

基于离心机平台的复合环境试验系统综述

欧峰, 陈颖, 陈洪, 牛宝良

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了能够更好地模拟以加速度为基础的复合试验环境, 系统总结了离心-冲击、离心-振动、离心-温度、离心-气动等四种以离心机为平台的复合环境试验技术在国内外的研究进展, 并重点介绍了其中具有代表性的试验设备的技术特点、复合原理及试验能力, 并对以离心机为平台的复合环境试验的未来发展趋势进行了总结和展望。

关键词: 离心机; 复合环境试验; 复合效应

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.05.004

中图分类号: TJ05; V416 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)05-0028-06

Review of the Compound Environment Test System Based on Centrifuge Platform

OU Feng, CHEN Ying, CHEN Hong, NIU Bao-liang

(Institute of Systems Mechanics, CAEP, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: In order to simulate the compound test environment based on acceleration, this paper summarized the research progress of four types of compound environment tests based on centrifuge as the platform, including acceleration-impacting test, acceleration-vibration test, acceleration-temperature test and acceleration-aerodynamic test. This paper also introduced the technical characteristics, compound principle and test capabilities of some typical experimental equipment. The future development trend for compound environment test based on centrifuge was also discussed in this paper.

KEY WORDS: centrifuge; compound environment test; compound effect

航空航天飞行器的工作环境十分复杂, 将承受加速度、冲击、气动、振动、温度等各类环境因素^[1], 这些环境参数的剧烈变化可能造成飞行器及其机载设备

的性能和可靠性降低, 结构产生变形, 甚至破坏^[2]。据统计, 由于环境因素引起的失效占比达70%以上^[3], 因此, 地面环境试验对评估考核各类飞行器的性能以及

收稿日期: 2015-07-28; 修订日期: 2015-08-13

Received: 2015-07-28; Revised: 2015-08-13

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2013B0203030)

Fund: Supported by the China Academy of Engineering Physics Technology Fund(2013B0203030)

作者简介: 欧峰(1982—), 男, 四川广元人, 硕士, 主要研究方向为环境试验技术和装备研发。

Biography: OU Feng(1982—), Male, from Guangyuan, Sichuan, Master, Research focus: environment test and equipment design.

通讯作者: 陈颖(1976—), 女, 重庆人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为振动环境试验技术。

Corresponding author: CHEN Ying(1976—), Female, from Chongqing, Master, Engineer, Research focus: vibration environment technology.

提前发现设计缺陷和结构优化具有重要意义。

目前,常见的环境试验多以单一环境考核为主,并通过每个单项环境作用效果的简单叠加来模拟复合环境的影响,但复合环境的效果可能远大于每个单项环境试验效果之和,也可能远小于单个环境的试验效果^[4-5]。这种简单的叠加难以模拟产品在复合环境作用下的效果,因此开展复合环境试验成为必然趋势。

由于加速度环境几乎贯穿整个飞行过程,因此以加速度环境为基础的复合环境研究更具有应用价值,目前主要是采用以离心机为平台模拟单一的加速度考核为主,并在离心机上简单叠加其他环境因素。这方面的研究已经起步但还不够系统,因此,文中将系统地总结几种有代表性的以离心机为平台的复合环境试验技术的研究进展,并对其发展趋势进行展望。

1 离心-冲击复合环境试验

在火箭发射、级间分离以及击中目标这些环节中,都存在冲击效应,为了模拟这些飞行中的冲击效应,美国Rucker公司于20世纪70,80年代为Sandia国家实验室制造了一台室外离心机,如图1所示。该离心机的独特之处在于可以通过抛掷试件进行冲击试验,除此之外还可以开展特大型物件、爆炸载荷以及火箭发动机点火等试验^[6]。



图1 Sandia实验室的离心机
Fig.1 Centrifuge in Sandia laboratory

主要有两种冲击方案:

1) 试件安装在离心机转臂前端的释放机构上,靶固定在地面,将试件抛向靶进行冲击试验,如图2a所示;

