

智能减压阀压力相关性研究和膜片尺寸优化^{*}

童成彪^{1,2},周志雄^{1†}

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院,湖南 长沙 410082;

2. 湖南省特大口径电站阀门工程技术研究中心,湖南 长沙 410007)

摘要:智能自力式减压阀(简称智能减压阀)的膜片尺寸对控制部分的密封性能会产生重要影响,进而影响阀门的压力波动范围、寿命、功耗等性能参数.本文提出了一种智能减压阀膜片尺寸优化设计方法,即依据力平衡方程建立智能减压阀压力相关性的理论模型,通过流动实验和实时采样获取原始数据,以此为基础进行回归分析建立实际数学模型,采用有约束条件的最小值优化模型对膜片尺寸进行优化.优化结果表明:采用优化后的膜片尺寸,压差和减少了30%,最大压差极值减少了7.7%,最小压差极值减少了39.6%.这对有效降低控制系统漏率起到了有益的作用.

关键词:回归分析;智能减压阀;优化设计

中图分类号:TH134

文献标志码:A

Research on Pressure Correlation and Size Optimization of Intelligent Pressure Reducing Valve

TONG Chengbiao^{1,2},ZHOU Zhixiong^{1†}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. The Special Largest Size Valve Engineering Research Center of Hunan Province, Changsha 410007, China)

Abstract: The diaphragm cylinder diameter of intelligent self-operated pressure reducing valve(intelligent pressure reducing valve for short) have important influence on sealing performance of control unit, which affects the valve performance parameters such as pressure variation range, service life, power and etc. This paper presented a method to optimize the diaphragm cylinder diameter of intelligent pressure reducing valve, including building the pressure correlation theoretical model according to static equilibrium equation, getting the raw data by fluid experiment and high accuracy sampling, building the actual mathematical model by linear regressive, and optimizing the diaphragm cylinder diameter by minimal extreme optimization model with constraint condition. The results show that under the optimization dimension, the sum of pressure difference reduces by 30.6%, the limitation value of the maximal pressure difference reduces by 7.7%, and the limitation value of the minimal pressure difference reduces by 39.6%, which are beneficial for reducing the control system leakage. The pressure correlation model and optimization model offer a good reference for the design of intelligent pressure reducing valve.

Key words: regression analysis; intelligent pressure reducing valve; optimization design

^{*} 收稿日期:2016-06-23

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX07412-001), National Science and Technology Major Program of China(2011ZX07412-001)

作者简介:童成彪(1979—),男,湖南安乡人,湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: Zhouzx8@sina.com

减压阀是工业中应用广泛的稳压器件之一^[1],而自力式减压阀^[2]具有不需动力电源、自动稳压的特点,在供水工程中获得大量的应用.随着社会的进步,人们对自力式减压阀的性能提出了更高的要求,如更高的稳压精度、更宽的压力调节范围、更好的工况适用性等,甚至还要求其具有远程压力可调性,智能自力式减压阀(以下简称智能减压阀)便应运而生^[3].智能减压阀是在传统减压阀的基础上增加了膜片缸和控制器,通过控制膜片缸的压力来达到调节阀出口压力的目的^[4].目前国内对智能减压阀的研究较少,本文从智能减压阀的原理入手,建立了计算膜片缸压力的理论模型,通过实验和数据拟合得到相关系数,应用最小值优化模型对智能减压阀膜片缸的直径进行优化,并将优化前后的情况进行对比,证明了优化结果的有效性.

1 理论模型

传统自力式减压阀和智能自力式减压阀的结构图分别如图 1 和图 2 所示.

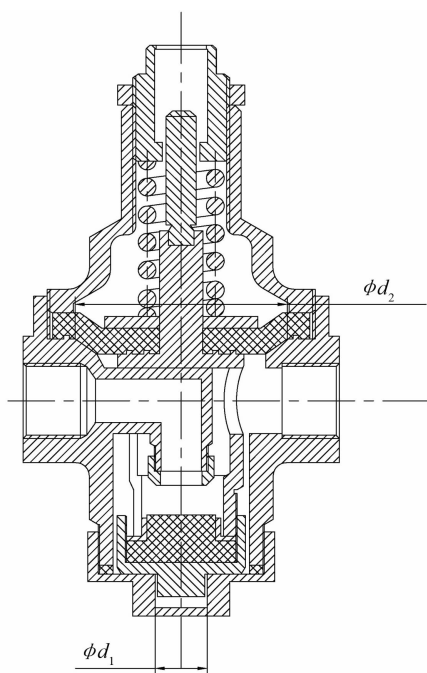


图 1 自力式减压阀结构图

Fig.1 Structure of self-operated pressure reducing valve

如图 1 所示,传统减压阀的静力平衡方程为:

$$k(x_0 + x) + P_1 \times A_1 = P_2 \times A_2 \quad (1)$$

式中: k 为弹性系数; $A_i = \pi d_i^2 / 4$, ($i=1,2$); P_1, P_2 分别为阀门进出口压力; x_0 是减压阀弹簧初始压缩

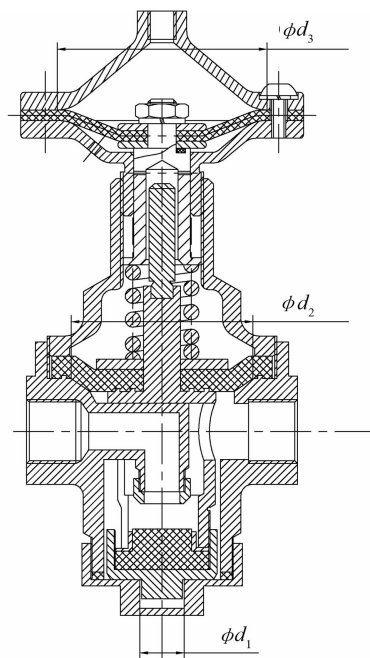


图 2 智能型自力式减压阀结构图

Fig.2 Structure of intelligent self-operated pressure reducing valve

量; x 为有载荷情况下的压缩变形.

当进口压力波动为 ΔP_1 , 假设出口压力波动为 ΔP_2 , 则 $\Delta P_2 = (k \Delta x + \Delta P_1 \times A_1) / A_2$, 由于 $k / A_2 < 0.01$, $A_1 \ll A_2$, 所以出口压力波动远小于进口压力波动, 从而起到稳压的效果^[5].

如图 2 所示, 智能减压阀的静力平衡方程为:

$$P_3 \times A_3 + P_1 \times A_1 = P_2 \times A_2 \quad (2)$$

式中: P_3 为膜片缸压力.

由式(2)得出膜片压力为:

$$P_3 = \frac{A_2}{A_3} P_2 - P_1 \times \frac{A_1}{A_3} \quad (3)$$

经测量: $d_2 = 65 \text{ mm}$, $d_1 = 14 \text{ mm}$, $d_3 = 50 \text{ mm}$, 将已知参数代入式(3)可得:

$$P_3 = \frac{A_2}{A_3} P_2 - P_1 \times \frac{A_1}{A_3} = 1.69 P_2 - 0.078 4 P_1 \quad (4)$$

式(4)表明, 阀前压力、阀后压力与膜片压力是线性相关的, 通过控制膜片压力可以达到改变阀门出口压力的目的. 由于以上公式中仅将膜片按线性特性来考虑, 且忽略了摩擦力和动水作用力, 因此这种简化会存在一些误差, 现通过实验来建立三者之间的实际数学模型, 为膜片尺寸的优化打下基础.

2 实验及数据处理

为了与理论模型进行比较, 本文通过实验测得

进口压力、膜片压力、出口压力原始数据,并对实验数据进行处理,求得膜片缸压力与阀前、阀后压力之间的实际数学表达式.

实验中所使用的主要仪器仪表包括:

- 1)精密压力表(精度等级 0.4 级,表盘直径 63 mm,量程 0~+2.5 MPa),2 块;
- 2)微型高压软管接头总成(型号:HFJ1-J1-3-P-0.4),4 根;
- 3)DN20,PN40 小型流体实验台;
- 4)压力变送器 MPM480A(0~+2.5 MPa),精度 0.1 级;
- 5)USB-DAQ-PIC18F-V02 高速 12 位模拟量采样板.

按图 3 所示连接管路和实验装置,进水口连接试压泵,出水口直接排空.保持各种阀的位置不动,通过给控制器发送指令,调节阀后压力至目标值,采用虚拟仪器平台,测试过程的人机界面如图 4 所示.

