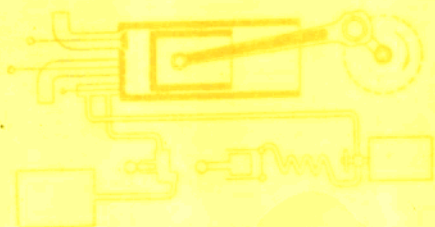


小型柴油机性能提高方法

杨建华 袁文华 编著



中国科学技术出版社

前 言

柴油机是各种机动车辆、农、林、牧、渔业机械和船舶、军工、石油、地质等工程机械的主要配套动力，在国民经济建设中有着重要作用。然而，面对柴油机在市场上的激烈竞争，如何提高柴油机性能，开发出高性能，高寿命、低成本的一代小型柴油机，以满足可靠、耐久、节能和环保的需要，已成为内燃机工作者的共同愿望。作者根据多年从事内燃机教学、科研和产品开发过程中积累的一些经验、资料编写成此书，供同行参考。

本书系统地介绍了柴油机的基本理论，重点阐述了提高柴油机性能指标的各项技术措施，反映了国内外的最新研究概况。

本书第一至六章由杨建华撰写，第七、八章由袁文华撰写。

本书由湖南大学杨连生教授主审，并担任一、三、四、六章的审稿工作，上海工程技术大学葛贤康教授担任第二、五章，湖南大学龚今科副教授担任第七、八章的审稿工作。同时得到了湖南省教育委员会、湖南省科学技术协会等单位和欧阳水格、姚仲鹏、张春宇、罗会兰、刘菊春、唐维新、钱关民、杨坚、谷益华、何志强、熊斌等同志的大力支持，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，恳请读者不吝指正。

作 者

主要符号

- a —— 声速, m/s
- a_s —— 进气门座处的气流声速, m/s
- C_m —— 活塞平均速度, m/s
- C_p —— 气缸内工质的定压摩尔比热, kJ/kmol · K
- C_{p_a} —— 空气的定压摩尔比热, kJ/kmol · K
- C_v —— 气缸内工质的定容摩尔比热, kJ/kmol · K
- D —— 气缸直径, mm
- d_{32} —— 油粒平均直径, μm
- d_p —— 柱塞直径, mm
- d_v —— 出油阀直径, mm
- d_s —— 喷孔直径, mm
- G_j —— 小时燃油消耗量, kg/h
- g_b —— 循环喷油量, g/cyc
- g_r —— 燃油消耗率, g/(kW · h)
- g_i —— 指示燃油消耗率, g/(kW · h)
- g_N —— 质量功率比, kg/kW
- H_u —— 燃油低热值, kJ/kg
- i —— 气缸数目, 个
- k —— 绝热指数
- L —— 喷注贯穿距离, m
- M_1 —— 燃烧前的工质摩尔数, kmol
- n —— 柴油机转速, r/min
- n_b —— 标定转速, r/min

- n_m —— 最大扭矩转速, r/min
 n_p —— 凸轮轴轮转速, r/min
 P_e —— 有效功率, kW
 P_b —— 标定功率, kW
 P_i —— 指示功率, kW
 P_L —— 升功率, kW/L
 P_m —— 机械损失功率, kW
 P_v —— 单位体积功率, kW/m³
 p —— 气缸内工质压力, MPa
 p_a —— 进气终点压力, MPa
 p_c —— 压缩终点压力, MPa
 p_e —— 平均有效压力, MPa
 p_i —— 平均指示压力, MPa
 p_m —— 平均机械损失压力, MPa
 p_r —— 残余废气压力, MPa
 p_r' —— 排气管内气体压力, MPa
 p_i' —— 进气管内气体压力, MPa
 p_{m1} —— 进气过程气缸内工质的平均压力, MPa
 p_l —— 理论平均指示压力, MPa
 p_c —— 最高燃烧压力, MPa
 R —— 通用气体常数, $R=8314.3\text{J/kgmol}\cdot\text{K}$; 排气烟度, BSU
 S —— 活塞行程, mm
 T —— 气缸内工质温度, K
 T_q —— 扭矩, N·m
 T_{qb} —— 标定工况时的扭矩, N·m
 T_w —— 气缸周壁温度, K
 t —— 时间, s

