

# 民用飞机试飞规划与管理技术研究

## Research on Flight Test Planning and Management for Civil Aircraft

袁冲<sup>1</sup> 修忠信<sup>1</sup> 田海玲<sup>1</sup> Ding Zhongtao<sup>2</sup>/ Yuan Chong<sup>1</sup> Xiu Zhongxin<sup>1</sup> Tian Hailing<sup>1</sup> Ding Zhongtao<sup>2</sup>  
(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2. 2D Technology LLC, US 30004)

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China; 2. 2D Technology LLC, US 30004)

### 摘要:

梳理了通用的民机试飞需求类型,讨论了民机试飞任务分工和试飞计划制订原则,分析了民机试飞科目特点和逻辑关系,研究并提出了一种民机试飞任务优化方法,系统地阐述了试飞规划与管理,实现了民机试飞的闭环控制,解决了国内试飞规划中未能系统研究的问题,并创建了一套具有国际先进水平的民机试飞规划与管理系统(Flight Test Control System,简称“FTCS”)。FTCS已在实际型号试飞工作中得到了验证和应用,起到了减少试飞架次和提高试飞效率的作用,具有实际的工程应用意义。

**关键词:**民机试飞;试飞规划与管理;试飞任务需求;试飞任务分工;试飞逻辑;试飞优化

**中图分类号:**V217

**文献标识码:**A

[**Abstract**] The article introduces the requirement types of general flight test for civil aircraft. The principles about flight test division and planning is discussed. The characteristics and logical relationship of flight test subjects are analyzed. A optimization method about flight test is researched and presented. The flight test planning and management system is systematically elaborated. A closed-loop control flight test is achieved. The problem of flight planning is solved, which has not been researched in China. A set of civil aircraft flight test planning and management system (FTPM) which has the international advanced level is created. The FTPM has been validated and applied in practical flight test, which plays a role of reducing flight test sortie and improving the efficiency. The results show it has a practical significance in engineering application.

[**Key words**] Civil Aircraft Flight Test ;Flight Test Planning and Management(FTPM);Flight Test Requirement; Flight test Division;Flight Test Logical;Flight Test Optimization

## 0 引言

民用飞机飞行试验技术复杂,投入成本高,飞机的试飞规划与管理成为加快民用飞机型号试飞取证的科学、高效之路。国际成熟民机企业凭借丰富的型号研制与试飞取证经验,已摸索出一套以试飞规划软件为工具的试飞规划方法与管理,并将其作为核心知识产权进行保护。

目前,国内尚未对民用飞机的试飞规划与管理进行系统研究,试飞任务的需求、规划、优化、管理等工作基本依靠人工和工作经验来完成,整个型号试飞工作的科学性与效率不高。根据国内外民机试飞经验和取证试飞发展趋势,对民机试飞任务需

求、分工、排序、优化、管理的方法进行了分析和研究,并提出了一套具有国际先进水平的民机试飞规划与管理系统(Flight Test Control System,简称“FTCS”)。

## 1 概述

民机试飞规划与管理主要有两个方面的内容,一是试飞任务规划,即基于对民机型号试飞任务的梳理和分析,将试飞任务拆分为最小子集,在民机试飞任务基本逻辑关系的基础上,采用优化组合和飞行剖面优化的方式,制订型号试飞计划和试飞任务单;二是试飞任务管理,即对试飞任务需求、任务执行状态、计划执行情况进行动态管理,实时调整

和掌控试飞工作进展,以增强型号试飞的规划性与科学性、减少试飞架次、提高试飞效率、缩短型号试飞周期和降低成本投入。

## 2 试飞规划

民机试飞规划必须对型号的任务需求、任务特点(逻辑关系)进行梳理和研究,对型号试飞任务进行合理化分工和科学规划,并根据型号设计特点和试飞任务特点制订工作量合理、高效的任务单。当然,试飞计划的制订还要综合考虑各种影响试飞计划的因素。

