

柴油机设计手册

(下 册)

柴油机设计手册编辑委员会

中国农业机械出版社

《柴油机设计手册》共27章，分上、中、下三册出版。
下册主要内容是：第二十六章 单缸试验机，第二十七章 电算在柴
油机设计中的应用。

本手册主要供广大柴油机工作者查阅使用，也可供其他有关人员参考。

柴油机设计手册

下 册

柴油机设计手册编辑委员会

*

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
机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
新华书店经售

*

787×1092¹/₁₆ 开 33¹/₄ 印张 813 千字
1984年12月北京第一版·1984年12月北京第一次印刷
印数：00,001-7,250 定价：7.25 元
统一书号：15216·122

柴油机设计手册编辑委员会

主任委员 史绍熙

副主任委员 孙永平 张德庆 田广文

茅继庆 陆孝宽

委员 何学良 董金华 钱耀义 朱吉桥

编辑组 苗瀛 武善谋 宋初煜 朱敏学

范荣礼 钱耀义 郭耀泉 王懿铭

朱仙鼎 朱英杰 吴关昌

编辑说明

柴油机是国民经济和国防建设中获得广泛应用的一种主要动力机械。解放以来，我国的柴油机工业得到了蓬勃发展，取得了很大成就。柴油机工业的发展对我国实现四个现代化有着重要的意义。

为了进一步提高柴油机的技术水平和产品质量，适应柴油机工业发展的需要，我们总结了我国柴油机生产和研究中的经验，汲取国外的先进技术，编辑出版这部《柴油机设计手册》。

本手册着重概括中、高速柴油机设计的主要技术内容，包括专业理论，设计资料，计算方法以及有关技术的发展方向。内容力求简明实用，重点突出。本手册主要供中等以上文化水平的柴油机工作者查阅使用，也可供其他有关人员参考。

天津大学、上海内燃机研究所、上海柴油机厂，长春汽车研究所、吉林工业大学、天津动力机厂和洛阳拖拉机研究所组成编辑委员会，负责组织与领导手册的编辑工作。参加编写的单位还有（按章次排列）：铁道部科学研究院机车车辆研究所，山东工学院，天津内燃机研究所，西安交通大学，北京内燃机总厂，上海交通大学，无锡油泵油嘴厂，铁道部四方机车车辆厂，北京农业机械化学学院，无锡柴油机厂，五机部七〇研究所，复旦大学等。

在手册的编写过程中，得到许多工厂、科研单位和高等院校的大力支持，积极提供技术资料，参加审稿。其中参加主审工作的有五十余单位，在此一并表示衷心感谢。

鉴于水平有限，缺乏经验，手册中的缺点和错误在所难免，衷心希望读者在使用中继续审查验证、批评指正，以臻完善。使它为我国柴油机工业的进一步发展，为赶超世界先进水平、实现四个现代化发挥应有的作用。

柴油机设计手册编辑委员会

手册通用符号

A ——热功当量	N_i ——指示功率
a ——声速	N_K ——增压器压气机功率
活塞加速度	N_l ——升功率
B ——柴油机宽度	N_m ——机械损失功率
C_m ——活塞平均速度	N_s ——扫气泵功率
c_p ——定压比热	N_T ——增压器涡轮功率
c_{pa} ——空气定压比热	N_v ——单位体积功率
c_v ——定容比热	n ——柴油机转速
c_{va} ——空气定容比热	n_1 ——压缩多变指数
D ——气缸直径	n_2 ——膨胀多变指数
F_p ——活塞面积	n_p ——喷油泵转速
G ——流量(重量)	n_{TK} ——增压器转速
柴油机净重	p ——气缸压力
G_f ——燃油消耗量	p_0 ——环境压力
G_l ——机油消耗量	p_0' ——涡轮出口压力
G_s ——进气流量	p_a ——压缩始点气缸压力
g ——重力加速度	p_b ——膨胀终点气缸压力
g_e ——有效燃油消耗率	p_c ——压缩终点气缸压力
g_i ——指示燃油消耗率	p_e ——平均有效压力
g_l ——机油消耗率	p_i ——平均指示压力
g_N ——比重量	P_j ——往复惯性力
H ——柴油机高度	p_K ——增压压力
H_u ——燃料低热值	p_K' ——中冷器后压力
I ——转动惯量	P_N ——气缸侧压力
i ——焓	P_r ——离心惯性力
J ——惯性矩	p_s ——进气系统压力
k ——绝热指数	P_t ——作用在曲柄销上的切向力
K ——作用于曲柄销的径向力	p_r ——涡轮进口压力(增压)
L ——柴油机长度	排气管压力(非增压)
L_0 ——缸心距	p_z ——最高爆发压力
燃烧1公斤燃料理论所需空气量	R ——曲柄半径
l ——连杆长度	气体常数
M_1 ——进气充量公斤摩尔数	Re ——雷诺数
M_2 ——燃烧产物公斤摩尔数	S ——活塞行程
M_e ——柴油机扭矩	$T_0(t_0)$ ——环境温度
$M_{e,max}$ ——柴油机最大扭矩	$T_a(t_a)$ ——压缩始点温度
M_r ——残余废气公斤摩尔数	$T_b(t_b)$ ——膨胀终点温度
N_e ——有效功率	$T_c(t_c)$ ——压缩终点温度
N_p ——单位活塞面积功率	$T_K(t_K)$ ——增压空气温度

