

文章编号:1674-8190(2015)03-354-06

新型飞控驾驶舱操纵机构故障状态建模与分析

王婧茹, 王博, 王宜芳

(中航飞机研发中心 飞控液压设计研究所, 西安 710089)

摘要: 某电传民机驾驶舱操纵机构采用超控杆的连接形式, 该种机构重量轻、维修性好, 但是故障模式具有多样性和复杂性, 针对这一问题, 研究其驾驶杆操纵机构的原理和物理特性, 对其正常模式和单侧驾驶杆卡阻故障模式进行建模, 并对各故障模式进行分析和杆力特性品质评估, 结果表明: 该种操纵机构在故障模式下的杆力特性品质是可以接受的。

关键词: 电传民机; 驾驶舱操纵机构; 超控杆; 故障模式; 品质评估

中图分类号: V249.1

文献标识码: A

Modeling and Analysis about a Fault State of a New Cockpit Control Mechanism

Wang Jingru, Wang Bo, Wang Yifang

(Flight Control and Hydraulic Pressure Institute, Xi'an Aircraft International Corporation
Research & Development Center, Xi'an 710089, China)

Abstract: Override rod linkage form is adopted by the cockpit control units of a certain type of fly-by-wire civil aircraft, and it brings some profits on the weight and maintainability. But the failure mode is of diversity and complexity. To solve the problem, the working principle and physical characteristics of the cockpit control units are studied. Through modeling and simulation on its normal mode and unilateral failure mode, each failure mode is analyzed and the column force quality is evaluated. Results show that the column force quality of each failure mode is acceptable.

Key words: fly-by-wire civil aircraft; cockpit control units; override rod; failure mode; flight quality evaluation

0 引言

民机设计的首要目标是获取满意的飞行性能和优良的飞行操纵特性, 所以设计方案前对飞机操纵性能评估显得尤为重要。在民机研发过程中, 操纵机构在故障模式下的操纵性能也是需要考虑的一个重要问题。

目前, 国内外主要是对驾驶杆操纵机构设计^[1-2]以及在正常模式的动力学仿真^[3]和操纵性能^[4]进行相关的研究和评估, 但未对驾驶杆操纵机构在故障模式下的操纵性能进行一定的研究分析。

某民机驾驶超控杆的设计解决了常规弹簧—卡锁式解脱机构^[5]带来的结构复杂、重量重以及当驾驶杆单侧故障, 左右驾驶杆脱离, 在空中无法恢复, 只能落地后进行地面恢复, 整个飞行过程中带硬故障飞行, 风险不可控^[6]的问题。但这种超控杆式操纵机构故障模式却具有多样性和复杂性, 因此对这种操纵机构建模以及操纵特性评估较为复杂。

本文建立超控杆连接式操纵机构的正常模式模型和故障模式模型, 分析其在各种故障模式下的性能指标, 为操纵机构后续设计提供依据。

1 驾驶杆操纵机构系统介绍

1.1 驾驶杆操纵机构

新型驾驶舱操纵机构包括配平机构、超控杆机

构以及左右驾驶杆控制机构。配平机构是对驾驶杆杆力进行配平。超控杆机构连接左右驾驶杆控制机构。左右驾驶杆机构控制升降舵,对飞机进行俯仰操纵^[7]。

1.2 驾驶杆力组成

与机械类操纵飞机相比,电传飞机的飞行员不能直接感受到飞机的舵面载荷^[8-9],为了避免飞行员出现错误操纵而影响飞行安全,合理的驾驶杆力是电传飞机的一个重要组成部分^[10]。电传飞机力感系统主要包括静态力感系统和动态力感系统。

