

文章编号: 1674-8190(2022)01-101-06

民用电传飞机颤振/ASE 试飞风险控制技术

王海刚, 张绍云

(中国商飞民用飞机试飞中心 试飞运行部, 上海 210016)

摘要: 现有颤振/ASE 试飞风险控制技术相关研究不够系统全面, 未充分考虑民用电传飞机试飞特点及机上试飞工程师的作用。系统地研究民用电传飞机颤振/ASE 试飞风险控制技术, 包括理论评估、测试改装、试飞方法、试飞风险分析、风险降低措施和应急处置程序制定等; 针对识别出的颤振/ASE 不稳定、不良操纵特性和局部结构损坏等风险源, 提出振动超限或异常时客舱试飞工程师切断激励的新技术, 开发地面监控专用软件用于实时颤振/ASE 裕度定量分析; 在某型号试飞中应用该技术进行颤振/ASE 试飞科目验证。结果表明: 该风险控制技术能够有效降低试飞风险和成本, 人工切断技术可在 1 s 内中止激励保障飞机结构安全, 实时分析技术可以快速准确计算稳定裕度并且提高试飞效率。

关键词: 颤振/ASE 试飞; 扫频激励; 风险评估; 人工切断; 实时分析

中图分类号: V217.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.01.11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Flutter/ASE Flight Test Risk Control Technique of Civil Fly-by-wire Aircraft

WANG Haigang, ZHANG Shaoyun

(Department of Flight Test Operation, COMAC Flight Test Center, Shanghai 210016, China)

Abstract: The existing research on flight test risk control techniques related to flutter/ASE test is not systematic enough, and has limited consideration of civil fly-by-wire aircraft characteristic and onboard flight test engineer. The flutter/ASE flight test risk control technique is systematically studied, which includes the theoretical evaluation, test modification, flight test method, flight test risk analysis, risk mitigation measures and emergency procedures formulation. Aiming at three identified hazards including flutter/ASE instability, adverse handling quality and local structure damage, a new technique is proposed for onboard flight test engineers to cutoff the excitation when the vibration limit is exceeded or abnormal. The dedicated ground monitor software is developed to perform the margin quantitative analysis of flutter/ASE in real time. The technique is applied to a certain model flight test for flutter/ASE flight test verification. The results show that the risk control technique can reduce the flight test risk and cost effectively, the manual cutoff technique can stop the excitation within 1 second to protect the aircraft structure safety, and the real-time analysis technique can calculate the stability margin quickly and improve the flight test efficiency.

Key words: flutter/ASE flight test; frequency sweep; risk evaluation; manual cutoff; real-time analysis

收稿日期: 2021-03-17; 修回日期: 2021-06-06

通信作者: 王海刚, wanghaigang1@comac.cc

引用格式: 王海刚, 张绍云. 民用电传飞机颤振/ASE 试飞风险控制技术[J]. 航空工程进展, 2022, 13(1): 101-106.

WANG Haigang, ZHANG Shaoyun. Flutter/ASE flight test risk control technique of civil fly-by-wire aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(1): 101-106. (in Chinese)

0 引言

颤振/气动伺服弹性(ASE)是飞行器能遇到的最复杂的物理现象之一,涉及非定常气动力、结构动力学、飞行控制等多个学科,颤振/ASE试飞风险极高,国内外因颤振试飞而发生意外的飞机不甚枚举^[1]。避免颤振要从设计分析开始,霍应元等^[2]从工程型号设计的角度,研究了大型飞机气动弹性设计的翼面刚度、跨声速颤振特性分析及气动伺服弹性分析等关键技术,给出了解决措施;李秋彦等^[3]总结了新一代战斗机气动弹性设计历程,详细阐述复杂结构气动弹性设计、高精度结构动力学分析、颤振模型设计与风洞试验、主动颤振边界预测等关键技术。对飞机颤振问题,国内外研究者从设计分析角度开展较多研究,对颤振/ASE试飞风险控制技术方面的研究较少,卢晓东等^[4]全面总结了ARJ21-700飞机颤振试飞测试方法、试飞方法、激励方法及数据处理,但对试飞风险方面未进行说明。

