DOI: 10.3901/JME.2020.02.130

基于概率-椭球混合模型的缓冲气囊防护特性可靠性分析方法*

刘鑫^{1,2} 尹来容¹ 胡林¹

(1. 长沙理工大学工程车辆安全性设计与可靠性技术湖南省重点实验室 长沙 410004;

2. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室 西安 710049)

摘要: 针对多重不确定性因素对缓冲气囊防护特性的影响,提出一种基于概率-椭球混合模型的缓冲气囊防护特性可靠性分析方法。首先,利用概率模型和椭球凸集模型对装备空降过程中的不确定性因素进行描述,并建立缓冲气囊防护特性可靠性分析模型;然后,利用 Karush-Kuhn-Tucker 最优化条件将可靠性指标求解时面临的双层嵌套优化问题转化成单层优化问题,实现循环嵌套优化问题的解耦,从而提高可靠性指标的求解效率;最后,利用隔代映射遗传算法对气囊防护可靠性指标进行求解,并通过开展装备落地碰撞试验对缓冲气囊的防护特性进行验证。结果表明,该方法能有效对缓冲气囊的防护特性进行可靠性评估,并确保空降装备的安全性,在装备空降技术领域具有一定的实际工程意义。

关键词: 缓冲气囊; 装备空降; 相关性; 混合模型; 可靠性分析

中图分类号: V224

Hybrid Reliability Approach for Airbag Protection Performance Based on Probability and Ellipsoidal Convex Models

LIU Xin^{1,2} YIN Lairong¹ HU Lin¹

(1. Hunan Province Key Laboratory of Safety and Reliability Technology for Engineering Vehicle, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004;

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: Considering the influence of multi-source uncertainties on airbag protection performance, a hybrid reliability approach based on probability and ellipsoidal convex models is presented for airbag protection performance. Firstly, the probability and ellipsoidal convex models are used to quantify the uncertainty, and the reliability analysis model of airbag protection performance will be constructed. Then, considering the original hybrid reliability analysis belongs to a complex nesting optimization problem, an efficient decoupling strategy is suggested to improve the computational efficiency. Based on this decoupling strategy, the normalized hybrid reliability model can be converted into the single-layer equivalent model by utilizing the Karush-Kuhn-Tucker conditions. Finally, the intergeneration projection genetic algorithm (IP-GA) is adopted to obtain the reliability index of airbag protection performance, which is validated by the vehicle airdrop experiments. The results demonstrate that the proposed method could effectively evaluate the reliability of airbag protection performance and ensure the vehicle safety. The method can also be used in the field of other airdrop protections.

Key words: airbag; equipment airdrop; correlation; hybrid model; reliability analysis

0 前言

缓冲气囊因重量轻、吸能效果好等特点已经广

泛应用于装备空降、无人机回收、航天返回等技术领域,并成为装备安全保障的重要组成部分^[1-2]。许多学者也对气囊减振技术开展了广泛研究^[3-4]。如加拿大战地无人侦察机的回收方式和美国火星探索者的着陆方式均采用的是气囊减振技术。在国内,何欢等^[5]研究了深空探测气囊着陆缓冲系统的冲击动力学相似问题,并给出了全尺寸气囊系统冲

* 国家自然科学基金(51305047, 51775057)、湖南省教育厅科学研究(16B014)和机械结构强度与振动国家重点实验室(西安交通大学)开放基金(SV2016-KF-09)资助项目。20181225 收到初稿, 20190520 收到修改稿

击响应特性的模型; 刘鑫等^[6]研制并开发了全气囊缓冲座椅, 并应用于保障载人空降乘员的安全性; 戈嗣诚^[7]则基于火星全向着陆缓冲气囊的数学模型分析了气囊的着陆缓冲特性, 并通过投放试验验证了方案的可行性。

应该说, 目前对于缓冲气囊减振技术的研究, 人们多数是在各种因素都非常明确, 系统参数模型也是基于确定的条件下展开研究讨论的。这些研究具有一定的代表性, 而且也容易通过试验进行测量。但是, 在许多实际的着陆冲击过程中, 不可避免地存在着与边界条件、初始条件、测量偏差等有关的误差或不确定性。这些误差或不确定性虽然在多数情况下数值较小, 但耦合在一起可能使系统响应产生较大的偏差, 而这些因素又确实是客观存在、不可避免的^[8]。由于可靠性与不确定性紧密相关, 所以针对缓冲气囊的设计过程中需要对可靠性进行分析, 对保证缓冲气囊的防护性能具有重要的工程意义。

