

## 滑阀副配磨参数测量的理论研究

陈吉红 宁德初 梁建成

(精密机械与仪器系)

**摘要** 本文对滑阀副配磨参数测量进行了理论分析, 推导了滑阀副流量位移曲线的数学模型。文中分析了数据处理中的原理误差, 提出了理论公式拟合的算法, 消除了原理误差。其中估算的节流边圆角半径、径向间隙, 对控制阀的加工质量有重要意义。

**关键词** 测量, 数学模型, 滑阀副, 配磨参数

**分类号** TP211.3

滑阀副是电液伺服阀的关键部件之一。它的加工质量直接影响伺服阀的静、动态特性和泄漏特性。由于其精度要求高, 加工测量都很困难。目前大多数生产厂家都是采用气动测量的方法, 确定配磨余量和评价阀的加工综合质量。但这种方法测量精度低, 不能精确测量节流边开口较小时的流量位移曲线非线性, 并将对阀的综合性能影响很大的节流边圆角半径、径向间隙的影响折合到开口搭接量中, 引起数据处理原理误差。针对这些缺陷, 我们研制了滑阀副配磨参数测量系统。本文就该系统对滑阀副配磨参数的测量进行了理论分析, 采用非线性参数估计算法, 估算出圆角半径、径向间隙, 并消除了原理误差。

## 1 滑阀副流量—位移曲线理论公式推导

阀芯阀套组成的滑阀副相当于一个喷嘴盖板机构。若不考虑阀芯阀套的几何形状误差, 在这种理想状态下的模型如图1所示。理想的流量—位移曲线的关系式为:

$$Q = \begin{cases} KB(s - s_0) & \text{当 } s > s_0 \\ 0 & \text{当 } s \leq s_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为流量,  $s_0$  为固定边位置,  $s$  为活动边位置,  $K$  是与流量系数、气体膨胀系数及理想气体平均流速有关的系数, 在一定范围内可视为常数;  $B$  为喷嘴的宽度。

由式(1)可知, 理想的流量位移曲线由一条折线组成。当  $s > s_0$  时, 流量位移曲线呈线性关系, 见图2中的直线①。但实测的流量位移曲线如图2所示曲线②, 呈明显的非线性。

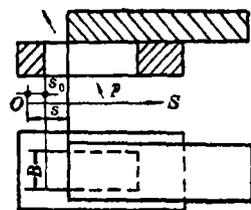


图 1

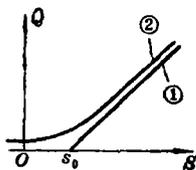


图 2

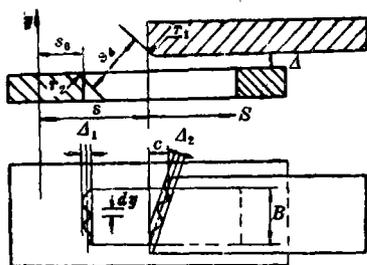


图 3

图 3 是实际节流口的理论模型。节流边不是理想的直线和直角，而是具有  $r_1$ 、 $r_2$  圆角、微观形貌误差  $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$  和不平行度误差  $C$ ，喷嘴和盖板间存在间隙  $\Delta$ 。

由于滑阀副的非线性范围较大，而  $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ 、 $C$  均在  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  内，因而它们不是引起非线性的主要原因。为了简化计算，将其忽略。各点的圆角半径取一平均值  $R_1$ 、 $R_2$ 。可以推导出流量位移曲线的数学模型为：

$$Q = \begin{cases} KB [\sqrt{(R+\Delta)^2 + (R+s-s_0)^2} - R] & s > s_0 - R \\ KB\Delta & s \leq s_0 - R \end{cases} \quad (2)$$

式中  $R = R_1 + R_2$ 。因为

$$\lim_{s \rightarrow +\infty} \frac{Q}{s - s_0} = KB$$

故  $Q = KB(s - s_0)$  是式(2)的一条渐近线方程。

图 4 是计算机按理论公式(2)生成的 4 条流量—位移曲线。从图中可见，理论曲线和实测曲线在形状上非常接近。若圆角半径、径向间隙越小，曲线越接近于折线。

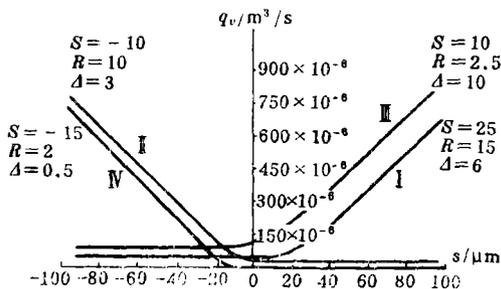


图 4

## 2 数据处理方法的研究

### 2.1 线性最小二乘拟合法

目前伺服阀生产厂家的数据处理方法一般采用实际流量位移曲线上一段线性较好的线段  $m-n$ ，将其延长到横轴，得到直线②，如图 5 所示。直线②与横轴的交点为  $O'$ ，并认为  $s'_0$  为搭接量。这类似于取  $m-n$  上的测量点作线性最小二乘拟合。从图 5 可知，这种方法在原理上存在搭接量的计算误差  $\delta$ 。若近似用线段  $m-n$  的中点  $p$  处的切线代替直线②，则原理计算误差有