尽管颤振设计分析技术不断发展,设计分析精度不断提高,但试飞实践表明,颤振/ASE理论分析预测和有限地面试验,并不能发现所有潜在问题。E-6飞机颤振试飞事故表明,实际结构非线性、不确定性因素不一定能在试飞前发现^[5],YF-16/17飞机试飞时遇到横滚脉冲激励起6.5 Hz反对称模态和滚转角速率传感器反馈形成不稳定现象,该问题并没有在分析或地面试验中发现^[6]。F. A. Barfield等^[7]发现案例中飞机在进近构型、侧滑机动时,襟翼抖动反馈到襟翼铰链附近的俯仰陀螺,引起持续共振。因此,颤振/ASE试飞实施中的风险控制技术研究对于确保试飞安全具有重要意义。

民用电传飞机颤振/ASE存在诸多挑战:飞机尺寸大,结构柔性增加,模态影响显著;典型商用

飞机巡航速度在跨声速段,激波等复杂非线性现象给气动力计算带来挑战;采用全时全权限电传飞控系统,多组传感器、多反馈回路、复杂增益控制律设计,使ASE稳定性设计更加困难。为了确保试飞安全,需要准确全面地识别颤振/ASE试飞相关的危险源,并制定风险降低措施和应急预案。

本文基于民用飞机试飞特点,总结民用飞机颤振/ASE试飞准备中理论评估、机上测试和地面监控设备等方面注意事项;分析民用电传飞机的试飞激励和机组人员组成特点,采用风险矩阵工具识别潜在风险,进行全面风险评估,制定风险降低措施和应急处置程序,提出机上人工切断和地面实时分析技术;基于MATLAB,开发地面颤振/ASE实时分析的专用软件,为试飞高效推进提供决策依据;该风险控制技术进行应用型号试飞,以期确保颤振/ASE试飞安全、高效开展。

1 试飞准备工作

1.1 理论评估中注意事项

典型的颤振/ASE理论评估过程如图1所示,理论模型经过缩比模型、风洞试验、地面试验、飞行试验不断更新,以提高颤振预测准确度,通过传感器位置合理选择和限幅滤波器提高ASE裕度^[8]。在实际执行试飞前,理论评估需要重点关注模型构型与试飞实际构型的一致性。一架通用飞机在GVT之后对平尾设计进行了较大更改,但未重新计算颤振,颤振试飞时在较小的速度便发生颤振飞机坠毁^[9]。一般民用飞机试飞,在完成GVT试验到颤振试飞可能间隔较长时间,需要考虑期间飞机构型变化,比如可能对飞机颤振/ASE产生影响的测试改装更改、飞机本身结构更改等,试飞前应对实物构型差异进行评估。

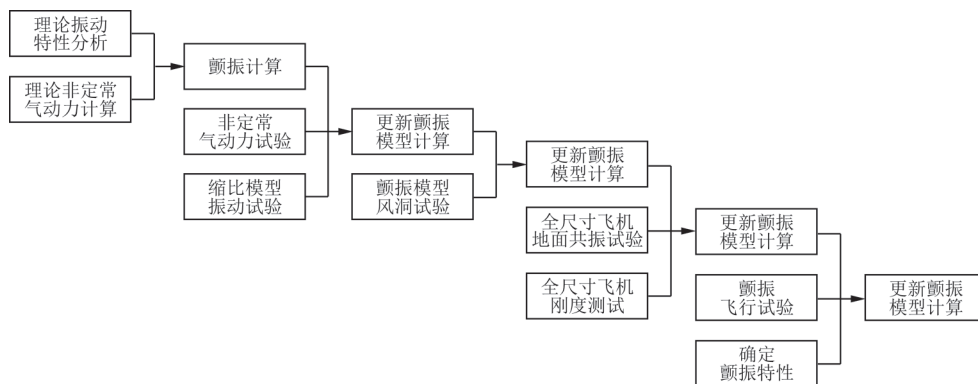


图1 颤振/ASE研发流程图

Fig. 1 Flutter/ASE development process

ASE 理论分析需要评估各个飞控模式的稳定性,典型的电传民用飞机通常有正常模式、辅助/降级模式、直接模式等,需要对每种模式下稳定性进行分析。

1.2 机上测试及地面监控系统

颤振/ASE 试飞主要的机上测试改装系统,按照其功能可以分为激励系统和监控系统两类,激励系统包括扫频设置和信号注入设备,不同的飞机根据驾驶舱空间布局激励需求,专门设计控制系统,面板通常集成在驾驶舱由试飞员操作^[10]。监控系统包括振动传感器、试飞工程师监控台及切断开关、遥测系统等,如表 1 所示。此外考虑到高速段空速准确性问题的影响,还需根据实际情况选择加装拖锥及驾驶舱综显用于提供速度、高度参考。地面监控还需配置专用的监控页面、ASE 准实时分析软件等。