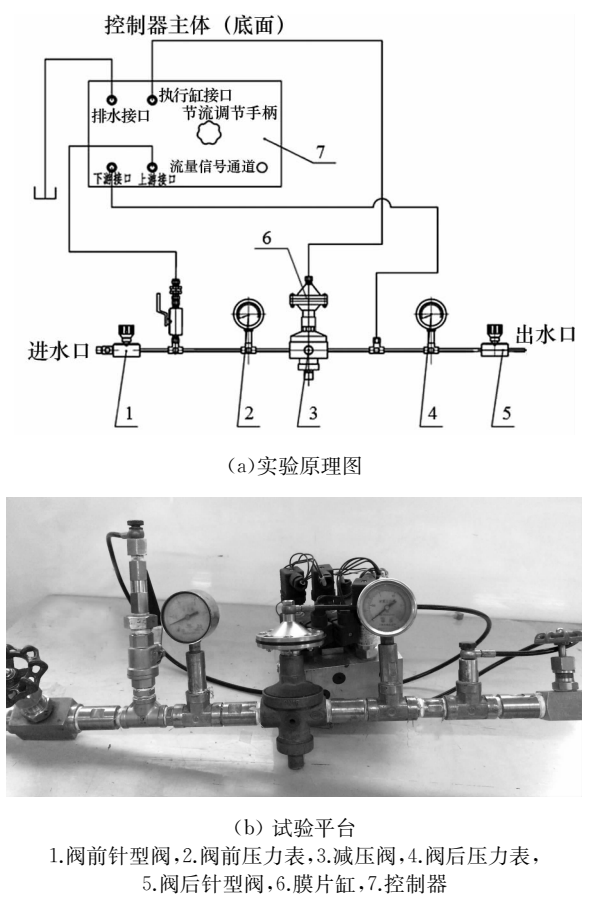


图 3 智能减压阀实验原理及平台
Fig.3 Experiment platform of intelligent pressure reducing valve

根据以上实验测得的相关数据经整理后如表 1 所示.

