



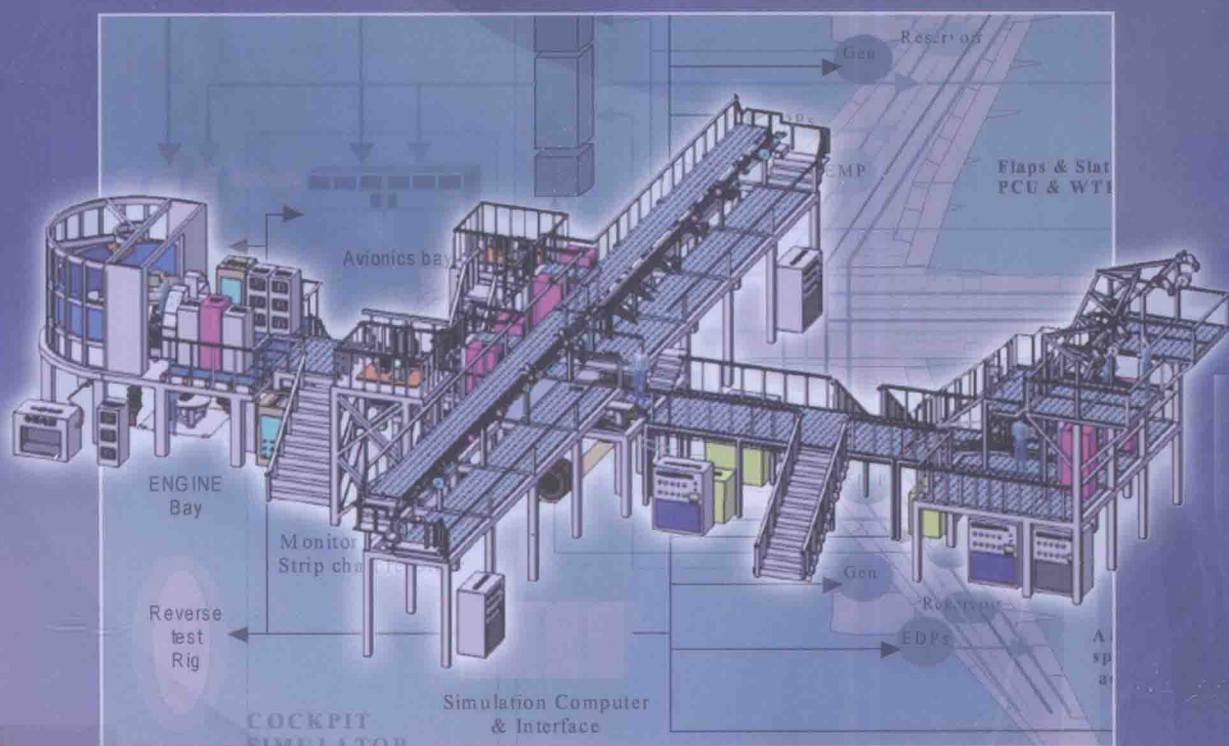
飞机设计技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

MODERN AIRCRAFT IRON BIRD

现代飞机铁鸟

李振水 支超有 主编



航空工业出版社

现代飞机铁鸟

李振水 支超有 主编

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

随着航空技术的飞速发展,铁鸟研制已经成为新型号飞机研发不可或缺的重要组成部分,成为飞机多系统试验综合的手段。本书对铁鸟的基本概念、设计要求、设计方法、关键技术、铁鸟试验设备的设计方法,以及铁鸟试验方法进行了深入研究和阐述。

本书根据作者多年来从事飞机铁鸟设计、研究、工程实践的成果和经验编著而成,可作为飞机机电系统工程技术人员设计参考用书,也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代飞机铁鸟/李振水,支超有主编. --北京:
航空工业出版社,2016.8

(飞机设计技术丛书)

