

运输类飞机 PIO 试飞方法研究

Flight Test Method Research on Pilot Induced Oscillation of Transport Category Airplanes

米 毅 刘庆灵 / Mi Yi Liu Qingling
(中国商飞民用飞机试飞中心, 上海 200232)
(COMAC Flight Test Center, Shanghai 200232, China)

摘 要:

基于 CCAR-25-R4《运输类飞机适航标准》要求,结合 FAA 咨询通告 AC25-7C《运输类飞机合格审定飞行试验指南》,叙述了驾驶员诱发振荡(PIO)的分类,以及运输类飞机 PIO 的合格审定试飞要求,分析了 PIO 试飞方法、试验点的选取原则、试飞评定准则、注意事项和风险规避措施等,可为民用飞机的 PIO 试飞提供参考。

关键词: PIO; 开环操纵; 闭环操纵; 人机系统

中图分类号: F41

文献标识码: A

[Abstract] Based on the CCAR-25-R4 “Airworthiness Standards of Transport Category Airplanes” and FAA advisory AC25-7C “Flight Test Guide for Certification of Transport Category Airplanes”, this paper specifies the requirements of airworthiness and the classification of pilot induced oscillation (PIO). The paper also gives analysis on the flight test method of PIO and principles of flight test points’ selection, the safety procedures during PIO flight test and evaluation criteria. The research can provide guidance for the PIO flight test of the civil airplanes.

[Key words] pilot induced oscillation(PIO); open-loop operation; closed-loop operation; pilot-vehicle system

0 引言

在人机闭环操纵情况下,由于人机系统相互作用而导致的非期望的振荡或发散运动,这种现象被称为驾驶员诱发振荡^[1-2](Pilot Induced Oscillation, 简称 PIO)。在民机设计安全性、经济性和舒适性要求中,安全性是首要和关键要求,而驾驶员诱发振荡一直是关乎航空飞行器安全的重要因素之一。历史数据表明,几乎所有部分或完全采用电传飞控系统的飞机在研制阶段都发生过 PIO^[3]。特别是近年来航空技术的飞速发展及电传飞控系统、主动控制技术的应用,使得飞行控制系统越来越复杂。在一定的使用和飞行条件下,由于操纵系统的非线性、舵机速率限制、飞机响应延迟、飞控模式转换等各种因素,电传飞控系统相对于传统机械操纵系统更易导致 PIO 事件或产生 PIO 趋势。

CCAR25 部 § 25.143(a) 和 (b) 规定,在任何可能的使用条件下飞机必须可安全操纵和机动,而不需要超常的驾驶技能,也不会有超过飞机限制载荷系数的危险。历史事件表明,在某些使用条件下,

现代运输类飞机可能易受飞机-驾驶员耦合(Aircraft Pilot Coupling, 简称 APC)的影响而不满足该款规定。因此,飞机型号合格证申请人需要通过飞行试验等方式确定飞机遇到不利 PIO 趋势的可能性为最小^[4]。

1 典型 PIO 事件及 PIO 的分类

国外早在上世纪就开展了 PIO 的研究。图 1 为某型电传飞机发生 PIO 时的杆力-俯仰姿态历程曲线^[5]。如图 1 所示,从 35s 开始,由于驾驶员的杆输入和俯仰姿态出现延迟,驾驶员继续增加输入的幅值,从 37s 开始,飞机的输入达到最大并和俯仰姿态呈反相,最终发展成严重 PIO 事件。

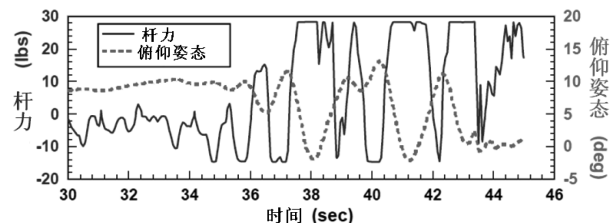


图 1 某型电传飞机 PIO 事例

为了更好地理解 PIO 事件, Duane McRuer 根据 PIO 产生的原因将 PIO 事件分成了三类^{[1][6]}: I 型 PIO 为线性的人机系统振荡, 此类 PIO 是由过大的时间延迟、各种滤波器产生的过大的相位滞后和不适当的控制/响应灵敏度等引起的。II 型 PIO 为准线性人机系统振荡, 带有一定的非线性因子如速率或位置限制, 此类 PIO 存在非线性引起的附加延迟。III 型 PIO 为瞬态变化的非线性人机系统振荡, 此类 PIO 事件高度非线性, 难于辨识, 很少发生但通常很严重, 它是由飞行力学、飞机或驾驶员状态发生变化而引起的振荡。