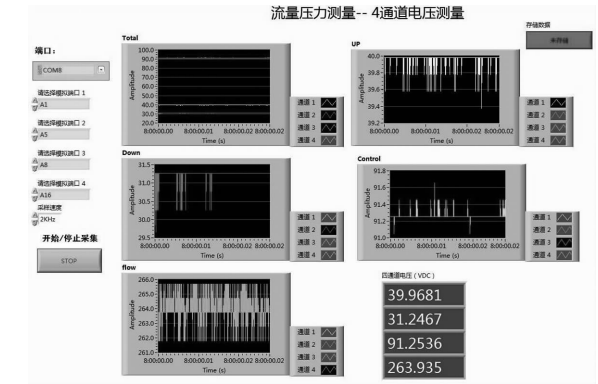


图 4 虚拟仪器采样界面
Fig.4 Virtual instrument stamping interface

表 1 实验数据							
Tab.1 Test data							
序号	阀前压力 P_1 /kPa	阀后压力 P_2 /kPa	膜片压力 P_3 /kPa	出现次数 n	权重系数 ω	拟合值 $\hat{P}_3$ /kPa	拟合误差 /kPa
1	640	330	580	23	0.008 261	548.600 5	31.399 5
2	640	340	550	18	0.006 466	564.083 6	-14.083 6
3	650	310	490	39	0.0140 09	514.609 4	-24.609 4
4	650	330	570	175	0.062 859	545.575 7	24.424 3
5	650	340	570	88	0.031 609	561.058 8	8.941 2
6	650	350	550	6	0.002 155	576.541 9	-26.541 9
7	660	310	500	24	0.008 621	511.584 6	-11.584 6
8	660	320	530	5	0.001 796	527.067 7	2.932 3
9	660	330	570	63	0.022 629	542.550 8	27.449 2
10	660	340	570	180	0.064 655	558.034 0	11.966 0
11	660	350	570	4	0.001 437	573.517 1	-3.517 1
12	670	280	440	5	0.001 796	462.110 3	-22.110 3
13	670	310	500	28	0.010 057	508.559 8	-8.559 8
14	670	320	540	9	0.003 233	524.042 9	15.957 1
15	670	330	570	32	0.011 494	539.526 0	30.474 0
16	670	340	570	138	0.049 569	555.009 2	14.990 8
17	670	350	570	11	0.003 951	570.492 3	-0.492 3
18	680	270	440	4	0.001 437	443.602 4	-3.602 4
19	680	310	490	55	0.019 756	505.534 9	-15.534 9
20	680	320	490	61	0.021 911	521.018 1	-31.018 1
21	680	330	560	28	0.010 057	536.501 2	23.498 8
22	680	340	560	124	0.044 540	551.984 4	8.015 6
23	680	350	560	50	0.017 960	567.467 5	-7.467 5
24	690	310	510	9	0.003 233	502.510 1	7.489 9
25	690	320	510	15	0.005 388	517.993 3	-7.993 3
26	690	340	560	80	0.028 736	548.959 6	11.040 4
27	690	350	560	145	0.052 083	564.442 7	-4.442 7
28	690	360	580	58	0.020 833	579.925 8	0.074 2
29	690	370	590	36	0.012 931	595.409 0	-5.409 0
30	690	380	590	8	0.002 874	610.892 1	-20.892 1
31	700	340	560	8	0.002 874	545.934 7	14.065 3
32	700	350	560	18	0.006 466	561.417 9	-1.417 9
33	700	370	590	4	0.001 437	592.384 2	-2.384 2
34	710	270	430	4	0.001 437	434.527 9	-4.527 9
35	720	270	410	6	0.002 155	431.503 1	-21.503 1
36	780	290	470	7	0.002 514	444.320 5	25.679 5
37	780	300	470	14	0.005 029	459.803 7	10.196 3
38	780	310	470	141	0.050 647	475.286 8	-5.286 8
39	780	320	470	234	0.084 052	490.770 0	-20.770 0
40	790	290	470	7	0.002 514	441.295 7	28.704 3
41	790	310	470	14	0.005 029	472.262 0	-2.262 0
42	790	320	470	95	0.034 124	487.745 2	-17.745 2
43	7900	330	480	702	0.252 155	503.228 3	-23.228 3
44	950	280	390	4	0.001 437	377.415 6	12.584 4
45	950	290	390	5	0.001 796	392.898 7	-2.898 7

为建立三者之间的实际关系,采用数据拟合的方法对实验数据进行处理.首先分别绘出 P_1 与 P_3 , P_2 与 P_3 的散点图分别如图 5、图 6 所示.

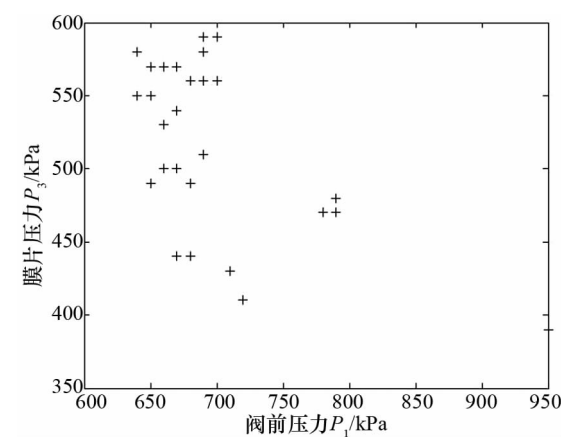


图 5 阀前压力与膜片压力散点图
Fig.5 Scatter diagram between upstream pressure and diaphragm pressure

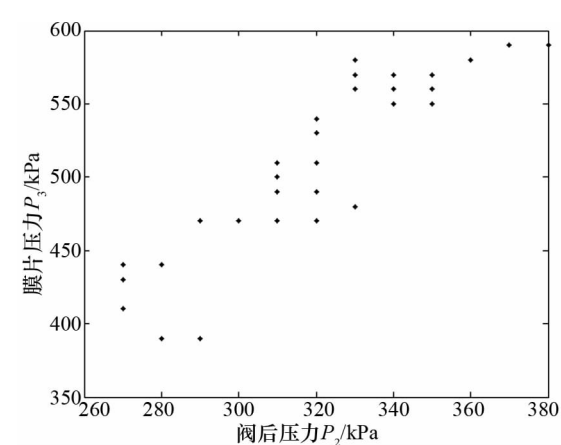


图 6 阀后压力与膜片压力散点图
Fig.6 Scatter diagram between downstream pressure and diaphragm pressure

