轻工学报® 2018 年 3 月 第 33 卷 第 2 期
JOURNAL OF LIGHT INDUSTRY Vol. 33 No. 2 Mar. 2018

**引用格式**:尚宣,何世权. 基于 Chebyshev 多项式拟合的调节阀阀芯设计方法[J]. 轻工学报,2018,33(2):102 - 108.
**中图分类号**:TH134 **文献标识码**:A
**DOI**:10.3969/j.issn.2096 - 1553.2018.02.015
**文章编号**:2096 - 1553(2018)02 - 0102 - 07

# 基于 Chebyshev 多项式拟合的调节阀阀芯设计方法

## Design method of regulating valve spool based on Chebyshev polynomial fitting

尚宣,何世权
SHANG Xuan, HE Shiquan

南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 211816
*College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing* 211816, *China*

**关键词**:
调节阀阀芯设计;流量特性;Chebyshev 多项式拟合

**Key words**:
regulating valve spool design; flow characteristic; Chebyshev polynomial fitting

**摘要**:基于调节阀阀芯在不同流量特性下均拥有抛物线外形轮廓的特性,提出了一种基于 Chebyshev 多项式拟合的调节阀阀芯设计方法:根据调节阀流量系数与流通面积的关系,运用 Chebyshev 曲线对调节阀阀芯等值面上的点进行拟合,得到阀芯的曲线方程. 对阀芯曲线用 Fluent 等软件进行数值模拟和实验验证,结果表明,阀芯设计的流量特性偏差为 1.9% ~ 14.1%,符合标准 IEC 60534 - 2 - 4:1989 在 10.0% ~ 18.4% 范围的规定,设计方法是切实可行的.

**收稿日期**:2017 - 03 - 08

**作者简介**:尚宣(1994—),男,安徽省马鞍山市人,南京工业大学硕士研究生,主要研究方向为特种阀门.

**通信作者**:何世权(1966—),男,安徽省肥东县人,南京工业大学教授,博士,主要研究方向为化工过程机械、阀门与流体密封和流体机械.

**Abstract**: For the characteristics of the control valve spool in different flow characteristics with parabola contour, a design method of regulating valve spool based on Chebyshev polynomial fitting was proposed. According to the relationship between the flow coefficient and the flow area, the curve equation of spool was aquired by fitting the point on the spool contour which used the Chebyshev curve fitting method and then the Fluent was used for software simulation and experimental verification of the designed spool curve. The results showed that the deviation of the flow characteristic of the spool design was 1.9% ~14.1%, which conformed to the standard IEC 60534-2-4:1989 in the range of 10.0% ~18.4%. The design method was practical and feasible.

## 0 引言

调节阀也称为控制阀,可以利用相关的执行机构来调节流体的流量,主要用于工业过程控制,在现代工业发展中被广泛使用. 现代工业对调节阀的性能提出了严格的要求,如何更好地设计调节阀以满足不同工况下所需的流量系数是当今调节阀研究的重点之一. 阀芯是影响阀门流量系数的重要因素之一[1],如何更好地设计阀芯成为阀门性能提升的关键.

国内外学者关于阀芯的设计和生产制造早有研究. 国外前期多利用大量实验积累的经验数据和 CFD 模拟来设计,后期主要利用流量实验来设计. 目前国内阀芯的设计生产主要是通过流量实验对阀芯进行反复修正实现的. 对于如何得到阀芯,成鹏等[2]采用的包络线法、王渭等[3]采用的相似法得到的阀芯,均太过复杂,不利于加工制造;陈兵等[4]通过能量损失得到的阀芯,只能在特定条件下使用,无法推广应用.

鉴于此,本文拟利用调节阀阀芯外形具有的抛物线特性,将采用试凑法[5]得到的阀芯上的点利用数值分析方法[6]计算出阀芯曲线方程,通过数值模拟与实验测定其流量特性是否符合标准,验证该设计方法的可行性,以期为调节阀阀芯的设计及后续生产和加工提供一种新的思路.