经过多年研究, 国内外先后形成了比较成熟的 PIO 预测准则。常用的 I 型 PIO 预测准则主要有: 带宽/俯仰速率超调准则、频域 Neal-Smith 准则、Gibson 相位速率/增益准则等。II 型 PIO 预测准则主要有: 带宽/俯仰速率超调准则、开环触发点 (Open Loop Onset Point, 简称 OLOP) 准则、时域 Neal-Smith 准则等。

其中, 频域 Neal-Smith 准则是通过单位输入的闭环俯仰操纵响应中的幅值和相位延迟来评定操纵品质和 PIO 级别, 该准则的应用需要建立精确的飞行员模型。PIO 的发生通常由驾驶员操纵的增益和相位补偿引起, Gibson 相位速率/增益准则, 通过驾驶员操纵在接近短周期共振频率时的开环增益和相位特性来进行操纵品质判别。带宽/俯仰速率准则是基于频域 Neal-Smith 准则的改进准则, 可用于不同类型飞机 I 型和 II 型 PIO 的评价和预测, 其原理是计算开环俯仰姿态频率响应以得出系统开环系统带宽 ω_{BW} 和俯仰姿态相位延迟 τ_{ph} , 并结合飞机航迹响应带宽 ω_{BW_y} 、俯仰速率超调 $\Delta G(q)$ 和中立稳定频率 ω_{180} 来评估飞机的操纵品质和 PIO 趋势^[7], 如图 2 所示。

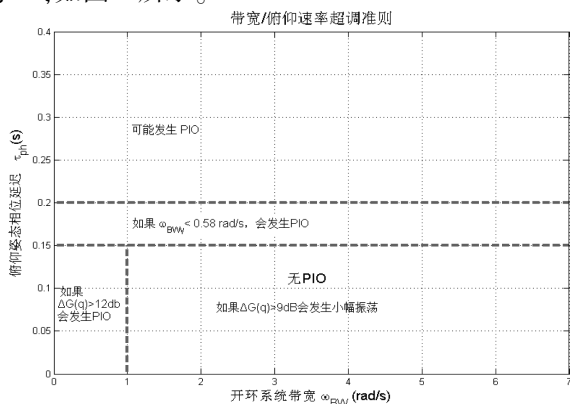


图 2 带宽/俯仰速率超调准则

ω_{BW} 是俯仰姿态对驾驶杆输入的开环系统相位裕度为 45° 或增益裕度为 6db 时的频率 (取小值), 这是假设飞行员的操纵有可能会引起 45° 的相位延迟或增加 1 倍的输入增益; τ_{ph} 是在 ω_{180} 处的相位延迟; ω_{BW_y} 是飞机航迹对驾驶杆输入的开环系统相位裕度为 45° 时的频率; $\Delta G(q)$ 是在频域中俯仰角速率传递函数高频率俯仰模态 (短周期模态) 的超调值; ω_{180} 是相位为 -180° 时的频率。

2 适航条款要求及分析

2.1 适航条款

CCAR-25-R4 在 25.143(a)(b) 中对飞机的操纵性和稳定性提出了如下要求:

(a) 在下述过程中, 飞机必须可以安全地操纵并可以安全地进行机动:

(1) 起飞; (2) 爬升; (3) 平飞; (4) 下降; (5) 着陆。

(b) 必须能从一种飞行状态平稳地过渡到任何其它飞行状态, 而不需要特殊的驾驶技巧、机敏或体力, 并且在任何可能的使用条件下没有超过飞机限制载荷系数的危险, 这些使用条件包括:

(1) 临界发动机突然失效;

