

密闭型气囊抗冲击效能仿真方法研究

周 昊 赖慎玮 李文波 闫小超 包建平

航宇救生装备有限公司, 湖北 襄阳 441003

[摘要]气囊具有体积小、重量轻、易于控制等优点,正在安装空间狭小的航空航天大型装备的减震隔震以及航空和军用物资空投着地缓冲领域得到广泛应用。本文针对如何形成一种计算效率高、收敛性好,适用于工程实际的密闭型气囊抗冲击效能仿真方法的业界难题,首先应用运动学理论、工程热力学原理及流体力学方程等理论建立起了多构型气囊的抗冲击数学模型;其次,通过典型工况的有限元仿真与物理试验对构建的气囊抗冲击数学模型进行了评价,结果表明数学模型具有较高的可信度;最后,采用 Qt+VS2010 实现了密闭型气囊抗冲击效能仿真平台的开发。本文的研究成果能够极大提升气囊类产品的正向设计能力并缩短研发周期,具有重要的实际应用价值。

[关键词]缓冲气囊;数值仿真;优化算法;仿真平台;缓冲性能

DOI: 10.64635/ja.2026.1279

中图分类号: V244

文献标识码: A

Research on a Simulation Method for the Impact Resistance Performance of Sealed Airbags

Zhou Hao, Lai Shenwei, Li Wenbo, Yan Xiaochao, Bao Jianping

Hangyu Life-Saving Equipment Co., Ltd., Xiangyang, Hubei 441003, China

Abstract: Airbags have the advantages of small size, light weight, and easy control, and are being widely applied in shock absorption and vibration isolation for large aerospace equipment with limited installation space, as well as in landing cushioning for the airdrop of aviation and military supplies. To address the industry challenge of developing a simulation method for the impact resistance performance of sealed airbags that offers high computational efficiency, good convergence, and suitability for practical engineering applications, this paper first establishes impact resistance mathematical models for airbags with multiple configurations based on kinematic theory, engineering thermodynamics, and fluid mechanics equations. Then, the established mathematical models are evaluated through finite element simulations and physical tests under typical operating conditions. The results show that the mathematical models have a high level of reliability. Finally, a simulation platform for the impact resistance performance of sealed airbags is developed using Qt and VS2010. The research findings can greatly enhance the forward design capability of airbag products and shorten the research and development cycle, demonstrating important practical application value.

Keywords: cushioning airbag; numerical simulation; optimization algorithm; simulation platform; cushioning performance

引言

气囊类产品由于其体积小、重量轻、缓冲性能好、易于控制,在非使用状态下便于折叠收起,使用状态时便于展开等优点被广泛应用于大型装备回收、充气式承载结构、着陆缓冲等抗冲击场景^[1]。自从上世纪 40 年代气囊缓冲技术的概念萌芽诞生以来,其一直是国内外学者的研究热点^[2,3]。Gregory J. Vassilakos 以“猎户座”载人飞船中的单个组合气囊为研究对象,完整再现了气囊的缓冲全过程^[4]。最早在上个世纪六七十年代有限元法开始被运用于气囊计算,1972 年 Nefske 最早采用了 CV (控制体积)

法进行气囊领域的研究;1988 年 Wang 和 Nefske 对 CV 法共同进行了改进,为 CV 法的应用奠定了理论基础,这一方法也被大多数研究人员采用沿用至今^[5]。Taylor A 系统研究了气囊初始压力对缓冲性能的影响,研究结果表明通过提高气囊初始压力可显著提高着陆缓冲气囊的适用性^[6]。方康寿聚焦于无人机气囊系统,研究了各气囊设计参数对缓震特性的影响^[7]。

综上所述,现在的气囊产品的典型设计主要依托于物理试验、有限元仿真计算和数值仿真方法。传统方法由于投入高、效率低和工程适用性不高等原因已难以适应航空

航天装备快速迭代的需求。因此,形成一套计算效率高、收敛性好且适应性高的抗冲击效能仿真评估方法,已经成为支撑囊类抗冲击产品的快速研发与正向设计的关键突破口^[8]。

