



引用格式:王刚,何世权.立式升降式止回阀的流道优化设计与流阻分析[J].轻工学报,2016,31(5):75-82.

中图分类号:TH134 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2016.5.013

文章编号:2096-1553(2016)05-0075-08

立式升降式止回阀的流道优化设计与流阻分析

Optimal design and fluid resistance analysis of flow channel of vertical lift check valve

王刚,何世权

WANG Gang, HE Shi-quan

关键词:

立式升降式止回阀;
流道优化设计;流阻
分析

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:

vertical lift check valve;
flow channel optical
design; fluid resistance
analysis

摘要:对立式升降式止回阀流道型线进行优化设计,采用 Granville 双参数平方多项式回转体流线型对阀瓣型线进行设计,选用 Granville 尾部型线对导流体型线进行设计.通过解析计算法、数值模拟法和试验验证对优化设计的新流道进行流阻分析,结果表明:新流道的流阻系数比原有流道下降约 47%,且压力分布均匀、梯度小,具有优良的流场特性.

收稿日期:2016-03-16

作者简介:王刚(1988—),男,山东省邹城市人,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、阀门与流体密封和流体机械.

Abstract: Lines plans of flow channel of vertical lift check valve were optimal designed. The lines plan of disc was designed on the basis of Granville double parameters square polynomial. The lines plan of guide shell was designed on the basis of Granville tail curve. According to the analysis of new flow channel by analysis method, numerical simulation and experimental verification, flow resistance coefficient of new flow channel was lower than before by about 47% and pressure distribution was uniform and gradient was tiny as well. It had good channel feature.

0 引言

社会的发展始终离不开能源,进入现代社会,可再生能源日渐枯竭,节能技术越来越受到重视.对于管道系统来说,节能主要体现在降低压力损失上;而对于阀门来说,降低阀门流阻系数是一种较为有效可行的节能方法^[1-2].

一般来说,降低立式升降式止回阀的流阻系数,可以通过对阀门内部流道优化来实现.阀门内部流道由阀瓣、导流体和阀体内壁构成(见图1).所以,止回阀流道的优化设计可以分为三部分,包括阀瓣型线设计、导流体型线设计和阀体内壁型线设计.

阀门流道的型线设计非常繁琐复杂,目前还没有一种通用的而且足够精确的方法.实际上,当阀瓣完全开启时,阀瓣和导流体组成了一个回转体.在工程应用中,流线型回转体具有优良的流场特性,而且几何形状简单.而流线型回转体的型线设计对于降低流体阻力、改善流场

特性直接而有效,并且不需附加额外的部件,相比其他的改进方法更具优势^[3].本文拟对立式升降式止回阀流道进行优化设计,并进行流阻分析,以期提出一种新的设计思路,供业界参考.

1 阀瓣型线设计

立式升降式止回阀的阀瓣和导流体结构紧凑,由其闭合而组成的型线是一种没有平行中体的回转体型线^[4].可以将其型线分为入流段(即阀瓣)和出流段(即导流体)两部分.

1.1 量纲转换

设阀瓣和导流体闭合后的总长度为 L ,入流段长为 L_H ,出流段长为 L_T ,最大直径为 D .取坐标原点位于阀瓣底端, Y 轴沿阀瓣和导流体的轴线向上, X 轴垂直于 Y 轴向右,回转体型线坐标系见图2. (X, Y) 表示线型上某一点的坐标.通过转换关系式①②对有量纲坐标 X, Y 进行转换,转换后的坐标以 (x, y) 表示.

入流段:

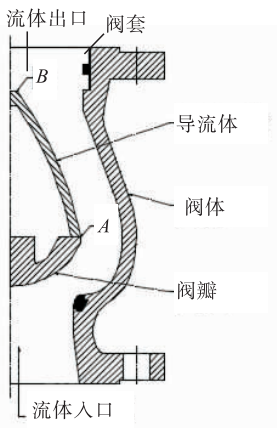


图1 立式升降式止回阀内部流道

Fig. 1 The flow channel of vertical lift check valve

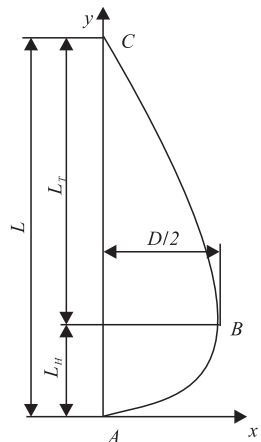


图2 回转体型线坐标系

Fig. 2 The coordinate of the curve of solid of revolution

$$\begin{cases} y = Y/L_H \\ x = 2X/D \end{cases} \quad (1)$$

出流段:

$$\begin{cases} y = (L - Y)/(L - L_H) = \frac{L - Y}{L_T} \\ x = 2X/D \end{cases} \quad (2)$$