(1) 静态力感系统与驾驶杆操纵位移有关,主要包括启动力、弹簧力和动摩擦力^[3]。

启动力,又称定中力,具有操纵器件维持中立位置的特性。启动力主要来自机械系统本身的静摩擦力和预紧力,例如飞行员操纵驾驶杆由静止到运动会有一个操纵力,即启动力。

弹簧力,模拟飞行员因操纵位移变化而产生的舵面载荷变化。其本质是由弹簧的弹性形变引起的,操纵位移越大所需的操纵力越大。

动摩擦力是由系统机械特性所决定,与接触面表面的粗糙程度和相对压力有关,通常操纵力越大,动摩擦力越大。对于飞机做大幅度动作(例如空中防撞)时,动摩擦相对变大。

(2) 动态力感系统主要是阻尼力,与操纵速度有关系。运动速度越大,阻尼力越大^[11]。

感觉力包线如图 1 所示。

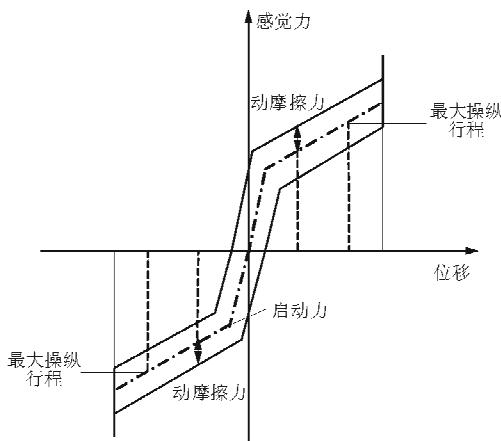


图 1 感觉力包线

Fig. 1 Feel force envelope

2 驾驶杆操纵机构建模

2.1 驾驶杆操纵机构正常模式建模

为了建立操纵机构故障模式模型,首先需要建立正常模式下的模型。

只有在杆运动速度不为 0 时,动态力感(即阻尼力)才会存在^[12]。本文是基于静平衡,在驾驶杆的阻尼力为 0 的条件下建立操纵机构模型,此时可以将驾驶杆操纵机构等效为两个驾驶杆控制机构弹簧和一个超控杆弹簧^[13],如图 2 所示。

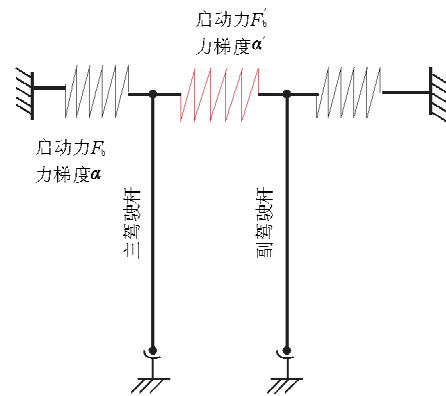


图 2 正常模式驾驶杆操纵机构等效物理模型

Fig. 2 The equivalent physical model of column control mechanism of the normal mode

若驾驶杆位于某一确定位置,则驾驶杆处的操纵力为单侧驾驶杆控制机构输出弹簧力的 2 倍^[14]。由此可以建立正常模式下的杆力-杆位移曲线,如图 3 所示。

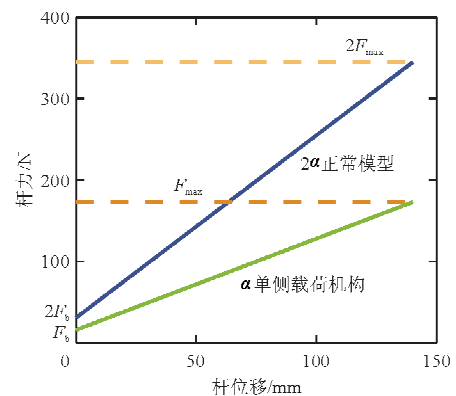


图 3 正常模式下的杆力-杆位移曲线

Fig. 3 Column force and column displacement curve of normal model

2.2 驾驶杆操纵机构故障模式类型

根据驾驶舱操纵机构的组成可知,其主要存在以下三类故障:

(1) 配平模块故障:配平模块故障无法配平驾驶杆的操纵力,使得飞行员只能一直带杆飞行,增加飞行员的飞行负担。

(2) 超控杆故障:超控杆故障分为超控杆卡阻和超控杆断裂。

①超控杆卡阻:超控杆卡阻时,驾驶杆两侧仍可正常操作,只是当一侧驾驶杆卡阻时,超控杆无法再断开。此故障工况下的模型等效为正常模式下的杆力—杆位移模型,如图 3 中 2α 正常模式,即飞行员的操纵力等于正常模式下两侧驾驶杆控制机构弹簧力的总和。

②超控杆断裂:超控杆断裂时,相当于两侧驾驶杆断开连接而独立操作。此故障工况下的模型则可等效为单侧驾驶杆控制机构的杆力—杆位移模型,如图 3 中 α 正常模式。

(3) 左(右)驾驶杆控制机构故障:单侧驾驶杆控制机构故障(卡阻)则通过超控杆将故障侧驾驶杆断开,一侧驾驶杆操控。由于超控杆的特殊性,本文主要对这类故障进行分析研究。

