

某型飞机弹射座椅穿盖弹射试验与数值模拟

王一丁 童明波 闫家益 潘 雄

(南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室,南京,210016)

摘要:通过某型飞机弹射座椅穿盖弹射火箭滑车试验,研究了舱盖在穿盖弹射中的破裂形式。在试验研究的基础上,进行了数值模拟,利用 PCL 语言对 MSC.PATRAN 进行二次开发,实现参数化建模。采用非线性有限元方法,通过瞬态动力学软件 MSC.Dytran 仿真得到了人椅系统在穿盖出舱过程中的过载及舱盖的破裂效果,与试验数据对比吻合较好,验证了模型的准确性。在此基础上,以 VC 及 OpenCASCADE 为工具,开发了通用性的飞机座椅弹射仿真平台,该平台具有一定的工程应用价值。

关键词:动力学分析;穿盖弹射;参数化建模;二次开发

中图分类号:V215.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2013)03-0336-05

Test and Numerical Simulation of Through Canopy Ejection for Aircraft

Wang Yiding, Tong Mingbo, Yan Jiayi, Pan Xiong

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The rupture mode of canopy during through canopy ejection is discussed via rocket sled for an aircraft. Based on the investigation, numerical simulation is carried out. Parametric modeling is accomplished by secondary development of MSC.PATRAN using PCL. The overload of seat-man system and the rupture mode of canopy are simulated by MSC.Dytran, a general-purpose explicit nonlinear transient dynamic finite element code. The agreement between the simulation results and the test data proves the effectiveness of the simulation model. A general platform for analyzing and simulating the ejection process is developed by the use of VC and OpenCASCADS. The platform is helpful for the design and modification of aircraft canopy and ejection seat.

Key words: dynamics analysis; through canopy ejection; parametric modeling; secondary development

弹射座椅被称为飞行员的“生命之舟”,弹射通道安全快速地清除是飞行员弹射救生成功的关键。现阶段国内对于弹射救生研究主要依赖于试验^[1],文献[2-4]等对弹射过程中的冲击问题进行了分析研究。穿盖弹射是目前飞行员离机救生的主要方式,但是相关文献中针对穿盖弹射此类复杂冲击过程的研究还较少,因此,对这一问题的分析显得尤为必要。弹射救生中的穿盖问题属于非线性动力学范畴,此类冲击碰撞问题发生在毫秒量级,动载荷强、材料应变率高、位移变形大,涉及到冲击与碰撞动力学、弹塑性力学、粘弹性力学以及有限元等

多学科知识。数值仿真能在试验前对设计修改进行分析,对舱盖以及弹射座椅进行初步分析,从而大大节省研制费用,缩短研制周期。所以有必要在深入研究穿盖弹射试验和数值仿真的基础上,建立穿盖弹射试验与仿真平台对舱盖进行便捷的仿真分析,并能方便地处理与比较所得数据结果。

本文对某型飞机进行了穿盖弹射试验研究,采用 PCL 语言对 MSC.PATRAN 进行二次开发,实现参数化建模,对整个穿盖过程进行了数值模拟,将数值模拟结果与穿盖试验结果进行了对比,验证了分析模型的准确性,建立了飞机座椅弹射仿真平

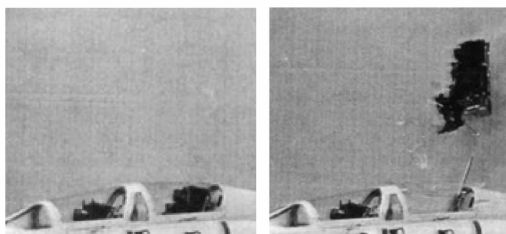
台,为舱盖及弹射座椅设计及改型提供参考。

1 火箭滑车试验

1.1 试验设备方法

火箭滑车试验是利用火箭发动机推动特制的滑车,沿地面滑轨高速运动以模拟飞行情况^[5]。火箭滑车是研究救生设备的重要试验装置,可以鉴定弹射救生系统的工作性能,评价各子系统的工作情况,同时能评价弹射救生是否满足生理耐限要求,还可以检验数学模型或计算机程序的正确性^[6]。