本文针对如何快速、有效开展缓冲气囊研发与设计的业界难题,构建了计算工作量小、使用方便的密闭型气囊抗冲击效能数学模型,并使用有限元仿真和物理试验方法对数学模型进行了验证,在此基础上,开发了气囊抗冲击效能仿真平台。为缩短囊类产品研发周期、降低研发成本提供了关键支撑。

1 密闭型气囊缓震系统数学模型的建立

当受到某些冲击波的影响时,由于响应时间很短,若使用排气型气囊难以及时排出囊内气体以起到降低最大过载的目的,且密闭型气囊常用的全包裹式设计十分适用于减震系统。因此,本文的缓震系统中选用密闭型气囊。

对于密闭型气囊的缓冲减震过程,气囊的变化过程大致如下:

(1)在地震波等外部冲击作用下,约束体发生振动,上下气囊分别在模拟件相对约束体向上和向下运动时被压缩,通过气体的绝热压缩耗散冲击能量,既降低载荷传递率,又避免模拟件与约束体发生刚性接触,有效减小外部扰动对模拟件的损伤效应;

(2)模拟件在上下气囊的协同作用下运动状态逐渐衰减,待模拟件完全稳定后,气囊开始排气并恢复到贮存状态。

本文的气囊缓震系统中模拟件的受力示意图如图 1 所示。

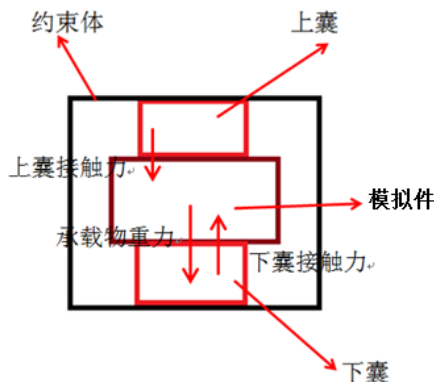


图 1 模拟件受力示意图

基于上述假设与分析,可以开展对缓震系统的数学建模研究。由两气囊压差所产生的对模拟件的作用力可以表示为:

$$F = (P_{\text{下}} - P_{\text{at}})A_{\text{下}} - (P_{\text{上}} - P_{\text{at}})A_{\text{上}} \quad (1)$$

其中, P_{at} 为标准大气压, $P_{\text{下}}$ 为下囊内压, $P_{\text{上}}$ 为上囊内压, $A_{\text{下}}$ 为下囊-模拟件间的接触面积, $A_{\text{上}}$ 为上囊-模拟件间的接触面积。

基于模拟件的受力情况,根据受力平衡方程与能量守恒定律,得到其运动方程:

$$F - Mg = Ma \quad (2)$$

其中, M 为模拟件的重量, g 为重力加速度, a 为模拟件的加速度。改写式 (2) 可得:

$$a = \frac{(P_{\text{下}} - P_{\text{at}})A_{\text{下}} - (P_{\text{上}} - P_{\text{at}})A_{\text{上}}}{M} - g \quad (3)$$

此时,气囊的形变仅在竖直方向上,且始终未排出气体,因此,囊内气体质量 m 保持不变。气体质量 m 可以表示为:

$$m = \rho_0 V_0 \quad (4)$$

囊内气体的密度可以表示为:

$$\rho = \frac{\rho_0 V_0}{V} \quad (5)$$

根据能量守恒定律,该缓震系统能量守恒,而模拟件的机械能和缓冲气囊内的气体内能存在转化关系,设初始时刻的位置为零势能位置,则某时刻模拟件的机械能 E 可以表示为:

$$E = \frac{1}{2} M \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 + Mgs \quad (6)$$

s 表示模拟件的位移,密闭型气囊内气体的总内能则可以表示为:

$$E' = E'_0 + E_0 - E \quad (7)$$

E'_0 是气体初始时刻总内能,可以表示为

$$E'_0 = me_0 = \frac{P_0 V_0}{(\gamma - 1)} \quad (8)$$

其中 e_0 是气体初始质量能, γ 是 Gamma 常数, e_0 可以表示为:

$$e_0 = \frac{P_0 V_0}{\rho_0 (\gamma - 1)} \quad (9)$$

由理想气体状态方程可得某时刻气囊内压 P :

$$P = \rho \left(\frac{E'_0 + E_0}{m} - \frac{1}{2} M a^2 - \frac{M}{m} gs \right) (\gamma - 1) \quad (10)$$