### 2.1 试飞需求

随着民机设计水平和适航审定技术的不断发展和完善,任务需求也需要进行多元化的分析和梳理。首先,要准确定位试飞对象,对试飞对象设计特点和系统功能进行分析,对比分析其差异性和先进性;依据试飞对象定位,梳理适航规章和程序。其次,要对民机试飞进行整体性考虑和规划,一般分为研发性试飞需求、取证性试飞需求、客户性试飞和其它必要性试飞需求。再次,要依据适航规章和程序制定适航试飞科目,比如型号合格审定试飞科目(除颤振、功能和可靠性外)需进行申请人的验证试飞需求,部分试飞任务在申请人验证试飞的基础上,局方选择性地局方试飞需求,新增适航条款导致增加或减少的试飞需求,发动机进行必要的取证(CCAR-33部)试飞和新增系统或功能产生的试飞需求等。最后,要结合自有民机型号试飞工作实际经验制定研发科目,比如构型更改等原因导致的试飞需求,排故、转场、航展、飞行员训练等类型的试飞需求,各系统须进行必要的调参试飞等。

针对一般典型的民机型号,根据民航适航管理程序 AP-21-03-R4《航空器型号合格审定程序》,试飞按照性质和目的可分为首飞、申请人试飞、审定试飞、功能和可靠性试飞、AEG(航空器评审组)试飞、出厂和交付试飞。申请人试飞可分为申请人的研发试飞和申请人的符合性验证试飞。申请人的研发试飞是申请人自行组织开展的、以调整飞机状态为目的试飞;申请人的符合性验证试飞和审定试飞是按照批准的型号合格审定试飞大纲开展的试飞,用于表明航空器对于民航规章的符合性,其中同时作为申请人的符合性验证试飞和审定试飞的试飞活动称为并行试飞。功能与可靠性试飞是审定试飞的一部分,是为了确认航空器及其零部件

和设备是可靠的、能适当工作的,且是满足航空器评审组(AEG)的审查要求的。AEG试飞用于表明运行要求的符合性,确保飞机可运行。出厂和交付试飞是TC证后的试飞活动。

### 2.2 试飞逻辑

根据确定的试飞需求,进行试飞规划和制订详细的试飞计划时,必须考虑各种任务需求之间存在的逻辑关系。不同科目之间存在前后制约关系,比如执行失速速度、极曲线、横航向配平等性能、操稳试飞科目前,必须先完成空速系统校准和大气总温校准试飞科目。

首先,根据试飞科目的试验目的和试验结果,按照科目约束关系的类型可以将试飞科目划分为以下五种类型。

A类科目:以建立试验标准为目的,所获取试验结果影响后续大量试验科目(如:空速系统校准和大气总温校准、发动机推力确定、确定临界发动机等);

B类科目:以确定试验基准为目的,所获取试验结果影响后续部分试验科目(如:失速、颤振、高速特性、起飞性能等);

C类科目:根据所确定的试验基准,进一步考察飞机各项平台或系统工作品质(如:过载杆力梯度-机动特性、进气畸变、横向操纵-单发工作等);

D类科目:考察飞机各项品质,对标准有要求,但对试验基准无要求的试飞科目(如:1#液压系统故障、供油性能试飞、前轮转弯能力验证等);

E类科目:以检查系统功能为目的,对试验标准无要求的试飞科目(如:仪表照明、旅客氧气等)。

其次,在科目前置类型的基础上,按照科目具体试验顺序,进行试飞状态卡的组合和优化,并为后期试飞任务单编制提供支持。由于试飞科目顺序逻辑的数学模型实现难度较大,目前使用任务包的形式进行科目的排序,将科目划分为顺序包、专项包和组合包三组。

