

文章编号:1674-8190(2015)03-382-05

机载蒸发循环系统结构的稳健性研究

张毅, 郭银赛

(西京学院 机械工程学院, 西安 710123)

摘要: 机载蒸发循环系统结构的疲劳寿命易受外界和内部环境的影响, 导致无法满足设计要求。采用随机有限元法, 参照设计变量和随机变量的变异性, 建立机载蒸发循环系统结构疲劳寿命稳健性优化的数学模型; 通过引入权因子 α , 将稳健性优化问题转化为结构疲劳寿命均值和标准差的双目标优化问题。结果表明: 合理设置疲劳寿命均值和标准差的权因子, 可有效降低设计变量和随机变量对变异的敏感性, 进而提高机载蒸发循环系统结构疲劳寿命的稳健性。

关键词: 机载蒸发循环系统; 疲劳寿命; 稳健性; 均值; 标准差

中图分类号: V245.3⁺43

文献标识码: A

Research on the Robustness of Airborne Evaporation Circulatory System Structure

Zhang Yi, Guo Yinsai

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

Abstract: As the fatigue life of airborne evaporation circulatory system structure is susceptible to the influence of external and internal environment, it does not satisfy the design requirements. Based on stochastic finite element method and considering the variability of design variables and other random variables, a mathematic model of the robustness optimization of fatigue life is established. By introducing the weight factor α , the robustness of fatigue life problem is transformed into the double objective problems of mean and standard deviation of fatigue life, which effectively reduces the sensitivity of the design variables for fatigue life and improves the robustness of fatigue life by setting the power factor of mean and standard deviation of fatigue life.

Key words: airborne evaporation circulatory system; fatigue life; robustness; mean; standard deviation

0 引言

大功率的电子设备在现代直升机上获得了广泛应用, 无论民用还是军用直升机, 其热载荷均比以前增加了许多^[1-2]。传统的空气循环系统已经无法满足现代直升机对制冷量的需求, 制冷效率高且制冷量大的机载蒸发循环系统则很好地解决了这

一难题^[3-4]。国外早在 20 世纪 80 年代就已经开始应用机载蒸发循环系统, 但目前我国直升机尚不具备独立应用机载蒸发循环系统的技术。主要原因之一是机载蒸发循环系统机械结构的疲劳寿命易受外界和内部环境(例如材料性质、结构件特性、载荷施加及振动冲击等随机因素^[4-5])的影响, 容易导致其机械结构无法满足设计寿命的要求。国内通常采用重复设计的方法解决该问题, 以实现在技术和经济上尽量符合理想的设计方案。传统设计方法主要有两方面弊端: 一是设计复杂, 效率低; 二是由于时间和经验的原因, 最终设计结构的疲劳寿命往往受到最初设计的影响, 在很大程度上依赖于设计者的经验, 导致最终确定的设计方案其疲劳寿命

收稿日期: 2015-05-07; 修回日期: 2015-06-14

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(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

达不到设计要求^[6-7]。

本文以随机有限元为理论基础,建立机载蒸发循环系统的结构疲劳寿命稳健性优化数学模型,并引入权因子 α 的概念,将稳健性优化问题转化为结构疲劳寿命均值和标准差的双目标优化问题,对机载蒸发循环系统结构的疲劳寿命稳健性进行研究。

1 随机有限元法

线弹性有限元方程^[8-9]为

$$KU = F \tag{1}$$

式中: K 为总刚度矩阵; U 为位移列阵; F 为等效节点载荷列阵。

根据应力—应变关系,有

$$S = DBU \tag{2}$$

式中: S 为应力; D 为弹性应力应变矩阵; B 为形变矩阵。

由式(1)可知:

$$E(S) = DBE(U) \tag{3}$$

位移 U 在随机变量 x 的均值处进行一阶泰勒展开式,有

$$E(U) \approx \bar{U} = \bar{K}^{-1} \bar{F} \tag{4}$$

$$\begin{cases} \sigma^2(U) \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial U}{\partial x_i} \frac{\partial U}{\partial x_j} \text{Cov}(x_i, x_j) \\ x = \bar{x} \end{cases} \tag{5}$$

式中: \bar{U} 为 U 在 \bar{x} 处的值; \bar{K} 为 K 在 \bar{x} 处的值; \bar{F} 为 F 在 \bar{x} 处的值; $\text{Cov}(x_i, x_j)$ 为随机变量 x_i 和 x_j 的协方差。

应力方差可由式(6)~式(8)得出:

$$\sigma^2(S) \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial S}{\partial x_i} \frac{\partial S}{\partial x_j} \text{Cov}(x_i, x_j) \tag{6}$$

$$\frac{\partial S}{\partial x_i} = \frac{\partial DBU}{\partial x_i} + DB \frac{\partial U}{\partial x_i} \tag{7}$$

