

基于 DOE 的某异型喷管结构优化减重研究

李环 邓洁 张琪 李宁

(中国航发贵阳发动机设计研究所, 贵阳, 550081)

摘要:针对某异型喷管结构特点,采用实验设计(Design of experiment, DOE)中的全因子实验设计方法,建立优化数据模型,经过仿真计算和规律分析,最后使用多目标优化方法优化异型喷管结构参数,使其最大应力、最大变形及质量都取得合适值。此项研究选取异型喷管的三个主要构成因子——加强环高度、加强环厚度和喷管壁厚,经过分析这三个因子分别对该异型喷管的质量、最大应力和最大变形等响应目标的影响规律,从而得出传递函数,最终利用响应优化器求出最优解因子组合。该项研究得出:在保证强度使用要求的情况下,异型喷管的质量同比减轻 24.45%。

关键词:DOE 全因子; 结构优化; 质量; 异型喷管; 传递函数

中图分类号: V232.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2017)S-0040-05

Study on Structural Optimization and Weight Reduction of a Shaped Nozzle Based on DOE

LI Huan, DENG Jie, ZHANG Qi, LI Ning

(AECC Guiyang Engine Design Research Institute, Guiyang, 550081, China)

Abstract: In the light of the structural characteristics of a shaped nozzle, the optimized data model is established by using the total divisor experiment in design of experiment (DOE). Through the simulation calculation and regular analysis, the multi-objective optimization method is used to optimize the structure parameters of the shaped nozzle so that their maximum stress, maximum deformation and mass are all appropriate. Three main structure parameters of the shaped nozzle—the height of the stiffening ring, the thickness of the stiffening ring and the thickness of the nozzle wall, are selected. After analyzing their respective influence rules on the mass, maximum stress and maximum deformation, and getting the transfer function, the optimal solution factor combination is obtained by using the response optimizer. The result shows that the mass of the shaped nozzle is reduced by 24.45% in the case of ensuring the use of strength requirements.

Key words: total divisor in design of experiment; structural optimization; mass; shaped nozzle; transfer function

推重比是航空发动机的一项重要指标,同样的推力,质量越轻,则发动机越好^[1]。喷管是发动机不可或缺的一个重要部件,设计人员致力于以最轻的质量代价达到符合要求性能的设计研究。鉴于此,一套行之有效的优化设计方法能大大提高设计

效率,降低设计经济成本,缩短设计周期。实验设计(Design of experiment, DOE)是一种集方案设计与优化分析于一身的数理统计方法,它能够用较少的实验次数、较短的实验周期和较低的成本获得良好的预期目标,在很多学科和领域中都能够

收稿日期: 2017-05-15; **修订日期:** 2017-06-20

通信作者: 李环,男,助理工程师, E-mail: litianhuan1993@sina.com。

引用格式: 李环, 邓洁, 张琪, 等. 基于 DOE 的某异型喷管结构优化减重研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(S): 40-44. LI Huan, DENG Jie, ZHANG Qi, et al. Study on structural optimization and weight reduction of a shaped nozzle based on DOE[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(S): 40-44.

运用,逐渐在工程实际中显示出其独特的优越性^[2]。DOE方法众多,主要包括:全因子实验设计、部分因子实验设计和响应曲面实验设计等。

DOE的应用很广泛。胡磊等选取喷油系统参数中预喷油量、预喷油角、主喷油角作为设计变量进行DOE实验设计,得到柴油机外特性典型工况下的最佳喷油参数^[3]。李金明等通过DOE实验设计完成齿面接触性能参数(齿向鼓形、齿向角度偏差、齿形鼓形和齿形角度偏差)的最优化设计^[4]。张俊红等采用DOE实验设计中的拉丁超立方设计对消声器参数进行分析,有效辨识出各参数对消声器传递损失贡献度的大小,简化了消声器的优化模型^[5]。赵云针对集装罐用安全阀使用特点,采用DOE实验设计方法,引用多任务优化方式优化弹簧设计,得出其最大影响因素为丝径^[6]。马三中通过DOE实验设计,对铝合金压铸件镀装饰性铜镍铬工艺参数进行了优选,找出了电流密度、温度、pH值的最佳配合,运用到生产实践中,提高了产品质量和生产效率^[7]。

本文中采用了全因子实验设计,即所有实验因子不同水平取值下的所有组合,都要至少进行一次实验,其优点是能够评价所有因子的主效应以及多阶交互效应^[8-9]。本文使用三维建模软件UG、仿真软件ANSYS,以某异型喷管为研究对象,运用DOE系统进行了3因子2水平全因子实验设计,在保证满足强度使用要求的前提下,以减轻该喷管质量为目标,得出最优解因子参数组合。