2) 试件和靶都安装在离心机转臂前端的释放机构上,离心机启动后,将试件沿着转臂上的一段轨道加速,并撞击安装在转臂前端的靶子,实现离心-冲击

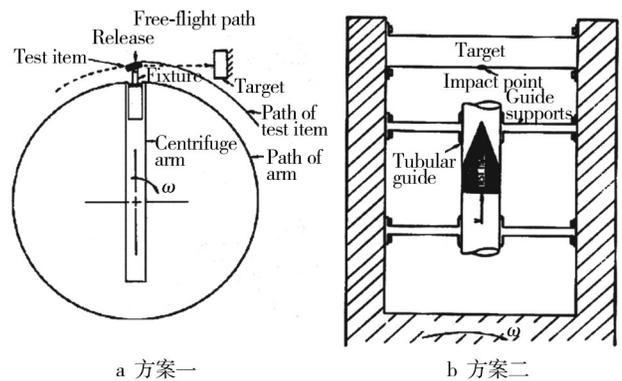


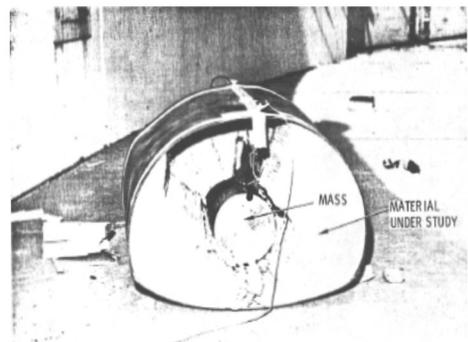
图2 离心环境下冲击试验原理
Fig.2 Principle of impact test under centrifugal environmental

复合,如图2b所示。

目前,该室外离心机在抗冲击容器测试中应用得较多。抗冲击容器测试的目的是为了评估各种抗冲击材料吸收冲击能量的能力。轴向和侧面冲击试验之后试件的情况如图3所示。



a 轴向



b 纵向

图3 冲击后的产品试件
Fig.3 Product after impact test

每种方案都进行了多次试验,以得到可靠的数据。该离心机不仅冲击速度可以精确设定(3~183 m/s),而且可复现,目标上的冲击点位置和冲击目标

的角度也是精确且可复现的。20世纪80年代以后, Sandia实验室对该离心机又进行了多次改进,在当初进行的25次各类冲击试验中,试验成功率为100%^[7]。

2 离心-气动复合环境试验

离心-气动复合环境试验主要是为了同步模拟飞行器在飞行阶段受到加速度和气压共同作用的效应。在离心机提供加速度环境的同时,由固定在试件表面的特质皮囊来施加气动压力。皮囊里充以氮气或空气,由气源提供一个持续的压力,如图4所示。为了能够更真实地模拟试件轴向和法向的加速度,需要旋转吊舱中的试件存在角度,对离心机产生的加速度进行载荷分解。为了模拟试件表面不同区域的压力,可以通过分区加载来模拟试件表面的压力分布载荷。

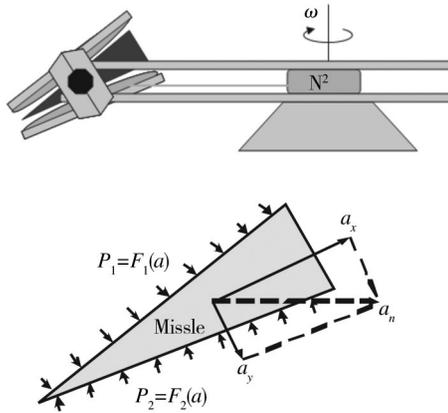


图4 离心-气动复合环境试验原理

Fig.4 Principle for acceleration-aerodynamic system

离心-气动复合环境试验的关键是实现加速度与气压的持续同步,需要由PLC根据每一时刻采集的加速度值计算出相对应的理论气压值,并与压力变送器采集的实际压力值进行比较,然后控制比例阀对气囊压力进行调节^[8]。目前中国工程物理研究院,北京强度环境研究所都建有离心-气动复合试验系统,具备离心与气压复合环境模拟能力。其中中国工程物理研究院的LJ-2离心机是国内最早具备离心气动复合试验能力的试验系统^[9],而中国工程物理研究院的LJ-1是目前国内有效半径最长的离心-气动复合试验系统,如图5所示。

