

飞行试验安全文化

Flight Test Safety Culture

周自全 / 中航工业试飞中心

摘要: 飞行试验是集科学性、实践性和风险性于一体的系统工程, 确保试飞安全是飞机研制和飞行试验的头等大事。本文以具体事例说明: 飞机研制是试飞安全的基石, 飞行试验是试飞安全的保障, 试飞管理是试飞安全的关键。试飞安全是全行业的共同责任, 营造健康试飞安全文化是全行业的共同义务。

Abstract: Aircraft flight test is a system engineering integrated with science, practicability and risk. Flight safety is the most important issue in the aircraft development and flight test. Many examples are used in this paper to show that aircraft development is the foundation of flight test safety, flight test technologies and equipments are the support of flight test safety, and flight test management is the key factor of flight test safety. Flight test safety is the common responsibility of the industry and it is the obligation of the industry to build healthy flight test safety culture.

关键词: 飞行试验; 安全文化

Keywords: flight test; safety culture

0 引言

飞行试验安全(以下简称试飞安全)是指在成功完成飞行试验任务过程中不发生任何造成人员伤亡和/或重大财产损失。每个人都认可试飞安全的重要, 每次试飞的会议都强调试飞安全。然而在实际试飞过程中, 事故或事故征候仍时有发生, 有一些事故还相当严重, 给生命财产带来了重大损失。

应该承认, 风险性是飞行试验的固有属性, 不存在没有风险的试飞。对于那些新技术的验证试飞, 对于那些技术跨度大、新系统和新技术成熟度不高的新型号试飞, 发生事故或事故征候的概率更大。

事故的发生往往是一连串偶然诱因同时发生的必然结果。这些诱因有客观的, 也有主观的; 有机械的, 也有机理的; 有技术的, 也有管理的。

所谓试飞安全文化就是对试飞安

全技术的重视和研究, 对试飞安全法规的制订和贯彻, 对健康试飞安全氛围的认知和营造等。试飞安全文化寓于航空科技和航空工业发展的全过程和全领域, 保障试飞安全是人们的共同责任。

本文结合实际试飞经验, 提出当前试飞安全方面应特别关注的若干问题, 以促进试飞安全文化健康发展, 尽最大可能把试飞风险控制到一个可以接受的程度, 杜绝或减少试飞事故, 确保试飞安全。

1 飞机研制是试飞安全的基石

飞机设计水平和试制质量是试飞安全最基本的条件。研制水平高, 表现在良好的飞行安全设计, 新技术和新系统成熟度较高, 领前试验验证充分, 新机制造工艺水平高, 产品质量得到保证, 这些是试飞安全的基本保证。

1.1 飞机安全设计和评审

无论是新机还是技术验证机, 要达到预定的功能和性能目标, 安全性设计应放在首位。

按照GJB900要求, 为了保证飞行安全, 在整个飞机研制过程中都应制订安全性工作大纲, 进行危险性分析, 包括论证阶段的初步危险性分析、方案确定阶段的分系统危险性分析、研制阶段的系统危险性分析、试飞和使用阶段的使用和保障危险性分析等。每个阶段必须在专门的范围内, 由专门的人员具体和逐条地进行评审和协调。

安全性分析和评审离不开各设计专业的安全性分析, 如系统故障模式分析和可靠性分析等。但是, 现代飞机是一项综合性极强的大系统, 各专业交互影响非常复杂, 必须有一支专门的安全性工作队伍对全机安全性进行综合分析和管理。在试飞阶段的试飞方案和试飞大纲中, 试飞工程师必须在飞机总体

安全性分析的基础上,针对试飞的各个环节的可能因素,包括试飞技术、飞机改装、测试设备、维修保障以及试飞员操作等进行风险性综合评估,最后落实到每一个试飞任务单,制订安全保障措施。因此鉴于试飞安全的理由,试飞员和试飞工程师必须介入全机总体安全性工作大纲,参加危险性分析活动,了解安全性大纲执行的结果,以及将风险控制可在接受范围的措施。

