现代战斗机的飞行试验

周自全

(中国飞行试验研究院，西安 710089)

摘　　要：根据近几年新机飞行试验的工程实践，结合国外飞行试验的经验，叙述了现代战斗机飞行试验的特点，包括飞行试验的架次和周期，机载测试和地面实时监控，地面支持设施，它机试飞和组织管理；由于电传操纵显得更为突出的飞行试验技术，包括飞控系统稳定裕度、颤振和气动伺服弹性(ASE)、人机闭环飞行品质和大迎角试飞技术，提出了国内飞行试验工作方面目前存在的若干问题.

关　键　词：飞行试验；飞行控制；飞行力学；电传操纵；现代战斗机

中图分类号：V 217

文献标识码：A　　**文 章 编 号**：1001-5965(2003)12-1110-05

Flight test of modern fighter

Zhou Ziquan

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: Based on the engineering practice of flight test recently for the new type of fighter, referred to the foreign experience, the flight test characteristics of modern fighters was described, including sorties and period, aboard acquisition system, ground data acquisition system, ground support facilities, flight with other types of aircraft, organization and management ; The flight test technologies which should be emphasized in term of the fly-by-wire, including stability margin of flight control system, flutter and aero-servo-elasticity, pilot in-the loop flying qualities and high angle of attack technologies . Some problem in F/T was discussed.

Key words: flight tests; flight control; flight dynamic; fly-by-wire; modern fighter

现代战斗机即所谓第三代战斗机，如：F16，F18，CY-27，Rafale，EF2000 等，有如下特征：先进的气动布局，电传飞行控制系统，高度综合化的航空电子系统，高性能的动力装置，包括复合材料的优化结构. 由于采用了这些新技术，使飞机具有宽阔的性能包线，优良的飞行品质，突出的机动性，多功能通讯、导航、武器火控和电子战的能力. 这些特点给现代战斗机的飞行试验带来了许多不同于以往飞机的飞行试验要求、内容、规模和技术. 本文主要根据自己的飞行试验实践，结合国外第三代飞机的试飞经验，概述了现代战斗机试飞的特点、组织管理和试飞技术以及存在的某些问题.

1　现代战斗机飞行试验的特点

1.1　试飞架次和周期

现代战斗机的试飞架次约 1 500～4 000 次，试飞时间约 2 000～5 000 h. 试飞周期大约是整个飞机研制周期的 1/4～1/2，自然时间 3～8 a. 之所以规模如此之大，耗时如此之长，其主要原因是：

1) 飞机包线宽阔

为安全起见，速度、高度、过载、迎角等包线扩展都要循序渐进，逐步扩展. 全加力情况下，每分钟耗油达几百公斤，这样一个架次中做动作的时间只有几分钟. 诸如此类的因素会增加很多试飞起落.

2) 飞机功能多、构型多、武器种类多

现代飞机功能全，作战对象多，模式多，空/空、空/地、空/海；通讯、导航、识别；作战、巡航、侦

收稿日期：2003-06-20

作者简介：周自全(1940－)，男，湖北武汉人，研究员.

察,电子战,空中加油等.任务和目的不同,带来许多不同试飞剖面和试飞构型.

3) 新技术应用多、系统余度多

现代战斗机是先进技术的综合,否则不可能体现整体作战性能.这样就使得飞机需要验证的新技术多,需要考核的系统多.为了飞机的可靠性和生存力,绝大部分的系统都采用了余度的概念.多数情况下,正常系统和应急系统,系统重构和转换都要加以验证,这也是造成飞行架次多的重要原因.

1.2 机载测试和地面实时监控

现代战斗机试飞的参数采集量达几千,地面实时监控参数达一、两千个.

1.2.1 机载测试参数多的原因

1) 系统复杂,需测试监控和验证的参数多

一个四余度的数字电传操纵系统所需采集的参数约几百;航电系统主总线的数据量一千以上.如果要测试记录各个分系统的内部总线信息,其总信息量会成倍增加.

2) 加装测试传感器

为了考核飞机及系统性能,了解飞机及系统的工作环境,试飞过程中往往需要测试大量的应变、振动、流量、压力、温度等,需要加装的传感器很多.这一部分的参数量达几百个.