(1)顺序包:有明确顺序要求的科目组合,比如速度/角度标准、推力标准、失速、颤振、初始性能、VMC试飞、爬升、高速特性等。

(2)专项包:有特殊的环境要求和测试要求,难以重复进行的科目组合,比如排液试验、高寒试验、高温试验、侧风试验、高原试验、自然结冰试验等。

(3)组合包:无特殊要求,可与其他科目进行组合的科目,比如照明系统、水/废水系统、中央维护

系统、起落架摆振、通信系统、指示记录系统、压差/氧气系统、空调系统、内饰和设备的试飞。

最后,依据不同科目之间的约束关系类型,按照顺序包科目和专项包科目为主线,组合包科目适时插入的方法,便可以初步完成一个新型号的试飞科目规划。

### 2.3 任务分工

任务分工需要根据试飞任务的特点(任务量、周期、目的、试飞逻辑等)来进行总体规划,通过将试飞状态点分配到各架试飞机上,并实现试飞状态卡的优化和组合,以满足总体任务的减少和各架试飞飞机任务在同一时间节点完成的最优组合。任务分工必须考虑试飞机(参与飞行试验的飞机)数量和型号试飞周期带来的影响,在型号试飞周期和投入试验飞机数量确定的情况下,可按照如下原则进行任务分工的规划:

(1)各架试飞机所承担任务应可覆盖所有审定试飞内容;

(2)各架试飞机实际承担试飞相关任务所需求的时间周期应与各架试飞机的试飞周期基本一致,应考虑的因素有试验实施周期、试验准备周期、不可预见事件预留周期等;

(3)为实现型号试飞的周期和直接成本的优化,应评估试验的各项需求,通过组合的方式减少试验任务量和试飞周期,应考虑的因素包括科目构型需求、科目测试改装的共通性、具备相同实施约束的科目、科目顺序需求等。

考虑到试飞周期和投入直接成本,新型号的民用运输飞机一般投入3~6架试飞机进行试飞工作。

### 2.4 试飞计划

根据任务需求梳理,可以评估型号试飞工作量和试飞周期;根据试飞任务逻辑关系和任务分工的分析,可以评估型号投入试飞机数量及各架试飞机的测试改装构型计划;根据试飞周期、任务逻辑关系、任务分工、试飞机数量及测试改装计划,可以初步制订型号的总试飞计划。

图1为一架典型的试飞机试飞计划编制方法的示意图,其中flight block为一个试飞阶段,比如高原试飞、高温试飞、自然结冰试飞、性能试飞、机械系统(飞控液压)试飞阶段等;flight sub block为同构型要求、同试飞因素的科目组,比如静稳定性试飞、动稳定性试飞、失速特性试飞、液压故障试飞等;flight group为同构型、试飞因素的试飞架次组合,比

