

文章编号:1674-8190(2019)03-389-07

并行试验管理技术在民用飞机全机 疲劳试验中的应用

夏峰, 牟珊珊

(中国飞机强度研究所 全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要: 在民用飞机结构适航符合性验证试验中, 全机结构疲劳试验是最复杂、最昂贵、最耗时的, 提高全机疲劳试验效率、缩短全机疲劳试验周期一直是型号研制中追求的目标, 尤其是疲劳试验管理技术的提高。在 MA600, ARJ21-700, Y12F 等全机疲劳试验中引入并行实验管理技术进行工程应用, 提出应用并行试验管理技术应当注意的问题。结果表明: 并行实验管理技术在全机疲劳试验时缩短了试验时间, 提高了试验效率, 发挥了重要作用。

关键词: 全机疲劳试验; 并行工程; 并行试验管理技术

中图分类号: V216.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.03.013

Application of Concurrent Test Management Technique in Full Civil Aircraft Fatigue Test

Xia Feng, Mu Shanshan

(Aviation Technology Key Laboratory of Full Scale Aircraft Structure Static and Fatigue Test,
Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: Full aircraft structure fatigue test, as a part of civil aircraft structure airworthiness verification test, is the most complicated, the most expensive and the most time-consuming. Improving the efficiency of full aircraft structure fatigue test and shortening the fatigue test cycle have always been pursued, especially for fatigue test management technique. This paper introduces concurrent engineering which is applied to full aircraft fatigue tests such as MA600, ARJ21-700, Y12F tests. The traditional serial working mode is transformed into the parallel working mode. Concurrent test management technique is summarized and proposed creatively. The basic content and method of concurrent test management technique are described. Different requirements of the technique in different stages in a single test are analyzed. At the same time the management methods in multiple tests in the same factory are proposed. The practice shows that concurrent test management technique plays an important role in accelerating the cycle of full aircraft fatigue test. What's more the technique is potential for further research and it is of application prospects.

Key words: full aircraft fatigue test; concurrent engineering; concurrent test management technique

收稿日期: 2018-06-13; 修回日期: 2018-09-10

通信作者: 夏峰, summer_wine@21cn.com

引用格式: 夏峰, 牟珊珊. 并行试验管理技术在民用飞机全机疲劳试验中的应用[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 389-395.

Xia Feng, Mu Shanshan. Application of concurrent test management technique in full civil aircraft fatigue test[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 389-395.

0 引言

近年来,我国航空武器装备和民用航空进入了发展的快车道,规模不断扩大。民用飞机研制是一项复杂的系统工程,依据适航规章制度,必须通过适航符合性验证试验和有试验支持的分析来表明飞机的设计、制造和使用维护等满足相关适航条例要求。按照国内目前的试验技术,全机疲劳试验所需时间一般为 8~10 年,期间要耗费大量设备成本、人力成本等。面对全机结构疲劳试验任务多、试验周期紧等情况,为加速全机疲劳试验进度,将并行工程的理念引入全机疲劳试验中,把传统串行工作转化为并行工作,从而缩短试验周期,降低试验成本。

对并行工程最具代表性且被广泛采用的定义是美国防御分析研究所 IDA 于 1988 年在其著名的 R-338 研究报告中给出的:“并行工程是对产品及其相关过程(包括制造过程和支持过程)进行并行、一体化设计的一种系统化的工作模式”^[1]。这种工作模式要求设计者从设计初始就要考虑产品全生命周期(从概念形成到产品报废)内各阶段的各种因素,并强调各部门的协同工作,最大限度地减少设计反复,缩短设计、生产准备和制造时间。

自 19 世纪 80 年代并行工程的概念提出以来,国内外学者对其进行了广泛的研究。D. Schrage 等^[2]分析了并行工程及其技术;J. Krammer 等^[3]介绍了并行工程在飞机研制中的应用;P. Gaudenzi^[4], A. Braukhane 等^[5]介绍了并行工程在航天器设计中的应用;G. Karpati 等^[6]研究了航空航天并行工程中的资源管理。除了理论研究,并行工程的理念也曾经应用在具体实例中。比如美国洛克希德公司在研制新型号导弹中通过应用并行工程,将研发周期从 5 年缩短到 2 年。美国波音公司研制 B777 客机时采用并行工程,实现了 5 年内从设计到试飞的一次成功,与 B767 客机相比,研制周期缩短了 13 个月^[7]。