- V_a —— 压缩始点容积, m^3
 V_b —— 膨胀终点容积, m^3
 V_c —— 压缩终点容积, m^3
 V_h —— 气缸工作容积, m^3 或 l
 V_e —— 加热终点容积, m^3
 V_m —— 进气门座处气流的平均速度, m/s
 W_e —— 有效功, J
 W_i —— 指示功, J
 W_m —— 机械损失功, J
 Z —— 进气马赫数
 α —— 过量空气系数
 α_c —— 接触换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 β —— 喷雾锥角, ($^\circ$); 压缩系数
 δ —— 后期膨胀比
 ϵ —— 压缩比
 ϵ_e —— 有效压缩比
 η —— 有效效率
 η_i —— 指示热效率
 η_m —— 机械效率
 η_i —— 理想循环热效率
 η_v —— 充量系数
 θ —— 喷油提前角
 λ —— 连杆比
 λ_p —— 压力升高比
 μ —— 实际分子变化系数
 μ_e —— 排气门流量系数
 μ_i —— 进气门流量系数
 ξ —— 排气道流动阻力系数

- ξ —— 进气道流动阻力系数
- ρ —— 密度, kg/m^3 ; 初期膨胀比
- ρ_a —— 空气密度, kg/m^3
- ρ_e —— 废气密度, kg/m^3
- ρ_f —— 燃油密度, kg/m^3
- ρ_i —— 进气管内空气密度, kg/m^3
- τ —— 冲程数, 二冲程柴油机 $\tau=2$, 四冲程柴油机 $\tau=4$
- φ —— 曲轴转角, $^\circ\text{CA}$
- φ_r —— 转速储备系数
- φ_{tr} —— 扭矩储备系数
- ω —— 曲轴旋转角速度, i/s

目 录

第一章 柴油机性能指标与研究方法	(1)
第一节 柴油机的性能指标.....	(1)
第二节 两个重要参数.....	(20)
第三节 柴油机性能的影响因素与研究方法.....	(22)
第四节 新一代小型柴油机的开发.....	(25)
参考文献.....	(32)
第二章 柴油机的热力循环分析	(34)
第一节 柴油机的理想循环.....	(34)
第二节 实际循环的工质变化.....	(39)
第三节 柴油机的传热损失.....	(41)
第四节 柴油机的换气损失.....	(51)
第五节 时间、燃烧与流动损失.....	(64)
参考文献.....	(66)
第三章 小型柴油机的机械损失	(68)
第一节 引言.....	(68)
第二节 机械损失的组成及其计算.....	(69)
第三节 减少机械损失提高机械效率的措施.....	(74)
第四节 机械损失功率的测定.....	(90)
参考文献.....	(95)
第四章 提高充量系数的方法	(98)
第一节 四冲程柴油机充量系数的分析式.....	(99)
第二节 影响充量系数的因素分析.....	(101)
第三节 提高充量系数的措施.....	(109)
第四节 四冲程柴油机充量系数测定.....	(125)

参考文献.....	(126)
第五章 柴油机燃烧及其控制.....	(128)
第一节 柴油机的燃烧过程.....	(128)
第二节 柴油机的燃油喷射过程.....	(143)
第三节 空气运动规律分析.....	
第四节 深盆形燃烧室.....	
第五节 涡流燃烧室.....	
参考文献.....	
第六章 柴油机的冷起动性能分析.....	
第一节 影响冷起动性能的因素.....	
第二节 提高冷起动性能的辅助措施.....	
第三节 利用起动孔改善涡流室柴油机的冷起动性能.....	(226)
参考文献.....	(231)
第七章 柴油机排放污染物与噪声.....	(233)
第一节 柴油机排放污染物的产生.....	(234)
第二节 降低排放污染物的措施.....	(243)
第三节 柴油机噪声的产生及控制.....	(254)
参考文献.....	(265)
第八章 柴油机特性.....	(268)
第一节 负荷特性.....	(268)
第二节 速度特性.....	(270)
第三节 万有特性.....	(272)
第四节 调速特性.....	(274)
参考文献.....	(277)

第一章 柴油机性能指标与研究方法

第一节 柴油机的性能指标

柴油机性能指标主要有动力性指标、经济性指标、结构完善性指标、强化性指标、运转性能指标、可靠性指标、耐久性指标、适应性指标和工艺性指标。本节主要介绍柴油机各项性能指标的定义、表示方法及其相互关系