(2) 对于三发或三发以上的飞机, 当飞机处于航路、进场或着陆形态, 临界发动机停车并已配平时, 第二台临界发动机突然失效;

(3) 形态改变, 包括打开或收起减速装置。^[8]

2.2 条款分析

§ 25.143(a) 和 (b) 规定, 在任何可能的使用条件下飞机必须可安全操纵和机动, 而不需要超常的驾驶技能, 也不会有超过飞机限制载荷系数的危险。

为表明对本条款的符合性, 需在任何可能的使用条件下进行相应的操纵性和稳定性飞行试验。条款没有明确规定速度范围和包线范围, 而航线运行时, 正常情况下飞行速度不会超过 V_{MO}/M_{MO} (最大操纵速度/马赫数) 或 V_{FE} (标牌速度), 高度不会超过巡航高度。根据航线运行需求和以往试飞经验, PIO 评估任务设置应包括 V_2 (起飞安全速度) 或 V_{REF} (着陆参考速度) 到 V_{MO}/M_{MO} 或 V_{FE} 的速度包线, 并考虑机动时的速度变化, 一般留有 10kts 的速度安全余量。

CCAR25 部未给出 PIO 具体评定指标的条款, 其符合性主要通过驾驶员依据飞行品质评定方法 (Handling Quality Rating Method, 简称 HQRM) 与

PIO 评定准则的主观评定来实现。

3 试飞方法

PIO 试飞可以分为两类:一类是 PIO 专项试飞,指专门针对 PIO 进行的试飞,其任务的设计和任务点的选取应易于激发 PIO 趋势;一类是非 PIO 专项试飞,包括所有与飞行品质或者飞行特性相关的闭环操纵试飞,试飞时需对此类试飞进行全程跟踪和分析,以监控在整个试飞过程中是否发生 PIO 事件或出现 PIO 趋势。

本文着重对 PIO 专项试飞方法进行分析。AC25-7C 提出,为了确保飞机达到 § 25.143(a) 和 (b) 所要求的飞行品质,需通过试飞员执行高增益(宽带宽)闭环任务来对飞机进行评定,以确定遇到不利的 PIO 趋势的可能性为最小。在民用飞机运营中,比较普遍的高增益任务包括姿态截获、俯仰跟踪、纠偏着陆、突风颠簸和防撞规避。AC25-7C 建议对于认为是太危险以至于不能在实际飞行中尝试的状态(超出使用飞行包线的某些飞行状态、在严重大气湍流中飞行、带某些失效状态的飞行等),可使用高保真度模拟器来执行闭环评定任务,前提是证实模拟器对于所关注的飞行状态是有效的。由于按 § 25.143(a) 和 (b) 进行的飞行品质评定基本上是定性的,特别是 PIO 敏感性评定,因此在进行合格审定试飞时,这些高增益任务应至少由 3 名试飞员来完成。

对于所选定的所有任务,为保障试飞安全,应使用渐进法(Build-up approach)进行 PIO 试飞。在某些情况下,依据飞机的特性,首先考虑截获任务,然后进行精确跟踪任务,或采取粗略截获与精确跟踪任务组合的方法^[4]。

3.1 截获任务试飞方法

截获任务倾向于评估粗略截获机动飞行的飞行品质,例如俯仰姿态截获、坡度倾斜角截获、航向截获、飞行航迹角截获、迎角截获和过载 g 截获等都可以用来评定不同方面的飞机响应。这些捕获任务可得到飞机操纵品质的总体印象,但由于未涉及闭环精确跟踪,不能暴露出精确跟踪任务中可能出现的所有问题,因此不应将截获任务作为唯一的评定任务。

(1) 俯仰截获

在试验点(指定高度、速度)配平飞机水平飞行;从水平飞行快速截获 5° (或 10° , 如果配平姿态

角已超过 5°) 姿态角;然后快速操纵飞机进行俯仰姿态增量为 $\pm 5^\circ$ 的姿态截获,持续此操纵 3~5 次;如飞机无异常,继续快速操纵飞机进行俯仰姿态增量为 $\pm 10^\circ$ 的姿态截获,持续此操纵 3~5 次。如图 3 所示。具有较强能力的飞机能够以较大的俯仰偏移继续该程序。

