

国外民航机试验

上海科学技术情报研究所

国 外 民 航 机 试 验

*

上海科学技术情报研究所出版

新华书店上海发行所发行

上海科学技术情报研究所印刷厂印刷

*

开本, 787×1092 1/16 印张, 2.5 字数, 60,000

1977年9月第1次印刷

印数, 1—1,800

代号, 151634·368 定价, 0.35元

(限国内发行)

前 言

为配合我国民航事业的飞速发展，我们根据“洋为中用”的原则，编译了国外主要民航机的模拟试验、地面试验和飞行试验，简明列出试飞计划，还介绍了波音公司的试验设备，可供从事这方面工作的领导、工人和技术员参考。本书由上海5703厂和我所共同选题编译，最后由上海5703厂审阅。

由于我们水平有限，书中一定还存在不少缺点和错误，希望读者批评指正。

..... 编 者

一九七七年二月

目 录

1. DC-10 和 L-1011 飞机发展中采用了地面模拟设备.....	(1)
2. DC-10 飞机飞行试验计划.....	(4)
3. L-1011 三星飞机飞行试验计划.....	(11)
4. A 300 B“公共客机”地面试验和飞行试验.....	(14)
5. 协和式飞机的地面试验和飞行试验.....	(18)
6. F.28 试飞情况简介.....	(20)
7. 波音 707 自动着陆系统的飞行试验.....	(22)
8. 波音 727 飞行试验.....	(26)
9. 波音 747 飞行试验计划.....	(31)
10. 波音公司的飞行模拟和结构试验设备.....	(33)
11. 国外主要喷气式民航机研制进展一览表.....	(35)

DC-10和L-1011飞机发展中采用了 地面模拟设备

在洛克希德·加利福尼亚公司和麦克唐纳·道格拉斯公司宽机身运输机飞行试验操纵系统的研制和鉴定中，地面模拟设备“铁鸟”起了很重要的作用，铁鸟是一种钢架，与真实的飞机大小相同，里面装有用于鉴定的各种飞行操纵部件。

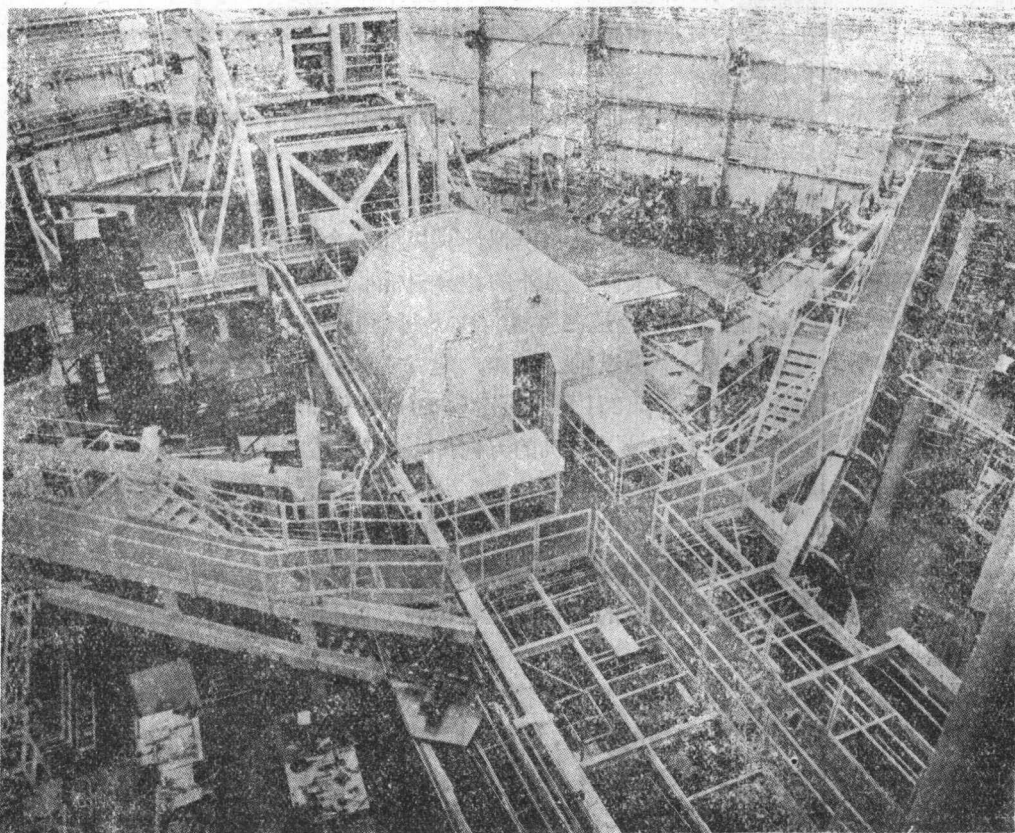


图 1 L-1011 飞机系统模拟器“铁鸟”的钢架，用于起落架、飞行操纵系统、液压和电气系统的持久循环和鉴定试验。缩短的17呎机身段(位于中间)，用于测量客舱的噪音