ISBN 978-7-5165-1088-9

I. ①现… II. ①李…②支… III. ①飞机—设计—
实验方法—研究 IV. ①V22-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第209332号

现代飞机铁鸟

Xiandai Feiji Tieniao

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016年8月第1版

2016年8月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:10

字数:226千字

印数:1—1500

定价:45.00元

《现代飞机铁鸟》

编 著 人 员

主 编：李振水 支超有

审 校：段卓毅 秦 成

编写人员：（按姓氏笔画排序）

江辉军 李 伟 李美玲 常 凯

常俊侠

前 言

研究飞机铁鸟，特别是现代飞机铁鸟这一命题的重要性和迫切性，是我们在工程实践中的切身感受，也是航空科学技术迅猛发展的结果。早期的飞机设计，可以不使用铁鸟，或者只需要简单的铁鸟。现代飞机研发不仅离不开铁鸟，而且还在不断扩展铁鸟试验的范围，铁鸟已经成为新研飞机系统试验综合及验证的工具，铁鸟试验也成为首飞前必须考核的关键试验项目。如果没有铁鸟和铁鸟试验的验证，许多故障只有等到机上试验甚至空中试飞时才能被发现，由此带来的不仅仅是由于设计反复、零部件报废、进度延误导致的巨大经济损失，而是潜伏于系统中的故障和安全隐患不能被用户所接受。欧洲空中客车集团认为，在当今飞机设计和测试主要由计算机完成的时代，发现潜在问题至关重要，对于有超过几千万行数据代码在计算机中运行的飞机，首飞之前必须排除任何可能的故障，并完成系统融合。

对于当今先进的飞机，特别是大中型飞机的铁鸟而言，其研制涉及到多系统和多学科的技术理论，零部件数量以百万计，经费以亿计，是名副其实的庞大工程项目。国内开展铁鸟研究和工程设计已有40余年的历史，取得了长足进步，铁鸟技术正在成为飞机机电系统领域的重要学科分支。但同国际先进水平相比，国内对铁鸟技术认知的深度仍显不够，缺乏较为系统的研究，以学术论文、专利、标准规范、技术专著为标志的显性成果较为匮乏，甚至是空白。针对这种状况，中航工业第一飞机设计研究院近年来特别加强了对铁鸟工程的系统性研究，并启动了标准规范和技术专著的编撰工作。本书即是在此背景下，经过对以国际航空巨头波音公司、洛克希德-马丁公司、欧洲空中客车集团为代表的先进铁鸟技术进行分析和研究，对国内主要的铁鸟设计案例及经验进行总结的基础上撰写而成的。本书撰写过程中，得到了中国航空工业集团公司所属的有关厂所院校、中国商用飞机有限责任公司有关部门的大力支持和帮助，在此一并致以衷心的感谢！

本书共分5章，第1章阐述了铁鸟的基本概念和国内外技术发展现状；第2章阐述了铁鸟的设计要求和顶层设计方法；第3章阐述了铁鸟台架设计方法；第4章对铁鸟试验设备进行了分类、概括性描述和综合分析；第5章对铁鸟试验项目和试验方法进行了论述。

本书可作为飞机机电系统工程技术人员设计参考用书，也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。由于作者水平有限，难免有错误和不足之处，恳请读者批评指正。

编者

2015 年 12 月

术 语

1. 铁鸟 (Iron Bird, IB)

早期指飞机机械操纵系统试验台,或飞机液压系统试验台,或操纵系统与液压系统合为一体的地面模拟试验台;现在的铁鸟(又称铁鸟综合试验台)既可以是单一的试验台,也可以是由多个试验台综合而成的试验环境,且后者更为普遍。

通常,铁鸟被试系统包含完整的飞行控制系统(简称飞控系统)、液压系统、起落架系统,以及部分航空电子系统(简称航电系统)、机电管理系统、电源系统和发动机控制系统。

2. 被试系统/试验件

被试系统指安装在铁鸟上作为试验对象的飞机系统;试验件是指作为试验对象的零件或部件。试验件一词是相对于成品和标准件而言的,是由设计部门设计、生产部门制造形成的,而成品、标准件通常由专业公司研制。严格地讲,被试系统是由成品、标准件、试验件组成的,因为都是试验对象,我们经常将被试系统等同于试验件。

3. 飞行控制系统 (Flight Control System, FCS)

其演变过程如下。

(1) 简单机械操纵系统,依靠飞行员人力操纵,可进一步细分为硬式、软式、混合操纵系统;

(2) 助力操纵系统,由“机械线系+助力器”组成的操纵系统,依靠助力器克服气动载荷,可进一步细分为可逆式助力操纵系统、不可逆式助力操纵系统;

(3) 带增稳的操纵系统,由“助力操纵系统+增稳系统”组成的操纵系统;

(4) 带控制增稳的操纵系统,由“助力操纵系统+控制增稳系统”组成的操纵系统;

(5) 自动驾驶仪/自动飞行系统,由“外回路+舵回路”组成的控制系统,实现自动驾驶功能;

(6) 电传操纵系统,当控制增稳的权限扩大至100%时,控制增稳操纵系统即成为电传操纵系统,换句话说,“电信号传输+全时全权控制增稳系统”构成了电传操纵系统。

综上所述,现代飞控系统是覆盖了上述全部内容,能够控制飞机姿态和轨迹,具有良好飞行品质的控制系统。需要补充说明的是,操纵和控制一词,在英文中的译法是一样的,而在中文里则有细微的差别,过去的较长时间里,习惯将“控制”一词对应自动器的功能,如增稳、自动驾驶;而“操纵”一词则对应飞行员的动作指令。所以“电传操纵系统”是与“机械操纵系统”相对应的,将操纵一词改为控制当然