$T'_k(t'_k)$ ——中冷器后空气温度	η_k ——增压器压气机效率
T_r ——残余废气温度	η_m ——机械效率
$T_s(t_s)$ ——进气系统温度	η_s ——扫气效率
$T_T(t_T)$ ——涡轮前温度(增压) 排气温度(非增压)	η_T ——增压器涡轮效率
$T_z(t_z)$ ——最高燃烧温度	η_{TK} ——增压器总效率
U ——气体内能	η_v ——充量系数
v ——活塞速度(瞬时)	θ ——供油提前角
V_o ——压缩始点容积	θ_p ——供油持续角
V_c ——压缩终点容积	λ ——压力升高比
V_h ——气缸工作容积	曲柄半径与连杆长度之比
V_s ——气缸总容积	μ ——流量系数
x ——活塞位移	实际分子变更系数
相对湿度	μ_0 ——理论分子变更系数
Z ——气缸数	μ_{cp} ——气体定压摩尔比热
λ ——过量空气系数	μ_{cv} ——气体定容摩尔比热
曲轴转角	μ_m ——扭矩储备系数
α_s ——总过量空气系数	ξ ——热量利用系数
β ——连杆摆角	π_k ——增压压力比
γ ——空气重度	π_T ——涡轮膨胀比
γ_k ——增压空气重度	ρ ——初期膨胀比
γ_r ——残余废气系数	τ ——冲程数
δ ——后期膨胀比	τ_i ——滞燃期(s)
δ_1 ——瞬时调速率	φ ——进排气重叠角
δ_2 ——稳定调速率	φ_f ——示功图丰满系数
ϵ ——压缩比	φ_i ——滞燃期(°CA)
η_{adh} ——绝热压缩效率	φ_s ——扫气系数
η_e ——有效热效率	ψ ——转速波动率
η_i ——指示热效率	ω ——角速度
	$\dot{\omega}$ ——角加速度

目 录

第二十六章 单缸试验机	1	2. 框图和源程序	75
第一节 概述	1	3. 四冲程增压柴油机工作过程计算通 用源程序说明	97
第二节 单缸试验机结构设计要求 及典型结构	1	4. 计算实例	104
1. 单缸试验机设计要求	1	第二节 内燃机运动学、动力学、平衡 和曲轴疲劳强度计算	107
2. 单缸试验机的分类	4	1. 概况	107
3. 各种单缸机的特点和单缸机上典型 结构举例	4	2. 符号说明	107
第三节 单缸机试验室	11	3. 内燃机运动学、动力学	108
1. 试验室的一般要求	11	4. 示功图及其副缸示功图的换算	113
2. 试验室的布置及其他	12	5. 一排(星型)合成、连杆轴颈(L) 负荷	113
3. 测功器的选择	13	6. 整机合成、主轴颈(承)负荷	115
第四节 单缸试验机的试验	13	7. 曲轴疲劳强度计算	118
1. 单缸试验机的主要试验内容	13	8. 程序使用说明	118
2. 单缸机试验前的准备工作及其磨合 要求	13	9. 单排程序(719型电子计算机)	121
3. 单缸机的试验方法	14	10. 整机程序(719型电子计算机)	139
4. 单缸机试验中应注意的事项	17	第三节 柴油机放热规律计算	154
5. 单缸试验机燃烧系统的试验	18	1. 直喷式柴油机放热规律计算	156
6. 单缸试验机摩擦功的测定	43	2. 预燃式柴油机放热规律计算	169
7. 单缸机模拟增压试验	44	第四节 增压柴油机排气压力波 的计算	190
8. 单缸机试验数据的整理	53	1. 基本方程及其特征形式	190
9. 单缸机试验成果与多缸机的验证 问题	60	2. 特征方程的数值求解	195
第五节 有关多缸柴油机的试验 概要	61	3. 边界问题的概述	198
1. 一般要求	61	4. 气缸边界条件	200
2. 多缸机的性能试验	61	5. 涡轮边界条件	208
3. 多缸机耐久性可靠性试验	62	6. 分叉接头边界条件	210
参考文献	65	7. 计算步骤与计算框图	214
第二十七章 电算在柴油机设计中 的应用	67	8. 计算例子	226
第一节 四冲程增压柴油机工作过程 计算通用源程序	67	9. 排气压力波计算源程序	228
1. 计算的基本方法、方程式、边界 条件及一些问题的处理	67	第五节 轴系扭转振动计算	244
		1. 概述	244
		2. 系统运动微分方程式的建立	245
		3. 自由振动计算	247
		4. 强制振动计算	256
		5. 减振器计算	260

6. 程序使用说明及计算示例.....	262	1. 计算方法.....	365
第六节 用连续梁法计算柴油机曲轴		2. 程序的使用说明.....	376
的主轴承负荷	298	参考文献	400
1. 序言.....	298	第九节 柴油机配气机构计算	401
2. 计算模型及其假定条件.....	299	1. 多质量动力学计算程序.....	401
3. 曲柄当量刚度的转换.....	300	2. 多项动力凸轮计算程序.....	420
4. 多支点弹性支承连续梁支座弯矩方程		3. N 次谐波凸轮计算程序.....	430
的建立.....	302	参考文献	440
5. 计算步骤及电算方框图.....	306	第十节 用有限元素法计算柴油机零部件	
6. 电算程序的说明.....	309	的机械应力和热应力	441
7. 输入及输出标识符的说明.....	311	1. 连杆的应力分析.....	442
8. 柴油机轴承及轴颈负荷计算源程序		2. 曲轴的应力分析.....	455
(DJS-6型电子计算机)	314	3. 活塞和气缸盖的热应力分析.....	461
第七节 轴心轨迹计算	333	4. 附录.....	473
1. 汉氏法.....	334	参考文献	509
2. 荷氏法.....	350	第十一节 径流式增压器叶轮强度的	
第八节 柴油机燃油喷射过程计算	365	有限差分法计算	509

第二十六章 单缸试验机

七〇研究所 房金 于素兰

第一节 概 述

单缸试验机通常设计成特殊结构型式的单一气缸（有时为V型双缸或V型四缸）柴油机，它是探索新设计柴油机或改进现产品柴油机性能和结构参数的一个重要工具。要使柴油机的性能指标迅速达到预期要求，很大程度上取决于是否重视单缸机的试验研究工作。

