

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2023.03.009

基于可靠性的民机防爆结构优化设计研究

欧靖^{1*} 林心怡¹ 薛小锋¹ 冯蕴雯¹ 杨祥²

(1. 西北工业大学航空学院, 西安 710072; 2. 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 最小风险炸弹位置(least risk bomb location, 简称 LRBL)结构作为应用于民航客机的防爆结构, 在保证可靠性的同时, 还应尽可能地减小结构质量。开展了基于可靠性的 LRBL 结构优化设计研究, 首先以 LRBL 结构轻量化作为优化设计目标, 选择 LRBL 结构的结构尺寸作为设计变量, 然后确定约束为结构可靠性指标, 采用响应面法结合可靠性指标转化得到优化模型约束函数, 搭建 LRBL 结构的可靠性优化模型, 最后采用内点法进行 LRBL 结构的可靠性优化求解。以某个 LRBL 结构设计开展了优化设计案例分析, 结果表明在满足可靠性指标的基础上, 优化后的 LRBL 结构质量减轻了 45.08%, 减重效果明显, 对 LRBL 结构应用于工程实际具有指导意义和参考价值。

关键词: 最小风险炸弹位置; 优化设计; 爆炸冲击; 可靠性

中图分类号: V221

文献标识码: A

OSID:



0 引言

美国联邦航空管理局在 2009 年颁布的 FAR 25-127 修正案^[1]中要求针对大型民机, 制造商必须设计一个“最小风险炸弹位置^[2](least risk bomb location, 简称 LRBL)”, 用于放置飞机上发现的可疑爆炸物。冯振宇等^[3]基于 LRBL 结构的适航要求, 总结了 LRBL 结构的研究现状和设计特征, 为后续开展相关技术研究提供参考。冯蕴雯等^[4]解读了与 LRBL 相关的适航条款和咨询通告, 提出了一种 LRBL 结构设计技术, 并给出了一个高可靠单向爆破的 LRBL 结构方案。薛小锋等^[5]基于正交试验法对 LRBL 结构进行参数敏感性研究, 确定炸药位置和结构尺寸因素对抗爆性能的影响程度。目前国内对 LRBL 结构开展的相关研究主要集中在适航要求分析、可靠性设计等方面, 没有针对 LRBL 结构的可靠性优化设计研究, 因此有必要开展相关研究。

目前与 LRBL 直接相关的针对内爆下密闭结构的可靠性优化研究几乎没有, 但国内外一些学者对爆炸载荷作用下的典型结构开展了优化设计研究。

Yamazaki 和 Han^[6-7]使用有限元软件 DYNA3D 对管状和圆柱壳结构进行仿真, 结合试验设计, 基于响应面近似技术和数学规划方法对管状结构和圆柱壳结构耐撞性优化设计问题进行了研究。XUE Zhenyu 和 Huntchinson^[8]比较了爆炸冲击载荷作用下金属夹层板与相同材料、相同重量的固体夹层板的性能, 并考虑每种芯材的几何参数, 包括芯材和面板厚度、芯材长径比和相对密度, 以结构重量为优化目标, 对夹层板进行了优化设计研究。梁民族^[9]基于代理模型技术和非支配遗传算法, 对防爆容器进行了优化, 大大提升了结构的抗爆性能。曾爱、孙晓旺等^[10-11]以防爆梁总质量为设计目标, 以乘员损伤为约束条件, 利用 Kriging 近似模型和序列优化方法进行数值优化获得了最佳的设计参数, 将优化后的模型再次仿真计算, 验证了优化方案满足设计要求。

本文针对 LRBL 结构开展可靠性优化设计研究, 首先以 LRBL 结构轻量化作为优化设计目标, 选择 LRBL 结构的结构尺寸作为设计变量, 然后确定约束为结构可靠性指标, 采用响应面法结合可靠性

* 通信作者. E-mail: 540463017@qq.com

引用格式: 欧靖, 林心怡, 薛小锋, 等. 基于可靠性的民机防爆结构优化设计研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2023(3): 56-63. OU J, LIN X Y, XUE X F, et al. Research on optimization design of civil aircraft least risk bomb location structure based on reliability[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(3): 56-63(in Chinese).