是可以的。

4. 光学工具点 (Optical Tooling Points, OTP)

采用激光跟踪测量仪安装测量时, 用来确定被安装单元空间位置的控制点。

5. 基准工具球点 (Tooling Ball, TB)

用于建立铁鸟台架坐标系的控制点。

6. 增强参考系统 (Enhance Reference System, ERS)

从已有坐标系转化, 或为计算机辅助测量系统 (CAMS) 专门产生的在铁鸟台架全寿命周期 (又称全生命周期) 使用的永久坐标系。

7. 动力有限元建模

对结构件进行动力特性 (如振动特性、颤振特性、动响应) 计算分析时, 需要将真实结构简化成有限自由度的计算模型, 该计算模型应能真实反映结构件的刚度特性、质量特性和连接特性, 这个过程称之为动力有限元建模。常用方法为有限元素法 (简称有限元法), 即将结构件离散化为有限个节点和连接这些节点的有限个元素。

目 录

第1章 概述	(1)
1.1 铁鸟的基本概念	(1)
1.2 铁鸟技术发展概况	(5)
1.3 铁鸟案例	(9)
第2章 铁鸟顶层方案设计	(15)
2.1 铁鸟被试系统要求	(15)
2.2 需求分析	(18)
2.3 铁鸟顶层方案设计	(24)
2.4 模块化组合式铁鸟设计	(29)
第3章 铁鸟台架设计	(35)
3.1 铁鸟台架基础知识	(35)
3.2 台架设计	(41)
3.3 安装设计	(63)
第4章 铁鸟试验设备	(67)
4.1 概述	(67)
4.2 飞控系统铁鸟试验设备	(68)
4.3 液压系统铁鸟试验设备	(84)
4.4 起落架系统铁鸟试验设备	(90)
4.5 铁鸟试验通用设备	(95)
第5章 铁鸟试验	(110)
5.1 概述	(110)
5.2 飞控系统铁鸟试验	(111)
5.3 液压系统铁鸟试验	(123)
5.4 起落架系统铁鸟试验	(129)
5.5 铁鸟综合试验	(137)
参考文献	(148)

第1章 概述

铁鸟是飞机系统地面模拟试验的设备/设施，用于完成全系统的地面模拟试验，支持飞机首飞和鉴定试飞，是研发新型号飞机必不可少的“大型试验工具”。对于现代先进飞机特别是大中型飞机，由于系统复杂且高度综合、参与铁鸟试验的系统多，铁鸟研制越来越显现出交联关系复杂、技术难度大、工程规模大、耗资金大的特征，已经成为飞机研发过程中的大型工程项目。

本章着重介绍铁鸟的基本概念、技术演变和技术特征，例举了几型飞机铁鸟案例，使读者对铁鸟的轮廓形成比较完整的认识，为后续几个章节的深入阐述做好铺垫。

1.1 铁鸟的基本概念

1.1.1 定义

铁鸟，又称铁鸟试验台或飞机系统地面模拟试验台，是用于飞机系统地面模拟试验的大型试验设施。它由试验台架、安装在台架上的被试系统、配套试验设备组成，可以替代飞机，完成飞机飞控系统、液压系统以及相关联系统的地面模拟试验。图1-1为铁鸟示意图。

