

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.06.034

飞机方向舵卡阻对飞行安全的影响分析

伍智敏^{1,*}, 席锋¹, 薛帅²

1. 航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

2. 中航飞机西安民机有限责任公司, 陕西 西安 710089

摘要: 针对飞机方向舵出现卡阻时对飞机飞行安全性的影响问题, 对空中及地面不同飞行阶段的飞行情况进行仿真计算, 得到方向舵出现卡阻的偏角范围, 给出了飞机在方向舵卡阻时的安全等级。并在工程模拟器上进行了方向舵卡阻安全性试飞验证, 结果表明, 分析结果与试飞结果一致, 该分析方法和思路正确, 可用于飞机的安全性分析。

关键词: 方向舵卡阻; 安全性; 操纵性; 稳定性; 仿真

中图分类号: V249.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 06-0034-04

方向舵作为飞机航向轴的主操纵面, 其主要作用是对飞机进行偏航操纵, 产生和修正偏航。在飞行中若出现方向舵卡阻, 对飞机的横航向操纵性和稳定性会产生较大的影响, 严重时威胁飞机的飞行安全。

飞机安全性分析是型号研制中不可或缺的重要部分, 如何准确地给出故障模式下的安全性影响分析, 是飞机设计师们必须面对的难题。目前, 国内对有关舵面卡阻的安全性影响分析尚处于起步和摸索阶段, 具体的研究报道不多。本文通过仿真计算, 分析不同飞行状态下方向舵卡阻对飞机安全性的影响。再经工程模拟器试飞, 对飞机方向舵卡阻的安全性影响进行验证。

1 飞机安全性的影响等级

飞机安全性影响等级判定标准划分为等级 1~ 等级 5 共 5 个等级, 按失效状态与安全等级一一对应分为灾难的、危险的、较大的、较小的和无安全性影响 5 类; 按对飞机的影响分为飞机损毁、极大降低功能或安全裕度、显著降低功能或安全裕度、轻微降低功能或安全裕度和对运行或安全性没有影响 5 个方面。

安全等级的给出需尽量合理, 因为过高的安全等级需要更高的系统可靠性, 这会影响研发和制造的成本, 过低的

安全等级则会影响飞机的飞行安全。

2 方向舵卡阻分析情况的选择及安全性分析

方向舵卡阻在空中和地面两个飞行阶段均可能出现, 因此, 需对空中及地面卡阻情况分别进行分析。在分析方向舵卡阻的安全性影响时, 不考虑临界发动机停车和大侧风情况, 因为这属于单点事故的叠加。按照安全性的规范要求, 必须考虑 5.14 m/s 的小侧风情形。

2.1 空中卡阻

在空中出现方向舵卡阻时的飞行阶段包括: 起飞、起飞爬升、爬升、巡航、下降、进近、着陆、复飞等。

在空中飞行出现方向舵卡阻时, 其产生的侧滑所引起的横向力矩需要由副翼来平衡, 副翼不仅要平衡侧滑引起的滚转力矩, 还需要留有一定的余量进行滚转操纵。方向舵卡阻的角度, 在分析过程中, 不能简单地按极限偏转角度来给出, 需要根据具体情况进行计算分析。

本文以某涡浆民用飞机为例, 根据文献[1]~ 文献[3]建立的仿真模型, 进行了大量的仿真计算。图 1 给出了空中不同试飞科目下计算出的方向舵卡阻的极限偏度 δ_r 的离散值, 根据这些离散点绘制出不同速度 V_{EAS} 下方向舵卡阻的极值边界。图 2 给出了在空中不同速度 V_{EAS} 方向舵出现卡

收稿日期: 2017-03-06; 退修日期: 2017-04-19; 录用日期: 2017-05-02

* 通讯作者. Tel.: 029-86832287 E-mail: 22640208@qq.com

引用格式: WU ZhiMin, XI Feng, XUE Shuai. Analysis of flight safety with jammed rudder [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (06): 34-37. 伍智敏, 席锋, 薛帅. 飞机方向舵卡阻对飞行安全的影响分析 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (06): 34-37.

