

航空减压器输出特性回归分析及参数优化

张长帅, 王 慧, 赵国超, 符 鹏
(辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为研究某型航空双级气体减压器设计参数对输出特性的影响规律,建立减压器 AMESim 模型并与测试结果对比验证;采用响应面法获得减压器设计参数与输出特性的二次回归模型,分析减压器设计参数的影响;利用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)对二次回归模型进行优化,得到最优设计参数。响应面结果显示:反馈孔面积是影响输出压力超调量的关键因素,与阀芯密封处动泄漏面积的交互作用对超调量影响显著;阀芯质量是影响输出压力脉动强度的关键因素,与弹簧刚度、膜片刚度的交互作用对脉动强度影响显著。优化结果表明:减压器二级结构的阀芯质量、反馈孔面积、主弹簧刚度、副弹簧刚度、阀芯密封处动泄漏面积和膜片刚度分别为 52.26 g、9.06 mm²、67.27 N/mm、10.68 N/mm、0.64 mm² 和 89.49 N/mm 时输出特性达到最优,优化后输出压力超调量降低了 28.72%,脉动强度降低了 40.63%。

关 键 词: 双级气体减压器;设计参数;输出特性;回归分析;
NSGA-Ⅱ(带精英策略的快速非支配排序遗传算法)

中图分类号: V430 文献标志码: A

Regression analysis and parameters optimization of output characteristics for aviation pressure reducing regulator
ZHANG Changshuai, WANG Hui, ZHAO Guochao, FU Peng
(School of Mechanical Engineering,
Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China)

Abstract: To study the impact of design parameters and interdependencies on an aviation dual-stage gas pressure reducing regulator's output characteristics, the AMESim model was established and verified by comparing results with the test. A quadratic regression model of the output characteristics and design parameters was obtained by the response surface method to analyze design parameters' influence. The quadratic regression model was optimized by using the non-dominated sorting genetic algorithm-Ⅱ (NSGA-Ⅱ) to obtain the optimal design parameters. The response surface results showed that the feedback hole area was the primary factor affecting overshoot, whose interaction with the spool seal's dynamic leakage area had a significant impact on overshoot. The spool mass was the primary factor affecting output pressure pulsation intensity, whose interaction with the spring stiffness and diaphragm stiffness had a significant influence on pulsation intensity. The optimization indicated that the output characteristics would be optimal when the spool mass, feedback hole

收稿日期:2020-12-17
基金项目:国家自然科学基金(51574140)
作者简介:张长帅(1994—),男,博士生,主要从事气动航空元件研究。
通信作者:王慧(1960—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事气动元件及系统的研究。E-mail:wanghui9955@126.com
引用格式:张长帅,王慧,赵国超,等.航空减压器输出特性回归分析及参数优化[J].航空动力学报,2021,36(5):1094-1102.
ZHANG Changshuai, WANG Hui, ZHAO Guochao, et al. Regression analysis and parameters optimization of output characteristics for aviation pressure reducing regulator[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(5): 1094-1102.

area, mainspring stiffness, auxiliary spring stiffness, spool seal's dynamic leakage area and diaphragm stiffness in II-stage structure were 52.26 g, 9.06 mm², 67.27 N/mm, 10.68 N/mm, 0.64 mm² and 89.49 N/mm, respectively. The output pressure overshoot was reduced by 28.72%, and the pulsation intensity reduced by 40.63%.

Key words: dual-stage gas pressure reducing regulator; design parameters; output characteristics; regression analysis; NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm-II)

柱塞式航空减压器作为飞行器燃料进给系统的重要组成元件,利用节流原理,将压力能转化为动能,实现高压气体的减压^[1-2]。减压器的输出特性是保障推进剂准确供给和发动机安全、可靠运行的关键^[3]。由于减压器结构复杂、参数众多,使得其输出特性极易受到内部不确定变量及非线性因素的影响^[4]。因此,面向减压器设计参数对输出特性开展研究具有重要意义^[5-6]。

国内外学者对减压器的输出特性开展了大量的理论及试验研究。Hurlbert 和 Abe^[7]通过试验测试和频域分析发现圆柱阀口是导致减压器出口压力振荡的重要原因,提出了圆锥阀口结构的改进方案。Mizukami 等^[8]采用环境模拟测试剧烈冲击下减压器的输出特性,验证了加装减振装置增强减压器的抗冲击特性的可行性。翟华等^[9]利用键合图法研究减压器金属波纹膜片的载荷变化,分析最大载荷下膜片的变形和应力,提出膜片长期承受高压会产生蠕变但不会影响减压器的输出特性。陈阳等^[10-11]基于有限体积法建立高压卸荷式减压器的数学模型,借助数值手段阐明结构及参数对减压器稳定性的影响。刘君等^[12]利用流-固耦合的方法对减压器内部流场进行分析,发现了减压器出口压力存在振荡现象且振幅随着进口压力的升高而减小。王拥军团队^[13-14]采用 BP (back propagation) 神经网络数据挖掘模型来研究参数变化对逆向卸荷式减压器稳定性的影响,利用拟牛顿法(BFGS)替换梯度下降法对算法进行改进,提升了预测结果的精确性。陈富强等^[15-16]提出了一种多级高压减压阀,基于流-固-热耦合法研究不同参数对内部流动特性的影响,并分析内部焊接孔板的热应力分布情况。

上述文献利用试验测试和数值模拟对减压器进行相关研究,证明了通过分析和改进结构提高减压器输出特性的可行性和研究方法的有效性。考虑到新一代飞行器的性能需求,航空双级气体减压器被设计并投入使用。双级气体减压器结构更加复杂,阀芯在工作过程中一直处于动平衡的