如小重量空速校准、大重量高速特性试飞等;flight为单架次试飞(单个任务单);down time为一个停飞期,比如自然结冰试飞前测试改装等。

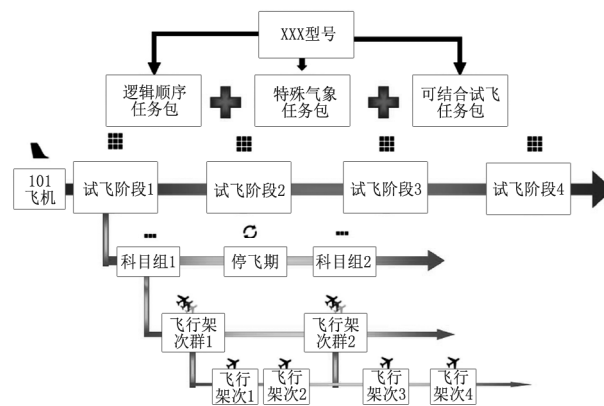


图1 典型的民机试飞计划逻辑图

### 2.5 试飞优化

通过试飞任务需求梳理、逻辑关系分析、任务分工确定、试飞计划制订等工作,基本完成了一个新型号民机试飞工作的初步规划。当然,在此过程中根据有限的、局部的试飞工作经验和方法,已经进行了民机试飞任务的宏观优化。但是,多数新型民机试飞过程中由于构型、试飞方法、试飞效率、试飞资源、计划安排等原因,试飞任务量(实际飞行架次数)和试飞周期会不同程度地增加,最终导致型号研制成本增加和取证交付延期。对于一个新型号民机试飞工作来讲,在研制技术水平、可利用资源等无法快速提高的情况下,提高单飞行架次的试飞效率就成为了缩短试飞周期和降低研制成本的有效途径。

提高单飞行架次的试飞效率的方式有两种,一是提高单架次试飞结果的有效性,即减少试飞任务的重复执行;二是提高单架次各个环节的利用率,即利用较少的试飞架次完成更多的试验点。

单架次试飞结果有效性一定程度上取决于试飞前的准备情况。试飞过程中,由于构型偏离、试飞员操作技巧、试飞方法、测试系统稳定性等因素影响,将不可避免地产生无效的试飞架次。当然,随着试飞进展,试飞机构型逐渐趋于稳定,试飞员操作熟悉性提高,以及试飞准备经验的积累,单架次试飞结果的有效性会不断提高。

单架次试飞利用率属于深层次规划的问题,必须采取飞行剖面优化(任务单优化)的方法解决,即在充分利用单个飞行架次的各个阶段(滑行、爬升、巡航、下降、进近、着陆)的条件下,合理进行试验点



组合和飞行剖面优化,以达到在同任务量(试验点数量)条件下试飞架次(任务单)最少。飞行剖面优化(任务单优化)需要考虑试验点的参数特征(高速、速度、重量、重心要求等),还要考虑飞行中各个阶段的燃油消耗和重量重心变化,还要在一定量试验点里筛选最合适的试验点组合,人工操作无法实现,可采取人工干预和计算机辅助的方式开展。

图2(a)~(d)为一个典型的任务单优化过程效果图。图2(a)为一个含4个试验点的任务单1,飞行时间为1小时59分钟;图2(b)为一个含5个试验点的任务单2,飞行时间为2小时13分钟;图2(c)为一个含4个试验点的任务单3,飞行时间为51分钟。图2(d)为经过飞行剖面优化(任务单优化)后的新任务单,包含了任务单1、2、3的所有试验点,试飞时间为2小时45分钟。通过优化结果来看,执行上述13个试验点的试飞架次由3个优化为1个,飞行时间缩短2小时42分钟。

### 3 试飞管理

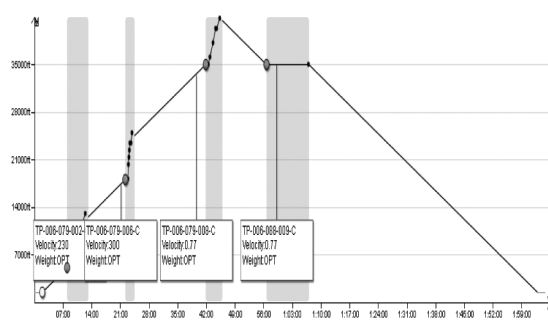
试飞管理更强调对试飞任务的管理,即对试飞任务需求、任务执行状态、计划执行情况进行动态管理,实时调整和掌控试飞工作进展情况。民航试飞规划成果的有效性和实施性需要匹配的管理方法去推动和适时地调整、维护,高效、动态的计划管理措施可以促进和保障试飞计划的实施。试飞管理可分为3个阶段,即试飞前管理、试飞过程中管理和试飞后管理。

试飞前管理是指试飞前跟踪科目的技术准备情况和制订科目构型到位计划,针对试飞前的准备情况实时调整和优化试飞计划;试飞过程中管理是指对试飞过程中出现的问题进行整理和分析,确认试验点执行的有效性,为下一个试验点做好准备;试飞后管理指的是及时确认架次有效性和科目完成性,为进行下一个飞行计划做好准备。