阻时,副翼配平和操纵的极限偏角 δ_a ,图 3 给出了在空中方向舵卡阻时,使用副翼操纵产生的偏航角 φ 和滚转角 ϕ 的仿真时间历程曲线。从图 2 中可知,副翼配平偏度较小,副翼操纵仍然具有一定余量。由图 3 中可知,在方向舵卡阻时,飞机能产生正负偏航和正负滚转,说明飞机依然具有偏航和滚转能力。

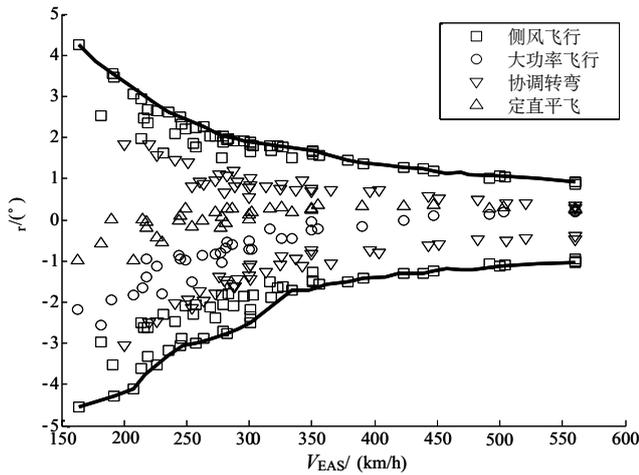


图 1 空中不同试飞科目方向舵卡阻的极限偏度
Fig.1 The extremum of jammed rudder deflections in different flight test subjects

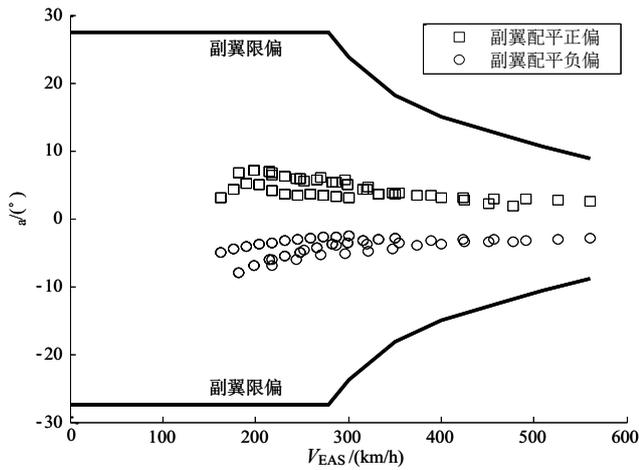


图 2 空中方向舵卡阻时,副翼配平和操纵的极限偏角
Fig.2 The maximum trimming and operating deflections of aileron when the rudder is jammed in flight

根据上述分析可知,该飞机在空中方向舵卡阻时,副翼可以保证飞机定直飞行和转弯,明显地降低了飞机的滚转操纵性能,增加了飞行员的操纵负担。因此,飞机在起飞、起飞爬升、爬升、巡航、下降、进近、着陆、复飞时遇到方向舵卡阻,其安全等级可设置为等级 3。

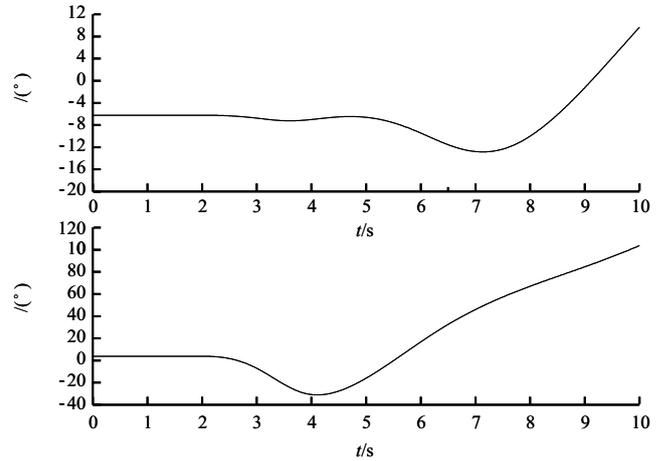


图 3 空中方向舵卡阻时,副翼操纵仿真时间历程曲线
Fig.3 Time history of aileron operation simulation when the rudder is jammed in flight

