

柴油机的供油  
与燃油雾化

国防工业出版社

# 柴油机的供油与燃油雾化

〔苏〕И.В.阿斯达赫夫等 著

米鹤颐 译 唐后启 校

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书讨论了柴油机中燃油喷射和雾化过程的流体动力学和各种燃油系统有关这些过程的计算方法。书中引用计算-实验资料来说明燃油系统工作的特点和喷油过程对柴油机工作过程的影响。讨论了燃油系统的近似计算方法及它们的某些发展前景。介绍了燃油系统的分类并简要叙述了某些最新的结构。本书可供工程技术人员和实际科研工作者参考。

Подача и распыливание топлива в дизелях

И. В. Астахов, В. И. Трусов,

А. С. Хачиян и др. М.

《Машиностроение》1972

\*

### 柴油机的供油与燃油雾化

〔苏〕И. В. 阿斯达赫夫等 著

米鹤颐 译 唐后启 校

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张11<sup>5</sup>/<sub>8</sub> 296千字

1977年7月第一版 1977年7月第一次印刷 印数：00,001—14,300册

统一书号：15034·1537 定价：1.45元

## 出版者的话

随着我国社会主义建设的蓬勃发展，柴油机在工农业生产、交通运输和国防建设中的应用也更加广泛。现代柴油机不断向高速强载、提高寿命和改进经济性的方向发展。因此深入探索与柴油机燃烧过程密切有关的供油系统和混合气形成的内在规律特别受到重视。

苏联 И. В. 阿斯达赫夫等所著的《柴油机的供油和燃油雾化》一书从管道冲击理论出发，综述了各型燃油系统的近似计算方法；阐述了柴油机喷油过程的各种影响因素，介绍了燃油雾化理论和燃油系统设计及其参数选择的方法并对所提供的计算和试验结果作了一些分析。由于本书将喷射过程的近似计算和柴油机的性能实验、燃油系统的实测数据汇集在一起，有利于分析柴油机的燃烧问题，因此本书对从事于柴油机燃油系统设计和研究工作有一定的参考价值。

本书虽有以上一些可取之处，但由于作者从资产阶级唯心主义的世界观出发，看不见广大劳动人民和其它各国劳动人民、科技人员在柴油机制造和理论发展方面的成就和贡献，而把一切功劳归于“苏联学者的努力”，这是不符合实际的；其次，作者在烦琐哲学和保守思想的支配下，对许多先进技术不仅不予重视，如对电子计算机在燃油系统计算中的应用介绍得过于简单，相反，对费时费事烦琐冗长的手算方法则不厌其烦的加以介绍。再次，对于近代柴油机燃油系统中的新结构和各种影响因素，文中亦未涉及，因此本书的取材显得有些陈旧。最后，书中所联系的一些实际柴油机燃油系统的试验研究，也是理论脱离实际的，因为文中内容并没有提供燃油系统的计算实例，缺少计算与试验数据的

详细分析，缺少对实际柴油机性能影响的分析等。

遵照伟大领袖毛主席的“洋为中用”以及“对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化”的教导，我们将本书翻译出版，供广大读者参考，并在阅读时对书中内容要批判地接受，取其精华，弃其糟粕。

由于原书的审校及印刷质量较差，错误较多，中译本虽经译、校者修改、更正，但难免还有未发现之处，希读者批评指正。

本书译稿经华中工学院船舶内燃机教研组详细审校一遍，在此表示谢意。

# 目 录

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 主要符号说明 .....                        | 7   |
| 序言 .....                            | 11  |
| 第一章 柴油机的燃油设备 .....                  | 15  |
| 1. 燃油设备的类型 .....                    | 15  |
| 2. 油量计量方法 .....                     | 26  |
| 3. 结构 .....                         | 30  |
| 第二章 压燃式发动机中喷油过程的理论和计算方法 .....       | 51  |
| 1. 计算理论和计算方法的流体动力学基础 .....          | 51  |
| 2. 具有高压油管的直接作用式燃油系统喷油过程的计算 .....    | 58  |
| 3. 无高压油管的燃油系统的喷油过程的计算 .....         | 113 |
| 4. 蓄压器式燃油系统的喷油过程的计算 .....           | 131 |
| 第三章 应用数字计算机计算喷油过程 .....             | 140 |
| 1. 数学模型的特点和原始算法 .....               | 140 |
| 2. 边界条件方程数值积分法的选择 .....             | 145 |
| 3. 算法的精确算法 .....                    | 149 |
| 4. 喷油过程精确算法的基本方程与算法 .....           | 169 |
| 5. 喷油过程计算程序简述 .....                 | 175 |
| 第四章 压燃式发动机燃油系统的实验和<br>计算-理论研究 ..... | 181 |
| 1. 根据理论计算结果估算喷油过程参数的方法 .....        | 181 |
| 2. 燃油系统的有限容积和燃油压缩性对供油特性的影响 .....    | 190 |
| 3. 在喷油过程中燃油泵柱塞副和燃油泵凸轮外形的作用 .....    | 195 |
| 4. 油泵输油阀和高压油管对喷油过程的影响 .....         | 199 |
| 5. 燃油泵轴转速对喷油特性的影响 .....             | 208 |
| 6. 喷油器的结构参数和介质的反压力对喷油特性的影响 .....    | 219 |
| 7. 用多种燃油工作的直接作用式燃油系统的工作特点 .....     | 229 |