指标转化得到 LRBL 结构约束函数,得到 LRBL 结构的可靠性优化模型,最后采用内点法进行 LRBL 结构的可靠性优化求解。以冯蕴雯团队提出的 LRBL 结构进行案例分析,优化后的 LRBL 结构减重效果明显,研究结果对 LRBL 结构应用于工程实际具有指导意义和参考价值。

1 LRBL 结构可靠性优化设计理论分析

1.1 基于可靠性的优化设计流程

本文针对 LRBL 结构提出了一种基于可靠性优化设计方法,将传统优化设计和可靠性理论结合起来,在保证 LRBL 结构安全可靠的基础上实现轻量化,优化流程如图 1 所示。

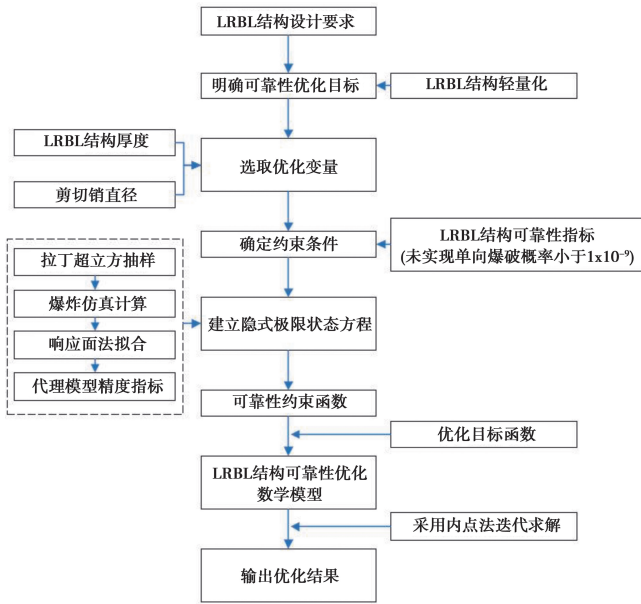


图1 LRBL 结构可靠性优化流程图

首先,基于 LRBL 结构设计要求确定优化目标为轻量化,选取优化变量并确定特征参数,以结构可靠性指标作为约束条件。其次,对抽样后的优化变量数据进行仿真计算,获得相应的输出响应,然后采用响应面法代理模型进行拟合,比较各代理模型的精度后确定最优拟合方程,得到隐式极限状态方程的近似表达式,在此基础上结合可靠性指标得到 LRBL 结构的可靠性约束函数。最后,确定 LRBL 结构可靠性优化数学模型,采用内点法求解输出优化结果。

1.2 可靠性优化数学模型

结构优化设计数学模型是设计变量、状态变

量、中间参数、约束条件、优化目标的整体关系的数学函数。标准的非线性规划模型如下:

$$\begin{aligned} \min f(X) \\ \text{s. t. } g_i(X) &= 0, i=1, \dots, p \\ g_j(X) &\leq 0, j=p+1, \dots, m \\ X^L &\leq X \leq X^U \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f(X)$ 为目标函数; $g_i(X)$, $g_j(X)$ 为约束函数; $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ 为设计变量; X^L, X^U 为 X 上下限。

当考虑多个优化目标,便形成了多目标优化问题,可用以下数学模型来描述。

$$\begin{aligned} \min f(x) &= (F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x))^T \\ \text{s. t. } g_i(x) &= 0, i=1, 2, \dots, p \\ h_j(x) &\leq 0, j=1, 2, \dots, q \\ x^L &\leq x \leq x^U, x=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $F(x)$ 为目标函数、 $g(x)$ 为不等式约束函数、 $h(x)$ 为等式约束函数; x 为设计变量;其中参数 n, p, q 均为对应函数的个数。

1.3 响应面代理模型的基础理论

针对爆炸载荷作用下 LRBL 结构的输出响应与设计变量之间因关系复杂,导致其功能函数无法直接通过显式函数进行表达且仿真求解耗时费力的问题,本文引入代理模型技术。由于响应面法充分利用样本数据,且相对于其他代理模型技术具有计算效率高的优势,本文采用响应面法代理模型技术。

响应面法最常用的函数形式是线性多项式和二次多项式。其中,二次多项式根据是否含有交叉项又可分为不同种情况,具体表达式如下所示:

a) 线性拟合

$$\bar{Z} = \bar{G}(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i \quad (3)$$

b) 纯二次拟合

$$\bar{Z} = \bar{G}(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n c_{ii} X_i^2 \quad (4)$$

c) 交叉拟合

$$\bar{Z} = \bar{G}(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n d_{ij} X_i X_j \quad (5)$$

d) 完全二次拟合

$$\bar{Z} = \bar{G}(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n d_{ii} X_i^2 \quad (6)$$

式中: $a, b_i, c_i, d_{ij} (i=1, 2, \dots, n) (j < i)$ 均为表达式的待定系数^[12]。

采用响应面代理模型法拟合函数时,还需要通过比较真实值与预测值之间的误差大小来衡量代理模型函数的预测能力。本文采用典型的两种精度评价指标:均方根误差和决定系数^[13-17]。

均方根误差代表了拟合得到的代理模型函数对研究对象原始模型的全局逼近能力,代理模型拟合函数的预测精度越高,其计算得到的均方根误差越小。具体计算公式如下所示:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |f(x_i) - \hat{f}(x_i)|^2} \quad (7)$$

