

柴油机燃油喷射系统

译文集

〔日〕 広安博之 等著

贾锡印 田忠魁 译

国防工业出版社

柴油机燃油喷射系统

(译文集)

〔日〕 広安博之 等著

贾锡印 田忠魁 译

张志华 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本译文集译自日本《内燃機関》杂志，燃油喷射系统连载讲座，共八篇文章。其中主要叙述：燃油喷射系统的理论与计算；喷射压力、喷射率和喷雾颗粒度分布的测量方法；大型低速柴油机燃油系统的特点；船用柴油机的两级喷射方式；各主要部件的结构、功用和加工制造；按照气体循环，利用模拟装置精确计算喷射系统的设计方法；最后，对保持喷射系统的性能在设计和使用时应注意的问题也作了介绍。

本译文集可供从事柴油机设计、制造、试验和使用的工程技术人员、工人及大专院校的师生参考。

该译文集第一、五、六篇由贾锡印译，其余均由田忠魁译，译后进行了互校，最后由张志华同志进行了总校。

《内燃機関》(燃油喷射系统连载讲座)

山口 広安博之 等著

柴油机燃油喷射系统

(译文集)

贾锡印 田忠魁 译

张志华 校

国防工业出版社 出版

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

787×1092¹/₃₂ 印张 47/8 103千字

1980年12月第一版 1980年12月第一次印刷 印数：0,001—4,000册

统一书号：15034·2099 定价：0.52元

目 录

一、高速柴油机的燃油喷射系统理论	1
1. 概述	1
2. 符号	3
3. 计算方法	5
二、高速柴油机燃油喷射系统的测量	18
1. 压力的测量	18
2. 喷射率的测量	23
3. 测量颗粒度分布的方法	26
4. 不同喷油嘴的喷射特性比较	29
三、大型低速柴油机燃油喷射系统的应有状态	35
1. 直接作用式燃油系统和蓄压式燃油系统	35
2. 燃油喷射系统与燃烧室壁面的热负荷	42
3. 机舱自动化带来的一些问题	46
4. 燃油系统的故障实例	49
四、燃油喷射系统的结构与制造	55
1. 喷油泵的结构及其作用特性	55
2. 喷射装置的高压系统	56
3. 输油泵	64
4. 喷油定时调节器	66
5. 调速器	68
6. 制造	73
五、燃油喷射系统中燃油压力的变化和喷射的 关系 (基本理论)	74
1. 概述	74

2. 高压油管内一元不稳定流动理论	74
3. 管路内的不稳定现象	78
4. 针阀的喷射过程	83
5. 异常喷射 ⁽⁵⁾	87
六、燃油喷射系统的设计	92
1. 平均喷射特性——气缸内的工作循环和喷射的关系 ⁽²⁾	94
2. 燃油泵凸轮形状及其它——间断喷射和二次喷射 ⁽⁵⁾⁽⁶⁾	99
3. 喷射率的精确计算——喷射系统的模拟	107
4. 凸轮的调正——喷射延迟和着火延迟	108
5. 其它问题	109
七、特殊喷射方式与机构(船用柴油机的二级喷射)	112
1. 概述	112
2. 二级喷射方式	113
3. 韦格姆 (Vigom) 过程	127
八、保持燃油喷射系统的性能, 在设计和使用上应	
注意的一些问题	131
1. 在设计和使用喷油嘴时应注意的问题	131
2. 燃油喷射系统的试验及发生的故障	136
3. 有关喷油嘴性能的几个问题	146

一、高速柴油机的燃油喷射系统理论

広安博之

1. 概 述

柴油机的输出功率和效率，与喷入燃烧室中的燃料雾化性能有很大关系。在燃烧室中形成最适合燃烧的混合气是燃油喷射系统的任务，发动机的性能在很大程度上取决于采用什么样的喷射系统。

混合气形成的最佳条件是根据发动机的要求由喷射系统来决定的。这里所说的喷射系统是指喷油泵、高压油管、喷油嘴和调速器而言。喷射系统的供给条件分为时间方面的和空间方面的。燃油的供给时间主要是由燃料离开喷油嘴到喷射结束这一过程中发生的问题来确定，如喷射时刻、喷射持续期、喷射率、不规则喷射等。燃料供给在空间方面的条件是指燃料从喷油嘴喷出之后的外部现象，即燃料颗粒的直径、分布、贯穿度、分散程度等。这些虽然是喷射系统的外部问题，但在很大程度上是由燃烧室和喷射系统本身来决定的。