本文对某型飞机的前舱和后舱弹射座椅分别进行了两次穿盖弹射试验。试验是在装有模拟某型飞机前机身的火箭滑车上进行的“零-零”穿盖弹射试验,试验采用前、后椅分别单弹,单弹又按照先破盖后穿盖两个步骤进行。穿盖试验用燃爆机构击发破盖枪先破盖,之后检查舱盖破裂情况并拍照,然后用电打火机构击发弹射筒工作,完成座椅穿盖弹射。图1为现场拍摄的本文试验使用的火箭滑车照片。除了考察舱盖的破损情况外,穿盖生理指标也是试验的指标之一,通过相关的测试,可以得到试验中人/椅穿盖时的弹射最大过载、过载平均增长率、椅背动态响应指数(Dynamic response index, DRI)及最大角速度值,以此考察是否满足人体穿盖生理指标的要求。



(a) 座椅弹射前状态

(b) 座椅弹射后状态

图1 火箭滑车试验

1.2 试验结果

破盖枪试验结果如表1所示。由表1可知在

表1 现场记录的实际试验结果

试件编号	人椅系统质量/kg	破盖枪位置	破盖枪破盖情况
1	168	前舱	破盖面积约43 cm×31 cm,左右裂纹分别长约30,33.5 cm。
2	178.6	后舱	破盖面积约28 cm×23.5 cm,纵、横向裂纹分别长17,26 cm
3	178.6	前舱	破盖面积约25 cm×31 cm,纵、横向裂纹分别长31,19.4 cm
4	168	后舱	破盖面积约27.6 cm×23 cm,有3条裂纹,最长的约16 cm

“零-零”穿盖弹射试验中破盖枪破盖后舱盖的破裂情况,破盖枪在弹射座椅与舱盖透明件接触前工作,舱盖透明件产生初始裂纹,随后舱盖透明件被座椅穿盖器破坏,弹射通道障碍得以清除。

2 数值模拟

2.1 问题描述方程

弹射座椅穿盖弹射是发生在极短时间内复杂的瞬态冲击过程^[7]。在冲击的过程中,接触冲击系统必须遵循质量守恒、能量守恒和动量守恒以及初始条件和边界条件^[8]。采用Lagrange描述法,接触冲击系统的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程分别为

$${}^t\rho = J^0\rho \quad (1)$$

$${}^tS_{ij} - (p + q)'\delta_{ij} + {}^t\mathbf{b}_i = {}^t\rho'\mathbf{a}_i \quad (2)$$

$${}^t\mathbf{E} = {}^t\mathbf{V}'S_{ij}\epsilon_{ij} - (p + q)'\dot{\mathbf{V}} \quad (3)$$

式中: ${}^t\rho$ 和 ${}^0\rho$ 分别为 t 时刻与初始时刻的质量; J 为体积变化率; \mathbf{a}_i 为 t 时刻质点加速度的第 i 个分量; \mathbf{b} 为 t 时刻力向量的第 i 个分量; ϵ_{ij} , s_{ij} 代表应变率张量和偏应力张量; \mathbf{V} 和 \mathbf{E} 表示 t 时刻的体积与能量; p , q 分别代表压力与体积粘性阻力^[9]。

根据虚功原理,接触冲击系统的控制方程可表示为

$$\delta W_S - \delta W_R - \delta W_C - \delta W_I = 0 \quad (4)$$

式中,应力 δ 在虚应变场 δ_e 上所做的虚功 δW_S 可表示为

$$\delta W_S = \int_{\Omega} \delta \sigma_i d\Omega \quad (5)$$

外载荷、接触力和惯性力在虚位移场 δu 上所做的虚功分别为

$$\delta W_R = \int_{\Omega} {}^t\mathbf{b}_i \delta u_i d\Omega + \int_{\Gamma_f} \mathbf{q}_i \delta u_i dS \quad (6)$$