式中: k 为样本总数; $f(x_i)$ 为代理模型函数预测值; $\hat{f}(x_i)$ 为研究对象原始模型真实值。

选择的代理模型拟合函数能否准确表征 LRBL 结构爆炸冲击过程中输出响应和输入参数之间的关系,还需要采用决定系数 R^2 进行验证,系数值越接近 1,表明方程的变量对 y 的解释能力越强。具体计算公式如下所示:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_{actual} - Y_{predict})^2}{\sum (Y_{actual} - Y_{mean})^2} \quad (8)$$

式中: Y_{actual} 为研究对象原始模型真实值; $Y_{predict}$ 为代理模型函数预测值; Y_{mean} 为真实值的平均值。

1.4 基于可靠性指标确定约束函数的方法

当可靠性优化设计模型中约束函数为概率函数时,直接进行求解比较复杂,采用可靠性指标结合均值一次二阶矩方法进行转换。

设约束函数为 $P(H_i > 0)$, H_i 为极限状态函数值。

由均值一次二阶矩方法可以得到当各变量相互独立时,通过以下形式进行可靠性约束转换:

$$P(H_i > 0) = \Phi\left(\frac{\mu_{H_i}}{\sigma_{H_i}}\right) = \Phi(\bar{\beta}) \quad (9)$$

$$\mu_{H_i} = g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}) \quad (10)$$

$$\sigma_{H_i}^2 = \sum \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (11)$$

$$\sigma_{x_i} = C_{x_i} \mu_{x_i} \quad (12)$$

式中: μ_{H_i} 为极限状态函数值 H_i 的均值; σ_{H_i} 为极限状态函数值 H_i 的标准差; σ_{x_i} 为输入变量 x_i 的标准差; C_{x_i} 为输入变量 x_i 的变异系数; μ_{x_i} 为输入变量 x_i 的均值。

转换后约束函数为:

$$\begin{aligned} \bar{\beta} &= \frac{\mu_{H_i}}{\sigma_{H_i}} \\ \mu_{H_i} &= q(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \sigma_{H_i}^2 &= Q(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (13)$$

此时可靠性优化设计模型均为优化变量的一般函数,提高了优化求解效率。

2 LRBL 结构可靠性优化案例

2.1 确定 LRBL 结构优化设计目标及设计变量

冯蕴雯等^[4]给出了一个高可靠单向爆破的 LRBL 设计方案,LRBL 结构由剪切销、冲头、底盖、罐体组成。LRBL 结构罐体、底盖和冲头使用材料为 Ti-6Al-4V,剪切销使用材料为 15-5PH 不锈钢。LRBL 结构如图 2 所示。本文基于该设计方案进行可靠性优化设计。

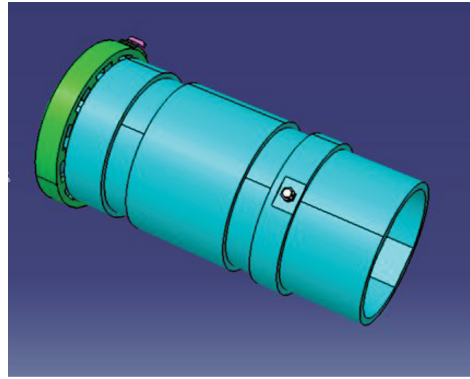


图 2 LRBL 结构示意图

LRBL 结构关键尺寸的增加能够在一定程度上提升整个结构的抗爆性能,但结构尺寸的增加会导致结构质量过大,LRBL 结构作为应用于民航客机的防爆结构,有必要在保证结构防护能力的同时进行轻量化设计。LRBL 结构质量 f_M 计算公式为:

$$f_M = f_{M\text{罐体}} + f_{M\text{底盖}} + f_{M\text{冲头}} + f_{M\text{剪切销}} \quad (14)$$

根据设计方案得到 LRBL 结构质量为:

$$\begin{aligned} f_M &= \rho_{\text{Ti-6Al-4v}} \pi \{ 480 [180X_1 + X_1^2] \\ &\quad - \frac{X_2^2}{2} X_1 + (90 + 2X_1)^2 \cdot X_1 \\ &\quad + 50 [(90 + 2X_1)^2 - (90 + X_1)^2] \\ &\quad + (405\,000 - 45X_2^2) \} + \rho_{15-5PH} \pi 67.5 X_2^2 \end{aligned} \quad (15)$$

式中: f_M 为 LRBL 结构质量,kg; X_1 为 LRBL 结构厚度,mm; X_2 为剪切销直径,mm; $\rho_{\text{Ti-6Al-4v}}$ 为材料 Ti-

6Al-4V 的密度,值为 $4.43 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$; ρ_{15-5PH} 为材料 15-5PH 不锈钢的密度,值为 $7.78 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 。

