

文章编号:1674-8190(2013)03-261-07

故障注入技术在飞行器非电系统中的应用进展

于琦, 万方义, 郭英男, 赵阳
(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 故障注入是一种基于试验的测评方法,是飞行器综合健康管理的重要组成部分,在提高飞行器的安全性方面具有重要作用。本文介绍了故障注入技术的基本原理,详细阐述了故障注入的各种实现方法在飞行器中的应用现状,重点分析了故障注入技术在飞行器结构、防热、液压、机械等非电系统应用中的关键技术以及存在的技术难点,并展望了该领域的发展。

关键词: 飞行器;故障注入;健康管理;非电系统

中图分类号: V267

文献标识码: A

Application of Faults Injection Technologies for Aircraft Non-electronic System

Yu Qi, Wan Fangyi, Guo Yingnan, Zhao Yang

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Faults injection technologies, which are important component of integrated vehicle health management (IVHM) system and can be used to estimate the safety status of vehicles by lots of experiments, are being paid more and more attention. Based on the principle of faults injection, several methods of faults injection and their applications in aircraft are described in detail. For different systems or subsystems of aircraft, the key-point of different faults injection technologies have been discussed. Especially, for non-electronic system, including the structure system, thermal-protection, hydraulic and mechanical system, there are some particular technologies and updated promotions which may make the system health management more easy and convenient. All the investigation on faults injection technologies will be useful to the IVHM system and its implement.

Key words: aircraft; fault injection; health management; non-electronic system

0 引言

随着航空航天技术的发展,飞行器的安全性与可用性以及飞行器后勤保障体系的高效性与经济性成为日益突出的问题。美国联邦航空局(FAA)和国家运输安全委员会(NTSB)的统计数据表明,全世界的飞行事故约有24%是由飞行器子系统和部件的故障引起,26%是由飞行失控引起,而大部

分飞行失控是由硬件和系统的故障引起的^[1]。

飞行器在寿命周期内,承受复杂的载荷,并且受到腐蚀、磨损、老化、疲劳、意外损伤等因素的影响,各个系统或构件均可能出现故障。设计人员需要了解飞行器在各种故障状态下的响应,以便对飞行器的安全性、可用性、容错能力等性能指标进行分析和评估,为改进或优化设计提供依据。因此,需要采用故障注入技术,人为地将故障注入目标系统,并对目标系统在注入故障后的响应进行监测、记录和分析。

故障注入作为一种基于试验的测评方法,最早是在20世纪70年代初期提出的,目的是针对程序的可靠性进行评估。之后便得到了迅速地发展,广

收稿日期:2013-03-04; 修回日期:2013-04-22

基金项目:国家自然科学基金(10402035)

西北工业大学基础基金(JC201216)

通信作者:于琦,physics2009@yahoo.cn

泛应用于软件系统和大规模集成电路的容错性能验证^[2]。随着故障注入理论的完善和故障注入具体实现方法的改进,故障注入技术的应用逐渐从软件系统、电路系统等电子系统向结构系统、防热系统、液压系统和机械系统等非电系统方面拓展,在航空航天领域的应用研究也越来越广泛,是飞行器健康管理验证试验中的重要环节。

本文介绍故障注入技术的基本原理和应用现状,并分析其在非电系统应用中的关键技术和难点,同时展望了该领域的发展。

1 故障注入技术及其应用现状

故障注入是指按照选定的故障模型,通过人为的方式向目标系统中引入故障,以加速该系统的错误和失效的发生,同时观测并记录系统对所注入故障的响应信息,最后通过结果分析对系统进行验证和评价^[2]。

在目标系统中,一个实际故障的发生通常需要复杂的环境或经历较长的时间。采用故障注入技术就是采用虚拟的技术,给目标系统注入特定的故障模式,在较短时间内获得足够的信息,从而大大缩短研究所需的时间和费用。