国内对并行工程的研究工作开展的相对较晚。1995 年国家成立由清华大学、上海交大、华工、北航和航天二院组成的联合课题组,开始开展并行工程相关技术的研究^[8]。多年以来,并行工程已经在航空航天、船舶、汽车、计算机等领域广泛应用。魏法杰等^[9],于海燕^[10],李乃鑫等^[11]分别介绍了并行工程在航空新产品开发、商用飞机研制、民用飞

机维修中的应用;方建平等^[12]分析了并行工程在航天型号研制中的应用与实践;张涂^[13]研究了并行工程在船舶设计中的应用;杨胜统等^[14]对汽车研发中的并行工程实效性进行分析。各领域通过采用并行工程,提高了工作效率,降低了成本,获得了高额的经济利益。

通过查阅文献发现,目前研究中鲜见并行工程在试验管理尤其是全机疲劳试验方面的研究。针对疲劳时间耗时长、成本高这一现状,本文将并行工程理念引入全机疲劳试验中,总结并提出并行试验管理技术。通过在型号试验中采用此技术,缩短试验时间,试验效率最高提高 30% 以上。

1 并行试验管理技术及工程应用

1.1 全机疲劳试验

全机疲劳试验是一项大型系统工程,涉及材料、结构、力学、计算机辅助设计、电子测量、多通道自动控制、液(气)压控制和无损检测等多个环节,需要多专业、多部门密切配合才能完成。

全机疲劳试验全过程可以划分为三个主要阶段^[15],如图 1 所示。第一阶段为试验准备阶段,包括试验策划、试验设计、试验准备、试验安装与调试等,通常占试验周期的 20%;第二阶段为试验运行阶段,包括试验实施与过程控制、试验数据处理分析等,除按要求完成所施加的循环载荷外,主要工作为无损检测、应变/位移测量、结构维修,通常占试验周期的 70%;第三阶段为试验总结阶段,包括试验报告编写及归档等,通常占试验周期的 10%。

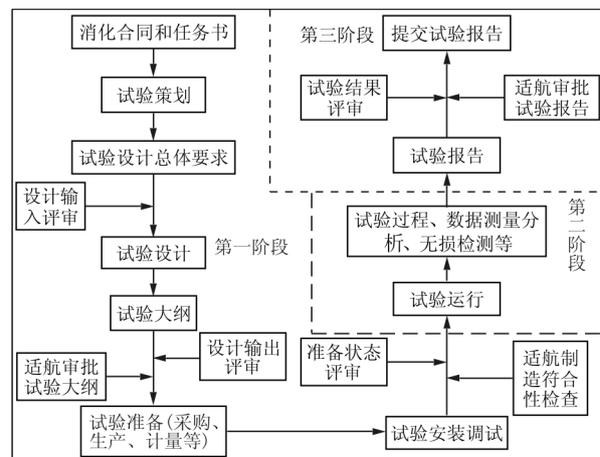


图 1 全机疲劳试验过程

Fig. 1 Full aircraft fatigue test process

从图 1 可以看出:试验准备和试验运行这两个阶段包含了试验 90%的工作,在这两个阶段不但需要占用一定的场地、设备,而且需要多个部门协调配合工作。可见,全机疲劳试验在不同阶段都有多项工作,随着全机疲劳试验任务的增多,同一厂房、同一时间内会存在多个疲劳试验同步运行的情况。因此针对全机疲劳试验各阶段的特点,提出并行试验管理技术,分别从单项疲劳试验的并行管理、同一厂房多型号疲劳试验的并行管理这两个层面进行论述。

