

# 基于可靠性的飞机风挡抗鸟撞优化设计

## Reliability-Based Optimization Design of Aircraft Windshield for Resisting Bird Impact

西北工业大学 于明 刘永寿 李磊 岳珠峰

**[摘要]** 传统的飞机风挡设计通常在确定的工况下进行,未能充分考虑实际鸟撞风挡过程中不确定性因素的影响,导致飞机鸟撞风挡的故障多发。综合考虑鸟撞飞机风挡过程中鸟体材料参数、质量、撞击速度等不确定因素的影响,以飞机风挡抗鸟撞的可靠度为约束,风挡质量为目标,基于双循环方法和近似技术建立了风挡抗鸟撞可靠性优化设计系统,利用一阶矩法进行可靠性分析,对某飞机风挡进行了基于可靠性的优化设计。实例分析证明所建风挡抗鸟撞可靠性优化设计系统可行有效。

**关键词:** 飞机风挡 鸟撞 可靠性设计优化 一阶矩法 近似技术

**[ABSTRACT]** Traditional methods for aircraft windshield design are carried out based on determinate work condition. The effect of uncertainty factors during the process of windshield impacted by bird are not fully considered, so this result in low reliability of windshield performance. The effects of uncertainty factors into as bird body material parameters, mass and impact velocity during the process of windshield impacted by bird are considered. Reliability-based optimization design of windshield for resisting bird impact is set up according to the reliability of aircraft windshield for resisting bird impact and the windshield quality based on the double loop strategy and the approximation technique. The reliability analysis is carried out by using the first-order reliability method. The reliability-based optimization design of aircraft windshield for resisting bird impact is made. It is proved that this optimization design is feasible.

**Keywords:** Aircraft windshield Bird impact Reliability-based optimization design First-order reliability method Approximation technique

飞机风挡的抗鸟撞性能是飞机设计所关心的关键力学性能之一。鸟撞飞机风挡是发生在毫秒量级的冲击动力学问题,具有瞬时强值动载荷、柔性撞击、大变形、高应变率等特点,涉及材料动力学、结构冲击动力学

等理论。通常对鸟撞的动响应分析方法包括试验和数值模拟两种。近年来学者们对鸟撞动响应分析数值模拟方法作了大量工作,形成了包括解耦解法和耦合解法在内的一系列分析策略,对改进风挡设计起到了重要作用<sup>[1-3]</sup>。但传统的风挡设计和优化工作在确定工况下进行,没有定量的从可靠性的角度考虑和实施设计<sup>[4]</sup>,忽略了实际鸟撞风挡过程中鸟体材料、质量、形状以及速度等不确定性因素的影响,使得风挡实际工作下的可靠性得不到保证。目前,针对风挡抗鸟撞的可靠性优化设计工作较少,本文综合考虑鸟撞过程中不确定因素的影响,结合双循环策略和近似技术建立了风挡抗鸟撞可靠性设计优化模型,以风挡性能可靠度为约束,利用改进的一阶矩法进行可靠性分析,对某飞机风挡进行了可靠性设计优化。

## 1 风挡抗鸟撞可靠性优化设计

### 1.1 基于双循环的可靠性优化设计方法

基于可靠性设计优化<sup>[5-9]</sup>的目的是在满足可靠性约束的条件寻求系统的最优解,目前对此类问题的求解常用方法为双循环方法。双循环方法<sup>[10-12]</sup>为一个嵌套结构,内环进行可靠性分析循环,也即概率约束的计算;外环为优化循环,使含有可靠性约束的问题得到最优解。由于鸟撞过程属于非线性动力学分析,求解过程需要进行多步迭代才能收敛,使得分析过程耗费资源较大,而风挡可靠性设计优化在寻优和求解可靠度时需反复调用鸟撞分析,为提高计算效率,本文在风挡可靠性设计优化中引入近似技术,通过在设计空间内构造数学模型代替实际的分析过程,利用试验设计(DOE)进行采样,并在优化过程中实时增加样本点,保证近似模型精度,所建立的飞机风挡抗鸟撞可靠性优化设计流程见图1。