两家公司采用的设备用于下列相同的有关功能：

1. 操纵系统(包括液压、机械和电机机械部分)的研制。
2. 系统和操纵的功能试验。
3. 提出修改或设计变更的鉴定。
4. 自动飞行操纵系统(包括自动驾驶仪和自动着陆系统)的研制和鉴定。

5. 驾驶仪熟悉和鉴定。

铁鸟用于试验新飞机的操纵系统，当飞机开始飞行时，用于验证这些系统的操作。这些设备一般说来尽可能简单，用手动操作或用机械操作。然而，L-1011和DC-10应无手动操作类型。因此，液压作动操纵的重复要求、故障-工作式系统要求以及三级自动着陆系统的研制产生了增加试验飞行器铁鸟的要求。

北美洛克维尔公司把类似的设备用到B-70轰炸机中，而波音公司把模拟设备用到波音747运输机中。在欧洲，协和式超音速运输机也用这样一种模拟器。洛克希德公司在C-5A运输机研制计划中，麦克唐纳·道格拉斯公司在DC-8运输机试验中，都用先进的铁鸟获得了早期的经验。

虽然在细节方面有些不同，DC-10和L-1011系统模拟器包括下列一些设备：

1. 对于各自飞机在长度、翼展和高度方面相适应的标准铁鸟机架，带有大部分用于操纵系统的液压、电气和机械设备。

2. 带有完整飞行操纵和仪表显示能力的座舱，允许系统“在翻筋斗中驾驶”的鉴定，以及自动飞行操纵性能的鉴定。

3. 带有自动飞行操纵、自动驾驶仪和自动着陆系统设备的航空电子试验台。

4. 在操纵功能试验时，与数字计算机和模拟计算机的结合能提供座舱飞行模拟，把信号输入到操纵系统中，以及模拟气动载荷。另外的计算机能收集和分析试验中得到的数据。

DC-10和L-1011系统的铁鸟试验是在飞机首次飞行前约一年开始的，每个部件逐件安装并且试验。然后，分别检查每个操纵轴。例如，麦克唐纳·道格拉斯公司在1969年11月开始试验俯仰轴，洛克希德公司在同年12月开始鉴定L-1011俯仰操纵。当L-1011在1970年11月16日作首次飞行时，已在铁鸟上记录了飞机的方向舵系统3600次以上的飞行循环。DC-10在1970年8月29日作首次飞行，麦克唐纳·道格拉斯公司在铁鸟上已完成飞机操纵系统的组合试验，包括界面机械的、电气的和液压分系统。

作为早期试验的结果，DC-10和L-1011作了许多设计修改。据两个公司说，大多数修改是较小的，包括稍扩大一定液压管的直径来改善液流，或稍改变停机刹车手柄的形状使驾驶员更好地握住它。

两只铁鸟的一个早期目标是消除操纵摩擦力，例如，麦克唐纳·道格拉斯公司在这个范围内试验了不同的材料和用了不同的概念，并且发展了一种充满石墨的聚四氟乙烯（Teflon）导引片垫圈以支持操纵电缆，DC-10仅在俯仰轴中就使用了这种垫圈72个。

一种液压热传送新计划也是从DC-10试验中得到的，现在用沿着副翼和升降舵边缘流动的旁路小管系冷却液压系统。通常，飞机液压液体是由通过燃料箱的液压管系来冷却的，这就使重量较大，而且当燃料箱空着的时候，冷却作用就无效。

不同的方法

虽然L-1011和DC-10铁鸟计划的目标本质上是相同的，但是两个公司使用了稍微不同的方法。可操作的操纵面（包括前缘缝翼条、扰流器、副翼和襟翼）以及在左机翼主要使用真实飞机结构表示L-1011铁鸟的特征。洛克希德公司使这些特征适应于联邦航行局验证和操作试验的一部分，这些试验对于L-1011的联邦航行局签证是必不可少的，飞机通常使用这些试