1.2 单项疲劳试验的并行管理

单项疲劳试验的并行管理主要针对试验第一、第二阶段的工作任务,包括试验的策划、设计、准备、安装、调试、试运行和正式试验等阶段,按照“设计过程中各活动并行交叉进行”的同步并行管理思想,尽可能将每项任务同步并行进行。

1.2.1 试验策划阶段的并行管理

该阶段主要工作是了解试验种类、性质和规模等,对试验人员、设备、场地等试验资源进行总体规划。在编制技术文件,例如试验策划书、试验计划总网络图等时,并行开展试验设备,例如试验控制设备、测量设备、通用设备等的市场调研、采购、生产规划等。

1.2.2 试验设计阶段的并行管理

该阶段主要工作是组建试验团队,进行人员分工,并行开展试验设计工作;明确试验难点,并行开展试验技术攻关研究;根据试验设计进程,确定试验所需设备的种类、数量等,并行开展专用设备、通用设备、新研设备等生产、采购、验收工作。

1.2.3 试验安装、调试、试运行的并行管理

该阶段主要工作是试验件验收、应变片粘贴引线、胶布带粘贴、加载设备安装、试验单点调试、多点联调等。在试验件验收交付前,与试验件复装并行开展部件无损检测、应变片补贴、通用设备的维护保养、测控系统的维护保养、泵站空压站的维护保养、机动设备的维护保养、通用件补充生产、专用件生产验收等工作。试验件完成进场验收标志试验实施阶段工作全面展开,可以并行开展胶布带粘贴、杠杆系统组装、承载系统安装、测控系统调试、仪器仪表计量等多项工作。

1.2.4 试验正式运行阶段的并行管理

经过一段时间的试运行,疲劳试验转入正式运行阶段,这一阶段通常占据整个试验周期的 70%。该阶段主要工作是制定管理制度和试验计划,完成试验周期性检查和适航检查,完成动态/静态测量,完成仪器仪表计量/标检、维修试验件、维护设备,分析试验数据等日常管理工作。其中部分管理工作可以同步并行开展。比如可以在试验件维修期间,并行开展仪器仪表的计量/标检、设备维护等工作。

1.3 同一厂房多型号疲劳试验的并行管理

随着疲劳试验任务逐渐增多,同一厂房需要同时运行多个型号疲劳试验。通过引入并行工程的管理理念,可以更加合理配置有限资源,缩短试验周期,加速疲劳试验进度。

1.3.1 建立疲劳试验实施责任体系

建立“高效率的组织机构”是并行管理的主要思想,也是实现并行管理的基础。建立“高效率的组织机构”首先要建立实施责任体系,如图 2 所示。该体系要求将每一项具体工作落实到各负责人,管理责任明确化,奖惩办法透明化,确保人人都管事,事事有人管。

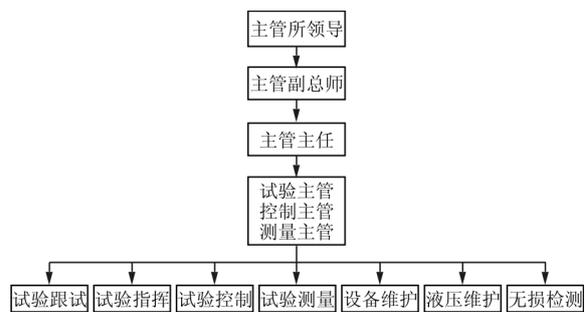


图 2 疲劳试验实施责任体系
Fig. 2 Fatigue test duty system

1.3.2 建立全机疲劳试验日常管理制度

围绕责任体系,细化实化作业文件,标准化试验各环节,确保执行到位。通过技术协调会、交底会、班前会等形式建立协同作业机制。针对 MA600, ARJ21-700, Y12F 等全机疲劳试验日常管理的各个环节,制定了试验岗位责任制和操作规程,如图 3 所示。

