



引用格式:刘磊,何世权. 调节阀阀芯型线的优化设计与流阻分析[J]. 轻工学报,2017,32(3):96-101.

中图分类号:TH134 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.015

文章编号:2096-1553(2017)03-0096-06

调节阀阀芯型线的优化设计与流阻分析

Optimal design and flow resistance analysis of regulating valve spool type line

刘磊,何世权

LIU Lei, HE Shi-quan

关键词:
调节阀; 阀芯型线; 数值模拟; 流阻

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 University of Technology, Nanjing 211816, China

Key words:
regulating valve; spool type line; numerical simulation; flow resistance

摘要:针对传统的调节阀阀芯型线设计无法有效减小压降的问题,采用正交多项式作最小二乘拟合的方法对型线进行优化,得到新的曲线方程,将该方程提取到 AutoCAD 中设计阀芯型线.数值模拟结果表明,新设计的阀芯型线的流阻系数比原来下降 35%,且进出口压降减小,实现了节能的目的.

收稿日期:2016-07-09

作者简介:刘磊(1990—),男,河南省信阳市人,南京工业大学硕士研究生,主要研究方向为特种阀门开发.

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、流体机械.

Abstract: In order to solve the problem that type line conventional valve spool design can't effectively reduce pressure drop. Optimization of the profile of the orthogonal polynomials for fitting the least squares method was used to obtain a new curve equation, and then a new curve equation into AutoCAD design type lines was extracted. Numerical simulation results showed that the flow resistance coefficient of the newly designed molded lines decreased by 35% than the original, and import and export reduced pressure dropped, to achieve energy saving purposes.

0 引言

调节阀也称控制阀,其主要作用是:在过程控制中利用相关的执行机构来调节流体的流量^[1]。相比于截止阀,它具有流量更易控制、开度更易调节等优势,所以常用在工业控制系统中。

随着工业的日益现代化,对调节阀的设计提出了新的要求,例如节能。调节阀的节能措施主要有:采用低阻抗阀门;提高阀门的密封性能;使用电动执行机构来代替其他种类的执行机构^[2]等。此外,通过优化阀芯型线来减小压力损失、降低流阻系数,也可使调节阀达到节能的效果^[3]。

阻力大小是衡量一个阀门是否合格的标志,阀门的阻力系数对整个管道系统有着重要的影响^[4]。阀门的阻力影响整体的系统性能,无论增大进口的压力还是降低出口的压力,都会影响用户的使用效率。一般地,在相对较短的管道系统中,阀门的压降是影响能量消耗的重要因素。同时,阻力也是阀门产生噪声的原因之一,间接地反映了流场内部的振动强弱。从经济和噪声两方面考虑,阀门的阻力系数越小越好,这样有利于节能环保和降噪,便于实现对阀门的精细化设计和整个管道系统对节能、降噪要求的有效融合^[5]。

随着计算机技术和计算流体力学的发展,出现了许多 CFD 仿真模拟软件,本文用 ICEM CFD 软件对流道模型进行网格划分和边界定义,然后将网格文件导入 FLUENT 软件,进行调节阀内部流场模拟,再利用模拟所得数值进行最小二乘法运算,从而实现阀芯型线的优化设计。

1 调节阀流量特性与型线分类

1.1 调节阀流量特性分类

调节阀的流量特性是指流体流过调节阀时的相对流量与相对行程之间的函数关系,表示为

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

式中: Q 为行程在 L 时的流量, Q_{\max} 为阀的最大流量, L 为某开度时的行程, L_{\max} 为最大流量时的行程。

根据调节阀进口和出口两端的压降,可以将其流量特性分为固有流量特性和工作流量特性,其中固有流量特性也被称为理想流量特性,是在进口、出口两端压降恒定时测定的。

1.2 阀芯型线分类

不同的流量特性曲线对应不同的阀芯型线。理想流量特性曲线大致可以分为快开流量特性曲线、直线流量特性曲线、抛物线流量特性曲线和等百分比流量特性曲线 4 种情况^[6](见图 1),每条理想流量特性曲线都对应着不同的阀芯型线,相对应的阀芯型线也分为 4 种(见图 2)。其中,型线 1 对应快开流量特性曲线,型线 2 对应直线流量特性曲线,型线 3 对应抛物线流量特性曲线,型线 4 对应等百分比流量特性曲线。