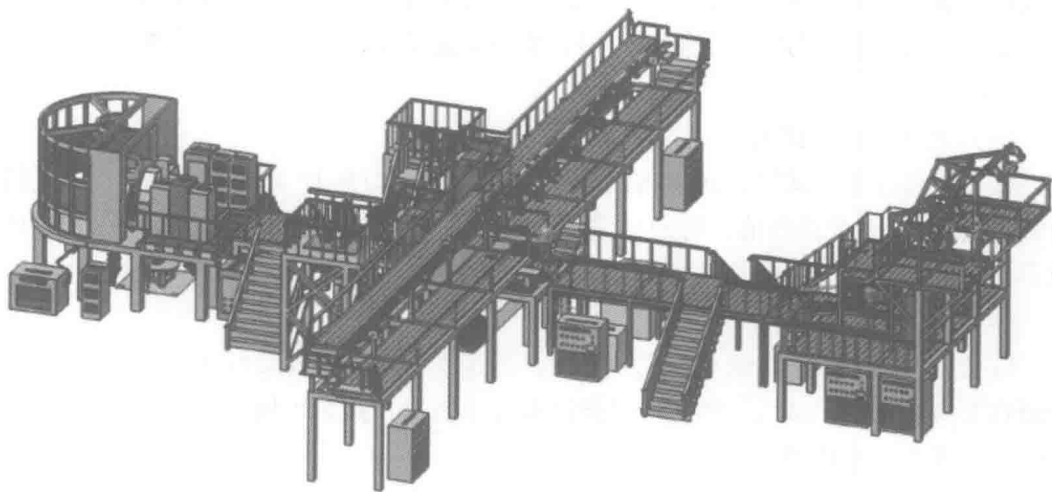


图1-1 铁鸟示意图

从上述铁鸟定义可以看出，它能够替代飞机用于开展飞机系统的地面模拟试验，这说明被试系统的逼真性好，与真实飞机系统具有可比性；此外，被试系统至少应包

括飞控系统或液压系统，或同时包括两个系统以及试验任务所要求的其他系统。实际上，随着飞机设计技术的发展，对多系统综合（又称交联）试验验证的需求更常见，“铁鸟”一词本身已经越来越具有综合的含义。

为什么要将飞机系统的地面模拟试验台称为铁鸟呢？有两个主要原因：其一，由于控制飞机姿态的舵面、驱动舵面的作动器、为作动器提供能源的液压系统和管路，以及操纵装置遍布整个飞机，从机头延伸至机翼和尾翼，这些系统和部附件基本属于飞控系统和液压系统的范畴。为了实现1:1模拟，用于安装被试系统（即飞控系统和液压系统）的试验台轮廓也与飞机尺寸相仿，犹如静卧地面的一只金属大鸟。其二，由于模拟的逼真度高，而且被试系统本身也基本是飞机真件，工程师和试飞员进行试验和操作时，身临其境的感觉强烈，仿佛驾驶飞机翱翔空中，真的变成飞鸟了。由此看来，铁鸟的名称是非常恰当的，因而逐步演变成了专用名词。

1.1.2 功能

研制铁鸟的主要目的是为了完成飞机系统地面模拟试验，验证系统设计的正确性，确保飞行安全，特别是新研飞机首次飞行的安全。也就是说，只有完成了铁鸟试验，新研飞机才能首飞。铁鸟的功能主要有五大类。

(1) 单系统模拟试验

对安装在铁鸟上的被试系统逐个进行功能试验和性能试验，当然也可以对该系统所包含的分系统、子系统、部件进行试验，但最终都要完成整个系统的试验验证，证明系统设计正确、满足要求。

(2) 多系统交联试验

对安装在铁鸟上的被试系统进行两两联合试验和多系统联合试验，又称交联试验（或称综合试验，集成试验），验证系统之间接口的正确性以及交联后的性能是否满足设计要求。例如，我们通常要进行液压能源系统与主飞控系统、液压能源系统与起落架系统、飞控系统与航电系统、飞控系统与电源系统，以及铁鸟上全部被试系统的交联试验。

(3) 试飞员在环试验

试飞员亲自参加试验，在铁鸟的模拟驾驶舱中进行各种飞行操纵（相当于驾驶真实飞机），评价设计性能，特别是评价人机工效、操纵品质、故障模式等方面的性能。

(4) 支持试飞培训

试飞员和试飞机组在铁鸟上实习体验，是首飞前培训的重要科目之一。由于铁鸟的逼真度高，有助于试飞员熟悉飞机操纵和显示装置，熟悉飞机性能，熟悉特情处置方法，增强首飞成功的信心。

(5) 支持试飞

新研飞机的试飞周期较长，通常包括首飞、调整试飞、鉴定试飞等阶段，期间难免出现故障，甚至需要设计更改，而对于较难诊断的故障，利用铁鸟也许能方便排故。此外，有些故障排除后或设计更改之后，仍需要进行铁鸟试验予以验证。

1.1.3 分类

简单地讲,铁鸟有两种形式,一种是只安装单一系统的铁鸟,例如,液压系统铁鸟试验台、飞控系统铁鸟试验台;另一种是安装多个系统的铁鸟,例如,A380、波音787、F-35、ARJ21、C919等飞机的铁鸟,都安装着比较完整的液压系统、飞控系统,以及(全部或部分)起落架系统、航电系统和电源系统。

目前国际上先进的飞机制造商(如欧洲空中客车集团、波音公司、洛克希德-马丁公司)都建有先进的综合试验室,铁鸟上也都综合着多个系统。随着现代飞机大系统综合的趋势,铁鸟试验的综合程度也必然越来越高,所以现在提到铁鸟,通常是指综合式铁鸟,本书也是以综合式铁鸟作为研究和描述的对象。尽管安装单一被试系统的铁鸟仍有需求,也有许多正在应用的实例。一些航空器(如直升机、水陆两栖飞机)的铁鸟也有特殊之处,但都不妨碍本书的描述,因为书中的理论和方法可供设计各种类型铁鸟时参考。