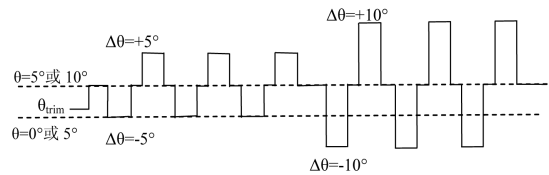


图 3 俯仰截获任务示意图

(2) 滚转截获

在试验点(指定高度、速度)配平飞机水平飞行;从 15° 坡度倾斜角开始,驾驶员使飞机快速滚转而捕获相反的 15° 坡度倾斜角(坡度倾斜角总变化量为 30°);然后,驾驶员使飞机反向横滚并捕获原方向上的 15° 坡度倾斜角,持续此操纵 3~5 次;在试验点恢复飞机水平飞行,然后使用 30° 坡度倾斜角重复此程序,然后再用 45° 坡度倾斜角重复此程序,各坡度倾斜角下持续此操纵 3~5 次。如图 4 所示。

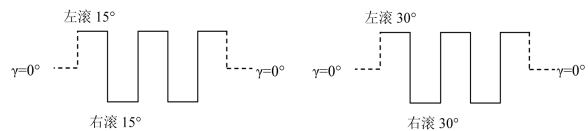


图 4 滚转截获任务示意图

(3) 偏航截获

航向捕获仅可用于评定偏航控制器(通常以 5° 或 5° 以下增量间隔使航向发生小的变化)。在试验点(指定高度、速度)配平飞机水平飞行;驾驶员蹬脚蹬使飞机航向偏转 5° , 保持机翼水平,然后精确捕捉初始航向;然后向另一方向蹬脚蹬使飞机航向偏转 -5° , 保持机翼水平,再精确捕捉初始航向。如图 5 所示。

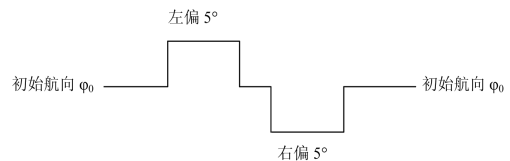


图 5 偏航截获任务示意图

3.2 精密跟踪任务试飞方法

精密跟踪任务用于评定在湍流大气条件下飞行时飞机的 PIO 敏感性。可采取俯仰跟踪任务和纠

偏着陆任务进行试验。

(1) 俯仰跟踪任务^[4]

基于历史上发生的 PIO 事件,俯仰跟踪任务(以大约 2s~5s 不同的时间间隔出现的偏离配平状态高达大约 $\pm 4^\circ$ 的俯仰偏差)对评定 PIO 敏感性是有效的。如图 6 所示,在试验点(指定高度、速度)配平飞机水平飞行,进行偏离量小于 $\pm 4^\circ$ 的俯仰姿态精密跟踪。

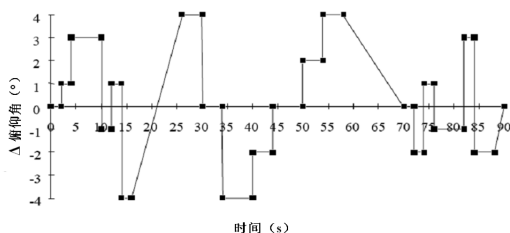


图 6 俯仰跟踪任务

在此任务中,俯仰和坡度倾斜角指令应是阶梯波形和斜坡波形的组合,且如果可能,试验时应使飞机保持试验高度 $\pm 1\ 000\text{ft}$ 和试验速度 $\pm 10\text{kn}$ 范围内。任务指令应足够长和足够复杂(以免试飞员默记而预先执行指令),这样有助于在执行任务时保持试飞员的高增益,并排除试飞员的意外补偿。这种补偿连同降低的增益,可能掩盖 PIO 倾向。