表 1 颤振/ASE 试飞测试改装需求
Table 1 Flight flutter/ASE test instrumentation

设备	功能
驾驶舱测试板及接口计算机	实现 ASE 注入取出信号及试飞员操作接口
加速度传感器	监控参数作为切断判据
试飞工程师监控台	机上实时数据显示
切断开关	试飞工程师用于取消激励信号
遥测系统	数据采集及遥测

2 试飞方法

2.1 激励方法

民用电传飞机颤振/ASE 试飞通常采用人工脉冲和飞控舵面自动扫频的激励方法。

人工三向脉冲是指试飞员快速拍击侧杆或踩方向舵脚蹬,向飞机施加快速脉冲激励,观察飞机振动收敛特性,用以定性检查飞机稳定性。可通过机上人员主观判断和地面监控大厅振动数据衰减情况分析,进行稳定性确认。脉冲激励方式简单但能量小,信噪比低,需要进行数据降噪处理^[11]。原则上首次到新的高度速度点,必须先进行三向脉冲检查,检查正常后才可进行其他的动作。

自动扫频是指通过测试设备向飞控计算机注入正弦线性扫频信号,驱动舵面进行扫频,一般典型的扫频持续时间 30 s 左右,频率范围 0.5~30 Hz^[12]。扫频同时记录飞控系统输出信号,通过

输入/输出信号进行传递函数频域响应运算,最终得到飞机气动伺服弹性系统的定量稳定裕度。

2.2 机组分工

典型的民用飞机颤振/ASE 试飞可由 4~5 人机组组成,包括 2~3 名试飞员和 2 名试飞工程师,机上人员分工可采取如下的方案。

- (1) 试飞员 1 负责扫频前后的飞机状态控制,监控速度、高度;
- (2) 试飞员 2 负责扫频激励设备操作,与地面和客舱工程师通信;
- (3) 驾驶舱观察员负责试验任务讲评和状态监控;
- (4) 客舱试飞工程师 1 负责关键振动数据监控、切断开关操作、与驾驶舱通话;
- (5) 客舱试飞工程师 2 负责目视观察飞机内部、外部振动/噪声情况,辅助进行关键振动数据监控。

需要说明的是也有试飞机构要求最小机组登机,但针对民用飞机试飞特点,最小人员配置根据试飞科目需求而定,能有效降低试飞风险的最低必要人员登机即可。

3 风险控制

3.1 风险分析

颤振/ASE 试飞由于在大动压/大马赫数下进行,并且有意地激励起整机较大幅度振动,采用 FAA 推荐的试飞风险评估程序^[13]和 risk 矩阵工具对识别出的风险源进行评估,如表 2 所示,其中三个风险源依次为:飞机颤振/ASE 不稳定、不良操纵特性和局部结构损坏。

表 2 风险矩阵
Table 2 Risk matrix

严重程度	发生概率				
	经常	可能	偶然	不太可能	极不可能
灾难性的	避免	高	①	②	
危险性的		高		②	
重大的		③			
较小的			中		
对安全无影响					低

(1) 飞机颤振/ASE 不稳定

可能致因包括大动压/大马赫数飞行气动不

确定性、飞机本体结构系统不确定性,考虑到试飞前开展的理论评估和地面试验验证该风险发生的概率,认为偶然等级比较适合。产生后果可能导致飞机主翼面或操纵面破损、缺失,飞机操纵困难,甚至失去控制,后果严重程度属于灾难性,因此风险源 1 在风险矩阵中如表 2 中①所示,为高风险。

(2) 不良操稳特性

可能致因包括异常的飞机操控响应,高高度试验点速度裕度小,机动过程中触发抖振或失速,电传飞机正常控制律改善操稳特性,气动上导致后果可能只有在降级/直接模式下才会表现出来,因此风险源 2 发生概率要根据试飞飞控模式确定,一般的正常模式可认为在不太可能和极不可能之间。产生的后果可能导致飞机损毁,机组严重受伤,属于危险的等级,因此其在风险矩阵中如表 2 中②所示,为中风险。

(3) 局部结构损坏

可能的致因包括飞机高速飞行时,未知的气动效应造成局部结构异常振动。颤振/ASE 理论分析和风洞试验都是主结构的分析,通常忽略局部结构细节,在大动压/大马赫数及较大振动激励的工况下局部结构损坏风险源发生概率较高,根据工程经验归到可能的等级。产生后果可能导致飞机局部结构损伤,典型的部位包括舵面、作动器、舱门等,后果的等级为重大,因此其在风险矩阵中如表 2 中③所示,为高风险。