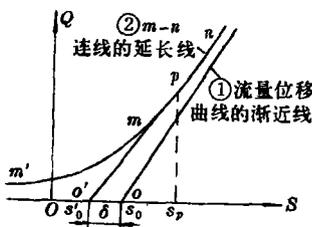


图 5

$$\delta = s_0 - s'_0 = -R \sqrt{1 + \left( \frac{R+\Delta}{R+s_p-s_0} \right)^2} + R + \frac{(R+\Delta)^2}{R+s_p-s_0} \quad (3)$$

可以证明 $\delta > 0$ 。当 $s_p$ 越小， $\delta$ 越大，且

$$\lim_{s_p \rightarrow +\infty} \delta = 0$$

从减小原理误差出发，应将 $m-n$ 远离原点，且应增加 $m-n$ 线段长度。但这又受到气动力测量程的限制，因此，一般 $s_m - s_n = 10 \sim 100 \mu\text{m}$ ，但伺服阀工作范围为 $\pm 300 \mu\text{m}$ ，大于 $\pm 100 \mu\text{m}$ 。所以上述测量方法测出的搭接量已将间隙、圆角造成的泄漏折合到滑阀副的搭接量中，其结果必然导致同一滑阀副在不同条件下测得不同的搭接量。且该搭接量并不能反映伺服阀开口较大（大于 $100 \mu\text{m}$ ）时的工作状况。

## 2.2 理论公式拟合法

现设在 $m' - n'$ 之间（见图5），已测出 $N$ 组数据。

$$\hat{Q}_i \sim s_i (i=1, \dots, N)$$

令式(2)中 $KB = a_1$ ， $R = a_2$ ， $\Delta = a_3$ ， $s_0 = a_4$ ，则(2)式变为：

$$Q = \begin{cases} a_1 [\sqrt{(a_2 + a_3)^2 + (a_2 + s - a_4)^2} - a_2] & s > a_4 - a_2 \\ a_1 \cdot a_3 & s \leq a_4 - a_2 \end{cases} = f(s, a_1, a_2, a_3, a_4) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{又设 } \varphi &= (a_1, a_2, a_3, a_4) = \sum_{i=1}^N [\hat{Q}_i - Q_i]^2 \\ &= \sum_{i=1}^N [\hat{Q}_i - f(s_i, a_1, a_2, a_3, a_4)]^2 \end{aligned} \quad (5)$$

因此，曲线拟合的问题就是 $\varphi(a_1, a_2, a_3, a_4)$ 的极小值问题。通过此极小值问题去确定拟合曲线 $f(s, a_1, a_2, a_3, a_4)$ 中的参数 $a_1, a_2, a_3, a_4$ ，使得计算值 $Q_i$ 与实测值 $\hat{Q}_i (i=1, \dots, N)$ 在最小二乘意义下误差最小。因 $f(s, a_1, a_2, a_3, a_4)$ 是 $a_1, a_2, a_3, a_4$ 的非线性函数，因而这是非线性参数估计问题。

$$\text{设迭代公式 } a_k = a_k^{(0)} + \Delta_k \quad (k=1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

其中 $a_k^{(0)}$ 是 $a_k$ 的一个迭代初始值。

将 $f$ 在 $a_k^{(0)}$ 附近作泰勒展开并略去二次及二次以上的项得：

$$f(s_i, a_1, a_2, a_3, a_4) \approx f_{i0} + \frac{\partial f_{i0}}{\partial a_1} \Delta_1 + \frac{\partial f_{i0}}{\partial a_2} \Delta_2 + \frac{\partial f_{i0}}{\partial a_3} \Delta_3 + \frac{\partial f_{i0}}{\partial a_4} \Delta_4 \quad (7)$$

式中：

$$\begin{aligned} f_{i0} &= f[s_i, a_1^{(0)}, a_2^{(0)}, a_3^{(0)}, a_4^{(0)}] \\ \frac{\partial f_{i0}}{\partial a_k} &= \left. \frac{\partial f(s, a_1, a_2, a_3, a_4)}{\partial a_k} \right|_{\substack{s=s_i, a_1=a_1^{(0)}, a_2=a_2^{(0)} \\ a_3=a_3^{(0)}, a_4=a_4^{(0)}}} \quad (k=1, 2, 3, 4) \end{aligned} \quad (8)$$