一、动力性指标与经济性指标

动力性指标与经济性指标又有指示指标与有效指标之分。指示指标是以工质对活塞做功为基础的指标，它是表示柴油机气缸工作容积利用程度的一组参数；有效指标是以功率输出轴输出功率为基础的指标，它是在指示指标的基础上再计及从活塞顶到功率输出轴端的功率传递过程中的一系列机械损失与驱动附属机构的能量损耗，也就是柴油机铭牌上所标定的指标。二者之差表征了柴油机结构设计、制造工艺水平与附属机构效率的高低。

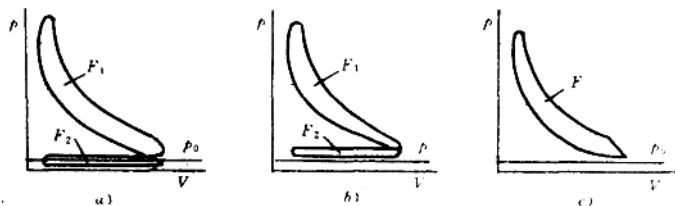
1. 指示指标

指示指标主要有指示功、平均指示压力、指示功率、指示热效率与指示燃油消耗率。

(1) 指示功 W_i

W_i 是指柴油机一个工作循环中气缸内工质所作的功。可由 $p-V$ 示功图中闭合曲线所占有的面积 F_i 来确定。

图 1-1 分别示出了四冲程非增压与增压及二冲程柴油机的 $p-V$ 示功图。可见，四冲程柴油机示功图有由压缩、膨胀行程所围成的有用功（高压示功图）面积 F_i 和由进气、排气行程所围成



a) 四冲程非增压柴油机 b) 四冲程增压柴油机 c) 二冲程柴油机

图 1-1 柴油机的 $p-V$ 示功图

的换气功(低压示功图)面积 F_2 两个闭合面积。其中四冲程非增压柴油机进气压力低于排气压力, 换气功为负值, 即 $F_2 < 0$; 而四冲程增压柴油机中的进气压力大于排气压力, 其换气过程中工质是对外作功的, 即换气功为正值, $F_2 > 0$ 。换气功不论是正功还是负功, 本应计算在指示功之内, 亦即指示功面积 F_i 应等于有用功面积 F_1 与换气功面积 F_2 的代数和。然而, 由于现代常规的测试仪器很难将换气功单独分离出来, 习惯上将换气功作为机械损失的一部分。因此, 指示功只按高压示功图面积 F_1 来确定。至于二冲程柴油机, 一个工作循环只有两个活塞行程, 示功图只能形成一个闭合面积 F_i , 它就代表了指示功的大小。

用求积仪或计算方法求出示功图指示功面积 F_i 后, 便可按下式计算出指示功 W_i 值。

$$W_i = abF_i \quad \text{N} \cdot \text{m} \text{ 或 } \text{J} \quad (1-1)$$

式中 F_i ——示功图的示功面积, cm^2 ;

a ——示功图纵坐标比例尺, MPa/cm ;

b ——示功图横坐标比例尺, cm^3/cm 。

多缸柴油机的指标功为上述 W_i 值乘以气缸数目(个)。

指示功虽然反映了柴油机气缸中工作循环获得有用功的数量, 但是它除了与工作循环中热功转换的有效程度有关外, 还要受到气缸工作容积的影响。为了比较不同气缸工作容积的柴油机,

其工作循环中热功转换的有效程度,通常用平均指示压力来评价。

(2) 平均指示压力 p_i

p_i 是指单位气缸工作容积所作的指示功。

即

$$p_i = \frac{W_i}{V_h} \quad \text{MPa} \quad (1-2)$$

式中 W_i ——指示功, J (KJ);

V_h ——气缸工作容积, cm^3 (L)。

上式又可写成

$$W_i = p_i V_h = \frac{\pi}{4} D^2 p_i S$$

式中 D ——气缸直径;

S ——活塞行程。

可见,平均指示压力是一个假设的恒定不变的压力,这个压力作用在活塞顶上,活塞承受该压力的面积为 $\pi D^2/4$,推动活塞移动一个行程的距离 S 时,所做的功等于循环指示功 W_i 。这就是 p_i 被称为平均指示压力的缘故。