1.1.4 构成

通常采用以下3种方式描述铁鸟的构成。

(1) 按构成铁鸟的要素划分,可以分为台架、被试系统、试验设备三大部分。台架是铁鸟的承力框架,用于安装被试系统和试验设备(详见第3章);被试系统是铁鸟试验测试的对象,代表着飞机系统(详见第2章);试验设备是保障铁鸟试验的条件,包括供给能源设备、激励被试系统的设备、试验管理系统、试验过程控制、测试系统等(详见第4章)。

(2) 按铁鸟布置的区域划分,大致可以分为机头段、左机翼段、右机翼段、机身段、尾段五大部分(如图1-1所示),各段安装的被试系统亦与飞机相对应。通常情况下,机头段主要包括模拟座舱、舱外视景系统、仪表板和操作台、飞行员(又称驾驶员)操纵机构、前起落架和控制系统、部分航电系统,以及部分机载设备;机翼段(左右对称)主要包括副翼和操纵系统、扰流板和操纵系统、襟翼和操纵系统、缝翼和操纵系统、发动机驱动的液压泵源模拟系统、液压系统管路和电缆,以及部分机载设备;机身段主要包括主起落架和控制系统、舱门和控制系统、飞控系统操纵线系、液压系统附件和管路、刹车系统操纵线系,以及部分机载设备;尾段主要包括方向舵和操纵系统、升降舵和操纵系统、水平安定面和操纵系统、液压系统管路,以及部分机载设备。

当然,这种划分是针对常规布局飞机而言的,本书的描述代表了多数情况,对于不同用途的飞机会有一些差别,例如,有些飞机的主起落架并不安装在机身里而是在机翼里;有些飞机将不同舵面的功能合并,以减少一些舵面;还有些飞机的机翼具有折叠或倾转功能,可能会选择铁鸟的一侧机翼来模拟这种特殊功能。

(3) 按构成铁鸟的主次结构或规模划分,可以分为试验台主体和若干小型的(局部的、分系统)试验台。试验台主体几乎包含了全部被试系统和试验设备,而分系统试验台仅包含部分系统,之所以这样设置,是因为分系统试验台需要完成某些特殊的试验功能;或是用于试验的时间更早,为了节约经费、降低试验台主体的规模和

复杂程度,通过局部试验台这种组合方式来实现铁鸟的全部功能。也就是说,分系统试验台可以单独用于试验,也可以与主试验合并为一个整体成为完整的铁鸟。

1.1.5 特点

通过上面的叙述,可以看出铁鸟具有以下明显的特点或特征。

(1) 规模大、成本高、技术复杂

铁鸟属于大型试验设施,其主体占据的空间可能接近真实飞机,再加上辅助设施,规模就更大了,尽管可以通过一些技术措施降低铁鸟的高度和占地面积,但它仍然是庞大的试验设施。大型飞机铁鸟的占地面积可能达数千甚至上万平方米(A350飞机铁鸟主体的占地面积为 2400m^2),耗费钢材数百吨,各类电缆数百千米长,用于试验的仪器设备(传感器、测试仪器、专用和通用设备)上千台/套,安装的零部件(试验件、零件、标准件)以百万计,耗费资金以亿计。

(2) 新研机型专用,基本功能是验证

研制铁鸟最初的目的就是针对新研飞机完成全系统地面模拟试验,为首飞提供安全保证。随着需求增加以及铁鸟技术的发展,功能也有较大拓展,但根本目的还是对新研飞机的系统进行试验验证。尽管也可以利用铁鸟完成一些分系统、子系统甚至部件的试验,而且首飞后也有许多试验要做,但如果不是为了进行首飞前的验证试验,就不一定非要花费巨资研制铁鸟了。

这里的关键词很明确,即新研飞机、专用、验证。它透露出的含义是:针对已有飞机的更改设计不一定需要铁鸟;铁鸟无法同时适用于不同系列的其他机型;不是为了做原理性试验和阶段性研发试验,即使做这些试验也是附带的,验证性试验才是主要目的。

(3) 被试系统具有较高的逼真度

既然研制铁鸟的主要目的是进行验证性试验,必然要求被试系统具有较高的逼真度,使其能够体现飞机系统特性,根据铁鸟试验结果可以判别新研系统是否符合设计要求。

(4) “综合”成为常态化

早期的铁鸟只安装单一被试系统,交联试验可以在飞机上进行,后来逐步有了交联试验的需求,但仍限于少数系统的交联,例如,液压能源系统与起落架收放系统交联、助力操纵系统与液压能源系统交联。随着飞机系统越来越复杂、综合化程度越来越高,对多系统交联试验(试验综合)的需求更加凸显,现在已经将(全部或部分)飞行操纵系统、自动飞行系统、液压能源系统、液压作动的舱门控制系统、起落架收放系统、机轮刹车系统、转弯系统、航电系统、电源系统、机电综合管理系统,以及其他一些相关的系统综合在铁鸟上,新研铁鸟多为综合式铁鸟。