2.2 地面卡阻

在地面出现方向舵卡阻时的飞行阶段包括:滑出、起飞滑跑、起飞、中止起飞、着陆、着陆滑跑、滑入等。

飞机在滑出、滑入、中止起飞期间出现方向舵卡阻,由于飞机速度不高,方向舵卡阻产生的偏航力矩较小,前轮转弯,差动刹车的能力较强,飞机航向纠偏能力充足。虽然方向舵卡阻降低了飞机的偏航操纵能力,采用差动刹车等措施可以满足航向纠偏要求^[4,5],但会给飞行员增加操纵负担,安全等级在等级 3 和等级 4 之间,其安全等级可以考虑设置为等级 3。

在地面起飞滑跑阶段遇到方向舵卡阻,若在飞机抬起前轮之前,前轮转弯尚有一定的纠偏能力,采用差动刹车也可纠偏。飞机在抬起前轮之后和腾空前,前轮转弯能力丧失,差动刹车能力逐渐降低,飞机会发生航向变化,但由于飞机很快进入空中,就可用副翼控制航向。因此,在地面起飞滑跑阶段遇到方向舵卡阻,会显著增加飞行员的操纵负担,但不会出现危险情况,安全等级可设置为等级 3。

在地面着陆阶段出现方向舵卡阻情况最为危险。方向舵卡阻情况下着陆接地如图 4 所示,此时若要保持飞机速度方向和跑道方向一致,飞机和跑道方向之间会有一个夹角,该角称为偏流角,也称为交叉角。对于着陆时的交叉角,空客飞机一般推荐着陆接地的交叉角绝对值最大不超过 5°。在接地时,若轮胎和跑道的夹角较大,会导致飞机主起落架的损坏。

根据图 1 的计算结果和基于驾驶员操纵引起的超调量考虑,某型民用飞机着陆时方向舵卡阻的极值选为 6°,在无风着陆、带 5.14m/s 侧风着陆时交叉角计算结果如表 1,表 2 所示。由表 1 可知,方向舵卡阻着陆时,无风时机体轴和跑

道中心线的交叉角为 10° 左右; 在有 5.14m/s 侧风条件下方向舵卡阻着陆, 方向舵后缘顺风时的交叉角要远比迎风时小很多, 其值为 5° 左右。因此, 在方向舵卡阻且又有侧风的情况下, 在选择跑道方位时, 方向舵后缘要尽量顺风; 在有侧风条件下, 方向舵卡阻偏度在 0° 时的交叉角为 6° 左右。这些交叉角绝对值大部分都超出了 5° , 在这些情况下着陆, 飞机的主起落架会受损, 安全等级为等级 2。

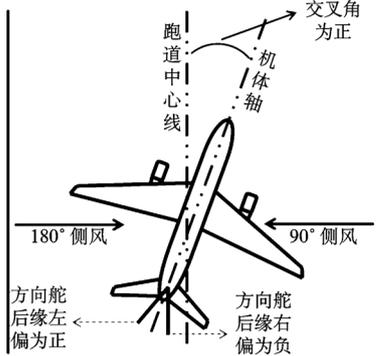


图4 方向舵卡阻着陆接地示意图
Fig.4 Landing with jammed rudder

表1 带交叉角着陆计算结果 (90° 侧风)

Table 1 The calculation result of drift angle for landing (crosswind angle is 90°)