1.2 阀瓣的数学线型

理论上,任何曲线都可以被多项式近似描述,但若要取得足够的精度,则需要多阶的多项式,计算非常复杂繁琐. P. S. Granville^[5]通过长期的努力,提出了将线性方程分段表示的理论,可以将回转体线型分段建立多项式,通过边界条件将各段连接起来.

阀瓣的线型选择 Granville 圆头回转体线型双参数平方多项式,即

$$x^2 = f(y) = r_0 R(y) + k_{s1} K_{s1}(y) + Q(y) \quad (3)$$

其中

$$R(y) = 2y(y - 1)^4$$

$$K_{s1}(y) = \frac{1}{3}y^2(y - 1)^3$$

$$Q(y) = 1 - (y - 1)^4(4y + 1)$$

式中, r_0 是数学线型在 $y = 0$ 处的曲率半径; k_{s1} 是数学线型在 $y = 1$ 处的曲率变化率; 函数 $Q(y)$ 是主函数, 函数 $R(y)$ 是 r_0 的影响函数, $K_{s1}(y)$ 是 k_{s1} 的影响函数.

把各个影响函数代入主函数, 整理后可得

$$x^2 = 2r_0y(y - 1)^4 + \frac{1}{3}k_{s1}y^2(y - 1)^3 +$$

$$1 - (4y + 1)(y - 1)^4 = f(y, r_0, k_{s1})$$

1.3 边界条件

1) 零值条件: 函数 $f(y, r_0, k_{s1})$ 的值不能小于 0, 否则无意义, 所以

$$x^2 = f(y, r_0, k_{s1}) \geq 0 \quad 0 \leq y \leq 1 \quad (4)$$

仅从上式无法求解 r_0 和 k_{s1} 关于 y 的取值范围. 可以借助几何包络线来求 r_0 和 k_{s1} 的取值范围.

2) 单位值条件: 由于无量纲化的限制, x 的

值在 $0 \leq y \leq 1$ 的区间内不能大于 1, 否则无意义. 在单位值条件下的约束

$$\begin{cases} x^2 = f(y, r_0, k_{s1}) = 1 \\ \frac{\partial [f(y, r_0, k_{s1}) - 1]}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

3) 极值条件: 若型线上 x 在 $0 < y < 1$ 区间内存在极小值或者极大值, 是不利于降低流阻系数的.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dy} = f'(y, r_0, k_{s1}) = 0 \\ \frac{\partial^2 [f(y, r_0, k_{s1}) - 1]}{\partial y^2} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

4) 拐点条件: 若型线存在拐点, 容易引起边界层脱落, 不利于降低流阻, 故型线不能有拐点. 无拐点的包络方程为

$$\begin{cases} x'' = 0 \\ x''' = 0 \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} 2ff'' - f'^2 = 0 \\ f'' = 0 \end{cases} \quad (7)$$

对于方程组(7), 由于式中含有 r_0 和 k_{s1} 的乘积项, 难以运用传统的解析方法求得 r_0 和 k_{s1} 的参数方程. 可以借助数值方法计算, 在 $(0, 1)$ 区间内取不同的值 y_i , 求解其对应的 r_{0i} 和 k_{s1i} , 把得出的多对 r_{0i} 和 k_{s1i} 作成曲线, 就能获得拐点包络线.

基于零值条件、单位值条件、极值条件和拐点条件, 借助方程组(4)~(7), 在 $(0, 1)$ 区间内, 可以作出 4 条包络线, 其交集为 r_0 和 k_{s1} 的取值范围, 见图 3.

1.4 型线方程的确定

根据止回阀阀瓣的厚度要求, 厚度计算公

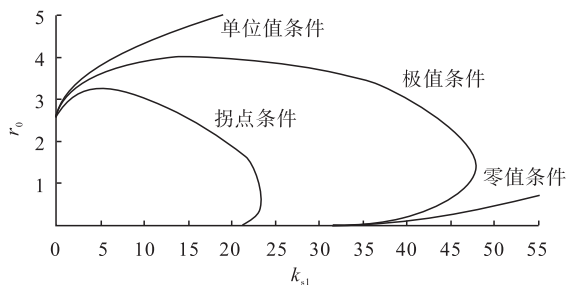


图 3 r_0 和 k_{s1} 的取值范围

Fig. 3 Value range of parameters r_0 and k_{s1}

式^[6]为

$$S_B = D_{MP} \sqrt{\frac{KP}{[\sigma_w]}} + C$$

式中, D_{MP} 为密封面平均直径/mm; P 为设计压力/MPa; 结构特征系数 $K=0.3$; $[\sigma_w]$ 为材料的许用弯应力/MPa; C 为厚度的附加量/mm.