3) 综合试飞的需要

为了提高飞行试验的有效性,缩短试飞周期,减少试飞起落,尽可能采用综合试飞技术,要求飞机测试的参数尽可能覆盖各专业的需要,为此增加了测试参数数量.

4) 参试飞机互为备份的概念

参试飞机出现故障甚至出现意外事故的可能性是存在的.为了不影响整个工程的进度,采取了参试飞机间互为备份的概念,这就要求两架飞机的测试参数要能够相互覆盖,增加了飞机参数的测试量.

1.2.2 要求地面实时监控的原因

1) 保证飞行安全

现代战斗机的座舱信息非常丰富,但仍然是总体性的.对于系统内部的细微变化不可能都显示出来.即使能调出详细信息,由于试飞员精力有限,必须靠地面专业人员协助监控飞机及其系统的状况.

对于那些需要计算而且通过判据识别风险的特性参数,如颤振阻尼,系统稳定裕度等更需要地面实时解算和监控.

2) 提高试飞效率

由于地面监控具有实时计算能力,试飞结果可以及时得知,这就可以决策下一个起落可否进行,如何进行,是否需要补充试验点或增加试飞动作等等,这样可以大大提高飞行效率.

1.3 地面支持设施

现代战斗机的飞行试验更大程度地依赖地面设施的支持.这里仅列举三项地面设施.

1) 飞行仿真

飞行仿真对于飞控系统控制律开发、验证和优化起着至关重要的作用.对于试飞,它对试飞员的培训、试飞计划编排、任务单演练、试飞结果预测、安全措施拟订都具有重要的作用.特别是对那些风险科目,意义更加重大.把飞行模拟器作为一个培训和交流平台,可收到多、快、好、省的效果.

2) 航空电子实验室

这是系统综合、开发和验证设施,也是试飞过程中排故、试飞方案制定和预演的平台.从经验来看,一个综合性强、使用方便的试飞现场航空电子系统支持设施是非常必要的.

3) 机载测试系统地面支持设施

现代战斗机试飞,要求有很复杂的机载测试系统.这个系统的规模和复杂性不亚于飞机上一个大型的子系统,其采集记录和遥测传输的信号类型几乎覆盖了全机系统所有的信号类型.为了保证这套系统配套合理、检校准确、集成可靠、操作方便、排故迅速,同样需要一套完备的地面支持实验室.

1.4 它机试飞

它机试飞,是型号试飞的重要组成部分,其主要目的是减少主机风险,缩短主机试飞周期,培训试飞员.

这里主要提及两种试验机,一是空中飞行模拟试验机;二是空中航空电子试验机.空中飞行模拟试验机主要是验证本机飞行控制律是否满足飞行品质规范要求,从而优化设计;另外一个主要目的就是培训试飞员.美国空军所有新机必须经过空中飞行模拟这个环节.

航空电子试验机在现代战斗机试飞中承担着非常重要的任务,这是因为现代航空电子系统的综合程度高,软件复杂,敏感单元多,天线既多又密,对环境非常敏感,地面环境很难代替空中.一般说来,包括雷达和电子战的航空电子系统在空中它机试飞的时间需要有几百飞行小时.

总之,现代战斗机应用的新技术越多,它机试

飞越需要.

1.5 现代战斗机试飞的组织管理

一流飞机的诞生需要有一流的设计、制造,也需要有一流的试飞.而从事一流试飞又必须有一个集研制、试飞和使用方于一体的联合试飞力量.基于这种理念,现代试飞的组织管理出现两个原则:即联合试飞和主场地原则.所谓联合试飞,即飞机及其系统的研制厂所,试飞鉴定单位和使用部队共同组织一个试飞队伍,从制定试飞方案和计划到处理和分析技术问题,分工负责,共同磋商,相互支持.对于一个重大型号来讲,参加这种试飞的人数多达数百人.

为了开展联合试飞,在试飞地点的选择上采用主场地原则(principale site),即整个试飞尽可能集中于一地进行.力求避免重复,缩短周期,也便于集中优势力量让试飞顺利进行.

2 飞行试验技术

任何一种航空新技术应用都要有相应的新的试飞手段来考核验证.或者是试飞新机动动作,或者是新采集记录方法,或者是新的数据处理软件.但是对现代战斗机来说,对飞行试验技术影响最大的莫过于电传飞机的飞行控制系统,这里仅就这方面的某些试飞科目做一简述.

