

航空系统仿真
HANG KONG XI TONG FANG ZHEN

译文集
YI WEN JI

中国航空工业总公司科技局

一九九五年十二月

V2-53

V2-53
1011-1

1011

航空系统仿真 译文集

主 编：周自全

副主编：高洪祥 章伯定

主 审：吴永刚

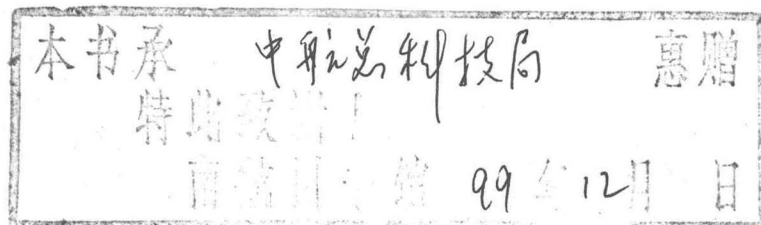
副主审：樊玉辰



二〇〇〇年一月十七日



30801385



中国航空工业总公司科技局

一九九五年十二月 西安

801385

航空系统仿真译文集

编辑委员会

主 编：周自全

副 主 编：高洪详 章伯定

编 委：(以姓氏笔划为序)

孙如林 李小龙 汪德才 周自全

聂大同 高洪祥 梁 恺 章伯定

主 审：吴永刚

副 主 审：樊玉辰

责任编辑：张永河 谷文福 王 莉

前 言

为了配合航空总公司第一届航空系统仿真学术交流会的召开,做好航空系统仿真的“九五”规划,推进航空系统仿真的发展,组织了本译文集的出版。

译文集收录了 33 篇文章,约 40 多万字。主要介绍了国外飞机、发动机、机载设备等方面的飞行模拟和工程仿真的好方法、好经验以及最新研究成果。在借鉴国外仿真技术的经验方面,译文集将对预研、型号研制、教育诸方面有重要参考价值。

译文集的出版得到试飞院、六二八所等单位的支持,得到了韩宽庆教授、王行仁教授的指导。谨在此表示感谢。

本译文集译、编、印时间紧,书中有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

1995 年冬 北京

目 录

NLR 活动基座研究飞行模拟器的现状及未来发展	(1)
USAF 飞行动力学实验室中的空中格斗仿真	(14)
飞行仿真的发展	(30)
发展武器系统的实时战术仿真	(46)
战术空战的实时多机战斗仿真	(59)
一个安全的、多任务实验室的建设	(70)
仿真标准建立过程	(76)
分布式交互仿真	(85)
VR 技术在军事上的应用	(89)
何时需要空中飞行模拟	(93)
有人驾驶模拟器敏捷性评估	(100)
用大迎角飞行试验数据验证战斗机仿真	(110)
先进旋翼机飞行仿真模型:并行实现和性能分析	(122)
美国空军空中飞行模拟:一种高效益的工作方法	(131)
未来军机飞行员训练——工业界的观点	(136)
美军平显标准的空中与地面模拟评价	(151)
美国海航试验中心的模拟设施的需求与发展	(161)
AH—64D“长弓”直升机全任务工程模拟器研制中的设计问题	(174)
UH—60 直升机叶素理论的并行计算机实时模拟	(185)
SIMONA 的发展:一种将先进的研究方法用于模拟技术、运动系统 控制和导航系统技术的模拟器设施	(201)
RM12 涡轮风扇发动机的仿真	(215)
燃气涡轮发动机模拟的前景	(221)
一种多计算机仿真系统综合控制的实时执行程序	(236)
90 年代的飞机战术环境仿真	(248)
F—22 座舱工程发展模拟器	(255)
F—22 在波音 757 航空电子空中飞行实验室上的试验	(261)
NASA 艾姆斯研究中心垂直运动模拟器的实时模拟研究与实施	(263)
F/A—18 斜板起飞模拟器的评定	(271)
多用途研究飞行仿真器费用管理的数据库方法	(278)
飞行仿真软件工程的演变和经济性	(289)
军用飞行仿真的未来	(295)
实时航空电子处理器的仿真器	(300)
有人驾驶飞机模拟器发展综述	(307)