针对工程系统可靠性的研究, 人们多采用概率模型^[9]、模糊模型^[10]和凸集模型^[11]来描述系统的不确定性。然而, 在实际工程设计过程中, 许多不确定变量因缺乏足够的样本数据而致使概率分布密度未知, 这就限制了概率模型与模糊模型的应用。非概率凸集模型被认为是能够克服概率方法缺陷的一种不确定性建模方法, 在描述不确定性时, 只需要知道参数可能的变化范围, 即上、下界, 并不需要其精确的概率分布, 这就为不确定分析带来很大的方便性和经济性, 并能够解决很多概率方法所无法解决的不确定性问题。凸集模型主要包括区间模型^[12]和椭圆模型^[13]。但区间模型只是凸模型的一种最简单形式, 即未考虑非概率变量之间的相关性。然而, 很多实际工程问题中非概率变量之间并不是相互独立的, 他们之间通常存在着一定的相关系数, 因此考虑椭圆模型的可靠性设计问题更具实用价值。

但值得注意的是, 在缓冲气囊设计过程中, 往往存在大量的不确定性变量。有些变量因为试验样本数据充足可以通过概率模型处理, 而有些变量因为信息量的缺失只能确定其边界, 并通过凸集模型对其分布进行描述。可见, 只存在单一类型变量的不确定性系统并不多见, 混合类型变量共同存在的情况则更为普遍, 采用何种模型处理缓冲气囊减振过程中的不确定信息应根据掌握的数据信息而定。而且, 一旦混合模型介入, 传统的基于概率模型的可靠性设计方法将无法直接应用。因此, 如何有效求解含混合模型的工程可靠性分析问题引起了广大

关注^[14-16]。尤其是针对含概率模型和椭圆模型的缓冲气囊防护特性可靠性问题而言, 如何实现双层嵌套优化问题向单层优化问题进行合理转化, 并高效求解其可靠性指标是缓冲气囊防护特性可靠性分析与设计的重要问题。

针对这一问题, 本文将采用理论和试验相结合的方法对缓冲气囊的防护性能进行可靠性分析。首先, 基于随机可靠度和凸集理论构建缓冲气囊防护性能的可靠性分析模型; 然后, 研究有效的求解策略对可靠性指标求解时面临的双层嵌套优化问题进行解耦, 并将其转换成单层优化问题; 最后, 利用隔代映射遗传算法对可靠性指标进行求解, 并通过开展装备落地碰撞试验对该方法进行验证, 从而确保空降装备的安全性。

1 问题的描述

使用气囊装置对空降装备进行缓冲, 是为了确保在着陆瞬间装备所受到的冲击加速度小于其耐受极限值 a_0 (图 1)。

图1 气囊缓冲示意图

在气囊缓冲过程中, 对于能够获得完整概率分布信息的随机变量采用概率模型来描述; 而有些不确定性变量因缺乏足够的样本数据而致使概率分布密度未知, 同时这些变量还存在相关性, 因此采用椭圆凸集模型来进行描述, 则缓冲气囊防护特性的极限状态功能函数

$$g(\mathbf{X}, \mathbf{Q}) = a_0 - a_m(\mathbf{X}, \mathbf{Q}) \quad (1)$$

式中, a_m 为空降装备在气囊缓冲作用下所受到的最大冲击加速度; $\mathbf{X}$ 为随机矢量, 包括气囊底面积、初始囊高和着陆垂直速度等参数; $\mathbf{Q}$ 为区间矢量, 包括初始囊压, 爆破膜起爆阈值和喷管排气口面积等参数, 其相关性如式(2)所示

$$\mathbf{Q} \in \Omega_Q = \left\{ \mathbf{Q} \mid (\mathbf{Q} - \mathbf{Q}^c)^T \mathbf{W}_Q (\mathbf{Q} - \mathbf{Q}^c) \leq 1 \right\} \quad (2)$$