本文针对 LRBL 结构的尺寸进行优化设计,选择 LRBL 结构的结构厚度 X_1 和剪切销直径 X_2 作为优化变量。其中,结构厚度包含罐体体壁厚度、装填端端盖厚度以及凸台厚度。同时考虑到在可靠性分析中载荷和材料性能参数存在不确定性,另补充 TNT 当量、Ti-6Al-4V 的弹性模量及其准静态下屈服强度作为 LRBL 结构单方向爆破可靠性优化模型的输入变量。LRBL 结构输入变量的特征参数如表 1 所示。

表 1 LRBL 结构输入变量特征参数^[18-20]

	输入变量	参数均值	标准差	变异系数
载荷	TNT 当量/g	230	13.8	0.06
材料性能	Ti-6Al-4V 弹性模量/GPa	102	5.1	0.05
	Ti-6Al-4V 准静态下屈服强度/GPa	0.938	0.047	0.05
结构尺寸	结构厚度/mm	10	0.06	0.006
	剪切销直径/mm	20	0.035	0.001 75

在内爆作用下,LRBL 结构罐体、装填端端盖、破坏端端盖可能发生破坏。针对内爆作用下的 LRBL 结构,在动力学仿真中采用的失效准则为最大塑性应变失效准则,即只要材料的变形达到失效应变值,材料将会发生破坏。因此选择最大塑性应变作为输出响应,LRBL 结构可靠性输出响应如表 2 所示。

表 2 LRBL 结构输出响应

序号	部位	对象	输出变量
1	罐体	罐体体壁	最大塑性应变
2		罐体孔边	
3		罐体凸台	
4	装填端端盖	装填端端盖凸台	
5		装填端端盖底部	
6	破坏端端盖	破坏端端盖孔边	

2.2 构建 LRBL 结构隐式极限状态方程

采用拉丁超立方试验方法对确定的输入变量

进行抽样,取得试验样本数据共 30 组,通过内爆作用下的 LRBL 结构动态响应仿真计算,获得相应的输出响应如表 3 所示,表中 Y_i 为各危险部位的最大塑性应变。

表 3 仿真结果表

罐体	装填端端盖				破坏端端盖孔边 Y_6
	体壁 Y_1	孔边 Y_2	凸台 Y_3	凸台 Y_4	底部 Y_5
0.061	0.052 5	0.075 7	0.08	0.013 2	0.125
0.030 9	0.060 1	0.099 2	0.082 5	0.021	0.122
0.034 6	0.053 3	0.060 4	0.063 5	0.007 15	0.146
0.048 9	0.040 4	0.073 6	0.076 5	0.096 4	0.106
0.057 8	0.062 9	0.074 3	0.073 3	0.010 3	0.125
0.035 4	0.049 3	0.064 9	0.069 4	0.009 6	0.12
0.047 4	0.057 9	0.071	0.072 7	0.009 93	0.124
0.055 1	0.053 8	0.080 7	0.078 1	0.012 1	0.131
0.040 6	0.050 8	0.101	0.087 2	0.030 9	0.126
0.036	0.051 9	0.094	0.085 8	0.024 2	0.131
0.059 7	0.051 3	0.079 2	0.077	0.011 7	0.122
0.030 8	0.049 1	0.087 3	0.084 5	0.020 8	0.126
0.029 4	0.051 7	0.058 7	0.062 6	0.007 18	0.137
0.043	0.050 5	0.079 1	0.076 3	0.015 1	0.115
0.061	0.058 1	0.079 1	0.075	0.011 8	0.135
0.036 4	0.070 3	0.068 7	0.068 3	0.010 6	0.127
0.033 5	0.057 3	0.072 4	0.070 9	0.013 8	0.139
0.054 9	0.054 4	0.070 6	0.072 7	0.009 55	0.117
0.029 3	0.045	0.093 9	0.087 6	0.028 6	0.119
0.031 5	0.043 8	0.084 7	0.084 9	0.02	0.113
0.033 3	0.055	0.065 5	0.065 2	0.008 59	0.142
0.039 3	0.049 2	0.094 8	0.088 6	0.029 2	0.123
0.064 2	0.064 3	0.088 1	0.083 8	0.016 5	0.143
0.053 8	0.061 6	0.079 8	0.075 8	0.011 8	0.148
0.059 4	0.053 9	0.077 4	0.080 9	0.013 8	0.126
0.041 7	0.055 1	0.064 2	0.066	0.007 98	0.107
0.050 8	0.067	0.076	0.073 7	0.010 7	0.135
0.028 2	0.045 9	0.081 8	0.081 2	0.017 1	0.118
0.054 4	0.051 1	0.081 4	0.078 8	0.012 2	0.129
0.025 8	0.047 6	0.077 6	0.082 1	0.014 7	0.116