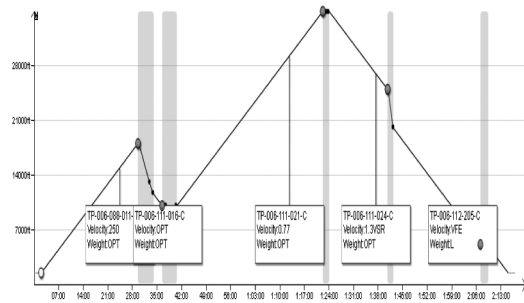
试飞管理是针对试飞任务的一个动态管理的闭环过程,即对任务的前期准备、任务执行、结果确认等环节进行实时监控,对影响试飞计划执行的问题进行及时评估和确认,然后对试飞计划进行动态调整,以确保试飞计划的规划性和科学性。

### 4 平台开发

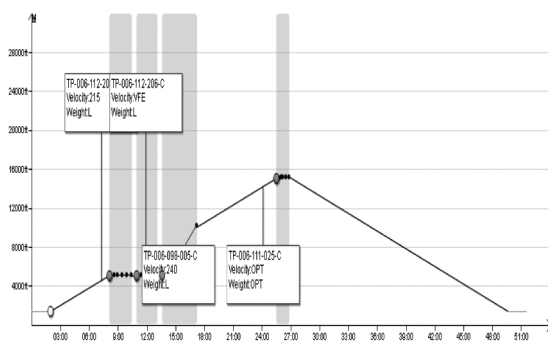
试飞规划和管理属于排序和组合的范畴,需要对大量数据进行判断和分析的同时,还要根据不可



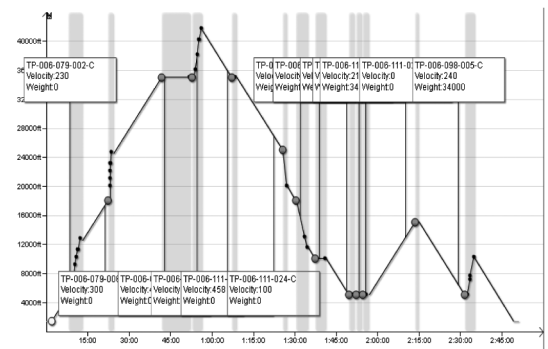
(a) 典型任务单 1



(b) 典型任务单 2



(c) 典型任务单 3



(d) 优化后任务单

图2 任务单优化过程效果图

量化的经验进行多轮迭代;既要进行试飞任务的合理规划,还要进行试飞计划的动态管理,特别是进行飞行剖面的优化,仅靠人工操作是不可能实现的。  
(下转第52页)

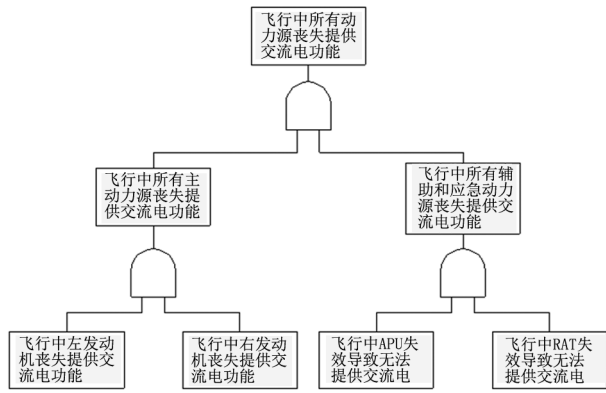


图7 APU 丧失交流供电功能故障树的一段子树

表6 底事件的失效率

	飞行中左发动机丧失提供交流电功能	飞行中右发动机丧失提供交流电功能	飞行中APU失效导致无法提供交流电	飞行中RAT失效导致无法提供交流电
失效率 (/h)	$2.2 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-3}$	$7.5 \times 10^{-2}$	$3.6 \times 10^{-2}$