平均指示压力是从实际循环的角度来评价柴油机气缸工作容积利用率的一个重要参数,在相同气缸工作容积的柴油机中,若平均指示压力越高,则发出的指示功就越大,气缸工作容积的利用率也就越高。目前小型四冲程柴油机,在标定工况下的平均指示压力通常在 $0.60 \sim 0.95 \text{MPa}$ 范围内。

(3) 指示功率 P_i

柴油机在单位时间内所作的指示功称为指示功率 P_i 。即

$$P_i = \frac{W_i}{t} \quad \text{J/s}$$

式中 $W_i = p_i V_h G$ (G 为气缸数目) 是一个工作循环内所作的指示功。若柴油机转速为 n (r/min), 引入冲程数 c , 对于二冲程机 $c=2$, 四冲程机 $c=4$, 则每秒钟柴油机进行了 $2n/c$ ($60n/c$) 个循环, 即一个循环所占的时间 $t = 30c/n$ (s), 代入上式得到指示功率的表

达式为

$$P_i = \frac{p_i i V_k n}{30\tau} \quad \text{kW} \quad (1-3)$$

式中 p_i ——平均指示压力, MPa

i ——气缸数目, (个);

V_k ——气缸工作容积, L;

n ——转速, r/min;

τ ——冲程数。

(4) 指示热效率 η_i

η_i 是指燃油所含的热能在柴油机中转变为指示功的份额。即

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_i} \quad (1-4)$$

式中 Q_i ——得到指示功 W_i 所消耗的热量, J。

当测得柴油机的指示功率 P_i 与小时燃油消耗量 G_f 以后, 应用 $1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^3 \text{kJ}$, 便可按下式确定指示效率:

$$\eta_i = 3.6 \times 10^3 P_i / (G_f H_u) \quad (1-5)$$

式中 G_f ——柴油机每小时消耗的燃油量, kg/h;

H_u ——所用燃油的低热值, 轻柴油取 $H_u = 42700 \text{kJ/kg}$

(5) 指示燃油消耗率 g_i

g_i 是指每小时单位指示功率 P_i 消耗的燃油量。即

$$g_i = 10^3 G_f / P_i \quad \text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (1-6)$$

利用式 (1-5) 与式 (1-6) 的关系有

$$\eta_i = 3.6 \times 10^6 / (g_i H_u) \quad (1-7)$$

对于轻柴油 $H_u = 42700 \text{kJ/kg}$ 代入上式有

$$g_i = 84.3 / \eta_i \quad (1-8)$$

目前小型四冲程柴油机的指示热效率一般在 0.42~0.48 范围之间, 指示燃油消耗率一般在 175~210g/(kW·h) 的范围之间。

2. 有效指标

有效指标主要有有效功率、扭矩、平均有效压力、有效热效

率与燃油消耗率。

(1) 有效功率 P_e 与标定功率 P_n

P_e 是指指示功率 P_i 减去机械损失功率 P_m 后所剩的功率，即输出功率。消耗于柴油机零件的摩擦损失、换气损失和驱动附件损失的功率称为机械损失功率 P_m 。则

$$P_e = P_i - P_m \quad \text{kW} \quad (1-9)$$

P_n 是制造厂为柴油机标定的有效功率。按用途和使用特点及在标定转速下允许连续运转的时间，国家标准 GB1105.1-87 中规定的标定功率有以下四种^{[1][2]}：

15 分钟功率：指在标准环境条件下，内燃机在标定转速下能连续运转 15 分钟的最大有效功率。适用于汽车、摩托车、摩托车艇内燃机的功率标定。

1 小时功率：指在标准环境条件下，内燃机在标定转速下能连续运转 1 小时的最大有效功率。适用于拖拉机、工程机械、内燃机车、船舶等内燃机的功率标定。

12 小时功率：指在标准环境条件下，内燃机在标定转速下能连续运转 12 小时的最大有效功率。适用于农业拖拉机、农业排灌、内燃机车、内河船舶等内燃机的功率标定。

持续功率：指在标准环境条件下，内燃机在标定转速下能长期连续运转的最大有效功率。适用于船舶、电站、农业排灌等内燃机的功率标定。

以上所说的标准环境条件是：大气压为 100kPa，相对湿度为 30%，环境温度为 25℃^[2]。

制造厂应根据使用特点在内燃机产品铭牌上标明其中 1~2 种标定功率。

(2) 机械效率 η_m

有效功率与指示功率的比值称为柴油机的机械效率 η_m 。即

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} = \frac{P_i - P_m}{P_i} = 1 - \frac{P_m}{P_i} \quad (1-10)$$