采用响应面法 4 种常用函数模型,分别对各危险部位处的塑性应变进行拟合并计算对应的均方根误差值,如表 4 所示。

表 4 LRBL 结构代理模型精度

危险部位	响应面法			
	线性拟合	纯二次拟合	交叉拟合	完全二次
罐体体壁 Y_1	0.000 909	0.000 881	0.000 730	0.000 711
罐体孔边 Y_2	0.012 607	0.012 816	0.013 056	0.014 165
罐体凸台 Y_3	0.003 244	0.002 790	0.003 025	0.003 033
装填端端盖凸台 Y_4	0.001 251	0.001 173	0.001 263	0.001 346
装填端端盖底部 Y_5	0.004 265	0.003 442	0.004 414	0.002 028
破坏端端盖孔边 Y_6	0.003 793	0.003 668	0.004 395	0.004 222

综合考虑各危险部位中所有代理模型函数的精度后,选用响应面法中的纯二次拟合模型对 LRBL 结构各危险部位的塑性应变进行拟合。进一步采用决定系数(R^2)来对 LRBL 结构各危险部位塑性应变的纯二次拟合模型的精度进行验证。计算结果如表 5 所示。

表 5 LRBL 结构各危险部位纯二次响应面函数精度

序号	危险部位	拟合度/ R	决定系数/ R^2
1	罐体体壁 Y_1	0.998 3	0.996 6
2	罐体孔边 Y_2	0.969 4	0.939 7
3	罐体凸台 Y_3	0.984 3	0.968 8
4	装填端端盖凸台 Y_4	0.985 9	0.972 1
5	装填端端盖底部 Y_5	0.954 3	0.910 7
6	破坏端端盖孔边 Y_6	0.948 8	0.900 2

由表 5 可知,响应面法中的纯二次拟合模型得到的 LRBL 结构各危险部位塑性应变的函数模型的决定系数均大于 0.9,拟合程度较高,能够合理表征 LRBL 结构输入变量和输出响应之间的关系,因此本文采用响应面纯二次模型进行拟合。

根据纯二次拟合模型可确定各危险部位的极限状态函数如下,参考相关材料手册^[18],取 LRBL 结构失效塑性应变为 0.25。令 $Z_i = 0.25 - Y_i$,即 $Z_i > 0$ 时表示危险部位没有发生破坏,反之则表示危险

部位处于临界状态或已经发生破坏。

(1) 罐体体壁

$$Z_1 = 0.25 + 0.799 2 + 0.065 0 X_1 + 0.009 3 X_2 - 0.006 3 X_3 - 0.491 7 X_4 - 0.008 2 X_5 - 0.001 8 X_1^2 - 2.789 0 \times 10^{-4} X_2^2 + 3.135 7 \times 10^{-5} X_3^2 + 0.297 6 X_4^2 + 1.736 3 \times 10^{-5} X_5^2$$

(16)

(2) 罐体孔边

$$Z_2 = 0.25 - 1.096 7 + 0.074 6 X_1 + 0.075 0 X_2 - 0.001 7 X_3 - 0.064 7 X_4 - 9.803 5 \times 10^{-4} X_5 - 0.002 1 X_1^2 - 0.002 5 X_2^2 + 8.669 8 \times 10^{-6} X_3^2 + 0.073 1 X_4^2 + 2.275 0 \times 10^{-6} X_5^2$$

(17)

(3) 罐体凸台

$$Z_3 = 0.25 - 0.404 7 - 0.015 6 X_1 - 0.018 5 X_2 + 0.002 6 X_3 + 0.474 2 X_4 + 0.001 2 X_5 + 9.299 5 \times 10^{-4} X_1^2 + 3.460 6 \times 10^{-4} X_2^2 - 1.304 5 \times 10^{-5} X_3^2 - 0.217 5 X_4^2 - 3.693 2 \times 10^{-9} X_5^2$$

(18)

(4) 装填端端盖凸台

$$Z_4 = 0.25 - 0.540 6 + 0.089 2 X_1 - 0.041 3 X_2 + 0.002 3 X_3 + 0.016 6 X_4 - 8.360 6 \times 10^{-4} X_5 - 0.002 5 X_1^2 + 0.001 2 X_2^2 - 1.066 5 \times 10^{-5} X_3^2 + 0.014 5 X_4^2 + 9.199 7 \times 10^{-7} X_5^2$$

(19)

(5) 装填端端盖底部

$$Z_5 = 0.25 - 0.344 4 + 0.054 3 X_1 - 0.018 5 X_2 + 9.058 7 \times 10^{-5} X_3 - 0.130 4 X_4 - 5.571 3 \times 10^{-5} X_5 - 0.001 4 X_1^2 + 5.112 3 \times 10^{-4} X_2^2 - 1.789 0 \times 10^{-7} X_3^2 + 0.097 7 X_4^2 - 8.005 4 \times 10^{-7} X_5^2$$