基于式 (3), (7) 和 (10) 可对各项参数进行联立求解,构建起密闭型气囊缓震系统的数学模型。

不同构型气囊的变形过程在数学建模中往往也需要进行不同的假设和分析,该数学模型适用于图 2 中 3 种典型构型的缓冲气囊,各构型参数的表征方式如下:

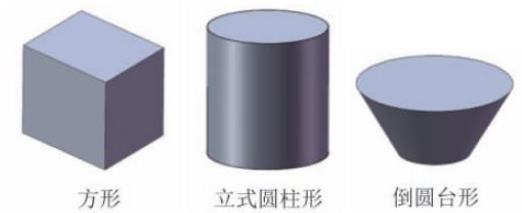


图 2 常用的几种缓冲气囊形状

(1) 方形气囊

对于方形气囊,在受压过程中,其不再是一个标准的方形,气囊侧壁会向外鼓出,截面近似为方形直段加四分之一圆弧,某时刻的气囊体积 V 在工程中常采用当量体积法求解,并引入修正系数 k (本文中 $k=0.8$),可以表示为:

$$V = L^2 h + k(V_0 - L^2 h) \quad (11)$$

L 为接触面方形直段长度, h 为某时刻气囊高度, V_0 为初始时刻的气囊体积。设鼓出弧线的曲率半径为 R , 某时刻的变形后截面积 A 为:

$$A = L^2 + \pi R^2 + 4LR \quad (12)$$

简化处理后,可以将 A 近似表达为:

$$A = L^2 + 2L(h_0 - h) \quad (13)$$

(2) 立式圆柱形气囊

在受压过程中,立式圆柱形气囊侧壁会向外鼓出,可近似认为是一个高为 h ,底面直径为 D 的等效扁圆柱且气囊体积不变,则:

$$\frac{\pi}{4} D^2 h = \frac{\pi}{4} D_0^2 h_0 \quad (14)$$

由此可以得到等效接触面直径为:

$$= D_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}} \quad (15)$$

接触面积 A 可以表示为:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (16)$$

(3) 倒圆台形气囊

假设气囊体积不变,气囊下表面与约束体接触,上表面与模拟件接触,下表面直径 D_{bottom} 可近似认为不变,气囊和模拟件接触面的等效直径 D_{free} 可以表示为:

$$D_{\text{free}} = D_{\text{bottom}} \sqrt{\frac{h_0}{h}} \quad (17)$$

h 为气囊某时刻的高度,对等效接触面直径 D_{top} 进行修正:

$$D_{\text{top}} = D_{\text{free}} \alpha \quad (18)$$

其中 α 为顶部鼓出放大系数,取值为:

$$\begin{cases} \frac{h}{h_0} > 0.6: \alpha = 1 \\ 0.3 < \frac{h}{h_0} < 0.6: \alpha = 1.1 \\ \frac{h}{h_0} < 0.3: \alpha = 1.2 \end{cases} \quad (19)$$

接触面积 A 可以表示为:

$$A = \frac{\pi}{4} D_{\text{top}}^2 \quad (20)$$

为形成数值仿真的计算程序,将缓震阶段离散化,并对于每个时间步长 Δt 前后两个时刻的缓冲状态建立数值递推关系。由递推关系基于 C++ 语言进行编程可以得到能够输出模拟件过载、模拟件速度、上下气囊囊压等参数随时间变化的曲线的数值仿真程序。

2 密闭型气囊缓震系统数学模型验证

本章将使用有限元仿真和物理试验验证相结合的方法对数学模型进行验证,具体验证流程如下:首先对典型工况下的密闭型气囊缓震系统进行数值仿真,得到关键动态参数时程响应曲线。其次,建立对应缓冲气囊的有限元模型,并进行仿真计算,本章使用的 LS-Dyna 软件是一款成熟的商用仿真软件,其在气囊仿真领域的计算效果已经得到业界的广泛认可。再次,对密闭型气囊缓震系统进行振动试验,得到真实情况下各关键参数随时间变化曲线。最后对数值仿真得到的各参数与有限元计算和试验数据进行关键指标对比,并引入均方根误差和确定系数进行相关性分析,验证缓冲气囊数学模型的正确性。