$$\delta W_C = \int_{\Gamma_c} {}^t\mathbf{q}_i (\delta u^2 - \delta u^1) \cdot {}^t\mathbf{N}_i^2 dS \quad (7)$$

$$\delta W_I = - \int_{\Omega} \rho' \mathbf{a}_i \delta u_i d\Omega \quad (8)$$

将式(5~8)代入式(4)并对其进行有限元离散化,可得

$$\mathbf{M}'\mathbf{A} + (\mathbf{K}_L + \mathbf{K}_N)\mathbf{U} = \mathbf{R}' + \mathbf{R}_C - \mathbf{F}' \quad (9)$$

式中: \mathbf{A} 为有限元节点在全局坐标系下的加速度; \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{K}_L 和 \mathbf{K}_N 分别表示线性刚度矩阵以及非线性刚度矩阵; \mathbf{U} 表示为节点的位移矩阵; \mathbf{R}' 和 \mathbf{F}' 为全局坐标系下外力和内力向量; \mathbf{R}_C 为接触冲击力向量。

2.2 模型建立

为了实现飞机座椅弹射仿真平台功能,穿盖弹

射有限元模型必须具备快速自动生成能力,从而减少由于座舱盖尺寸、人椅系统质量、弹射角度及弹射筒加载等参数变化而导致模型变化时人工建模所造成的效率降低。耦合解法可较好地用于穿盖弹射响应分析,故飞机座椅弹射仿真平台的分析方法采用耦合解法^[10]。根据工程实际需求,飞机座椅弹射仿真平台的有限元计算采用 MSC. DYTRAN 软件,通过 PCL 语言进行二次开发以实现参数化建模功能。在飞机座椅弹射仿真平台中导入试验件的几何模型、定义弹射筒加载、撞击角度、舱盖材料以及人椅系统质量等,平台自动启动 MSC. PATRAN 进行网格划分及边界条件的施加,驱动 MSC. DYTRAN 进行计算,实现整个过程的自动化处理。

进行有限元网格划分时,在满足网格的精度要求的前提下,必须考虑到网格的自动化快速划分。由于舱盖的长度和曲率远大于舱盖的厚度,因此舱盖采用四节点的壳单元来模拟。而座椅和破盖枪均为形状复杂几何体,固在划分单元时采用适应性好的四面体单元来模拟。舱盖网格由 3 198 个节点和 3 078 个单元组成,弹射座椅网格由 1 785 个节点和 6 059 个单元组成,破盖枪网格共由 249 个节点和 717 个单元组成。生成的网格模型如图 2~4 所示。

座舱有机玻璃属于聚合物材料^[11],本文在仿真时引入了材料屈服以及失效模型,采用分段线性弹塑性材料本构,舱盖的材料属性如表 2 所示。

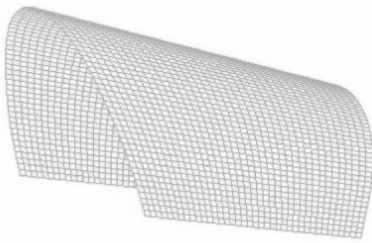


图 2 舱盖有限元模型

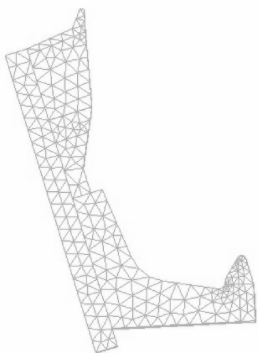


图 3 弹射座椅有限元网格

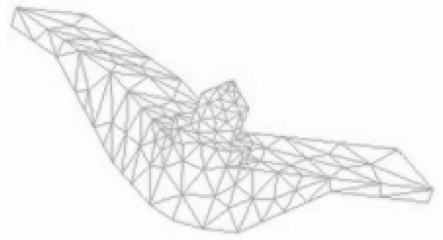


图 4 破盖枪有限元网格

表 2 舱盖材料特性

弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应 力/MPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	失效应变
3.15	0.35	70	1 190	0.067