某型飞机在进行大载荷对称拉起科目试飞时,两位来自不同机构的试飞员分别在不同时间将飞机过载拉超限,过载值都大于要求值的143%,达到设计极限载荷,甚至局部应力超过了静力试验值,这是非常危险的。如果事先进行了危险性分析和安全性培训,并在飞行模拟器上演练,上述事件或可避免。

按照我国现有飞机研制流程,对每款新机的首飞都要进行技术质量评审和放飞评审。这种高层次的、算总账式的评审虽然是必要的,但不能代替如前所述各阶段专门人员,包括使用人员的详细评审,即使在首飞前的这两个评审中,也应该把安全性作为突出的显性专题重点评审。

1.2 关注系统和软件的安全性

飞机的总体、气动、结构等历来是研制过程的重中之重,这一点无可厚非。但对于试飞安全而言,故障率最高且防不胜防的是飞机系统,包括发动机、飞控、液压、燃油、环控等。究其原因,一是这些系统技术更新换代快;二是这些系统受飞行环境,如温度、振动、湿度,甚至电磁环境等影响大;而另一个重要原因是由于系统庞杂,地位从属,因此投入的人力和物力无法与那些“大专业”相比。但对试飞安全来说,一根管道断裂,一个接头损害、一条软件语句错漏都可能导致灾难性后果,这不

能不引起重视。新机试飞中发生的许多事故与系统相关。

例如,某型飞机起飞后不久,由于燃油泄露引起发动机着火,飞机失控,试飞员弃机逃生成功。据了解,在这次事故发生之前长达6年多的时间内,此类故障年年发生,总计达10余次,直至飞机失事。如果能及早重视这类直接危及试飞安全的系统或成品故障,也许会另外是一种结果。

软件的重要性也是不言而喻的。在一架电传操纵技术验证机的飞控设计方案中,当平尾舵面达到和超过某一极限值时,计算机发出指令将平尾锁定在当前值。该验证机在一次着陆过程中,由于飞机响应振荡发散,平尾锁在最大偏度位置,飞机失控坠毁。这样的设计软件,实际上是剥夺了特殊状态下飞行员的能动性。

1.3 加强飞行品质研究

飞行品质是指能保证安全、顺利和容易地完成操纵任务的那些飞机特点。因此研究飞行品质的首要目的就是保证飞行安全。

某型飞机在一次360°全滚机动的试飞科目中,由于试飞员错觉,始终未将飞机改平,直至飞机触地,造成了严重飞行事故。试飞员是一位飞行经验丰富,完成过许多重大试飞科目任务的试飞员,为什么会在本次试飞任务中出现错觉呢?有据可查的原因是:在这种飞行状态,飞机存在多项飞行品质缺陷,包括横向操纵杆力过重,滚转速率过低、纵向短周期阻尼比小,纵横向操纵不协调等。问题的严重性还在于试飞员事前并不熟悉和理解这些飞行品质缺陷,更没有进行过有针对性的飞行模拟预测和演练,没有任何技术和心理准备。因此,在复杂飞行条件下,试飞员生理和心理负担过重,对环境的判断能力

和行为准确率大大降低,这是造成事故的主要原因。

这个例子充分说明对飞机飞行品质研究的重要性。20世纪70~80年代,飞行力学工作者对飞行品质研究工作极为重视,开展了广泛的合作研究,形成了许多重要成果,包括飞机飞行品质规范的制订和应用研究。遗憾的是,在这种联合研究的氛围似乎已消失。随着电传操纵技术的应用,飞机“无忧虑”操纵成为人们追逐的目标,但在我国电传操纵飞机试飞中,几乎都出现过驾驶诱发振荡(PIO)问题,而每一次面临这种问题,从未得出一个共同结论,至今还有人认为PIO是驾驶员操纵所致,这无异于认为桥梁共振是由于汽车行驶所致。

各种新技术应用虽为优化飞行品质创造了更好的平台,但也会带来一些更深层次的问题,如过失速机动中的机敏性、航空生理/心理问题、与武器系统交联的战术应用机动问题等,这些都需要面对。新形势下飞行品质的联合研究势在必行。