验。

L-1011 操纵系统在模拟器上着手耐航性循环试验,以遇到联邦航行局要求和用户的保证。在一个计划中,必须完成累计约25,000小时的试验,这与36,000次飞行循环有同样效果,相当于新运输机在主要的分系统上飞行50,000小时。在试验时,对于热鉴定来说,操纵系统所选的范围是封闭的,温度下降到 -65°F (-54°C)。

起落架也包括在洛克希德铁鸟上,除观察正常性能特性之外,还要验证过控和紧急状态,包括在水平姿态和机头向下姿态中的交替起落架收放系统,以及用模拟载荷下的自由落下。L-1011模拟器不带机身,只有一段17呎座舱,用来研究从液压系统、起落架和其它噪音源来的声音减弱。

麦克唐纳·道格拉斯公司在DC-10铁鸟上没有装设真实的操纵面。带有使操纵面运动的伺服作动器,代替结构的固态构件以及相当于操纵面的金属重量。襟翼和缝翼条的功能试验在圣路易的公司所属厂中作出,DC-10机翼是在这里制造的,而且新研制组件的循环要求与其在铁鸟上满足,不如在试验台上满足。

起落架从DC-10铁鸟上除去,虽然在设备上着手试验过刹车系统和防滑系统。麦克唐纳·道格拉斯公司技术人员在单独装置上试验起落架。起落架操作在其它液压分系统上的影响通过阀在铁鸟上加倍了。

驾驶员练习

甚至在铁鸟操作前,L-1011和DC-10提出驾驶员在计算机作计划的座舱模拟器内着手练习,计算机提供飞机的预测性能特性。后来,驾驶员进到铁鸟的座舱中,在这里,驾驶员能鉴定首次飞行前的操纵系统操作和操纵感觉。自动飞行和着陆系统在铁鸟试验中统合成一个整体之前,这种分开的座舱模拟器仍由洛克希德公司和麦克唐纳·道格拉斯公司在自动飞行操纵系统研制的某些阶段使用。

操纵系统研制工作大体上是在铁鸟上完成的,两台模拟器现在用到基于从飞行试验计划中返回的制造飞机的感觉和特性。调整首先在铁鸟上作出,鉴定后,装到飞机中去。飞机中的故障阻件也在铁鸟上试验,以分析故障。模拟器用到鉴定两种宽机身运输机机型的设计变化。

今后使用

现在,技术人员主要集中于准备两只铁鸟用于自动飞行操纵系统和自动着陆系统的研制和试验。两家制造商装配全部所需装置,以验证飞机三级自动着陆系统的能力,两家制造商增加计算机和带陀螺的飞行操纵输入,以及装在三轴飞行台上的惯性装置。有天气变化能力的目视进场系统加到模拟器中,并提供目视监控自动着陆系统的方法。

洛克希德公司和麦克唐纳·道格拉斯公司使他们的铁鸟操作24小时,计划有几个月,一直到自动飞行操纵的研制工作完成。两家公司很关心铁鸟计划,并且主张,在L-1011和DC-10飞行试验计划中,在安全、成本和计划方面提出分配金。

DC-10飞机飞行试验计划*



DC-10为美国麦克唐纳·道格拉斯飞机公司研制的大型宽机身民航机，装有三台美国通用电器公司的CF-6涡轮风扇发动机，巡航马赫数为0.88，可载客380名。1966年开始设计，1969年1月开始制造，1970年8月首次试飞，1971年8月投入航线。

一、试验飞机的选择

飞行试验方法进展后，确定了DC-10飞行试验计划所需的试验飞机数。在飞机设计阶段，飞行试验方法考虑下述因素而着手工作：飞机和系统的设计以及结构检查；详细系统的规范试验要求，联邦航行局和用户对系统的规范试验要求，估计的研制计划的范围；对于系统研制、试验和验证来说，建立试验程序，以满足要求。

最初飞行试验方法用于规定试验设备、使用仪器、试验设施以及联邦航行局合作的要求，用于建立需要的组织程序。

计划的飞行试验小时数建立在飞行试验方法的基础上，这种飞行试验方法相当于估计每个技术范围鉴定和验证所需的小时数。然而，对于正常的研制和意外问题的出现来说，从以前计划得出的经验需要考虑附加的试验小时数。通过平行试验获得的节省试验时间的计算后，已确定1500小时的总飞行小时数是需要的。能联合试验或完成平行试验是可以通过每架试验飞机机内大量使用仪器系统来作出的，试验飞机允许有独特的使用仪器作联合试验。所需的飞行试验小时总数通过起飞、爬升、降落和着陆时间来减少，如果平行试验的能力没有发展