2.3 单侧驾驶杆卡阻故障模式分析与建模

当单侧驾驶杆卡阻时,驾驶杆操纵机构相当于正常一侧的驾驶杆控制机构加上超控杆,其等效物理模型如图 4 所示。

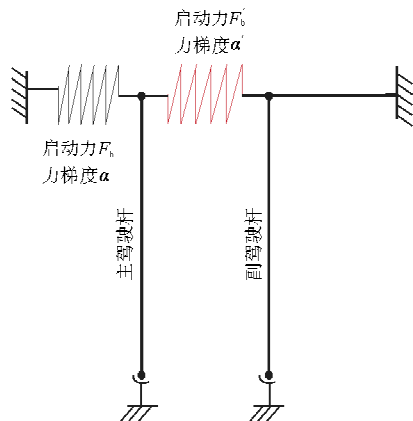


图 4 单侧驾驶杆卡阻时操纵机构等效物理模型
Fig. 4 The equivalent physical model of column control mechanism(one column jam mode)

根据超控杆的物理特性,超控杆弹簧的中立点随着卡阻位置不同而不同,可将其故障模式分为以下五种:

(1) 卡阻前推

假设单侧驾驶杆控制机构的力梯度为 α ,则正常模式下驾驶杆的力梯度为 2α 。当单侧驾驶杆卡阻时,当前时刻驾驶杆卡阻力 $F_{\alpha_{jam}}$ 。当飞行员推杆时,飞行员需克服超控杆的超控力 F'_0 和当前时刻驾驶杆的卡阻力 $F_{\alpha_{jam}}$,超控后的驾驶杆的力梯度为单边超控杆的力梯度加上单侧驾驶杆控制机构的力梯度,即 $\alpha+\alpha'$ 。驾驶杆杆力—杆位移特性如图 5 所示。

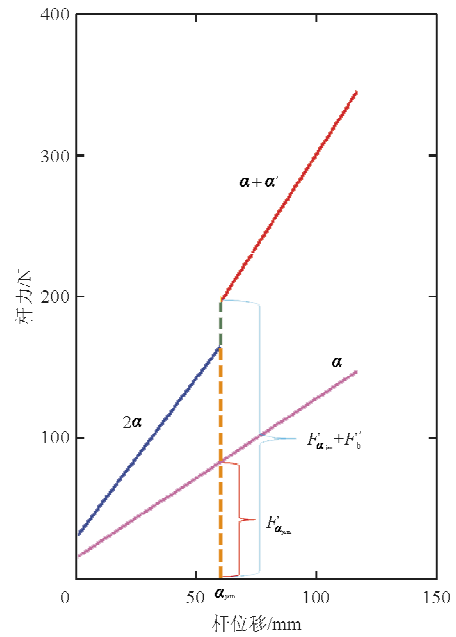


图 5 前推卡阻在中间位置的杆力—杆位移模型
Fig. 5 Column force and displacement model of push and jam in the middle position

(2) 卡阻后拉

当飞行员在卡阻位置拉杆时,此时单侧驾驶杆的卡阻力是帮助飞行员实现超控的,所以此时飞行员需要克服的力为超控力 F'_0 减去当前时刻的驾驶杆卡阻力 $F_{\alpha_{jam}}$,超控后的力梯度为超控杆的力梯度减去单侧驾驶杆控制机构的力梯度,即 $\alpha'-\alpha$ 。驾驶杆杆力—杆位移特性如图 6 所示。

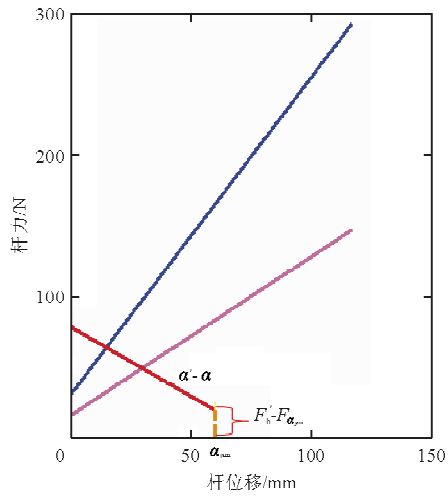


图 6 后拉卡阻在中间位置的杆力—杆位移模型
Fig. 6 Column force and displacement model of pull and jam in the middle position

(3) 前极限卡阻

这属于飞行员在单侧驾驶杆卡阻时进行后拉动作的极限情况。

(4) 后极限卡阻

这属于飞行员在单侧驾驶杆卡阻时进行前推动作的极限情况。

(5) 配平卡阻

这是飞行员在驾驶杆进行杆力配平后,单侧驾驶杆卡阻的情况。这种情况相当于第(1)和第(2)类情况按照配平位置的平移,该情况下的杆力—杆位移模型如图 7~图 8 所示。