1.4 飞机设计中的人素工程考虑

据统计,三分之二的飞行事故原因是人为因素,人为因素中又有三分之二是驾驶员操纵错误。这里姑且不去讨论这些统计的合理性,但要指出当事人不应简单地接受和应用这种分析模式。20世纪80年代,笔者曾主持研制和试飞验证了某型飞机的机械操纵与电操纵的转换系统。试飞中由于转换传感器故障,在由机械操纵向电操纵转换瞬间,飞机突然上仰,进入尾旋,由于飞行高度低,试飞员弃机跳伞成功。事故调查结论是“转换传感器瞬态失常”。潜台词是归咎于试飞员的操纵,因为系统已设计了三套转换措施将电操纵向机械操纵转换,只是试飞员转换动作延迟了近3

秒,待转换过来飞机已进入尾旋。事后笔者自省,在突发事件中,试飞员初始迟滞3秒是完全可能的,归根到底还是设计者考虑不周。接受这次教训,在以后的变稳飞机研制中,毫无例外地采用了杆力自动转换系统,利用试飞员的条件反射即可以保证特殊故障条件下的试飞安全。

早期一架F-18在海上转弯飞行时,由于海天混淆,飞行员未能从单一的平显滚转指针摆动判断飞机姿态,飞机坠入海中。设计师并没有简单地将事故原因归咎于飞行员错觉,而是据此改进设计,将平显固定的俯仰梯指示改成随滚转角而动,大大加强了特殊状态下驾驶员对飞机滚转的视觉感知,这就是当今平显中游动俯仰梯指示方案的由来。

飞机设计中的人素工程还体现在座舱告警显示上。有一型电传操纵飞机在试飞过程中,由于迎角传感器故障引起飞控系统的4个通道和主故障灯全部报故,试飞员和地面监控人员都非常紧张。其实飞控系统有两个迎角传感器,而每个传感器又有4个同步器输出,故障发生在一个迎角传感器中的一路同步器输出,也就是8个通道中的一个通道出现故障,对试飞安全影响极小。还有一型电传飞机,飞控系统告警级别与航电系统告警级别划分正好相反,即航电系统的最低告警级别对应飞控系统最高告警级别,也曾让试飞监控人员混淆误解。更为严重的例子是有一型飞机的迎角告警值与实际飞机失速迎角相差不到 1° ,这种迎角告警设置还不如没有。

1.5 使用手册和文件

飞机设计中的文件编制和提供对试飞安全影响极大。美国一架F-22在起飞过程中坠毁,事故分析的逻辑链

是:飞机坠毁原因是飞控系统故障→飞机系统故障的原因是三向速率陀螺工作失常→三向速率陀螺失常的原因是起飞前电源中断过40毫秒→电源中断40毫秒是由于地面主、备动力转换→主备动力转换后驾驶员没有做BIT检查→驾驶员未做BIT是因为手册上只规定起飞前要做BIT,但未规定主、备转换后还要做BIT。事故调查最后结论:主要原因是手册规定不清。

这个例子再次说明,详细、正确的试飞文件至关重要,因为它是飞行试验任务的依据和守则。

2 飞行试验是试飞安全的保障

新机试飞过程中不可能不出问题。如果试飞技术和保障水平高,飞行中飞机出问题不一定会酿成事故,或将事故后果减到最小危害程度;相反,如果试飞技术和保障水平低,管理松弛,飞行中即使飞机没有问题,也可能酿成飞行事故,因此试飞工作者对试飞安全负有不可推诿的职责。

2.1 试飞员的素质要求和培养

试飞员在保证试飞安全方面起着关键作用,对同一突发事件的处理结果,不同的试飞员之间有着天壤之别。

一架电传操纵飞机进场着陆时,突遇侧风扰动,在距道面1~2米的高度上发生严重的横向耦合振荡,飞机响应滞后驾驶员操纵 180° 。试飞员当即判断这是驾驶诱发振荡(PIO),停止滚转操纵,推油门带杆爬升,复飞成功。飞机从振荡发散到收敛,仅5秒时间。试飞员把这次处理成功的原因归结为变稳飞机的培训,因为在变稳飞机上教员带他们体验过类似的、因此摔过飞机的横向耦合振荡控制律。