2007—2008年,美国Sandia实验室计划对已有离心式激光跟踪仪的应用进行拓展,除了获取飞行器的时空位置信息,还希望能获得飞行姿态以及空气动力



图5 中国工程物理研究院的LJ-1离心机

Fig.5 The LJ-1 centrifuge in China Academy of Engineering Physics

参数。如图6所示,试验人员将一个长3.6 m火箭形状

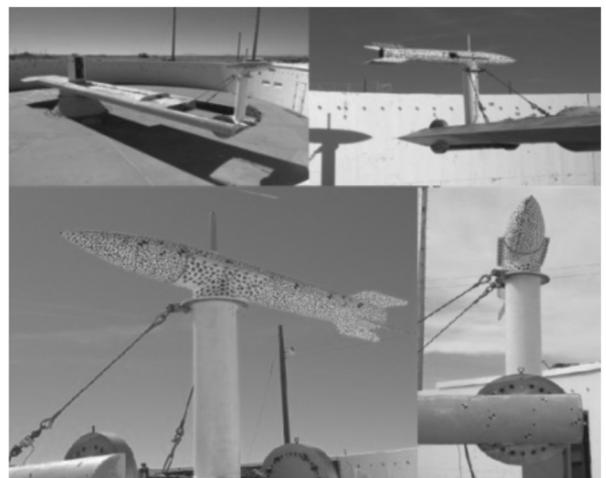


图6 离心机上的火箭模拟件

Fig.6 Rocket model on centrifuge

的模拟件固定在一台室外离心机转臂前端的基座上,并高于围墙高度。在距离离心机一定距离处架设两台激光跟踪仪,夹角为40°,试验场布局如图7所示,

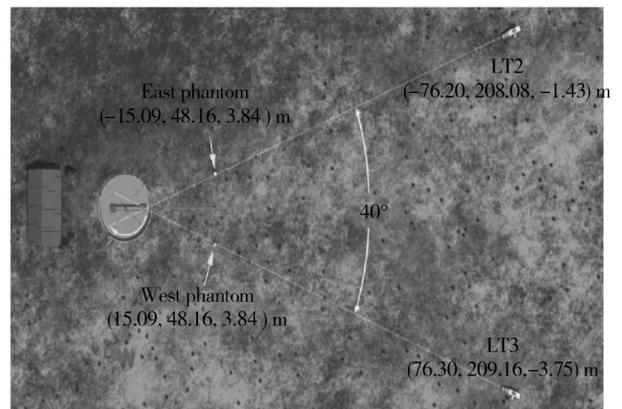


图7 试验装置俯视图

Fig.7 Overview of experimental setup

LT2,LT3为激光跟踪仪。当离心机转臂带动模拟试件一起旋转时,模拟试件表面因受到大气扰动会发生颤动或者变形,通过两台激光跟踪仪对模拟件进行跟踪并同步采集图像数据,如图8所示。将同步采集的图像进行配对,并对试件表面高对比度的散斑和四分圆标记(Quadrille markers)进行分析,就可以解析出试件在高速气流作用下的三维形状、位移、速度和应变等信息^[10-11]。

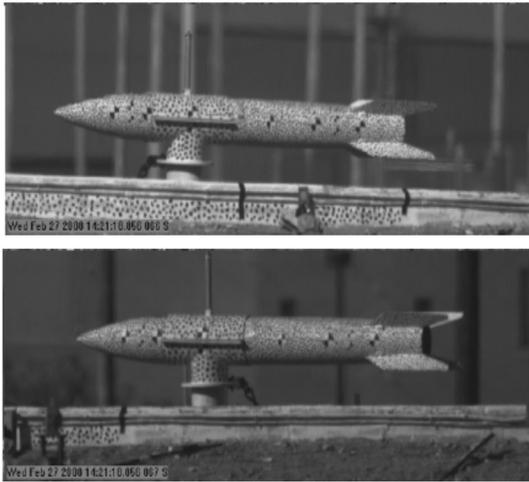


图8 左右激光跟踪仪同步采集的图像

Fig.8 Sample images from left and right laser trackers

3 离心-振动复合环境试验

离心-振动复合环境试验主要是为了同步模拟加速度和振动对机载设备结构可靠性的影响。振动环境由安装在离心机吊舱中振动台模拟,目前常用的振动台主要分为液压振动台和电动振动台。液压振动台推力大,但频率较低;电动振动台频率高,但推力较小。振动台在离心环境下的振动台面动圈定中、轴承可靠性以及多轴振动控制的技术难度非常大,世界上只有少数几个实验室具有这样的复合试验设备。