状态,减压器设计参数对输出特性影响尚未明确,使得双级气体减压器设计参数优化有待研究。已有文献表明,双级气体减压器二级结构对输出特性产生较大影响^[17]。因此,本文以双级气体减压器为研究对象,基于 AMESim 数值模拟和响应面法等技术手段,研究二级结构设计参数及交互作用对减压器输出特性的影响规律,利用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)算法建立多目标回归优化模型,获得了减压器的最优设计参数,为航空减压器的研发和优化提供了一种思路。

1 模型与方法

1.1 双级气体减压器结构模型

双级气体减压器由两个柱塞式减压器串联而成,分为一级结构和二级结构,如图 1 所示。一级结构为含反馈腔的正向卸荷式减压器,主要由阀芯、反馈孔、密封圈、主弹簧、高压腔、低压腔和反馈腔组成。二级结构在一级的基础上增加了副弹簧、反馈膜片和反馈中空。高压气体由减压器入口经一级高压腔进入减压器内部,在一级阀芯与柱塞腔形成的可变节流孔处做功后进入一级低压腔,实现第一次减压。可变节流孔的大小控制压力降低的幅度,由阀芯位置决定,依靠一级反馈腔和一级主弹簧的共同作用进行调节。此过程压力降低幅度较大,输出压力存在明显波动。一级低

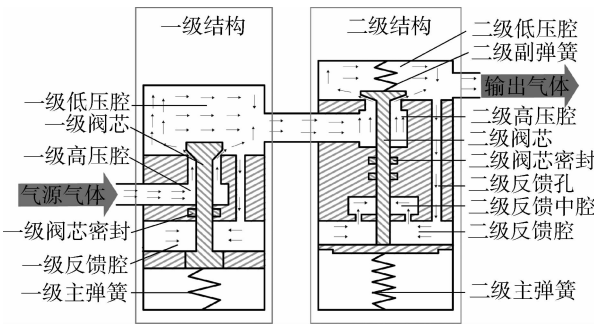


图 1 减压器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the pressure reducing regulator

压腔的气体在二级阀口处实现第二次减压,此过程压力降低幅度较小,但由于反馈膜片的存在使得输出压力的脉动强度大幅降低。

1.2 AMESim 仿真模型

根据双级气体减压器的结构建立减压器的 AMESim 仿真模型如图 2 所示。图中 M 代表阀芯的质量, C_v 代表腔室的容积; k 为常数, $k=1$ 。

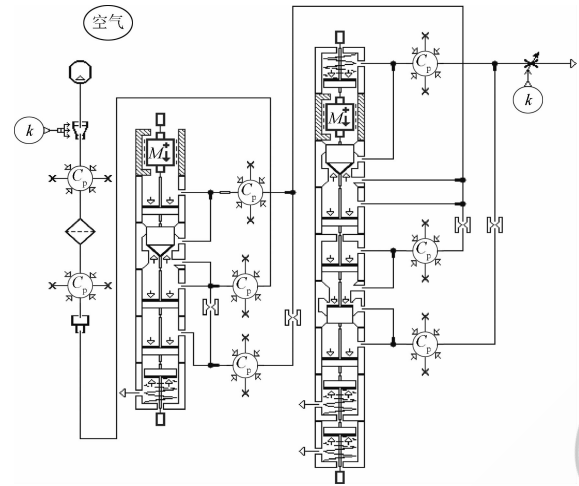


图 2 减压器 AMESim 模型

Fig. 2 AMESim model of the pressure reducing regulator

为研究减压器由启动至稳定工作阶段的输出压力特性,根据实际情况将回路中的截止阀视为完全开启状态^[18]。设定气罐容积为 12 L,气罐初始压力为 40 MPa,环境压力为 0.1 MPa,温度为常温,计算时间步长为 1 ms。为模拟气罐放气过程减压器的实际情况,设置 AMESim 仿真时间 t 为 800 s,气罐输出的仿真压力 p_0 及测试压力 p_1 如图 3 所示。由图可知,气罐输出压力随着时间的增加呈指数下降的趋势,并在 550 s 完成放气过程。

减压器输出的仿真压力 p_2 及测试压力 p_3 如图 4 所示。从图中可以看出,减压器的调工作过程为含有反馈环节的阶跃响应。减压器经短暂的调

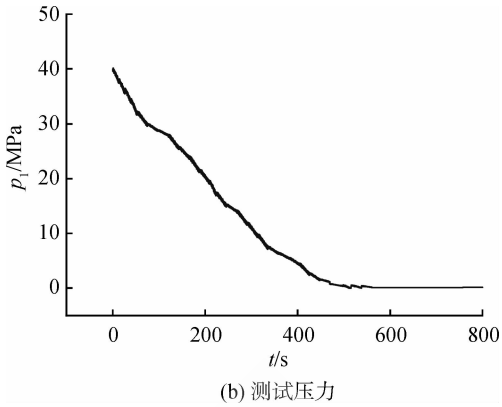
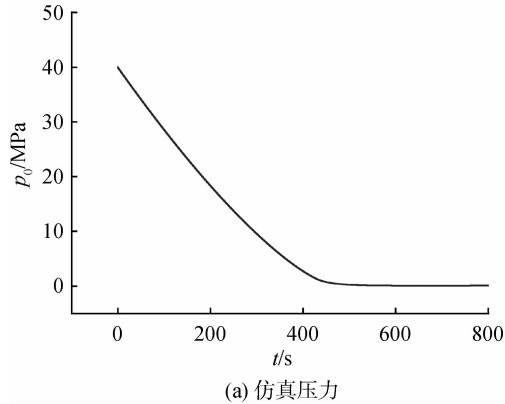