在一次综合空中飞行模拟试验机进场着陆过程中,由于电源问题,飞机

在800米飞行高度上失去控制,飞机呈倒飞状态无法翻转,千钧一发之际,后舱安全驾驶员成功地将电传操纵系统电源切断,转换为机械操纵,使飞机转危为安。究其原因,一是他面对险情沉着镇定,二是他对试飞对象非常熟悉和了解。

这两个事件说明,试飞员的技术素养和心理素质极为重要。为了保证试飞安全,试飞员必须理解飞机特性,熟悉飞机操纵,在突发事件到来时,能及时地甚至是条件反射地及时识别和正确处置,当然试飞员的这种高素质不是天生的,是要经过长期锻炼和专门训练的,除了他们自身的努力外,设计师和试飞工程师对此负有重要责任。

我国的试飞员队伍是优秀的,为航空工业和航空技术发展作出了重大贡献,受到人们尊重是理所当然的。但还应该看到,与国际先进水平相比,我们在经验、技术和心理素质上还有一定差距,应该看到有些事故发生是与试飞员(包括试飞指挥员)相关的。严格管理和要求,实事求是地开展批评和自我批评是健康安全文化的表现。试飞员应承受成功和挫折的双重考验。

2.2 飞行模拟是保障试飞安全的必备手段

发生事故的原因大体上可归结为三类,即被试飞对象、人为因素和环境条件。一旦被试产品成形,试飞队伍确定,控制试飞风险的有效措施就是预测和预防,而飞行模拟是实现这一目的的重要手段。

一架现代战斗机进行反尾旋模态试飞的例子能很好地说明飞行模拟器在试飞中的应用。该项试飞要求在不断开迎角限制器条件下,超越迎角限制范围,直至反尾旋模态工作。试飞采用所谓“海豚跃”的方法,即飞机配平后,猛拉驾驶杆将飞机跃起,然后推杆,飞机

“平拍”而下,实现大迎角飞行。这无疑是一项风险很大的课题。为了保障试飞安全,试飞队伍针对每一个任务单采用地面模拟预测和演练→试飞实时监控和数据处理→试飞结果与仿真模型比对和验证→下一试飞点的递推迭代,逐步增中加迎角,直至反尾旋模态得以验证。试飞过程中监控迎角与地面预测迎角约 1° 误差,这样试飞员、指挥员和工程技术人员人人心中有数,在从容自信的氛围中完成了高风险的试飞任务。

回顾试飞过程,如果事先把飞行模拟研究、预测和演练纳入试飞程序,认真执行,有些事故也许是可以避免的。

当然除飞行试验外,飞机设计也必须应用飞行模拟器。但应该指出两点:一是飞机设计和飞行试验所使用的飞行模拟器应尽可能使用同一种仿真模型;二是这种仿真模型必须通过飞行试验验证。因此设计师、试飞员和试飞工程师必须资源共享,联合工作,任何人为壁垒都是对试飞安全的不负责任。

2.3 试飞监控对于保障试飞安全起着至关重要的作用

在试飞任务单执行的过程中,尽管飞机上的试飞员只有一两个人,但他们不是“孤军”作战,在地面监控站聚集了一个团队实时地、同步地跟踪、监控和指挥着他们的飞行。

例如,有一架战斗机进行低空大速度试飞时,由于燃油系统故障,试飞员在座舱显示上看到的总油量足够,实际供油箱的燃油仅仅能维持加力状态飞行10多秒。由于地面监控站发现和指挥,试飞员收油门带杆爬升,安全返场着陆,避免了一场重大事故。

另有一架同类飞机起飞爬升过程中,地面监控人员发现发动机振动值增加速率快,指挥员及时提醒试飞员并指挥返场,返场途中发动机停车,两次启动

均告失败,只好无动力进场迫降,在距跑道端头不远处飞机主轮触地,飞机虽然局部受损,但未酿成更严重的事故。

相反,有的飞机试飞没有地面监控,飞机返场着陆时起落架未放到位却无人提示,结果造成非常严重事故。也有的飞机试飞中虽有监控,但监控人员精力分配不当,本来有可能挽救的事故未能挽回。还有的试飞地面监控人员不熟悉飞机应急处置措施,前起落架放不下来也不敢采用应急放起落架,结果飞机着陆过程中造成了飞机局部损坏。