在设计新柴油机或改进现产品柴油机过程中，用多缸机进行各项性能的调整和结构参数的比较试验，内容繁多、调整复杂、工作量大、试验周期长。如采用与多缸机同型的单缸试验机，则可简化调整过程，缩短调试周期，便于进行大量的结构参数的比较及性能调试。有的工厂和研究单位，还设计成各种万能单缸机，更便于各项参数的试验。

单缸试验机有如下优点：

1) 在单缸试验机上没有多缸机中各缸不均匀及各缸进排气相互干扰等的影响，因此试验精确，便于判断某一参数变化后引起的影响。

2) 试验中更换零部件的数量比多缸机少，易于进行多种方案选择试验，调整方便、试验进程快、周期短、费用低。

3) 在单缸试验机上，可便于柴油机非增压（或增压）燃烧系统的各项参数调整试验和某些零部件的机械负荷、热负荷的试验，此外，利用高速摄影可以观察柴油机气缸内的燃烧过程，改变缸径和行程可研究其最佳比值，还可以研究柴油机在很高的平均有效压力下工作的各种问题，以及其它专门性的试验等。

目前，有些单缸试验机正向高强化的领域试验，平均有效压力 p_e 达到 40 kgf/cm^2 、最高爆发压力 p_b 为 200 kgf/cm^2 左右。

第二节 单缸试验机结构设计要求及典型结构

1. 单缸试验机设计要求

除特殊要求的单缸机，单缸试验机上各零部件的结构参数，应尽量与多缸机相同。单缸机的一般设计要求如下：

1) 为使单缸机承受较大的负荷和转速（如超速超负荷），机体、曲轴等主要承力零件要牢固可靠。

2) 单缸机设计时，机体或曲轴箱上有关位置应考虑一些平面和凸台，以便安装各种试验装置和测试接头。机体设计时，应顾及不同缸径和行程皆可通用的结构型式。

3) 设计研究用单缸机时，应考虑到具有调整压缩比、配气定时、导气屏安装角、喷油

提前角、活塞冷却、活塞温度测量和连杆动应力测量等调节和测量装置。

4) 单缸机的曲轴、连杆、活塞、气缸盖、配气机构等零部件必须考虑拆装方便。

5) 考虑单缸机运转时的不稳定性, 需在曲轴输出端, 牢固地安装一个具有较大惯量的飞轮。为减小高压泵传递扭矩的峰值, 在高压泵传动端, 亦应装一个较大的飞轮。

为了减少往复惯性力所引起的振动, 需要安装平衡装置。若缸径较小(约在 130 mm 以下), 转速较低(约 1500 rpm 以下), 可不必安装平衡装置。但发动机基础应有减振措施。