2.1 数值仿真方法在典型工况下的应用

某缓震系统结构如图 3 所示,上下工装被完全固定,是该缓震系统的约束体,上下气囊分别被上下工装所约束,模拟件被置于上下气囊之间。其中模拟件的质量为 70kg;上下气囊采用对称结构设计,与模拟件接触面为 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$ 的正方形,高度为 0.1m 。该项目中仅关注模拟件在竖直方向上的运动情况,因此第一章中形成的密闭型气囊缓震系统数值仿真程序中的方形缓冲气囊模块可用于评估该缓震系统的缓冲减震性能。

依据该项目中对缓震系统缓震性能的要求,在仿真的前 24ms 内对约束体施加如图 4 所示的过载,此后约束体位置保持不变。

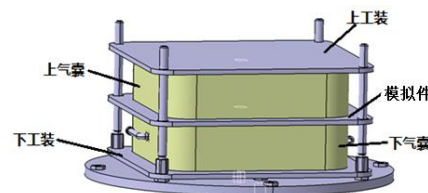


图 3 密闭型气囊缓震系统模型图

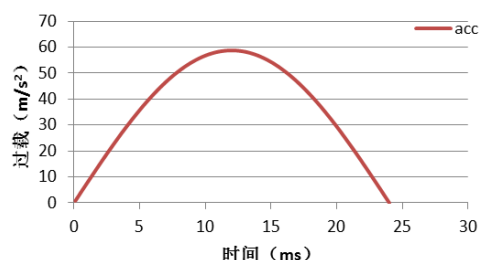


图 4 约束体加载曲线

总共设计了 5 组对比工况（见表 1），仿真方案包含多组气囊初始压力组合参数（上气囊初始压力 P_0 上与下气囊初始压力 P_0 下），各工况下模拟件的过载的数值计算结果如图 5 所示。

表 1 工况

工况	上气囊初始囊压 (kPa)	下气囊初始囊压 (kPa)
1	0.5	0.5
2	1	1
3	2	2
4	3	3
5	5	5

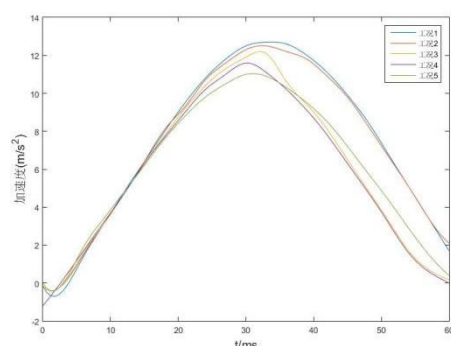


图 5 数值仿真模拟件过载

2.2 有限元仿真验证

针对密闭型气囊缓震系统，建立数学模型对应的有限元模型。该缓震系统选用上下两个密闭型气囊，通过气囊-模拟件-气囊的布置方式避免模拟件与约束体发生碰撞，其有限元模型如图 6 所示，约束体选用两个平面代替，上下气囊均为方形气囊，模拟件简化为质量均匀分布的立方体。

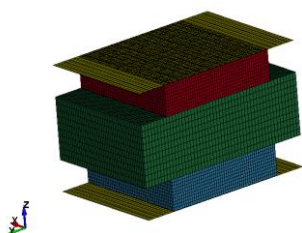
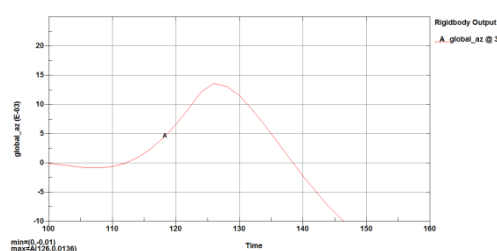
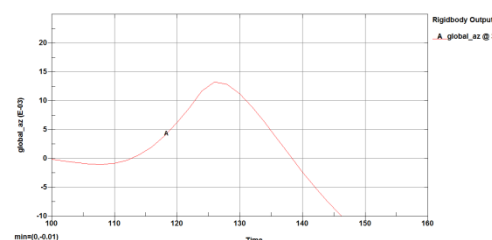