## 1 调节阀基本特性

### 1.1 阀芯流量与外形特性

调节阀的流量特性是指流体流过调节阀时相对流量和相对行程之间的函数关系,即

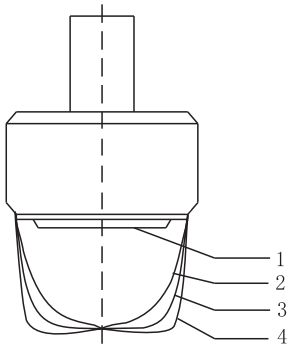
$$q=\frac{Q}{Q_{\max}}=f\left(\frac{L}{L_{\max}}\right)=f(l)$$

式中,$Q$ 为阀门某开度下的流量,$Q_{\max}$为阀门最大流量,$L$ 为阀门某开度行程,$L_{\max}$为阀门最大流量行程.

不同的流量特性对应着不同的阀芯线型,主要有快开型、直线型、抛物线型和等百分比型(如图 1 所示). 4 种线型中,快开型的设计类似截止阀,一般无流量控制能力,因此除快开型之外,其余 3 种阀芯线型具有部分或全部的抛物线线型特征.

### 1.2 调节阀流阻系数和流量系数

调节阀的流量系数可以通过阀瓣位移和介质流量大小确定,而介质流量大小取决于阀门所处工况和阀门阻力[7]. 调节阀的阻力主要来自于阀芯与阀座之间的流通面积. 阀门流阻系数公式如下:




1.快开型 2.直线型 3.抛物线型 4.等百分比型

图 1 调节阀阀芯线型示意图

Fig. 1 The shetch map of regulating valve spool linear schematic

$$\zeta = \frac{2\Delta p}{\rho v^2} \qquad ①$$

式中，$\zeta$ 为阀门流阻系数，$\Delta p$ 为阀门进出口压力差，$\rho$ 为介质密度，$v$ 为介质平均流速.

由阀门流量特性可以得知调节阀的液体流量公式为

$$q_v = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} A_r \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \qquad ②$$

式中，$q_v$ 为液体流量，$A_r$ 为调节阀入口处流通面积.

一个管路系统的液体流量取决于管路的总阻力，因为系统是变化的，所以相同开度下调节阀不可能总保持相同的流量系数值. 工业生产中为了更好地操控液体流量，定义调节阀流量系数与流量之间的关系如下式[5]：

$$q_v = K_v \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \qquad ③$$

式中，$K_v$ 为流量系数.

联立①②③式可得

$$K_v = A_r \sqrt{\frac{\rho v^2}{\Delta p}}$$

因为验证阀芯设计是否符合标准，只需要知道阀芯的设计流量系数与工况所需流量系数之间的偏差是否满足要求即可，故可以通过测量调节阀进出口之间的压降得知流量系数大小.

## 2　调节阀阀芯设计

### 2.1　等值面曲线的确定

调节阀的流通面积如图 2 梯形 $MNPQ$ 部分所示，其中流通面积的底线 $MQ$ 是阀座的内边周长，顶线 $NP$ 是对应阀行程的阀芯圆周长[7]，此截面对介质流通起到了主要的限制作用.

当给定阀芯位置时，要保证调节阀的开启，就要求介质通过的最狭窄的面积应等于 $A_r$. 按 $\theta$ 与 $x$ 绘制的等值面曲线如图 3 所示，从 $M$ 点以不同的角度引若干射线，就能得到具有侧表面积为等值面积的截锥体所形成的等值面曲线.

截锥体的侧表面积即流通面积，为

$$A_r = \frac{\pi l(d + D)}{2} \qquad ④$$

式中，截锥体母线长 $l = MN$，$D$ 为下遮盖直径，$d$ 为阀芯直径.