NLR 活动基座研究飞行模拟器的 现状及未来发展

摘译 邢丽莹 校 宋明仁

摘要 本文概述了 NLR 飞行模拟器的改进计划。该航空电子系统包括:连接 o. a. EFIS 显示器的 ARTNC 总线接口系统,一个通用图形站、一个可编程 EFIS。详细描述具有高带宽的新型全液压 6 自由度运动系统(对于来自模拟计算机的加速度指令在 4 赫兹处仅有 45 度相位滞后)。最后还描述了数字式运动接口和推荐的总线接口系统。

1 引言

为了研究与驾驶员和飞机相互作用有关的广泛问题,在 NLR Aamsterdam 设备上,启用了—个通用活动基座研究用飞行模拟器。

- 研究包括以下几个方面:
- 驾驶员—飞机的综合;
- 操纵品质;
- 显示系统;
- 飞行模拟技术;
- 先进的飞行控制系统;
- 运行状况。

模拟设备由以下几个模块组成:

- 一个多处理器计算机系统;
- 一个 TV(电视)模板目视系统;
- 一个四自由度运动系统;

一个运输机型座舱,由 2 人机组驾驶,且可能附加一个观测人员座位;

- 一个单座歼击机座舱;
- 控制台;
- 记录设备。

当前及未来研究项目:

- 评估民用运输机的主要飞行显示;
- 装有 MIS 跑道设备上进场和离场方法/技术;
- 为设计装备电传系统和平视显示器的未来运输机提供操纵品质指南;
- 高性能战斗机和直升机的操纵品质;

为了实现这些目标引出了飞行模拟器改进计划。

2 改进计划

现行改进计划包括以下新设备:

航空电子系统

- ARINC 总线接口系统 1985;

- 标准 EFIS 仪表装置 1986;
- 多用途图像生成系统 1987;
- 可编程 EFIS 1988;
- 具有 6 自由度的第二个运动系统 1988 中期;
- 接口系统 1989。

3 航空电子系统

3.1 ARINC 总线接口系统

ARINC 总线接口系统 (ABIS) 能把实际 ARINC429 飞机硬件 (标准 EFIS 主飞行和 NAV 显示) 与模拟器相连。

ABIS 有一个独立小型机, 它也实现了数据格式化。

3.2 标准 EFIS

民用运输机的座舱内安装了两个标准 Collins EFIS 显示器。该 EFIS 用于:

- 评定显示格式;
- 在模拟 MLS 起飞期间进行 NAV 显示。

3.3 可编程图象生成

为进行航空和航天研究, NLR 操纵两个可编程图象生成系统: 一个通用 Silicon 图象综合光栅图象系统 (IRIS) 和一个 Sperry 可编程工程电子飞行仪表系统 (EFIS)。

(1) IRLS

在实验室中, 通用 IRLS 用于快速独立评定或与飞行模拟器设备相连。

该系统特征为:

- 具有 4M 字节存储器的大功率 Motorola MC68020 处理器;
- 局部 Ethernet 高速通讯网络与主计算机连接;
- 为应用高级语言设计的 FORTRAN 和 C 程序编辑器;
- 实时图形的几何管道;
- 标准视频显示: 对角线长 19 英寸, 更新速率为 60Hz, 不隔行;
- 按照 CCIR 标准替换视频接口, 外部为可同步, 使视频与其它信号源 (即在平视显示中) 和视频记录混合;
- 座舱中 7×5 英寸显示部件用于下视显示。

在整个飞行显示评定中, 需要考虑动态特性时, 在独立情况下 NLR 接口中增加了一个模拟操纵杆连接器。它使简化飞机模型 (飞行控制器) 的飞行和对所提出的显示格式进行动态评定成为可能。