图 6 密闭型气囊缓震系统有限元模型

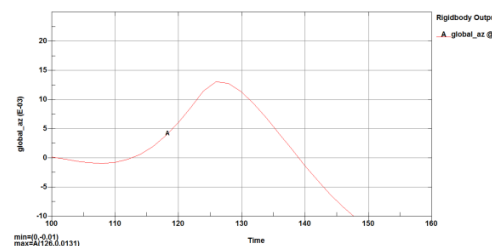
使用 LS-Dyna 求解器，对表 1 各工况下的缓震系统的缓冲减震过程进行仿真，各工况下模拟件的过载变化情况如图 7 所示。



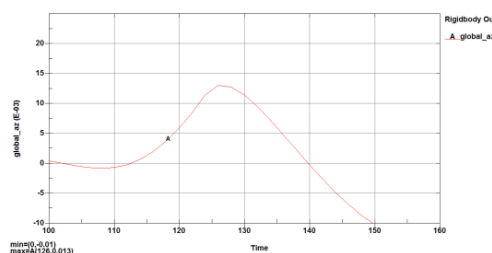
(a) 工况 1



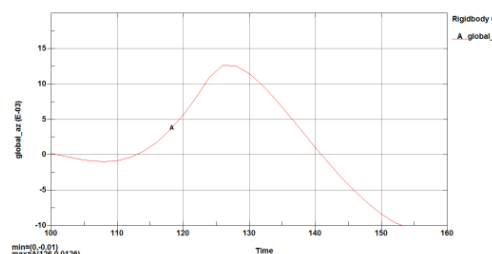
(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 4



(e) 工况 5

图 7 有限元仿真模拟件过载

2.3 物理试验验证

对密闭型气囊缓震系统开展振动试验，系统性评估其

动态缓冲性能。缓震系统结构如图 8 所示,其中对于模拟件的重量有较为严格的要求,选取一质量为 70kg 的钢板。本研究聚焦竖直方向缓冲性能分析,通过在约束装置与模拟件四角安装限位装置,有效约束系统水平方向自由度,确保实验数据的单向性特征。考虑到振动台传递到缓震系统上的过载与其本身过载可能存在差异,分别在振动台和下工装上安装传感器,若测得过载差距较大,则本次试验可判定为无效。除在图中模拟件上粘接的传感器外,在模拟件的对称位置也安装一传感器,若两传感器的测量曲线拟合度较好,则测得过载值即为真实值。

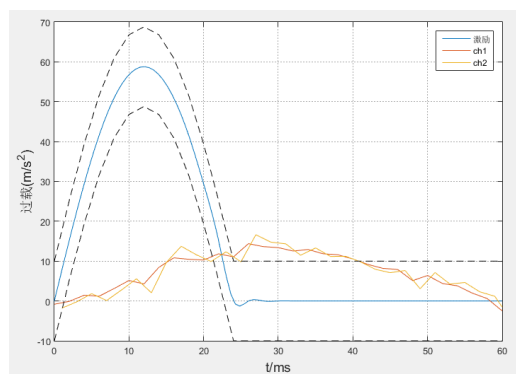


图 8 密闭型气囊缓震系统振动试验示意图

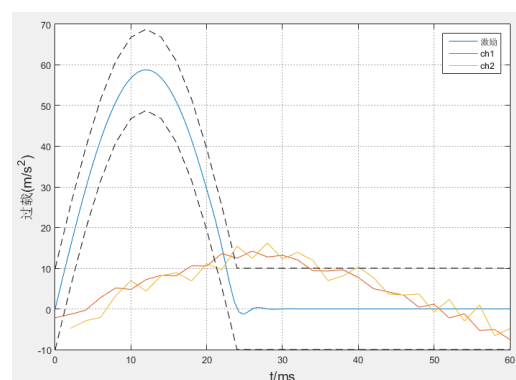


图 9 传感器安装示意图

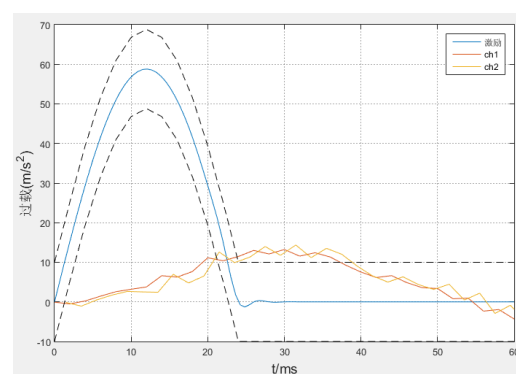
试验采用表 1 中的工况进行对比试验,通过传感器测得的不同工况下的试验结果如图 10 所示,其中 ch1 和 ch2 曲线为粘接在模拟件上两传感器的监测数据。