阀瓣厚度应满足要求, 则 $L_H > S_B$, 为了保证阀瓣的顺利启闭, 要求其型线不能过于尖锐, 应使 $L_H < D/2$, 参照 GB/T 12233—2006 标准的要求计算后得 $S_B = 14.625$ mm, 所以有 14.625 mm $< L_H < D/2$. 综合考虑止回阀的启闭特性、阀瓣尺寸和流阻特性等多方面因素, 最终确定型线方程的各个参数为: $r_0 = 1.1$ mm, $k_{s1} = 9.5$, $L_H = 43$ mm, 代入式③得

$$x^2 = 1.1R(y) + 9.5K_{s1}(y) + Q(y)$$

将 $Y = Y/L_H$, $x = 2X/D$, $L_H = 43$ mm, $D = 100$ mm 代入上式, 整理得出回转体阀瓣型线的数学表达式为

$$X = 50 [(0.0233Y - 1)^3 \cdot (0.019 - 0.0007Y^2 + 1) + 1]^{1/2}$$

2 导流体型线设计

2.1 导流体的数学线型

导流体坐标系见图 2. 导流体型线采用 Granville 尾部方程^[7], 线型方程如下:

$$\frac{X(y)}{L} = \frac{1}{2f_r} [S_i^2 F_1(y) + \left(\frac{1-y_m}{y_m} \right)^2 K_1 F_2(y) + G(y)]^{1/2}$$

其中

$$y = \frac{L - Y}{L_T}$$

$$F_1(y) = -y^2(y - 1)^3$$

$$F_2(y) = -y^3(y - 1)^2$$

$$G(y) = y^3(6y^2 - 15y + 10)$$

式中, 长细比 $f_r = \frac{L}{D}$; 尾部线型无因次斜率

$S_i = [-2(1 - y_m)f_r] \frac{dXL}{dY}$; 最大半径处无因次轴

间值 $y_m = \frac{L_H}{L}$; 最大半径处无因次曲率 $K_1 =$

$$(-2y_m^2 f_r) \frac{d^2 X(L_H)}{dY^2} L.$$

2.2 物理边界条件

对于导流体的流线型回转体型线, 其物理边界条件为

$$X(L_H) = D/2$$

$$X'(L_H) = 0$$

$$X''(L_H) = K'_1$$

$$X(L) = 0$$

$$X'(L) = S'_i$$

式中, K'_1 为最大半径处有量纲曲率, S'_i 为尾部线型有量纲斜率.

2.3 型线方程的确定

由于导流体型线与阀瓣型线相接处为最大半径处, 而此处的曲率 K'_1 为 0, 所以 Granville 尾部方程中 $F_2(y)$ 可以消去, 简化后的方程为

$$\frac{X(y)}{D/2} = \sqrt{S_i^2 F_1(y) + G(y)} \tag{8}$$

基于本文选定的某厂家生产的止回阀, 综合考虑, 最终参数选择为 $\alpha = 18^\circ$, $L_T = 145$ mm, 则 $S_i = 1.4$.

代入式⑧可得

$$X(y) = 50 \sqrt{1.96 F_1(y) + G(y)}$$

将各影响函数代入上式, 整理后得到回转体导流体型线表达式为

$$X = 50 \left\{ -1.96 \left(\frac{188 - Y}{145} \right)^2 \left(\frac{188 - Y}{145} - 1 \right)^3 + \left(\frac{188 - Y}{145} \right)^3 \left[6 \left(\frac{188 - Y}{145} \right)^2 - 15 \frac{188 - Y}{145} + 10 \right] \right\}^{1/2}$$