在目前有关电传飞机的操纵品质方案中, IRLS 用于生成平视显示。

(2) 可编程设计的 EFIS

可编程 EFIS 包括两个显示单元 (DU), 每个单元都具有综合萤光屏控制板 (BCP), 一个遥控板 (RCP) 和一个电子显示元件 (DEU)。该 EFIS 的一个重要研究能力为: 显示格式化是内部可编程的。系统提供确定完整的动态显示灵活性, 其项目如下: 参数、符号和字符、符号配置、参数优先权、颜色, 提供动态显示的完整组成。

在软件研究站中 NLR 工作人员能设计出新的应用软件之后, 通过 IEEE 总线下载到

DEU。

4 运动系统

按照 NLR 规范设计新的 6DOF(自由度)运动系统。完成了制造,最后阶段为验收试验。

4.1 技术规范

在改进计划的初始阶段中,编辑了运动系统的性能要求。培训的用户、操作员和研究模拟器人员紧密配合,同时搜集有关运动模拟的最新观点的文章。

运动系统是为了提供能影响驾驶员行为的驾驶员前方运动输入。这些输入在评定操作品质和飞机驾驶员在回路中的操作过程中起着重要作用。主要敏感因素为加速度。

目的是在人工控制的频率范围内重新生成加速度,频率范围即 0.05Hz 到由飞机动态特征决定的最大频率,同时伴随最小增益的降低和/或相位失真。

因为人对加速度的感受,所以生成的任何错误的或伪的加速度是很迷惑的,且可引起驾驶员非正常的行为。系统应严格限制所有方向上的噪声和非期望脉冲加速度,也限制非指令自由度下的加速度。

对 FAA 先进模拟计划第三阶段模拟器运动最初的要求,即允许对新驾驶员进行初级训练,这是对一个工程研究飞行模拟器的最低要求。要达到这些要求,现存四余度运动系统的性能是不够的。前向和侧向位移没有,垂直方向上的最大位移(2 英尺)很有限。

高性能战斗机和低空飞行直升机的 NLR 飞行模拟器操纵品质未来研究中有关频率响应和传输延迟的研究是最需要的。如果一个“标准”运动系统用于直升机模拟,那么它几乎与非运动情况相同。只有当带宽增加到约 3Hz 且延迟减少到 50ms 时,与非运动系统相比,驾驶员感受和驾驶仪性能有了很大改善。(参考 3)

现代战斗机响应很快。由座舱中控制器的带宽来确定刚性飞机运动的带宽。驾驶员手动其控制器的最大频率上限约为 4Hz。

用在紊流中飞行且执行“常规”机动(从起飞经巡航到着陆)的中型双喷气发动机的计算机模拟来确定最小运动系统极限。如果由于去掉了限制,运动系统加速度的增益没有减少且无相位失真,需要至少 2 米的总垂直位移。

加在该系统上的有效负载是许多模拟飞机座舱设备之一,这些设备包括适合于模拟任务的机组座舱、控制器、仪表和视频显示器的组件。

现有模拟器座舱是:

- 2000kg 的一个单座座舱;
- 2700kg 的并座运输机座舱。

将来有可能发展:座舱两侧加两个附加显示元件和座舱后侧加接线盒,总重量为 5000kg。

该运动系统能实现有效负载范围 2000 到 3000kg 之间所需的性能。

4.2 总性能范围

(1) 工作范围

由于接近系统极限而控制能力没有明显降级时,对于每个自由度,由输入信号指令获得的最大独立移动速度和加速度不能少于表 1 中的规定。

“降级控制”验收等级将依据工作范围内正弦波运动幅度和频率的加速度噪声量。

(2) 动态性能

该系统动态性能规范规定了与其应用和加速度噪声等级的验收范围有关的响应准则。

为确定每个自由度对位移、速度和加速度同时组合的一般要求,假定这三个参数的瞬时值与正弦函数相关。在给定频率处且随着幅值的逐渐增加,这些参数之一或更多将达到其工作范围的最大值。