大量事例表明,地面监控设施对于保障试飞安全起着至关重要的作用。但是要发挥地面监控设施作用,首先要保证地面监控站数据使用量足够,时间延迟足够小,指挥员和监控人员经过了严格的培训。如果是临时上岗,没有监控预案和判据,不了解监控对象和监控任务,不了解监控重点,没有恰当的精神分配,很可能达不到监控效果,完不成监控任务。

2.4 加强试飞技术研究,确保试飞安全

试飞技术包括试飞方案设计、试飞预测和模型验证、试飞驾驶和激励、试飞测试和数据处理,试飞改装和维护保障以及试飞设施的研发和应用等,所有这些方面都与试飞安全密切相关。

试飞方案设计非常重要,对于一个新的航空发展项目,无论是型号还是预研,在项目启动时就应考虑试飞,因为试飞技术与被试对象密切相关。有些试飞技术研究和设施建设需要周期,等到飞机推出总装厂房再考虑试飞实际上为时已晚。20世纪90年代初,为了准备我国某型战斗机的试飞,试飞方案中安排了17项技术攻关和多项专题研究。比如为了进行飞控稳定裕度和气动伺服弹性试飞,开展了颤振激励系统(FES)的研发和试验,包括利用变稳飞

机进行试飞验证,用这套系统首次测试出变稳飞机的结构模态特性,并有效地应用到后来的各型号试飞。一架电传操纵飞机试飞前,在用FES进行地面激励检查时,实时监控到该机一个操纵面的扭转模态频率下降4.5赫兹,当即取消飞行计划进行地面检查,发现该操纵面大轴承松脱并接近完全脱出。这种故障在地面用其他检查手段是不可能发现的,但这种故障一旦带到空中,后果将不堪设想。

同样,为了对某型飞机飞行包线左边界扩展进行技术准备,20世纪90年代,试飞单位启动了反尾旋伞系统研制。通过充分的地面和空中试验,验证了这套系统和技术的正确性和有效性。这套系统成功地应用到后来各型号的大迎角试飞,包括军机失速/尾旋试飞以及国产新支线喷气机的失速速度和失速特性试飞。

应该指出,随着航空技术的发展,新一代飞机技术更先进,功能更复杂,大系统特征更突出。因此对飞行试验技术,特别是试飞安全技术要求将会越来越高,比如针对使用任务性能的试飞技术、过失速机动试飞技术、舰载飞机试飞技术、重物超低空投放试飞技术、复杂环境下的无人机试飞技术和体系作战试飞技术等,都是必须面对和攻克挑战。

3 加强试飞管理是试飞安全的关键

3.1 联合试飞有利于保障试飞安全

试飞是一项全局性的系统工程,上下左右关系非常复杂,没有强有力的科学管理,确保试飞安全是不可能的。从国内外几十年的经验来看,联合试飞是最有效的试飞管理模式,它不但有利于提高试飞效率,更有利于试飞安全。

联合试飞的核心:一是在主管试飞当局的领导下,在行政上和技术上集中统一管理,不分板块和环节,不搞市场竞争;二是资源共享,凡是有利于试飞安全和效率的资料和信息,成员之间无条件交流。美国F-22试飞模式是一种典型的联合试飞模式。美国空军工程发展研究中心AEDC既不是飞机设计者,也不是试飞中心的成员,但是他们能无障碍地融入到F-22的试飞中去,从建模、验模到改进模型,从获取试飞数据到指导试飞点阵的优化,没有人以知识产权为借口相互封锁,进行资源垄断。要做到这一点,强有力的行政管理和文化氛围极其重要。回想有些试飞事故发生,如果试飞现场具有有效的仿真设施,试飞工程师和试飞员对被试对象的缺陷有所了解,即时即地地进行预测和演练,或许能避免事故的发生。