(2) 纠偏着陆任务

纠偏着陆任务是为了评估飞机在进场着陆阶段遇到不利 PIO 的可能性。此任务的试验操作程序可设置为:在试验点(指定高度、速度)设定飞机为着陆构型;右驾驶员有意地操纵飞机至正常下滑道之上 5m,偏离跑道中心线 30m,并建立 3° 稳定下滑;在高度为某一离地高度(高度设置值可根据模拟仿真结果确定,如 120m)时左驾驶员快速操纵飞机以降落在跑道中心线上。如图 7 所示。在执行任务时,需随机加入一些扰动信号,以提高驾驶员的紧张感和操纵增益,从而进入可能的 PIO 状态^[9]。

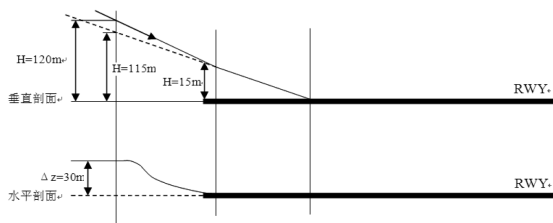


图 7 纠偏着陆任务示意图

3.3 粗略截获与精确跟踪任务组合试飞方法

根据 AC25-7C, 颠倾和/或避撞机动对于评定飞机在距抖振起始边界有小 g 裕度(一般为 $0.3g$)

的条件下作高空飞行时的 PIO 敏感性是有效的^[4]。

在试验点(指定高度、速度)配平飞机水平飞行,初始航向 180° (指定某一航向);保持发动机功率/推力不变的同时,柔和拉杆使飞机略有爬升而以大约 10 节/秒的减速率降低速度;迅速推杆建立 30° 的滚转坡度和约为 10° 的机头下俯姿态,加速至初始配平速度;在此初始配平速度下拉杆,过载约 $1.5g$ (AC25-7C 要求为 $1.5g \sim 1.67g$, 不超过抖振过载限制),并向反方向转弯捕捉飞机配平时的初始航向;沿初始航向建立俯仰姿态从而形成稳定爬升返回至初始配平高度。在这一机动过程中,驾驶员可按需要使用油门,并且应在开始机动前,挑选将要使用的目标 g 、坡度倾斜角、航向和俯仰姿态。应设定目标 g 和坡度倾斜角并严密跟踪,直至分别获得目标俯仰姿态和航向。应严密跟踪稳定的固定航向爬升,经历足够的时间,以允许驾驶员评定操纵品质,如果需要,甚至穿过初始配平高度和航向。驾驶员应在此任务的粗略捕获和精确跟踪这两个部分,对飞机进行定性评定。

4 PIO 试飞点选取原则

专项 PIO 试飞任务应选取易于诱发 PIO 的典型飞机构型和状态,以验证即使处于 PIO 敏感区,飞机的操稳特性仍满足适航条款要求。表 1 为某型飞机的 PIO 试飞姿态截获任务点安排,其试飞任务点顺序为先进行正常模式、后重心的试飞任务点,随后对正常模式下 PIO 等级评定较差的点在直接模式下进行重复试飞(表 1 中 *4(2), *5(3) 为重复正常模式试验点 2,3)。

参考表 1 中 PIO 试飞任务点的安排,考虑不同飞行控制模式、重量重心影响、飞机故障影响等因素,总结出以下选取 PIO 飞行试验点的基本原则:

(1) 通过设计仿真和风洞数据,模拟器试飞数据,按照循序渐进的原则,选取稳定裕度较低或 PIO 等级评定较差的试验点;

(2) 先进行正常模式的试飞,对正常模式下 PIO 等级评定较差的点在直接模式下进行重复;

(3) 一般选取小重量/大重量结合后重心,因为后重心稳定性较差,更易激起 PIO;

(4) 纠偏着陆时先做小重量,以降低风险。因为考虑到小重量情况下,飞机能提供更大的推重比;

(5) 需要进行故障模式下(如操纵杆断开,单个液压系统失效)的 PIO 试飞。

表 1 某型飞机 PIO 姿态截获试飞计划

试验点	起落架	襟翼	重心 (% mac)	重量 (kg)	高度 (ft)	空速 (kcas)	飞控模式	PIO 等级	驾驶员评价
1	UP	0	32.1	35 055	15 144	176	正常模式	1	
2	UP	0	31.1	36 132	40 901	239	正常模式	2	存在非期望的运动
3	UP	0	4.5	37 671	40 748	238	正常模式	3	飞机响应有延迟但可以进行姿态追踪
* 4 (2)	UP	0	31.2	35 990	40 995	240	直接模式	3	即使在飞行员增益降低后仍然存在由于飞机低头操纵引发的残余振荡
* 5 (3)	UP	0	4.4	37 805	40 986	233	直接模式	3	存在上下超调但尚属正常操纵