2 调节阀阀芯型线设计

2.1 直线流量特性

因为直线流量特性的调节阀在调节过程中具有放大系数不变、调节灵敏度好、不会出现振荡现象的优点,故本文主要针对直线流量特性的调节阀进行阀芯型线设计。直线流量特性是

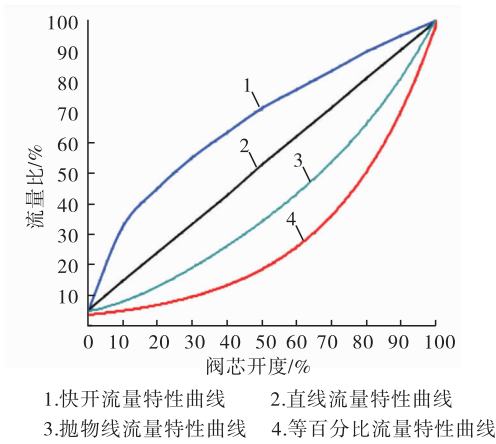


图1 理想流量特性曲线

Fig.1 Ideal flow characteristic curve

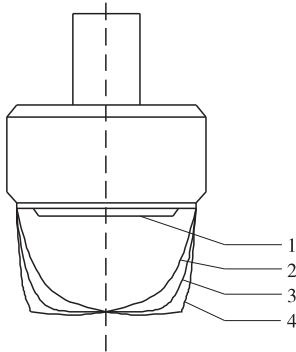


图2 阀芯型线

Fig.2 Spool type line

指在阀芯运动过程中某一位置相对流量的变化与该位置的相对行程是正比关系,即

$$dq = K_{v2} dl$$

两边同时积分得

$$q = K_{v2} l + C$$

边界条件 $L=0$ 时, $Q = Q_{\min}$; $L=L_{\max}$ 时, $Q = Q_{\max}$.

求解得直线流量特性的函数关系为

$$q = \frac{R-1}{R} l + \frac{1}{R}$$

2.2 抛物线型线设计及曲线方程

从图1和图2可以看出,直线流量特性的调节阀其阀芯型线对应的型线为抛物线. 根据工况需要,用 Auto CAD 绘制阀芯型线的样条曲线,并且基于中心线建立坐标轴,测出任意不同位置对应的半径. 阀芯型线类似于抛物线,将所

测得的数据按照二次抛物线的样式,采用正交多项式作最小二乘法拟合^[7],即可得到一条新的阀芯型线的样条曲线. 最小二乘拟合数据如图3所示.

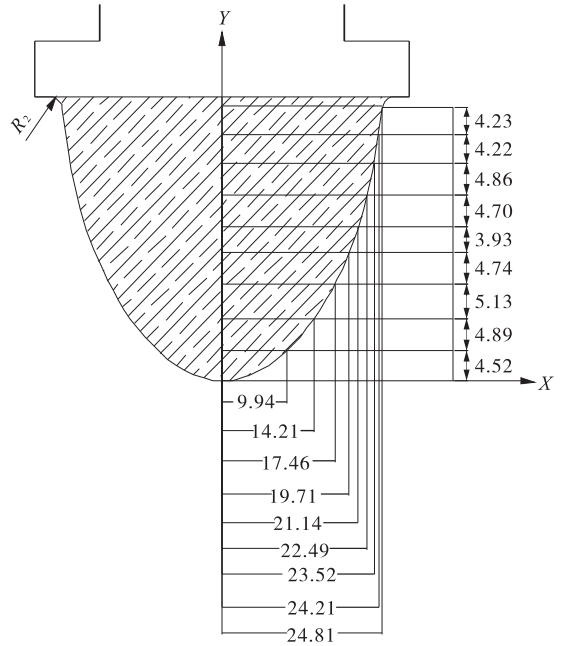


图3 最小二乘拟合数据/mm

Fig.3 Least square fitting data

根据正交多项式的算法^[8],给出其中一组正交基底,即

$$\begin{cases} P_0(x) = 1 \\ P_1(x) = (x - \alpha_1)P_0(x) \\ P_2(x) = (x - \alpha_2)P_1(x) - \beta_1 P_0(x) \end{cases}$$