3.2 风险降低措施

3.2.1 循序渐进方法

颤振/ASE 试飞循序渐进具体措施包括:

(1) 地面进行激励及切断系统、遥测监控的联试;

(2) 试验点执行顺序按照动压从小到大,并选择合适的速度步长;

(3) 确认颤振/ASE 裕度足够后,才可进行下一个状态点试飞。

3.2.2 机上手动切断技术

民用飞机试飞组织模式通常由试飞员和试飞工程师共同登机执行飞行。借鉴颤振风洞试验时通过人工开关在判断颤振发生时紧急停车以保护模型的做法,将该方案应用到试飞中,并加以改进。在试飞工程师监控台设置扫频切断开关,并在监控台配置专用的画面监控重要位置的振动数

据和舵面偏度数据,设置振动限制值,振动超限时信号灯亮起,提示试飞工程师进行切断(如图 2 所示)。振动门限值通常通过设计理论评估或实际飞行数据确定,在试飞过程中也可根据实际情况进行更新调整。

在实际执行中,试飞中机组密切关注飞机振动、噪声情况,如有异常立即中止试验点。试飞工程师执行切断的情况有以下两种情形,处置方式分别为中止和停止。

(1) 中止:振动参数/舵面偏度超限,中止扫频,无需立即减速,等待下一步指令;

(2) 停止:异常情况,立即停止激励,并控制飞机减速至上个已知安全速度,等待下一步指令。

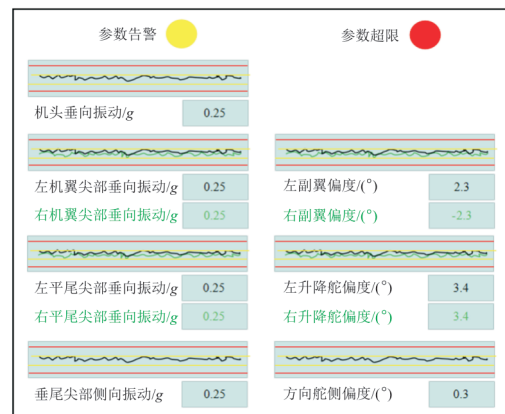


图 2 机上试飞工程师监控页面

Fig. 2 Onboard flight test engineer monitoring picture

3.2.3 地面监控软件

试飞中对振动试飞数据和 ASE 注入、取出数据进行监控,确认数据是否符合预期。基于 MATLAB 开发专用软件,典型的监控页面设置如图 3~图 4 所示,其中 $1 \text{ kn} = 0.5144 \text{ m/s}$ 。

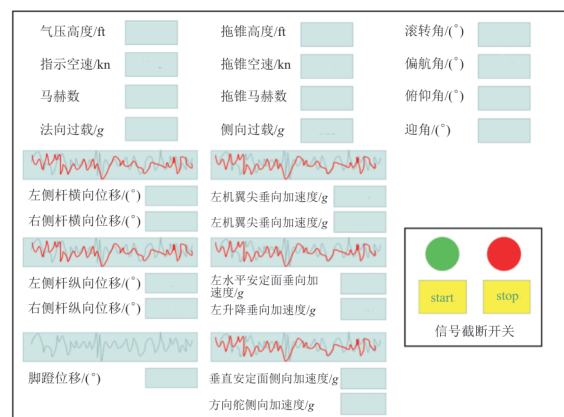


图 3 地面颤振监控页面

Fig. 3 Telemetry flutter monitoring picture

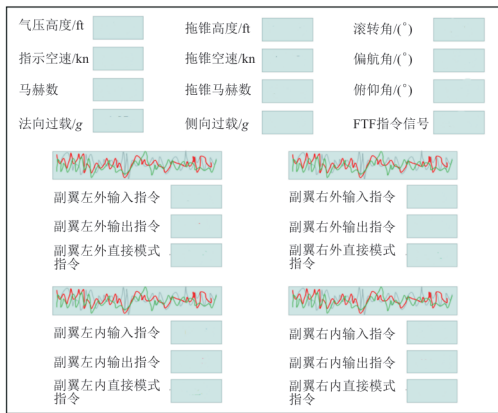


图 4 地面 ASE 监控页面

Fig. 4 Telemetry ASE monitoring picture

试验中每个扫频激励结束后,地面根据遥测存储数据开展 ASE 裕度准实时分析,确认 ASE 裕度符合判据要求后方可继续开展后续试验点,试飞中如某个试验点 ASE 试飞裕度低于预期值,则终止试验。

