

文章编号:1674-8190(2015)04-473-06

机载蒸发循环系统结构的轻量化设计

张毅, 郭银赛, 张梦漪, 曾祥福

(西京学院 机械工程学院, 西安 710123)

摘要: 机械结构作为机载蒸发循环系统主要的支撑件, 具有较大的质量并承受来自直升机的振动冲击作用, 其结构性能影响着整个系统的正常功能, 在保证足够强度和刚度的前提下, 对结构进行轻量化设计具有重要的理论意义和实用价值。首先, 采用 ANSYS 软件对机载蒸发循环系统进行有限元分析; 然后, 借助 Pro/E 与 Ansys Workbench 之间的双向参数实时传递功能, 对结构进行参数化设计, 在此基础上采用灵敏度分析法获取对模型优化目标影响较大的关键尺寸参数; 最后, 采用多目标遗传算法对结构进行优化设计。结果表明: 在满足设计要求的前提下, 结构质量比原来减少了 24.4%, 得到了最佳结构参数, 实现了轻量化目的。

关键词: 机载蒸发循环系统; 有限元分析; 参数化; 灵敏度分析; 轻量化

中图分类号: V245.3+43

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2015.04.012

Lightweight Design of Airborne Evaporation Circulatory System Structure

Zhang Yi, Guo Yinsai, Zhang Mengyi, Zeng Xiangfu

(College of Mechanical Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China)

Abstract: Mechanical structure, as the main support of airborne evaporation circulatory system, has great mass and subject to the vibration impact from the helicopter. Its performance affects the normal function of the whole system. On the premise of guaranteeing sufficient strength and rigidity of structure, lightweight design is of important theoretical significance and practical value. Firstly, the finite element analysis of airborne evaporation circulatory system is carried out by using ANSYS software. Then the structure is parametric designed by using real-time transfer function of parameters between Pro/E and Ansys Workbench. The critical dimensions of parameters model are got by using the sensitivity analysis, which are of more influence on the optimization goal. Finally, the multi-objective genetic algorithm is adopted to design its structure. Results show that the weight is reduced to 24.4% of the original structure. The optimal structure parameters are obtained to realize the lightweight of the structure.

Key words: airborne evaporation circulatory system; finite element method analysis; sensitivity analysis; parameterization; lightweight

0 引言

航空领域中要求机载设备具有质量轻的特点, 对机载设备的轻量化设计通常采用如下方法: ①对

目标函数和状态变量进行加权灵敏度分析^[1], ②选用强度、刚度大而重量轻的材料^[2], ③对其结构进行拓扑优化后再进行轻量化设计^[3], ④依据设计手册, 参照同类零件的尺寸和比例, 对其进行轻量化设计等。上述方法均存在一定的缺点或不足, 比如方法④不能合理设置多个设计变量在约束范围内的自动变化寻优, 故无法实现真正的轻量化设计。国内对于机载蒸发循环系统的研究多停留在其仿真层面上^[4-5], 鲜有对其主要支撑机械结构轻量化方面的研究。

收稿日期: 2015-05-07; 修回日期: 2015-07-14

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2013JM8040)

陕西省教育厅科学研究计划项目(13JK1204)

西京学院研究生创新基金

通信作者: 郭银赛, guoysxj@163.com

本文主要对设计变量进行参数化量,首先采用 ANSYS 软件对机载蒸发循环系统进行有限元分析,然后采用灵敏度分析法获取对模型优化目标影响较大的关键尺寸参数,最后采用多目标遗传算法对结构进行优化设计,以实现产品的多目标优化设计。

1 静力学分析

ANSYS 的 CAD/CAE 协同仿真新环境 AWE (ANSYS Workbench Environment)能直接读入各种 CAD 软件的零件模型,并在其统一环境中实现任意模型装配和 CAE 分析^[6]。Pro/E 建立的结构模型,要实现与 AWE 参数化对接,实现协同仿真优化功能,就必须对建立的模型参数进行修改^[7],原因是 AWE 只识别以“ds_”开头的尺寸变量才能将数据信息传递到 Simulation, Response Surface, Design Explorer 环境中^[8]。根据所选的机载蒸发循环系统的主要部件,进行合理放置,得到其系统的结构,如图 1 所示。