图 3 气罐输出的仿真与测试压力
Fig. 3 Simulation and test pressure of the vessel's output

整后使输出压力稳定在 0.715 MPa 附近,且调整时间在 0.2 s 以内。380 s 后,气罐的输出压力趋近于减压器的理论输出压力,此时输出压力会迅速降低至大气压力附近。气罐和减压器输出压力的仿真、测试结果显示:受传感器精度限制及外部干扰,测试值存在一定波动,仿真值与测试值整体趋势基本一致,在一定误差内,仿真和试验可以相互验证,说明 AMESim 仿真模型可对双级减压器进行准确模拟。

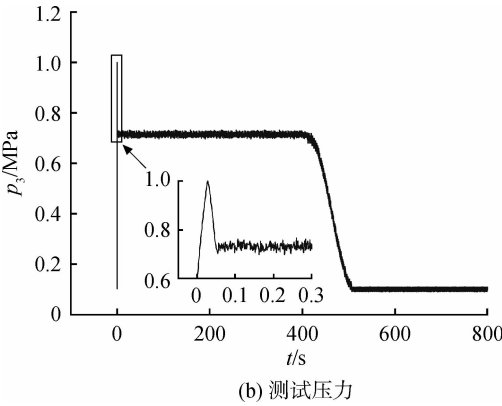
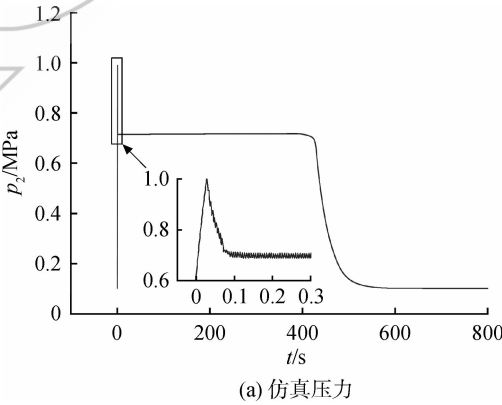


图 4 减压器输出的仿真与测试压力
Fig. 4 Simulation and test pressure of the pressure reducing regulator's output

1.3 响应面试验方法

双级气体减压器的输出特性主要受二级结构的影响并反映在输出压力的超调量和脉动强度上。文中采用基于 BBD(box-Behnken design)响应面试验设计方法分析二级结构设计参数对减压器输出特性的影响。根据减压器结构及工作原理,选取双级气体减压器二级结构的阀芯质量 X_1 、反馈孔面积 X_2 、主弹簧刚度 X_3 、副弹簧刚度 X_4 、密封处动泄漏面积 X_5 及膜片刚度 X_6 作为考察因素,以减压器输出压力的超调量和脉动强度作为响应。

根据图 4,取 0.2 s 内输出压力的最大值作为压力峰值、2~8 s 内输出压力的平均值作为输出压力的稳态值计算输出压力的超调量。取 2~8 s 阀芯运动速度的标准差作为输出压力脉动强度的衡量指标,即脉动标准差^[19]。根据减压器样件的实际尺寸、加工材料和工作环境选取各考察因素的设计参数变化范围,并确定各因素的水平编码,

由此设计 6 因素 3 水平的响应面试验,试验编码如表 1 所示。利用 design-expert 安排试验方案,通过 AMESim 仿真及统计分析得到各试验组对应的响应值,试验方案及响应结果如表 2 所示,式中 Y_1 表示超调量, Y_2 表示脉动标准差。

表 1 因素水平编码
Table 1 Factor level coding

因素	水平编码		
	−1	0	+1
X_1/g	32.60	42.60	52.60
X_2/mm^2	5.07	7.07	9.07
$X_3/(\text{N}/\text{mm})$	47.95	57.95	67.95
$X_4/(\text{N}/\text{mm})$	6.77	8.77	10.77
X_5/mm^2	0.05	0.35	0.65
$X_6/(\text{N}/\text{mm})$	70	80	90

表 2 试验方案及响应结果
Table 2 Experiment schemes and response results

方案	X_1/g	X_2/mm^2	$X_3/(\text{N}/\text{mm})$	$X_4/(\text{N}/\text{mm})$	X_5/mm^2	$X_6/(\text{N}/\text{mm})$	Y_1	Y_2
1	42.6	7.07	47.95	6.77	0.35	90	0.697789	0.045972
2	42.6	9.07	57.95	8.77	0.65	70	0.522749	0.037894
3	52.6	5.07	57.95	10.77	0.35	80	0.956448	0.032502
4	42.6	9.07	57.95	8.77	0.65	90	0.505392	0.044329
5	42.6	7.07	57.95	8.77	0.35	80	0.695802	0.046695
6	42.6	7.07	67.95	6.77	0.35	70	0.697789	0.045983
7	42.6	9.07	47.95	8.767	0.65	80	0.522749	0.037899
8	42.6	9.07	57.95	8.767	0.05	90	0.511363	0.046236
9	52.6	5.07	57.95	6.77	0.35	80	0.960996	0.031777
10	42.6	5.07	57.95	8.77	0.65	90	0.982327	0.044698
11	32.6	7.07	67.95	8.77	0.35	90	0.675724	0.122811
12	52.6	7.07	57.95	10.77	0.65	80	0.704231	0.028124
13	52.6	7.07	67.95	8.77	0.35	90	0.676974	0.035125
14	42.6	5.07	67.95	8.77	0.65	80	0.982327	0.044686
15	42.6	7.07	57.95	8.77	0.35	80	0.695802	0.046695
16	42.6	7.07	57.95	8.77	0.35	80	0.695802	0.046695
17	52.6	7.07	57.95	10.77	0.05	80	0.700117	0.030344