(20)

(6) 破坏端端盖孔边

$$Z_6 = 0.25 - 0.078 2 - 0.072 6 X_1 - 0.037 7 X_2 + 3.528 3 \times 10^{-4} X_3 + 0.107 1 X_4 + 0.005 6 X_5 + 0.002 2 X_1^2 + 0.001 2 X_2^2 + 8.628 3 \times 10^{-7} X_3^2 + 0.028 1 X_4^2 - 1.151 2 \times 10^{-5} X_5^2$$

(21)

式中: X_1 为结构厚度, mm; X_2 为剪切销直径, mm; X_3 为 Ti-6Al-4V 的弹性模量, GPa; X_4 为 Ti-6Al-4V 的准静态下屈服强度, GPa; X_5 为 TNT 当量, g。

2.3 建立 LRBL 结构可靠性优化设计模型

考虑到当 LRBL 结构的单方向爆破功能失效时,可能会导致飞机的关键结构和系统受到损伤,查阅资料^[21]确定 LRBL 结构单方向爆破失效为灾难性故障且发生概率应不大于 1×10^{-9} 。通过查正态分布表可以得到失效概率为 1×10^{-9} 对应的可靠度指标为 $\beta = 5.997\ 81$ 。

取结构厚度变异系数 $C_{x_1} = 0.006$, 销直径变异系数 $C_{x_2} = 0.001\ 75$ ^[17], 将 TNT 当量、Ti-6Al-4V 的弹性模量及其准静态下屈服强度的均值和标准差代入 β 指标, 采用均值一次二阶矩方法进行转换, 整理得到如下优化模型:

$$\begin{aligned} \min f_M &= \rho_{Ti-6Al-4V} \pi [180X_1 + X_2^2] \\ &\quad - \frac{X_2^2}{2} X_1 + (90 + 2X_1)^2 \cdot X_1 \\ &\quad + 50 [(90 + 2X_1)^2 - (90 + X_1)^2] \\ &\quad + (405\ 000 - 45X_2^2) \cdot \rho_{15-5PH} \pi 67.5X_2^2 \\ \text{s. t. } \beta_i &= \frac{\mu_{Z_i}}{\sigma_{Z_i}} \geq 5.997\ 81 (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \\ \mu_{Z_1} &= -0.434 + 0.065X_1 + 0.009\ 3X_2 \\ &\quad - 0.001\ 8X_1^2 - 2.789 \times 10^{-4} X_2^2 \\ \sigma_{Z_1}^2 &= (0.065 - 0.003\ 6X_1)^2 (0.006X_1)^2 \\ &\quad + (0.009\ 3 - 5.578 \times 10^{-4} X_2)^2 (0.001\ 75X_2)^2 + 1.868\ 3 \times 10^{-5} \\ \mu_{Z_2} &= -1.031\ 4 + 0.074\ 6X_1 + 0.075X_2 \\ &\quad - 0.002\ 1X_1^2 - 0.002\ 5X_2^2 \\ \sigma_{Z_2}^2 &= (0.074\ 6 - 0.004\ 2X_1)^2 (0.006X_1)^2 \\ &\quad + (0.075 - 0.005X_2)^2 (0.001\ 75X_2)^2 + 1.254\ 63 \times 10^{-5} \\ \mu_{Z_3} &= 0.308\ 8 - 0.015\ 6X_1 - 0.018\ 5X_2 \\ &\quad + 9.299\ 5 \times 10^{-4} X_1^2 + 3.460\ 6 \times 10^{-4} X_2^2 \\ \sigma_{Z_3}^2 &= (-0.015\ 6 + 1.859\ 9 \times 10^{-3} X_1)^2 (0.006X_1)^2 \\ &\quad + (-0.018\ 5 + 6.921\ 2 \times 10^{-4} X_2)^2 (0.001\ 75X_2)^2 + 5.716\ 48 \times 10^{-5} \\ \mu_{Z_4} &= -0.282\ 3 + 0.089\ 2X_1 - 0.041\ 3X_2 \\ &\quad - 0.002\ 5X_1^2 + 0.001\ 2X_2^2 \\ \sigma_{Z_4}^2 &= (0.089\ 2 - 0.005X_1)^2 (0.006X_1)^2 \\ &\quad + (-0.041\ 3 + 0.002\ 4X_2)^2 (0.001\ 75X_2)^2 + 3.710\ 37 \times 10^{-5} \\ \mu_{Z_5} &= -0.178\ 5 + 0.054\ 3X_1 - 0.018\ 5X_2 \\ &\quad + 0.001\ 4X_1^2 + 5.112\ 3 \times 10^{-4} X_2^2 \\ \sigma_{Z_5}^2 &= (0.054\ 3 - 0.002\ 8X_1)^2 (0.006X_1)^2 \\ &\quad + (-0.018\ 5 + 1.022\ 5 \times 10^{-3} X_2)^2 (0.001\ 75X_2)^2 + 4.048\ 46 \times 10^{-5} \\ \mu_{Z_6} &= 1.029\ 6 - 0.072\ 6X_1 - 0.037\ 7X_2 \\ &\quad + 0.002\ 2X_1^2 + 0.001\ 2X_2^2 \\ \sigma_{Z_6}^2 &= (-0.072\ 6 + 0.004\ 4X_1)^2 (0.006X_1)^2 \\ &\quad + (-0.037\ 7 + 0.002\ 4X_2)^2 (0.001\ 75X_2)^2 + 8.134\ 99 \times 10^{-5} \\ 0 &\leq X_1 \leq 20 \\ 0 &\leq X_2 \leq 20 \end{aligned} \quad (22)$$