(5) 采用模块化结构

当铁鸟上需要综合的系统越来越多之后,铁鸟就变得非常复杂,代价很高,如何简化结构和降低成本已经成为制订铁鸟方案时必须考虑的重要因素。工程师面临的主要问题是:在满足多系统交联试验需求的前提下,铁鸟不要过分复杂,代价不要过

高,能够支持基本型飞机的系列化改进改型。解决这些难题的有效途径就是采用模块化结构。所谓模块化结构,指的是将铁鸟划分成若干功能相对独立的模块,分别设计和制造。通常每个模块具备一个分系统或子系统的试验能力,可以独立进行试验,还可以方便地与其他模块或铁鸟主体连接成一体,参与全系统级的试验。模块化结构的铁鸟特别适合于采用电传控制、分布式控制的飞机系统。

1.2 铁鸟技术发展概况

铁鸟伴随着飞机发展的需求应运而生,也伴随着飞机设计技术的进步而进步,始终都与飞机研制的需求相适应,经历了几十年的发展历程,衍生出了多种形式,成为现代飞机研发不可或缺的重要手段。

1.2.1 发展历程

早期的飞机非常简单,操纵系统只是简单的软式或硬式机械操纵,即飞行员通过钢索滑轮或机械杆系直接操纵飞机舵面,座舱仪表都是简单的分立式仪表。这个时期飞机设计和更改都比较简单,系统试验也很简单,可以在制造完毕的飞机上进行,即使需要更改也容易实现,不会造成较大的返工和浪费,因此不需要专门的全系统试验台。

随着飞机性能不断提升和飞行包线扩大,舵面上的铰链力矩急剧增大,飞行员靠自身体力难以操纵舵面。为解决这一技术难题,以液压助力器为标志的助力操纵系统应运而生了,进而又陆续出现了增稳系统、控制增稳系统,飞机操纵系统和液压系统更加复杂而且有了交联关系。这种具有增稳或控制增稳功能、由液压系统提供动力的助力操纵系统,有效减轻了飞行员操纵负荷,但试验需求却更加复杂了。除了常规的静态性能验证之外,还要验证动态性能,这就需要模拟操纵系统与液压系统的耦合模态、控制系统与支撑结构的耦合模态、运动部件受到的气动载荷、飞行员在环的大控制回路性能和人机工效。为完成这些复杂的试验项目,需要安装种类和数量众多的测试传感器和试验设备,需要加装复杂的激励器并对飞机部件进行改装,同时也需要很大的工作空间。很显然,利用真实飞机来完成如此复杂的系统试验是不可能的,必须研制专门的系统试验台,铁鸟的前身——飞机操纵系统地面模拟试验台/飞机液压系统地面模拟试验台就是在这种背景下诞生的。

当然,上述过程是渐进式的,“铁鸟”一词成为专用技术名词也是个逐渐形成的过程。前面已经讲到,在全系统级的地面模拟试验台逐步完备的过程中,人们发现了两个有趣的现象:一是模拟试验台的外观很像飞机,或者说像一只由金属材料搭建的静卧地面的“飞鸟”;二是因为模拟效果逼真,做试验的时候仿佛是在“驾驶飞机翱翔天空”。将这样的试验台称为“铁鸟”真可谓水到渠成,再贴切不过了。

1.2.2 技术现状和展望

涉及铁鸟的技术内容很多,将在后续章节详细阐述。本节仅就铁鸟选型和顶层架构方面的技术状况做简要归纳,这些内容代表了铁鸟技术的最新进展和未来发展

趋势。

(1) 关于“综合”的考虑

当代飞机已经进入多系统综合及全机系统综合的时代,采用的是一体化设计的方法和流程,这就导致了对试验综合的需求,所以当今的铁鸟要安装多个被试系统来满足交联试验需求,“铁鸟”一词通常都被赋予了综合的含义。这里也要顺便说一句,尽管综合式铁鸟已经常态化,但不是绝对的,应该根据需求进行论证和选择,有些飞机可以不需要综合式的铁鸟,而且对于小型的或简易的飞机,仍然可以直接在飞机上进行试验。

国内的铁鸟多综合有飞控系统、液压系统、起落架系统(含收放系统、转弯系统、刹车系统)、部分航电系统、部分机电管理系统、部分电源系统,以满足交联试验需求,如 ARJ21 飞机铁鸟和 C919 飞机铁鸟就是这种模式。