因此，燃料喷射的最终结果是要知道在空间范围内所具有的立体图形是如何随时间变化的。并且，这些混合气形成问题，应和燃烧室的问题一起考虑，不能各个论述。可是在迄今为止的研究阶段要达到上述的最终目的还需要一定时间的努力。

现在燃油喷射系统设计的改进方向，主要有以下两点：

(1) 装置的小型轻便化和降低成本；

(2) 维护方便和强化结构。

作为(1)的改进方向是采用分配式油泵，对于(2)来说，由于自动给油（或延长给油时间）和在直接喷射式发动机上的高增压倾向，正准备发展成强化结构的形式。

另一方面，关于喷射系统的性能，必须从根本上把发动机的输出功率、效率和废气净化等问题直接作为一个整体来考虑，以适应新型发动机的要求。

最近，采用电子计算机模拟来揭示发动机的燃烧过程或工作现象，非常有助于开展研究工作。由于燃烧过程中存在着很多的参数，要用实验的方法来解决这些问题，就必须进行大量的实验，这是不可能的，因为实验只能在某种特定的条件下进行。为了弥补这个缺点，用电子计算机进行实验模拟，就能使很多参数变化，并可进行典型实验，因此，它将成为发动机设计和改进的有用武器。

这种方法也适用于喷射系统，根据模拟计算可以知道喷射系统的各个参数的变化及其效果，对于在实验中难于得到的数据则可由计算结果得知。并且不做实验或做少量实验就能确定适合于新型发动机喷射系统的最佳值。以前必需用实验获得的数据，现在用计算方法就可取得，因此它有节省时间、劳力和费用等优点。然而其前提是要有很准确的实验测量，并需证明用于计算的假定是非常正确的。

在这个意义上来说，作为探讨今后喷射系统应该采用什么样的手段，计算机模拟的方法将起很大作用。下面以波许（Bosch）型溢流式喷油泵为例来论述喷射系统的计算

方法。

2. 符 号

以下叙述中所使用的符号如下(见图 1-1)。

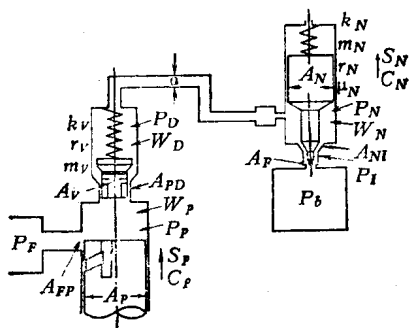


图1-1 符号说明

(1) 燃油和通用符号

γ : 燃油的比重 公斤/厘米³

ρ : 燃油的密度 ($= \gamma / g$) 公斤·秒²/厘米⁴

C : 燃油的音速 厘米/秒

E : 体积弹性模数 公斤/厘米²

k : 管路的阻力系数 1/秒

a : 管路的截面积 厘米²

P_R : 残余压力 公斤/厘米²

V_0 : 气泡量 厘米³

R : 齿条位置 毫米

L : 油管长度 厘米

t : 时间 秒

(2) 喷油泵的符号

- W_P : 柱塞腔容积 厘米³
 W_D : 出油阀腔容积 厘米³
 A_P : 柱塞的截面积 厘米²
 A_{FP} : 进油孔面积 厘米²
 A_V : 出油阀的截面积 厘米²
 A_{PD} : 出油阀的回流面积 厘米²
 P_F : 燃油的入口压力 公斤/厘米²
 P_P : 柱塞腔的压力 公斤/厘米²
 P_D : 出油阀腔压力 公斤/厘米²
 k_V : 出油阀弹簧的预紧力 公斤
 r_V : 弹簧常数 公斤/厘米²
 m_V : 弹簧重量/2 + 出油阀重量 公斤
 S_P : 柱塞行程 厘米
 S_V : 出油阀行程 厘米
 C_P : 柱塞的速度 厘米/秒

(3) 喷油嘴的符号

- W_N : 蓄压腔容积 厘米³
 W_I : 压力室容积 厘米³
 A_N : 针阀截面积 厘米²
 A_{ND} : 针阀座截面积 厘米²
 A_D : 针阀尖端截面积 厘米²
 A_F : 喷孔面积 厘米²
 A_{NI} : 针阀和阀座的间隙面积 厘米²
 P_b : 燃烧室压力 公斤/厘米²
 P_N : 蓄压腔压力 公斤/厘米²
 P_I : 压力室压力 公斤/厘米²