* DC-10飞机地面试验可参阅《国外航空科技》，总43号，第13~29页

时,用别的方法,这些时间是必需的。对于一种通常的3小时飞行期间来说,就节省总飞行时间约16%。

飞行试验计划和试验飞机数考虑了详细试验计划要求(包括设计的飞行速度、试验方法和计划因素)有关的制造能力来确定的。DC-8飞行试验计划在1958年着手工作的,每架试验飞机每月平均飞行27.5飞行小时。设计的DC-10试飞速度为每架飞机每月平均飞行33飞行小时,是基于采用了自动数据处理系统(而在DC-8计划中没有采用自动数据处理系统)以及操作方法中的其它改进,并且能引起结构改变。

对于DC-10飞行试验计划作为前面讨论因素的结果来说,选择五架飞机作为最佳试验飞机数,这又使得研制试验的主要部分在联邦航局适航合格证试验开始之前完成,以避免生产飞机的修改费用昂贵。成本分析指出,具有相应计划的最少试验飞机数使直接试验成本最低;然而,在飞行试验完成之前,飞机已制出,当考虑飞机的修改成本时,那末经济性特点就没有了。图1表示估计的增加成本对试验飞机数的关系曲线,也包括考虑使用仪器成本,试验飞机的修改以产生最后的结构,以及修改期间职工和实验室的维持费用。飞机飞行速度和所需的试验时间认为是固定的,一条曲线表示每架飞机无修改成本,另一条曲线表示分阶段修改的成本计划,后者曲线在五架飞机处是好的,而且对于另加的飞机来说,曲线是相当平坦的。这就可以认为,考虑计划描述的曲线仅与生产交货的速度有关,交货又影响到需修改的飞机数。

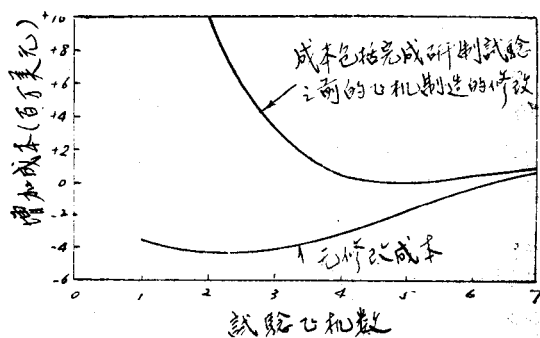


图1 增加成本对试验飞机数之间的关系

六架飞机试验计划少量增加使用仪器成本和操作成本,因为在适航签证之前,第六架飞机不进行长时间的飞行。用七架或八架试验飞机时,附加飞机的成本增加很少。

关于确定最佳试验飞机数,单架飞机的试验计划列于图2中,考虑了下列因素:1)试验飞机利用率,2)试验飞机飞行次数,3)单独试飞小时要求,4)单独试验使用仪器要求,5)用于平行试验的适应性,6)研制问题的预测,7)按时间分阶段研制,改进生产飞机,8)联邦航局(FAA)型号合格证日期,9)用户训练要求,10)生产交货计划。

在1970年8月29日开始首次飞行的DC-10飞行试验计划中,第一架飞机主要作操纵试验和稳定性试验。第三架飞机在第一架飞机飞行二个月后作性能飞行。第二架飞机主要作飞行导航试验、操纵试验以及验证试验,它是在第一架飞机开始飞行后四个月作飞行试验的。第四架飞机作系统试验。第五架飞机用于功能试验和可靠性试验。每架试验飞机是独特成形和装独特仪器的,以满足每种试验范围中的特殊要求。