1 DOE实验前准备

1.1 研究对象介绍

本文以某异型喷管组件为研究对象,研究流程如图1所示。

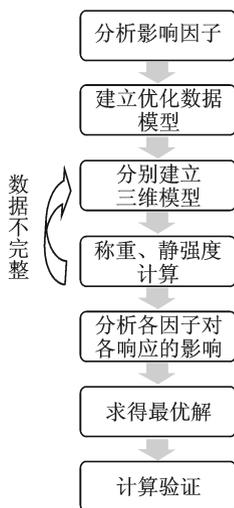


图1 研究流程

Fig.1 Research flow chart

异型喷管组件如图2所示,属于固定的收敛喷管^[10]。该喷管流道型面由进口的圆形逐渐过渡到出口的椭圆形,进出口位置都设计了法兰边与其他部件连接,位于该喷管中、后段的两个加强环结构能有效抑制其应力和变形。

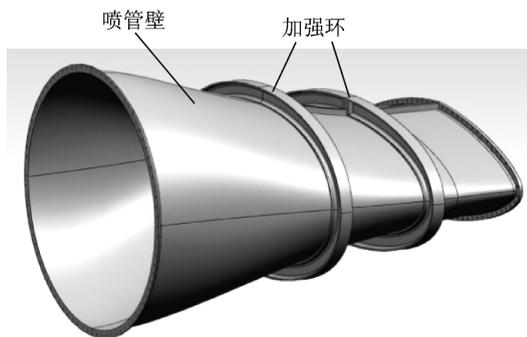


图2 异型喷管

Fig.2 Shaped nozzle

1.2 影响因子分析

该异型喷管进出口位置的法兰边与其他部件有连接关系,其结构也没有减重空间,内流道型面已经确定,不能改动,而喷管壁厚和加强环结构则相对自由。经计算分析可知该组件的最大应力和最大变形主要受喷管壁厚、加强环高度以及加强环厚度的影响,根据设计要求和以往计算经验选取了3个因子,如图3所示。

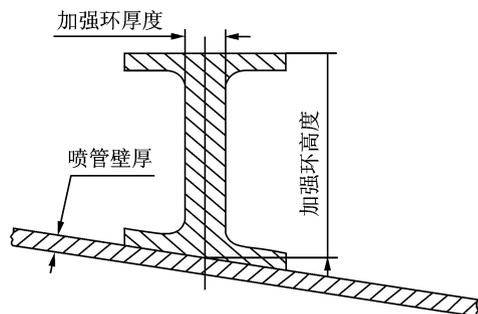


图3 优化模型影响因子

Fig.3 Influence factors of optimization model

2 DOE实验过程

2.1 建立优化数据模型、采集数据

依据前文影响因子,利用Minitab软件中的DOE程序进行3因子2水平全因子实验,建立优化数据模型,如表1所示(前4列),然后利用UG根据各组参数分别进行三维建模并称重,接着用ANSYS的Workbench平台中Static Structural模块进行仿真计算。鉴于该喷管为平面对称结构,为缩短计算时间,提高研究效率,故对其一半模型进行仿真计算,使用Hex Dominant Method进行网格划分,基本单元尺寸为6 mm,单元总数约为14万

表1 异型喷管优化数据模型

Tab.1 Optimized data model of shaped nozzle

标准序	加强环高度 X_1/mm	加强环厚度 X_2/mm	喷管壁厚 X_3/mm	质量 Y_1/kg	最大应力1 Y_2/MPa	最大应力2 Y_3/MPa	变形 Y_4/mm
1	72	12	3.6	76.61	478.88	511.82	8.85
2	84	12	3.6	79.87	491.94	429.64	8.20
3	72	24	3.6	89.26	491.41	434.77	8.02
4	84	24	3.6	95.42	480.76	357.12	7.22
5	72	12	4.8	91.43	381.62	466.98	7.52
6	84	12	4.8	94.30	364.09	385.06	6.61
7	72	24	4.8	104.06	395.18	375.19	6.72
8	84	24	4.8	109.92	375.32	325.96	6.00
9	78	18	4.2	92.13	458.77	388.02	7.09

个,节点数约为57万个,施加重力加速度以及通过流道流场计算得出的喷管轴向力、温度场、压力场等载荷,并固定约束喷管前端面,得出响应目标质量、最大应力和最大变形等三者的值,见表1(后4列),最后一列“变形”即为“最大变形”。其中,因最大应力区域出现在喷管Ⅱ段上两处不同位置(见图4),故采集的最大应力数据有两列值,最大变形位置如图5所示。