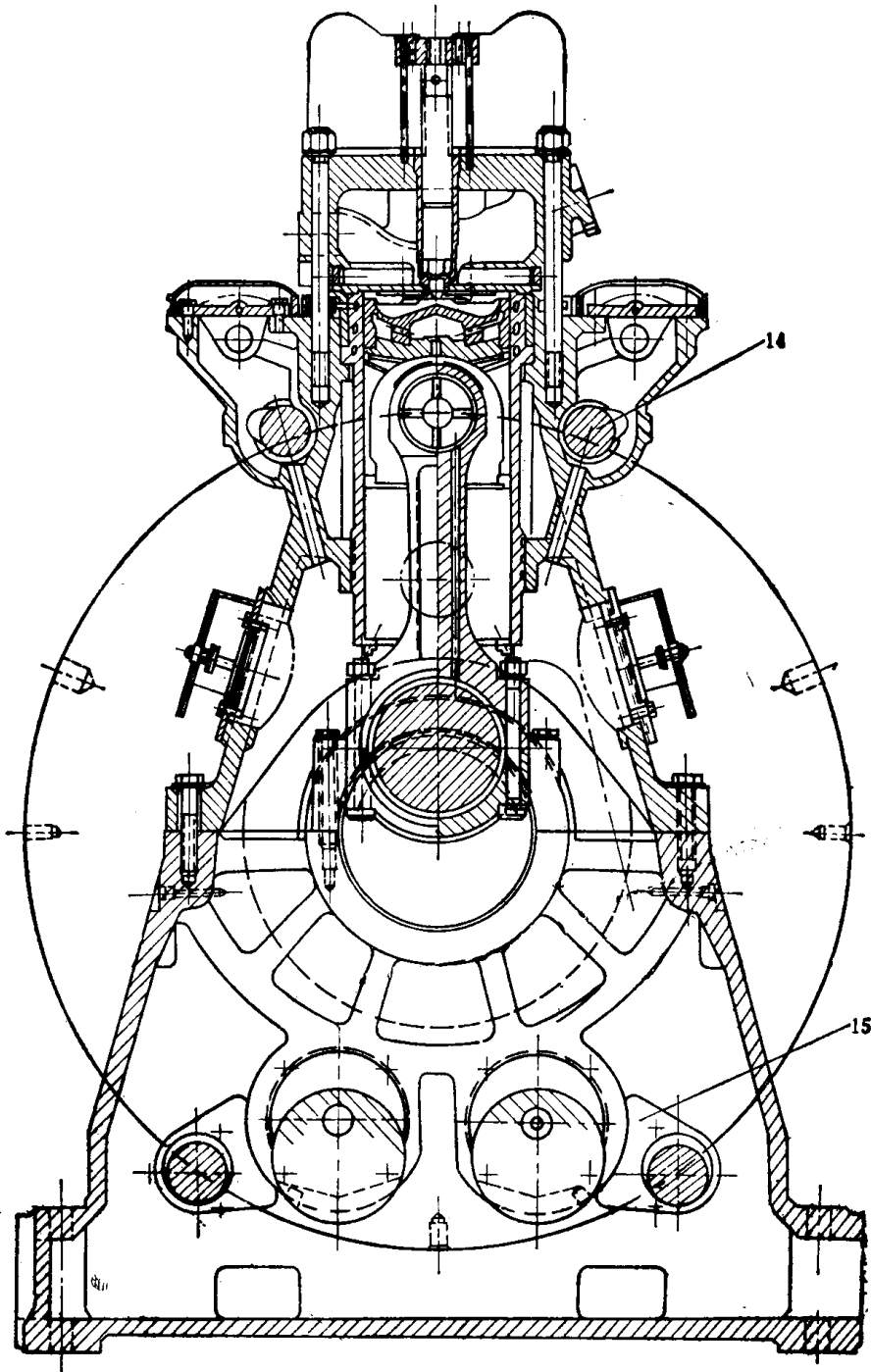


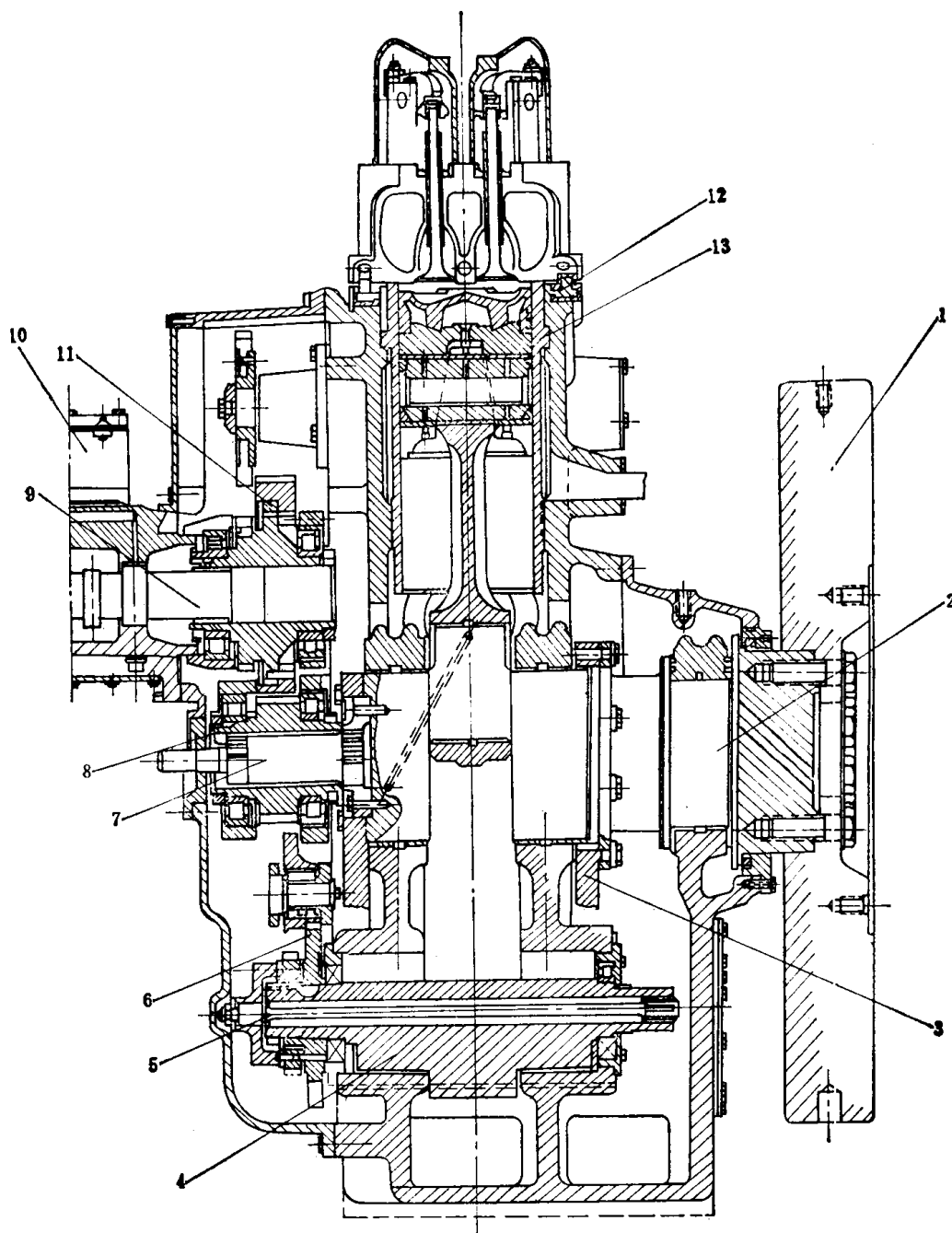
图26-1 “Atlas”单

1—飞轮 2—曲轴 3—回转平衡重 4—一级平衡重 5—挠性传动轴 6—平衡重传动齿轮 7—传
缸套冷却水集水圈 13—气缸套上端加固圈

6) 单缸机机体内应有足够的空间, 以便减小由于活塞往复运动时造成曲轴箱内气压的剧烈波动, 以减少泵吸损失。在机体侧面或上面应留有足够的通气口; 机体侧面应开有大的窗口, 便于安装和检查机体内的零件。

7) 合理布置气缸盖上各测量孔, 各孔应尽量接近燃烧室, 并且希望是较短的直孔, 因为拐弯的孔会使测量产生误差。

8) 曲轴的曲拐部分和连杆大头旋转不平衡力要加以平衡。



缸机纵横剖面图

动轴 8—定时齿轮 9—高压油泵凸轮轴 10—高压油泵 11—高压油泵传动齿轮 12—气
14—配气凸轮轴 15—二级平衡重

2. 单缸试验机的分类

单缸试验机类别 { 研究用单缸试验机。
产品用单缸试验机。
特种用途单缸试验机。

3. 各种单缸机的特点和单缸机上典型结构举例

一、典型单缸机

(一) 研究用的单缸试验机:

英国 Ricardo 研究所制成的“Atlas”高强度四冲程单缸试验机如图 26-1 所示。

主要设计参数如下:

缸径	216 mm
行程	241 mm
排量	8.85 l
转速	1500 rpm
活塞平均速度	12.1 m/s
最大功率	570 PS
平均有效压力	38.7 kgf/cm ²
最高爆发压力	210 kgf/cm ²

该单缸试验机的机体与机座均为铸铁件, 结构较坚固。曲轴有三档主轴承, 其中两档直径为 280mm, 靠飞轮端的一档为 240mm, 没有曲柄。曲柄销直径为 190 mm, 与曲轴主轴颈重叠为 114 mm, 这种曲轴坚固, 且刚性好。一级和二级往复惯性力均有平衡机构进行平衡。传动机构位于自由端。缸体两侧各有一根凸轮轴分别控制进排气门。机体两侧装有通气阀门。在气缸套上的定位肩膀上, 有一个热套配合的 100 mm 高的钢加固圈, 用以增加缸套上端的刚度。气缸盖用六个 28.6 mm 螺柱将缸套压紧在机体上。

高压油泵为 Bryce CC 型, 300 PS 以下可用一个, 大于 300 PS 则用两个。

冷却水泵和润滑油泵分别由电动机驱动。气缸套上端有切线方向的钻孔, 可使冷却水高速强制流入顶端的集水圈, 由此再通过八个水孔进入气缸盖。

奥地利 List 研究所 (AVL) 520 型单缸试验机, 如图 26-2 所示。

主要设计参数如下:

缸径	120 mm
行程	120 mm
排量	1.357 l
平均有效压力	3000 rpm 时为 15 kgf/cm ²
最高爆发压力	150 kgf/cm ²
标定转速	3000 rpm
外形尺寸 (长×宽×高)	860×950×1150 mm
重量	750 kgf/(干重)。

设计与控制设备:

由球墨铸铁制成隧道式曲轴箱，有足够的刚性，所有外表面都精加工。气缸盖上有两个气门，通过气缸体上支承的凸轮轴传动。凸轮轴与凸轮的相互位置是可以调整的。

曲轴是用调质钢制造。为了适合 4000 rpm 的转速，其飞轮用锻钢制造。两根平衡轴平衡一级惯性力。气缸盖和气缸体采用开式冷却水循环。

喷油泵为四缸 P₄ 型波许喷油泵。可以安装不同直径的柱塞和不同外型轮廓的凸轮轴，试验研究很方便。

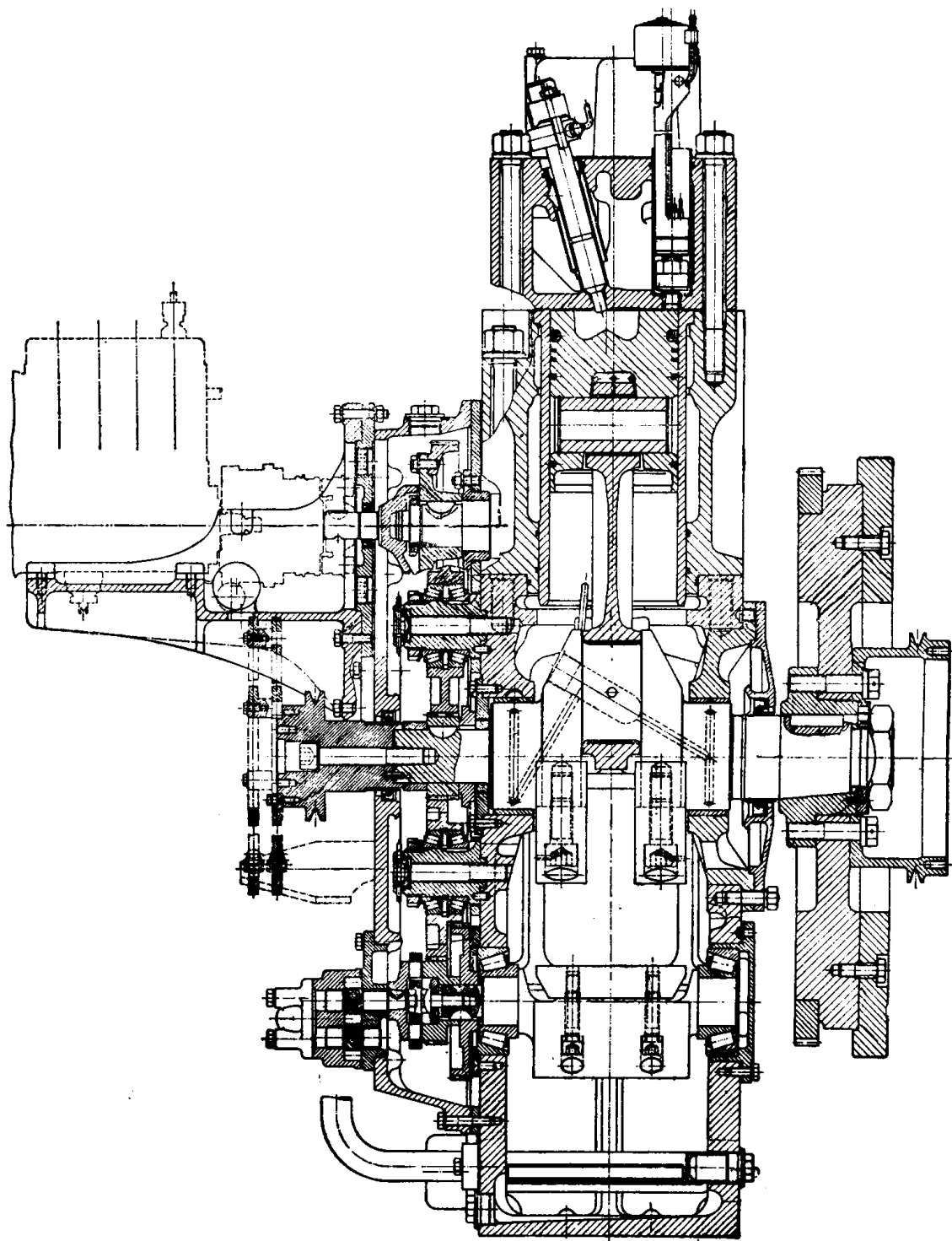


图26-2 520型单缸试验机

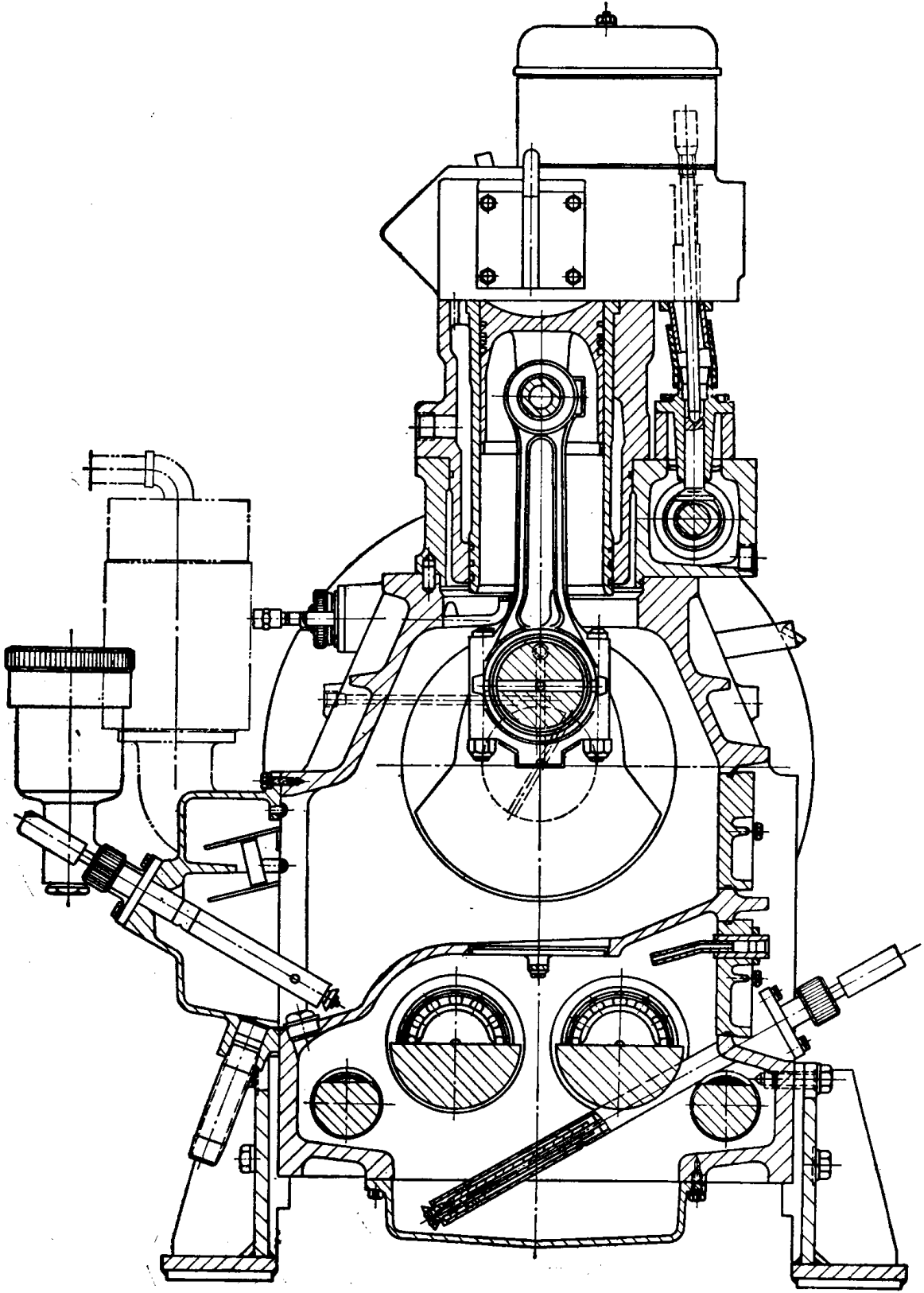
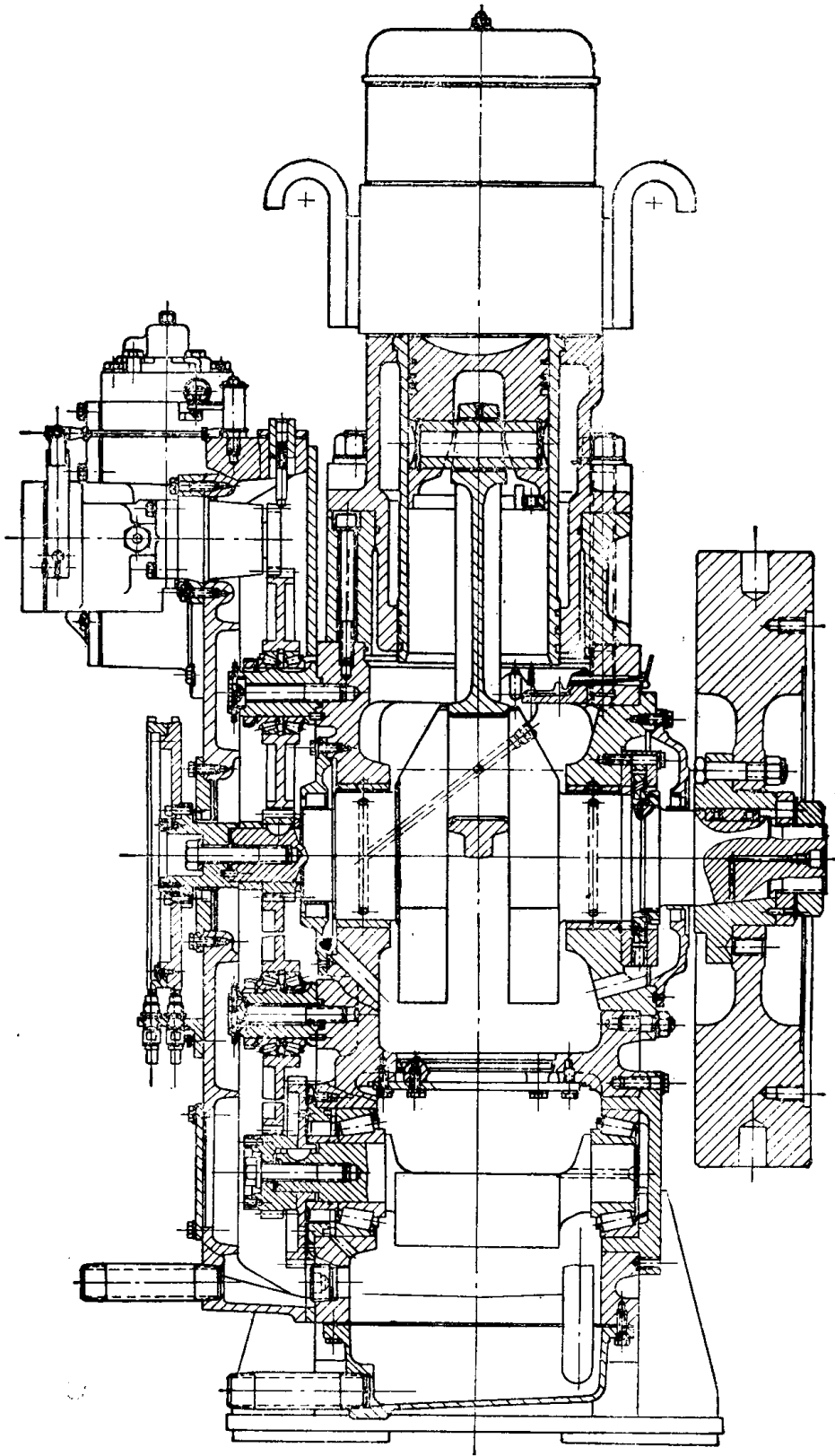


