换算成马力

$$\text{则} \quad N_e = \frac{2\pi M_e n}{60 \times 75} = \frac{M_e n}{716.2} \quad (\text{马力}) \quad (1-13)$$

式(1-13)反映了柴油机有效功率 N_e , 输出扭矩 M_e 和转速 n 三者间的关系。

4. 平均有效压力 p_e 。

平均有效压力就是柴油机一个工作循环中, 单位气缸工作容积所发出的有效功。用 p_e 表示, 单位是公斤/厘米²。它与平均指示压力 p_i 的区别仅在于 p_i 为单位气缸工作容积的指示功, 而 p_e 为有效功。故 N_e 有与式(1-8)相似的形式, 将式(1-8)中 p_i 换成 p_e , 则

$$N_e = \frac{p_e V_h i n}{225\tau} \quad (\text{马力}) \quad (1-14)$$

$$\text{所以:} \quad p_e = \frac{225\tau N_e}{V_h i n} \quad (\text{公斤/厘米}^2) \quad (1-15)$$

由式(1-13)和式(1-14)知:

$$\frac{M_e \cdot n}{716 \cdot 2} = \frac{p_e \cdot V_h i n}{225 \tau}$$

$$\text{则 } M_e = \frac{716 \cdot 2 p_e V_h i n}{225 \tau n} = \frac{3.18 p_e V_h i}{\tau} \quad (1-16)$$

对于同一台柴油机, V_h, i, τ 均已确定, 为常数值。若令 $\frac{3.18 V_h i}{\tau} = c$, 则式(1-16)可改写为

$$M_e = c p_e \quad (1-17)$$

即平均有效压力 p_e 与扭矩 M_e 成正比, p_e 的大小可以反映 M_e 的大小。因此, p_e 也是表征柴油机动力性能的主要参数之一。

5. 小时耗油量 G_T 和燃油消耗率 g_e

评价柴油机的性能, 不仅要看它所能输出功率的大小, 还要看它输出一定功率时所消耗燃料的多少。柴油机每小时消耗柴油的数量, 叫做小时耗油量。用 G_T 表示。单位为公斤/小时。小时耗油量只可以用来计算一定时间内的总用油量, 但是并不能衡量柴油机的经济性如何; 因为还必须要看消耗一定量的燃油时输出功率的大小。对于柴油机的经济性能指标, 通常是以有效功率 N_e 去除燃料消耗量 G_T 得出每马力、每小时所消耗的燃料重量来表示的。它叫做燃油消耗率 g_e , 简称耗油率, 单位是克/马力小时。

小时耗油量 G_T 可通过测定消耗一定量的燃油所用的时间, 然后经计算求得。如在时间 t 秒钟内, 消耗了柴油 m 克, 则:

$$G_T = \frac{m \times 3600}{t \times 1000} = 3.6 \times \frac{m}{t} \quad (\text{公斤/小时}) \quad (1-18)$$

在测得小时耗油量后, 若已知在上述测量工况下, 柴油机输出的有效功率为 N_e 马力。则耗油率 g_e 可以通过下式计算求出:

$$g_e = \frac{G_T \times 1000}{N_e} = \frac{3.6m}{N_e t} \times 1000 = \frac{3600m}{N_e t} \quad (\text{克/马力小时}) \quad (1-19)$$

三、机械效率 η_m 和有效热效率 η_m

1. 机械效率 η_m