从图 5 和图 6 可看出,阀门前、后压力分别与膜片压力均呈现出线性相关性,且阀前压力与膜片压力呈负相关,阀后压力与膜片压力呈正相关.因此,可采用二元线性回归模型,现设定模型为 $\hat{P}_3 = \beta_0 + \beta_1 \times P_1 + \beta_2 \times P_2$.采用数学方法对数据进行处理^[6-9],得到其回归模型系数及其置信区间如表 2 所示.

表 2 回归模型系数及其置信区间

Tab.2 Regressive model coefficient and confidence interval

回归系数	回归系数估计值	回归系数置信区间
β_0	231.244 8	[122.620 8,339.868 8]
β_1	-0.302 5	[-0.385 9,-0.219 0]
β_2	1.548 3	[1.334 9,1.761 7]

由表 2 可知,所有回归系数的置信区间都不包含零点,残差均匀分布在零点左右,且无任何异常数据点,说明模型是可用的.由表 2 所示的回归系数估计值可得阀门前、后压力与膜片压力之间的回归方程为:

$$\hat{P}_3 = 231.244\ 8 - 0.302\ 5 \times P_1 + 1.548\ 3 \times P_2$$

(5)

以 $\beta_1 \times P_1 + \beta_2 \times P_2$ 为横轴, P_3 为纵轴,将膜片压力的拟合值、理论值和实际值统一放到二维散点图中,如图 7 所示.可见实际值分布在拟合线两侧,有较好的精度,而理论值偏向拟合线下侧,说明理论值总体偏小.

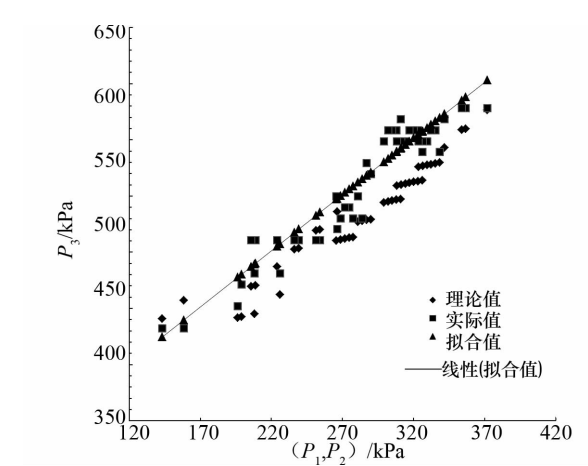


图 7 预测模型比较图
Fig.7 Comparison with forecast model

对回归模型进行显著性校验,结果如表 3 所示.

表 3 显著性校验

Tab.3 Checking validity

参数	R^2	F	P	S
取值	0.913 3	221.100 2	0.000 0	299.297 6

对回归模型进行 F 检验,取显著性水平 α 为 0.05.由表 3 的计算结果可知, F 值较大,而 P 值很小仅为 0.000 0,明显低于 0.05,表明回归方程是显著的; S 为方差 σ^2 的估计值,表示数据值偏离回归线的标准距离, S 值仅为 299.297 6,说明偏差较少;拟合优度 R^2 为 0.913 3,与 1 十分接近,说明拟合的回归方程预测响应效果良好,对数据的拟合优度高,拟合的回归方程可用.

3 膜片尺寸优化

膜片缸直径越大,膜片缸压力对点滴泄漏越不敏感,但膜片缸直径不合理时会增大阀门的泄漏,

不利于密封,所以需要对膜片缸的直径进行优化,以控制电磁阀的泄漏同时改善膜片缸对泄漏的敏感性,提高保压时间.显然,膜片直径的平方与膜片压强成反比,直径 d_3 过大,膜片压力 P_3 减小,进水侧电磁阀压差和增大,甚至排水侧电磁阀有造成负压的风险,造成泄漏;相反,直径过小,膜片压力增加,出水侧电磁阀压差增加,亦存在泄漏隐患.因此膜片缸直径 d_3 是一个非常重要的参数,需要对其进行优化.