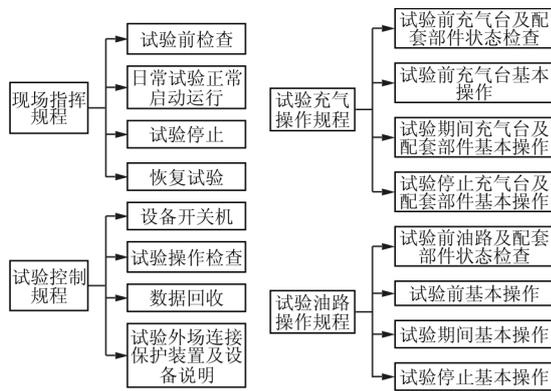


图 3 全机疲劳试验日常管理规程

Fig. 3 Full aircraft fatigue test daily management regulations

1.3.3 建立疲劳试验联合值班团队和集中检查团队

按照“不同领域技术人员的全面参与和协同工作”的并行管理思想,针对同一厂房内多个型号疲劳试验并行运行的情况,在各型号疲劳试验管理规程的基础上,优化人员配置,组建疲劳试验联合值班团队,如图 4 所示。该团队由各个班组抽调人员组成,包括试验指挥、加载设备维护检查人员、液压设备维护检查人员、油泵站空压站运行人员、控制系统操作人员,根据试验现场情况,电工和采集系统操作人员视情加入、巡视。

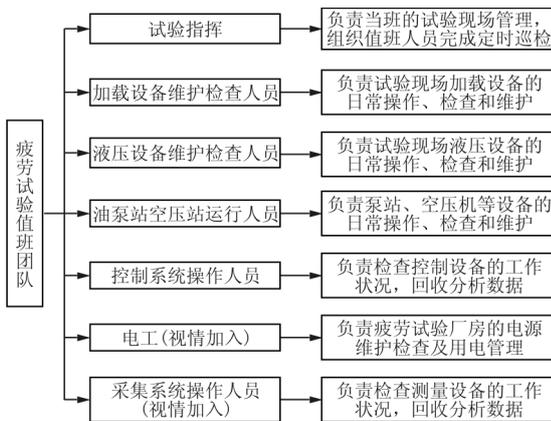


图 4 疲劳试验值班团队及其职责

Fig. 4 Fatigue test teams on duty and their responsibilities

为了提高试验检查效率,集中有限的人力、物力,组建疲劳试验集中检查团队,该团队主要由加载设备维护检查人员组成,与联合值班团队一同工作。

团队人员每人职责不同,为了保障疲劳试验安全有效运行,对作业文件进行梳理和优化,建立详细的人员职责,规范作业流程,明确责任划分,落实责任到个人。

1.3.4 统筹调度试验资源,提高试验设备综合效率

疲劳试验占用试验设备数量多、周期长。这些试验设备中的计量设备,按照质量管理体系要求,需要进行定期标检。为了最大程度减小设备标检对试验进度的影响,可以将标检工作与试验的第三、第四步检查工作同步进行。第三、第四个检查阶段需要拆除相关加载设备和口盖,内容多、周期长,在此阶段开展标检工作,可以最大程度减小对试验进度的影响,如表 1 所示。

另外,按照试验要求,每项疲劳试验需要进行动态测量(实时测量动态跟踪通道)和定期静态测量(测量全部测量通道)。如果每项试验都配置静态测量所需测量设备,数量规模将会相当庞大,设备使用效率也会很低,因此可以根据各个厂房每项试验静态测量周期统筹调度、“削峰填谷”,实现测量设备“错峰”使用,提高设备综合效率,如表 2 所示。