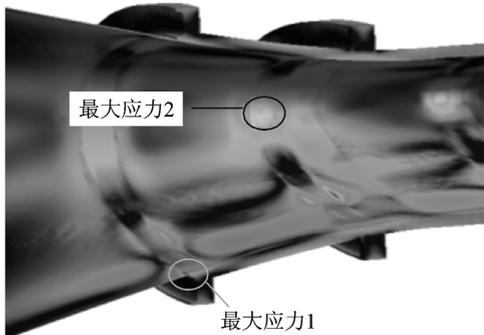


图4 最大应力位置

Fig.4 Maximum stress position

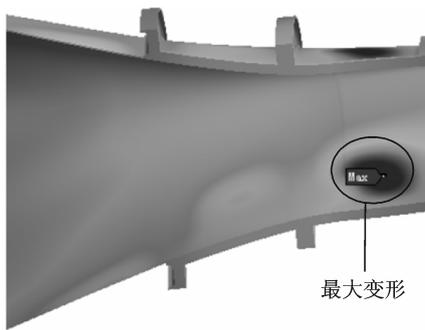


图5 最大变形位置

Fig.5 Maximum strain position

及两两组合而成的3个二阶因子分别对质量、最大应力和最大变形等4个响应的影响情况,一步步剔除对各响应影响不显著的因子项,得出各响应的传递函数如下(函数中各变量代表参数见表1)

$$Y_1 = 19.3859 + 0.00982X_1 - 0.41858X_2 + 12.1987X_3 + 0.024534X_1X_2$$

$$Y_2 = 808.754 - 88.91X_3$$

$$Y_3 = 1151.48 - 6.0625X_1 - 6.2595X_2 - 37.535X_3$$

$$Y_4 = 18.3341 - 0.0642025X_1 - 0.0671375X_2 - 1.13287X_3$$

3个因子对各响应的影响强弱对比如图6~8中各Pareto图所示,柱状图越长表示影响越大。其中对响应为最大应力1影响显著的因子有且只有喷管壁厚,故无需其Pareto图。

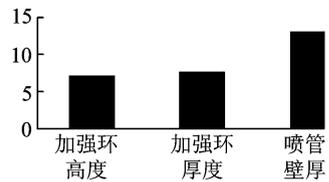


图6 最大变形 Pareto 图

Fig.6 Pareto chart of maximum strain

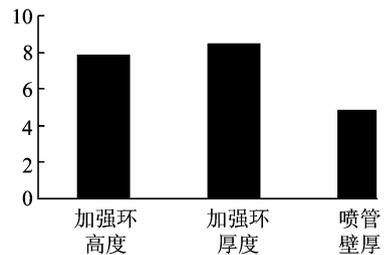


图7 最大应力2 Pareto 图

Fig.7 Pareto chart of maximum stress 2

2.2 影响规律分析

研究中取显著性水平 $\alpha=0.05$,经过综合分析加强环高度、加强环厚度、喷管壁厚3个主因子,以

经过3个因子交互作用分析发现,3个因子对各响应的影响相对独立,无明显交互作用。通过残

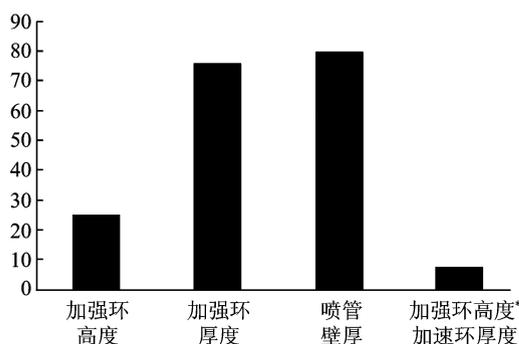


图 8 重量 Pareto 图

Fig. 8 Pareto chart of weight

差分析知各项数据点分布随机,无明显规律,可排除存在未知的特定干扰项的可能。

2.3 最优解及其验证

利用响应优化器,把 4 个响应都选定为优化目标,其值都为“望小”,目标值分别设置为:质量目标值为 86 kg,两应力的目标值均为 420 MPa,变形目标值为 6.2 mm,所有项权重和重要性均设置为 1。根据前文中得出的传递函数关系式,DOE 响应优化器程序能自动求解最优解,求出的最优解如图 9 所示。

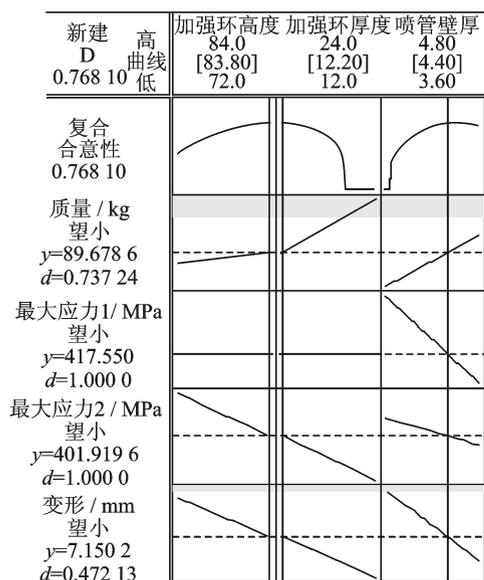


图 9 最优解

Fig. 9 Optimum solution

其中加强环高度、加强环厚度和喷管壁厚的复合合意性曲线都为上凸曲线,取其最高点位置进行微调得最优解为:加强环高度为 83.8 mm,加强环厚度为 12.2 mm,喷管壁厚为 4.4 mm。