飞行状态	交叉角 / ($^\circ$)			
	0m/s 侧风	5.14m/s 侧风		
	方向舵卡阻偏度 -6°	方向舵卡阻偏度 6°	方向舵卡阻偏度 -6°	方向舵卡阻偏度 0°
最小飞行重量	10.1	-2.6	16.8	5.6
最大重量前重心	10.6	-4.2	15.5	4.2
最大重量后重心	11.4	-4.6	16.2	4.2
中等重量前重心	10.2	-3.5	15.8	4.6
中等重量后重心	11.5	-4.1	16.6	4.6

表2 带交叉角着陆计算结果 (180° 侧风)

Table 2 The calculation result of drift angle for landing (crosswind angle is 180°)

飞行状态	交叉角 / ($^\circ$)			
	0m/s 侧风	5.14m/s 侧风		
	方向舵卡阻偏度 6°	方向舵卡阻偏度 6°	方向舵卡阻偏度 -6°	方向舵卡阻偏度 0°
最小飞行重量	-9.1	-15.6	3.8	-7.4
最大重量前重心	-9.4	-14.4	5.3	-6.0
最大重量后重心	-9.9	-14.8	6.0	-6.0
中等重量前重心	-9.2	-14.6	4.8	-6.4
中等重量后重心	-9.8	-15.2	5.6	-6.4

3 模拟器试验验证

在某型民用飞机的工程模拟器上已经初步完成了方向舵卡阻安全性试飞。图5给出方向舵卡阻 6° 时在空中时飞机的偏航角和滚转角变化模拟器试飞曲线, 根据曲线可知, 飞机能产生正负偏航和正负滚转, 说明飞机依然具有偏航和滚转能力, 与理论计算得到的结论一致。试飞员认为空中方向舵卡阻, 可以用副翼修正航向, 不会发生危险, 只是增加了飞行员的工作负担。图6给出在着陆接地前, 交叉角随时间变化的模拟器试飞曲线, 由图6可见, 试飞数据和计算结果大部分比较吻合, 小部分与计算值稍有些差异的原因是, 计算结果是平衡时的静态值, 而飞行员总是时刻在平衡值附近来回调整的缘故。试飞员认为在着陆时如果出现方向舵卡阻, 飞机需要带一定的交叉角着陆, 但主起落架存在损坏的可能, 试飞结论和本文给出的结论一致。