### 1.2 AFOSM法可靠性分析

工程常用可靠性的分析有一次二阶矩法、蒙特卡洛法等。一次二阶矩法是可靠性分析中最简单的一种方法,其基本思想就是将非线性的功能函数线性化,然后通过基本变量的一阶矩和二阶矩来计算线性化后的功能函数的一阶矩和二阶矩,进而近似得到功能函数的失效概率。一次二阶矩法包括均值一次二阶矩法和

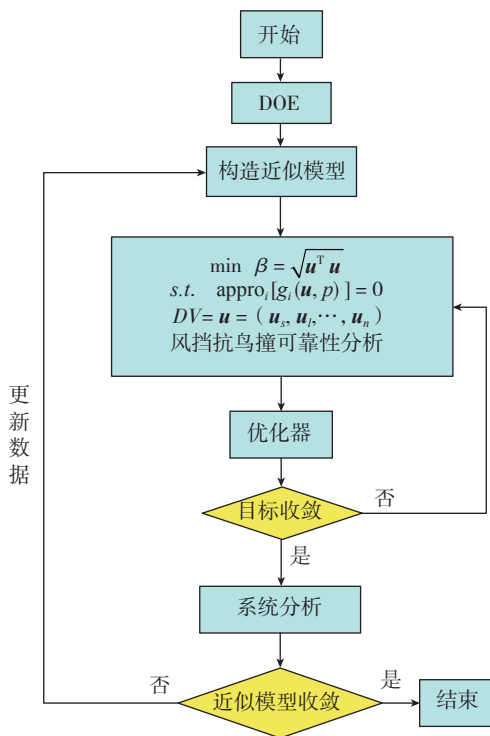


图1 风挡抗鸟撞可靠性设计优化流程  
Fig.1 Flow chart of reliability optimization design of windshield for resisting bird impact

改进的一次二阶矩法(Advanced First Order and Second Moment, AFOSM),改进的一次二阶矩法将功能函数在最可能失效点(Most Probable Points, Mpps)处展开,相对均值一次二阶矩法具有更高的精度。以下为AFOSM法可靠性分析的基本原理。

设包含相互独立正态基本随机变量  $x_i \sim N(\mu_{x_i}, \sigma_{x_i})$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 的功能函数为  $Z=g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 以AFOSM求解失效域最可能失效点  $P^*(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  和相应的可靠度指标的步骤为:

(1) 假定设计点坐标  $x_i^*$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 的初始值,一般取为基本变量的均值;

(2) 利用设计的初始设计点值,根据下式计算  $\lambda_i$ :

$$\lambda_i = -\frac{(\frac{\partial g}{\partial x_i})_P \sigma_{x_i}}{[\sum_{i=1}^n (\frac{\partial g}{\partial x_i})_P^2 \sigma_{x_i}^2]^{1/2}} = \cos \theta_i \quad (i=1,2,\dots,n); \quad (1)$$

(3) 将  $x_i^* = \mu_{x_i} + \sigma_{x_i} \lambda_i \beta$  代入功能函数,得出关于  $\beta$  的方程:

$$g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0; \quad (2)$$

(4) 解关于  $\beta$  的方程,得出  $\beta$  值;

(5) 将  $\beta$  值代入下式,得出新的设计点  $x_i^*$  坐标值;

$$x_i^* = \mu_{x_i} + \sigma_{x_i} \lambda_i \beta \quad (i=1,2,\dots,n); \quad (3)$$

(6) 重复以上步骤,直到迭代前后两次的可靠度指标的相对误差满足精度要求为止。

本文基于上述可靠性优化设计模型采用改进的一次二阶矩法进行飞机风挡抗鸟撞的可靠性分析。

## 2 鸟撞求解分析方法

鸟撞飞机风挡的过程相当于高速流体团撞击结构,采用流固耦合方法进行分析能较为真实地模拟鸟撞过程。对鸟撞,任意拉格朗日-欧拉耦合(ALE)是最高效的耦合分析方法,ALE方法中,拉格朗日网格与欧拉网格的节点在界面上——对应,位置重合,但是是不同的两个节点。在分析过程中该界面充当欧拉材料的流场边界。另一方面,欧拉材料对该界面产生压力,从而使模型的拉格朗日部分受到载荷的作用。