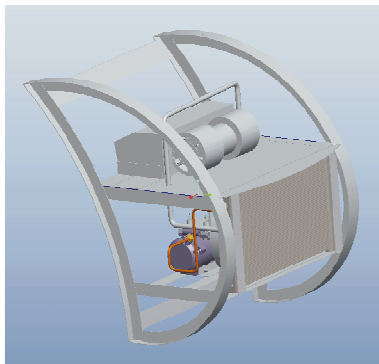


图 1 机载蒸发循环系统的结构图

Fig. 1 Structure diagram of airborne evaporation circulatory system

结构材料选用 Al7075,密度为 $2\ 810\ \text{kg}/\text{m}^3$,屈服强度为 $455\ \text{MPa}$,考虑安全系数为 1.5,许用应力为 $303\ \text{MPa}$,最大变形量为不超过 $1.2\ \text{mm}$,弹性模量为 $71\ 700\ \text{MPa}$,泊松比为 0.33。根据设计经验得出结构的初始设计参数,根据所选的部件,冷凝器、压缩机、蒸发器的重量分别为 6.2 、 7.6 和 $3.5\ \text{kg}$ 。由于压缩机为电动压缩机,引起的振动载荷较小,相对可以忽略,在施加边界时考虑一定的余量。冷凝器、压缩机、蒸发器的承重件承受的分布载荷分别为 2.0×10^3 、 1.4×10^3 、 $1.2 \times 10^3\ \text{MPa}$,空气流动产生的最大载荷为 $1.658 \times 10^3\ \text{MPa}$ 。把参数名称改为“ds_”,然后将参数化模型导入 AWE 的 DM 模块中,

共有 26 个参数。

考虑到结构的布置,根据设计经验只对如图 2 所示的十个关键结构件中的部分变量(截面的长和宽,由于结构件 1、5、7、10 的截面为“L”型,分别取合理的长与宽)进行参数化处理。选取的参数化变量如表 1 所示。

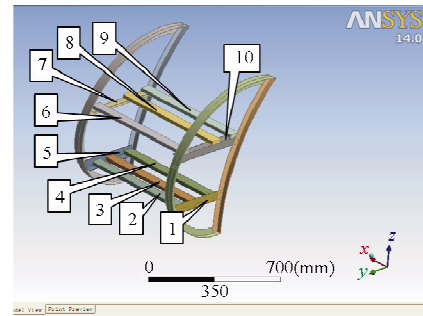


图 2 关键结构件

Fig. 2 Key structure parts

表 1 选取的参数化变量

Table 1 The parametric variables selected

| 结构件 编号 | 选取的参数化变量 | |
|-----------|---------------|-------------|
| | 长 | 宽 |
| 1 | ds_d33/ds_d32 | ds_d31 |
| 2 | ds_d17 | ds_d18 |
| 3 | ds_d16 | ds_d15 |
| 4 | ds_d30 | ds_d14 |
| 5 | ds_d20/ds_d19 | ds_d22 |
| 6 | ds_d5 | ds_d4 |
| 7 | ds_d12/ds_d13 | ds_d7/ds_d6 |
| 8 | ds_d3 | ds_d2 |
| 9 | ds_d1 | ds_d0 |
| 10 | ds_d11/ds_d10 | ds_d8/ds_d9 |

设置边界条件如图 3 所示。自动划分网格,节点数为 13 790,元素数为 3 984,如图 4 所示。

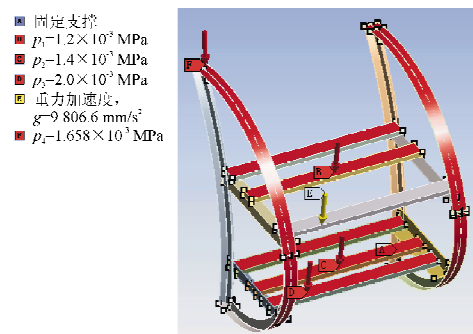


图 3 边界条件

Fig. 3 Boundary conditions

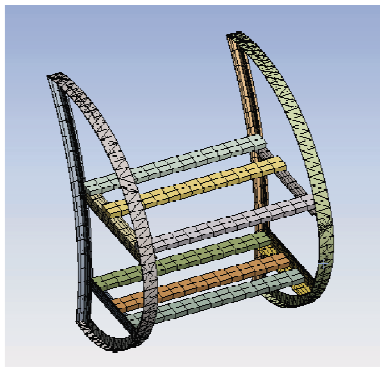
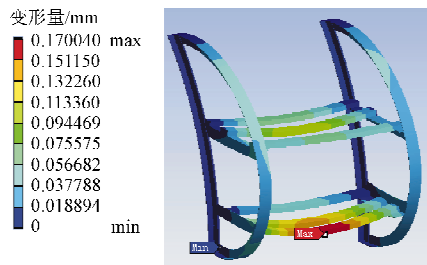