2 响应面分析

采用 ANOVA(analysis of variance)函数拟

合数据,取 95%置信区间内参数估计值的平均值作为回归方程参数估计的系数,分别得到双级气体减压器输出压力超调量回归方程 $f_1(X)$ 及脉动

强度回归方程 $f_2(X)$ 如下：

$$f_1(X) = 2.20 - 0.264X_2 - 0.002X_3 + 0.001X_4 + 0.123X_5 - 0.002X_6 - 0.019X_2X_5 + 0.010X_2^2 + 0.093X_5^2$$

(1)

$$f_2(X) = 0.146 - 0.008X_1 - 0.005X_2 + 0.001X_3 + 0.005X_5 + 0.001X_6 - 0.00006X_1X_3 + 0.00018X_1X_5 + 0.00014X_1^2 - 0.047X_5^2$$

(2)

对回归方程式(1)、式(2)进行置信度分析,结果如表 3 所示。当原假设为真时,所得到的超调量和脉动强度模型的样本观察结果或更极端结果出现的概率 P 值均小于 0.0001,模型可信。模型拟合优度的确定系数 R^2 值分别为 0.999 6 和 0.990 1,证明超调量和脉动强度的回归模型可以解释响应值 99.96% 和 99.01% 的变化。 R^2 调整值分别为 0.999 2 和 0.979 7, R^2 预测值分别为 0.997 9 和 0.948 1。 R^2 预测值和调整值之差均小于 0.1,回归方程拟合结果较为合理。

表 3 回归模型置信度分析

Table 3 Confidence analysis of regression model

参数	超调量模型	脉动强度模型
P 值	<0.000 1	<0.000 1
平均值	0.72	0.052
变异系数	0.61	6.08
R^2 值	0.999 6	0.990 1
R^2 调整值	0.999 2	0.979 7
R^2 预测值	0.997 9	0.948 1

置信度为 95% 时各因素(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 和 X_6)的显著性如表 4 所示。表中 F 值为统计检定值,表示拟合模型中参数的显著性, F 值越大,拟合程度越好,参数越显著。根据表 4 对各因素及交互作用进行显著性评判可知:反馈孔面积 X_2 是影响超调量的关键因素,反馈孔面积与阀芯密封处动泄漏面积的交互作用 X_2X_5 会对超调量产生显著影响;主弹簧刚度 X_3 、副弹簧刚度 X_4 、阀芯密封处的动泄漏面积 X_5 和膜片刚度 X_6 的改变均会对输出压力的超调量产生影响,影响顺序为 $X_2 > X_3 > X_6 > X_2X_5 > X_4$ 。阀芯质量 X_1 是影响脉动强度的关键因素,阀芯质量与主弹簧刚度 X_3 、膜片刚度 X_6 的交互作用 X_1X_3 、 X_1X_6 对脉动性影响显著;主弹簧刚度 X_3 、副弹簧刚度 X_4 、阀芯密封处动泄漏面积 X_5 和膜片刚度 X_6 的变

化均会对脉动强度产生影响,其影响顺序为 $X_1 > X_6 > X_3 > X_1X_6 > X_1X_3 > X_5 > X_2$ 。

为分析设计参数交互作用对双级气体减压器输出特性的影响,基于回归方程绘制反馈孔面积与阀芯密封处动泄漏面积的交互作用对超调量 Y_1 影响的响应面曲线如图 5 所示。在等高线云图中,等高线沿反馈孔面积向峰值移动的密度大于阀芯密封处动泄漏面积向峰值移动的密度,表明反馈孔面积比阀芯密封处动泄漏面积对输出压力超调量影响显著。在响应面云图中,效应曲面整体呈斜坡型,当反馈孔面积较大时,效应曲面趋势较为平缓,此时交互作用较小;随着反馈孔面积的减小和阀芯密封处动泄漏面积的增加,效应曲面趋势逐渐变陡,对超调量的影响愈加明显。当反馈孔面积小于 7.07 mm^2 且阀芯密封处动泄漏面积大于 0.25 mm^2 时,效应曲面趋势明显变陡,此时存在一定的交互作用。当反馈孔面积由 9.07 mm^2 减小至 5.07 mm^2 ,阀芯密封处动泄漏面积分别为 0.05 、 0.20 、 0.35 、 0.50 mm^2 和 0.65 mm^2 时超调量相应增加了 45.86%、46.50%、47.04%、47.49% 和 47.84%。

阀芯质量与主弹簧刚度、膜片刚度的交互作用对脉动强度的影响如图 6 所示。图 6(a)是阀芯质量与主弹簧刚度的交互作用对脉动强度的影响,在等高线云图中,等高线沿阀芯质量向峰值移动的密度大于主弹簧刚度向峰值移动的密度,表明阀芯质量比主弹簧刚度对输出压力脉动强度影响显著。响应面云图的效应曲面呈内凹斜坡型,当阀芯质量减小且膜片刚度不断增大时,效应曲面趋势变陡,交互作用逐渐增加。当阀芯质量大于 45.60 g 时,随着主弹簧刚度的增大,输出压力的脉动强度迅速增大,此时阀芯质量与主弹簧刚度之间存在较强的交互作用。当阀芯质量小于 45.60 g 时,输出压力的脉动强度较小。当阀芯质量由 52.60 g 减小至 32.60 g ,主弹簧刚度分别为 47.95 、 52.95 、 57.95 、 62.95 N/mm 和 67.95 N/mm 时,减压器输出压力的脉动强度分别增加了 58.54%、61.93%、64.70%、66.93% 和 68.67%。图 6(b)是阀芯质量与膜片刚度的交互作用对脉动强度的影响,通过等高线云图可以看出阀芯质量对脉动强度的影响比膜片刚度更显著,且当阀芯质量小于 45.60 g 时输出压力的脉动强度变化明显。响应面云图的效应曲面为内凹斜坡图,随着阀芯质量的减小和主弹簧刚度的增加,阀芯质量与膜片刚度的交互作用明显增强。