利用最优解参数组合建立三维模型,按 2.1 节所述进行仿真计算,得出质量等计算值数据见表 2,其中偏差为拟合值与计算值的差值同计算值的比值, $R-sq$ (预测)为利用 DOE 程序分析影响规律时所

得,表征优化数据模型得出的函数关系式对可行域内各参数组合的拟合值与相应计算值的比值范围。观察发现,最优解的质量等拟合值与计算值相比,其偏差均不大,且偏差规律与 $R-sq$ (预测)相符。因此,该最优解参数组合可靠性高。在保证强度使用要求的情况下,得出的最优喷管质量为 89.6 kg,原喷管质量为 118.6 kg,同比减轻 24.45%。

表 2 拟合值与计算值对照表

Tab. 2 Check list between fitted value and calculated value

对照项	质量/kg	最大应力 1/MPa	最大应力 2/MPa	变形/mm
壁厚 4.4 (拟合)	89.68	417.55	401.92	7.15
壁厚 4.4 (计算)	89.60	390.05	395.34	7.05
偏差/%	0.09	7.05	1.66	1.42
$R-sq$ (预测)/%	99.91	89.59	92.02	95.66

3 结 论

有限元分析与 DOE 多项目优化设计相结合的办法,不仅能够避免基于经验设计所造成的不优化问题,而且其优化过程条理清晰、有理有据、方便快捷,能大大提高研发效率。

该项基于 DOE 的异型喷管结构优化减重研究工作可得出如下结论:

- (1)加强环高度、加强环厚度和喷管壁厚 3 因子对异型喷管组件的质量、最大应力和最大变形的影响关系及其传递函数;
- (2)保证强度使用要求的情况下,筛选得到最优解参数组合,有效降低某异型喷管组件质量,同比减轻 24.45%。

参考文献:

- [1] 张洪彪,李志广,吴大观,等. 航空发动机设计手册 [M]. 北京:航空工业出版社,2001.
- [2] 李辉. 基于 DOE 的无铅波峰焊接工艺优化的研究 [D]. 深圳:哈尔滨工业大学深圳研究生院,2008. LI Hui. Optimizing the process of lead-free wave soldering based on DOE [D]. Shenzhen: Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 2008.
- [3] 胡磊,石君明,孙跃东,等. 基于 DOE 的柴油机喷油系统参数优化研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(6):743-747. HU Lei, SHI Junming, SUN Yuedong, et al. Study of parameter optimization of a diesel engine injection system based on DOE [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2015,38(6):743-747.

- [4] 李金明,刘飞涛,方伟荣. 基于 DOE 的大转矩工况下齿面接触形态优化[J]. 机械传动, 2015, 39(11): 170-172.
LI Jinming, LIU Feitao, FANG Weirong. Optimization for gear contact pattern under high torque condition based on the DOE[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(11): 170-172.
- [5] 张俊红,朱传峰,毕凤荣,等. 基于 DOE 和改进模拟退火算法的消声器优化设计[J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 169-175.
ZHANG Junhong, ZHU Chuanfeng, BI Fengrong, et al. Optimal design of mufflers based on DOE and improved simulated annealing algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(13): 169-175.
- [6] 赵云. 集装罐安全阀弹簧优化设计研究[J]. 煤炭技术, 2010, 29(12): 31-33.
ZHAO Yun. Study on container tank safety relief valve spring design and optimization [J]. Coal Technology, 2010, 29(12): 31-33.
- [7] 马三中. 运用 DOE 实验设计优化锌铝合金压铸件电镀工艺参数[J]. 家电科技, 2015, 1(6): 84-86.
MA Sanzhong. Application of DOE experiment to optimize the zinc aluminum alloy diecasting electroplating process parameters design[J]. China Appliance Technology, 2015, 1(6): 84-86.
- [8] 刘晓剑. 变频空调主板无铅波峰焊工艺 DOE 优化及可靠性评价[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2013.
LIU Xiaojian. Optimization and reliability evaluation of lead-free wave soldering process by DOE for inverter air-conditioner motherboard [D]. Shenzhen: Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 2013.
- [9] 闵亚能. 实验设计(DOE)应用指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [10] 陈怀壮. 二元推力矢量喷管的结构设计及优化[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2008.
CHEN Huaizhuang. The design and optimization on the structure of dual thrust vectoring nozzle [D]. Nanjing: College of Aeronautics Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.