根据数学关系，由图 3 可得

$$l = \frac{D - d}{2\cos\theta} \qquad ⑤$$

$$l = \sqrt{x^2 + y^2} \qquad ⑥$$

$$\cos\theta = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \qquad ⑦$$

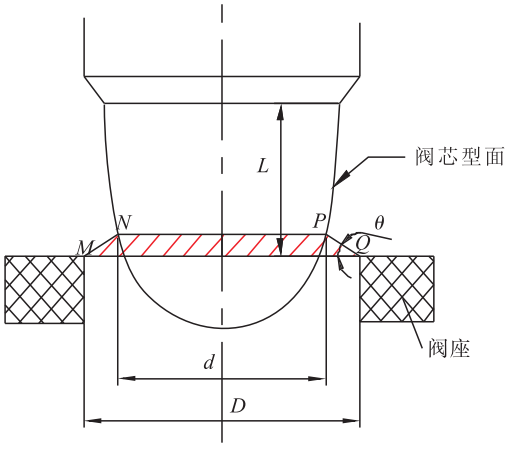



图 2　阀芯型面

Fig. 2　Spool-shaped surface

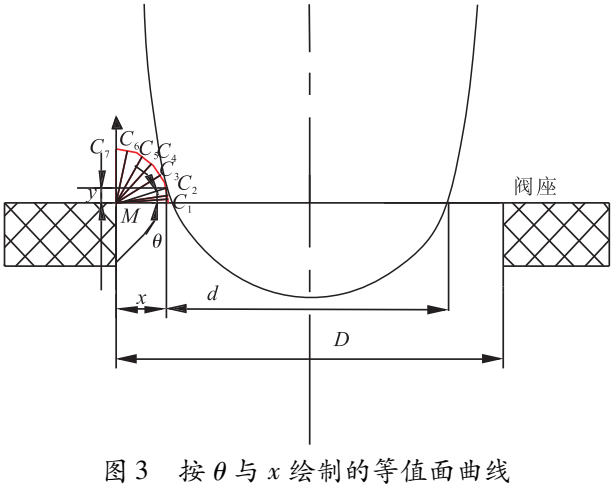



图 3　按 $\theta$ 与 $x$ 绘制的等值面曲线

Fig. 3　The surface curve plotted by $\theta$ and $x$

由式④—⑦得等值面曲线

$$y^2 = \left(\frac{A_r}{\pi}\right)^2 \frac{1}{(D-x)} - x^2 \qquad ⑧$$

## 2.2 阀芯线计算

由于等值面上的点反映的是阀芯在某一开度下流通面积与流量系数的关系,故通过截取调节阀在不同开度等值面上的点,便可在坐标系中得出如下关系式:

$$f(A_r) = (x_i, y_i)$$

式中,$x_i$,$y_i$ 为不同开度下等值面上的点,与式⑧中某一开度下的点的坐标对应.

阀芯最大开度为 100%,超过 100% 开度的等值面的阀芯可用其他方法近似替代,因此阀芯设计可分为两部分进行. 由于不同流量特性对应的阀芯线型均具有抛物线的特性,所以其中一部分可用 Chebyshev 多项式拟合来完成;另外一部分可根据不同流量特性利用不同的光滑曲线来设计. 等值面上低次 Chebyshev 多项式的基函数在最小二乘拟合中有很好的效果,可利用此数值分析方法对坐标$(x_i, y_i)$进行拟合,曲线拟合原理如图 4 所示.

多项式基坐标为

$$t_i = \frac{2x_i - (m+n)}{m-n}$$

$$m = x_{max} \quad n = x_{min} \quad T_0(t) = 1$$

$$T_1(t) = t \quad T_2(t) = 2t^2 - 1$$

对基坐标作变换处理,即

$$(T_i, T_k) = \sum_{i=1}^{m} T_i(t_i) T_k(t_i)$$

$$(y, T_k) = \sum_{i=1}^{m} y T_k(t_i)$$

可得阀芯方程为

$$y = c_0 T_0(t) + c_1 T_1(t) + c_2 T_2(t) \qquad ⑨$$

$$x \geqslant x_{min}$$

其中,$t = \dfrac{2x - (m+n)}{m-n}$.

在设计阀芯时,应尽可能地让调节阀的阀芯平滑,以减小流阻系数,降低涡流的产生,提高调节阀性能. 因此对于调节阀阀芯底部剩余部分的设计应采用圆弧平滑连接[8]. 假设式⑨的变化形式为 $y = ax^2 + bx + c$,当 $x \leqslant x_{min}$ 时,利用数学公式进行推导可得出剩余部分,即阀芯底部,如图 5 所示.