故障注入的基本原理如图1所示,故障注入试验包括选择故障模型、执行故障注入、监视系统行为和分析试验结果这四个主要环节。典型的故障注入系统结构通常由故障注入控制器、故障注入器、故障模式库、目标系统、监测收集器和数据分析器六部分组成^[3]。

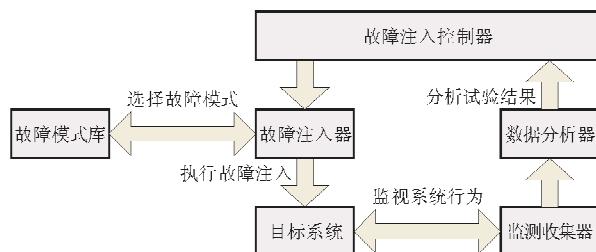


图1 故障注入的基本原理图

Fig.1 Principle of faults injection

故障注入的实现方法有很多种,可分为基于原型的方法和基于模拟的方法两类^[4],基于原型的方法又可分为基于硬件的方法和基于软件的方法。

在实际应用中,故障注入方法的选择取决于目标系统的具体情况以及故障注入试验的具体要求。

电子产品的工作以电信号的传输作为基础,其故障大多表现为电信号的非正常变化,因此可以通过外界影响电子产品内部电信号,直接实现故障注入。而非电产品与电子产品不同,其故障主要是某些物理、化学因素引起系统参数的变化,因而故障注入的实现方法也不同。

故障注入技术在电子产品中应用较早,发展较成熟,广泛应用于机载、箭载、星载计算机以及航空电子电路系统等电子产品中。产品模型的故障注入方法主要是通过仿真软件进行模拟^[5-6]。对于电子产品成品,可以采用特殊的硬件设备直接向目标系统注入故障^[7],采用外部干扰源对目标系统产生影响^[8],或通过代码突变、数据突变等手段来模拟故障的发生^[9]。

对于飞行器而言,非电系统(如结构、防热、液压或机械等子系统)的故障概率可能没有某些电子产品频繁,但其故障的危害程度尤为严重。随着飞行器技术的发展,其非电系统的健康管理逐渐成为关注的重点。

对于飞行器非电系统,其故障模式大多数是硬件故障,如结构破损、液压泄露、防热冲击缝隙、机械疲劳等。非电产品的故障注入技术,不能简单地归类为硬件注入或者软件注入,需要针对不同对象的具体故障分别进行。

2 飞行器结构系统的故障注入

基于结构试验,人为地引入故障,可以衍生出适用于结构系统的故障注入方法。其主要技术难点在于模型相似和故障等效的问题,尚未得以广泛应用;另外,利用有限元软件对飞行器结构系统的故障进行建模,可以方便地进行故障注入试验,并可与控制软件进行集成,实现故障注入自动化。

2.1 结构系统的模型相似

对于飞行器这类大型的、复杂的系统,采用缩比模型进行故障注入试验可以大大减少开销,但是需要解决模型相似的问题。

在实际设计与制造缩比模型时,如果采用与真

实模型完全相同的材料和完全相似的几何外形,存在两个问题:一是,为了结构减重,在飞行器结构中广泛采用了薄壁结构,制造薄壁结构的缩比模型,使所用的材料和制造工艺都面临极大的挑战^[10];二是,相似问题不等于简单的几何相似,还需保证质量特性和刚度特性等相似条件得以满足^[11],相似条件通常由 Buckingham Pi 定理分析得到,然而严格满足所有的相似条件是不现实的。

为了解决上述问题,缩比模型试验通常采用近似相似模型进行分析,然后采用适当的方法进行修正^[12-13]。近似相似模型只要求满足对所研究问题影响最大的几个相似条件。朱彤^[11]归纳了结构动力模型试验的近似相似方法,研究结构自振频率与振动模态等振动特性时,主要保持惯性力与弹性恢复力的相似条件,研究结构动力响应时,还应保持外力的相似条件。邓魁英^[10]介绍了等效梁或等效壳的近似相似模型,只保证在质量特性和刚度特性方面满足相似关系,而对几何形状和所用材料没有要求。