美国Sandia实验室于1970年率先成功研制出第一代离心-振动复合试验设备,如图9所示。该设备的离心机臂长8.84 m,采用振动台面朝向离心机转轴的顺臂安装方式安装了一套电动振动台,建成了能对不大于15 kg试件进行模拟的飞行再入环境综合力学试验装置,该装置能产生50g的线加速度,10 Hz~2000 Hz,20g均方根值的振动加速度^[12]。

为满足特殊环境模拟,Sandia实验室又进行了新型的高频振动加载,将原有的电动振动台更换为压

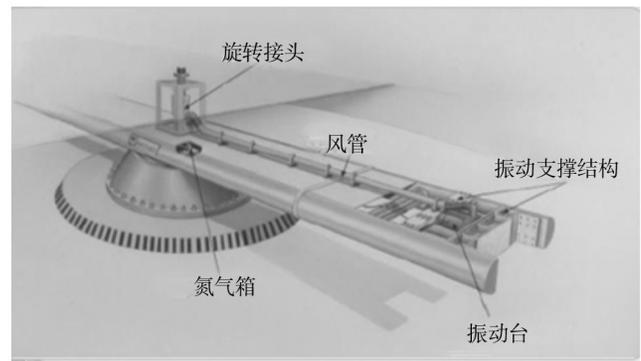


图9 Sandia实验室振动离心机

Fig.9 Vibration centrifuge in Sandia laboratory

电式激振器,每个激振器可在300~2000 Hz频率范围内输出约2 t推力,激振器最大行程为100 μm,如图10所示^[13]。

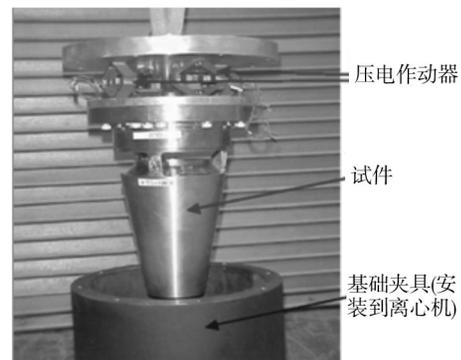


图10 sandia实验室压电振动系统

Fig.10 Piezoelectric vibration system in Sandia laboratory

法国Actidyn公司研制的离心-振动试验设备(如图11所示)在国际上也非常有影响力,Actidyn公司采用振动台面背向离心机转轴的顺臂安装方式。该套试验设备能够实现最大承载120 kg,过载80g,振动推力为48 kN。其最关键的技术在于离心机两端不平衡力的调节以及振动台动圈的定中控制。目前,国内中物院总体工程研究所、北京强度环境研究所及中国水利水电科学研究院也开展了离心-振动复合环境试验系统的研究工作。

由于真实的飞行环境过程是多维振动与加速度环境并存,实践证明,许多无法用一维振动试验复现的飞行试验故障,用简单的多维振动试验即可复现^[14]。因此目前,离心-振动的发展方向主要由离心-一维振动复合向离心-多维振动复合发展。目前该技术以美国最为成熟,国内的香港科技大学和中国水利水电科学研究院也配备有离心-二维振动复合试验系统^[15],如图

12所示。



图11 Actidyn公司的离心-振动试验系统

Fig.11 Centrifuge-vibration test system from Actidyn Co. Ltd.

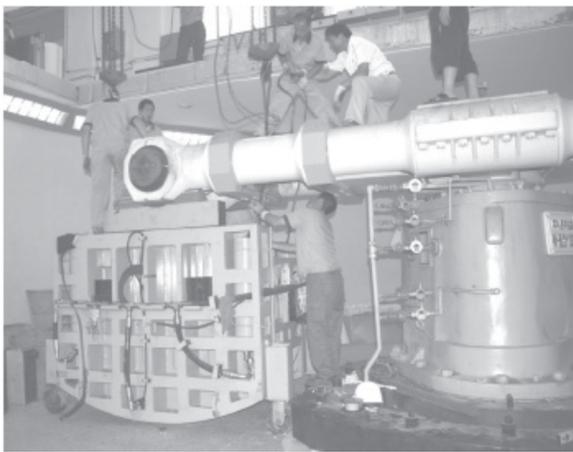


图12 中国水利水电科学研究院的二维振动离心机

Fig.12 Two-dimension vibration centrifuge in China Institute of Water Resources and Hydropower Research