可以推导出：

$$\frac{\partial f}{\partial a_1} = \begin{cases} \sqrt{(a_2 + a_3)^2 + (a_2 + s - a_4)^2} - a_2 & s > a_4 - a_2 \\ a_3 & s \leq a_4 - a_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{\partial f}{\partial a_2} = \begin{cases} a_1 \left[ \frac{2a_2 + a_3 + s - a_4}{\sqrt{(a_2 + a_3)^2 + (a_2 + s - a_4)^2}} - 1 \right] & s > a_4 - a_2 \\ 0 & s \leq a_4 - a_2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\partial f}{\partial a_3} = \begin{cases} a_1 \left[ \frac{a_2 + a_3}{\sqrt{(a_2 + a_3)^2 + (a_2 + s - a_4)^2}} \right] & s > a_4 - a_2 \\ a_1 & s \leq a_4 - a_2 \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{\partial f}{\partial a_4} = \begin{cases} -a_1 \left[ \frac{a_2 + s - a_4}{\sqrt{(a_2 + a_3)^2 + (a_2 + s - a_4)^2}} \right] & s > a_4 - a_2 \\ 0 & s \leq a_4 - a_2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\varphi(a_1, a_2, a_3, a_4) = \sum_{i=1}^N \left[ \hat{Q}_i - \left( f_{i0} + \frac{\partial f_{i0}}{\partial a_4} \Delta_4 + \dots + \frac{\partial f_{i0}}{\partial a_1} \Delta_1 \right) \right] \quad (13)$$

为了使 $\varphi$ 在最小二乘意义下达到最小值，将上式对 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$ 求偏导数，并令其等于零，得出：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N a_{kj} \Delta_j = a_{k0} & (k, j=1, 2, 3, 4) \\ a_{kj} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial f_{i0}}{\partial a_k} \cdot \frac{\partial f_{i0}}{\partial a_j} & (k, j=1, 2, 3, 4) \\ a_{k0} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial f_{i0}}{\partial a_k} [\hat{Q}_i - f_{i0}] & (k, j=1, 2, 3, 4) \end{cases} \quad (14)$$

当初值 $a_k^{(0)}$ 及观测值 $\hat{Q}_i, s_i$ 给定后，按式(9)~(12)可以确定方程(14)的系数矩阵及右端项。因而可解出 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$ ，再按式(6)求出 $a_k$ 。当 $|\Delta_k|$ 值未满足精度要求时，可用当前的 $a_k$ 值代替 $a_k^{(0)}$ ，再重复上述计算，如此反复迭代，直到 $|\Delta_k|$ 值小于事先给定的允许误差。此时所得的 $a_k$ 即为曲线拟合后所求的参数。其中 $a_2, a_3, a_4$ 分别为圆角半径、径向间隙、搭接量的计算值。由于按此方法求出搭接量就是 $s_0$ ，显然，这种方法消除了搭接量的原理计算误差 $\delta$ 。尤其是定量估算出圆角半径、径向间隙大小，这时对提高阀的加工质量以及伺服阀的装配调试，有重要意义。

### 3 数据处理程序

为了与工厂现用数据处理方法兼容，保证理论公式拟合法收敛，并减少迭代次数，滑阀副磨参数测量系统中保留了线性最小二乘拟合法，其数据处理结果作为理论公式拟合法的初始值 $a_k^{(0)}$ 。该子程序为通用的线性最小二乘拟合子程序，故不再详述。