|                                               |            |
|-----------------------------------------------|------------|
| 8. 分配式油泵的燃油系统 .....                           | 231        |
| 9. 泵-喷油器 .....                                | 233        |
| 10. 蓄压器式燃油系统 .....                            | 263        |
| 11. 关于喷油特性与压燃式发动机工作过程的某些相互关系 .....            | 266        |
| <b>第五章 柴油机闭式喷油器的工况 .....</b>                  | <b>277</b> |
| 1. 根据喷油器流体动力特性并考虑到喷嘴针阀运动<br>动力学分析喷油器的工况 ..... | 278        |
| 2. 考虑到高压油路和喷油器弹簧的波动现象确定喷<br>嘴针阀的振动频率 .....    | 282        |
| <b>第六章 燃油雾化细度和燃油射束的扩展 .....</b>               | <b>303</b> |
| 1. 喷流的散裂和用来表示雾化细度及均匀性的参数 .....                | 303        |
| 2. 雾化细度和均匀性的计算 .....                          | 308        |
| 3. 燃油射束的扩展 .....                              | 334        |
| <b>第七章 燃油系统设计和参数选择原理及其改进途径 .....</b>          | <b>340</b> |
| 1. 根据压燃式发动机的给定指标选择喷油特性参数和<br>设计燃油系统 .....     | 340        |
| 2. 喷油过程和燃油系统主要参数的近似估算方法 .....                 | 353        |
| 3. 柴油机燃油系统的改进途径 .....                         | 360        |
| <b>参考文献 .....</b>                             | <b>368</b> |

## 主要符号说明

- $a$  —— 压力波在燃油中的传播速度;
- $C_{\text{H}}, C_{\text{K}}, C_{\text{H}}$  —— 喷油器针阀、输油阀和柱塞的运动速度;
- $C_{\text{T}}, C'_{\text{T}}$  —— 油管入口和出口处的燃油流速;
- $U_{\text{H}}$  —— 气流速度;
- $U_{\text{K0}}, U_{\text{KH}}, U_{\text{KP}}$  —— 油粒相对于气体介质的初始、即时和临界运动速度;
- $r_{\text{BH}}, r_{\text{OT}}$  —— 套筒进油孔和回油孔的半径;
- $d_{\text{H}}, d_{\text{K}}$  —— 柱塞直径和输油阀减压凸缘直径;
- $d_{\text{T}}$  —— 高压油管通道直径;
- $d_{\text{H}}, d_{\text{x}}$  —— 针阀导向槽直径和针阀锥体上密封缘的直径;
- $d_{\text{PK}}, d_{\text{c}}$  —— 喷嘴头部中心通道直径和喷油孔直径;
- $d_{\text{KH}}$  —— 油粒直径;
- $d_{\text{max}}, d_{\text{min}}$  —— 油粒的最大和最小直径;
- $F\left(t - \frac{L}{a}\right)$  —— 传向喷油器的正向压力波;
- $f_{\text{K}}, f'_{\text{K}}, f_{\text{H}}$  —— 输油阀减压凸缘、尾部和减压凸缘下的横截面面积;
- $f_{\text{H}}$  —— 针阀横截面面积, 其上作用着压力  $p'_{\Phi}$  和  $p_{\Phi 0}$ ;
- $f_{\text{H}}, f_{\text{O}}$  —— 针阀锥面下的即时流通截面面积和柱塞套筒回油孔或进油孔面积;
- $f_{\text{c}}$  —— 喷嘴的喷油孔面积;
- $f_{\text{H}}, f_{\text{T}}$  —— 柱塞和高压油管通道的横截面面积;