为了在工作范围内确定和评定运动系统每个自由度的动态性能,采用 AGARDAR—144(参考 4)的判据和步骤。特别确定了描述函数,峰值加速度噪声、噪声比和动态门限。它们将由适当组装的加速度计来测量。这些判据与系统高逼真,低频性能有关,并仅用于 0.02Hz 到 4Hz 频率范围内。它可用运动系统沿着或绕着每个独立自由度的确定轴,在其旋转中心处生成的加速度来表示,以响应那些自由度的确定输入信号。在模拟器的主计算机中产生这些输入信号。

头三个判据与频域中系统的稳态响应有关。另外可通过规定“附加”加速度的最大等级来限制驱动与非驱动自由度之间相互作用的验收等级。

(3) 描述函数

描述函数 $H(K_i)$ 被定义为基本加速度输出信号与一个正弦波形输入信号之间的幅值与相位关系。(见 AGARD AR—144 的 2.3 节)

对于六个自由度中的每个自由度,描述函数必须是:幅值比大体上保持平滑(1 ± 0.1)直到 1Hz 相位滞后少于 20° ,且位于 4Hz 处幅值比在 1.0 和 0.7 之间且相位滞后少于 45° 。在 1Hz 和 4Hz 之间,幅值比和相位滞后必须处于由连接以上限制构成的直线所确定的界限内。

(4) 峰值加速度噪声

峰值加速度噪声(AP)被定义为加速度输出信号的最大偏差,它是由响应一个正弦输入信号而产生的加速度输出信号的基波(参见 AGARD AR—144 的第 2.4 节)。在任何驱动轴以 0.5Hz 测量的峰值加速度噪声,达到工作范围的 90%内,对于平动轴和转动轴分别不能超过 0.2m/s^2 和 0.1rad/s^2 。

(5) 寄生加速度

在与上述相同情况下,对于平移和旋转其非驱动轴上生成的最大加速度分别不能超过 0.1m/s^2 和 0.05rad/s^2 。(见 AGARD AR—144 第 2.4.3 节)

(6) 加速度噪声比

加速度噪声比 r_n 被定义为加速度输出信号的标准偏差,它来自加速度输出基波信号,(它响应一正弦输入信号)表示为与加速度输出基波信号的标准偏差之比,(见 AGARD AR—144 的 2.4 节)。

在任何驱动轴上,频率为 0.5Hz 以及超过加速度输出范围(对平移轴和旋转轴分别为 0.3m/s^2 和 0.3rad/s^2),即工作范围的 90%,加速度噪声比不能超过 0.1。

(7) 动态门限

动态门限(Δt)被定义为输出加速度到达的 63%的一个阶跃输入加速度指令所需的

时间。(见 AGARD AR—144 第 2.6 节)。

在加速度指令等于 0.1m/s^2 (对平移轴) 和 0.05rad/s^2 (对旋转轴) 或更高时, 动态门限不能超过 0.05 秒。

(8)位置精度

输出的与指令的平台位置之间的静态误差不能少于全量程的百分之 0.1。

(9)高频响应

要求能产生可控环境振动在负载 4Hz 到 20Hz 范围内相对运动接口的直接输出。带宽(幅值比 0.7, 相位滞后 45 度)应为 6Hz。

表 1 给出了用 Hydraudyne 系统和工程(Boxtel, the Netherlands)设计和制造的运动系统的规范。它显示高频响应和相当大垂直运动的良好组合。

在给定频率处每个自由度的描述函数的测量是在输入指令幅值处等于该给定频率处每个自由度工作范围的 10% 做出。

表 1 NLR 第二代静压轴承的运动系统工作范围和频率响应的技术要求
工作范围限制

	位移		速度	加速度
纵向	1.72	-1.34(m)	$\pm 0.8(\text{m/s})$	$\pm 8(\text{m/s}^2)$
横向	1.39	-1.39(m)	$\pm 0.8(\text{m/s})$	$\pm 8(\text{m/s}^2)$
垂直	1.01	-1.14(m)	$\pm 0.8(\text{m/s})$	$\pm 10(\text{m/s}^2)$
横滚	30	30(deg)	$\pm 30(\text{deg/s})$	$\pm 200(\text{deg/s}^2)$
俯仰	29	29(deg)	$\pm 30(\text{deg/s})$	$\pm 200(\text{deg/s}^2)$
偏航	41	41(deg)	$\pm 30(\text{deg/s})$	$\pm 250(\text{deg/s}^2)$