本文采用Datran软件进行鸟撞分析,鸟体本构模型采用Linfluid(DMAT)模型,风挡玻璃本构采用线性强化弹塑性本构ElasPlas(DMATEP)模型。利用以ALE法进行鸟撞分析数值模拟,鸟体模型采用长径比为2:1的圆柱体,沿飞机平飞方向撞击风挡中心点。

## 3 实例分析

### 3.1 风挡抗鸟撞可靠性优化设计数学模型

基于可靠性优化设计的基本方式为将系统不确定性因素定义为随机变量或参量,选择合适的可靠性设计优化策略,建立基于可靠性的优化设计模型,基于一定的优化算法进行优化设计。实际鸟撞飞机风挡过程中,鸟体材料、大小及撞击速度等因素均具有一定的分散性,为不确定因素,而这些因素对鸟撞中风挡的响应具有重要的影响。对鸟体,本文考虑将鸟体密度、质量(通过鸟体半径控制)、速度以及鸟体体积模量作为随机参量;风挡,考虑风挡厚度为随机设计变量,风挡材料弹性模量、泊松比、屈服应力为随机参量。表1给出了风挡抗鸟撞可靠性优化设计随机变量和参量的分散性指标。

本文考虑鸟撞风挡过程中的随机因素的影响,以风挡质量为目标,风挡性能可靠度为约束,建立可靠性设计优化模型,并基于双循环可靠性设计优化方法进行求解,其数学模型表示如下:

$$\begin{aligned} \text{obj.} \quad & \min M_{\text{plate}} \\ & d_l \leq d \leq d_u, \\ \text{s.t.} \quad & P_i\{\epsilon_p(d, p_i, \dots, p_n) \leq \epsilon_{p_{\max}}\} \geq 0.9995 \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $M_{\text{plate}}$  为风挡质量,为优化目标;  $d$  为风挡厚度,为随机设计变量,  $d_l$ 、 $d_u$  表示风挡厚度的上下限;  $p_i, \dots, p_n$  为鸟体材料、尺寸、撞击速度等随机参量;  $P_i$  为可靠性约束;  $\epsilon_p$  为风挡等效塑性应变;  $\epsilon_{p_{\max}}$  表示最大允许等效塑性应变。由于本文中风挡玻璃为线性强化弹塑性

本构 Elaspas (DMATEP)模型,该材料本构模型具有双线性性能,破坏准则采用最大塑性应变失效模式,即撞击过程中风挡材料的塑性应变达到失效塑性应变时材料破坏。

### 3.2 优化结果和分析

以某飞机风挡为对象,基于上述风挡抗鸟撞可靠性设计优化模型,利用超拉丁方法进行试验设计,建立初始数据库,以 Kriging 方法构建近似模型,优化算法采用全局寻优的多岛遗传算法和局部寻优的可行方向法形成的组合算法,保证了在对设计空间进行寻优和可靠性分析求解最可能失效点( $M_{pps}$ )时能快速得到最优解。建立整个分析流程后即顺利实现了风挡抗鸟撞的可靠性优化设计。优化结果如表 2 所示,在满足风挡抗鸟撞性能可靠度约束的前提下,通过优化设计,风挡质量由初始的 20.51kg 下降到 17.87kg,下降幅度为 12.87%,优化效果明显。