式中, Ω_Q 为一个多维的椭圆集; $\mathbf{W}_Q$ 为对称正定的

椭圆特征矩阵,它描述了椭圆集的方向和大小; Q^c 为椭圆中心

$$Q^c = (Q_1^c, \dots, Q_n^c) \quad (3)$$

$$Q_i^c = \frac{Q_i^R + Q_i^L}{2} \quad i=1,2,\dots,n$$

式中,上标 R 和 L 代表了不确定性变量 Q_i 区间的上、下界。

在前期工作中,作者已建立气囊缓冲的动力学模型^[17],得到了冲击加速度 a 与各变量之间的联系。本文将依据此模型对气囊缓冲的防护性能进行可靠性分析,以确保空降装备的安全性。因此,含概率-椭圆混合模型的缓冲气囊防护特性可靠性分析问题如式(4)所示

$$\begin{cases} \beta^L = \min_U \|U\| \\ \text{s.t.} \min_{Q \in \Omega_Q} G(U, Q) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$Q \in \Omega_Q = \left\{ Q \mid (Q - Q^c)^T W_Q (Q - Q^c) \leq 1 \right\}$$

式中, β^L 为最小可靠性指标, U 为 X 映射到标准正态空间下的随机矢量; G 为 g 映射到标准正态空间下的极限状态功能函数。

显然,上述问题属于一个双层嵌套的优化问题。因此,需要研究一种有效的可靠性分析方法实现缓冲气囊防护特性可靠性指标的高效求解。

2 基于概率-椭圆混合模型的高效可靠性分析方法

2.1 不确定性矢量标准化

针对含混合模型的缓冲气囊防护特性可靠性分析问题,首先在式(2)所示的椭圆凸集中,通过式(5)将区间矢量 Q 无量纲化,将其转化为相对偏差矢量 C

$$C_i = \frac{Q_i - Q_i^c}{Q_i^w} \quad i=1,2,\dots,q \quad (5)$$

式中, $Q_i^c = \frac{Q_i^R + Q_i^L}{2}$ 和 $Q_i^w = \frac{Q_i^R - Q_i^L}{2}$ 分别代表第 i 个不确定性变量 Q_i 的中点和半径。

因此,多维椭圆凸集模型 Ω_Q 可用 C 空间下的凸集 Ω_C 来表示

$$C \in \Omega_C = \{C \mid C^T W_C C \leq 1\} \quad (6)$$

式中, W_C 为 C 空间下的特征矩阵。

将特征矩阵 W_C 进行特征值分解

$$\Psi^T W_C \Psi = \Lambda \quad \Psi^T \Psi = I \quad (7)$$

式中, Ψ 为由特征矢量组成的正交矩阵; Λ 为由特征值组成的对角矩阵; I 为单位矩阵。

然后通过线性转化式(8)

$$\rho = \Lambda^{1/2} \Psi^T C \quad (8)$$

可将凸集 Ω_C 转化到 ρ 空间下,并用凸集 Ω_ρ 来表示

$$\rho \in \Omega_\rho = \{\rho \mid \rho^T \rho \leq 1\} \quad (9)$$

式中, ρ 为不确定矢量 Q 对应的标准化矢量。

通过上述数学变换,式(4)所示的含混合模型的缓冲气囊防护特性可靠性分析问题可进一步改写为

$$\begin{cases} \beta^L = \min_U \|U\| \\ \text{s.t.} \min_{\rho \in \Omega_\rho} G(U, \rho) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

在式(10)的求解优化过程中,通常可以分解成内、外层嵌套优化问题。其中,外层优化问题如式(11)所示,用来求解最小的可靠性指标 β^L

$$\begin{cases} \beta^L = \min_U \|U\| \\ \text{s.t.} G(U, \rho^*) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

而内层优化问题则是针对凸集 Ω_ρ 来求解最小化的函数值 $G(U, \rho^*)$,可表示为

$$\begin{cases} G(U, \rho^*) = \min_{\rho} G(U, \rho) \\ \text{s.t.} \rho^T \rho \leq 1 \\ -1 \leq \rho_i \leq 1 \quad i=1,2,\dots,q \end{cases} \quad (12)$$