2.2 结构系统故障的等效

飞行器结构系统常见的故障包括腐蚀、裂纹、断裂失效等。腐蚀是由非常缓慢的化学反应形成的,具体的腐蚀过程难以控制,常用的结构腐蚀试验是在试验室条件下模拟飞行器所处环境,进行加速腐蚀试验从而缩短腐蚀历程,但试验周期仍将持续若干天,而且对试验设备的要求也很高^[14]。结构腐蚀以及裂纹、断裂失效等故障不仅引起构件尺寸的变化,还造成材料的强度、刚度、稳定性等力学性能的变化^[15],从而改变结构受载后的响应。故障等效就是找到各种故障对结构参数的影响关系,并将结构参数的变化等效为外部载荷的变化,产生与故障状态相同的响应。国内外对于故障状态下的结构刚度及稳定性等力学性能参数进行了研究,并提出了一些计算模型^[15-16]。但这些计算模型多数是针对某一具体的结构而提出的。另外,关于故障等效实现方法的研究很少,这一难题未能解决,使基于物理的结构系统故障注入方法未能得到广泛应用。

2.3 基于有限元模型的故障注入

有限元软件已被广泛应用于飞行器结构系统的故障仿真,也可以实现故障注入。对故障模式进行建模,将故障的影响引入有限元模型中,即可实现模拟故障的注入,利用有限元软件仿真目标系统的故障响应,可实现系统行为的监测。

国内在结构系统故障的有限元建模方面进行了较多的研究,多数是将实际的故障进行简化并通过修改有限元模型参数来进行模拟。吴云^[17]对某机翼结构故障状态下的瞬态响应进行了仿真,在有限元模型中,将一部分蒙皮去除可以模拟蒙皮破损故障,去掉接头节点处的约束可以模拟接头断裂失效故障,将部分单元弹性模量减小可以模拟翼梁腹板性能退化故障。江君^[18]建立了含各类裂纹的转子系统有限元模型,计算并统一了各类裂纹转子单元的刚度矩阵。徐强等^[19]建立了坑点腐蚀的力学模型,对坑点腐蚀壳体腐蚀层进行了力学等效,导出了坑点腐蚀壳体单元的刚度矩阵和等效结点载荷。

2.4 结构系统故障注入自动化

故障注入自动化的概念最早是针对电子设备系统的故障注入提出的,石君友等^[20]通过单片机控制电磁继电器,从而控制电路中开关通断与切换,进而实现了故障的自动注入和自动撤销,整个过程由控制软件进行控制。

类似的方法也可以应用于飞行器结构系统的故障注入试验,开发一套故障注入控制软件,实现故障模型的选择、故障注入的执行、系统行为的监视和试验结果的分析。一种针对飞行器结构系统的自动化故障注入试验设备框图如图2所示。

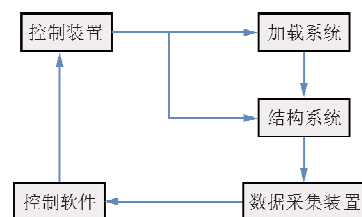


图2 飞行器结构系统自动化故障注入试验设备框图

Fig. 2 Process of automatic faults injection for aircraft structure system

对基于物理的结构系统故障注入而言,实现自动化的关键在于如何由控制软件控制故障的位置、类型、时间特性等属性,并注入到目标系统中。通过故障注入控制软件及控制装置产生相应的控制信号,对加载大小进行控制,从而模拟目标系统受到的载荷发生变化。但上述方法局限于突风、鸟撞、起落架撞击等载荷故障的注入试验,对于结构系统自身的腐蚀、磨损、裂纹、断裂失效、塑性变形等故障,如何解决故障等效问题并由控制装置对故障的注入与撤销进行控制,需做进一步的研究。