弹射筒是座椅出舱前的主要动力,在进行穿盖弹射数值模拟时,必须考虑弹射筒加载情况,在工程运用中,认为导向装置的长度大于弹射筒的工作行程,弹射座椅在弹射筒工作期间没有转动,只沿着导向装置作直线加速运动。在数值模拟中选取试验测得的弹射筒性能作为载荷工况施加。弹射筒加载曲线如图 5 所示。

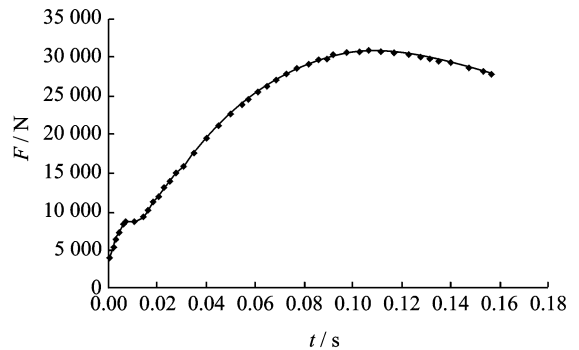


图 5 弹射筒加载曲线

2.3 数值模拟结果

2.3.1 舱盖破裂效果

数值模拟仿真时间为 200 ms,主要目的是评估舱盖玻璃破裂效果,为舱盖透明件优化设计提供依据。图 6 为破盖枪破盖后舱盖的破裂效果仿真结果与试验照片对比,图 7 为人椅系统完全出舱后舱盖最终破裂效果的仿真结果与试验照片对比。通过试验与仿真结果的对比可以看出,数值模拟得到的舱盖破裂效果与试验基本吻合,表明本文所采用的分段线性弹塑性材料本构和材料屈服以及失效模型能较好地反映穿盖弹射过程的冲击问题。图 8 是人椅系统出舱过程中 t 为 50, 100, 150 和 200 ms 时刻时舱盖破裂仿真图。可以看到人椅系