这样可以求得新拟合曲线如下相关系数:

$$\alpha_0^* = \frac{\sum_1^{10} y_i P_0(x_i)}{\sum_1^{10} [P_0(x_i)]^2} = \frac{\sum_1^{10} y_i}{10} = 20.985$$

$$\alpha_1^* = \frac{\sum_1^{10} x_i [P_0(x_i)]^2}{\sum_1^{10} [P_0(x_i)]^2} = \frac{\sum_1^{10} x_i}{10} = 17.749$$

$$P_1(x) = x - 17.749$$

$$\alpha_1^* = \frac{\sum_1^{10} y_i P_1(x_i)}{\sum_1^{10} [P_1(x_i)]^2} = \frac{895.196}{551.344} = 1.624$$

$$\alpha_2 = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i [P_1(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^{10} [P_1(x_i)]^2} = \frac{4640.662}{551.344} = 8.417$$

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^{10} [P_1(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^{10} [P_0(x_i)]^2} = \frac{551.344}{10} = 55.134$$

$$P_2(x) = (x - 8.417)(x - 17.749) - 55.134 = x^2 - 26.166x + 94.259$$

$$\alpha_2^* = \frac{\sum_{i=1}^{10} y_i P_2(x_i)}{\sum_{i=1}^{10} [P_2(x_i)]^2} = \frac{2\ 696.464}{30\ 753.069\ 2} = 0.087\ 7$$

所以,新的拟合曲线为

$$y = \alpha_0^* P_0(x) + \alpha_1^* P_1(x) + \alpha_2^* P_2(x) = 0.087\ 7x^2 - 0.684x + 0.664$$

用正交多项式做最小二乘法拟合,得到的拟合曲线方程准确可靠,其拟合精度达到 0.01 mm,可以对原有的曲线进行修正。

2.3 阀芯型线的优化设计与加工

根据上述用正交多项式做最小二乘法得到的新的拟合曲线方程,计算出阀芯型线上各点坐标,将这些新的坐标数据提取到 AutoCAD 中,并对相关坐标加以修正,绘制出新的阀芯型线,如图 4 所示。

对于机械加工而言,这样的设计方法使阀芯加工有一定困难。但是可以利用 Master Cam X9 软件包含的 CAD 模块绘出新设计的阀芯

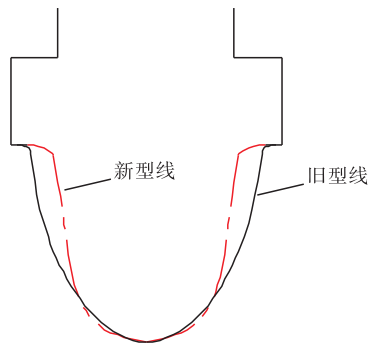


图 4 新旧阀芯型线对比

Fig. 4 Comparison of original and new spool type line

型线,绘制完成之后选择进入加工环境,接着设定相关参数进行模拟加工,可以很直观地看到整个过程^[9]。Master Cam 提供 400 种以上的后置处理文件,适用于各种类型的数控系统。根据机床的实际结构编制后置处理文件,所编译的 NCI 文件经后置处理后便可生成加工程序。

生成的加工程序可以视加工对象之具体情况进行修改和微调,然后导入 FANUC 系统数控机床,完成对阀芯型线的加工。

3 调节阀流阻分析

3.1 阀门阻力系数计算

阀门阻力系数通过试验来确定,同一个阀门在不同开度时的阻力系数也不一样。假设被测阀门的进口与出口之间的压降为 $\Delta P/\text{Pa}$,流体密度为 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$,流体速度为 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$,阻力系数 K 为无量纲系数,则 $\Delta P = \rho v^2 K/2$,即

$$K = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} \quad (1)$$

因此,要想准确测出阻力系数 K ,关键在于先得到准确的进出口压降值 ΔP 。

3.2 阀芯的数值模拟

利用 Ansys ICFM CFD 软件,对新阀芯的调节阀阀体进行网格划分,然后导入 Fluent 软件。选择标准 $k-\varepsilon$ 模型为湍流模型;选择标准壁面函数;流道内介质为 20 °C 的水;阀门入口为速度入口边界, $v = 1.2 \text{ m/s}$;阀门出口为压力出口边界,为 0.1 MPa;采用 SIMPLE 算法二阶迎风格式求解速度和压力的耦合方程。求解完成后,对运算结果进行后处理,可以得到相关的压力云图(见图 5)和速度云图(见图 6)。