2.1 飞控系统稳定裕度试飞

控制系统稳定裕度测试这是一般实验室利用通用设备进行的一项常规工作.但是要在飞行中测试飞行控制系统的稳定裕度就要解决许多特殊问题.

1) 系统输入

系统的输入是驾驶杆力或位移,它是通过驾驶员手工扫频来实现的.频率为0.2~5 Hz.要求驾驶员从低频到高频连续扫瞄,尽可能使各个频点有足够的谐波信息.扫频的幅值要适当大,以便克服非线性影响.不同频率下的幅值也尽可能保持相等.与此同时,还要尽可能保持飞行状态不变.要做到这一点主要靠试飞员平日训练,特别是飞行模拟器上的训练.

2) 系统输出

系统输出点的选择要根据系统状态,因为飞控系统是一个多回路系统,多个操纵舵面,且舵面之间有交联.一般说来,将驾驶杆指令作为输入,而系统总反馈信号作为输出,计算出开环频率特性,即可得出系统的相位储备和增益储备.特殊情况下,需要测试某一特定控制环的稳定储备,只要这个特定控制环的输入和综合反馈信号是可测的,或是间接可测的.

3) 数据处理

可以采用专用的频率特性处理软件得到系统频率特性,但是对信号的滤波处理非常重要,它直接影响处理结果的有效性.

2.2 颤振激励

颤振试飞历来是飞机试飞中最受关注的课题,因为它直接影响飞行安全.颤振激励的方式很多,其中火箭激振是传统的试飞方法,这种方法简单、作用时间短,特别在全加力或俯冲状态情况下,作用时间显得十分宝贵,但对于电传操纵的飞机来说,必须采用一种新型的颤振激励系统,即用一种机载信号发生单元将各种激励信号通过飞控舵机驱动舵面,从而激励飞机结构和系统响应.这种激励方法的优点是各谐波激励能量集中,效果好;更重要的是,这种方法能测取所需测量点的输入信号,从而进行频率特性分析,得出气动伺服弹性(ASE)稳定裕度.这种方法的最大问题是把飞控系统的动态特性带入整个系统动态特性中去.这就要求数据处理分析中把这些特性分辨出来,以便进行结构动特性分析.另一方面,由于舵机频带限制,使高达50~70 Hz的结构模态很难激励出来,这就要求在激励幅值的选择上采取随频率变化,激励幅值也自动改变.如果不这样做,从低频到高频采用同一幅值,要么低频响应过大,影响安全;要么高频响应激励不出来,无法分析.

各种激励方法都有其优缺点,发展趋势是用多种激励方法进行关键状态的颤振试飞,以便得出合理和可靠的结果,所付出的代价是增加了飞行起落和时间.值得注意的是,利用飞行中大气紊流对飞机激励响应,进行颤振分析是极有前途的,既安全又节省.事实表明,许多情况下大气紊流的激励能量是相当可观的,甚至比人工激励的能量还要大.

还应该指出,在新机试飞中采用的颤振激励系统(FES)不但用于颤振和ASE激励,还可以进行飞控稳定裕度试飞.尤其是航向系统稳定裕度试飞,必须依赖这种设备,因为驾驶员很难用脚蹬去进行人工扫频.FES还可以产生其它信号进行其它科目的试飞,如:阶跃、脉冲,“3211”等,这对操稳分析和系统辩识具有极重要的意义.总之,FES对于试飞工程师们来说具有无限的潜力.