表7 冷备件门案例的计算结果

方法	传统故障树解析解	动态故障树解析解	动态故障树二阶近似解
顶事件发生概率	$2.67 \times 10^{-6}$	$1.65 \times 10^{-6}$	$1.67 \times 10^{-6}$

## 4 结论

动态故障树作为传统故障树的拓展,具有两个优点:定性分析方面,由于可以表达出系统的动态特性,因此对系统的描述更为全面,有助于分析人员进一步

(上接第4页)

为了将系统的民机试飞规划与管理研究成果应用于实际试飞工作,使用计算机辅助和人工干预相结合的方式是必然的途径。

在上述民机试飞规划和管理研究成果和方法的基础上,上海飞机设计研究院已开发出一套适用于民机试飞的 FTCS 软件平台,且已在 ARJ21-700 飞机型号项目取证试飞工作中得到了验证和应用。

## 5 结论

本文梳理了民机试飞需求类型,讨论了民机试飞任务分工和试飞计划制订原则,分析了民机试飞科目特点和逻辑关系,研究并提出了一种民机试飞任务单优化方法,阐述了一套国际先进水平的试飞规划与管理体制,实现了民机试飞的闭环控制,解决了国内试飞规划中未能系统研究的问题,并创建

理解系统架构。定量计算方面,通过施用马尔可夫模型求解,可以得到更准确的数值。但同时也有一个缺点,即马尔可夫模型的建立和计算都比较复杂。本文对双输入的动态逻辑门的计算式进行了理论推导,然后对解析解施用了二阶近似,得出的计算式在保证一定精度的前提下较大幅度地简化了计算,其运算成本几乎与传统故障树分析相同,所以保证了工程实践上大批量计算的可行性,有一定的应用前景和价值。

### 参考文献:

- [1] 美国原子能委员会. 故障树手册[M]. 1987: 6.
- [2] SAE. ARP 4761 Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment[S]. 1996.
- [3] 高顺川. 动态故障树分析方法及其实现[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005.
- [4] 赵运生,胡骏,吴铁鹰,陈娟娟. 大型民用飞机辅助动力装置性能仿真[J]. 航空动力学报, 2011, 26: 1590.
- [5] 朱正福,李长福,何恩山,杨春华. 基于马尔可夫链的动态故障树分析方法[J]. 兵工学报, 2008, 29: 1104.
- [6] 王波,刘东,李艺. 基于顺序失效符的动态故障树形式规约[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38: 1255.
- [7] K. Dura Rao, V. Gopika, V. V. S. sanyasi Rao, H. S. Kushwaha, A. K. Verma, A. Srividya. Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment. Reliability engineering and system safety[J]. 2009, Vol. 94: 872.
- [8] 孙杨慧. 基于故障树与马尔科夫分析模型的发动机系统安全性评估[J]. 民用飞机设计与研究, 2013, 增刊第2期: 29.

了一套具有国际先进水平的 FTCS。

本文所得出的研究成果和方法已在实际型号试飞工作中得到了应用和验证,起到了减少试飞架次、提高试飞效率、缩短型号试飞周期和降低成本投入的作用,具有实际的工程应用意义。

### 参考文献:

- [1] Marle D. Hewett, David M. Tartt etc. The development of an automated flight test management system for flight test planning and monitoring [J]. ACM, 1988, 324-333.
- [2] Victor W, Bender, Gerald Cahill etc. Automating the flight test planning process [C]. Digital Avionics Systems Conference, 1994, 14th DASC: 83-88.
- [3] 沈宏良,余勇军,刘旭,等. 试飞科目的最优排序问题研究[J]. 南京航空航天大学学报,2000,32(3): 312-317.
- [4] 周自全. 飞行试验工程[M]. 北京:航空工业出版社,2010.