当阀芯质量由 52.60 g 减小至 32.60 g,膜片刚度强度分别增加了 58.53%、61.92%、64.70%、分别为 70、75、80、85 N/mm 和 90 N/mm 时脉动66.93%和 68.68%。

表 4 回归模型方差分析结果
Table 4 Variance analysis of regression model

方差来源	平方和		平均值		F 值		P 值	
	超调量	脉动标准差	超调量	脉动标准差	超调量	脉动标准差	超调量	脉动标准差
模型	1.268	0.026	0.047	9.458×10^{-4}	2417.072	95.946	<0.000 1	<0.000 1
X_1	2.602×10^{-5}	0.021	2.602×10^{-5}	0.021	1.338	2081.075	0.2578	<0.000 1
X_2	1.233	7.918×10^{-5}	1.233	7.918×10^{-5}	63437.716	8.033	<0.000 1	0.0088
X_3	2.364×10^{-3}	5.566×10^{-4}	2.364×10^{-3}	5.566×10^{-4}	121.601	56.461	<0.000 1	<0.000 1
X_4	9.328×10^{-5}	3.114×10^{-5}	9.328×10^{-5}	3.114×10^{-5}	4.799	3.159	0.0376	0.0872
X_5	1.027×10^{-3}	1.123×10^{-4}	1.027×10^{-3}	1.123×10^{-4}	52.830	11.395	<0.000 1	0.0023
X_6	2.364×10^{-3}	5.583×10^{-4}	2.364×10^{-3}	5.583×10^{-4}	121.601	56.642	<0.000 1	<0.000 1
X_1X_2	1.238×10^{-8}	1.390×10^{-5}	1.238×10^{-8}	1.390×10^{-5}	6.371×10^{-4}	1.410	0.9801	0.2457
X_1X_3	9.402×10^{-8}	2.534×10^{-4}	9.402×10^{-8}	2.534×10^{-4}	4.837×10^{-3}	25.710	0.9451	<0.000 1
X_1X_4	1.097×10^{-8}	1.608×10^{-5}	1.097×10^{-8}	1.608×10^{-5}	5.646×10^{-4}	1.631	0.9812	0.2128
X_1X_5	1.154×10^{-12}	2.352×10^{-6}	1.154×10^{-12}	2.352×10^{-6}	5.939×10^{-8}	0.239	0.9998	0.6293
X_1X_6	9.400×10^{-8}	2.544×10^{-4}	9.400×10^{-8}	2.544×10^{-4}	4.836×10^{-3}	25.810	0.9451	<0.000 1
X_2X_3	2.117×10^{-5}	2.077×10^{-7}	2.117×10^{-5}	2.077×10^{-7}	1.089	0.021	0.3063	0.8857
X_2X_4	5.011×10^{-7}	3.023×10^{-8}	5.011×10^{-7}	3.023×10^{-8}	0.026	3.066×10^{-3}	0.8737	0.9563
X_2X_5	2.083×10^{-3}	3.436×10^{-5}	2.083×10^{-3}	3.436×10^{-5}	107.139	3.486	<0.000 1	0.0732
X_2X_6	2.117×10^{-5}	2.327×10^{-7}	2.117×10^{-5}	2.327×10^{-7}	1.089	0.024	0.3063	0.8791
X_3X_4	6.449×10^{-9}	7.518×10^{-8}	6.449×10^{-9}	7.518×10^{-8}	3.318×10^{-4}	7.626×10^{-3}	0.9856	0.9311
X_3X_5	3.680×10^{-6}	5.425×10^{-8}	3.680×10^{-6}	5.425×10^{-8}	0.189	5.503×10^{-3}	0.6671	0.9414
X_3X_6	4.335×10^{-7}	1.762×10^{-5}	4.335×10^{-7}	1.762×10^{-5}	0.022	1.788	0.8824	0.1928
X_4X_5	3.643×10^{-8}	8.174×10^{-11}	3.643×10^{-8}	8.174×10^{-11}	1.874×10^{-3}	8.292×10^{-6}	0.9658	0.9977
X_4X_6	6.449×10^{-9}	8.574×10^{-8}	6.449×10^{-9}	8.574×10^{-8}	3.318×10^{-4}	8.698×10^{-3}	0.9856	0.9264
X_5X_6	3.679×10^{-6}	5.549×10^{-8}	3.679×10^{-6}	5.549×10^{-8}	0.189	5.629×10^{-3}	0.6671	0.9408
X_1^2	4.303×10^{-6}	2.148×10^{-3}	4.303×10^{-6}	2.148×10^{-3}	0.221	217.857	0.6419	<0.000 1
X_2^2	1.700×10^{-2}	2.078×10^{-6}	0.017	2.078×10^{-6}	899.096	0.211	<0.000 1	0.6499
X_3^2	1.398×10^{-6}	5.301×10^{-6}	1.398×10^{-6}	5.301×10^{-6}	0.072	0.538	0.7907	0.4699
X_4^2	3.611×10^{-6}	8.931×10^{-6}	3.611×10^{-6}	8.931×10^{-6}	0.186	0.906	0.6700	0.3499
X_5^2	7.224×10^{-4}	1.848×10^{-4}	7.224×10^{-4}	1.848×10^{-4}	37.163	18.744	<0.000 1	0.0002
X_6^2	1.398×10^{-6}	5.306×10^{-6}	1.398×10^{-6}	5.306×10^{-6}	0.072	0.538	0.7907	0.4697
残差	5.054×10^{-4}	2.563×10^{-4}	1.944×10^{-5}	9.858×10^{-6}				
失拟误差	5.054×10^{-4}	2.563×10^{-4}	2.407×10^{-5}	1.220×10^{-5}				
纯误差	0	0	0	0				
总离差	1.269	0.026						