表1 随机量分布指标

随机量	分布类型	均值	变异系数
风挡厚度 $d/mm$	正态	(10, 20)	0.05
鸟体半径 $/mm$	正态	53.6	0.05
鸟体密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	正态	930	0.05
鸟撞速度 $/(m \cdot s^{-1})$	正态	150	0.1
鸟体体积模量 $/MPa$	正态	2.2e3	0.01
风挡弹性模量 $/MPa$	正态	3130	0.01
风挡泊松比	正态	0.314	0.01
风挡屈服应力 $/MPa$	正态	55	0.01

注:表中均值项( $a, b$ )中的  $a$  和  $b$  分别对应随机设计变量的上下限,均值固定的量为随机参量。

表2 从挡抗鸟撞化前后比较

参数	优化前	优化后	相对变化
风挡厚度 $/mm$	16	13.94	
风挡质量 $/kg$	20.51	17.87	↓ 12.87%
风挡抗鸟撞的可靠度	1	99.989%	满足约束

## 4 结论

本文综合考虑鸟撞飞机风挡过程中不确定性因素的影响,建立风挡抗鸟撞可靠性优化设计模型,通过双循环策略组织整个分析过程,引入近似技术,在保证模型精度的前提下提高了计算效率。在此基础上对某风挡进行基于可靠性的优化设计,由优化结果和分析可知,与传统的风挡设计方法相比,在保证风挡抗鸟撞性能的可靠度前提下有效降低了风挡质量。实例分析说

明了本文所建风挡抗鸟撞可靠性优化设计框架的可行性,对工程设计有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 张志林,姚卫星.飞机风挡鸟撞响应分析方法研究.航空学报,2004,25(6):577-580.
- [2] 李磊,虞跨海,毛坤,等.多学科设计优化在飞机座舱透明件设计中的应用.机械设计,2010,27(11):69-72.
- [3] 王富生,岳珠峰,冯震宙,等.鸟撞飞机风挡动态响应数值模拟方法研究现状.飞机设计,2008,28(5):39-46.
- [4] 屈滋培.可靠性工程.北京:原子能出版社,2000.
- [5] Chen X G, Hasselman T K, Neill D J. Reliability based structural design optimization for practical applications// 38th the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASE Structural Dynamics, and Materials Conference, Hyatt Orlando, Kissimmee, FL. AIAA-97-1403, 1997.
- [6] Du X, Chen W. Sequential optimization and reliability assessment for probabilistic design. ASME Journal of Mechanical Design, 2004, 126(2):225-233.
- [7] Du X P, Sudjianto A, Chen W. An integrated framework for optimization under uncertainty using inverse reliability strategy[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2004, 126: 562-570.
- [8] Perez R E, Liu Hugh H T, Behdinan K. Evaluation of multidisciplinary optimization approaches for aircraft conceptual design. AIAA 2004-4537.
- [9] Turcotte J, Trepanier J Y, Tribes C. Integration and multidisciplinary design optimization of a simplified gas turbine model using perl and isight. AIAA 2004-4425.
- [10] 原薇.基于可靠性的多学科设计优化[D].大连:大连理工大学,2004.
- [11] 袁亚辉.多学科设计优化及其不确定性研究[D].成都:电子科技大学,2009.
- [12] 李磊,李元生,于明,等.船用大功率柴油机涡轮增压器多学科设计优化.北京:科学出版社,2011. (责编 良辰)

(上接第 85 页)

### 参考文献

- [1] Kocar V, Akgunduz A. A virtual environment for engineering change management. Computers in Industry, 2001, 61 (1): 15-28.
- [2] 何睿,唐敦兵,薛建彬.基于设计结构矩阵的工程变更传播研究.计算机集成制造系统,2008,14(4):656-660.
- [3] Clarkson L, John P, Simons, et al. Predicting change propagation in complex design. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2004, 126(5): 788-797.
- [4] Keller R, Eckert C M, John P, et al. Change propagation analysis in complex technical system. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2009, 131: 1-14.
- [5] Keller R, Eckert C M, Clarkson P J. Multiple views to support engineering change management for complex products. London Proceedings of the Third International Conference on Coordinated & Multiple Views in Exploratory Visualization (CMV '05), 2005, 33-41. (责编 深蓝)