机械效率的高低反映了柴油机结构设计、加工工艺、装配质量水平与附件效率的高低，是影响柴油机动力性、经济性与耐久性能好坏的一个重要因素。因此，在提高柴油机性能的研究中，首先应设法提高机械效率。

(3) 扭矩 T_q

T_q 是柴油机功率输出轴输出的平均扭矩。应用 $P_e = W_e/t$ (J/s), $W_e = T_q \theta$, 当转速为 n (r/min) 时，每分钟转过的角位移 $\theta = 2\pi n$ 弧度，则有效功率 P_e 与扭矩 T_q 的关系式为

$$P_e = \frac{T_q \cdot 2\pi n}{60} \times 10^{-3} = \frac{T_q n}{9550} \quad \text{kW} \quad (1-11)$$

式中 T_q ——扭矩，N·m。

可见，扭矩越大，则柴油机曲轴每旋转一转所作的功就越大，亦即每循环所作的功也就越多，所以扭矩的大小也就反映了柴油机每循环做功强度的高低。

对于汽车、工程机械用柴油机来说，最大扭矩是表示柴油机牵引性能的一个主要指标。在相同的标定工况下，最大扭矩越大越好，最大扭矩时的转速越低越好。全负荷速度特性曲线的扭矩储备率 φ_{pb} 按下式计算

$$\varphi_{pb} = \frac{T_{qmax} - T_{qb}}{T_{qb}} \quad (1-12)$$

式中 T_{qmax} ——标定工况速度特性的最大扭矩，kN·m；

T_{qb} ——标定功率时的扭矩，kN·m。

扭矩储备率越大，表示柴油机的扭矩特性越好，也就是柴油机适应外界阻力变化的能力越强。亦可以减少车辆的换挡次数，减轻驾驶员的疲劳。对于车用柴油机 φ_{pb} 应大于 10%。

柴油机标定转速 n_b 与最大扭矩转速 n_m 的比值称为转速储备系数 φ_n 。即

$$\varphi_n = \frac{n_b}{n_m} \quad (1-13)$$

对于车用柴油机要求 $\varphi_n \leq 70\%$ ，拖拉机及工程机械 $\varphi_n \leq 80\%$ 。

转速储备系数 φ_n 是表示机械传动的车辆在某一排挡下的行驶速度与变化范围。 φ_n 值越大转速变化范围越广，即可减少变速箱的排挡数，简化结构。

对于工程机械、汽车、拖拉机用柴油机，扭矩储备系数与转速储备系数的乘积，表明了柴油机动力性对外界阻力变化的适应能力，其数值的大小与配气相应，燃油喷射系统以及增压情况等有关。现代车用柴油机的扭矩储备系数一般在 1.04~1.25 之间，转速储备系数一般在 1.1~2.2 左右。

(4) 平均有效压力 p_e 与平均机械损失压力 p_m

与平均指示压力 p_i 相似，平均有效压力 p_e 是指柴油机单位气缸工作容积所发出的有效功。它是从柴油机实际输出功率的角度来评价气缸工作容积利用程度的一个重要参数，也是标志着柴油机工作过程的有效性与制造技术完善性的一个重要指标。

平均机械损失压力 p_m 是单位气缸工作容积中所消耗的机械损失功。

依照上述定义，可像式 (1-3) 所表示的指示功率 P_i 与平均指示压力 p_i 之间的关系那样，分别列出 P_e 与 p_e 、 P_m 与 p_m 的关系式：

$$P_e = \frac{p_e i V_A n}{30\tau} \quad \text{kW} \quad (1-14)$$

$$P_m = \frac{p_m i V_A n}{30\tau} \quad \text{kW} \quad (1-15)$$

柴油机的工作负荷不同时，它的平均有效压力也不同。对比标定工况下柴油机的平均有效压力，便可揭示出各类柴油机工作强度的差异，对比平均机械损失压力便能评价柴油机设计与制造水平的高低。

应用式 (1-11) 与式 (1-14) 的恒等关系有

$$T_e = 318.3 p_e i V_A / r \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (1-16)$$