3.2.4 其他风险降低措施

(1) 对机组进行必要的培训、应急改出操作训练等^[14],为试飞机组配备应急离机的头盔、伞包等设备。

(2) 每架次试飞前,在地面确认所有测试设备工作正常,包括振动加速度传感器、激励系统、切断功能、飞控模式开关等。

(3) 飞机状态和试飞环境选择上注意根据颤振特性选择合适重量配载,避免在中度或以上气流颠簸条件下进行试验。

(4) 飞行结束后对飞机结构和系统进行检查,检查重点部位包括副翼、方向舵、升降舵、各类舱门等。

3.3 应急处置程序

3.2 节主要是针对如何降低和避免风险的预防性措施,对于激励过程中出现紧急或异常情况,可按以下应急程序处置以减少损失、降低危害。

(1) 切断激励信号并柔和拉杆减速至已知安全速度,观察飞机响应情况;

(2) 若情况缓解,保持安全速度等待下一步指令;

(3) 若仍无法恢复控制则执行应急离机。

需要说明的是,在减速措施中采用收油门和柔和拉杆方法,不推荐使用减速板,主要考虑飞机首次达到新速度状态,减速板的效应、功能存在不

确定性,并且打开减速板会形成潜在较强激励^[15]。

4 试飞结果分析

4.1 机上切断数据分析

在高高度、大马赫数飞行条件下执行航向 ASE 稳定性试飞数据示例如图 5 所示。实际试飞表明,在发生振动超限后,从人工开关切断到舵面停止偏转时间约在 1 s 以内。

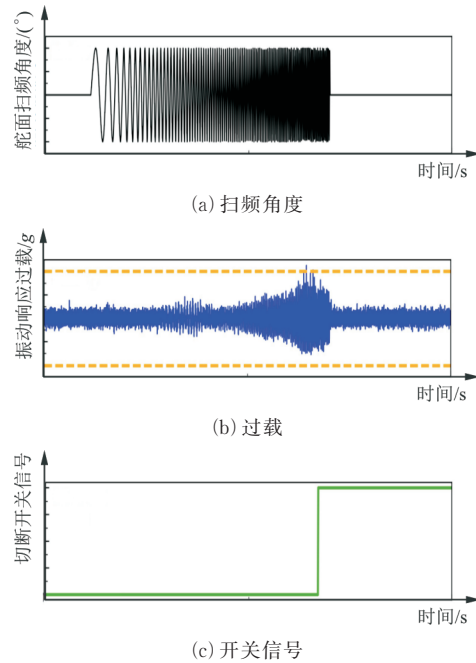


图 5 切断开关数据示例

Fig. 5 Cutoff data example

从图 5 可以看出:人工切断后可以有效防止振动扩大至更危险程度,减少飞机在大振幅下暴露时间,保护飞机安全。

此外,相对于自动切断设备,人工切断方案只需在测试系统接入一个人工开关即可,成本大幅降低,并且在试飞实施中灵活性强,具有较高可操作性。

4.2 地面实时数据分析

通过开发专用分析程序,在完成扫频后进行实时数据分析,输出/输入信号快速运算,主要采用 Nyquist 和 Bode 两种方法计算得到 ASE 裕度,如图 6 所示。开发的监控软件在试飞过程可以快速计算出试验点 ASE 幅值裕度和频率等,供地面指挥员决策,有效确保试飞安全高效推进。

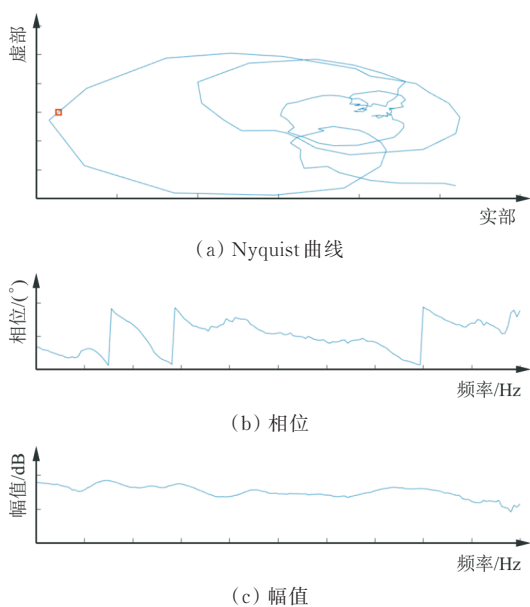


图 6 ASE 实时分析结果示例
Fig. 6 ASE real-time analysis results example

5 结 论

(1) 基于民用电传飞机颤振/ASE 试飞特点, 颤振/ASE 试飞风险控制技术能够准确识别潜在的风险源, 制定针对性风险降低措施和应急程序, 有效实现试飞风险控制。