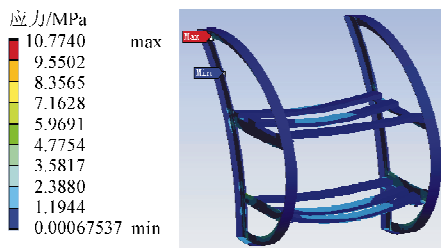
图 4 网格图

Fig. 4 Grid chart

静力学分析结果如图 5 所示。



(a) 变形量



(b) 应力图

图 5 静力学分析

Fig. 5 Statics analysis

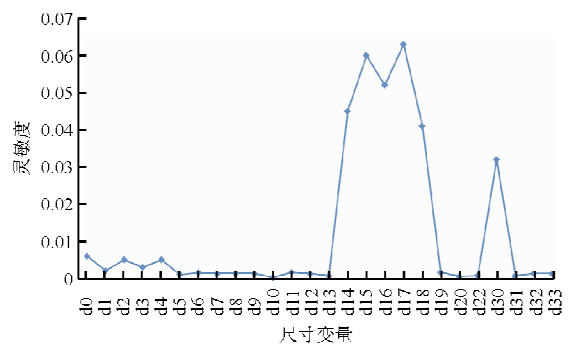
从图 5 可以看出,最大变形量为 0.170 04 mm,最大应力为 10.744 MPa,此时质量为 16.210 kg。虽然变形量、应力均已满足要求,但是由于设计参数是根据设计经验得出的,并不能保证此时设计参数是最佳的匹配,既满足设计要求,又保证质量最小,需要进行多目标优化设计。

2 灵敏度分析

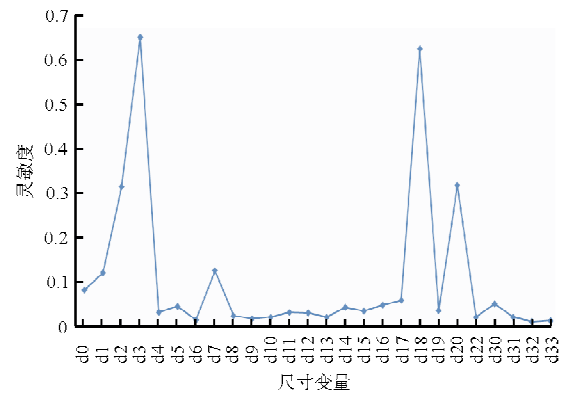
由于结构的各个设计变量对模型的优化目标影响程度并不相同,若将全部的设计变量都用于优化,则计算十分繁琐,可能会导致迭代不收敛,寻找不到最优值,最终致使计算失败。

灵敏度分析是通过定量分析选取对模型优化目标影响较大的设计变量,提高设计效率并减少设计成本,得到合理的最优值,同时灵敏度分析也是结构优化设计的基础,为进一步的优化提供方向^[9-10]。

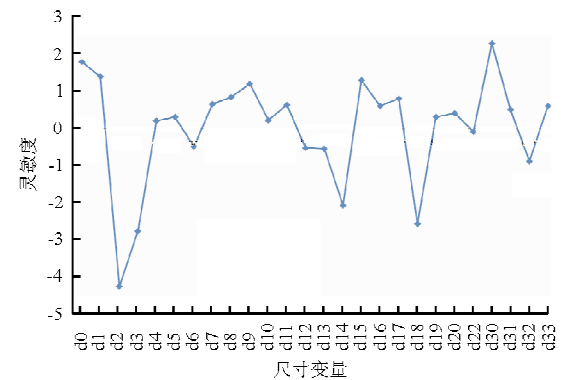
通过对上述参数进行灵敏度分析,分别得到关于质量、应力、变形量的灵敏度,如图 6 所示,当优化尺寸的灵敏度为正值时,表示尺寸增大时,目标函数的值增加;相反,当优化尺寸的灵敏度为负值时,表示尺寸减小时,目标函数的值减小。



(a) 质量



(b) 应力



(c) 变形量

图 6 灵敏度分析

Fig. 6 Sensitivity analysis

从图 6 可以看出: d0、d1、d2、d3、d14、d15、d16、d17、d18、d30 产生的结构变形、应力和质量的影响因子较大,而且 $d0 = d2, d14 = d15$, 因此选用上述八个尺寸对结构进行最终的尺寸优化。