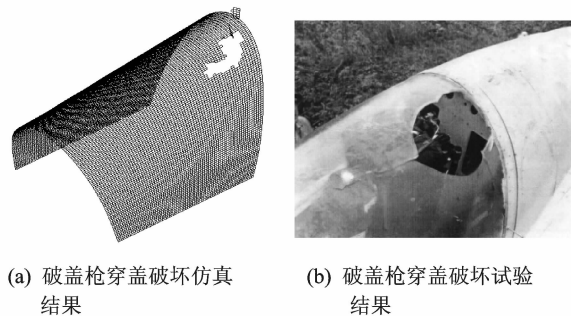


图 6 破盖枪破盖后舱盖仿真与试验对比图

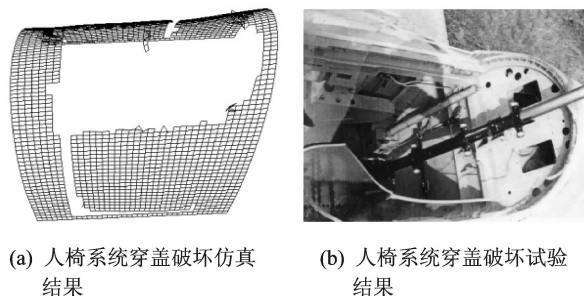


图 7 人椅系统出舱后舱盖仿真与试验对比图

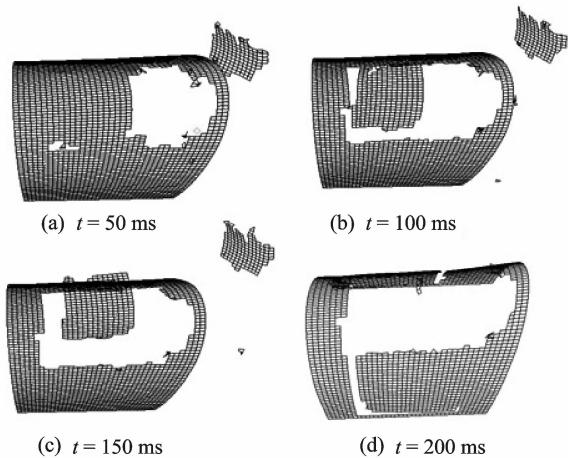


图 8 人椅系统穿盖过程中舱盖的破坏历程

统出舱过程中舱盖的破坏历程。

2.3.2 穿盖生理指标

穿盖生理指标是试验的重要指标,也是飞机座椅弹射仿真平台的模块之一。图 9 和图 10 为椅背过载和动态响应指数的数值模拟结果与试验结果对比图。图 9 和图 10 中,数值结果曲线和试验结果曲线形状相似,但是极值以及极值出现的时间与试验结果有所偏差,这主要是由于仿真与试验所使用的弹射筒加载有一定的差异。这些都表明:数值模拟能很好地评估穿盖弹射过程人体生理的动态

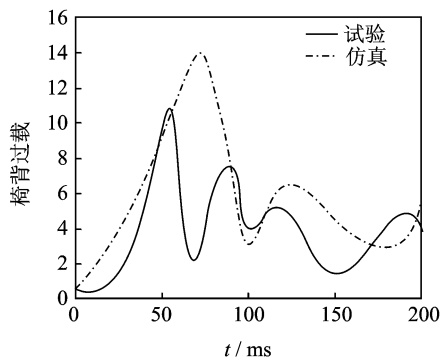


图 9 椅背过载试验与仿真对比

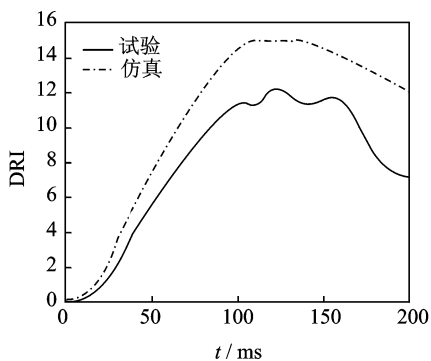


图 10 动态响应指数试验与仿真对比

特性,本文的分析模型具有较高的精确度。

3 飞机座椅弹射仿真平台

穿盖仿真试验平台的建立可以充分发挥穿盖弹射仿真分析模型的优点,在试验前能够对座舱盖以及弹射座椅进行初步设计,对设计修改进行初步仿真分析,大大节省研制费用,缩短研制周期^[12]。

该试验平台不需要设计者具有深厚的专业背景知识,只需输入人椅系统质量、速度、弹射角以及舱盖厚度、尺寸等参数,通过简单操作,就能实现穿盖弹射模拟仿真以及对数据的后处理。平台的系统架构如图 11 所示。

飞机座椅弹射仿真平台通过 VC 并结合 Open CASCADE 开发工具包实现。选择 MSC. PATRAN 和 MSC. DYTRAN 软件作为有限元分析工具;采用耦合算法作为穿盖弹射过程动态响应分析方法;使用 PCL 语言对 MSC. PATRAN 进行了二次开发。建立了试验数据后处理分析模块以及对应的相关数据库和系统支撑模块。计算分析舱盖玻璃破裂、临界出舱穿盖时作用在飞行员上的过载及 DRI。图 12 为仿真平台工作界面。