很明显,上述基于概率-椭圆混合模型的可靠性分析问题属于典型的双层嵌套的优化问题。而且,对于缓冲气囊防护特性可靠性分析这类复杂的工程问题而言,如果直接采用传统的非线性优化算法求解将造成极低的计算效率。因此,为了求解可靠性指标,需要研究有效的求解策略对上述嵌套优化问题进行解耦,并将其转换成单层优化问题后,再对其可靠性指标进行求解。

2.2 等效模型的建立与证明

假设不确定性变量 ρ_i 均服从区间 $[-1,1]$ 的均匀分布,且变量之间存在相关性

$$\rho_i \sim u(\rho_i^L, \rho_i^R) = u(-1,1) \quad i=1,2,\dots,q \quad (13)$$

$$\rho \in \Omega_\rho = \{\rho \mid \rho^T \rho \leq 1\}$$

式中, $u(-1,1)$ 表示服从区间 $[-1,1]$ 的均匀分布。则包含随机矢量 X 和不确定性矢量 ρ 的可靠性问题如式(14)所示

$$\begin{cases} \beta = \min_{U,V} \sqrt{\|U\|^2 + \|V\|^2} \\ \text{s.t. } G(U, V) = 0 \\ \left(F_{\rho_1}^{-1}(\Phi(V_1)) \right)^2 + \left(F_{\rho_2}^{-1}(\Phi(V_2)) \right)^2 + \dots + \left(F_{\rho_q}^{-1}(\Phi(V_q)) \right)^2 \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中, U 和 V 分别为 X 和 ρ 映射到标准正态下的随机矢量; $\Phi(V_i)$ 为标准正态变量 V_i 的累积分布函数; $F_{\rho_i}^{-1}$ 为均匀分布参数 ρ_i 的累积分布函数的反函数。

由文献[18]可知, 在极限状态功能函数上, 最可能失效点(Most probable point, MPP) (U^*, V^*) 具有最大的概率密度, 且为式(14)的最优解。则与之对应的 (U^*, ρ^*) 也是式(15)所示优化问题的最优解

$$\begin{cases} \max_{U,\rho} f_{U,\rho}(U, \rho) \\ \text{s.t. } g(U, \rho) = 0 \\ \rho^T \rho \leq 1 \\ -1 \leq \rho_i \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (15)$$

式中, $f_{U,\rho}$ 为随机矢量 U 和 ρ 的联合概率密度函数。由于矢量 U 和 ρ 相互独立, 因此式(15)可以改写成如式(16)所描述的形式

$$\begin{cases} \max_{U,\rho} f_U(U) f_\rho(\rho) \\ \text{s.t. } g(U, \rho) = 0 \\ \rho^T \rho \leq 1 \\ -1 \leq \rho_i \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (16)$$

由于式(16)的概率密度函数 $f_\rho(\rho)$ 是一个固定的正值, 所以式(16)可以简化为式(17)

$$\begin{cases} \max_{U,\rho} f_U(U) \\ \text{s.t. } g(U, \rho) = 0 \\ \rho^T \rho \leq 1 \\ -1 \leq \rho_i \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (17)$$

对于式(17)所示的优化问题, 利用 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)最优化条件^[19]可知它的优化解必须满足如下条件

$$\begin{cases} -\nabla_{U_i} f_U(U) + \mu_1 \nabla_{U_i} g(U, \rho) = 0 \quad i=1, 2, \dots, n \\ \mu_1 \nabla_{\rho_i} g(U, \rho) + \mu_2 \nabla_{\rho_i} g(\rho) - \mu_{3i} + \mu_{4i} = 0 \quad i=1, 2, \dots, q \\ \mu_{3i}(-1 - \rho_i) = 0 \quad i=1, 2, \dots, q \\ \mu_{4i}(\rho_i - 1) = 0 \quad i=1, 2, \dots, q \\ g(U, \rho) = 0 \\ g(\rho) = 0 \\ -1 \leq \rho_i \leq 1, \quad i=1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (18)$$

式中, $g(\rho) = \rho^T \rho - 1$; μ_1, μ_2, μ_{3i} 和 μ_{4i} 为拉格朗日乘子。

如果可以证明式(10)所示的优化问题具有式(18)相同的 KKT 最优化条件, 则说明式(10)与式(15)具有相同的优化解。假设 U^* 为式(10)的 MPP 点, 根据 MPP 点的性质, U^* 也是如下优化问题的一个最优解

$$\begin{cases} \max_U f_U(U) \\ \text{s.t. } \min_{\rho \in \Omega_\rho} g(U, \rho) = 0 \\ \rho^T \rho \leq 1 \\ -1 \leq \rho_i \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (19)$$