3 基于多目标遗传算法的优化设计

由于 AWE 中的 Design Exploration 模块是基于变分技术的多目标优化工具,选择设计管理器中的静力学模块和多目标优化驱动模块(如图 7 所示)^[11-12],对结构件进行优化设计。借助 Pro/E 与 AWE 之间的双向参数实时传递功能,实现产品的多目标优化设计,在很大程度上缩短设计周期,从而降低产品的研发成本。设计变量及目标变量如图 7 所示。

| | A | B | C |
|----|---------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 1 | | Enabled | Quick Help |
| 2 | Design of Experiments | | |
| 3 | Input Parameters | | |
| 4 | Static Structural (A1) | | |
| 5 | P5 - ds_d30 | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 6 | P4 - ds_d15 | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 7 | P3 - ds_d3 | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 8 | P1 - DS_d1 | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 9 | P2 - DS_d2 | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 10 | P6 - ds_d18 | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 11 | P7 - ds_d16 | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 12 | P8 - ds_d17 | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 13 | Output Parameters | | |
| 14 | Static Structural (A1) | | |
| 15 | P9 - Total Deformation Maximum | | |
| 16 | P10 - Equivalent Stress Maximum | | |
| 17 | P11 - Geometry Mass | | |
| 18 | Charts | | |

图 7 设计变量及目标变量

Fig. 7 Design variables and objectives

通过中心复合设计的试验方法,设计类型为 G-Optimality,选取合适的结构有限元分析样本点,优化参数的变化范围如表 2 所示。共有 81 种组合,部分组合参数的变化范围如图 8 所示。

表 2 优化参数的变化范围

Table 2 Ranges of optimization parameters

| 尺寸变量 | 原始参数/mm | 上限/mm | 下限/mm |
|------|---------|-------|-------|
| d0 | 20 | 17 | 13 |
| d1 | 55 | 52 | 48 |
| d2 | 20 | 17 | 13 |
| d3 | 55 | 52 | 48 |
| d14 | 20 | 17 | 13 |
| d15 | 20 | 17 | 13 |
| d16 | 55 | 52 | 48 |
| d17 | 55 | 52 | 48 |
| d18 | 20 | 17 | 13 |
| d30 | 55 | 52 | 48 |

图 8 部分组合参数的变化范围

Fig. 8 Ranges for parts of the combination parameters

经过试验设计生成响应面,在此基础上采用多目标遗传算法(MOGA)^[13-15]进行优化。最大允许 Pareto 百分比为 80%,即收敛准则:群体中至少有 80%的样本包含在此次迭代得到的 Pareto 优化前沿,则迭代停止。设种群总数为 81 个,最大迭代次数为 25 次。由多目标遗传算法可知,获得 Pareto 最优解集(Pareto Front)需要设置不同的权值 ω 来选取不同的优化方案。Design Exploration 中可以通过设置目标函数的重要性(Importance)来决定权值取最优值。本优化问题中由于主要关注最大变形量和质量,将二者的重要性均设为 Higher,应力设为 Lower。得出的三个候选设计点如图 9 所示,候选点上面的星级表示其最合适的程度,第三个候选点相对于第一和第二个候选点,在质量、应力、变形量的星级分布更均匀,更能同时满足三个目标的要求,故选取第三个点作为最优解。

图 9 三个候选设计点

Fig. 9 Three candidate design points

对候选设计点进行圆整,保留一位小数,得到的参数值如表 3 所示。

表3 优化方案前后对比

Table 3 Comparison of the scheme between before and after optimization

| 方 案 | 数值/mm | |
|-----|-------|------|
| | 优化前 | 优化后 |
| d0 | 20 | 14.5 |
| d1 | 55 | 51.5 |
| d2 | 20 | 14.5 |
| d3 | 55 | 49.0 |
| d14 | 20 | 13.5 |
| d15 | 20 | 13.5 |
| d16 | 55 | 48.5 |
| d17 | 55 | 50.0 |
| d18 | 20 | 14.0 |
| d30 | 55 | 48.5 |