基于有限元软件,开发一套外围控制程序,用来自动控制、修改有限元模型、调用有限元求解器,可以非常方便地实现自动化故障注入。其主要流程如图 3 所示。

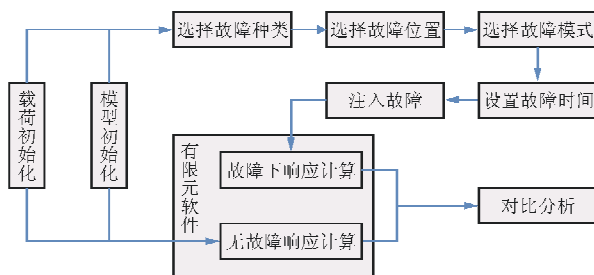


图 3 调用有限元软件的自动化故障注入流程

Fig. 3 Process of the automatic faults injection based on FEA model

利用有限元软件进行故障注入,实现自动化的关键在于有限元软件的自动调用。关于自动调用有限元软件的故障注入方法尚未见报道,但目前主要的有限元软件与程序开发工具的接口技术已经广泛应用于各种专用分析软件的开发^[21-22]。

3 飞行器防热系统的故障注入

对于飞行器防热系统而言,其故障的表现形式与结构系统类似,主要体现在对系统热学性能和热响应的影响。因此,防热系统故障注入的实现方法以及技术难点都与结构系统故障注入类似。

高超音速飞行器防热系统的地面模拟试验广泛采用辐射模拟法,即根据飞行器所处的气动条件计算热载荷,控制石英灯加热器对试件进行辐射加热^[23]。借助于气动加热试验方法,人为地向目标系统中引入故障,可以实现防热系统的故障注入。

3.1 防热系统的模型相似与故障等效

与结构系统类似,基于物理的防热系统故障注入主要技术难题仍然是模型相似与故障等效问题。其试验模型和热载荷需满足传热学相似准则。另外,还要将故障状态下系统热学性能的变化等效为热载荷的变化,产生与故障状态相同的热响应。对于该类问题的研究,目前国内的报道很少。

3.2 防热系统的故障注入控制

防热系统的故障注入是通过石英灯辐射来模拟气动加热对飞行器的加热量,改变试验模型的参数来模拟故障状态,然后测量结构在故障状态下的热响应。故障注入的控制系统结构如图 4 所示。

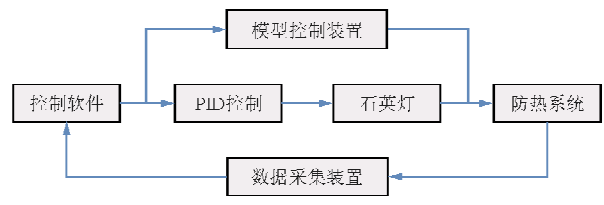


图 4 飞行器防热系统故障注入控制方法

Fig. 4 Control method of fault injection for aircraft thermal protection system

控制软件对加热系统和试验模型进行控制。在加热系统控制方面,主要根据气动加热量估算值,控制石英灯加热器的功率。估算气动加热量的理论和经验方法已经比较成熟,只需根据不同的飞行状态和结构形式,选择合适的近似计算方法^[24]。由于控制对象的非线性特征,采用常规 PID 控制系统的控制效果并不理想。张伟等^[25]做了大量的理论分析和试验研究,提出了非线性 PID 控制器的设计方法,改善了控制效果。PID 控制器与石英灯、数据采集装置、控制软件等组成闭环加热控制系统。目前主要的控制方式有温度程序控制和热流程序控制。温度程序控制采用气动加热计算得到的结构壁面温度作为热载荷条件,实测的表面温度作为控制反馈;热流程序控制采用气动加热计算得到的热流密度作为热载荷条件,实测的热流密度作为控制反馈^[24]。在试验模型控制方面,如何改变试验模型的参数以模拟故障状态,并由控制装置进行控制,需要做进一步的研究。