频率响应

频率(Hz)	最大相移(deg)	幅值比
≤ 1	20	1.0 ± 0.1
4	45	在 0.7 和 1.0 之间

注:有用载荷为 2000 至 5000kg

4.3 液压系统

液压伺服作动器有三种可能的设计(见图 1)

(1)常规不对称

该结构的一大优点是相比有效行程它的总长短,且结构相当简单。缺点是活塞面积不等。由于改善了机械刚性而使杆的直径增加时,面积上的差异也将增加。在许多情况下,为使作动器具有良好控制能力,需要特别制造不对称伺服阀。

(2)常规对称

该作动器的优点是活塞面积相等,且干扰力也相等,可改善运动的平滑度且能够采用“标准”对称伺服值。实际缺点是增加了自由杆端头,几乎是总长度的两倍。在我们现有四自由度运动系统中,也由于限制了垂直方向运动,可采用这类的作动器总行程增大时,设

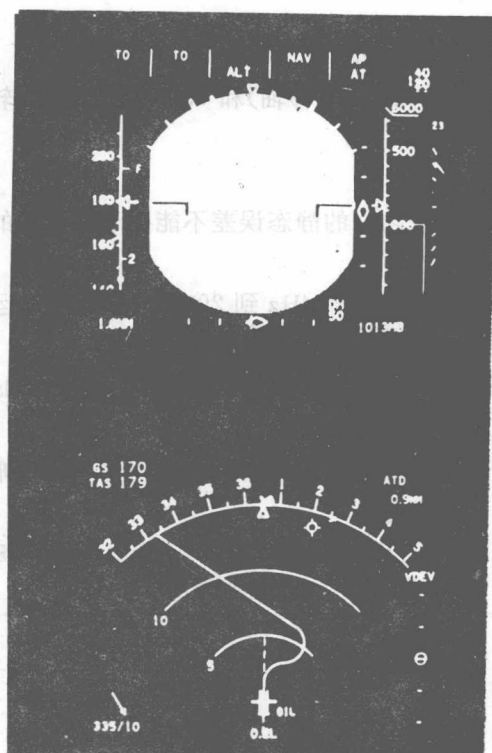


图1 在MIL起飞过程中所用的EFIS显示器(PFD+ND)

计一个运动零件间无机械干扰的运动系统结构几乎是不可能的。

(3)新设计

这是所谓双重叠(double-fold)对称设计,它是具有相同的范围,尺寸的非对称作动器,但面积和平滑运动可能相同。它能做成活塞面积相同,且完全与杆的直径无关。对高刚度作动器该直径最佳。

为了使磨擦力减至最小,所有轴承应为全静压的特性,即本质上无金属与金属的接触。作动器内所有活塞和导杆全部由强液体薄膜包围这样可使任何静磨擦力为最小(图2)。这些优点的代价是换来了一个具有很小间隙公差 of 的复杂机械结构。

4.4 机械结构

通常综合类型(图3)的运动系统结构包括:

- 三角型支架;
- 座舱支架结构(平台);
- 6个伺服传动装置,由3对可逆V型块定位。

把相当大的刚性平台建成箱架式结构。有限元分析显示,没有低于20Hz的谐振频率。因而作动器间相互作用较低且在高频段能确保平滑运动。低重心可使运动间的动态干扰降低。

所设计的作动筒径向和轴向的刚度允许至少6Hz的系统带宽。作动器和基座相连,而平台通过几乎是万向支架安装高速转体。很紧凑的尺寸能确保失真最小,刚度好和允许高动态负载。