由图 5 可知,从阀门的进口到阀芯部位为高压区域,压力很大;阀芯到出口为低压区域,压力较小。整个区域不存在局部压力较大的区域,压力分布较为均匀。

由图 6 可知,阀门流道内部的流场运动较

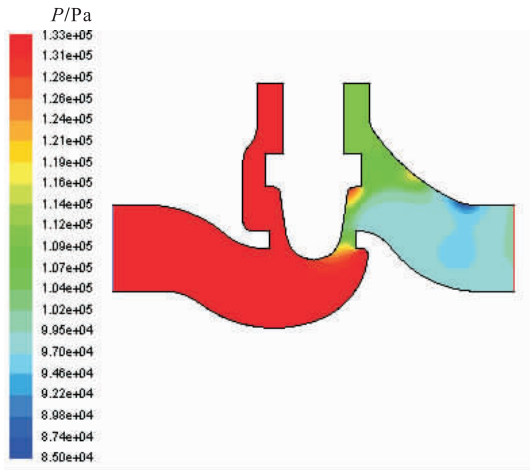


图5 阀芯开度60%压力云图

Fig. 5 Pressure distribution at 60% valve opening

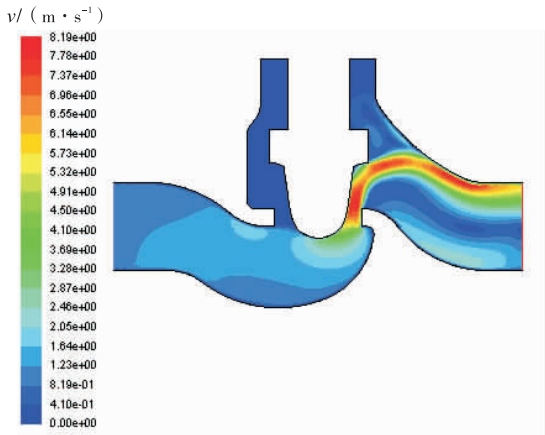


图6 阀芯开度60%速度云图

Fig. 6 Speed distribution at 60% valve opening

为复杂,流速较高的区域位于阀芯出口一侧.流速较高区域后移至阀芯右侧,减弱了高速流体对阀芯的冲刷,有利于延长阀芯的使用寿命.从整体看来,从阀门的进口段一直到阀门的出口段,流速呈带状分布.特别是在阀芯右侧,既有高流速区,也有低流速区,呈对称分布.

新设计的阀芯在全开状态下,改变其入口处介质的流动速度,并且在不改变出口边界条件的状况下进行数值模拟,得到进、出口之间的压降值,见表1.

根据表1数值模拟得到的压降值,利用公式①,可以计算出阻力系数 $K \approx 4.82$.

表1 不同入口介质流速下的压降

Table 1 Pressure drop of various medium velocity

入口处介质流速/($m \cdot s^{-1}$)	出口处压强/Pa	压降/Pa
1.0	1×10^5	2 380.22
1.2	1×10^5	3 431.72
1.4	1×10^5	4 598.20
1.6	1×10^5	6 184.46
1.8	1×10^5	7 728.13
2.0	1×10^5	9 560.62
4.0	1×10^5	38 152.42

在进口速度为 $v = 1.2 m/s$,出口压力为 $0.1 MPa$ 时,对新旧两种阀芯结构进行数值模拟,得到进口、出口压降曲线如图7所示.

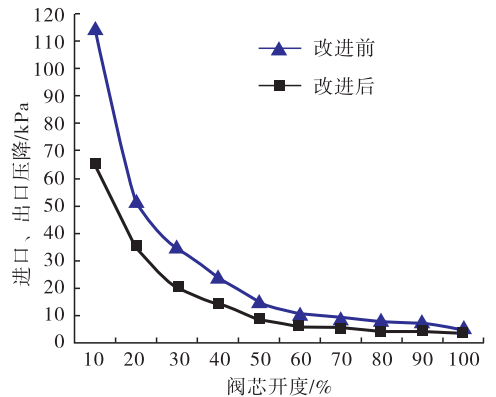


图7 改进前后进口、出口压降曲线图

Fig. 7 Import and export pressure drop curve original and imparased valve

从图7可以看出,阀门的进口、出口压降随着开度的增大而逐渐减小,最后趋于平缓.对比改进前后的两条曲线发现,在刚开始时,相同开度的情况下,压降的变化下降比较明显;开度增加到60%以后,压降的变化幅度逐渐减缓.