3.3 基于有限元模型的故障注入

隔热系统的故障主要影响系统的热力学响应,因此可以用有限元软件对系统的故障响应进行仿真。在飞行器隔热系统中,常见的故障包括撞击损伤、隔热瓦脱落、表面涂层破坏等。与结构系统的故障建模类似,对实际的故障进行简化并体现在有限元模型中。崔旭辉^[26]和张茂^[27]对隔热瓦损伤故障的热响应进行了仿真计算,在隔热瓦有限元模型中,撞击损伤和隔热瓦脱落的模拟是将损伤区域对应的部分去除,隔热瓦表面涂层破坏可用破坏区域单元的黑度折减来模拟。

4 飞行器液压、机械系统的故障注入

对于飞行器结构、隔热系统,可以提取故障特征信息,用故障等效的方法实现基于物理的故障注入。而液压、机械系统的复杂性和故障模式的多样性更加突出,非线性现象更加明显,故障的特征信息不易提取,同时故障的不可预知性也使得故障注入试验存在较大的安全隐患,因此对液压、机械系统采用基于物理的故障注入比较困难。

随着计算机仿真技术的发展,特别是 AMESim、Matlab/Simulink、MSC. ADAMS 等仿真软件的广泛应用,基于软件仿真的故障注入方法在液压、机械系统故障研究领域也逐渐得到应用,并且体现出很大的优越性^[28-29]。

利用仿真软件对液压、机械系统进行故障注入,核心问题是系统建模和故障建模。李霏霞等^[30]针对某飞机的舵机进行建模和仿真,通过修改模型的方式模拟了负载扰动、舵面卡死等故障。P. Evans 等^[31]对某起落架建模仿真,将减震器等效为弹簧和阻尼器系统,将轮胎简化为弹簧系统,通过改变模型参数来模拟各种故障状态。

5 结束语

故障注入技术在飞行器中已经得到部分的应用,为飞行器的安全性和可用性的分析和评估提供了依据。

本文将故障注入技术应用领域划分为电子产品和非电产品,重点介绍了故障注入技术在非电产

品中的研究现状,并分析了存在的技术难点。在非电系统中,基于模拟的故障注入可以与控制软件进行集成,实现自动化故障注入,大大提高故障注入的效率,而基于物理的故障注入还有待更深入地研究。针对飞行器非电系统故障注入技术的发展需求,重点突破关键技术难点,可以促进该技术的发展与应用。

参考文献

- [1] 常琦,袁慎芳. 飞行器综合健康管理(IVHM)系统技术现状及发展[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2652-2657.
Chang Qi, Yuan Shenfang. Overview of integrated vehicle health management (IVHM) technology and development [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(11): 2652-2657. (in Chinese)
- [2] 靳昂,江建慧. 故障注入技术及其应用[J]. 中国计算机学会通讯, 2007, 3(7): 19-28.
Jin Ang, Jiang Jianhui. Fault injection technique and its application [J]. Communications of the CCF, 2007, 3(7): 19-28. (in Chinese)
- [3] 彭俊杰,黄庆成,洪炳熔. 一种用于星载系统可靠性评测的软件故障注入工具[J]. 宇航学报, 2005, 26(6): 823-827.
Peng Junjie, Huang Qingcheng, Hong Bingrong. A principle frame work for the research of fault injection [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(6): 823-827. (in Chinese)
- [4] Ningfang Song, Jiaomei Qin, Xiong Pan, et al. Fault injection methodology and tools [C] // 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics, Dalian; Institute of Electrical and Electronics Engineers. Inc, 2011: 47-51.
- [5] 涂志均. 模拟电路故障仿真与诊断平台研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 2011.
Tu Zhijun. Development of fault simulation and diagnosis platform for analog circuit [D]. Harbin; School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [6] 刘小雄. 高空长航时无人机飞行控制计算机系统冗余设计技术研究[D]. 西安: 西北工业大学自动化学院, 2004.
Liu Xiaoxiong. Study of redundancy design technology for flight control computer systems of HALE UAVs [D]. Xi'an; School of Automation, Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)
- [7] 李璇君. 航空发动机数字控制器与航空电子综合系统 BIT 技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学能源与动力学院, 2001.
Li Xuanjun. Research of BIT technology for aero-engine digital controller and integrated system of avionics [D]. Nanjing; College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001. (in