同理, 利用 KKT 最优化条件可知它的子优化问题 $\min_{\rho \in \Omega_\rho} g(U, \rho)$ 的优化解必须满足如下条件

$$\begin{cases} \nabla_{\rho_i} g(U, \rho) + \mu_2 \nabla_{\rho_i} g(\rho) - \mu_{3i} + \mu_{4i} = 0 \quad i=1, 2, \dots, q \\ \mu_{3i}(-1 - \rho_i) = 0 \quad i=1, 2, \dots, q \\ \mu_{4i}(\rho_i - 1) = 0 \quad i=1, 2, \dots, q \\ g(\rho) = 0 \\ -1 \leq \rho_i \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (20)$$

把式(20)代入式(19)可得

$$\begin{cases} \max_U f_U(U) \\ \text{s.t. } g(U, \rho) = 0 \\ \nabla_{\rho_i} g(U, \rho) + \mu_2 \nabla_{\rho_i} g(\rho) - \mu_{3i} + \mu_{4i} = 0 \quad i=1, 2, \dots, q \\ \mu_{3i}(-1 - \rho_i) = 0 \quad i=1, 2, \dots, q \\ \mu_{4i}(\rho_i - 1) = 0 \quad i=1, 2, \dots, q \\ g(\rho) = 0 \\ -1 \leq \rho_i \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (21)$$

然后, 在求解式(21)的 KKT 最优化条件可发现与式(18)有相同的表达形式。

因此, 可证明优化问题式(10)和式(15)具有相同的优化解 (U^*, ρ^*) , 即式(10)所示双层嵌套优化问题可以转换为式(14)所示的单层优化问题来进行求解。

2.3 计算流程

在建立了基于概率-椭圆混合模型的缓冲气囊可靠性分析模型后, 通过上述的数学证明便可将嵌套优化问题转换为单层优化问题进行可靠性指标求解, 其具体流程如图 2 所示。

(1) 对缓冲气囊防护特性可靠性问题进行分析, 区分随机矢量 X 和存在相关性的区间矢量 Q , 并建立如式(1)所示的极限状态功能函数。

图2 缓冲气囊防护特性可靠性分析流程图

(2) 基于等概率变换，将随机矢量 $\mathbf{X}$ 转换成标准正态矢量 $\mathbf{U}$ ；同时，把区间矢量 $\mathbf{Q}$ 转化成标准化不确定矢量 $\boldsymbol{\rho}$ ，建立如式(10)所示的混合可靠性分析模型。

(3) 将不确定性变量 ρ_i 转变成服从均匀分布的随机变量，则可建立如式(14)所示的混合可靠性分析问题，即把嵌套优化问题转换为单层优化问题。

(4) 用隔代映射遗传算法(IP-GA)对式(14)所描述的优化问题进行求解，获得优化解 $(\mathbf{U}^{(s)*}, \mathbf{V}^{(s)*})$ 及与其对应的解 $(\mathbf{X}^*, \mathbf{Q}^*)$ 。

(5) 利用公式 $\beta^L = \|\mathbf{U}^{(s)*}\|$ 获得最小可靠性指标 β^L 。

3 工程应用实例

某空降装备质量为 8 000 kg、着陆角为 0° 、耐受极限值 $a_0 = 250 \text{ m/s}^2$ [20]，则缓冲气囊防护特性的极限状态功能函数可表示如下

$$g(\mathbf{X}, \mathbf{Q}) = 250 - a_m(\mathbf{X}, \mathbf{Q}) \quad (22)$$

式中， $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3)^T$ 为随机矢量，包括 X_1 气囊底面积(m^2)、 X_2 初始囊高(m)和 X_3 着陆垂直速度(m/s)； $\mathbf{Q} = (Q_1, Q_2, Q_3)^T$ 为存在相关性的区间矢量，