3 阀体内壁型线设计

对于流道内每一个截面, 为了确保流通顺畅, 应使流道的流通面积不小于管道的通径面积, 即

$$\pi(R_1^2 - R_2^2) \geq \pi R^2 \quad (9)$$

式中, R_1 为阀体内壁的半径, R_2 为阀瓣与导流体上的半径, R 为阀门公称半径。

由式(9)可以推得 $R_1 \geq \sqrt{R_2^2 + R^2}$ 。取 $R_1 = \sqrt{1.1R_2^2 + R^2}$, 其中 $R = D/2 = 50$ mm。阀体内壁型线与阀瓣完全关闭时的型线、一段平行中体和导流体型线存在如下对应关系:

$$R_1 = \sqrt{1.1R_2^2 + R^2} = \sqrt{1.1R_2^2 + 2500}$$

根据阀瓣行程, 平行中体长度为 10 mm。另外, 阀套的头部位置通常为流道最小通流面积处, 根据本文选取的某厂家生产的止回阀的结构特点, 为保证阀体腔内部件的安装, 设计时应使阀体出口端半径大于阀套、阀瓣、导流体的最大半径^[8], 阀体出口侧流道半径为 52 mm, 与阀体腔内圆弧过渡。计算得出阀体内壁型线的坐标。

综合阀瓣、导流体和阀体内壁型线的坐标, 作出立式升降式止回阀流道型线坐标的总表, 见表 1。表 1 中, Y 为 y 轴坐标, X_2 为阀瓣和导流体型线的 x 坐标值, X_1 为阀体内壁的 x 坐标值。

将数据提取到 AutoCAD 中, 即可作出整个流道的型线图。设计出的流道型线尺寸见图 4a), 图 4b) 为原流道与新流道型线的对比图, 可见, 新的流道型线更为光滑, 尾部倾角减小, 有利于降低流体阻力, 防止边界层脱落。

4 流道阻力分析

4.1 流阻系数的解析计算

1) 回转体表面上的压力

设阀瓣表面上某一点的液体介质流速在 x, y 轴方向上的分量分别为 v_x 和 v_y , 根据液体流速与流函数的关系^[9]

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi}{\partial x} = -v_y \\ \frac{\partial \Psi}{\partial y} = v_x \end{cases} \quad (10)$$

可以通过下式求得该点的液体介质流速为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (11)$$

回转体表面上某一点的压力公式^[10]为

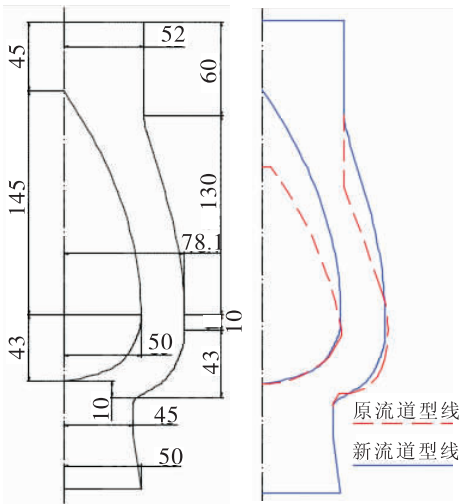
$$p = p_1 + \lambda(\rho v_0^2/2) \quad (12)$$

表 1 流道型线坐标总表

Table 1 Coordinate of flow channel

mm

坐标	坐标值								
Y	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6
X_2	无	无	无	无	无	0.00	10.68	18.92	25.22
X_1	50.00	51.62	54.91	58.44	61.61	64.25	66.39	68.12	69.54
Y	8	10	12	14	16	18	20	22	24
X_2	30.00	33.63	36.40	38.55	40.27	41.70	42.95	44.07	45.12
X_1	70.74	71.81	72.78	73.70	74.56	75.36	76.10	76.74	77.26
Y	26	28	30	32	34	36	38	40	42
X_2	46.09	46.99	47.80	48.51	49.09	49.52	49.81	49.95	50.00
X_1	77.66	77.92	78.06	78.10	78.10	78.10	78.10	78.10	78.10
Y	43	53	63	73	83	93	103	113	123
X_2	50.00	49.76	49.05	47.86	46.20	44.05	41.44	38.35	34.78
X_1	78.10	77.88	77.23	76.15	74.65	72.77	70.52	67.95	65.13
Y	133	143	153	163	173	183	188	203	—
X_2	30.74	26.22	21.22	15.76	9.81	3.39	0.00	无	—
X_1	62.13	59.08	56.11	53.46	52.00	52.00	52.00	52.00	—



a) 通道尺寸 b) 原流道型线与新流道型线对比
图4 流道型线图/mm

Fig. 4 Lines plan of flow channel/mm

式中, p_1 为外界压力/MPa, ρ 为介质密度/($g \cdot mm^{-3}$); v_0 为来流速度/($m \cdot s^{-1}$), 压力系数