4 离心-温度复合环境试验

离心-温度复合试验系统,主要用来模拟飞行过程中加速度与高低温变化对设备性能与结构的影响。温度环境由安装在离心机试验舱中的加热和冷却装置来模拟,由于受到离心过载以及科氏加速度的影响,温度的均匀性会受到严重影响,虽然可以用电扇来提高流场的均匀度,但还需要通过在空气腔内壁加入扰流柱、调整热源的位置、加大电机功率、增加风扇转速等措施来进一步改善温度均匀性,如图13所示^[16]。

如果将离心、温度、振动复合环境综合考虑,将更加复杂,同样也更具研究意义,北京强度环境研究所与中物院总体工程研究所合作研制的一台离心-振动-温度复合试验系统就具备该能力。该设备同时还具备加热加压功能,其容量为400g-t,转臂有效半径

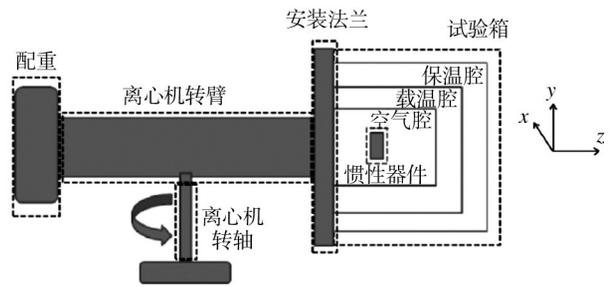


图13 离心-温度复合系统原理

Fig.13 Principle for acceleration-temperature system

为7.5 m,最大加速度为100g,振动台推力为20 kN,温控范围为常温~120 ℃,如图14所示。目前中物院总体所在研的高温离心复合系统的最高设计温度可以到达300 ℃。

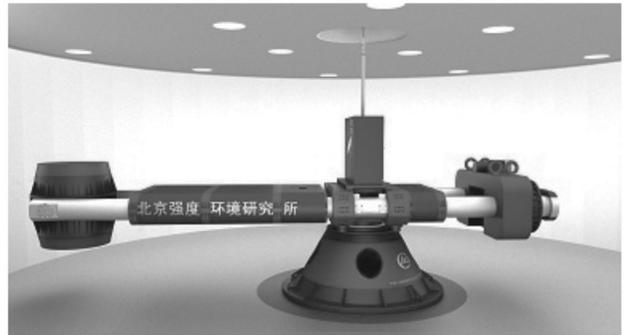


图14 北京强度环境研究所的离心-温度-振动复合试验系统

Fig.14 Acceleration-temperature-vibration system in China Aerospace Science and Technology Corporation

5 发展趋势及展望

除了上述几类基于离心机平台的复合试验系统,国外还开展了离心-噪声、离心-低气压(或高度)以及离心-静力(弯矩)等复合形式。例如美国哥达德空间飞行中心建有发射模拟器,可以模拟加速度、振动、噪声、真空复合环境,其最大加速度为30g^[17]。

另一方面,离心机平台本身也有新的发展方向,据相关文献报道,美国的Sandia实验室还计划研制可控加速度、振动和双轴自旋的复合试验系统,这就意味着离心机平台本身也将传统的单轴加速度向多轴加速度发展。目前,中物院总体工程研究所正在研制的高动态离心机具备两轴加速度动态加载的能力,各轴最大加速度变化率能达到20 g/s。

这一系列发展趋势虽然各自的发展方向不同,但

都将对今后的复合试验系统带来新的变化和深远的影响。

6 结语

从国内外几种有代表性的以离心机为平台的复合试验系统的技术特点、原理和应用可以看出,复合环境试验能有效提高飞行器及相关设备的可靠性,以离心机为平台的复合环境试验技术是一种必然的发展趋势。我国在相关方面也具备了坚实的技术实力,开展以离心机为平台的复合环境试验将与其他单项环境试验互为补充,共同构成一个科学的、完善的环境试验体系。这将有助于我国环境试验水平的提高,也将为我国各类飞行器的研制提供更有力的技术保障。

参考文献:

- [1] 蔡成钟. 再入飞行器系统综合环境可靠性试验[J]. 强度与环境, 1998(2): 44—48.
CAI Cheng-zhong. The Integrated Environmental Reliability Test System for Reentry Vehicle[J]. Structure & Environment Engineering, 1998(2): 44—48.
- [2] 吴建国, 李海波, 张琪, 等. 综合离心环境试验技术研究进展[J]. 强度与环境, 2014, 41(1): 1—9.
WU Jian-guo, LI Hai-bo, ZHANG Qi, et al. Advances in Synthesis Centrifugal Environment Test[J]. Structure & Environment Engineering, 2014, 41(1): 1—9.
- [3] 方兵, 沈润杰, 何闻, 等. 航天器元件多参数综合可靠性环境试验研究综述[J]. 中国机械工程, 2009, 20(22): 2766—2772.
FANG Bing, SHEN Run-jie, HE Wen, et al. Research Summary of the Multi-parameter Combined Environmental Test of Spacecraft Component Reliability[J]. China Machinery Engineering, 2009, 20(22): 2766—2772.
- [4] O'SHEA Paul. Environmental Test Helps You Juggle Design Demands[J]. Evaluation Engineering, 1997, 36(5): 38—40.
- [5] SCHUTT Jeff. Vibration Testing of Electronic Assemblies[J]. Electronic Packaging and Production, 1996, 36(13): 20—26.
- [6] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备: 离心机设计(7)[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(1): 126—127.
JIA Pu-zhao. The Steady Acceleration Simulation Device: The Design for Centrifuge(7)[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(1): 126—127.
- [7] SAND80-0481, The Sandia National Laboratories 8.8 Meter and 10.7 Meter Centrifuge Facilities[S].
- [8] OU Feng. The Design of the Synchronously Simulate System for Acceleration and Air Pressure[J]. Applied Mechanics and Materials Vols, 2013, 433—435: 1175—1179.
- [9] 陈洪, 邓志刚, 庄志, 等. LJ-2型离心机改造[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(5): 636—639.
CHEN Hong, DENG Zhi-gang, ZHUANG Zhi, et al. Rebuilding of LJ-2 Centrifuge[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(5): 636—639.
- [10] TIMOTHY J Miller, HUBERT W Schreier, MICHAEL T Valley, et al. Extending Digital Image Correlation to Moving Field of View Application: A Feasibility Study[C]// Proceedings of the XIth International Congress and Exposition. 2008.
- [11] TIMOTHY J Miller, EDWARD F Romeroa, HUBERT W Schreier, et al. Extending Digital Image Correlation to Moving Field of View Application: Error Assessment Using Outdoor Centrifuge, 2009.
- [12] Centrifuge/Superfuge. <http://www.sandia.gov/vqsec/SON-CF.html>.
- [13] GOETHEM D V, JEPSEN R, ROMERO E. Vibrafuge: Re-entry and Launch Test Simulation in Acombined Linear Acceleration and Vibration Environment[C]// The 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno Nevada, 2006.
- [14] 王梦魁. 多维振动环境试验的实践[J]. 装备环境工程, 2005, 2(3): 22—25.
WANG Meng-kui. Multi-dimensional Vibration Testing Practice[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(3): 22—25.
- [15] 宋献慧, 侯瑜京, 梁建辉. R500B大型土工离心机双向振动台控制及数据采集系统[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(3): 76—78.
SONG Xian-hui, HOU Yu-jing, LIANG Jian-hui. Control and Data Acquisition System for R500B Biaxial Centrifuge Shaker[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(3): 76—78.
- [16] 赵智忠, 孟晓风. 离心—温度复合试验箱温度场模拟分析[J]. 计测技术, 2014, 34(1): 5—9.
ZHAO Zhi-zhong, MENG Xiao-feng. Simulation on Temperature Fields of a Test Chamber Combined by Centrifugal Situation and Temperature[J]. Metrology & Measurement Technology, 2014, 34(1): 5—9.
- [17] ANDREW J Fleming, QUINN H Leland, KIRK L Yerkes, et al. Aircraft Thermal Management Using Loop Heat Pipes: Experimental Simulation of High Acceleration Environments Using the Centrifuge Table Test Bed[R]. AFRL-PR-WP-TP-2007-208, 2007.