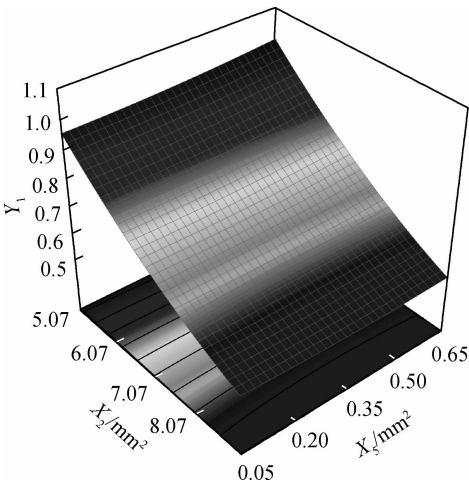
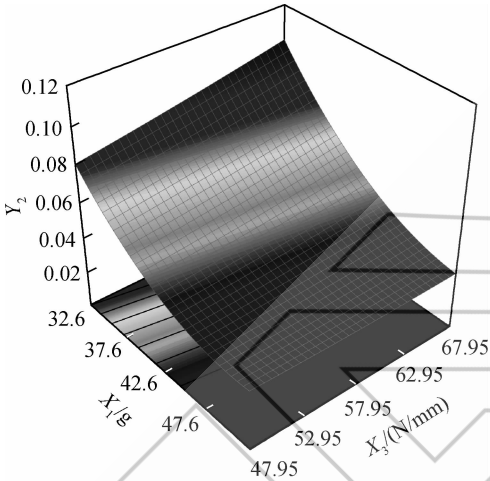
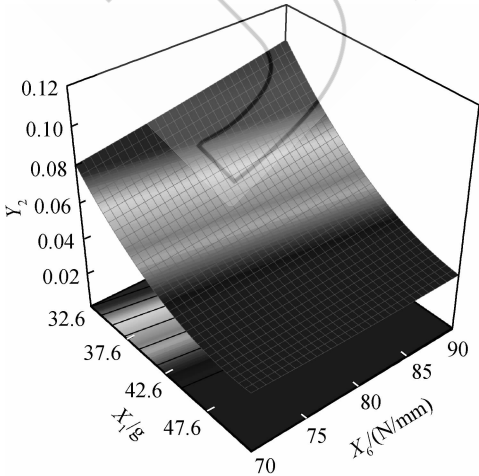


图 5 超调量的响应曲面

Fig. 5 Response surface of the overshoot



(a) 设计参数 X_1 、 X_3 的响应曲面



(b) 设计参数 X_1 、 X_6 的响应曲面

图 6 脉动强度的响应曲面

Fig. 6 Response surface of the pulsation intensity

3 回归优化分析

为提升双级气体减压器的输出特性,根据响应面分析结果,采用 NSGA-II 自适应遗传算法对回归方程式(1)、式(2)进行多目标优化,根据各考察因素的水平编码,确定优化方程的约束条件并建立优化函数如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & F(X) = [f_1(X) \quad f_2(X)] \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} 32.6 \leq X_1 \leq 52.6 \\ 5.07 \leq X_2 \leq 9.07 \\ 47.95 \leq X_3 \leq 67.95 \\ 6.77 \leq X_4 \leq 10.77 \\ 0.05 \leq X_5 \leq 0.65 \\ 70 \leq X_6 \leq 90 \end{cases} \end{aligned} \tag{3}$$

根据式(3)在 modeFRONTIER 中建立优化模型,如图 7 所示,图中 Obj1、Obj2 分别为超调量和脉动强度的回归方程 $f_1(X)$ 、 $f_2(X)$ 的优化目标,均取最小值。NSGA-II 算法的控制参数如下:交叉概率取 0.9,变异概率取 0.1,种群规模取 20,终止进化代数取 50,整个计算共约 0.5 h。

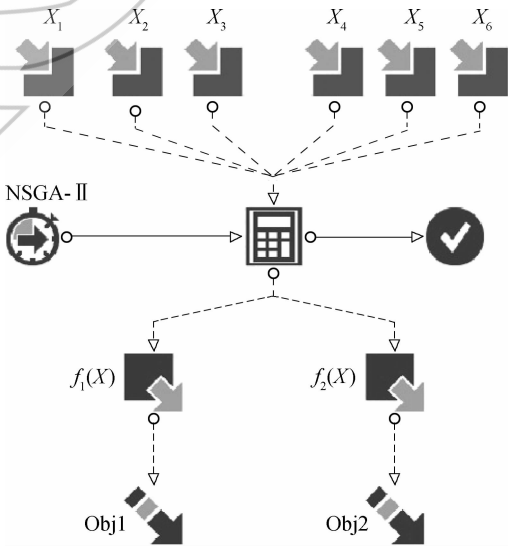


图 7 多目标优化模型

Fig. 7 Multi-objective optimization model

图 8 为进化到第 50 代时个体分布的 Pareto 解集气泡图。图中绿色实心圆代表 Pareto 解集, Pareto 前沿解以红色轮廓线标出。从图中可以看出,大多数设计都位于 Pareto 前沿上,且不断在超调量和脉动强度之间进行权衡,这表明 NSGA-II 算法优化效果较好。