包括 Q_1 初始囊压(Pa)、 Q_2 爆破膜起爆阈值(Pa)和 Q_3 喷管排气口面积(m^2)。本文将运用上述方法将含概率-椭球混合模型的缓冲气囊防护特性可靠性分析问题转换成等效的单层优化问题进行求解，并探讨随机变量不同分布类型与不同的特征系数矩阵分别对可靠性指标的影响。需要说明的是，本文选取隔代映射遗传算法求解评价缓冲气囊缓冲特性的可靠性指标，其算法的相关参数设置如下：种群大小为 5，交叉概率为 0.5，变异概率为 0.02，迭代次数为 500 代，极限状态函数的调用次数为 2 500。

3.1 随机变量分布类型对可靠性指标的影响

本节将针对椭球特征矩阵一定的条件下，分别讨论随机矢量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3)^T$ 在两种不同分布类型工况下对缓冲气囊防护特性可靠性指标的影响。其中，椭球特征矩阵关系式如下所示

$$(\mathbf{Q} - \mathbf{Q}^c)^T \begin{pmatrix} 0.65 & -0.23 & 0.48 \\ -0.23 & 0.89 & -0.15 \\ 0.48 & -0.15 & 0.44 \end{pmatrix} (\mathbf{Q} - \mathbf{Q}^c) \leq 1 \quad (23)$$

$$\mathbf{Q}^c = (11900, 134500, 0.4)^T \quad (24)$$

$$\mathbf{Q}^w = (2000, 1500, 0.1)^T \quad (25)$$

3.1.1 工况一

随机矢量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3)^T$ 的具体分布类型如表 1 所示，其中针对服从对数正态分布的随机变量 X_1 和 X_2 ，分布参数 1 和分布参数 2 分别表示均值和标准差；针对服从均匀分布的随机变量 X_3 ，分布参数 1 和分布参数 2 分别表示区间的下界和上界。计算结果由表 2 可知，此工况下的缓冲气囊防护特性可靠性指标为 6.31，失效概率为 1.40×10^{-10} ，说明缓冲气囊具有较好的防护性能。

表1 随机变量分布类型(工况一)

随机变量	分布参数 1	分布参数 2	分布类型
X_1 / m^2	20.816 7	0.624 5	对数正态分布
X_2 / m	0.277 6	0.045 5	对数正态分布
$X_3 / (\text{m/s})$	4.0	8.0	均匀分布

表2 可靠性指标计算结果(工况一)

随机变量			不确定变量			可靠性指标值
X_1 / m^2	X_2 / m	$X_3 / (\text{m/s})$	Q_1 / Pa	Q_2 / Pa	Q_3 / m^2	β^L
20.79	0.274	7.093	119000	134500	0.50	6.31

3.1.2 工况二

此工况下，随机变量 X_1 和 X_2 服从正态分布，分布参数 1 和分布参数 2 分别表示均值和标准差；随机变量 X_3 仍服从均匀分布，具体分布参数如表 3 所示。计算结果由表 4 可知，可靠性指标为 7.35，

失效概率为 9.91×10^{-14} 与工况一相比, 可靠性指标值明显得到提升, 说明随机变量的分布类型将直接影响到缓冲气囊防护特性的可靠性评估, 尤其在计算缓冲气囊可靠性指标时, 必须考虑功能函数中随机变量的概率分布类型。

表 3 随机变量分布类型(工况二)

随机变量	分布参数 1	分布参数 2	分布类型
X_1 / m^2	20.816 7	0.208	正态分布
X_2 / m	0.277 6	0.0138 8	正态分布
$X_3 / \text{m/s}$	4.0	8.0	均匀分布

表 4 可靠性指标计算结果(工况二)

随机变量			不确定变量			可靠性指标值
X_1 / m^2	X_2 / m	$X_3 / (\text{m/s})$	Q_1 / Pa	Q_2 / Pa	Q_3 / m^2	β^L
20.85	0.321 6	7.163	119 000	134 500	0.50	7.35