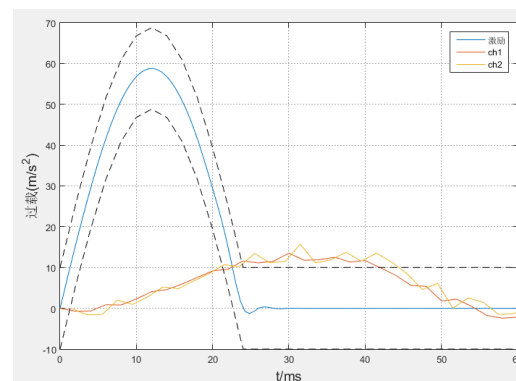
(a) 工况 1



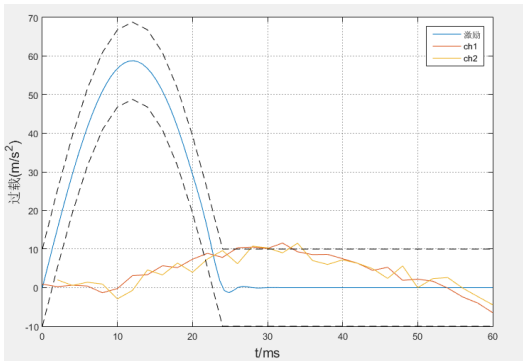
(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 4



(e) 工况 5

图 10 不同工况下模拟件过载

2.4 对比与分析

为验证缓冲气囊数学模型，开展数值仿真值与有限元仿真/物理试验结果的关键指标相对误差分析，并引入量化指标均方根误差（RMSE）和确定系数（ R^2 ）。其中， R^2 作为统计学中常用的衡量模型拟合度的指标，表示模型中可以解释的变异占总变异的百分比，越接近与 1 时表明模型拟合度越好；可以通过确认 RMSE 是否在工程/实验允许范围内进一步验证模型的拟合度，其评判标准通常取决于数据背景，将其与均值进行对比是常用的研究方法。具体验证原则如下：

- （1）关键指标相对误差 $\leq 10\%$ ；
- （2） $R \geq 0.8$ ；
- （3）RMSE/均值 $\leq 20\%$ 。

缓震系统的核心性能指标为降低被保护物的最大过载以确保其结构完整性，因此本节选取模拟件的最大过载为关键指标。从表 2 可以看出，对于模拟件最大过载，数值计算和有限元仿真的数据间相对误差最大为 9.52%；对于 R^2 ，各工况下的最小值为 0.814；对于 RMSE 与均值的比值，最大为 19.32%。

表 2 数值计算和有限元仿真对比

工况	1	2	3	4	5
有限元仿真模拟件最大过载（ m/s^2 ）	13.6	13.3	13.1	13	12.6
数值计算模拟件最大过载（ m/s^2 ）	12.7	12.5	12.1	11.8	11.4
相对误差	6.62%	6.02%	7.63%	9.23%	9.52%
RMSE（ m/s^2 ）	0.694	1.15	1.515	1.447	1.251
均值（ m/s^2 ）	7.96	7.93	7.84	7.73	7.69
RMSE/均值	8.71%	14.51%	19.32%	18.71%	16.32%
R^2	0.955	0.905	0.821	0.814	0.861

通过数值计算与试验结果对比分析，进一步验证气囊数学模型。对比结果如表 3 所示，对于模拟件最大过载，数值计算和试验数据间相对误差最大为 5.92%；对于 R^2 ，各工况下的最小值为 0.843；对于 RMSE 与均值的比值，最大为 17.31%。