图 9 所示为 Pareto 解集的平行坐标图,图中每组横坐标均代表一组变量或目标,每组解均由

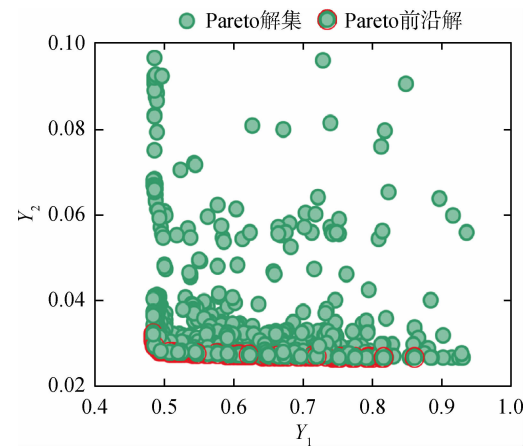


图 8 Pareto 解集气泡图
Fig. 8 Bubble chart of the Pareto

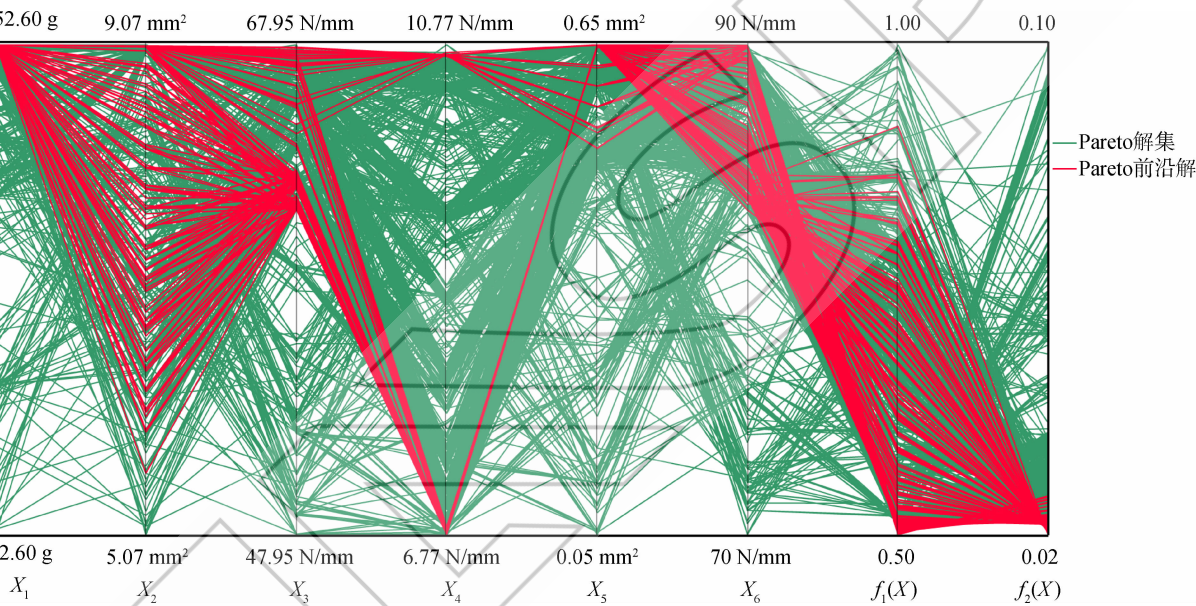


图 9 Pareto 解集的平行坐标图
Fig. 9 Parallel coordinates chart of the Pareto

表 5 优化前后结果对比

Table 5 Comparison results before and after optimizing

参数	优化前	优化后
Y_1	0.695802	0.495940
Y_2	0.046695	0.027723

4 结 论

1) 建立 AMESim 模型对航空双级气体减压器工作过程进行仿真,结果表明,减压器工作过程为含有反馈环节的阶跃响应,调整时间在 0.2 s 内。

2) 通过响应面法和回归分析,获得双级气体减压器二级结构的设计参数对输出特性的影响。其中反馈孔面积与阀芯密封处动泄漏面积的交互

折线连接,红色折线代表 Pareto 前沿解。由图 8 可知,多数的最优设计集中在阀芯质量、主弹簧刚度、阀芯密封处动泄漏面积和膜片刚度较大处。迭代次数越多,最佳设计就越接近真实的 Pareto 前沿。因此,当阀芯质量、反馈孔面积、主弹簧刚度、副弹簧刚度、阀芯密封处动泄漏面积和膜片刚度分别为 52.26 g、9.06 mm²、67.27 N/mm、10.68 N/mm、0.64 mm² 和 89.49 N/mm 时优化目标最优。

根据优化结果,利用 AMESim 进行仿真并与原始设计对比,结果如表 5 所示。回归优化后,双级气体减压器的超调量降低了 28.72%,脉动强度降低了 40.63%,减压器的输出特性提升显著。

作用对超调量影响显著,减小反馈孔面积可以有效降低输出压力的超调量;阀芯质量与弹簧刚度、膜片刚度的交互作用对脉动强度影响显著,增大阀芯质量可以有效降低输出压力的脉动强度。