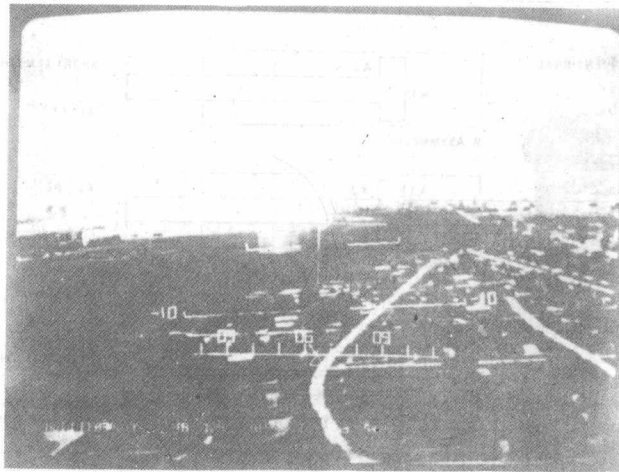


图 2 平显叠加在视景系统上的操纵品质试验的例子

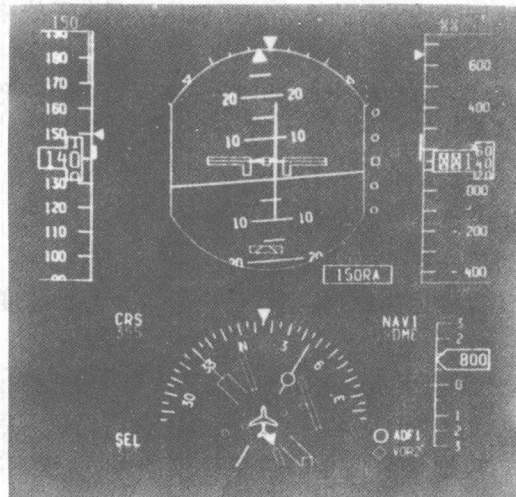


图 3 可编程的 EFIS 显示器的例子

4.5 电子驱动的控制系统

在液压作动器控制中最重要组件是伺服阀。在阀的零流量范围内,具有重要的全线性性能“关键阀”都有“轻微”负重叠量,重叠量很接近容差所生成主阀,它可在流体(速度)逆转处生成很小的回流扰动。

图 4 是伺服作动器控制回路方框图。位置反馈采用超声波传感器。该反馈信号和输入指令间差的增益决定了频率响应。压差反馈控制了运动阻尼且能调节使用时有效负载的补偿。高阻尼率将抑制由非线性和平滑运动所产生的影响,当通过每个油缸的最大油流量为每分钟 300 升,伺服阀由一主阀和用来改善低流速时作动器控制的导阀组成。导阀具有阀芯位置的内电子反馈且能改善线性度和带宽。

主阀具有一个 LVDT 阀芯位置传感器,且用于阀控制回路以改善线性度和带宽。在具有 2000kg 试验负载 的分离作动器上试验表明平坦的频率响应到 10Hz。

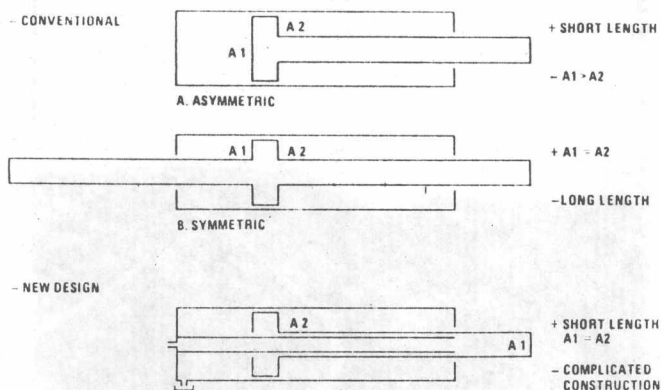


图4 传统的与新设计的液压伺服作动筒的比较

4.6 运动接口

运动接口把主计算机与运动平台的6个液压缸的控制电子线路相连。接口的四个主要功能是：

- 把主计算机信号(数字式)转换为具有小阶跃幅度和小阶跃宽度的模拟位置和速度信号；
- 为模拟发动机和螺旋桨影响生成特效信号；
- 为液压控制部件生成离散控制信号；
- 处理来自液压控制部件的离散状态信号。