2.3 人机闭环飞行品质试飞

只要是有人驾驶飞行器都有人机闭环飞行品质问题.由于电传操纵系统具有突出的高阶性、高

增益性和时间延迟,加上系统内增加了各种信号交联,使得飞机和驾驶员行为之间的耦合关系更为复杂.在一般情况下,因为控制律不断的优化和迭代,使电传飞机具有优良的飞行品质;但在特殊情况下,如驾驶员执行高增益的任务,就有可能形成飞行品质的突降(cliff),产生人机闭环耦合振荡.因为这种情况不是经典的开环品质指标所能反映的,所以现代战斗机试飞强调人机闭环飞行品质试飞.这种试飞就是给飞行员一个高增益任务,如精确跟踪、空中加油、定点纠偏着陆等等,飞行结果和结论主要依赖驾驶员定性评述,参考一定的飞行参数,甚至整理出一定的闭环性能指标,如 HQDT(跟踪操纵品质)等.应指出的是,这些试飞验证能说明一定问题,但不能说明全部问题.主要原因是所谓的驾驶员高增益与心理有关,很难形成和确定.截止目前为止,没有一套公认的、可用于工程判断的性能指标去辩识是否存在可能的驾驶员诱发振荡(PIO)问题.既要按常规品质规范检查各种开环指标要求,也要进行人机闭环飞行品质试飞.同时,还要用变稳飞机对试飞员进行飞行品质培训.

应该特别指出的是,速率饱和非线性是造成人机闭环耦合振荡的主要因素之一.如果由于某种原因,如临近跑道的局部气流扰动引起驾驶杆修正过快过大,造成飞控系统速率饱和,从而使飞机响应对操纵指令的相位滞后达到 180°,形成 PIO,这是一种非常危险的情形.不少电传飞机失事都与此相关,对此应引起新机研制者和飞行试验工程师足够警惕,应从飞控系统研制、飞行员培训和飞行试验方案上做更多的工作,防止事故发生.

2.4　大迎角试飞

航空技术愈发展,大迎角试飞变得 愈重要.过去的战斗机研究大迎角主要是研究飞机气动特性,防止飞机进入失速/尾旋,一旦进入如何改出,保证飞行安全.那时的飞机机动只把迎角使用到十几度的范围;今天的三代机除研究它的气动特性外,还要研究大迎角的控制律,把正常的飞机使用机动迎角扩展到限制器的范围,例如近 30°,而且要验证控制律能否自动防止进入失速/尾旋,一旦进入也能自动改出到安全范围.随着矢量推力技术的应用,下一代战斗机把飞机更大范围的迎角作为正常使用迎角,即过失速机动,使用迎角达 50°以上.所有这些都必须通过飞行试验来验证,迎角越大,地面风洞数据可靠性越需要飞行试验来验证.

对现代战斗机的试飞,大迎角试飞分为可控区和非可控区两个阶段,在迎角限制范围内为可控区;在迎角限制器范围之外为非可控区.在可控区范围内,通过试飞来考核飞机在 20°～30°迎角范围的操纵性和稳定性;确定最小机动速度和最小平飞速度;检查和验证迎角限制控制律的正确性和合理性.在试飞方法上,用常规的操纵动作,如阶跃、脉冲、扫频、纵横航向复合操纵来考核飞机的飞行品质.不过其操纵幅值较常规操纵要大,逐步达到极值,操纵速度也偏于急猛.因为在迎角限制器范围内,失速迎角尚未确定,但确定最小机动速度和最小平飞速度对部队使用又非常重要,为此用保持 45°稳定盘旋所达到的表速确定为最小机动表速;用稳定平飞所达到的最小表速作为最小平飞表速;用收敛转弯和减速转弯来验证迎角限制器边界.应该指出,即使进行可控区内的大迎角试飞也应该采取适当的安全措施.这种措施应包括两个方面:一是在控制律中设置临时限制边界,即在最大边界内按 2°之差设置 2 个临时边界,即 $\alpha_{max}-4°$和 $\alpha_{max}-2°$,逐步达到 α_{max};另一个措施是加装反尾旋伞,一旦由于某种特殊原因使飞机进入失速/尾旋,通过正常方式又无法使飞机改出来时,可以通过反尾旋伞使飞机恢复到可控状态.有了这些措施,还可以进行一些较为激烈的战术机动动作来考核迎角限制器的可靠性.如果这些试飞表明,飞机还有放宽迎角限制器的潜力,还可以在 α_{max}的基础上按 2°的增量适当扩大飞机的迎角限制包线.

可控区试飞结束后,应进行超出 α 限制值的非可控区的大迎角试飞.进入该区有两种方法:一是使用飞控系统的直链摸态,直接进入失速/尾旋试飞,前提是此时飞机应可控;另一种方法是人工切断迎角限制器,试飞员通过正常系统使飞机进入非可控的大迎角区,首先考核飞机失速和偏离特性以及反尾旋摸态的功能和可靠性;最后还要进行失速/尾旋试飞,确定飞机大迎角气动特性以及进入失速/尾旋后的改出方法.