(2) 基于民用飞机试飞组织模式特点的机上试飞工程师人工切断方案可有效降低颤振/ASE 试飞风险, 具有操作性强、成本低等优点。

(3) 开发的地面实时监控和 ASE 实时分析软件, 能快速准确地计算稳定裕度, 有效保障试飞实施安全和效率。

未来可开展自动切断系统相关研究, 详细对比人工切断与自动切断在安全性、设备成本、实施灵活性等方面具体指标。

参 考 文 献

- [1] LIU D D, SARHADDI D, PIOLENC F M. Flutter prevention handbook: a preliminary collection part C: flutter occurrence on eighteen high performance military: NASA/TP-2006-212490[R]. Scottsdale, Arizona: NASA, 2006.
- [2] 霍应元, 蒲利东, 赵冬强, 等. 大型飞机气动弹性设计关键技术[J]. 航空科学技术, 2017, 28(5): 1-7.
HUO Yingyuan, PU Lidong, ZHAO Dongqiang, et al. The key aeroelastic technologies of large aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(5): 1-7. (in Chinese)
- [3] 李秋彦, 李刚, 魏洋天, 等. 先进战斗机气动弹性设计综述[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 523430.
- LI Qiuyan, LI Gang, WEI Yangtian, et al. Review of aeroelasticity design for advanced fighter[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 523430. (in Chinese)
- [4] 卢晓东, 霍幸莉, 梁海州. 民用飞机颤振试飞技术研究[J]. 航空工程进展, 2014, 5(1): 80-84.
LU Xiaodong, HUO Xingli, LIANG Haizhou. Research on flight flutter test technology for civil transport airplane[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(1): 80-84. (in Chinese)
- [5] BORST R G, STROMET R W. E-6 flutter investigation and experience[C]// 1992 AIAA Guidance Navigation and Control Conference. Hilton Head SC: AIAA, 1992: 1-7.
- [6] ABRAMS R, HARLEY H C. F-117A flight test program[C]// Proceedings of SFTE 22nd Annual Symposium. [S.l.]: SFTE, 1991: 7-10.
- [7] BARFIELD F A, FELT L R. Aeroservoelasticity[J]. Robust Aeroservoelastic Stability Analysis, 1976, 21: 29-54.
- [8] NORTON B. Aircraft structure testing[R]. US: National Test Pilot School, 2001.
- [9] REIMERS T. Grob SPN flutter accident[C]// 2010 European Flight Test Safety Workshop. London: [s. n.], 2010: 1-7.
- [10] MEANY J J. The evolution of flutter excitation at McDonnell aircraft[C]// Proceedings of SFTE 14th Annual Symposium. [S.l.]: SFTE, 1983: 6-11.
- [11] 关爱锐, 刘旭华, 张芹芹. 颤振试飞脉冲激励信号分析技术[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(4): 836-838.
GUAN Airui, LIU Xuhua, ZHANG Qinqin. Analysis technology applied to the impulse excitation signal of flight flutter test[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(4): 836-838. (in Chinese)
- [12] 杨挺健, 田福礼. 电传飞机 ASE 稳定性试飞技术[C]// 第八届全国空气弹性学术交流会. 鞍山: 中国空气动力学学会, 2003: 179-183.
YANG Tingjian, TIAN Fuli. Fly-by-wire aircraft ASE flight test technology[C]// The 8th Chinese Aeroelasticity Conference. Anshan: China Aeromechanics Society, 2003: 179-183. (in Chinese)
- [13] FAA. Flight test risk management program: Order4040. 26B[R]. US: FAA, 2012.
- [14] KELLY M. Pushing Texaco's limits-flutter expansion for the super hornet tanker[C]// Proceedings of SETP 49th Symposium. US: SETP, 2005: 64-76.
- [15] CAPT Rob Niewoehner. SETP handbook: chapter 4 flutter[M]. US: Boeing, 2001.

作者简介:

王海刚(1986-),男,硕士,工程师。主要研究方向:试飞工程等。

张绍云(1987-),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:结构强度试飞工程等。

(编辑:丛艳娟)