图26-3 “LEF”单缸



试验机纵横剖面

标准装置:

有机油泵、机油冷却器、自动温度调节装置。有带调速器的四气缸用 P₄ 型波许泵。手动喷油调节装置、一级惯性力平衡机构。水泵、四 PS 起动电机 (12 V)、曲轴转角信号发生器。两个活塞油冷喷嘴。在曲轴箱上有通气阀门装置。

测量点

除了通常的温度和压力测量点外,在气缸盖上有两个位置可插入压力传感器。一个位于活塞燃烧室区域,为高压传感器(燃烧室压力)。另一个位于接近气缸边缘,可安装高压传感器(燃烧室压力)或低压传感器(换气压力)。在排气管上安装低压传感器,以测取排气压力。

为确定气缸瞬时压力和活塞位置(曲轴转角)的关系,在曲轴前端安装有曲轴转角信号和触发示波器的触发环。

(二) 产品用的单缸试验机

产品用单缸试验机,主要是解决产品中存在的有关问题或为其性能指标进一步提高而设计的。故在设计中除满足单缸试验机的设计要求外,其它结构参数应和多缸机产品相同。

(三) 特种用途的单缸试验机

奥地利 List 研究所“LEF”单缸试验机,如图 26-3 所示。

该种单缸机是为研究润滑油和燃料油及放射物等多种用途的单缸机。其上部为美国 Caterpillar 公司“1Y73”单缸机的结构。其它结构是在“1Y73”单缸机基础上改进设计的。其缸径为 130 mm,行程为 165 mm。