国外的铁鸟多综合有主飞控系统、液压系统、部分航电系统、部分电源系统、部分机电管理系统。起落架系统一般不在其中,其流量负载用负载模拟器代替,这是因为整个起落架系统的研制和交付由供应商负责,供应商拥有完备的试验设施,在交付产品之前已经完成了大量验证试验,在铁鸟上不再需要做单系统试验,交联试验也可以大幅度简化。与之相类似,高升力系统通常也不综合在铁鸟上,而是由供应商单独试验和交付。另外,由于多电飞机已经出现并有快速发展的趋势,电源系统正在并将被更多地综合在铁鸟上用于完成与电作动器的交联,例如, A380 和波音 787 飞机铁鸟。

(2) 关于模块化设计

前面已经讲到,采用模块化设计技术是简化铁鸟结构、降低成本、快速投入试验的有效方法。模块化结构的概念是近些年才提出来的,尽管这种结构的铁鸟早已经有了一些应用案例,例如,对于起落架系统、高升力系统、大型舱门控制系统等相对独立的系统,国外的系统供应商实力强大、经验丰富,具备整个大系统的研发和交付能力,主制造商一般将这些系统当作独立的模块对待,需要时将其与铁鸟主体交联,或用负载模拟器代替。国外还有一种应用较多的模式,就是在设计铁鸟的时候,将分系统(包括主要部件、安装支座、管路、电缆、配套标准件等)打包成模块,与供应商协调好接口,由供应商直接交付和安装分系统模块。国内方面,也已经开始按照模块化的思路进行铁鸟设计,可以预见,这项技术将是现在和未来相当长一个时期内的主流技术。

(3) 关于飞机舵面的模拟

这里讲到的飞机舵面主要指副翼、扰流板、升降舵、方向舵、可动水平安定面,是主飞控系统的重要组成部分。作动器-舵面系统试验是重要的铁鸟试验项目,其动态性能受舵面的转动惯量和刚度影响较大。对逼真度的要求很高时,在铁鸟上直接安装飞机舵面和舵面悬挂支臂(真件),这样可以保证作动器-舵面系统的动态试验结果更为真实可信,但缺点也很明显。首先,飞机舵面的成本很高,特别是对于大中型飞机和一些特殊气动布局飞机,由于舵面数量多、尺寸大,成本更昂贵;其次,进度

会受到制约,因为要等待设计和制造流程完毕后才能得到试验件,无法提前开展试验;再次,由于要增加测试改装(如加强加载点、加装传感器等),可能要对试验件进行局部更改;最后,大尺寸的飞机舵面对试验室空间高度和场地面积的要求较为苛刻,造成了附加成本和限制。这些缺点促使工程师们考虑用“工艺件”或模拟舵面来代替真舵面,答案是肯定的,而且这种替代方法已经被普遍采用,这也得益于数学仿真技术的进步,设计人员通过仿真可以准确地认知被试系统特性。

(4) 关于气动载荷模拟

飞机飞行时,运动的部件要克服气动载荷,例如,舵面偏转、起落架收放、舱门开启和关闭等。那么在试验室试验时,如何模拟作用在运动部件上的气动载荷呢?当前采用较多的方法有:计算机控制的伺服加载、液压加载、弹簧加载、橡皮筋加载、配重加载,其中伺服加载系统相对较复杂和昂贵但精度最高,其他加载方式比较简单但精度较低。这些加载方法都已成熟,选用时要根据试验需求、价格等因素来决定。从技术趋势上讲,工程师们正在努力减少甚至取消对气动载荷的模拟。

(5) 关于起落架的模拟

国内各主机厂所的铁鸟,多将液压系统和起落架系统综合,而国外飞机制造商的做法恰恰相反,铁鸟上不综合起落架系统,而是用负载模拟器代替。正如前面所述,铁鸟上是否需要综合起落架系统,完全取决于铁鸟设计方案,没有对错之分。国内与国外的做法不同,是由于研发体制不同所致,国内的供应商是按照分系统或部件分散交付的,主机单位负责大系统集成,需要在铁鸟上完成大量的试验;而国外的供应商按照大系统交付,交付之前已经完成了大部分验证试验,不需要在铁鸟上过多地做试验。

应当承认,国外的做法是对的,分工界面明晰合理,符合航空制造业的发展方向,国外飞机的大部件和大系统都是由专业厂商完成的,我国也正朝着这个方向努力。由于这个话题超出了本书的主题,此处不再赘述。