- $f_{\text{ш}}$ ——喷油器针阀销阀的横截面面积；  
 $h_{\text{ш}}, h_{\text{акт}}$ ——柱塞的全行程和有效行程；  
 $h_{\text{к}}, h_{\text{к0}}$ ——输油阀的全行程和等于减压凸缘高度的升程；  
 $L$ ——高压油路的长度，即从油泵管接头腔到喷嘴腔的距离；  
 $L_{\Phi}$ ——向静止气体介质喷射时燃油射束的长度（射程）；  
 $l_{\text{п}}$ ——弹簧钢丝的长度；  
 $M_{\text{ш}}, M'$ ——喷油器弹簧和运动零件的质量；  
 $M$ ——输油阀及随它一起运动的零件的质量；  
 $M_{\text{кп}}$ ——油粒质量；  
 $n$ ——油泵凸轮轴转速；  
 $p_{\text{ш}}, p'_{\text{ш}}$ ——油泵增压腔和管接头腔中的即时压力；  
 $p_{\text{вс}}$ ——油泵进油腔压力；  
 $p_{\text{к}}$ ——输油阀弹簧的预紧压力；  
 $p_{\text{кп}}$ ——输油阀开始运动时增压腔内的燃油压力；  
 $p_{\text{o}}$ ——高压油路中的燃油残余压力；  
 $p_{\Phi}, p_{\Phi 0}$ ——密封锥面以上喷嘴腔内的即时压力和针阀开始运动时的压力；  
 $p'_{\Phi}$ ——针阀密封锥面与喷油孔之间的容积（对于销阀式喷嘴则是针阀密封锥面和销阀处环形流通截面之间的容积）中的即时燃油压力；  
 $p_{\text{ц}}$ ——发动机气缸内的气体压力；  
 $p_{\text{нп}}$ ——研究燃油雾化和射束进展时燃气介质的压力；  
 $p_{\text{ср}}^{\tau}$ ——“阶梯形”供油规律时喷射第一阶段中喷油孔前的平均燃油压力，它用调节系统保证；

$Q$ ——流经喷油器的燃油秒体积流量；

$q_{\text{и}}$ ——循环供油量；

$q_{\text{и}\Phi}$ ——到喷油过程的某一即时瞬间由喷嘴供给的燃油量；

$t$ ——时间，秒；

$V_{\text{н}}, V_{\text{н}0}$ ——增压腔即时容积和相当于柱塞全行程的容积；

$V'_{\text{н}}$ ——油泵管接头容积；

$V_{\text{oc}}$ ——高压油路中的残余空腔容积；

$V_{\text{oc.н}}, V_{\text{oc.т}}, V_{\text{oc.ф}}$ ——油泵管接头中、油管中和喷油器中的空腔容积；

$V_{\text{с}}, V_{\text{т}}, V_{\text{ф}}$ ——高压油路、高压油管和喷油器喷嘴中的容积；

$V_{\text{кп}}$ ——油粒体积；

$W(t)$ ——传向油泵管接头的反射波；

$x$ ——油管长度的即时值；

$y, y_{\text{max}}$ ——针阀的即时和最大（到止动器）升程；

$Z_1, Z_2, Z_3$ ——经过柱塞滑阀部分、柱塞活塞部分及喷嘴针阀与壳体间的间隙的漏泄量；

$\alpha$ ——燃油的平均压缩性系数；

$\Delta q_{\text{и}}$ ——凸轮每转一度的供油量；

$\Delta V_{\text{кп}}$ ——油粒体积增量；

$\delta, \delta'$ ——分别为输油阀和喷油器的弹簧刚度；

$\delta_{\text{н}}, \delta_{\text{н}}$ ——分别为喷嘴和油泵元件内的径向间隙；

$\varepsilon_{\text{с}}$ ——喷油孔的喷流压缩系数；

$\mathfrak{g}$ ——振动阻尼系数；

$\lambda'$ ——单位长度油管的阻尼系数；

$\mu_{\text{т}}, \mu_{\text{г}}$ ——分别为燃油和气体的粘性系数；

$\mu_{\text{и}}$ ——流经输油阀和阀座间的缝隙的燃油流量

系数;

$\mu_c, \mu_o, \mu_H$ ——分别为燃油流经喷油孔、进油和回油孔、针阀密封锥面与喷嘴锥座间的截面的流量系数;

$(\mu f)_p$ ——喷嘴-针阀组的等效流通截面;

$\nu$ ——喷油器针阀的振动频率;

$\nu'_T, \nu_r, \nu_B$ ——分别为燃油、燃气和空气的运动粘性系数;