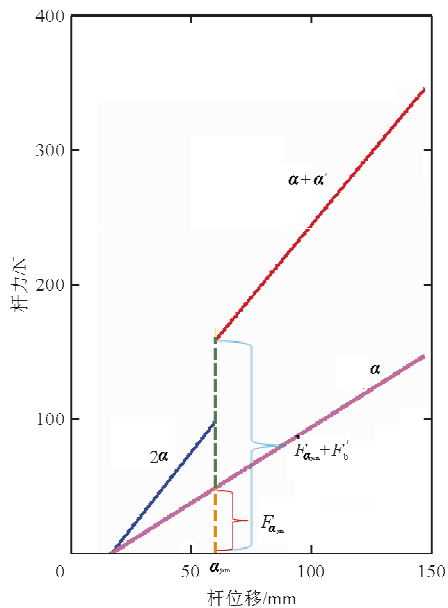


图 7 前推卡阻在配平中间位置的杆力—杆位移模型
Fig. 7 Column force and displacement model of push, jam and trim in the middle position

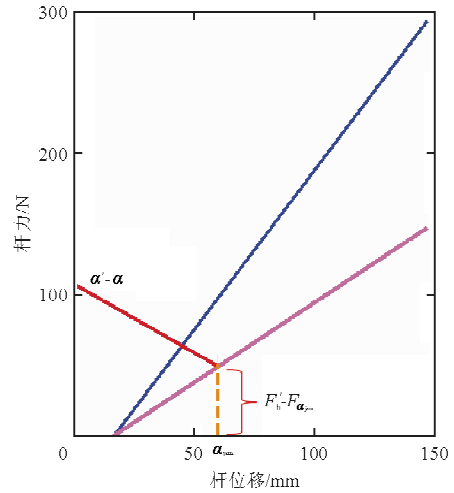


图 8 后拉卡阻在配平中间位置的杆力—杆位移模型
Fig. 8 Column force and displacement model of pull, jam and trim in the middle position

3 操纵机构故障模式飞行品质评估

杆力—杆位移特性的好坏直接影响飞机的俯仰操纵品质。对于不同的故障模式,杆力—杆位移特性会发生较大的变化。

3.1 飞行品质要求

杆力过载梯度是衡量飞机做机动飞行时杆力特性好坏的一个重要指标,杆力过载梯度品质要求如表 1 所示^[15]。

表 1 杆力过载梯度品质要求
Table 1 Handling qualities requirement column force overload gradient

飞行品质等级	杆力过载最大梯度	杆力过载最小梯度
等级 1	$\frac{2\ 270}{n}$ 但不大于 540 也不小于 360	107
等级 2	$\frac{3\ 500}{n}$ 但不大于 825 也不小于 550	91
等级 3	1 090	23

3.2 故障模式飞行品质评估结果

选取巡航前单侧驾驶杆重心的不同高度、不同速度状态点对不同故障工况来进行品质评估,如图 9~图 13 所示。

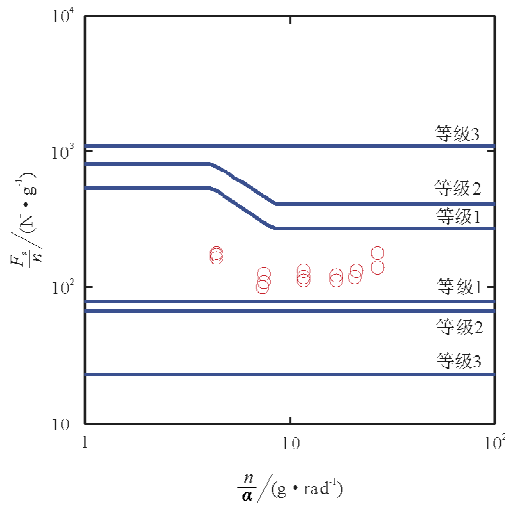


图 9 卡阻在中立位置杆力过载梯度
Fig. 9 Column force overload gradient jam in the neutral position