表 5 不同椭球特征矩阵对应的可靠性指标值

椭球特征矩阵	随机变量			不确定变量			可靠性指标值
	X_1 / m^2	X_2 / m	$X_3 / (\text{m/s})$	Q_1 / Pa	Q_2 / Pa	Q_3 / m^2	β^L
$\begin{pmatrix} 0.65 & -0.23 & 0.48 \\ -0.23 & 0.89 & -0.15 \\ 0.48 & -0.15 & 0.44 \end{pmatrix}$	20.79	0.274	7.093	119 000	134 500	0.50	6.31
$\begin{pmatrix} 0.46 & 0.01 & 0.45 \\ 0.01 & 0.87 & 0.12 \\ 0.45 & 0.12 & 0.68 \end{pmatrix}$	19.97	0.243	6.987	119 000	134 500	0.50	7.36
$\begin{pmatrix} 0.37 & -0.004 52 & -0.209 \\ -0.004 52 & 1.98 & 0.141 \\ -0.209 & 0.141 & 0.24 \end{pmatrix}$	20.74	0.289	7.081	119 000	134 500	0.445	10.72

3.3 实际应用

根据以上可靠性分析结果, 研制缓冲气囊(图 3)并安装于空降装备的底部, 在离地 1.8 m 处进行装备落地碰撞试验(图 4)。着陆过程中空降装备所受到的冲击加速度如图 5 所示, 试验结果中空降装备的最大冲击加速度值为 231.5 m/s^2 , 完全低于耐受极限值 250 m/s^2 , 说明依据可靠性分析结果所研制的缓冲气囊能有效对空降设备进行防护。

图 3 缓冲气囊装置

3.2 椭球特征矩阵对可靠性指标的影响

本节将针对随机变量为同一分布类型的条件下, 讨论不同的椭球特征矩阵对缓冲气囊防护特性可靠性指标值的影响。其中, 随机矢量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3)^T$ 的具体分布类型以表 1 所示的数据为基础; 存在相关性的区间矢量 $\mathbf{Q} = (Q_1, Q_2, Q_3)^T$ 的中点和半径如式(24)和式(25)所示。表 5 则列出了椭球特征矩阵在三种不同工况下缓冲气囊防护特性可靠性指标值的大小, 其中最小可靠性指标值为 6.31, 最大可靠性指标值为 10.72。由表 5 所示的计算结果可知, 不同的椭球特征矩阵将造成可靠性指标值的波动, 说明区间变量 Q_i 之间的相关性同样会对缓冲气囊防护特性的可靠性评估造成重要影响。因此需要根据装备空降的实际情况, 对影响缓冲气囊防护特性的不确定性变量进行分析, 确定其特征系数矩阵并获得准确的可靠性指标值。

图 4 装备落地碰撞试验

4 结论

(1) 针对不确定因素对缓冲气囊缓冲特性的影响, 构建了基于概率-椭球混合模型的缓冲气囊可靠性分析模型, 并利用 KKT 最优化条件将双层嵌套的优化问题转化成单层优化问题, 实现了循环嵌套优

图5 空降装备冲击加速度试验结果

化问题的解耦,极大地提高了缓冲气囊防护特性可靠性指标的求解效率。

(2) 针对含概率模型和椭球模型的缓冲气囊可靠性分析问题,随机变量的分布类型和区间变量之间的相关性将直接影响到缓冲气囊防护特性的可靠性评估。因此需要根据装备空降的实际情况,对影响缓冲气囊防护特性的随机变量和存在相关性的区间变量进行分析和建模,从而获得准确的可靠性指标值。

(3) 根据可靠性分析结果,研制缓冲气囊并应用于装备落地碰撞试验。试验结果表明,在缓冲气囊的防护下,空降装备的最大加速度值完全低于其耐受极限值,说明本文的建模方法和求解过程是正确的,能对缓冲气囊的缓冲特性进行有效评估,符合实际工况要求,在装备空降技术领域也具有一定的实际工程意义。

参 考 文 献

- [1] LIU Xin, ZHANG Zhiyong, ZHAO Ziheng. The uncertain optimisation of buffering characteristics of landing airbag in manned airdrop[J]. International Journal of Crashworthiness, 2013, 18(3): 225-236.
- [2] 洪煌杰, 王红岩, 李建阳, 等. 空投装备气囊缓冲系统评价方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(4): 148-154.
HONG Huangjie, WANG Hongyan, LI Jianyang, et al. Research on assessment method of airbag cushion system for airdropping equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(4): 148-154.
- [3] 汪娜, 彭雄奇, 鲁宏升, 等. 应用 CPM 法模拟折叠气囊[J]. 机械工程学报, 2015, 51(12): 120-126.
WANG Na, PENG Xiongqi, LU Hongsheng, et al. Folded airbag simulation based on corpuscular particle method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(12): 120-126.
- [4] 文桂林, 肖久如, 尹汉锋, 等. 全向式多室连通火星着陆缓冲气囊的多目标优化设计[J]. 机械工程学报,

2015, 51(15): 135-141.