$\nu_T, \nu_{\pi}$ ——分别为油管中液柱的和喷油器弹簧的自振频率;

$\rho, \rho_r, \rho_B$ ——分别为燃油、燃气和空气的密度;

$\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$  等——阶梯形函数。根据所加条件的不同,它们分别取 0, 1 或 -1 值;

$\sigma_T$ ——燃油的表面张力系数;

$\tau_i$ ——发火延迟期, 秒;

$\tau_{\pi}$ ——供油持续时间, 秒;

$\tau, \tau_1$ ——阀座和针阀的锥角;

$\varphi$ ——油泵轴转角;

$\varphi_{\pi}$ ——供油持续时间, 度;

$\varphi_1$ ——从柱塞开始运动到进油孔完全关闭的油泵轴转角;

$\varphi_{акт}$ ——相应于柱塞有效行程的油泵轴转角。

## 序 言

柴油机的特点是它的技术-经济指标取决于燃油系统的工作质量和参数。在柴油机中，燃油在高压下（ $350\sim 1000$ 公斤/厘米<sup>2</sup>）通过小孔喷射，因而它直接在发动机燃烧室内雾化。燃烧室内的空气被压缩到几十个大气压并在压缩过程中被加热到  $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ 。喷入灼热空气中的燃油，在其中被加热、发火和燃烧。因此，工作过程的质量将取决于如何供油和在什么时间供油，取决于燃油雾化和在燃烧室中分布的情况。

通常由燃油泵、高压油管和喷油器组成的燃油系统，是柴油机最重要的部件。考虑到燃油系统在混合气形成过程中起着重要的作用，因而对它提出严格的要求。它必须：

- 1) 每循环供给定量的燃油；
- 2) 在给定的时间并按一定的规律供油；
- 3) 使燃油雾化成微粒，微粒大小要使油粒在燃烧室容积内的分布能最合理地利用工作空气；
- 4) 保证燃油系统所有泵组同样地工作。

实现上述要求的困难在于：

- 1) 供油持续时间很短（在低速柴油机中为  $0.01$  秒，在高速小功率柴油机中为  $0.0005$  秒）；
- 2) 每循环供油量也很少。在大功率柴油机中，在额定工况下喷入几克燃油，在高速小功率柴油机中，喷入百分之几克燃油；
- 3) 喷油压力和速度以及燃油喷入其中的介质的压力和温度急剧地变化着；
- 4) 对使用所设计的燃油系统的柴油机来说，相应其结构特点和运转条件的供油规律尚不清楚。因为这时还不知道在供油、

混合气形成和燃烧过程之间的量和质相互的关系。苏联下述著作中〔7, 20, 25, 27, 34, 52, 60, 67, 75〕, 也只能是十分近似地估算出供油规律和为某台具体柴油机设计的燃油系统的某些特点。

对于供油、混合气形成和燃烧过程之间的相互关系了解不够, 是因为在柴油机气缸中燃油准备发火和燃烧时所发生的物理现象和化学反应很复杂。此外, 研究上述过程的大量著作未得到综合。这种综合是困难的, 因为在大多数情况下, 对混合气形成和燃烧过程的研究, 是在不研究燃油系统下作出的, 而燃油系统的工作则主要是在试验台上研究的。

目前, 没有一种理论计算方法能以足够的精度并考虑到柴油机喷油过程和工作过程进行的特点, 选择出喷油和燃油系统的适当特性参数。因此, 这些参数主要是通过燃油系统和柴油机的共同调配来选择。与此同时, 由于必须进行大量的实验工作并为此耗费大量时间和物资的困难, 因此, 各国都特别致力于寻求在理论上解决上述问题的出路。解决这个问题, 要求详尽地研究柴油机燃烧室中喷油过程的理论和计算方法、燃油雾化理论以及燃油喷流在变化的高压高温气体介质中扩展的理论。

我们简要地阐述一下上述过程的主要理论基础和计算方法。以下述几点为基础的供油过程的理论和计算方法, 获得了较全面的发展:

- 1) 考虑到燃油的压缩性及其它诸因素 (这时未注意到喷油过程的流体动力学, 因而这种方法被称为静力法);
- 2) 相似理论和因次理论;
- 3) 喷油过程的流体动力理论 (流体动力法)。

第一个静力法是 Гессельман 提出的, 但是, 因为这个方法未考虑燃油的压缩性, 因而它甚至未被用于近似地估算实际供油过程。后来, Г. Г. Калиш、Б. И. Сифман 和 Фармер、Алкок及其他研究者考虑了燃油压缩性及其它诸因素, 修正了这个方法。目前不用静力法计算高速柴油机的喷油过程, 因为误差太大。但