优化结果如图 10 所示。

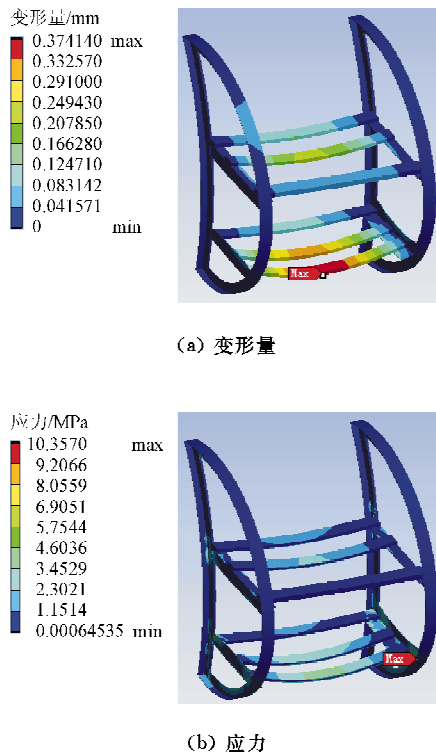


图 10 优化结果

Fig. 10 Optimization results

从图 10 可以看出,优化后的变形量为 0.374 14 mm,应力为 10.357 MPa,满足设计要求。优化前机载蒸发循环系统结构的质量为 16.210 kg,优化后的质量为 12.257 kg,优化后质量比原来减少了 24.4%,实现了轻量化设计。

4 结 论

采用灵敏度分析法可以获得机载蒸发循环系统机械支撑结构的关键尺寸参数;通过多目标遗传算法对其结构进行优化设计,与原设计方案相比,在满足设计要求的前提下,该方法具有计算效率高、较准确的特点,结构质量比原来减少了 24.4%,实现了轻量化设计。

参考文献

- [1] 朱泽鹏. 大展弦比机翼的轻量化设计及颤振分析[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
Zhu Zepeng. The lightweight design and flutter analysis of high aspect ratio wign[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013. (in Chinese)
- [2] 吕岗. 基于复合材料的某飞机零部件轻量化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Lü Gang. Study on lightweight of a certain aircraft parts based on composite materials[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [3] 季武强. 飞机机翼结构拓扑优化方法研究及其实现[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
Ji Wuqiang. Research and implementation on topology optimization methods of aircraft wing structure[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013. (in Chinese)
- [4] 李运祥, 潘泉, 刘志丽, 等. 机载蒸发循环制冷系统动态仿真[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(1): 127-132.
Li Yunxiang, Pan Quan, Liu Zhili, et al. Dynamic numerical investigations of on-board vapor-compression refrigeration system[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(1): 127-132. (in Chinese)
- [5] 龙海, 朱春玲. 机载蒸发循环系统动态仿真[J]. 飞机设计, 2012, 32(1): 53-57.
Long Hai, Zhu Chunling. The dynamic simulation of airborne vapor cycle system[J]. Aircraft Design, 2012, 32(1): 53-57. (in Chinese)
- [6] Kent Lawrence. ANSYS Workbench tutorial release 14 [M]. SDC Publications, 2012.
- [7] 周尔民, 肖乾. 基于 Pro/E Wildfire 实现变速器的虚拟装配和运动仿真[J]. 煤矿机械, 2007, 28(20): 78-80.
Zhou Ermin, Xiao Qian. Virtual assembly and kinematics of gearbox based on Pro/E Wildfire[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(20): 78-80. (in Chinese)
- [8] Hwei-Huang Lee. Finite element simulations with ANSYS Workbench 14[M]. SDC Publications, 2012.
- [9] Wu Qiang, Semenova Y, Wang Pengfei, et al. High sensitivity SMS fiber structure based refractometer-analysis and experiment[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 7937-7944.

- [10] 刘军华. 空调钣金件结构优化设计及冲压成形仿真[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
Liu Junhua. Structure optimization and stamping forming simulation of air-conditioned panel[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [11] ANSYS Inc. ANSYS 15.0 release highlights-ANSYS Workbench[M]. ANSYS Inc., 2010.
- [12] Huei-Huang Lee. Finite element simulations with ANSYS Workbench 13[M]. SDC Publications, 2011.
- [13] Saravanan R, Asokan P, Sachidanandam M. A multi-objective genetic algorithm (GA) approach for optimization of surface grinding operations [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42 (12): 1327-1334.
- [14] Farhang-Mehr A, Azarm S. Entropy-based multi-objective genetic algorithm for design optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 24(5): 351-361.
- [15] Li M, Azarm S, Aute V. A multi-objective genetic algorithm for robust design optimization[C]. GECCO'05 Proceedings of the 7th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, New York, USA, 2005: 771-778.

作者简介:

张 毅(1969—),男,博士,副教授。主要研究方向:先进制造技术。

郭银赛(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:先进制造技术。

张梦旖(1990—),女,硕士研究生。主要研究方向:先进制造技术。

曾祥福(1990—),男,硕士研究生。主要研究方向:先进制造技术。

(编辑:马文静)