总体来看,阀芯改进后压降的减小比较明显.分析其原因,改进后的阀芯,能够更好地让流体沿着曲线平稳地向前流动.这能够在阀门的开关过程中,减小流体对阀芯的冲刷,起到保护阀芯的作用,从而延长阀门的使用寿命.

根据公式①可以计算出,在全开的状态下,改进前后阀门的流阻系数(见表2).经过计算,

表2 阀芯改进前后的压降和流阻系数

Table 2 Pressure drop and flow resistance coefficient of original and improved spool

阀芯	入口流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	压降/Pa	流阻系数
改进前	1.2	5 321.25	7.48
改进后	1.2	3 431.72	4.82

新阀芯曲线的流阻系数比改进前下降 35%,且进出口压降有效降低。

3.3 试验验证

按照 JB/T 5296—1991 标准^[10],以 20 °C 水为介质对改进后的调节阀进行流阻试验,结果见表 3。

表3 阀芯改进后调节阀试验结果

Table 3 Regulating valve test results of spool after improvement

序号	入口流速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流量 /($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	压降 /Pa	流阻 系数
1	1.00	18.12	2 310.32	4.63
2	2.00	36.33	9 410.24	4.71
3	3.00	54.42	21 380.12	4.76

由以上试验结果可以看出,调节阀的阀芯改进后,数值模拟结果与试验结果非常接近,可以认为两结果相一致,这表明利用数值分析设计阀芯的方法是可行的。

4 结论

本文针对传统的调节阀阀芯型线设计无法有效减小压降的缺点,提出了用最小二乘法设计型线的方法,并使用 Ansys ICEM CFD 软件进行数值模拟,得到如下结论。

1) 调节阀不同的理想流量特性曲线对应着不同的阀芯型线。若要使工作流量特性接近理想流量特性,可以利用这种对应关系,对阀芯型线进行大致方向上的确定,这样有利于缩短整个设计周期。

2) 利用直线流量特性中流量与开度的关

系,可以推导出两者之间的数学关系式。

3) 针对绘制的阀芯型线,选择采用正交多项式做最小二乘拟合,对曲线进行修正。利用 FANUC 系统数控机床完成对新阀芯的加工。

4) 对新旧两种阀芯进行数值分析,设置多种进口条件。模拟结果表明,新阀芯的流阻系数比旧阀芯下降 35%。

5) 对新阀芯进行试验验证,利用试验数据得到的流阻系数与数值模拟得到的基本一致,证明了对阀芯型线用正交多项式做最小二乘拟合的可行性。

参考文献:

- [1] 龚飞鹰,刘传君,何衍庆. 控制阀实用手册 [M]. 北京:化学工业出版社,2015.
- [2] 明赐东. 调节阀应用 1000 问 [M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [3] 张文栋. 论如何降低流阻系数加强阀门的节能作用 [J]. 科技传播,2010(16):106.
- [4] 陆培文. 调节阀应用技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [5] 周志杰,沈正帆,种道彤. 船舶管路阀门阻力系数试验研究 [J]. 中国科技论文,2015,10(10):1197.
- [6] 尚照辉. 阀芯结构对节流截止阀性能影响的研究 [D]. 杭州:浙江理工大学,2012.
- [7] 崔硕,晏宇,胡旭. 调节阀阀瓣型线拟合 [J]. 阀门,2010(5):38.
- [8] 林成森. 数值分析 [M]. 北京:科学出版社,2006.
- [9] 胡泽凯. 调节阀阀瓣型线的加工 [J]. 阀门,2014(3):14.
- [10] 中华人民共和国机械电子工业部. 通用阀门流量系数和流阻系数的试验方法: JB/T 5296—1991 [S]. 北京:机械工业出版社,1991.