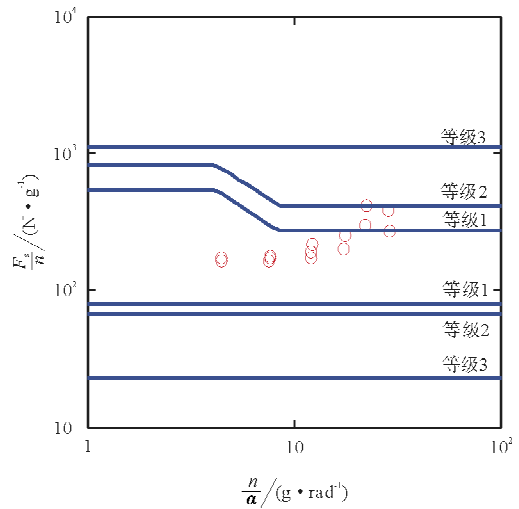


图 12 30 mm 配平加后极限卡阻杆力过载梯度
Fig. 12 Column force overload gradient jam in the 30 mm trim and back limit position

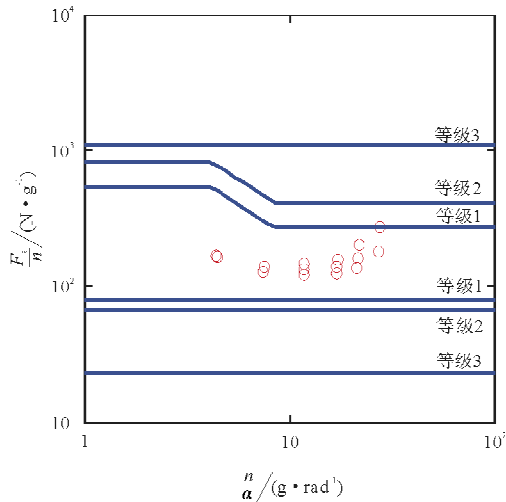


图 10 卡阻在后极限位置的杆力过载梯度
Fig. 10 Column force overload gradient jam in the back limit position

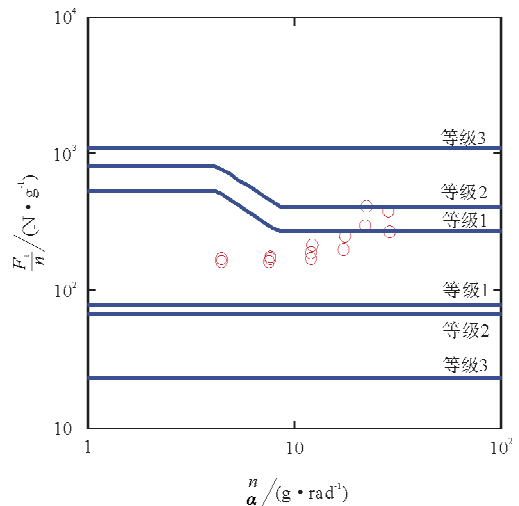


图 13 -40 mm 配平加前极限卡阻杆力过载梯度
Fig. 13 Column force overload gradient jam in the -40 mm trim and front limit position

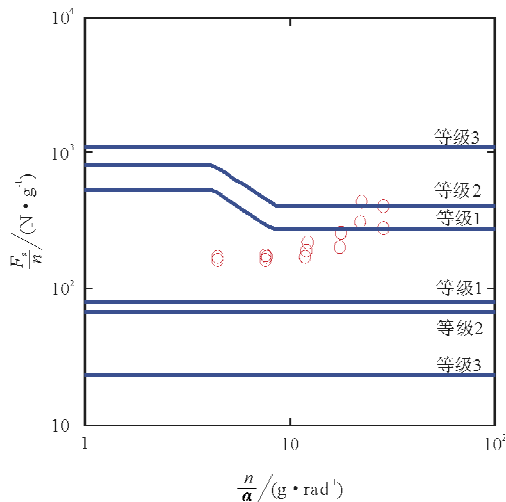


图 11 卡阻在前极限位置的杆力过载梯度
Fig. 11 Column force overload gradient jam in the front limit position

从图 9~图 13 可以看出:选取的巡航前重心状态点的杆力特性大部分落到一级品质区,少数落到二级品质区域,卡阻在中立位置时杆力特性优于其他工况,都在一级品质范围内;配平加卡阻工况下的杆力特性略差于其他工况,该问题可以对杆力进行一些补偿来改善故障模式下的品质。

4 结 论

本文对一种新型超控杆式驾驶杆操纵机构进行分析,并根据其原理建立不同工况下的数学模

型,依靠杆力-杆位移数学模型对其杆力特性进行仿真评估。

超控杆式驾驶杆操纵机构在故障模式下的杆力过载特性在大部分工况下是可以达到一级品质,对于二级品质情况可以从减小超控杆的超控力、驾驶杆控制机构和超控杆的力梯度来进行改善,因此这种新型操纵机构是可以实际应用的。