设计结构特点:为缩短研究试验周期,减少油料的消耗,将试验机油腔分开。在每一试验腔最低处都装有充油油标和抽油油头。

其它结构:曲轴箱为隧道式、整体球墨铸铁曲轴箱,侧

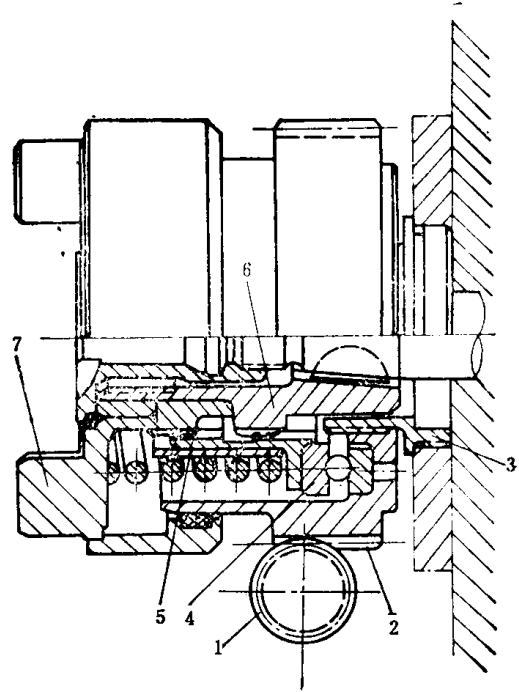


图26-4 手动喷油调节装置

1—蜗杆 2—蜗轮 3—螺纹套 4—止推轴承
5—内齿圈 6—外齿圈 7—供油泵轴

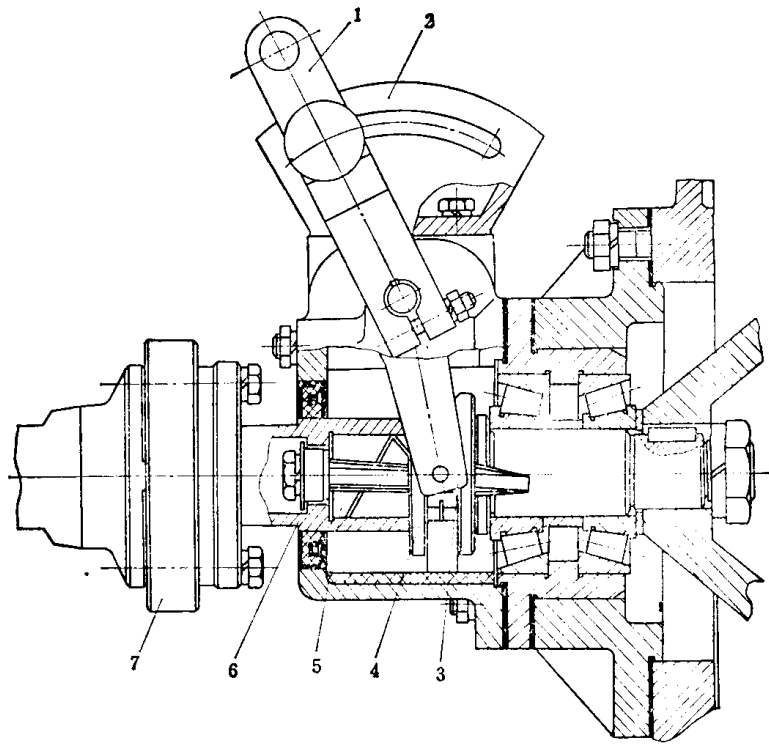


图26-5 手动喷油调节装置

1—手柄 2—刻度板 3—拨叉 4—滑键套 5—驱动轴
6—从动轴 7—供油泵连接盘

面有大小不同的窗口，便于拆装检查箱体内的各机件。曲轴后端固定一个特殊法兰盘，用于曲轴轴向止推。借助油压的作用拆卸飞轮。

该单缸机缸径较小，为减轻振动，装有一、二级惯性力平衡装置。

该单缸机还有一些测量装置：曲轴一端装有曲轴转角的触发器。上曲轴箱孔内侧装有活塞温度测量装置。

二、单缸机上典型结构

(一) 手动喷油提前调节装置

图 26-4 所示为奥地利 List 研究所 520 型单缸试验机上用的手动喷油调节装置。

动作原理：转动蜗杆 1，带动蜗轮 2 在螺纹套 3 上旋转产生位移，推动止推轴承 4，使此移动变为内齿圈 5（此部分为斜齿啮合）与外齿圈 6 的相互转动，从而带动供油泵轴 7 的转动，达到喷油调节的目的。

图 26-5 所示为一种单缸试验机上采用的手动喷油调节装置。

动作原理：手柄 1 在刻度板 2 上移动，带动拨叉 3，拨动滑键套 4 上的两个内凸键在驱动轴 5 上的斜槽中做轴向直线移动，此移动促使驱动轴转动，带动从动轴 6 与供油泵连接盘 7 的转动达到喷油调节的目的。

图 26-6 所示为另一种单缸机上采用的手动喷油调节装置。

动作原理：蜗杆 1 转动带动半蜗轮圈 2 与供油泵支架 3 的摆动，从而使供油泵沿着凸轮轴轴心转动一定角度，达到喷油调节的目的。

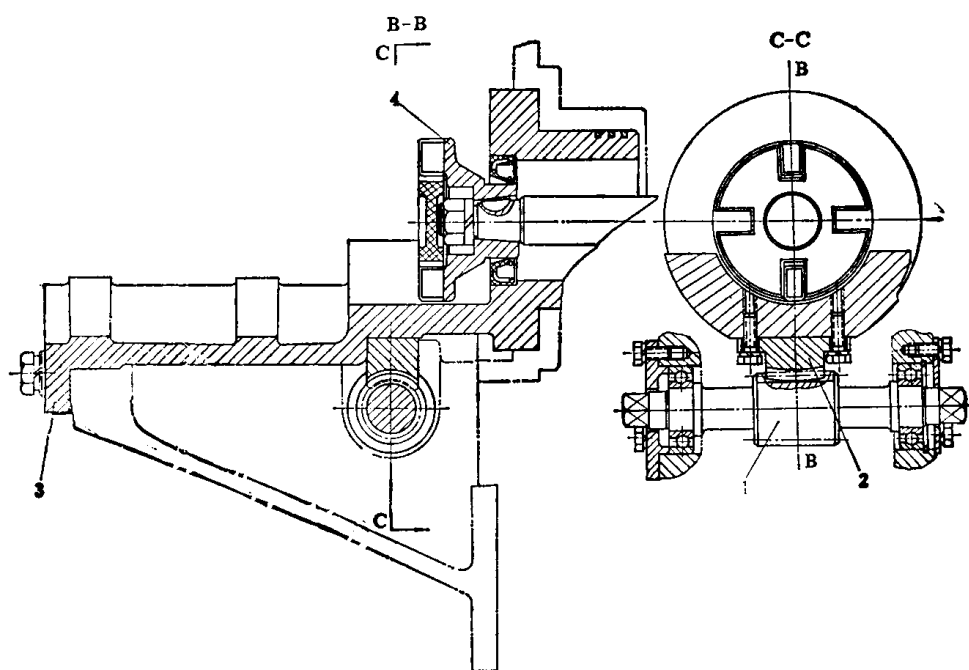


图26-6 手动喷油调节装置

1—蜗杆 2—半蜗轮圈 3—供油泵固定支架 4—供油泵连接盘

(二) 手动配气相位调节装置

图 26-7 所示为手动配气相位调节装置。

调节顺序：转动螺杆使拨柄移动，此移动促使一对斜齿轮相对转动，从而达到调节的目的。