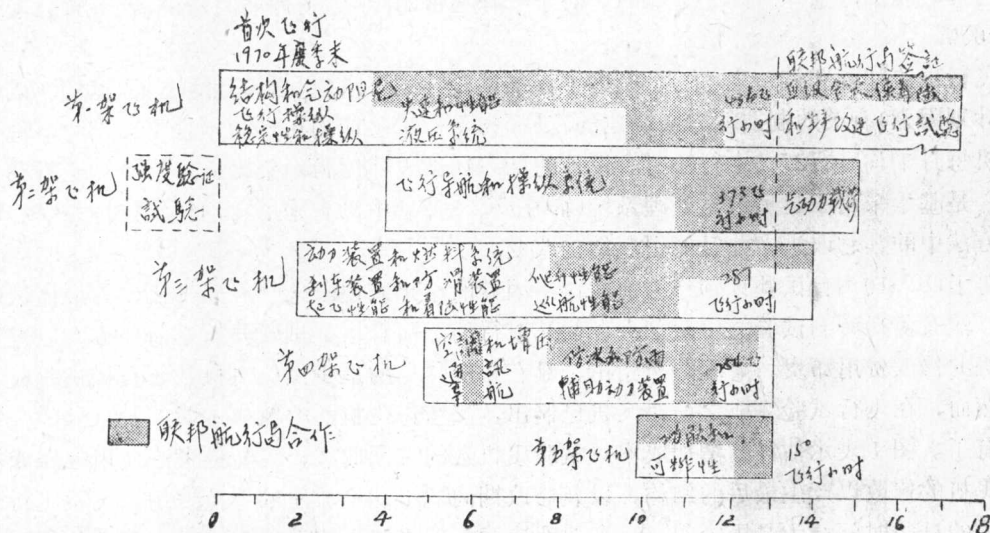


图 2 DC-10 飞行试验计划

二、数据获取、数据处理和试验使用仪器系统

对于任何多架飞行试验计划来说,考虑试验效果的一个重要因素是数据获取、数据处理和使用仪器系统,这些系统在总成本方面占有很大部分。

鉴定和严格地规定飞机操纵性和稳定性以及其它性能特点所需的数据量,直接与飞机和系统的尺寸、复杂性有关。过去,在每架飞机连续研制计划方面,已增加了有关飞行试验的数据积累和数据处理要求。

在过去十年所用的典型数据获取系统大大限制目前和今后民用运输机的大尺寸试验计划,这些系统最重要的限制出现在数据获取和鉴定过程中,人起主要作用,在数据处理顺序中的每个阶段大量的数据需要人工处理,这就使时间浪费,价格昂贵。另外,当需要变更使用仪器时,则降低系统适应性,导致增加成本和延迟时间。与加速数据要求有联系的计划任务,需要使试验飞机的飞行速度也以新的计划增加。为了保持这种增长速度,且确保经济可能性,数据减少处理(过去需要1天到几周),今后必须在飞行后几小时内完成,在有些情况中,用实时工程单位处理数据,而试验仍在进行中。

明显满足这些要求是用了一个自动数据获取和处理系统。使用了自动化技术将大大减少处理时间,以使最后数据和所作可能的实时遥测装置不受过去通道能力的限制。

为了确保DC-10全面、精密和适时的飞行试验计划的完成,已使用了一种先进的数字数据系统。系统由下述三种基本部件组成。

1. 机载系统

机载系统主要是带二次调幅-调频(secondary AM-FM)记录能力的数字式系统。系统含有400个数据通道,其中90个通道记录为基本采样速度,290个通道记录为10:1的变换速度,20个通道记录为20:1的变换速度。在采样速度的种类方面,系统能记录的数据正如表1所

示。机载系统的基本部件如下：1)信号调节辅助系统——接收模拟数据信号，提供每个通道校准、放大、比较和清除；2)数字辅助系统——把模拟信号转换到数字码，接收数字数据信号，并提供频率输入的累积计算；3)在机内数据显示——每个机载系统装有3个10通道条形图象显示系统和6个数字计数读出器；4)磁带记录器——利用有14条通道的1吋磁带，记录器具有下述能力：对于串行形式中数据的400通道来说，使用1条通道；对于时间来说，使用1条通道；对于高频数据的模拟记录来说，使用12条通道；5)遥测术——在L段频带特殊频率操作的两台遥测发射机同时发送同样的数据。地面站不断监控主要通道，万一在信号损失或受干扰时，将自动地切换到辅助通道，以使数据脱落减到最少。

表1 机载系统能力

通道形式	每通道每秒选择的数字系统数据采样					
基本的 (30通道)	400	200	100	50	20	10
辅助的 (290通道)	40	20	10	5	2	1
频率 (20通道)	20	10	5	$2\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$
联合通道 (包括数据和调整) 404通道	50 K	25 K	12.5 K	6.25 K	2.5 K	1.25 K
系统记录时间 一圈磁带(分钟)	32	64	128	256	512	1024
磁带速度 (吋/秒)	60	30	15	$7\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{8}$