- Chinese)
- [8] Arlat J, Crouzet Y, Karlsson J, et al. Comparison of physical and software-implemented fault injection techniques[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2003, 52(9): 1115-1133.
- [9] 曹军明, 佟明明. 基于软件的新一代空空导弹系统故障注入技术研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(9): 377-379.
Cao Junming, Tong Mingming. Research of fault injection for new generation airborne missile system based on software[J]. *Computer Engineering and Application*, 2010, 46(9): 377-379. (in Chinese)
- [10] 邓魁英, 王毅. 火箭动特性的缩比模型及建模分析[J]. *导弹与航天运载技术*, 2003(3): 6-12.
Deng Kuiying, Wang Yi. Studies on the scaled model and mathematical model for the overall dynamic characteristics of launch vehicle[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2003(3): 6-12. (in Chinese)
- [11] 朱彤. 结构动力模型相似问题及结构动力试验技术研究[D]. 大连: 大连理工大学建设工程学部, 2004.
Zhu Tong. The research on similitude problem of structural dynamic models and technology of structural dynamic tests [D]. Dalian: Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [12] 张振华, 汪玉. 舰艇结构在水下爆炸冲击作用下损伤响应的相似问题研究框架及其工程应用[J]. *海军工程大学学报*, 2010, 22(6): 78-82.
Zhang Zhenhua, Wang Yu. Analysis of scaling method of warship subjected to undex[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2010, 22(6): 78-82. (in Chinese)
- [13] 李辉, 丁桦. 结构动力模型修正方法研究进展[J]. *力学进展*, 2005, 35(2): 170-180.
Li Hui, Ding Ye. Progress in model updating for structural dynamics[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(2): 170-180. (in Chinese)
- [14] 孙祚东. 军用飞机典型铝合金结构腐蚀损伤规律及加速腐蚀试验方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学机电工程学院, 2005.
Sun Zuodong. Study on corrosion damage of the typical aluminum alloy of air force plane and the test of accelerated corrosion[D]. Harbin: School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, 2005. (in Chinese)
- [15] 赵婷婷. 腐蚀钢结构受弯构件刚度及稳定性退化模型分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2010.
Zhao Tingting. The analysis for the corroded steel structure stiffness and stability model[D]. Xi'an: School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese)
- [16] 张泰峰, 杨晓华, 张勇. 多种损伤影响下正交层合板刚度退化研究[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(2): 25-28, 41.
Zhang Taifeng, Yang Xiaohua, Zhang Yong. Research on stiffness reduction of cross-ply laminate after multi-damages [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2011, 8(2): 25-28, 41. (in Chinese)
- [17] 吴云. 基于瞬态激励的机翼结构健康监测技术研究[D]. 西安: 西北工业大学航空学院, 2012.
Wu Yun. Study on health monitoring technology for wing structure with transient excitation[D]. Xi'an: School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, 2012. (in Chinese)
- [18] 江君. 基于有限元的裂纹转子动力学特性研究[D]. 上海: 华东理工大学机械与动力学院, 2011.
Jiang Jun. Study on dynamic behaviors of a rotor system with cracks on the shaft based on finite element method [D]. Shanghai: School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [19] 徐强, 万正权. 含坑点腐蚀的壳体有限元方法[J]. *船舶力学*, 2010, 14(1): 84-93.
Xu Qiang, Wan Zhengquan. Finite element method of pitting corrosive shell[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2010, 14(1): 84-93. (in Chinese)
- [20] 石君友, 李郑, 刘骧, 等. 自动控制故障注入设备的设计与实现[J]. *航空学报*, 2007, 28(3): 556-560.
Shi Junyou, Li Zheng, Liu Liu, et al. Design and implementation of automatic control fault insertion equipment [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(3): 556-560. (in Chinese)
- [21] 周晴. 发动机测试探针振动特性有限元分析系统的研究与开发[D]. 成都: 电子科技大学机械电子工程学院, 2010.
Zhou Qing. Study and development of FEA system for vibration character of the aero-engine testing probes [D]. Chengdu: School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [22] 沈永伟. 整星隔振平台动力学仿真及软件设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学飞行器动力学与控制研究所, 2010.
Shen Yongwei. The dynamics simulation and software design for the whole-spacecraft vibration isolation platform [D]. Harbin: Spacecraft Dynamics and Control Institute, Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [23] Daryabeigi K, Knutson J R, Sikora J G. Thermal vacuum facility for testing thermal protection systems[R]. NASA TM-2002-211734, 2002.
- [24] 王智勇. 飞行器气动加热环境与结构响应耦合的热结构试验方法[J]. *强度与环境*, 2006, 33(4): 59-63.
Wang Zhiyong. Thermo-structural experiment coupling of aero-heating environment and structural response of aircraft[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2006, 33(4): 59-63. (in Chinese)
- [25] 张伟, 王乐善, 王梦魁, 等. 气动加热模拟试验加热系统控制研究[J]. *强度与环境*, 2005, 32(3): 45-52, 58.
Zhang Wei, Wang Leshan, Wang Mengkui, et al. Research