同样,每个厂房油源油路有限,需要根据厂房内每项试验规模、所需油源流量及进度,合理安排每个试验的油泵、油路,如图 5 所示。

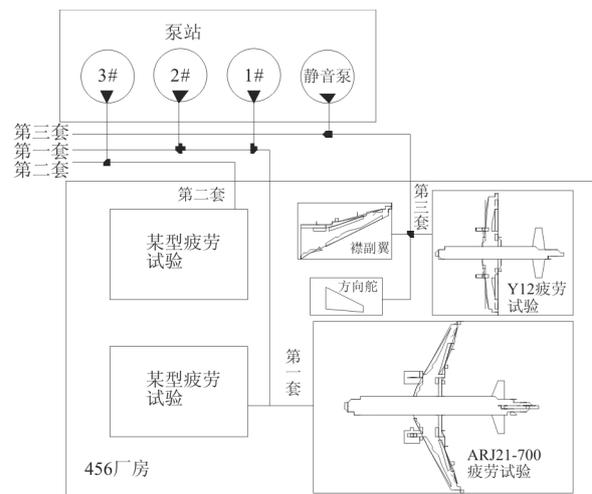


图 5 全机疲劳试验油泵、油路安排示意图

Fig. 5 Oil pump and oil-way management of full aircraft fatigue test

表1 2017年计量设备标检计划安排

Table 1 Measuring equipment check schedule in 2017

厂房	疲劳试验名称	2017年												
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
106	MA600 全机试验	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	标检	运行	运行	运行
	M600F 后机身试验	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	标检	运行	运行	运行
456	Y12F 全机试验	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	标检	运行	运行	运行	运行	运行
	ARJ21-700 方向舵试验	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	标检	运行
	ARJ21-700 全机试验	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	标检	运行	运行
	ARJ21-700 襟缝翼试验	运行	运行	运行	标检	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行	运行

表2 2017年测量设备统计

Table 2 Measuring equipment statistics in 2017

试验名称	2017											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
MA600 全机疲劳试验	200	3 284	200	200	200	3 284	200	200	3 284	200	200	3 284
Y12F 全机疲劳试验	40	40	806	40	806	40	806	806	40	806	40	806
ARJ21-700 全机疲劳试验	4 580	480	4 580	480	4 580	480	480	4 580	4 580	480	4 580	480
合计	4 820	3 804	5 586	720	5 586	3 804	1 486	7 904	7 904	1 486	4 820	4 570

1.4 工程应用

在疲劳试验第一阶段、第二阶段中,采用单项疲劳试验的并行管理技术,将各个阶段可以并行进行的步骤尽量同步进行,并可在试验设计阶段根据需求适当采用新技术。通过采用并行试验管理技术,试验环节的总效率得到整体提高。以MA600F 货运型飞机后机身疲劳试验为例,从2013年2月24日收到试验任务书到6月19日疲劳试验正式运行仅用不到4个月时间,为以前同类型试验的三分之二,提高效率30%以上。

在型号疲劳试验日常管理中,采用多型号疲劳试验的并行试验管理技术,可达到优化试验管理流程,提高试验效率的目的。以2017年106厂房疲劳试验完成情况为例,MA600型飞机全机疲劳试验提前20天完成10000起落年度试验计划;MA600货运型飞机后机身疲劳试验提前64天完成3倍寿命试验,提前100天超额完成19000起落年度试验计划(原计划16000起落)。实践表明多型号疲劳试验并行运行的整体效率提高了10%以上。

1.5 小结

通过研究全机疲劳试验全过程不同阶段的应

用,可以总结并行试验管理技术的主要内容就是在各项试验开始前做好试验的策划、设计、准备、安装调试、运行等各环节的规划及各项工作安排,包括技术创新、工作流程、工作计划等,将串行工作尽可能转换为并行工作,并且每项工作内容都能按照节点要求完成,否则会打乱计划,导致试验不能顺利进行,甚至影响其他试验的进度。

2 应用并行试验管理技术应当注意的问题

2.1 在试验安装、调试、试运行中落实精细化管理

在试验中要实现并行作业,需要对各项工作进行精细化管理,确保每个环节都能按节点保质保量完成。通过精细化管理,积极提高试验水平,缩短试验各环节时间,才能在真正意义上实现同步并行。

在试验安装、调试及试运行阶段,对试验各项工作内容进行细化,对每一个试验做预先评估,梳理细化工作内容,制定切实可行的日计划、周计划、月计划,尽可能按计划完成对应工作。同时需要合理调配设备,弹性安排职工作息时间,解决人员、设

备和场地紧张等问题。全面落实精细化管理实践,现场工作要做细做精,排查安全隐患,保证后续试验运行的顺利进行。精细化管理实践主要包括油路循环清洗、合理安排导线并保护、舷窗玻璃粘贴防爆膜、安装放气管路消音器、充气管路更改和更换、充压点监视等,如图 6 所示。