表 3 数值计算和试验结果对比

工况	1	2	3	4	5
试验模拟件最大过载（ m/s^2 ）	13.43	13.24	12.42	12.33	11.62
数值计算模拟件最大过载（ m/s^2 ）	12.7	12.5	12.1	11.8	11.4
相对误差	5.74%	5.92%	2.56%	4.66%	1.93%
RMSE（ m/s^2 ）	1.215	0.955	1.013	1.330	1.001
均值（ m/s^2 ）	7.92	7.9	7.81	7.68	7.64
RMSE/均值	15.34%	12.08%	13.18%	17.31%	13.09%
R^2	0.866	0.917	0.897	0.843	0.911

从模拟件最大过载的对比情况可以看出，数值计算和有限元仿真/试验的数据间相对误差在各工况下均在 10% 之内，而 R 的计算结果均大于 0.8 且 RMSE 均小于均值的 20%，表明密闭型气囊缓震系统的数学模型有较高的可信度。

3 密闭型气囊抗冲击仿真平台开发

为工程人员使用该仿真方法更加便利，基于 Qt+VS2010 开发了密闭型气囊抗冲击仿真平台。该平台主要包括气囊选型模块和仿真模块两大模块。由选型模块可快捷选择进入各仿真模块。本章将选取方形气囊的仿真模块为例进行介绍。



图 11 仿真平台选择界面

密闭型气囊缓震系统数值仿真模块是针对密闭型气囊设计的专用仿真模块,模块需满足以下核心需求:①支持囊体各参数的独立输入与校验;②实现动力学方程的求解;③提供 5 条曲线的同步展示与联动交互;④自动计算并展示关键特征值。

结果展示区包含 5 条曲线与 2 个特征值文本框,创建 5 个 QCustomPlot 控件,分别展示各变量曲线,初始化时设置不同的曲线以区分;特征值展示:创建 2 个 QLineEdit 文本框(禁用编辑),接收到计算结果后,将最大过载、最大囊压格式化显示,模块界面如图 12 所示:



图 12 数值仿真模块界面

4 结论

1.本文基于热力学,系统动力学,气体动力学等构建了三种构型的密闭型气囊缓震系统的数学模型。基于该模型建立的计算程序可以实现被保护物运动学参数(速度、加速度等)及气囊内部压力的快速计算,为囊类产品的快速研发提供理论支撑。

2.将数值仿真值与成熟商业有限元软件 LS-Dyna 的仿真结果及物理试验的实测数据进行对比分析,从关键指标相对误差、均方根误差(RMSE)和确定系数(R^2)三个维度对缓冲气囊抗冲击数学模型进行验证。对比结果表

明本文提出的缓冲气囊数学模型有较高的可信度。

3.基于 Qt+VS2010 开发了气囊抗冲击效能仿真平台,相较于传统的仿真平台,既实现了仿真参数设置的可视化,又具备多构型缓冲气囊的仿真能力,为工程人员使用该仿真与优化平台提供了便利的同时又创新性地具备了多构型缓冲气囊的仿真能力。

[参考文献]

- [1]X Zhou, S M Zhou and D K Li. Optimal Design of Airbag Landing System without Rebound[J].IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2019,531:012001.
- [2]WARNER K E.Bags, buckles, and belts-the debate over mandatory passive restraints in automobiles[J]. Journal of Health Politics Policy and Law, 1983, 8(1): 44-75.
- [3]李令举,齐邓林. 汽车安全气囊概述和机械式气囊[J]. 汽车电器,1997(6):1-3.
- [4]Vassilakos G J,Stegall D E,Hardy R C,et al. Orion crew module landing system simulation and verification [C]//IEEE Aerospace Conference. IEEE Computer Society, 2011:1-23.
- [5]Wang J T, Nefske D J. A New CAL3D Airbag Inflation Model[J]. SAE Transactions,1988: 697-706.
- [6]Taylor A, Benney R, Bagdonovich B. Investigation of the application of airbag technology to provide a softlanding capability for military heavy airdrop[C]// 16th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. 2001.
- [7]方康寿.无人机回收气囊减震性能的有限元研究[D].浙江大学, 2008.
- [8]李良春,黄刚,李文生,等.基于 ANSYS/LS-DYNA 的新型着陆缓冲气囊仿真分析[J].包装工程,2012,33(15)5.