2. 遥测和微波系统

遥测线路具有同时发送400个数据通道的能力，为了适应横向磁场(TM)发送超过250哩范围，一个微波中继站设置在8400呎高山顶上。横向磁场信号用一种自动跟踪的10呎抛物面天线接收，并通过微波线路发送到飞行操纵和数据中心。系统包括特高频(UHF)和甚高频(VHF)音频的通道以及14个故障和警告通道，以监控设备性能和数据点。

3. 飞行操纵和数据中心

图3所示的数据处理系统在两个方面起作用：用于飞行试验的数据处理中心和飞行操纵监控站。系统具有处理从机内磁带来的数据的能力，或实时通过遥测线路，以完成显示工程单位时间变化或带有完整注解的制表的主要功能。数据处理和实时监控能够用一个条形图象支持计算机的多余独立部分来同时完成。

完成数据处理的阴极射线管图象显示仪的使用是这个系统的主要特征。使用阴极射线管显示允许实时和在线监控、校正和处理飞行试验数据，于是可取消通常包括在数字系统中的许多预备阶段。

数据处理系统的主要控制和操作是借助于飞行试验数据处理中特殊设计的文字数字式键盘和操纵作用键盘来完成的。操纵作用键盘为技术人员提供了显示工程单位制表和时间变化的快速方法，对于数据处理所需的各种资料(如校准和参数表)也要快速显示。参数选择、标度、注解或图解图象上的参数位置不需要预先确定，但是能通过两只键盘来选择和改变。清

晰复制和(或)显微胶卷设备提供了记录阴极射线管上产生的数据的方法。

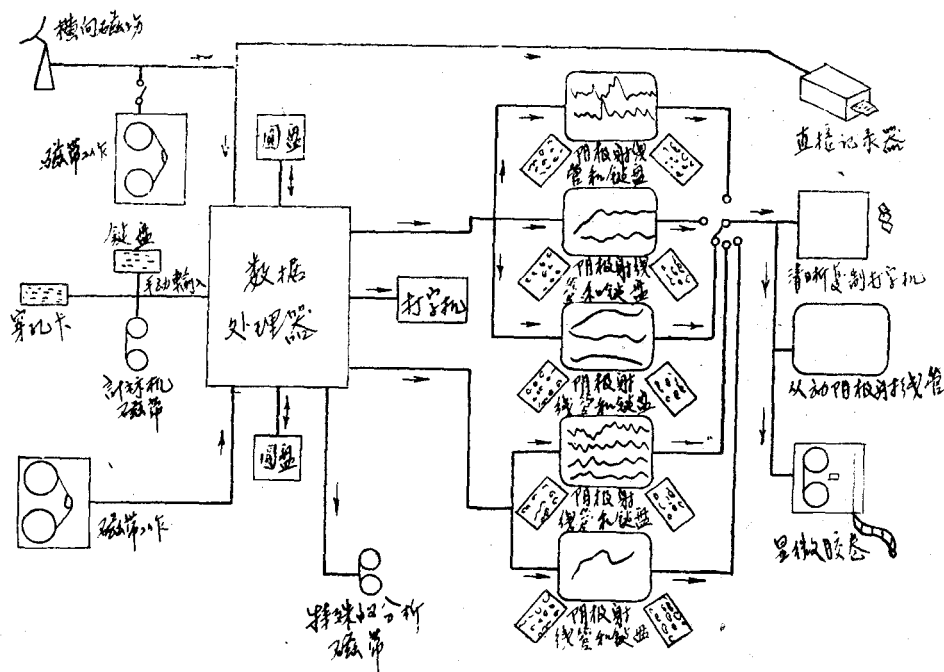


图 3 数据处理系统

三、飞行导航和操纵

DC-10飞机超过早期飞机操纵能力的最大特点，具体表现在飞行导航和操纵系统。飞机在进入航线、爬升、巡航、下滑、降落、进场、对准跑道、拉平和接地后的滑跑等情况下，DC-10飞行导航和操纵系统具有自动操纵的能力。飞行导航和操纵系统见图 4。