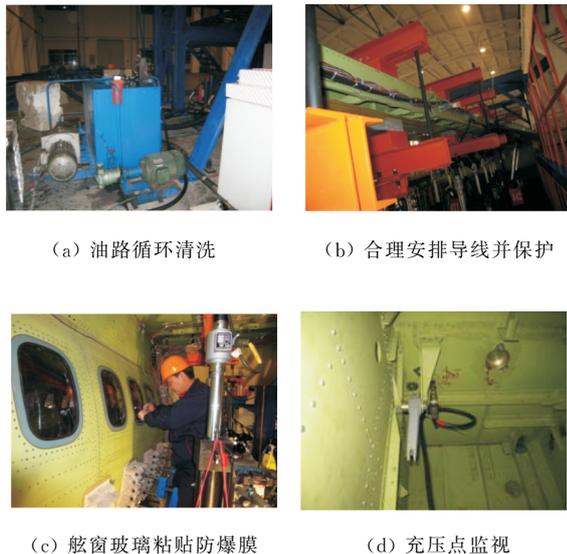


图 6 精细化管理实践
Fig. 6 Elaborate management practice

2.2 并行开展试验技术研究

按照“设计时同时考虑产品生命周期的所有要素”的并行管理思想,试验设计时不仅要考虑设计的正确性、合理性,还要考虑这种设计的工艺性、可制造性、可生产性、可维护性等。在 MA600, ARJ21-700 等全机疲劳试验设计中,进行了一系列的技术改进及创新,比如三维设计技术、一体化框架技术、大容量充气加载技术、机身气密地板加载技术等,如图 7 所示。

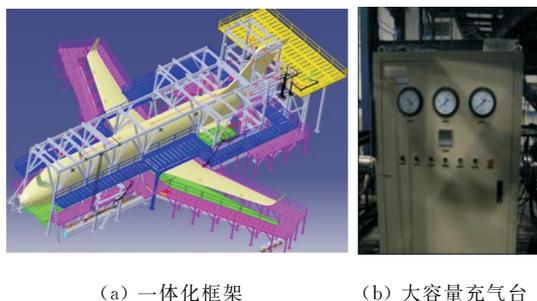


图 7 试验新技术
Fig. 7 New test technologies

通过试验技术的改进,缩短了试验周期,提高了试验质量。也只有试验技术的提高,才能保证试验任务按计划进行。

2.3 严格按照计划完成每项工作

在疲劳试验日常管理中,要严格按照计划完成每项工作,才能确保整体试验计划的顺利实施。但在疲劳试验实际运行过程中,由于试验件疲劳损伤、意外损伤等情况,常常会打乱预先计划,而国内全机疲劳试验一般都存在维修效率较低的问题,主要是维修预案制定不充分,拖延了试验件维修时间。目前试验件维修通常由试验委托方完成,在后续研究中应当关注试验件维修问题,积极配合试验委托方制定完善的维修预案,加强试验件损伤维修工作,减少停机等待时间,提高试验效率。

3 结束语

民用飞机全机疲劳试验是一项大型的综合工程,通过将并行工程理念引入到全机疲劳试验管理中,最大程度合理分配有效资源,在一定程度上能够达到缩短疲劳试验周期、减少试验成本的目的。由于理论与实际的差异,并行工程在实施中仍然存在需要注意的问题,在今后的研究中应当总结经验,完善并行试验管理技术。

参考文献

- [1] 熊光楞. 并行工程的理论与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 8-9.
Xiong Guangleng. Theory and practice of concurrent engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 8-9. (in Chinese)
- [2] Schrage D, Gordon M. Management issues and techniques in concurrent engineering[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Atlanta: AIAA, 1992: 1-18.
- [3] Krammer J, Sensburg O, Vilsmeier J, et al. Concurrent engineering in design of aircraft structures[J]. Journal of Aircraft, 1995, 32(2): 423-430.
- [4] Gaudenzi P. The design of space structures in the frame of a concurrent engineering approach[C]// 57th International Astronautical Congress. Valencia: AIAA, 2006: 1-8.
- [5] Braukhane A, Dumont E, Koch A D, et al. Launch vehicle design applying concurrent engineering[C]// 2013 AIAA Space Conference and Exposition. San Diego: AIAA, 2013: 1-13.
- [6] Karpati G, Hyde T, Peabody H, et al. Resource manage-