(6) 关于一些特殊功能的模拟

由于飞机种类很多,对铁鸟试验的需求也必然很多,对于一些特殊的功能,例如,机翼折叠、机翼变形、复杂的货舱门机构、起落架下蹲、雷达驱动系统、加油机构等,是否在铁鸟上模拟呢?这是设计铁鸟方案时必须考虑的因素。推荐的做法是,如果上述的特殊机构比较庞大和复杂,在铁鸟上进行全尺寸模拟必然导致铁鸟过于复杂,则应该在专用试验台上模拟,铁鸟上用模拟装置代替,能够保证信号交联即可;反之,如果功能不十分复杂,则可以考虑综合在铁鸟上予以实现。

目前的铁鸟较少有模拟上述特殊功能的,通常采用折中方式,以专用试验台上的试验为主,辅之以铁鸟交联试验和机上地面试验。这主要是由于两方面的因素,一是避免铁鸟过于庞大复杂,降低成本;二是上述的功能中,许多是伴随着飞机改型增加的,更适合通过专用的试验台完成试验。

(7) 关于虚拟铁鸟技术

所谓虚拟铁鸟,是指利用计算机网络和数学模型构建的、与物理铁鸟相对应的虚

拟试验环境。虚拟铁鸟与被试系统的部分真件实时交联，就构成了半物理仿真环境。这里要顺便解释一下，所谓的物理铁鸟只是相对而言，其实质仍是半物理仿真试验环境，除了空中试飞的真实飞机之外，地面上不可能也没有必要做到百分之百的物理仿真，因为被试系统中的一部分（例如，飞机运动特性、空气动力特性、发动机特性等）很难在铁鸟上真实再现，只能用数学模型代替。这样说来，物理铁鸟和虚拟铁鸟是密切关联并可在一定条件下相互转换的，当尽可能多地采用飞机真件时，即是本书所描述的物理铁鸟；当较少或基本不采用真件时，就是虚拟铁鸟。

虚拟铁鸟是新兴技术，明确提出这个概念并开展研究工作是近些年才开始的，已经受到国际先进飞机制造商的高度重视和广泛共识。虚拟铁鸟的优势显而易见，即成本低、改动方便、不受生产进度制约，在设计阶段就能够同步开展验证。利用虚拟铁鸟进行仿真研究，可以实现与飞机研制的同步甚至早于飞机设计，及早发现问题，减少物理铁鸟的试验工作量，减少返工，降低试验成本。当然，由于数学模型的局限性，数学仿真结果还不能作为最终的验证结论，只是作为物理铁鸟的辅助手段，但可以预言，随着仿真技术的不断发展，虚拟铁鸟技术前景广阔。

1.2.3 铁鸟的重要意义

通过前面的阐述，特别是1.1.2节关于铁鸟功能的描述，已经对建造铁鸟的必要性和重要性有了一定了解，现将铁鸟的重要意义归纳如下。

铁鸟是现代飞机研发所必需的试验设施，铁鸟试验是飞机首飞前必须完成的试验。由于铁鸟试验的项目很多，且大部分项目无法在真实飞机上进行，所以新研飞机首飞之前，都要经过铁鸟试验的验证。借助飞机进行的机上地面试验只能是有限项目的抽检，是为了与铁鸟试验结果进行对比和再次验证，无法针对全部试验项目。

铁鸟和铁鸟试验能够大幅度地降低研发成本，缩短研发周期，规避试飞风险。假如没有铁鸟的验证，意味着许多研发过程中的故障要等到飞机整机装配完成之后，在机上地面试验阶段或试飞阶段才能被发现，且不说可能危及试飞安全是我们所不允许的，即使从排故角度讲，因为不可能一次获得全部故障信息，也不可能快速定位故障，由此导致的设计更改、工装更改、返工制造、零部件报废、进度延误等方面的经济损失将十分巨大。如果因为这种技术上的不可控因素造成项目延误甚至失败，继而可能在政治、军事、经济、市场、企业形象等方面带来负面效应，其代价更是难以计量和容忍的。

对于铁鸟和铁鸟试验的重要性，已经形成了广泛共识。著名学者、美国麻省理工学院的约翰·汉斯曼（John Hansman）教授说：“对于非常复杂的飞机系统问题，计算机难以提前预测可能发生的故障，许多问题不到组装完成之后不会显现……”；波音公司在20世纪90年代的波音777项目中，建造了系统综合试验室和铁鸟，用于电子设备、飞控、液压、机械、电气的完整测试，而在此前的型号中，则要等到机上地面试验时，才会进行如此完整的测试；空中客车集团更是将铁鸟称作“Aircraft Zero”（这是空中客车集团的称谓，国内尚无与之对应的中文专用词，暂且根据字面意思将其称之为第“零架飞机”，意即它是早于首架飞机，但又不是真正飞上天的“飞机”。