WEN Guilin, XIAO Jiuru, YIN Hanfeng, et al. Multi-objective optimization design of omni-directional multi-chamber airbag for landing on mars[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(15): 135-141.

- [5] 何欢, 何成, 陈国平, 等. 深空探测气囊着陆缓冲系统的原理样机冲击动力学相似问题研究[J]. 振动工程学报, 2013, 26(4): 554-560.

HE Huan, HE Cheng, CHEN Guoping, et al. Similarity problem of the impact response of the deep space exploration airbag cushion landing system and its prototype[J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(4): 554-560.

- [6] 刘鑫, 张志勇. 基于气囊缓冲的载人空降乘员防护装置优化设计[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21): 168-174.

LIU Xin, ZHANG Zhiyong. Optimal design of passenger's protection devices in manned airdrop based on airbag cushion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(21): 168-174.

- [7] 戈嗣诚. 火星全向气囊的着陆缓冲特性研究[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(2): 16-22.

GE Sicheng. Study on cushioning characteristic of mars omni-direction airbag[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(2): 16-22.

- [8] 张义民, 孙志礼. 机械产品的可靠性大纲[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 14-20.

ZHANG Yiming, SUN Zhili. The reliability syllabus of mechanical products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 14-20.

- [9] FAN Xiaoning, ZHI Bo. Design for a crane metallic structure based on imperialist competitive algorithm and inverse reliability strategy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(4): 900-912.

- [10] WANG Zhonglai, HUANG Hongzhong, DU Li. Reliability analysis on competitive failure processes under fuzzy degradation data[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11: 2964-2973.

- [11] DU Xiaoping. Reliability-based design optimization with dependent interval variables[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2012, 91: 218-228.

- [12] ZHAO Ziheng, HAN Xu, JIANG Chao, et al. A nonlinear interval-based optimization method with local-densifying approximation technique[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 42: 559-573.

- [13] JIANG Chao, HAN Xu, LU Guoying. Correlation analysis of non-probabilistic convex model and corresponding structural reliability technique[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200:

- 2528-2546.
- [14] LUO Yangjun, KANG Zhan, ALEX L. Structural reliability assessment based on probability and convex set mixed model[J]. Computers & Structures, 2009, 87: 1408-1415.
- [15] YANG Xuefeng, LIU Yongshou, ZHANG Yishang, et al. Hybrid reliability analysis with both random and probability-box variables[J]. Acta Mechanica, 2015, 226(5): 1341-1357.
- [16] OBERGUGGENBERGER M. Analysis and computation with hybrid random set stochastic models[J]. Structural Safety, 2015, 52: 233-243.
- [17] 刘鑫, 韩旭, 刘桂萍. 基于微型多目标遗传算法的气囊缓冲特性优化[J]. 中国机械工程, 2009, 20(15): 1819-1823.
- LIU Xin, HAN Xu, LIU Guiping. Optimization of cushion characteristic of airbag based on micro multi-objective genetic algorithms[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(15): 1819-1823.
- [18] MADSEN H O. First order vs. second order reliability analysis of series structures[J]. Structural Safety, 1985, 2: 207-214.
- [19] NOCEDAL J, WRIGHT S J. Numerical optimization[M]. New York: Springer, 1999.
- [20] 王玉兰. 飞船着陆冲击人体耐力分析[J]. 航天医学与医院工程, 1996, 9(1): 60-63.
- WANG Yulan. Analysis of human tolerance to landing impact of manned spacecraft[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 1996, 9(1): 60-63.
-
- 作者简介: 刘鑫(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机械结构可靠性设计方法。
E-mail: lxm810205@163.com
- 尹来容, 男, 1984 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机械结构优化设计方法。
E-mail: yinlairong@hotmail.com
- 胡林, 男, 1978 年出生, 教授, 博士研究生导师, 湖南省“芙蓉学者”, 湖南省杰出青年基金获得者。主要研究方向为车辆动力学控制与智能化、交通事故深入调查及预防。
E-mail: hulin@csust.edu.cn