- ment and contingencies in aerospace concurrent engineering [C]//2012 AIAA SPACE Conference & Exposition. Pasadena: AIAA; 2012: 1-15.
- [7] 李海涛. 并行工程在商用飞机研制中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2017(1): 99-105.
Li Haitao. Application of concurrent engineering in commercial aircraft development[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2017(1): 99-105. (in Chinese)
- [8] 熊光楞, 张和明. 并行工程在我国的研究与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2000, 6(2): 1-6.
Xiong Guangleng, Zhang Heming. Research and application of concurrent engineering in China[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2000, 6(2): 1-6. (in Chinese)
- [9] 魏法杰, 张帆, 苟小华. 并行工程在航空新产品开发中的应用[J]. 工业工程, 2008, 11(6): 85-88.
Wei Fajie, Zhang Fan, Gou Xiaohua. The application of concurrent engineering in the development of new aviation products[J]. Industrial Engineering Journal, 2008, 11(6): 85-88. (in Chinese)
- [10] 于海燕. 并行工程在商用飞机研发项目中的益处及其实施方法[J]. 民用飞机设计与研究, 2015(4): 83-87.
Yu Haiyan. The benefits and its implementation of concurrent engineering in commercial aircraft development program[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2015(4): 83-87. (in Chinese)
- [11] 李乃鑫, 陆中, 周伽. 民用飞机维修性并行设计体系研究[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(11): 77-81.
Li Naixin, Lu Zhong, Zhou Jia. Research on the concurrent design system for maintainability of civil aircraft[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(11): 77-81. (in Chinese)
- [12] 方建平, 宋凯歌, 米弘. 并行工程在航天型号研制中的应用与实践[J]. 航天工业管理, 2018(5): 3-9.
Fang Jianping, Song Kaige, Mi Hong. The application and practice of concurrent engineering in aerospace development [J]. Aerospace Industry Management, 2018(5): 3-9. (in Chinese)
- [13] 张涂. 并行工程在船舶设计中的应用研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2012.
Zhang Tu. The application of concurrent engineering in ship design[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] 杨胜统, 尧永春, 谢双, 等. 汽车研发并行工程实效分析[J]. 装备制造技术, 2016(10): 118-121.
Yang Shengtong, Yao Yongchun, Xie Shuang, et al. The analysis of vehicle development simultaneous engineering [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(10): 118-121. (in Chinese)
- [15] 强宝平. 飞机结构强度地面试验[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
Qiang Baoping. Ground testing for aircraft structure[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014. (in Chinese)

作者简介:

夏峰(1969—),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞机结构试验技术。

牟珊珊(1992—),女,硕士,助理工程师。主要研究方向:飞机结构试验技术。

(编辑:沈惺)

(上接第388页)

- carbon fiber reinforced composites[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016(18): 21-22. (in Chinese)
- [20] 杨杰, 王国珍, 王艺瀚. 双金属接头界面裂纹几何拘束与断裂韧性的统一关联[J]. 机械强度, 2017, 39(1): 172-177.
Yang Jie, Wang Guozhen, Wang Yihao. Unified correlation of geometry constraint with fracture toughness for the interface crack in bimetallic joints[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(1): 172-177. (in Chinese)
- [21] Bai Y. Effect of loading history in necking and fracture[D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2008.

作者简介:

林长亮(1982—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:直升机总体设计、结构强度分析。

胡文刚(1986—),男,学士,工程师。主要研究方向:直升机动力学分析。

刘娜(1990—),女,学士,工程师。主要研究方向:直升机结构强度。

(编辑:丛艳娟)