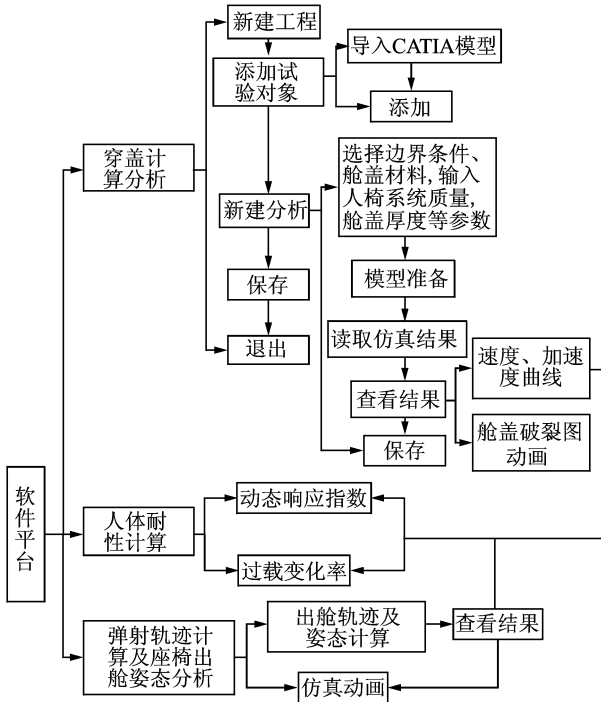


图 11 平台系统架构图

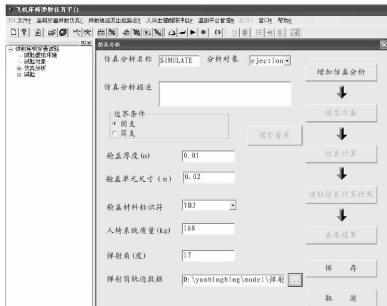


图 12 仿真平台工作界面

4 结束语

本文研究了某型飞机穿盖弹射试验与数值模拟。对比破盖枪破盖,人椅系统完全出舱后舱盖破裂效果以及椅背过载和动态响应指数的试验与仿真结果,两者吻合较好,验证了所建模型的准确性。在此基础上,建立了穿盖弹射试验平台,实现了参数化建模以及仿真结果的可视化,大大提高了舱盖及弹射救生系统设计效率。

参考文献:

[1] 王伟. 研究穿盖弹射的有效途径[J]. 飞机设计, 1995

(3):28-32.

[2] 王爱俊, 乔新, 厉蕾. 层合透明件材料抗冲击有限元数值模拟[J]. 工程力学, 1999, 16(5):58-64.

[3] 韩冰, 吴立言, 黄孝武. 弹射座椅冲击过程数值模拟方法[J]. 机械设计, 2007, 24(3):54-57.
Han Bing, Wu Liyan, Huang Xiaowu. Research on method of numerical value simulation for the impact process of ejection seat[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(3):54-57.

[4] 贺朝霞, 吴立言, 李艳敏. 弹射座椅的冲击动力学分析研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(3):201-204.
He Zhaoxia, Wu Liyan, Li Yanmin. Analysis and research about impact dynamic of ejection seat[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(3):201-204.

[5] Hegedus M C, Mendenhall M R. Engineering analysis for rocket sled aerodynamics[R]. AIAA 2006-664, 2006.

[6] 潘雄, 童明波, 王一丁. 穿盖弹射分析与虚拟仿真平台研究[J]. 航空计算技术, 2012, 42(1):107-114.
Pan Xiong, Tong Mingbo, Wang Yiding. Analysis of ejection through canopy and virtual simulation platform[J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(1):107-114.

[7] Dufour P B, McGillivray S R. Explicit dynamics simulation of ejection sequence and analysis of seat support structure for F-15 aircraft[R]. AIAA 2007-2213, 2007.

[8] 朱书华. 鸟撞飞机风挡挡响应分析与仿真试验平台研究[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2009.

[9] Bement L J. Explosive fracturing of an F-16 canopy for through-canopy crew egress[C]// The 38th Annual Safe Symposium. Reno, Nevada: [s. n.], 2000.

[10] Mccarty R E, Smith R A. Finite element analysis of through the canopy emergency crew escape from the T-38 aircraft[R]. AIAA 1982-0705, 1982.

[11] 张志林. 飞机座舱透明件设计理论及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2005.

[12] 余莉, 明晓, 张治华. 弹射座椅性能分析软件研制[J]. 南京理工大学学报, 2005, 29(1):13-16.
Yu Li, Ming Xiao, Zhang Zhihua. Development of performance analysis software for ejection seat system[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2005, 29(1):13-16.