对式(1)两边求导,则:

$$\frac{\partial U}{\partial x_i} = k^{-1} \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} - \frac{\partial k}{\partial x_i} U \right) \tag{8}$$

2 结构疲劳寿命稳健性优化问题数学模型的建立

确定性结构优化问题的数学模型^[10-13]可表示为

$$\text{find } d \tag{9}$$

$$\text{min } f(d) \tag{10}$$

$$\text{s. t. } g_i(d) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, k)$$

$$d_L \leq d \leq d_U$$

式中: $f(d)$ 为目标函数; $g_i(d)$ 为约束函数; d_L 为设计变量的下限; d_U 为设计变量的上限; $d \in R$ 。

由于结构的设计变量和随机变量受到内外环境因素的影响可能会出现变异,使系统结构的疲劳寿命降低。本文将结构的稳健性优化单目标问题转化为关于疲劳寿命均值和标准差的双目标优化问题,建立结构疲劳寿命稳健性优化设计的数学模型,以减少变异的敏感性。

把结构性能函数的标准差和期望值带入目标函数和约束条件中,则结构疲劳寿命稳健性优化设计的数学模型为

$$\text{find } d \tag{11}$$

$$\text{min } f(d) = (1-\alpha) \{ E[Z(d)] - \ln T_0 \}^2 +$$

$$\alpha \sigma^2 [Z(d)] \tag{12}$$

$$\text{s. t. } \ln T_L \leq E[Z(d)] - n\sigma [Z(d)]$$

$$E[Z(d)] + n\sigma [Z(d)] \leq \ln T_U$$

$$E[g_i(d)] + n\sigma [g_i(d)] \leq 0,$$

$$i=1, 2, \dots, m$$

$$d_L \leq d \leq d_U$$

$$\ln T_0 = (\ln T_L + \ln T_U) / 2 \tag{13}$$

式中: T_L 为最低设计寿命; T_U 为最高设计寿命; T_0 为期望寿命; α 为权因子,权因子的值不同,则结构疲劳寿命的稳健性不同; n 由可行性概率决定, n 值越大,则疲劳寿命稳健性越好; $Z(d)$ 为结构疲劳寿命函数。

$$Z(d) = \ln T_f = \ln \Delta + \ln C - \ln \left(\sum_{i=1}^k n_i S_{\epsilon_i}^m \right) \tag{14}$$

$$S_a = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} \tag{15}$$

$$S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \tag{16}$$

式中: S_{\max} 为最大应力; S_{\min} 为最小应力; S_a 为应力幅值; S_m 为应力均值; T_f 为结构的疲劳寿命。

由式(14)~式(16)可知:

$$E[Z(d)] = E(\ln \Delta) + E(\ln C) - \ln \left(\sum_{i=1}^k n_i S_{\epsilon_i}^m \right) \tag{17}$$

$$\sigma^2[Z(d)] = \sigma^2(\ln\Delta) + \sigma^2(\ln C) = - \sum_{i=1}^k \left[\left(\frac{\partial Z}{\partial S_{e_i}} \frac{\partial S_{e_i}}{\partial S_{\max_i}} \right)^2 \sigma^2(S_{\max_i}) + \left(\frac{\partial Z}{\partial S_{e_i}} \frac{\partial S_{e_i}}{\partial S_{\min_i}} \right)^2 \sigma^2(S_{\min_i}) \right] \quad (18)$$

式中： $\sigma^2(S_{\max_i})$ 和 $\sigma^2(S_{\min_i})$ 可通过随机有限元法求解。

3 机载蒸发循环系统结构的稳健性优化

由于机载蒸发循环系统的机械结构易受直升机引起的振动冲击影响,并且考虑到结构材料特性、结构件特性及载荷施加等因素的影响,导致设计变量及随机变量易产生较大变化,引起机械结构无法满足疲劳寿命的设计要求^[14-16]。

机载蒸发循环系统的主要支撑机械结构如图1所示。

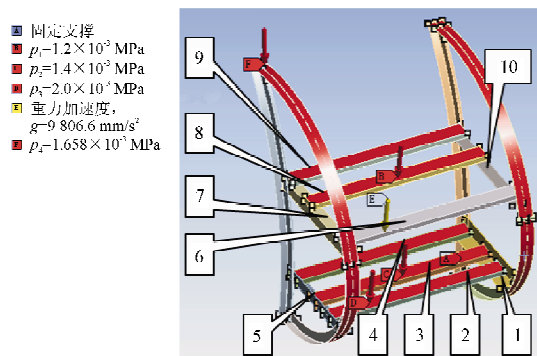


图1 机载蒸发循环系统结构

Fig. 1 Structure of airborne evaporation circulatory system

结构材料选用 Al7075,密度为 2 810 kg/m³,屈服强度为 455 MPa,考虑安全系数为 1.5,许用应力为 303 MPa,弹性模量为 71 700 MPa,泊松比为 0.33。设计变量为图 1 中十个结构件的截面面积,设定上述截面面积的变异系数均为 0.1,其余随机变量如表 1 所示。