P_0 : 针阀开启压力 公斤/厘米²

k_N : 弹簧预紧力 公斤

r_N : 弹簧常数 公斤/厘米²

μ_N : 弹簧粘性阻尼系数 公斤·秒/厘米

m_N : 弹簧重量/2 + 针阀重量 公斤

3. 计算方法

这种计算方法虽正被很多人使用, 但首先应考虑采用模拟计算机还是采用数字计算机求解。用模拟计算机时, 要把油管内波动的传播转换成具有重量的弹簧系统, 按电阻抗等近似地求解, 但是由于油管面积的变化及气泡等问题很不好处理, 所以不可能精确地计算。

用数字计算机时, 应用各部分的运动方程式和连续方程式, 可以把它们分成微小的时间间隔来计算。

在处理细直油管内压力波传播的这种计算中, 多应用吉芬 (Giffen) 和罗威 (Rowe)⁽¹⁾ 所建立的阿里微 (Alliévi)⁽²⁾ 管路波动方程式为基础的解析方法, 以及用开纳特 (Knight)⁽³⁾ 所建立的将油管分割成 M 个截面, 研究其被分割的区间内流量随着时间而增加的方法。

考虑到由于燃油系统内的气泡、管路阻力等引起的压力波的衰减以及管路面积的变化所产生的反射, 在解决喷射系统问题时, 前者应用特性曲线法求解, 需要使用很复杂的计算公式。与此相反, 后者的方法处理比较简单, 但严格说来, 将密度变化引起的音速变化考虑进去是不可能的。

以前虽然不大考虑气泡现象, 但从使用透明油管的实验结果可看出⁽⁴⁾, 在不受压的地方 (如图 1-2 所示) 就可看到

很多气泡，而且一出现气泡，油管内的压力波传播速度就有很大的差异。

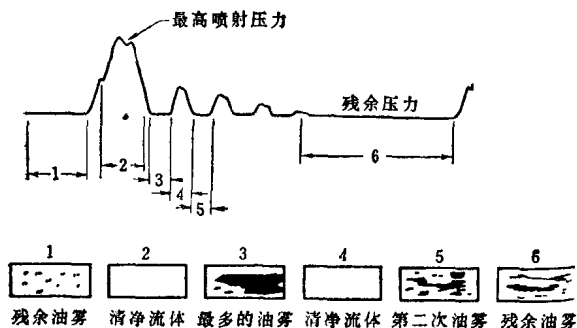


图1-2 透明管内压力和气泡的关系

因此，在这里为了考虑气泡现象以及管内阻力、截面变化所造成的反射波，我们来分析一下基于流量增加的方程式。

在建立方程式之前，首先对整个喷射系统作如下的假设：

(1) 在一次喷射中假定燃油的温度不变。由于一次喷射的时间约为 15 毫秒以下，因此，不考虑在此时间内的燃油温度的变化，并认为是一定值。同时压力引起的温度变化很小，所以也不必考虑。

(2) 在一次喷射中燃油的物理性质，即粘度、表面张力、密度和体积弹性模数不随压力而变化，视为定值。

(3) 因此可以认为没有气泡时的燃油音速为常数，而有气泡时的音速随后讨论。

(4) 喷射系统零件的弹性变形可以忽略不计。

(5) 不考虑气泡内的燃油蒸发。

3.1 高压油管中的公式

将图 1-3 所示的油管全长分成 M 个截面, 研究其分割区间的流量增加量 $Q_{i,j}$ 。

这个系统的压力传播正如阿里微 (Alliévi) 的解一样要应用连续方程式和运动方程式。

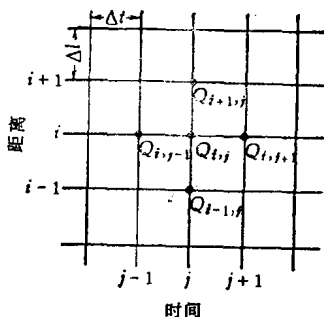


图 1-3

现在假定把油管分成 M 段, 其中一段的长度为 Δl ,

截面积为 a , 首先根据连续方程, 从 i 截面到 $i+1$ 截面之间在 j 时间内的压力应表示为:

$$P_{i,j} = \frac{E}{a\Delta l} (Q_{i,j} - Q_{i+1,j}) + P_R \quad (1-1)$$

式中 $Q_{i,j}$ ——累积流量, 即在 j 时间内流入 i 截面的总流量;

E ——燃料的体积弹性模数;

P_R ——油管内的残余压力。

在 i 截面上的运动方程式为:

$$f_{i,j} = m (\alpha_{i,j} + 2k \cdot v_{i,j}) \quad (1-2)$$

式中 m ——燃油质量, 即 $m = \rho a \cdot \Delta l$;

k ——与速度成比例的油管内阻力系数;