3) 利用 NSGA-Ⅱ 自适应遗传算法对回归方程进行多目标优化,当阀芯质量、反馈孔面积、主弹簧刚度、副弹簧刚度、阀芯密封处动泄漏面积和膜片刚度分别为 52.26 g、9.06 mm²、67.27 N/mm、10.68 N/mm、0.64 mm² 和 89.49 N/mm 时,减压器输出压力的超调量和脉动强度分别减少了 28.72%和 40.63%。

参考文献:

[1] SEKITA R, MATSUDA M, NAKAMURA R. Pressure

- oscillation analyses of the pressure regulator for the H-II A propulsion system[R]. Huntsville, US: the 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2003.
- [2] CHEN J, VEENSTRA M, PUREWAL J, et al. Modeling a hydrogen pressure regulator in a fuel cell system with Joule-Thomson effect[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(2): 1272-1287.
- [3] 王翀, 梁国柱, 帅彤, 等. 外激励振动条件下气体减压器工作稳定性仿真研究[J]. 航空动力学报, 2017, 32(1): 233-238.
- WANG Chong, LIANG Guozhu, SHUAI Tong, et al. Simulation study of working stability of a gas pressure regulator under external excitation vibration conditions[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 233-238. (in Chinese)
- [4] FILO G, LISOWSKI E, RAJDA J. Flow analysis of a switching valve with innovative poppet head geometry by means of CFD method[EB/OL]. [2020-12-27]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0955598619301463?via%3Dihub>
- [5] PERSSON J, ÖLVANDER J. Comparison of sampling methods for a dynamic pressure regulator[R]. Orlando, US: the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2011.
- [6] CASILLAS A R, REH J R, GERVASI J, et al. Chemical propulsion for outer planet exploration[R]. Indianapolis, US: AIAA Propulsion and Energy Forum, 2019.
- [7] HURLBERT E, ABE J. Methods used to investigate and resolve the space shuttle helium pressure regulator instability[R]. Orlando, US: the 26th Joint Propulsion Conference, 1990.
- [8] MIZUKAMI M, YANKURA G, RUST T, et al. Space shuttle 750 psi helium regulator application on mars science laboratory propulsion[R]. Denver, US: the 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2009.
- [9] 翟华, 钟华勇, 孙运东, 等. 基于键合图法的新型减压器金属波纹膜片分析[J]. 中国机械工程, 2010, 21(12): 1418-1423.
- ZHAI Hua, ZHONG Huayong, SUN Yundong, et al. Analysis of new relieve valve metal crinkle diaphragm based on bond graph[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(12): 1418-1423. (in Chinese)
- [10] 陈阳, 蔡国枫, 张振鹏, 等. 双组元统一推进系统减压器稳定性仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(10): 1135-1139.
- CHEN Yang, CAI Guobiao, ZHANG Zhenpeng, et al. Numerical simulation on dynamic stability of pressure reducing regulator in integral bipropellant propulsion system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(10): 1135-1139. (in Chinese)
- [11] CHEN Y, CAI G, WU Z. Modularization modeling and simulation of turbine test rig main test system[J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(11): 5382-5399.
- [12] 刘君, 徐春光, 董海波. 基于流固耦合方法模拟减压器动态特性[J]. 推进技术, 2014, 35(6): 721-726.
- LIU Jun, XUN Chunguang, DONG Haibo. Numerical analysis of dynamic properties for a pressure relief valve using a method of fluid and structure interaction[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(6): 721-726. (in Chinese)
- [13] 陈经禄, 王拥军, 陈阳. 使用 BP 神经网络模型研究逆向卸荷膜片式减压器的稳定性[J]. 航空动力学报, 2013, 28(9): 2112-2120.
- CHEN Jinglu, WANG Yongjun, CHEN Yang. Research on Stability of reverse unloading diaphragm pressure reducing regulator using BP neural network model[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(9): 2112-2120. (in Chinese)
- [14] 刘文英, 王拥军, 王宝山, 等. 一种研究逆向卸荷膜片式减压器稳定性的 BP 神经网络改进算法[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1241-1249.
- LIU Wenying, WANG Yongjun, Wang Baoshan, et al. An improved BP neural network algorithm for researching on stability of reverse unloading diaphragm pressure reducing regulator[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1241-1249. (in Chinese)
- [15] CHEN F, REN X, HU B, et al. Parametric analysis on multi-stage high pressure reducing valve for hydrogen decompression[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(59): 31263-31274.
- [16] 陈富强, 金志江. 高参数减压阀含多孔板热应力的数值分析[J]. 化工进展, 2019, 38(S1): 19-26.
- CHEN Fuqiang, JIN Zhijiang. Thermal stress analysis of perforated plates inside high pressure reducing valves[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(S1): 19-26. (in Chinese)
- [17] SUN B, XU Q, CHEN Y. Dynamic modeling and simulation of a pressurized system used in flight vehicle[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(6): 1232-1248.
- [18] 汪旭东, 李国岫, 陈君, 等. 压电比例阀调节的氙气微推进系统流量特性仿真研究[J]. 推进技术, 2019, 40(12): 2867-2873.
- WANG Xudong, LI Guoxiu, CHEN Jun, et al. Simulation study on flow characteristics of a xenon micro propulsion system under regulation of piezoelectric proportional valve[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(12): 2867-2873. (in Chinese)
- [19] 孙冰, 许琪, 陈阳, 等. 双级气体减压器稳定性影响因素数值分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(12): 1660-1665.
- SUN Bing, XU Qi, CHEN Yang, et al. Numerical analysis of influence factors on stability for dual-stage gas pressure reducing regulator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(12): 1660-1665. (in Chinese)