可见，对于一定排量 ($i V_A$) 的柴油机，平均有效压力 p_e 值反映了柴油机输出扭矩的大小，亦即 p_e 值的高低反映了单位气缸工

作容积输出扭矩的大小。

(5) 有效热效率 η_e

η_e 是指所消耗燃油中所含热能转变为有效功的份额。即

$$\eta_e = W_e / Q_1 = \eta_m W_i / Q_1 = \eta_m \eta_i \quad (1-17)$$

当测得柴油机的有效功率 P_e (kW) 与每小时燃油消耗量 G_f (kg/h) 后, 便可按下式计算有效热效率值。

$$\eta_e = 3.6 \times 10^3 P_e / (G_f H_u) \quad (1-18)$$

(6) 燃油消耗率 g_e

g_e 是指每小时单位有效功率消耗的燃油量。即

$$g_e = 10^3 G_f / P_e \quad \text{g/(kW} \cdot \text{h)} \quad (1-19)$$

应用式 (1-18) 有

$$g_e = 3.6 \times 10^6 / (\eta_e H_u) \quad \text{g/(kW} \cdot \text{h)} \quad (1-20)$$

可见, 有效热效率与燃油消耗率成反比, 有效热效率越高, 柴油机的工作经济性越好。目前小型四冲程非增压柴油机的有效热效率在 0.3~0.4 范围之间, 燃油消耗率在 210~280g/(kW·h) 范围之间。

二、结构完善性指标

主要有升功率、单位体积功率与质量功率比。

1. 升功率 P_L

P_L 是指柴油机在标定工况下, 气缸每升工作容积发出的有效功率。即

$$P_L = \frac{P_{eb}}{iV_h} = \frac{p_e n_e}{30\tau} \quad \text{kW/L} \quad (1-21)$$

式中 P_{eb} 、 n_e 、 p_e 分别为标定功率 (kW)、标定转速 (r/min) 与标定工况时的平均有效压力 (MPa), iV_h 为气缸工作总容积 (L); τ 为冲程数。

可见, 升功率综合反映了平均有效压力、转速与冲程数对柴油机性能的影响。是表征柴油机工作过程完善性、结构紧凑性与

外形尺寸大小的重要参数。当柴油机结构尺寸相同时，升功率越大，气缸工作容积的利用率越高，亦即强化程度越高；而有效功率相同时，若升功率越大，则气缸工作总容积越小，柴油机越紧凑，越轻巧。因此，柴油机发展趋势是不断提高升功率。现代小型四冲程柴油机的升功率一般在 $9\sim 20\text{kW/L}$ 范围内。

2. 单位体积功率 P_V

P_V 是指柴油机发出的标定功率 P_{ob} 与其外形尺寸（长×宽×高）所表示的体积 V 之比值。即

$$P_V = \frac{P_{ob}}{LBH} = \frac{iV_n}{V} \cdot \frac{P_{ob}}{iV_n} = KP_L \quad \text{kW/m}^3 \quad (1-22)$$

式中 L 、 B 、 H 、 V 分别为柴油机的最大长度、最大宽度、最大高度（m）与外廓体积（ m^3 ）， K 为总布置紧凑性系数（ L/m^3 ）。目前高速柴油机的 P_V 值大致在 $90\sim 350\text{kW/m}^3$ 范围内。

3. 质量功率比 g_N

g_N 是指柴油机净质量 m （kg）与标定功率 P_{ob} （kW）的比值。即。

$$g_N = \frac{m}{P_{ob}} \quad \text{kg/kW} \quad (1-23)$$

质量功率比是衡量柴油机强化程度与结构设计完善性的一个重要指标。降低质量功率比，可节约金属材料，减少制造成本。对于大批量生产的汽车、工程机械用柴油机来说减轻净质量意味着功率消耗的节约或有效载重量的增加，实际意义更为突出。因此，在结构设计时，应在不降低柴油机零件的刚度、保证强度的条件下，设法减轻净质量。如采用短连杆、短活塞、空心曲轴结构和设计尺寸小质量轻的新型附属机构等措施，都有利于减轻净质量。

另外，柴油机净质量的分析表明，铸件质量占总质量的 $60\%\sim 70\%$ ，因而减小铸件壁厚，不允许有多余的金属堆积，不受力零件可改用冲压件或工程塑料。采用轻合金、用金属模压铸机体、气缸盖、飞轮壳等零件，可大大减轻柴油机的净质量。不同用途柴油机的质量功率比应不大于表 1-1 的规定。