$\alpha_{i,j}$ ——加速度, 并表示如下

$$\alpha_{i,j} = (v_{i,j} - v_{i,j-1}) / \Delta t \quad (1-3)$$

由于前面假定燃油中的音速为常数, 如果压力波以音速传播的时间为 Δt , 则在 Δt 之间公式为

$$\Delta l / \Delta t = C = \sqrt{E / \rho} \quad (1-4)$$

由以上公式则得流量方程式为:

$$Q_{i,j+1} = \left\{ 2Q_{i,j} - Q_{i,j-1} + 2k\Delta t Q_{i,j} + (P_{i-1,j} - P_{i,j}) \frac{a\Delta l}{E} \right\} / (1 + 2k\Delta t) \quad (1-5)$$

在公式 (1-5) 中不考虑管内阻力时, $k = 0$, 把压力换成流量, 就成为如下简式

$$Q_{i,j+1} = Q_{i+1,j} + Q_{i-1,j} - Q_{i,j-1} \quad (1-5')$$

(1-5) 式中的阻力系数, 在普通油管内为层流时则用下式表示:

$$k = 16\nu/d^2 \quad (1-6)$$

管内的流量公式用 (1-5) 式表示, 但是管内产生气泡时, 则公式 (1-1) 不成立。因公式 (1-1) 是液体的连续方程式, 有气泡时必须用另外的公式。因此, 当 $p_{i,j} < 0$ 时, 则

$$P_{i,j} = 0 \quad (1-7)$$

即管内的压力不能成为负值。在公式 (1-5) 中, 如 $P_{i,j} = 0$, 则有气泡时的累积流量 $Q_{i,j+1}$ 可用此式求出。而气泡的数量, 根据公式 (1-1) 由下式求得。

$$V_0 = Q_{i,j} - Q_{i+1,j} + \frac{a\Delta l}{E} P_R \quad (1-8)$$

如上所述, 无气泡时燃油中的音速为常数。如图 1-4(a) 所示, 喷油泵端产生的压力, 经过 t 时间后到达喷油嘴。但是如果途中存在气泡, 必须有消除气泡所需要的时间, 如 (b) 所示, 由于气泡存在, 压力波就延迟。因此, 虽然在燃油中传播的音速为常数, 但由于气泡现象的存在, 音速实际上是

变化的。

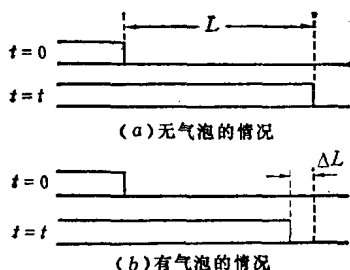


图 1-4

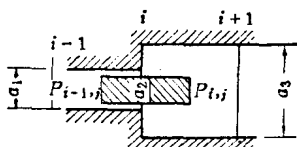


图 1-5

油管内截面变化时，可做如下处理，即公式 (1-1) 可变成如下式：

$$\left. \begin{aligned} P_{i,j} &= E/a_1 \Delta l (Q_{i-1,j} - Q_{i,j}) + p_R \\ P_{i,j} &= E/a_3 \Delta l (Q_{i,j} - Q_{i+1,j}) + p_R \end{aligned} \right\} \quad (1-1')$$

因此，在 i 截面的累积流量为：

$$\begin{aligned} Q_{i,j+1} &= \{ a_2/a_3 \cdot Q_{i+1,j} + a_2/a_1 \cdot Q_{i-1,j} - Q_{i,j-1} \\ &\quad + (2 + 2k\Delta l - a_2/a_1 - a_2/a_3) Q_{i,j} \} / (1 + 2k\Delta l) \end{aligned} \quad (1-9)$$

3.2 喷油泵端的公式

(1) 柱塞腔的连续方程式

柱塞的面积为 A_p ，当它以速度 C_p 运动时，单位时间内由柱塞运动而产生的流量为 $A_p C_p$ 。此流量必须等于从面积为 A_{FP} 的进油孔流进柱塞腔的油量，用 $A_{FP} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_p - P_F)}$ 表示。它是柱塞腔和输油泵之间压力的函数。而 A_{FP} 是包括流量系数在内的值，并是柱塞行程 S_p 的函数。