直线特性阀芯剩余部分方程为

$$f(A_r) = x^2 + \left(y - \frac{x_{min}}{2ax_{min} + b} - y_{max}\right)^2 = x_{min}^2 + \left(\frac{x_{min}}{2ax_{min} + b}\right) \qquad ⑩$$

抛物线和等百分比特性阀芯剩余部分方程为

$$f(A_r) = \frac{x_{min}^2 + 4x_{min}y_{max}x^2}{x_{min}^2} + 4y^2 = (x_{min} + 2y_{max})^2 \qquad ⑪$$

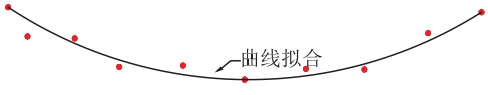



图 4 Chebyshev 曲线拟合原理示意图

Fig. 4 The sketch map of Chebyshev curve fitting principle

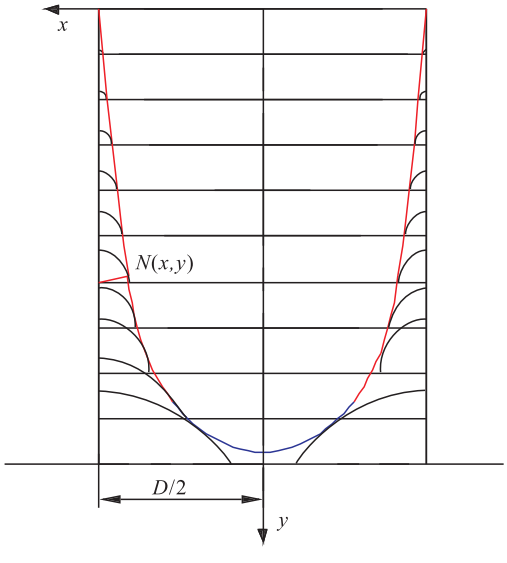



图 5 阀芯型面形成示意图

Fig. 5 The sketch map formed of spool-shaped surface

对于单座式调节阀可以联立式⑧—⑪进行阀芯的求解,由于公式中只给出了阀芯的一半,根据阀芯的对称性,其另外一半绕对称轴 $y$ 轴旋转即可得到完整的阀芯.

## 3　验证实验

由于直线流量特性加工方便,本文将选取直线流量特性阀芯进行数值模拟和实验验证.根据工况需求,设计 $DN=50$ mm 的具有直线流量特性的单通直座调节阀,可调比为 30,额定行程 65 cm,介质为 20 ℃的水.参照文献[5]取阀门在 10%,20%,30%,…,100% 开度下的流通面积,根据式⑧进行计算,结果见表 1 和表 2.

表 1　直线流量特性阀芯线数据

Table 1　Linear flow characteristics spool line data

| 开度 /% | 流通面积 $A_r$/cm$^2$ | 横坐标 $x$/mm | 纵坐标 $y$/mm |
|---|---|---|---|
| 10 | 1.03 | 24.36 | 6.50 |
| 20 | 2.06 | 23.72 | 13.00 |
| 30 | 3.09 | 23.02 | 19.50 |
| 40 | 4.13 | 22.28 | 26.00 |
| 50 | 5.22 | 21.45 | 32.50 |
| 60 | 6.44 | 20.52 | 39.00 |
| 70 | 7.92 | 19.50 | 42.34 |
| 80 | 10.20 | 18.00 | 49.12 |
| 90 | 14.05 | 15.00 | 55.22 |
| 100 | 19.63 | 10.00 | 60.31 |