理论公式拟合法子程序：

1) 子程序框图：见图6， $A_0(I)$ 为初始值 $a_k^{(0)}$ 。

2) 提高程序运行速度的方法：从图6可看出，计算机运算循环次数多，运算量大，未采取措施前，每条节流边数据处理运算时间长达3~4分钟。

为提高运行速度，我们采取了以下措施：

①关闭计算机内部中断，使来自视频信号发生器的20ms服务程序中断请求无效，机器运算时间减少为原来的3/5；

②用线性最小二乘拟合法求迭代初值，减少迭代次数；

③利用机器内部的单精度函数子程序库，将循环次数多的程序块或调用次数多的子程序用机器语言编写，大大提高运算速度；

④精炼程序，如合并多个语句行；以变量代替常数运算；使用整形变量等。

采用以上诸措施后，单边数据处理时间减至约 1 分钟。

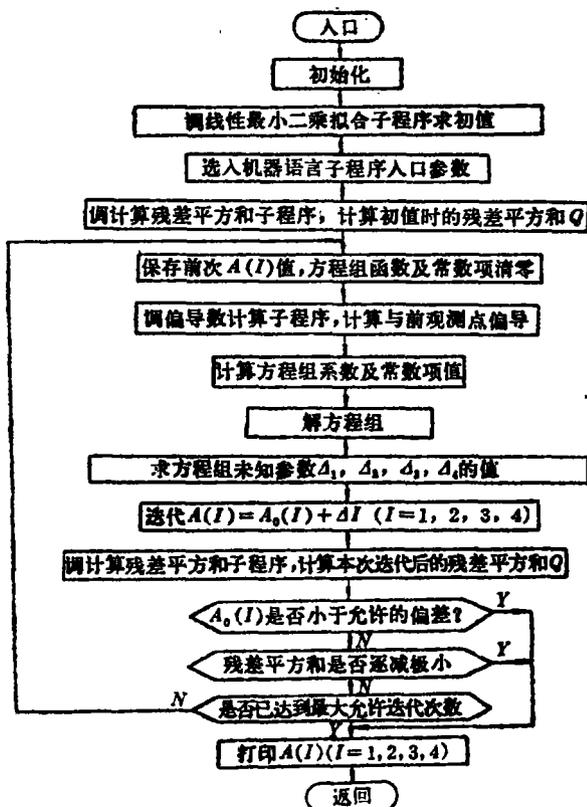


图 6

#### 4 测量试验

表1是对4FL-1A型阀多次测量的数据。从表中可以知道，搭接量的重复测量精度很高， $\pm 3\sigma = \pm 0.21\mu\text{m}$ ；径向间隙的重复测量精度为 $\pm 3\sigma = \pm 0.44\mu\text{m}$ ；圆角半径的重复测量精度 $\pm 3\sigma = \pm 2.48\mu\text{m}$ 。图7是 4FL-1A型阀的实测流量位移曲线。

表 1

序 号	搭接量( $\mu\text{m}$ )				径向间隙( $\mu\text{m}$ )				圆角半径( $\mu\text{m}$ )			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	2.79	3.17	3.17	2.75	2.10	1.86	2.08	2.46	10.58	8.61	9.23	7.95
2	2.760	3.09	3.09	2.746	2.16	1.93	2.08	2.07	9.79	8.03	9.37	9.07
3	2.796	3.127	3.127	2.862	2.20	2.00	2.03	2.24	9.42	7.99	10.00	8.05
4	2.85	3.231	3.231	2.851	2.19	1.86	2.05	2.07	9.53	9.34	9.08	9.21
5	2.896	3.024	3.024	2.72	2.07	1.77	2.17	2.19	10.77	9.11	8.41	7.95
平均值	2.754	3.127	3.127	2.746	2.148	1.844	2.086	2.202	10.02	8.618	9.218	8.246
均方差 $\sigma$	0.061	0.097	0.007	0.068	0.053	0.12	0.046	0.147	0.55	0.54	0.51	0.826

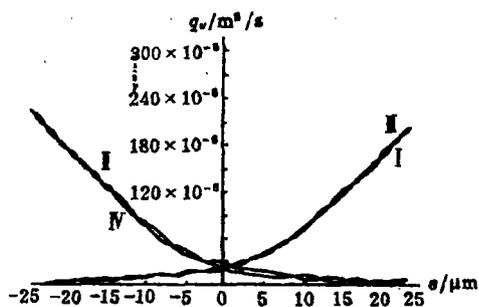


图 7 流量—位移曲线

## 5 结 论

(1) 本文推导了滑阀副节流边流量位移理论公式的数学模型, 分析了数据处理中的原理误差, 提出了理论公式拟合的算法, 消除了数据处理中的原始误差。文中估算出的圆角半径、径向间隙对保证伺服阀的加工质量及装配调试, 有重要意义。

(2) 本测量系统的重复测量精度较高, 以4FL-1A型为例, 搭接量的重复测量精度为:  
 $\pm 3\sigma \leq \pm 0.25\mu\text{m}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] 陶崇德等著. 微型机控制滑阀副开口叠合量气动测量的研究. 哈尔滨工业大学科研报告第22期, 1985
- [2] 上海计算技术研究所著. 电子计算机算法手册. 上海教育出版社, 1982
- [3] 王德人. 非线性方程组解法与最优化方法. 北京: 人民教育出版社, 1979
- [4] 范鸿金. 气动精测滑阀开口的理论分析. 计量学报, 1982

## Theoretical Research of Grinding-in Parameter Measurement of Slide Valves

Chen Jihong Ning Dechu Liang Jiancheng

(Department of Precision Machinery and Instrumentation)

### Abstract

In this paper, the problems in measuring the parameters of grinding-in of the slide valve are theoretically analysed. The mathematical model of flow-displacement curve is deduced. A new way of fitting the theoretical formula to eliminate the errors in data processing is put forward. To estimate the radius of fillets and the radial clearance is especially important to the control of the machining quality of slide valve.

**Key words** measuring, mathematical model, slide valve, grinding-in parameters