5 PIO 试飞评定准则

AC25-7C 提出,应使用 FAA 操纵品质评级方法(HQRM)进行飞机 PIO 敏感性评定。表 2 包含与 PIO 特性有关的说明材料及其与 MIL 1797A 所列 PIO 评级的关系。对于执行特定 PIO 任务过程中或执行整个合格审定试飞过程中可能会遇到的飞机运动,表 2 给出了 FAA 操纵品质评定^[4]说明。操纵品质评定等级随飞行包线、所考虑的大气扰动以及失效状态而变化,需根据具体的试飞情况进行评定。

6 注意事项与风险规避

执行 PIO 试飞任务时可能因为过载过大、飞控故障、飞机控制模式转换、驾驶员判断和操纵不当等原因,损坏飞机结构或诱发不利 PIO,导致飞机失控甚至坠毁。在试飞前和试飞时,应通过以下措施使风险降至最低:

(1)对风险科目风洞试验数据及理论预测计算结果进行认真分析研究,掌握并熟悉条款要求和试飞方法;

(2)针对试飞要求,对试飞员、试飞工程师和机务保障人员进行理论与试飞技术培训,试飞前向机组说明飞机的速度、迎角、滚转角、偏航角、过载限制,说明 PIO 试飞的程序及注意事项,以确保试飞安全;

(3)针对 PIO 试飞中可能出现的风险点,试飞之前,在模拟器上进行充分的试验任务演练及故障模拟演练;

(4)通过逐步逼近的方法达到化解风险的目的。截获姿态由小到大,纠偏着陆任务从飞行高度上和纠偏距离上逐步接近给定值,并实时进行评估以决定是否执行下一个任务点;

表 2 PIO 评定准则与 FAA 操纵品质评定等级对比

FAA 操纵品质评定等级	PIO 特性说明	MIL 1797A PIO 评定等级
满意的	无驾驶员诱导的非预期运动的趋势。	1
	当驾驶员起动突然的机动或试图紧密控制时,有出现非预期运动(超限)的趋势。可借助驾驶员的技术,阻止或排除这些运动(只需要极小的驾驶员补偿)。	2
合适的	当驾驶员起动突然的机动或试图紧密地控制时,易于诱导非预期运动(不可预见性,或操纵过度)。只有牺牲任务性能或通过驾驶员付出相当大注意力和努力,才可阻止或排除这些运动(只是需要很大的驾驶员补偿)。	3
可控制	当驾驶员起动突然的机动或试图紧密地控制时,有形成振荡的趋势。不能获得足够的性能,驾驶员必须降低增益来改出(仅仅通过降低增益,驾驶员才能改出)。	4
不满意或不合格的	当驾驶员起动突然的机动或试图紧密地控制时,有形成发散振荡的趋势。驾驶员必须通过松开或冻结操纵器件,使控制回路开环。	5
	扰动或驾驶员正常操纵可能引起发散振荡。驾驶员必须通过松开或冻结操纵器件,使控制回路开环。	6

(5)如在纠偏着陆时遇有重着陆,必须在飞行结束后对飞机可能的损坏进行详细检查;

(下转第 30 页)

根据 NTSB 的建议颁布了 FAR 25-130 修正案,修订目的是为了明确“机动速度”的具体含义,纠正驾驶员在实际运行中可能因错误理解“机动速度”而进行的危险操纵,从而提高飞机运行的安全水平。修正案增加了 FAR 25.1583(a)(3)(ii)对飞行手册使用限制的要求:“避免快速和大幅度交替操纵输入,尤其是大的俯仰、滚转或偏航改变的组合输入和同一时间在超过一个轴上的全行程操纵”^[1]。