表 2　Chebyshev 多项式基坐标变换值

Table 2　Chebyshev polynomial base coordinate transformation values　　mm

| $x$ | $t$ | $T_0(t)$ | $T_1(t)$ | $T_2(t)$ |
|---|---|---|---|---|
| 24.36 | 1.000 0 | 1 | 1.000 0 | 1.000 0 |
| 23.72 | 0.910 8 | 1 | 0.910 8 | 0.626 5 |
| 23.02 | 0.813 4 | 1 | 0.813 4 | 0.323 2 |
| 22.28 | 0.710 3 | 1 | 0.710 3 | 0.009 1 |
| 21.45 | 0.594 7 | 1 | 0.594 7 | −0.292 7 |
| 20.52 | 0.465 2 | 1 | 0.465 2 | −0.567 1 |
| 19.50 | 0.323 1 | 1 | 0.323 1 | −0.791 2 |
| 18.00 | 0.114 2 | 1 | 0.114 2 | −0.973 9 |
| 15.00 | −0.303 6 | 1 | −0.303 6 | −0.815 7 |
| 10.00 | −1.000 0 | 1 | −1.000 0 | −1.000 0 |

将表 1 和表 2 中的数据代入式⑨⑩,整理可以得到阀芯方程组为

$$\begin{cases} y=-0.411\ 8x^2+10.911\ 6x-13.501\ 4 \\ \quad (10\leqslant x\leqslant 25) \\ x^2+(y-51.572\ 52)^2=113.968\ 8 \\ \quad (0\leqslant x\leqslant 10) \end{cases}$$

### 3.1　数值模拟验证

根据表 1 中的数据绘制出 $DN=50$ mm 的直线流量特性下调节阀结构尺寸图,见图 6.

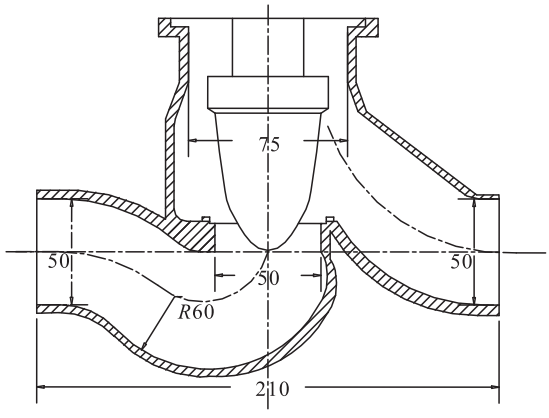



图 6　调节阀结构尺寸图/mm

Fig. 6　Regulating valve structure size

利用 ANSYS ICME CFD 软件[10-11]对设计出的调节阀阀芯进行网格划分,然后导入Fluent 进行模拟计算.选择湍流模型为标准 $k-\varepsilon$ 模型,标准壁面函数,流通介质为 20 ℃的水.阀门左边设置为入口边界条件(为了防止出现阻塞流影响阀门数值模拟结果,阀门入口流速的设计不应太大),入口流速为 1.2 m/s.阀门右边设置为出口边界条件,出口压力为 0.1 MPa.用 SIPME 算法二阶迎风格式求解,残差收敛精度小于 $10^{-5}$,三维流体模型网格划分见图 7.

保持阀门入口速度和出口压力不变,调节阀门开度,通过模拟计算得到阀门各个开度下的压降大小见表 3.

阀门在小开度时流通面积较小,从而导致流阻系数过大.随着开度的增加,由表 1 可知,

图 7 三维流体模型网格划分

Fig. 7 Three-dimensional fluid simulation of meshing

表 3 直线流量特性阀芯压降模拟计算结果

Table 3 Straight line characteristics of spool pressure drop simulation results

| 开度/% | 压降/Pa | 开度/% | 压降/Pa |
|---|---|---|---|
| 10 | 124 025.85 | 60 | 6 470.57 |
| 20 | 59 190.79 | 70 | 4 825.86 |
| 30 | 28 763.17 | 80 | 3 710.90 |
| 40 | 17 406.24 | 90 | 2 984.01 |
| 50 | 10 990.05 | 100 | 2 633.84 |

流通面积以近似抛物线形式递增. 因此阀门流阻系数的改变在逐渐地变缓,由式①可以得出压降与流阻系数成正比,因此调节阀压降应呈抛物线形式. 由表 3 可以看出,随着开度的增加,压降类似抛物线形式下降,其特性符合调节阀直线流量压降特性.

### 3.2 实验验证

根据模拟条件并按照 JB/T 5296—1991 标准[11],选用 20 ℃的水为介质对调节阀进行实验验证,测量进出口处的压力,得到压降. 数值模拟和实验流量系数对比图见图 8.