选取膜片直径 d_3 作为设计变量,即:

$$X = x = d_3 \quad (6)$$

设计的膜片缸应在满足结构性能的条件下,降低阀门工作时的泄漏风险.考虑到阀门工作时各处的压力是在一定范围内随机变化的,为更好地贴近实际工作情况,以表1圆整后的实验数据为准,考虑阀门前后压力对出现的权重,以各情况下的压差和 P 最小作为优化目标函数,即:

$$P = f(X) = \min\left\{\sum\left[\left(|P_{1i} - \hat{P}'_{3i}| + |P_{2i} - \hat{P}'_{3i}|\right) \cdot w(i)\right]\right\} \quad (i=1,2,\dots,45) \quad (7)$$

式中: $\hat{P}'_{3i}$ 为优化后直径 d 所对应的膜片压力; $w(i)$ 为每种工况可能出现的权重系数.由式(5)可推出:

$$\hat{P}'_{3i} = \hat{P}_{3i} \times d_3^2 / d^2 \quad (i=1,2,\dots,45) \quad (8)$$

确定约束条件如下:

1)根据阀门的正反向耐压值分别为100和50,可得:

$$\begin{cases} g_1(X) = P_{1i} - \hat{P}'_{3i} - 100 < 0 \\ g_2(X) = \hat{P}'_{3i} - P_{2i} - 100 < 0 \\ g_3(X) = \hat{P}'_{3i} - P_{1i} - 50 < 0 \\ g_4(X) = P_{2i} - \hat{P}'_{3i} - 50 < 0 \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,45) \quad (9)$$

2)根据阀门内流体的流向,可得:

$$\begin{cases} g_5(X) = \hat{P}'_{3i} - P_{1i} < 0 \\ g_6(X) = P_{2i} - P_{1i} < 0 \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,45) \quad (10)$$

3)为防止膜片变形过大影响其使用寿命和工作性能,对膜片压力提出约束条件如下:

$$g_7(X) = \hat{P}'_{3i} - 100 < 0 \quad (i=1,2,\dots,45) \quad (11)$$

综上所述,根据优化原理,可建立膜片尺寸的优化数学模型为:

$$\begin{aligned} \text{Fum}(X) &= \min f(X), X > 0 \\ \text{s.t. } g_u(X) &< 0 \quad u=1,2,\dots,7 \end{aligned} \quad (12)$$

根据上文建立的数学模型,将优化前使用的膜片直径 $d=50$ 作为初始值,采用有约束优化模型求最小值函数fmincon对其进行计算^[10-12],得出结果优化后的直径为63.495 mm,为满足实际加工制造的需求,将膜片直径圆整为64 mm,并与优化前的结果进行对比如表4所示.从表4中可以看出,优化后阀门工作时的各压差和为403.03 kPa,比优化前的值降低了30.597%.且优化后出现的最大、最小压差均较优化前有所降低,也说明了改进后的减压阀在各工况下的泄漏量都有所降低,工作更加平稳.

表4 优化前后结果对比

Tab.4 Result comparison with optimization

	膜片直径 d/mm	压差和 P/kPa	最大压差值 U_P/kPa	最小压差值 L_P/kPa
优化前	50	580.71	780.00	500.00
优化后	64	403.03	719.66	301.88

其中:

$$\begin{cases} U_P = \max(|P_{1i} - \hat{P}'_{3i}| + |P_{2i} - \hat{P}'_{3i}|) \\ L_P = \min(|P_{1i} - \hat{P}'_{3i}| + |P_{2i} - \hat{P}'_{3i}|) \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,45) \quad (13)$$

4 结 论

本文采用基于实验数据的回归分析和尺寸优化,得出了最优的膜片缸尺寸.

1)建立了普通减压阀和智能减压阀的力学模型,得出了普通减压阀阀后压力与阀前压力的相关性以及智能减压阀膜片压力、阀前压力、阀后压力三者之间的关系,证明了三者之间符合线性相关,智能减压阀设计是可行的.

2)采用实验方法测量、采集阀门各相关压力数据,并以理论模型为基础对相关参数进行线性回归分析,得出阀门前后压力与膜片压力的拟合曲线和回归方程,然后进行多项式显著性检验和拟合优度检验验证回归模型的可靠性,为后续优化模型的建立提供依据.