在实践中,“使用机动速度”与 25.335(c)确定的“设计机动速度 V_A ”不同,过去 25 部飞机飞行手册把“使用机动速度”称为“机动速度”,并使用与设计机动速度同样符号 V_A 。对于小型飞机,23 部定义了“使用机动速度 V_0 ”,这样便把运行中的“使用机动速度”与为满足强度设计要求的“设计机动速度 V_A ”区分开来。但对于 25 部运输类飞机,FAA 并不想引入新的速度标记,因为对于运输类飞机, V_A 在历史上一直在设计和运行中使用,若引入新的速度标记反而会产生混淆。但为了强调规章中这两个速度的区别,FAA 将规章使用的“机动速度 V_A ”改为“机动速度”。同时,FAA 将继续允许申请人把“机动速度”在 AFM 中称为“ V_A ”。

4 结论

设计机动速度和使用机动速度是进行飞机结

(上接第 14 页)

(6)试飞时如果发现严重 PIO 现象,飞行员应立即松杆或将杆至于中立位置,待飞机稳定后重新控制飞机,不改变飞机构型并在飞机着陆前进行操纵性检查。

7 结论

PIO 试飞是飞机操纵性和稳定性试飞中的一项重要科目,需通过高增益人机闭环试飞任务向适航当局表明符合性。本文分析介绍了 PIO 试飞的适航条款、试飞方法、试验点选取方法和试飞评定准则,并介绍了 PIO 试飞的注意事项和风险规避方法,可为运输类飞机的 PIO 试飞提供参考。

参考文献:

- [1] 颜世伟,高正红,刘艳,田福礼.模糊聚类方法在 PIO 探测中的应用[J].飞行力学,2011,29(5):5-9.
- [2] National Research Council. Aviation safety and pilot con-

构强度设计和飞行使用的两个重要特征速度,两者概念不同,不能混淆,否则就可能导致飞行事故。设计人员应充分研究重量和高度对设计机动速度的影响,确定能够产生最临界气动载荷的 V_A 值进行结构强度设计,并根据设计机动速度在飞行手册中制定合理的、便于驾驶员使用的机动速度限制和说明。试飞员和驾驶员应通过培训和学习充分了解设计机动速度和使用机动速度制定目的和使用限制,即使在使用机动速度以下,也要避免多轴组合操纵、大幅度快速反复操纵;在滚转拉起机动中和突然的俯仰机动过程中注意控制飞机的纵向载荷,使机体或部件不超过相应的限制载荷,以免飞机因过度载荷而产生损坏。

参考文献:

- [1] FAA. Amendment No. 25-130 Maneuvering Speed Limitation Statement[S]. USA: FAA,2010.
- [2] 中国民用航空总局. CCAR25-R4 中国民用航空规章第 25 部:运输类飞机适航标准[S]. 北京:中国民用航空局,2011.
- [3] FAA. AC 61-23C Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge[S]. USA: FAA,1997.
- [4] Hurt H Jr. Aerodynamics for Naval Aviators [M]. USA: Aviation Supplies & Academics Inc., 1965.

trol: understanding and preventing unfavorable pilot-vehicle interaction [M]. Washington, D C: Nation Academy Press, 1997:14-15.

- [3] 田福礼,高正红,俞志刚.用于人机耦合振荡探测的操纵振荡特征确定[J].飞行力学,2005,23(2):73-76.
- [4] AC25-7C. 运输类飞机合格审定飞行试验指南[S].
- [5] David G. Mitchell. Identifying a PIO Signature-New Techniques Applied to an Old Problem [C]. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, 21-24 August 2006, Keystone, Colorado.
- [6] Duane McRuer. Development of a comprehensive PIO theory [R]. AIAA-96-3433-CP,1996.
- [7] David H. Klyde David G. Mitchell. A critical examination of PIO prediction criteria [C]. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, Boston, Massachusetts, 1998.
- [8] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 中国民用航空条例第 25 部运输类飞机适航标准[S]北京:中国民用航空局,2011.
- [9] 刘艳,高正红,赵涛,吕海,李向维.民用飞机适航取证中的 APC/PIO 评估方法[J].飞行力学,2010,28(6):6-10.