柱塞腔内的燃油因弹性变形而变化。柱塞腔的容积随柱

塞的运动而改变, 可用下式表示:

$$\frac{W_p - A_p S_p}{E} \cdot \frac{dP_p}{dt}$$

柱塞腔的燃油流量也因出油阀的移动而变化。假设出油阀的截面积为 A_v , 速度为 C_v , 则流出出油阀的流量 $A_v C_v$, 从柱塞腔流到出油阀腔的流量为: $A_{pD} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_p - P_D)}$ 。此流量是柱塞腔和出油阀腔压力差的函数, A_{pD} 是包括流量系数在内的出油阀间隙面积, 它是出油阀行程 S_v 的函数。

因此对于柱塞腔来说下式是成立的

$$\begin{aligned} A_p C_p = & \frac{W_p - A_p S_p}{E} \cdot \frac{dP_p}{dt} + A_v C_v \\ & + A_{pD} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_p - P_D)} \\ & + A_{FP} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_p - P_F)} \end{aligned} \quad (1-10)$$

(2) 出油阀腔的连续方程式

流入出油阀腔的流量是因出油阀移动而变化的容积 $A_v C_v$ 和从柱塞腔流入的流量 $A_{pD} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_p - P_D)}$ 之和, 此流量应该等于出油阀腔压力改变而使燃油所产生的弹性变形量 $\frac{W_D}{E} \cdot \frac{dP_D}{dt}$ 和流向油管的流量 Q_p 之和, 也就是下面的连续方程式成立。即

$$A_v C_v + A_{pD} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_p - P_D)} = \frac{W_D}{E} \cdot \frac{dP_D}{dt} + Q_p \quad (1-11)$$

(3) 出油阀的运动方程式

出油阀的运动是由于柱塞腔和出油阀腔的压力差而产生的。这一压力差和出油阀弹簧的弹力、出油阀和弹簧的惯性力相平衡，即：

$$A_V(P_P - P_D) = m_V \frac{d^2 S_V}{dt^2} + \gamma V S_V + k_V \quad (1-12)$$

将上式进行差分变换后，应用迭代法求解。但是，对于出油阀腔存在气泡应做如下处理，有气泡时不能使用因燃油的弹性变形而产生的变化公式 $\frac{W_D}{E} \cdot \frac{dP_D}{dt}$ 。假设最初的气泡量为 V'_0 ，则：

$$V_0 = V'_0 + \left(Q_P - A_{PD} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_P - P_D)} - A_D C_D \right) \cdot \Delta t \quad (1-13)$$

由此公式可知： $V_0 \geq 0$ 时，有气泡， $p_D = 0$ ； $V_0 < 0$ 时，无气泡，可直接使用上式。

3.3 喷油嘴中的公式

(1) 蓄压腔的连续方程式

从油管流进蓄压腔的流量为 Q_N ，等于喷油嘴室中由压力引起的燃油弹性变形量 $\frac{W_N}{E} \cdot \frac{dP_N}{dt}$ 和受针阀移动影响的流量 $A_N C_N$ 以及流进压力室的流量 $A_{NI} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_N - P_I)}$ 之和。

式中 A_{NI} 是包括流量系数在内的针阀间隙面积，它又是针阀升程的函数。因此，

$$Q_N = \frac{W_N}{E} \cdot \frac{dP_N}{dt} + A_{NI} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (P_N - P_I)} + A_N C_N \quad (1-14)$$

(2) 压力室的连续方程式

从蓄压腔流进压力室的燃油通过喷孔喷出。由于压力室内没有针阀，所以初始条件应和燃烧室的压力相等，即 $p_I = p_B$ ，因此

$$A_{NI} = \sqrt{\frac{2g}{\gamma}(P_N - P_I)} = A_F \sqrt{\frac{2g}{\gamma}(P_I - P_B)} \quad (1-15)$$

式中 A_F 在喷孔式喷油嘴中为常数，但在轴针式、节流式喷油嘴中是针阀升程的函数。

(3) 针阀的运动方程式

针阀蓄压腔和压力室的压力应该与针阀和弹簧的惯性力以及弹簧的弹力相平衡，即

$$AP_N + BP_I = m_N \frac{d^2 S_N}{dt^2} + \mu_N \frac{dS_N}{dt} + \gamma_N S_N + k_N \quad (1-16)$$

式中 A 、 B ——作用在针阀上的承压面积，针阀开启时和关闭时其承压面积是不同的。

喷油嘴中的气泡处理和喷油泵中一样，由气泡的判别式 V_0 来确定。

$V_0 \geq 0$ 时，有气泡， $p_N = 0$ ，

$V_0 < 0$ 时，无气泡，可直接应用上述公式。

将以上公式进行差分变换用迭代法就可以求解。

3.4 程序框图

将以上的公式变换成差分形式，就可组成相当复杂的程序。现举其一例说明，例如公式 (1-10) 可变换成如下的形式：