$$\lambda = 1 - v^2/v_0^2 \quad (13)$$

将⑬式代入⑫, 则回转体表面上某一点的压力公式变为

$$p = p_1 + \frac{\rho}{2}(v_0^2 - v^2) \quad (14)$$

利用式⑩⑪和⑭即可求出回转体表面上任一点的压力。

2) 阀门的阻力系数

不可压缩液体介质通过阀门的压降公式^[11]为

$$\Delta p = \zeta \frac{v^2}{2g} \cdot 10\rho \quad (15)$$

式中, ζ 为阀门的阻力系数, g 为重力加速度 ($9.81 m \cdot s^{-2}$), ρ 为介质密度/($g \cdot mm^{-3}$)。

由式⑮可以推导出阻力系数

$$\zeta = \Delta p \frac{g}{5\rho v^2} \quad (16)$$

利用式⑩⑪和⑭求出回转体尾部表面上一点的压力, 与入口流体压力相减, 即可求得 Δp , 然后依据式⑯求得止回阀的流阻系数。

3) 计算结果

使用解析计算方法, 对优化后的流道, 在入口流体压力为 0.1 MPa, 入口速度为 1.2 m/s, 阀瓣完全开启的情况下, 求出其流阻系数 $\zeta = 0.52$ 。

4.2 对新流道的数值模拟

使用 ICEM 软件, 对设计完成的新流道进行网格划分, 然后导入 Fluent 软件中, 选择湍流模型为标准 $k-\varepsilon$ 模型, 标准壁面函数; 流道内介质为 20 °C 水; 阀门入口为速度入口边界, $v_{入口} = 1.2 m/s$, 阀门出口为自由出流边界; 采用 SIMPLE 算法求解速度和压力的耦合方程。

求解后对结果进行后处理, 得到改进后的流道在阀瓣完全开启时的压力云图(见图5)。可以看出, 重新设计的流道内压力分布均匀。

对重新设计的流道在不同入口介质流速的条件下进行模拟, 以获得新流道在不同入口介质流速下的压力降, 见表2。由表2可以看出, 随着入口介质流速的增大, 阀门入口与出口之间的压降会随之上升。

根据模拟得出阀门出入口之间的压差, 利用式⑯求得流阻系数 ζ 为 0.54。比解析法计算

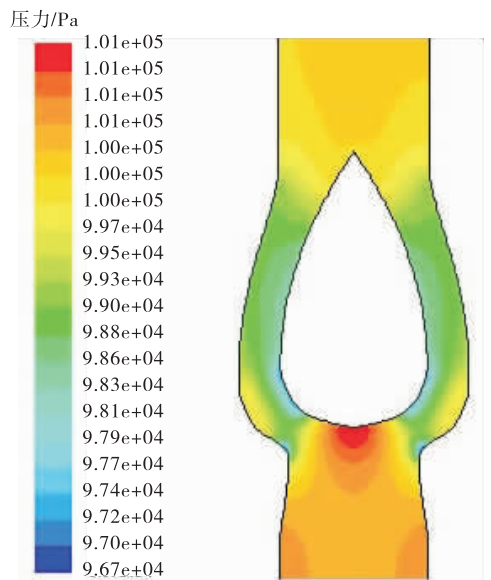


图5 改进后的流道在阀瓣完全开启时的压力云图
Fig. 5 Contours of pressure in flow channel when disc fully opens

表2 不同入口介质流速下的压降

Table 2 Pressure drop of various medium velocity

入口介质流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	入口处压强/Pa	压降/Pa
0.6	1×10^5	114.47
1.2	1×10^5	390.29
1.5	1×10^5	592.27
2	1×10^5	999.59
3	1×10^5	2 106.05
4	1×10^5	3 581.78