由不同开度流量系数与最大流量系数比值可知,调节阀设计流量特性符合直线流量特性的特征,随着调节阀开度的变化,调节阀设计流量系数特性在工况所需流量系数特性处上下波动. 由此可知,通过 Chebyshev 多项式拟合阀芯点所得到的阀芯线对流量系数的调节可基本满足直线流量系数特性,当保持进口流速不变的情况下,其流量系数偏差值见表 4.

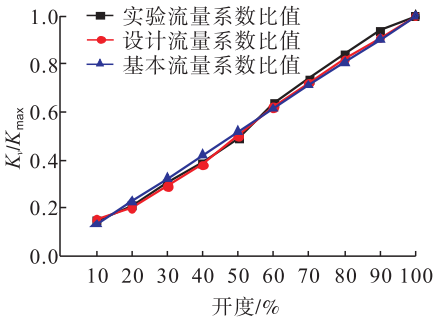



图 8 流量系数比值对比

Fig. 8 Flow coefficient ratio comparison chart

表 4 流量偏差对比

Table 4 Comparison of flow deviations %

| 开度 | 允许偏差[12] | 设计偏差 |
|---|---|---|
| 10 | 18.40 | 14.10 |
| 20 | 17.23 | -5.10 |
| 30 | 16.10 | -4.60 |
| 40 | 15.04 | -5.50 |
| 50 | 14.05 | -3.40 |
| 60 | 13.13 | 6.08 |
| 70 | 12.26 | 6.13 |
| 80 | 11.46 | 6.50 |
| 90 | 10.70 | 7.39 |
| 100 | 10.00 | 1.90 |

由表 4 可知,设计的流量系数特性与工况所需的流量系数特性之间的偏差为 1.9% ~ 14.1%.

## 4 结论

本文基于调节阀阀芯在不同流量特性下均拥有抛物线外形轮廓的特性,提出了一种基于 Chebyshev 多项式拟合的调节阀阀芯设计方法. 经数值模拟和实验验证,用该方法设计的阀芯流量特性偏差为 1.9% ~14.1%,符合标准 IEC 60534 - 2 - 4:1989[12] 设计流量系数特性与基本流量系数特性偏差在 10.0% ~18.4% 范围的规定. 可见,本文阀芯的设计方法是切实可行的.

该阀芯设计方法较为简单,可操作性强,降

低了阀芯设计的工作量,为阀芯设计提供了新的思路,具有一定的工程意义.

**参考文献:**


[1] 吴国熙. 调节阀使用与维修[M]. 北京:化学工业出版社,1999.

[2] 成鹏,李清廉,李春. 基于包络线法的调节阀阀芯型面改进设计方法[J]. 流体机械,2013,41(10):53.

[3] 王渭,陈凤官,明友,等. 直通单座调节阀柱塞式阀芯型线设计方法[J]. 流体机械,2016,44(5):37.

[4] 杨明,安培文. 调节阀柱塞型阀芯形面数学模型推导[J]. 流体机械,2009,37(10):34.

[5] 陆培文. 调节阀实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[6] 林成森. 数值分析[M]. 北京:科学出版社,2005.

[7] 张双德,张希恒,赵卿. 直通单座调节阀阀芯形面优化设计[J]. 阀门,2010(4):5.

[8] 张双德. 直通单座调节阀阀芯型面优化设计[D]. 兰州:兰州理工大学,2010.

[9] 韩占中. FLUENT——流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009.

[10] 任小龙,谭东杰,李柏松,等. 基于 CFD 方法的国产化调节阀结构优化设计[J]. 油气储运,2016,35(2):176.

[11] 中华人民共和国机械电子部. 通用阀门流量系数和流阻系数试验:JB/T 5296—1991[S]. 北京:机械工业出版社,1991.

[12] 中国国家标准化管理委员会. 工业过程控制阀 第 2—4 部分:流通能力 固有流量特性和可调比:GB/T17213. 10—2005/IEC 60534 - 2 - 4:1989[S]. 北京:中国标准出版社,2005.