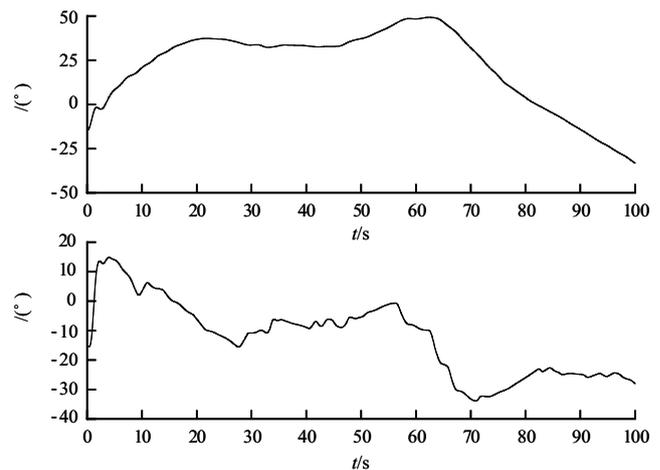


图5 空中方向舵卡阻模拟器验证试飞数据
Fig.5 The simulator test data of jammed rudder in flight

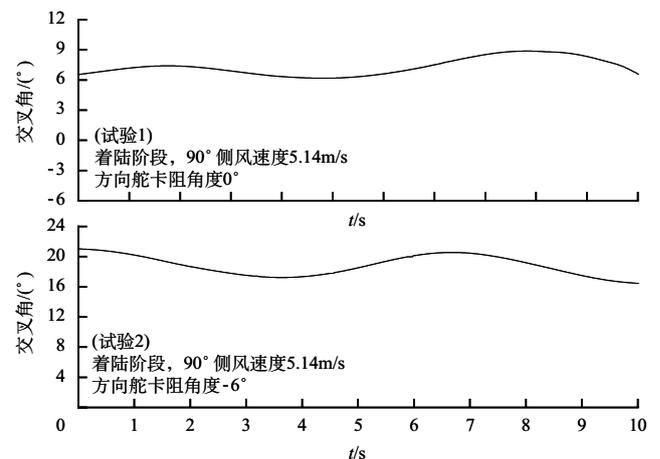


图6 接地前方向舵卡阻模拟器验证试飞数据
Fig.6 The simulator test data of jammed rudder before touch down

4 结束语

飞机方向舵卡阻,无论是发生在空中还是地面,均会对飞机的横航向操稳特性带来较大的影响,威胁飞机的飞行安全。通过对某型民用飞机按不同飞行阶段对方向舵卡阻故障模式进行的仿真计算,分析了安全性影响,并且在工程模拟器上进行了方向舵卡阻安全性试飞验证。结果表明,本文的分析方法合理、可靠,可以作为其他型号方向舵卡阻安全性分析参考的依据。

AST

参考文献

- [1] 李超. 基于 Matlab 的某型固定翼飞行器飞行仿真系统开发[J]. 系统仿真学报, 2013, 25 (8): 1772-1777.
LI Chao. Development of fixed wing aircraft flight simulation system based on Matlab[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25 (8): 1772-1777. (in Chinese)
- [2] 武虎子,唐长红,李伟,等. 飞机升降舵非指令偏转对飞行安全的影响分析[J]. 飞行力学, 2012, 30 (6): 507-510.
WU Huzi, TANG Changhong, LI Wei, et al. Analysis of influence of elevator non-instruction deflection of aircraft on flight safety[J]. Flight Dynamics, 2012, 30 (6): 507-510. (in Chinese)
- [3] 刘小雄,邱岳恒,刘世民,等. 操纵面故障对飞行包线的影响研究[J]. 飞行力学, 2012, 30 (2): 128-131.
LIU Xiaoxiong, QIU Yueheng, LIU Shimin, et al. Research for flight envelope effect of the control surface fault[J]. Flight Dynamics, 2012, 30 (2): 128-131. (in Chinese)
- [4] GJB185—86 有人驾驶飞机(固定翼)飞行品质[S].1986.
GJB185—86 Flying qualities of piloted airplanes (fixed wing) [S]. 1986. (in Chinese)
- [5] CCAR-25-R4 中国民用航空规章第 25 部: 运输类飞机适航标准[S].2011.
CCAR-25-R4 China civil aviation regulations (Part 25): Airworthiness standards transport category airplanes[S]. 2011. (in Chinese)

作者简介

伍智敏(1984—) 男,学士,工程师。主要研究方向: 飞行力学。

Tel: 029-86832287

E-mail: 22640208@qq.com

席锋(1983—) 男,硕士,工程师。主要研究方向: 飞行力学。

薛帅(1983—) 男,学士,工程师。主要研究方向: 飞行力学。

Analysis of Flight Safety with Jammed Rudder

WU ZhiMin^{1,*}, XI Feng¹, XUE Shuai²

1. AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

2. AVIC Aircraft Xi'an Commercial Aircraft Company Limited., Xi'an 710089, China

Abstract: In order to analyze the flight safety of aircraft with jammed rudder, some simulation and calculation in flight and on ground were carried out. The likely deflections of jammed rudder were calculated and the flight safety was analyzed as well. The safety test of jammed rudder was made by using the engineering simulator. The result supports the analysis of this article. The method can be used for flight safety analysis of jammed rudder.

Key Words: jammed rudder; safety; controllability; stability; simulation

Received: 2017-03-06; Revised: 2017-04-19; Accepted: 2017-05-02

*Corresponding author. Tel.: 029-86832287 E-mail: 22640208@qq.com