得出的流阻系数略大,推究其原因为:用软件作出的型线与理论型线存在误差,并且不如理论型线平滑,导致求得的流阻系数比理论流阻系数略大。

为了分析阀瓣和导流体表面压力变化规律,作出阀瓣和导流体表面压力分布曲线,如图6,图7所示。

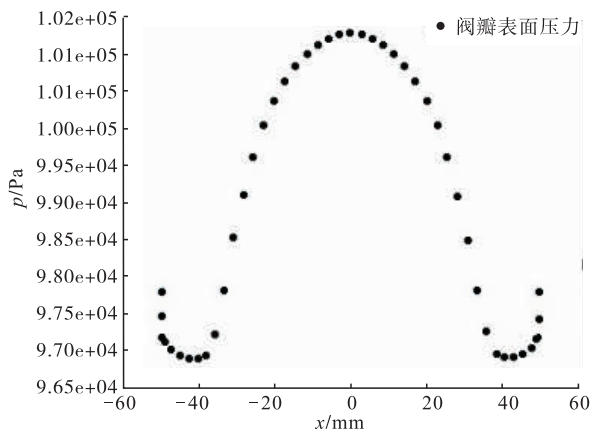


图6 阀瓣表面压力分布

Fig. 6 Surface pressure distribution of disc

由图6可以看出,阀瓣表面压力分布曲线较为平缓,阀瓣顶端压力最大,压力值达到最大后,分布呈抛物线形状下降;在接近尾段时,下降放缓,压力达到最小值,随后压力开始小幅上升,与后段(导流体)在连接处表面压力一致。

由图7可以看出,导流体表面压力分布平缓,压力分布在阀瓣型线与导流体型线连接处呈最小值,之后以类似余弦曲线形状逐渐上升,在导流体尾端处达到最大值之后逐步下降。

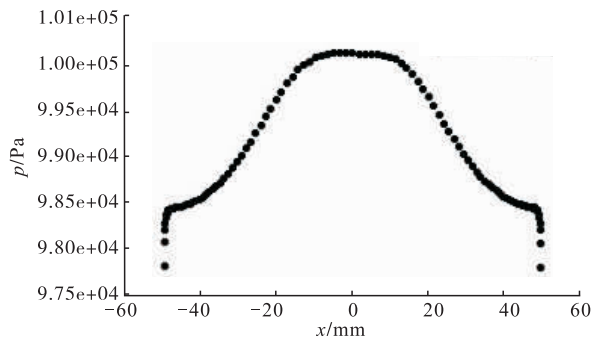


图7 导流体表面压力分布

Fig. 7 Surface pressure distribution of guide shell

4.3 试验验证

按照 JB/T 5296—1991 标准^[12],分别对改进前后的止回阀选用介质为 20 °C 水进行流阻试验,得出数据见表3.重新设计的流道的流阻系数,比原有流道的流阻系数下降了约 47%.试验结果与解析计算结果和模拟结果基本一致。

表3 改进前后的阀门流阻

Table 3 Flow resistance of original and improved valve

流道	入口流速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	压差 / Pa	流阻系数
改进前	1.2	33.91	754.49	1.05
改进后	1.2	33.91	395.21	0.55

以上分析表明,重新设计的流道流阻明显下降,且压力梯度小,有效延长了边界层,具有优良的流场特性。

5 结论

本文采用 Granville 双参数平方多项式圆头回转体流线型对阀瓣型线进行设计,选用 Granville 尾部型线对导流体型线进行设计;根据边界条件解出型线方程的影响参数,确定型线方程的表达式,然后依据阀体内壁型线与阀瓣和导流体型线的关系,求得阀体内壁型线的具体坐标。

通过解析计算法、数值模拟法和试验验证分析了新流道的流阻,结果表明,新流道的流阻系数比原有流道下降约 47%,且压力分布均

匀、梯度小,具有优良的流场特性.

本文为止回阀腔内阀瓣和导流体型线的设计提供了一种新的思路,供同行参考.

参考文献:

[1] 李德禹. 阀门节能的重要途径——降低流阻系数[J]. 流体机械,1984(1):54.
[2] 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.
[3] 杜月中,闵健,郭字洲. 流线型回转体外形设计综述与线型拟合[J]. 声学技术,2004,23(2):93.
[4] 李新汶,张宁,董根金,等. 回转体进流段型线参数化设计及其表面压力计算[J]. 舰船科学技术,2011,8(8):6.
[5] GRANVILLE P S. Geometrical characteristics of streamlined shapes [J]. Journal of Ship

Research,1969,13(4):12.

[6] 朱培元. 止回阀设计技术及图册[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
[7] 马捷. 水下热滑翔机推进[M]. 上海:上海交通大学出版社,2013.
[8] 申燕飞,许明恒,郭海保. 梭式止回阀的结构设计与三维建模[J]. 中国工程机械学报,2005,1(1):33.
[9] 朱仁庆,杨松林,王志东. 船舶流体力学[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
[10] 张宇文. 鱼雷总体设计原理与方法[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.
[11] 陆培文. 阀门制造工艺入门与精通[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
[12] 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.