3.2 飞行试验安排必须符合客观规律

飞行试验是科学性、实践性和风险性极强的系统工程,按科学规律办事是保障试飞安全的基本要求。按科学规律办事的含义:一是要将研究性试飞和型号试飞相结合,促进型号应用新技术的成熟度;二是要严格管理试飞程序,任何情况下首先要将飞机平台特性进行充分的验证试飞,然后进行任务系统验证试飞;三是所有试飞安排都要遵循先易后难、循序渐进的原则。应该认识到,在飞行试验的道路上,没有捷径可走。

例如,某型飞机试验机,在飞机平台特性没有充分试飞验证,更没有进行必要的飞行模拟研究和有针对性的试飞员培训的条件下,匆匆转入任务系统试用试飞,结果飞行中由于结冰问题造成极为严重的事故。后来补充平台试飞表明,有一些原机缺陷直接与飞行安全相关。通过补充试飞后,该飞机平台方成为令人放心的飞行平台。

3.3 研制/鉴定试飞与使用飞行的闭环管理

研制/鉴定试飞的目的是为了使用,因此飞机研发和试飞人员有责任向使用人员交流飞机技术和使用经验,以确保飞机使用安全,加快战斗力的形成。有这样的事例:同样的单发飞机发动机故障,在试飞单位没有造成严重后果,而在部队却造成重大损失,如果试飞员和飞行员建立融合和交流机制,情形可能改观。

同时由于受时间、空间和资源的限制,型号研制/鉴定试飞中不可能将所有的新机问题都暴露出来,何况有些飞机特性本来就具有长周期特性,因此型号研制/鉴定试飞作为一个阶段可以告一段落,但是有些内容的试飞还会延续。

例如,某型飞机由于条件限制没有进行大迎角试飞验证和研究,未揭示出飞机大迎角特性方面存在的缺陷,致使后来多次发生低空大迎角状态飞机坠毁的严重事故。如果这种问题在暴露的初期就安排技术攻关,并通过试飞验证,就有可能减少或避免这类事故的发生。其实这类情形在其他机型飞行中也有发生。有人认为是经费问题,其实一架飞机的代价远大于专题攻关费,更何况还有生命的代价。

鉴于上述理由,管理部门应倡导和推动试飞与使用方的交流和反馈体制,尤其是关于飞行安全方面的问题和解决方案。

3.4 科学和客观的事故调查

航空科技发展从来都不是一帆风顺的,试飞本身就是一种探索性强、风险性极大的行业,要发展新技术,试飞事故发生在所难免。对事故的积极态度应该是实事求是。严查严办,无限上纲不妥;息事宁人,推脱责任也不妥。面对事故或事故苗头,怕得罪人,不敢问责,

尽最大可能把事故责任推向死者和/或客观环境,这样的态度必将后患无穷。

事故调查和分析应具有独立性,要摆脱一切不利干扰。事故结论应在业内尽可能透明,以便真正吸取经验和教训,避免类似事件重复发生。

4 结束语

确保试飞安全是全行业人们的共同责任。为了保障试飞安全,必须在全行业乃至全社会营造良好的试飞安全文化,包括认真开展安全性设计和评审,严重关切飞机系统和软件的安全性,加强飞行品质研究,关注人素工程,加强试飞员素质培养,充分发挥飞行模拟预测、预防和试飞监控的作用,加强试飞技术研究;管理层应加强试飞安全管理,打破部门之间壁垒,组织联合试飞和联合技术攻关,以适应航空工业和国防事业发展的需要。

AST

参考文献

- [1] GJB900 系统安全性大纲[S]. 1990.
- [2] 周自全, 张子彦. 飞行品质和飞行安全[J]. 飞行力学, 2009(2).
- [3] 周自全. 飞行试验工程[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
- [4] Baker W B, Scott J K, Morgre C H, Sverdrup J. A case study of a modeling and simulation application to store separation on the F/A-22[R]. AEDC TN37389-6001, 2002-10-16.

作者简介

周自全, 中航工业飞机试飞技术资深首席技术专家, 长期从事飞行试验研究工作, 多次获得国家科技进步成果奖。