大迎角试飞是一项风险性极大的试飞科目,最大风险在于飞机的行为难以准确予测.为了减少风险,作好充分的技术准备是非常必要的,包括仔细研究风洞试验结果,特别是垂直风洞试验结果;进行模型试飞,摸清飞机的尾旋摸态和改尾旋方法;在此基础上,进行充分的地面模拟和试飞员培训.同时,还要研制和落实有效的反尾旋措施,

一般反尾旋伞更为合适.飞机测试对于尾旋试飞也特别重要,尤其是迎角传感器,其范围选择和校准显得更为突出,必要时要专门研制能适应大范围测试的迎角传感器.

3 飞行试验存在的问题

几年来,飞行试验事业有了质的飞跃.从试飞技术、设施建设、试飞员培训、软件开发、机务保障以及试飞组织管理等各方面都有长足的进步.但是我国的飞行试验仍然存在许多不足之处.

1) 对飞行试验的认识较为肤浅

许多人简单认为,试飞是型号研制的最后阶段,没有从顶层上、从深度上把它作为一个系统的工程科学来认识.一种新型号,往往一到试飞就急功近利,急于求成.正确的做法是从工程总体方案中就应规划试飞,从飞机设计开始就要进行飞行试验设计,从投入和周期上都要给飞行试验留有充分的余地.应该认识到,所谓原型机不过是为了达到使用技术要求而研制出来的试验机.有了这个思想,许多飞行试验的问题在设计中均应考虑.试飞员和试飞工程师是飞机设计成员的一部分.只有这样才不至于使型号试飞过于吃力,捉襟见肘,甚至把许多重要问题留到部队使用中.

2) 预研和技术攻关不够

试飞是一门实践性极强的科学,要与时俱进,许多技术发展要领先研究.由于基础工作开展得不够扎实,真正到了型号定型试飞,时间和人力都不允许做过细工作,这势必影响试飞的安全、质量和效率;有些最基础的科目都无法全面进行.

3) 它机预先验证不够

型号试飞的一个基本原则是:能在地面解决的问题不要带到天上;能在它机上分担的风险,不要带到本机上.对这个基本原则贯彻不够.特别是航空电子系统.航空电子系统本机试飞周期最长,实际起落不多,大部分时间在排故和优化系统.有些功能和性能考验不充分.飞机到了部队还在不断改,不断飞,难以形成战斗力.不能不说是一种教训.美国F22的航电软件系统在地面综合试验达1～2万小时,在波音757飞机改装的电子试验机上综合飞行达4～5百小时.他们的做法值得借鉴.

4) 试飞员培训仍有较大差距

与国际水平相比,试飞员理论和实践培训都不够,与国际交流也非常不够.在一些人的头脑里,似乎试飞员和飞行员没有多大差别,这是试飞科目进行得不够深入的重要原因之一.

5) 试飞与设计结合的不紧密

当前飞机设计介入试飞的深度有了改观,但试飞介入设计的深度太浅,这种情况直接影响到试飞的质量.应该说这是两门学问,彼此不能相互代替,只能是互相结合,才有利于航空事业的发展.

4 结 论

1) 现代战斗机飞行试验的特点是试飞起落多;机载采集记录和地面实时监控参数多;更大程度依赖地面设施支持;它机试飞是现代战斗机试飞工作的重要组成部分;在组织管理上贯彻联合试飞和主场地原则.

2) 在试飞技术上,电传操纵的应用使现代战斗机的试飞技术与以往飞机有很大区别,如飞控稳定裕度试飞;颤振/ASE试飞;人机闭环飞行品质试飞;大迎角试飞等等,都必须高度重视.

3) 虽然我国飞行试飞技术较以前有了很大的提高,但仍然存在许多问题有待于去思考和改进.这些问题主要是对飞行试验的认识肤浅,对试飞技术的予研和攻关不够,对它机试飞的作用重视不够,对试飞员的技术培训有待加强;试飞和设计彼此之间的融合仍需努力.