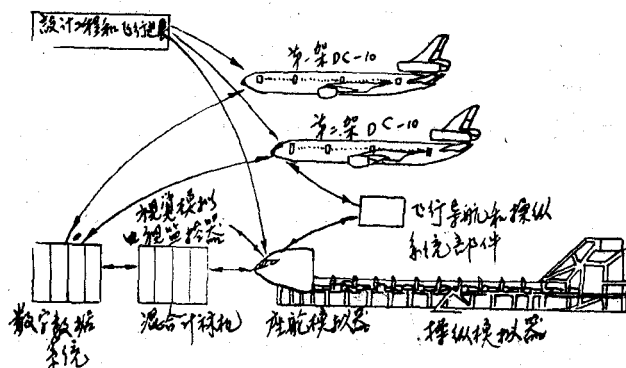


图 4 飞行导航和操纵系统

四、颤振试验

颤振试验在飞行试验计划的早期阶段进行，使飞机飞行包线扩展到设计高度和空速，然

用于DC-10的通用颤振飞行试验程序,包括借助于手动操纵面脉动,以及装在机翼、水平翼面和垂直翼面上的可操纵气动叶片各种振荡模的激励,叶片能够单独操作,或在预定位移、不连续频率和扫描频率比的组合下操作。这些激励技术的组合提供了临界振荡模早期验证的方法,并且提供了这些振荡模阻尼特性在深度方面的分析。

虽然完成了全部故障分析, 飞行试验包括有独特的故障-安全式试验结构, 例如有故障的操纵面操纵器、带自由作用杆的操纵和阻尼操纵器以及操纵面临界区域的平衡重量。

五、噪音测量

必须考虑噪音适航合格证的重要性，因为需要建立噪音级和适航标准之间的相容性。噪

音级标准能够照规则行事, 如果出现了降低起飞总重量的结果, 那末一种讨厌的性能克服了, 反过来对操作者来说, 出现了经济抑制。按美国联邦航行局的试验, 在规定的航向和航线上由一系列起飞和着陆所组成, 在指定点测量噪音。六个采样的最小部分(有一个90%的可靠界限不超过 ± 1.5 EPN分贝), 必须在每个测量点上作出。对于起飞、进场和跑道端来说, 在测量点, 600,000磅以上的最大重量飞机的噪音级必须不超过108EPN分贝; 75,000磅以下的最大重量飞机的噪音级, 用一个修正系数把噪音级调整到102EPN分贝。

所选的试验地点要求一种相当平的地势, 不论是人工造的环境, 还是自然环境, 必须不能使声音减弱。温度、相对湿度、风和其它的天气条件必须具备正常条件。在试验时, 相对于噪音测量站的飞机位置用激光跟踪来精确地确定。

如图6所示的起飞动作, 首先从起飞滑跑开始, 一直到离开滑跑点6哩。在这段时间内, 除了起落架收起外, 飞机必须保持起飞状态, 航线必须强制直接通过噪音测量站的上空。

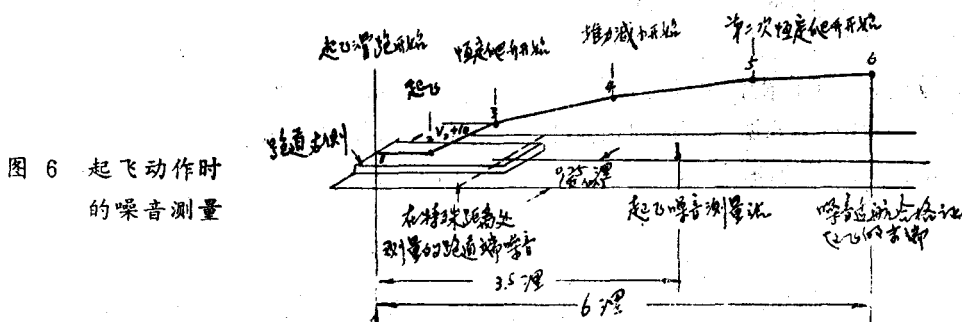


图6 起飞动作时的噪音测量

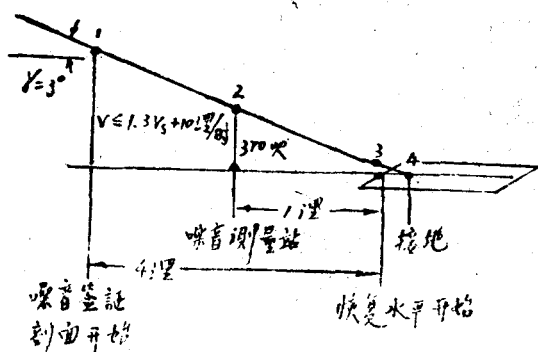


图7 进场动作时的噪音测量

起飞后, 飞机加速飞行于 $V_2 + 10$ 哩/小时, 而且必须继续起飞, 使飞机至少飞入1000呎高空, 此时推力开始减少。这种功率减少不能比用一个发动机提供水平飞行的功率或推力来得小; 或者减到至少保持4%的爬升梯度的功率或推力, 这时功率或推力却都是较大的。