2.4 LRBL 结构优化结果分析

使用 Matlab 优化工具箱进行计算, 采用内点法经过 18 次迭代达到收敛, 得到满足可靠性和尺寸约束条件下质量最小值。设计变量变化如图 3 所示, 质量的迭代过程如图 4 所示。

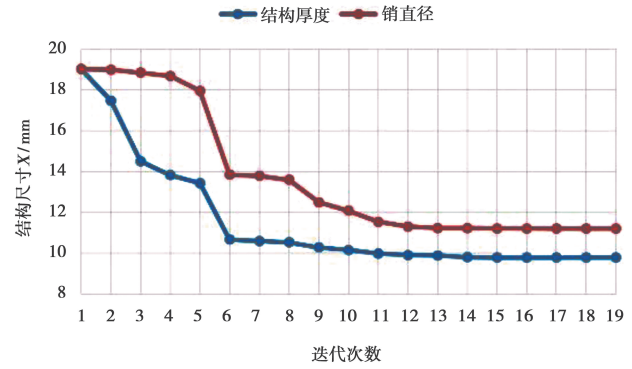


图3 结构尺寸迭代曲线

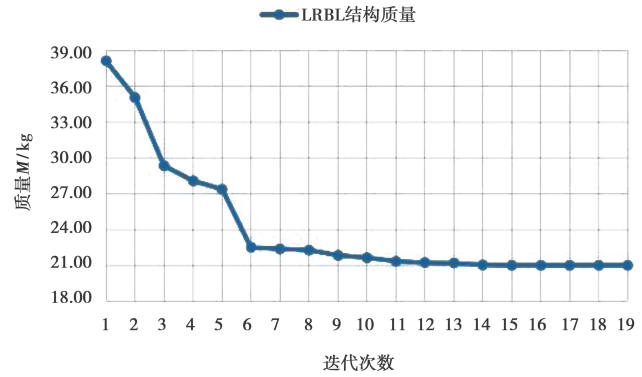


图4 罐体质量迭代曲线

优化前后 LRBL 结构尺寸和质量变化情况及改进百分率如表 6 所示。

表 6 优化前后结构尺寸及质量变化

变 量	X_1 /mm	X_2 /mm	M /kg
初始值	19.010 0	19.010 0	38.286 1
优化值	9.792 4	11.213 7	21.028 0
改进率	48.5%	41.01%	45.08%

由表 6 可知, 优化后的 LRBL 结构与初始方案相比, LRBL 结构尺寸有很大的改进, 在满足失效概率小于 1×10^{-9} 的基础上, LRBL 结构厚度缩小 48.5%, 剪切销直径缩小 41.01%, LRBL 结构质量减轻了 45.08%, 很大程度上实现了 LRBL 结构的轻量化。

3 结论

1) 本文针对 LRBL 结构提出了一种基于可靠性优化设计方法,以 LRBL 结构质量作为优化设计目标,选择 LRBL 结构的结构尺寸作为设计变量,以结构可靠性指标作为约束,将传统优化设计和可靠性理论结合起来,在保证 LRBL 结构安全可靠的基础上实现轻量化。

2) 针对爆炸载荷下约束函数求解复杂的问题,综合爆炸仿真和响应面代理模型拟合得到隐式极限状态方程的近似表达式,在此基础上采用可靠性指标结合均值一次二阶矩方法得到 LRBL 结构优化模型的可靠性约束函数。

3) 以某 LRBL 结构设计方案开展了可靠性优化设计分析,结果表明在保证满足失效概率小于 1×10^{-9} 的前提下,优化后的 LRBL 结构与初始方案相比质量减轻了 45.08%,很大程度上实现了 LRBL 结构的轻量化。

参考文献:

- [1] FAA. Security considerations requirements for transport category airplanes; FAR 25-127[S]. U. S. : Federal Aviation Administration, 1965.
- [2] FAA. Least risk bomb location; AC25. 795-6 [S]. Washington D. C. : Federal Aviation Administration, 1993.
- [3] 冯振宇,周书婷,李恒晖,等. 运输类飞机“最小风险炸弹位置”的研究进展[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 316-325.
- [4] 冯蕴雯,林心怡,薛小锋,等. 高可靠单向爆破的民机防爆结构设计研究[J/OL]. 航空学报, (2023-03-06) [2023-04-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20230303.1610.010.html>.
- [5] 薛小锋,欧靖,林心怡,等. 基于正交试验的民用飞机抗爆结构参数敏感性分析[J/OL]. 航空工程进展, (2023-04-11) [2023-04-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20230410.1423.002.html>.
- [6] YAMAZAKI K, HAN J. Maximization of the crushing energy absorption of tubes[J]. Structural Optimization, 1998, 16(1): 37-46.
- [7] YAMAZAKI K, HAN J. Maximization of the crushing energy absorption of cylindrical shells[J]. Advances in Engineering Software, 2000, 31(6): 425-434.
- [8] XUE Z Y, HUTCHINSON J W. A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(10): 1283-1305.
- [9] 梁民族. 内部爆炸载荷下梯度泡沫夹芯圆筒动态响应及其抗爆性能多目标优化[D]. 长沙:国防科学技术大学,2017.
- [10] 孙晓旺,曾爱,王显会,等. 车辆侧爆防护可靠性优化设计研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(17): 137-145.
- [11] 曾爱. 某型装甲车侧爆防护技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2019.
- [12] 李敏. 可靠度分析的响应面法研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [13] QUEIPO N V, HAFTKA R T, SHYY W, et al. Surrogate-based analysis and optimization [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(1): 1-28.
- [14] MACKMAN T J, ALLEN C B, GHOREYSHI M, et al. Comparison of adaptive sampling methods for generation of surrogate aerodynamic models [J]. AIAA Journal, 2013, 51(4): 797-808.
- [15] TENNE Y, ARMFIELD S W. Metamodel accuracy assessment in evolutionary optimization [C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation. [S. l. : s. n.], 2008: 1505-1512.
- [16] AUTE V, SALEH K, ABDELAZIZ O, et al. Cross-validation based single response adaptive design of experiments for Kriging metamodeling of deterministic computer simulations [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2013, 48(3): 581-605.
- [17] 张碧辉,岳良明,王军. 一种归一化的代理模型精度指标[J]. 航空工程进展, 2019, 10(5): 587-592; 627.
- [18] 秦福光. 民机结构分析和设计: 第一册 民机材料和结构性能数据手册[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2017.
- [19] 张骏华. 结构可靠性设计与分析[M]. 北京:宇航出版社, 1989.
- [20] 中国航空工业总公司. 一般公差: HB5800-1999 [S]. 北京:中国航空工业总公司,1999.
- [21] SAE. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment; SAE ARP 4761 [S]. Warrendale: SAE International, 1996.

作者简介

欧靖 男,硕士。主要研究方向:飞机设计可靠性分析。E-mail: 540463017@qq.com

林心怡 女,硕士。主要研究方向:结构可靠性分析。E-mail: 942708188@qq.com

薛小锋 男,博士,副研究员。主要研究方向:飞机设计可靠性分析。E-mail: xuexiaofeng@nwpu.edu.cn

冯蕴雯 女,博士,教授。主要研究方向:飞机设计可靠性分析。E-mail: fengyunwen@nwpu.edu.cn

杨 祥 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构设计。E-mail: yangxiang@comac.cc

Research on optimization design of civil aircraft least risk bomb location structure based on reliability

OU Jing^{1*} LIN Xinyi¹ XUE Xiaofeng¹ FENG Yunwen¹ YANG Xiang²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: The least risk bomb location (LRBL) structure, as an explosion-proof structure applied to airliner, should reduce the structure quality as much as possible while ensuring reliability. This article conducts research on reliability based LRBL structural optimization design. Firstly, the lightweight LRBL structure was taken as the optimization design objective, and the structural size of the LRBL structure was selected as the design variable. Then, the structural reliability index was used as a constraint, and the response surface method combined with reliability index transformation was used to obtain the optimization model constraint function. The reliability optimization model of the LRBL structure was established. Finally, the interior point method was used to optimize the reliability of the LRBL structure. An optimization design case analysis was conducted using a certain LRBL structural design scheme, and the results show that on the basis of meeting reliability indicators, the optimized LRBL structural mass was reduced by 45.08%, with a significant weight reduction effect. This has guiding significance and reference value for the application of LRBL structures in engineering practice.

Keywords: least risk bomb location(LRBL); optimal design; explosive shock; reliability

* Corresponding author. E-mail: 540463017@qq.com