表1 十个结构件的随机变量

Table 1 Random variables of ten structure parts

随机变量	均值	标准差	分布类型
损伤量 Δ	1	0.1	对数正态
疲劳参数 C	7.320×10^{31}	7.320×10^{32}	对数正态
载荷 p_1/MPa	1.200×10^{-3}	1.200×10^{-4}	正态分布
载荷 p_2/MPa	1.400×10^{-3}	1.400×10^{-4}	正态分布
载荷 p_3/MPa	2.000×10^{-3}	2.000×10^{-4}	正态分布
载荷 p_4/MPa	1.658×10^{-3}	1.658×10^{-4}	正态分布

最小设计寿命 $T_L = 10^7$ s,最大设计寿命 $T_U = 10^8$ s,十个结构件的约束函数:

$$g = E(|S_i|) + 4\sigma(S_i) \leq 420 \quad (i=1,2,\dots,10) \quad (19)$$

式中: S_i 为结构件 i 的应力。

当权因子 α 分别为0、0.25、0.50、0.75和1.00时,分别代入式(17)~式(18),得到机载蒸发循环系统疲劳寿命的稳健性研究结果,如表2所示。采用 Monte-Carlo 模拟方法对计算结果进行验证,验证结果如表3所示。

表2 十个结构件的优化结果

Table 2 The optimization results of ten structure parts

设计变量	下限	上限	初值	$\alpha=0$	$\alpha=0.25$	$\alpha=0.50$	$\alpha=0.75$	$\alpha=1.00$
面积 A_i/m^2	0.005	0.012	0.009	0.009 241	0.009 392	0.009 516	0.009 621	0.009 742
对数寿命均值 $E(\ln T_i)/\text{次}$	15.821	20.412	16.391	17.254	17.856	18.146	18.912	19.237
对数寿命标准差 $\sigma(\ln T_i)/\text{次}$	—	—	0.612 4	0.547 8	0.524 1	0.501 4	0.485 6	0.461 8

表3 Monte-Carlo 模拟方法对计算结果的验证

Table 2 Verification of calculation results by Monte-Carlo method

设计变量	下限	上限	初值	$\alpha=0$	$\alpha=0.25$	$\alpha=0.50$	$\alpha=0.75$	$\alpha=1.00$
对数寿命均值 $E(\ln T_i)/\text{次}$	15.820	20.411	16.392	17.255	17.857	18.145	18.910	19.236
对数寿命标准差 $\sigma(\ln T_i)/\text{次}$	—	—	0.621 1	0.548 9	0.521 6	0.502 0	0.482 30	0.462 1

从表2~表3可以看出:对于目标函数的平均值,计算结果与 Monte-Carlo 模拟吻合良好;对于目标函数的标准差,结果变化趋势相同且数值略有差别,表明本文优化方法用于结构的稳健性分析具有较高的精度。同时, α 越大,机载蒸发循环系统结构寿命越偏离 $E(\ln T_0)$, 并且 $\sigma(\ln T_f)$ 越小,其变化范围越小;反之, α 越小,机载蒸发循环系统结构寿命越接近 $E(\ln T_0)$, 并且 $\sigma(\ln T_f)$ 越大,其变化范围越大。因此,可以通过合理设置权因子 α , 提高机载蒸发循环系统结构疲劳寿命的稳健性。

4 结 论

对权因子 α 取不同的数值,得出双目标疲劳寿命均值、标准差与权因子 α 变化的规律: α 越大,机载蒸发循环系统结构寿命越偏离期望对数寿命均值,并且对数寿命标准差越小,其变化范围越小;反之, α 越小,机载蒸发循环系统结构寿命越接近期望对数寿命均值,并且对数寿命标准差越大,其变化范围越大。故可根据分目标相对重要性(设计要求)或经验来确定权重系数 α ,降低结构疲劳寿命对设计变量的敏感性,减少疲劳寿命的分散性,提高其稳健性,最终得出满足设计要求的疲劳寿命。