图7所示的进场动作离跑道端部4哩处开始, 飞机在最临界的状态下, 下滑面为 3° , 速度在 $1.3V_2 + 10$ 哩/小时以上。所有的发动机都必须在同样的推力级。

噪音测量站位于离跑道端部1哩处, 另外也作起飞、进场、跑道端的噪音测量。

当噪音数据的数量和质量要求增加, 而所需的时间要求减少时, 则飞越的噪音数据处理技术必须更容易掌握和自动化。例如, 道格拉斯公司发展了一种自动数据处理和分析系统, 称为平行模拟滤波器系统, 其能实时分析飞行试验数据。

在最初的飞行试验计划中, 试验从基本取样阶段中进行, 以确定噪音级的数量级、操纵程序的进展和数据系统操作, 以确定试验本身, 最后由美国联邦航行局验证。

L-1011三星飞机飞行试验计划

L-1011三星飞机是一种宽机身中、短程运输机，装有三台RB211型涡轮风扇发动机，巡航马赫数为0.85，可载客400人。

洛克希德飞机公司的L-1011飞行试验采用了最新的装置和计算机设备，在美国加利福尼亚州帕默戴尔市的洛克希德加利福尼亚分公司新的总装和飞行试验中心进行了飞行试验。

L-1011试飞飞机带有大量试验设备、配重和其它设备。飞行时调节水箱中水来改变飞机的重心。在客舱中间的飞行试验数据中心备有50通道示波器、50个仪表光电板、磁带记录器、含有123通道的脉冲编码调制器以及其它电子试验设备。所有的数据在试飞过程中发送到地面，立即进行分析，再通知试飞员，以作适当调整。

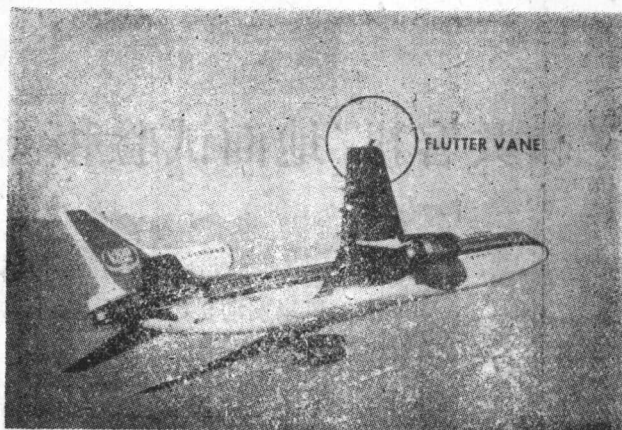
用六架飞机进行了1510次飞行试验，共飞行1695小时，在1970年11月16日作了首次飞行，在1972年4月开始交付并投入航线使用。



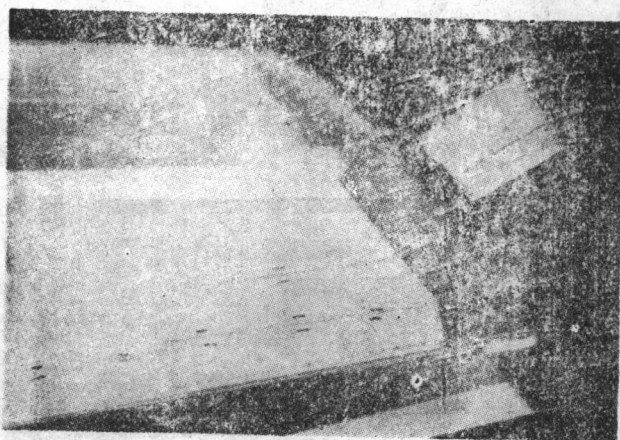
一、飞行试验计划

L-1011三星飞机飞行试验计划见图1。

第一架L-1011三星飞机在395小时中共飞行了200次，飞行超过了12个月，以得出试验载荷、初始飞行操纵、颤振和飞行品质，成功地探查了速度-高度包线的各个方面，见图2。早期结构试验与颤振计划同时进行，在机翼上装设颤振叶片作颤振试验，见图3。第二架飞机约在1971年2月中旬开始飞行，在9个月中飞行了265小时，用于鉴定性能和动力装置。



(a)



(b)

图 3 机翼上装设的颤振叶片

摘自[1]《AIAA Paper》, No.71-789

[2]《AW&ST》, Vol.93, No.11, 1970, p.28