3)以阀门的压差和最小为目标函数,考虑各工况出现的概率作为权重,建立非线性优化模型,基于计算机软件编程求出对应的最优解.优化结果表明,优化后压差和的值比优化前降低了30.597%,最大压差值降低了8.9%,最小压差降低了40%,电磁阀的工况得到了改善,有效改善了控制系统的保压时间.

本文结合理论研究、实验研究和优化设计方法

展开对智能减压阀的研究,本研究方法及得出的数学模型对类似阀门的设计开发具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 陈立龙, 张明, 王汤权. 中低压安全阀的优化研究[J]. 流体机械, 2014, 42(1): 44—46, 79.
CHEN Lilong, ZHANG Ming, WANG Tangquan. Research on optimization for low-mid pressure safety valve[J]. Fluid Machinery, 2014, 42(1): 44—46, 79. (In Chinese)
- [2] 姜国祥, 林德伟, 修国强. 自力式减压阀: 中国, 012491748[P]. 2001—8—20.
JIANG Guoxiang, LIN Dewei, XIU Guoqiang. Self-operated pressure reducing valve: China, 012491748[P]. 2001—8—20. (In Chinese)
- [3] 胡兆均. 丹佛斯智能减压阀的应用[J]. 中国给水排水, 2007, 23(24): 58.
HU Zhaojun. Application of Danfoss intelligent pressure reduce valve[J]. China Water and Wastewater, 2007, 23(24): 58. (In Chinese)
- [4] 童成彪, 周志雄, 周源. 支持矢量回归机的参数优化及在智能减压阀压力预测中的应用[J]. 中国机械工程, 2016, 27(14): 31—35.
TONG Chengbiao, ZHOU Zhixiong, ZHOU Yuan. Parameter optimization of support vector regression and its applications to pressure prediction of intelligent pressure reduce valves[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(14): 31—35. (In Chinese)
- [5] 伍容, 叶南海, 翟兴学, 等. 考虑孔板的淹没式调节阀性能特性的研究[J]. 流体机械, 2016, 44(1): 6—10.
WU Rong, YE Nanhai, ZHAI Xingxue, *et al.* Study on the performance characteristics of the submerged regulating valve with the orifice plate[J]. Fluid Machinery, 2016, 44(1): 6—10. (In Chinese)
- [6] DAI P D, LI Pu. Optimal pressure regulation in water distribution systems based on an extended model for pressure reducing valves[J]. Water Resources Management, 2016, 30(3): 1239—1254.
- [7] 廖庆斌, 王晓东, 胡必忠. 液体阀门泄漏检测装置的研制及试验研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(3): 295—299.
LIAO Qingbin, WANG Xiaodong, HU Bizhong. Design and experimental investigation about a leakage detecting device for liquid valve[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(3): 295—299. (In Chinese)
- [8] 黄育红, 马杰, 张慕华, 等. 基于 MATLAB 的二元线性回归在小孔流速实验中的应用[J]. 大学物理实验, 2016, 29(1): 94—97.
HUANG Yuhong, MA Jie, ZHANG Muhua, *et al.* Two variables linear regressive application for small hole velocity experiment based on MATLAB[J]. Physical Experiment of College, 2016, 29(1): 94—97. (In Chinese)
- [9] SAMODRO R R A, CHOI I M, WOO S Y. A study on the pressure gradient effect due to a leak in a pressure calibration system[J]. Metrologia, 2013, 49(3): 315.
- [10] CHEN Yize, WANG Xuanyin, XU Zhipeng. Pilot leakages influences on the performances of extra high pressure proportional pneumatic valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 18(2): 208—211.
- [11] 杨世文, 许小健. MATLAB 优化工具箱在结构优化设计中的应用[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(5): 1347—1349.
YANG Shiwen, XU Xiaojian. MATLAB optimization toolbox application for optimal structure design[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(5): 1347—1349. (In Chinese)
- [12] 任毅如, 张田田, 曾令斌. 基于遗传算法的潮流能水轮机翼型优化设计[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(10): 59—64.
REN Yiru, ZHANG Tiantian, ZENG Lingbin. Tidal turbine hydrofoil design method based on genetic algorithm[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(10): 59—64. (In Chinese)