参考文献

- [1] 宋翔贵,张新国.电传飞行控制系统[M].北京:国防工业出版社,2003:7-9.
Song Xiangui, Zhang Xinguo. Fly-by-wire flight control system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 7-9. (in Chinese)
- [2] 沈永奎,吴梅,陈澜,等.飞机操纵系统建模与仿真[J].火力与指挥控制,2005,30(3):98-104.
Shen Yongkui, Wu Mei, Chen Lan, et al. Modeling and simulation of vehicle control system[J]. Fire Control and Command Control, 2005, 30(3): 98-104. (in Chinese)
- [3] 李浩,王海燕.电传操纵系统在民用客机中的新发展[J].中国民航学院学报,2000,18(3):8-11.
Li Hao, Wang Haiyan. New development in the fly-by-wire system of civil airlines[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2000, 18(3): 8-11. (in Chinese)
- [4] 郑淑涛,廖峰,王立文.飞行模拟机操纵负荷系统试验研究[J].系统仿真学报,2008,20(4):965-969.
Zheng Shutao, Liao Feng, Wang Liwen. Experiment and study of control loading system in flight simulator[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(4): 965-969. (in Chinese)
- [5] 张冲,薛瀛,郭建伟.民航客机驾驶杆操纵机构脱开力仿真研究[J].科技创新导报,2013(26):23-24.
Zhang Chong, Xue Ying, Guo Jianwei. Simulation research on disengagement force of column mechanism of civil aircraft[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(26): 23-24. (in Chinese)
- [6] 于黎明,王占林,裘丽华.飞机操纵系统建模及降阶仿真研究[J].计算机仿真,2000,17(3):15-18.
Yu Liming, Wang Zhanlin, Qiu Lihua. The modeling and simulation of vehicle control system[J]. Computer Simulation, 2000, 17(3): 15-18. (in Chinese)
- [7] 田金强,薛瀛,郭建伟.电传飞控驾驶杆操纵系统的动力学仿真分析[J].民用飞机设计与研究,2012,25(3):53-56.
Tian Jinqiang, Xue Ying, Guo Jianwei. The kinetics simulation of fly-by-wire aircraft control column system[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2012, 25(3): 53-56. (in Chinese)
- [8] 张玉松.飞行模拟器电动式操纵负荷系统研究[D].天津:中国民航大学,2009.
Zhang Yusong. Study on control loading system in flight simulator base on the electro-motive[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2009. (in Chinese)
- [9] 孙国庆,吕明.电传操纵系统的分析[J].机械与电子,2008(1):444.
Sun Guoqing, Lü Ming. Analysis of fly-by-wire control system[J]. Mechanical and Electronic, 2008(1): 444. (in Chinese)
- [10] 王君龙.飞机主动驾驶杆机械结构与控制方案研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.
Wang Junlong. Research on mechanism structure and control scheme of active side-stick in aeroplane[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [11] 王婷,邹泉,刘艳.民用飞机飞控系统主舵面卡阻试飞方法研究[J].航空工程进展,2014,5(3):343-349.
Wang Ting, Zou Quan, Liu Yan. Flight test method study on civil aircraft primary flight control surfaces jamming[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(3): 343-349. (in Chinese)
- [12] 张芳.电传飞控系统在驾驶舱的操纵器件分析[C].北京:中国航空学会,2014.
Wang Fang. The operating components in cockpit of fly-by-wire flight control system research[C]. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [13] 林丰俊.CRJ200飞机飞行操纵系统设计分析[J].上海:民用飞机设计与研究,2001(4):32-39.
Lin Fengjun. Design and analysis of CRJ200 aircraft flight control system[J]. Shanghai: Civil Aircraft Design and Research, 2001(4): 32-39. (in Chinese)
- [14] 丁佐权.飞机主动驾驶杆控制系统的研究与实现[D].南京:南京航空航天大学,2011.
Ding Zuoquan. Active side-stick control system for aeroplane[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [15] 高金源,李陆豫,冯亚昌.飞机飞行品质[M].北京:国防工业出版社,2003:31-47.
Gao Jinyuan, Li Luyue, Feng Yachang. Aircraft handling qualities[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 31-47. (in Chinese)

作者简介:

王婧茹(1987—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞行建模与控制仿真。

王博(1983—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行操纵与控制。

王宜芳(1962—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行操纵与控制。

(编辑:赵毓梅)