参考文献

- [1] 孙超. 机载蒸发循环仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
Sun Chao. Airborne evaporation cycle simulation study[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 龙海. 机载蒸发循环系统动态仿真[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
Long Hai. Dynamic numerical investigations of on-board vapor-compression system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [4] 亢战,程耿东. 基于随机有限元的非线性结构稳健性优化设计[J]. 计算力学学报, 2006, 3(2): 129-135.
Kang Zhan, Cheng Gengdong. Structural robust design based on perturbation stochastic finite element method[J]. Journal of Computational Mechanics, 2006, 3(2): 129-135. (in Chinese)
- [5] 张义民,贺向东,刘巧伶,等. 非正态分布参数的车辆零件可靠性稳健设计[J]. 机械工程学报, 2005, 41(11): 102-108.
Zhang Yimin, He Xiangdong, Liu Qiaoling, et al. Reliability-based robust design of vehicle components with non-normal distribution parameters[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(11): 102-108. (in Chinese)
- [6] 樊建平,陈旭勇. 基于区间模型结构稳健性优化设计[J]. 固体力学学报, 2014(6): 539-544.
Fan Jianping, Chen Xuyong. Structural robustness optimization design by the interval model[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014(6): 539-544. (in Chinese)
- [7] 高镇同,熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2000.
Gao Zhen tong, Xiong Junjiang. Fatigue reliability [M]. Beijing: Beihang University Press, 2000. (in Chinese)
- [8] 李锋,孟广伟,周振平,等. 结构疲劳寿命稳健性优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 155-158.
Li Feng, Meng Guangwei, Zhou Zhenping, et al. Robust design of structural fatigue life[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 155-158. (in Chinese)
- [9] Li Bo, Gao Xiaoguang, Cai Fudong. Research on the robustness of over the shoulder fire control system[J]. Fire Control & Command Control, 2007, 32(11): 24-26, 30.
- [10] Tao Jing, Wu Qingming. Research on robustness of conceptual design based on axiomatic design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(11): 244-246.
- [11] 李小刚,程锦,刘振宇,等. 基于双层更新 Kriging 模型的机械结构动态特性稳健优化设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(3): 165-173.
Li Xiaogang, Cheng Jin, Liu Zhenyu, et al. Robust optimization for dynamic characteristics of mechanical structures based on double renewal Kriging model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 165-173. (in Chinese)
- [12] 贺新峰,于德介,肖枚清. 基于响应面的结构疲劳寿命 6σ 稳健优化设计[J]. 汽车工程, 2014, 36(3): 368-373.
He Xinfeng, Yu Dejie, Xiao Meiqing. Six-sigma robust design of structural fatigue life based on response surface method[J]. Journal of Automobile Engineering, 2014, 36(3): 368-373. (in Chinese)
- [13] Güntürk C S, Lagarias J C, Vaishampayan V A. On the robustness of single-loop sigma-delta modulation[J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2001, 47(5): 1735-1744.
- [14] Sang Y, Wang Z. Research on speed robustness for airborne hydraulic pump in the circular stress accelerated life test[C]// International Asia Conference on Informatics in Control, Automation & Robotics. IEEE, 2009: 180-184.
- [15] 贺向东. 机械结构可靠性稳健设计若干关键问题的研究[D]. 长春:吉林大学, 2005.
He Xiangdong. Research on several key issues of mechani-

- cal and structure reliability-based robust design[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)
- [16] 方柘林, 王丽娟, 陈宗渝, 等. 基于车门结构的多目标优化设计方法研究[J]. 机械设计, 2014, 31(8): 60-64.
Fang Zhelin, Wang Lijuan, Chen Zongyu, et al. Study of multi-objective optimization design based on the vehicle door structure[J]. Journal of Mechanical Design, 2014, 31(8): 60-64. (in Chinese)

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。

郭银寰(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:先进制造技术。

(编辑:马文静)



(上接第 376 页)

- [14] 冯振宇, 陈磊, 周惠文. 飞机整体油箱的微生物腐蚀剂及维护[J]. 航空维修及工程, 2009(3): 54-56.
Feng Zhenyu, Chen Lei, Zhou Huiwen. Microbial corrosion of aircraft integral fuel tanks and related maintenance[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2009(3): 54-56. (in Chinese)
- [15] 王向明, 毕世权. 飞机口盖复合垫片密封结构设计研究[J]. 飞机设计, 2007, 27(4): 13-16.
Wang Xiangming, Bi Shiquan. A research on structural design for multiple seal packing for access doors on fighter airframe[J]. Aircraft Design, 2007, 27(4): 13-16. (in Chinese)

作者简介:

李绪忠(1969—),男,高级工程师。主要研究方向:高分子材料及航空电线电缆技术。

李素琴(1982—),女,高级工程师。主要研究方向:高分子材料。

(编辑:赵毓梅)