- on control of heating system for aerodynamic heating simulation test [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2005, 32(3): 45-52, 58. (in Chinese)
- [26] 崔旭辉. 金属防热系统健康管理技术研究[D]. 西安: 西北工业大学航空学院, 2012.
Cui Xuhui. Research on health management technology for metallic thermal protection system[D]. Xi'an: School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, 2012. (in Chinese)
- [27] 张茂. 重复使用跨大气层飞行器防热系统健康监控技术研究[D]. 西安: 西北工业大学航空学院, 2006.
Zhang Mao. Health monitoring of thermal protection systems on reusable launch vehicles[D]. Xi'an: School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [28] 李伟, 马吉胜, 吴大林. 机械系统虚拟样机故障仿真技术研究[J]. *计算机工程与设计*, 2011, 32(5): 1759-1761, 1799.
Li Wei, Ma Jisheng, Wu Dalin. VP-based fault simulation technique research for mechanical system[J]. *Computer Engineering and Design*, 2011, 32(5): 1759-1761, 1799. (in Chinese)
- [29] 汪宇亮. 基于 AMESim 的工程机械液压系统故障仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学机电工程学院, 2012.
Wang Yuliang. Research on engineering mechanical hydraulic system fault simulation study based on AMESim[D]. Wuhan: School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [30] 李霏霞, 曾声奎, 马纪明, 等. AMESim 与 Simulink 联合仿真在舵机可靠性研究中的应用[C]//2008 系统仿真技术及其应用学术会议论文集, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 490-493.
Li Feixia, Zeng Shengkui, Ma Jiming, et al. The application of joint simulation based on AMESim and Simulink in reliability study of the actuator[C]//2008 International Conference on System Simulation Technology and Application, Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008: 490-493. (in Chinese)
- [31] Evans P, Perhinschi M G, Mullins S. Modeling and simulation of a tricycle landing gear at normal and abnormal conditions[R]. AIAA-2010-7618, 2010.

作者简介:

于琦(1990—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器故障预测与健康管理。

万方义(1973—),男,博士,副教授。主要研究方向:飞行器设计、飞行器健康管理。

郭英男(1975—),男,博士。主要研究方向:飞行器总体与结构设计。

赵阳(1988—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器故障预测与健康管理。

(编辑:赵毓梅)