它被用来计算泵-喷油器的喷油过程，因为在这里没有高压油管，因而可以忽略燃油压力和运动速度分布的波动性。

以相似理论和因次理论为基础的方法，是以实验数据为依据的。理论基础仅仅用于选择相似准则。这种方法和以实验数据为基础的其它方法一样，是近似的，而其使用范围仅限于那些和其实验数据作为该法基础的系统相似的系统<sup>[51,65等]</sup>。这些方法的一些拥护者，把这类方法与采用数字计算机（ЦВМ）的现代解析法对立起来。Л. И. Седов 指出，相似法和因次法在研究复杂现象的初级阶段，亦即当问题在理论上还研究得不够的时候，特别有效。但是他预告说，不仅不要对相似理论和因次理论的作用估计不足，也不要对它估计过高。他认为，把相似理论和因次理论与解析计算结合起来是很有效的。把相似理论和解析法对立起来是不对的。

喷油过程计算的流体动力法和静力法以及以相似理论和因次理论为基础的方法同时发展着。这是因为流体动力法最初十分费力，而其准确性又很低。例如，Эйхельберг 和 Засс 没有考虑燃油在系统有限容积内的压缩性的影响。Пишингер 和 И. В. Астахов 分别孤立地对闭式和开式喷油器系统考虑了这个因素。后来，流体动力法得到显著改进和发展<sup>[6,8,17,36,43,54,71]</sup>。目前，这种方法被广泛运用并且使用了数字计算机。

我们不仅对于直接作用式系统而且对其它类型的具有高压油管的系统，都把流体动力法视作基本方法。用流体动力法计算出的喷油过程的数据，十分准确地与发动机喷油过程的实际参数相符，特别是当计算考虑到燃油喷入的介质的压力和温度时。

燃烧室的喷油过程是非定常的，它在燃油运动的高压高速下进行。在非定常运动的情况下，射束扩展和燃油雾化问题，由于物理现象特别复杂，至今尚未解决。现在有各种设想和近似估算射束扩展与喷流雾化的方法，但都不够准确，而且在许多情况下它们与试验结果相差甚远。有些这类设想，是建立在液体以恒定

低速从圆孔流出时流束散裂的理论之上的。这个理论还是 Бое-декер、Магнус 和 Саварт 提出的，对于非粘性流体由 Релей 最后完成，对于粘性流体由 Н. Бор 最后完成。〔3, 4, 20, 30, 47, 48, 50, 68〕等著作对液体喷射和射束扩展问题给予了很大注意。

但是喷流散裂和射束扩展问题，是在稳定或准稳定的液体流动下进行研究的。所以本书对喷流雾化与射束扩展问题的阐述，仅涉及各国最新的研究成果。

# 第一章 柴油机的燃油设备

## 1. 燃油设备的类型

柴油机的燃油设备包括燃油箱、输油泵、滤清器、喷油泵或带传动机构的高压油泵、各气缸的燃油分配部件、油量计量部件、一个（或多个）蓄压器、喷油器、低压和高压油管。

随着燃油设备类型的不同，可能不具备上述元件中的某些元件，而另一些元件则可能是组合起来的（图 1）。例如，燃油分配部件则包括在分配式燃油设备中和某些类型的蓄压器式燃油系统中。油量计量部件常常和高压油泵组合在一起。在所有直接作用式系统和某些蓄压器式系统中，却没有蓄压器。喷油器可能和喷油泵组合成一个部件。典型的供油系统示于图 2。箭头表示燃油流动方向。

根据喷油能量供给方法的不同，燃油设备分为直接作用式和蓄压器式两种，因为供能方法对燃油设备的结构、对燃油设备所保证的喷油过程的参数以及这些参数在柴油机工况变化时的变化特征，有着决定性的影响。

由于比较简单和可靠性好而用得最广泛的直接作用式燃油设备，包括着所有这样的系统：其中高压油泵的增压元件，即它的柱塞，由工作的发动机在喷油过程中供给的能量传动，因此它直接参与实现供油过程。柱塞的传动可能是机械传动（由凸轮或偏心轮直接通过滚子推杆或杠杆与拉杆系统），或者利用发动机工作气缸内的燃气压力来实现。直接作用式燃油设备的主要元件是油泵和喷油器。图 3 中所示是用得最广的、能同时起油量计量作用的油泵元件的结构。油泵元件的主要功能，是把燃油压缩到能在燃烧室中实现最佳雾化和最佳分布所必需的压力。在该图所示的