为了减少主计算机计算延迟的影响，把替代位置信号的加速度作为主驱动信号用于运动接口。

异步运行 MOTIF 总允许延迟是 5ms，这给出了 3.4ms 的期望迭代帧时(平均延迟是 1.5 个帧时)。为了来自主计算机的加速度信号在 4Hz 时的相位滞后等于或小于 45°，允许运动系统本身对 MOTIF 模拟输出信号的响应有较高频率，规定在 6Hz 处相位滞后为 45°。

主计算机每 50 毫秒计算一次活动平台上一特殊点的加速度、速度和位置(通常位于驾驶员头部位置)。用这些数据可计算活动平台本身的运动。MOTION SYSTEM(运动系统)每 50ms 接收来自主计算机的更新计算的加速度值和位移值。此后用变换算法计算油缸伸长。为了产生好的油缸阶跃，每 3.4ms 把加速度信号综合到平台位置两次。每个数据更新后，把计算的平台位置与来自主计算机的接收数据进行比较。为了防止积分过程的漂移，该差异将作为所谓输入“滤波器”中一个反馈修正信号。(图 5)

当加速度信号在 MOTIF 中被采用时，可用二阶超前滤波器来改善 MOTIF 和活动系统的总响应。

(1) 信息分析

上述主计算机把平台数据每 50ms 送到运动接口中一次；以后能把时间减少为每次 10ms。该数据由一个 16 个字的脉冲组成，每个字由 16 个字节组成。在该数据脉冲中，每个字都有一个特殊含义。为了使主计算机计算的加速度与运动系统的实际指令之间的延

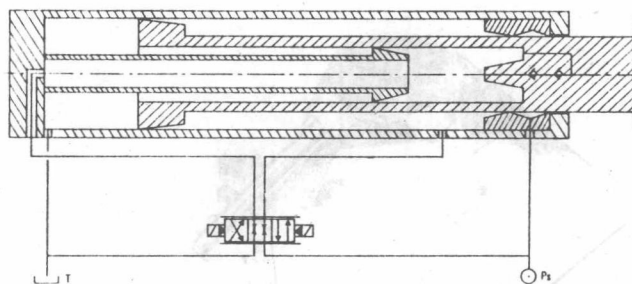


图 5 全静压轴承的伺服作动筒

迟最小,该脉冲的总传输时间必须限制在 0.5ms 内。涉及数据脉冲的参数包括:

- 6 个加速度;
- 6 个位置;
- 特殊影响的抖动频率和辐值;
- 特殊影响发动机振动频率和辐值。

除数字脉冲外,主计算机生成四个离散输出信号且接收运动系统状态控制的三个离散输入信号。因为这些信号的特性,所以不包括握手信号。

在模拟飞行的起始阶段中,降低加载控制常数可替代故障值。

这些常数包括:

- 超前滤波器的截止频率和阻尼(调节座舱质量特性);
- 旋转点的 X · Y · Z 坐标值。(取决于座舱几何形状);
- 输入滤波器常数(取决于主帧时)。

图 6 显示了 MOTIF 的硬件框图。三个 CPU (摩托罗拉 68020)需要在可允许时间内实现所有计算和 I/O。和主计算机串行连接允许把运动系统放在离计算机较远处。

运动接口内的独立逻辑卡检测从主计算机中接收的数据脉冲串和作为微处理机系统输出的数模转换更新值两者的帧时。在良好的工作状态下,所谓的 SYNC 信号是真实的。如果该信号有错(甚至一瞬间),独立液压控制逻辑将强使运动系统急停,且使它完全不管来自运动接口的所有其它信号。

运动接口可按局部模式来操作,而与主计算机无关。给出了自由度、正弦波的辐值和频率及试验周期的终端输入。它可独立检测活动系统的频率响应和噪音。

(2) 试验结果

在工厂验收试验期间,已检测了技术规范中的性能(即频率响应、噪声和工作范围)。初始分析显示出:系统满足技术规范,(除一点外)在 X、Y 和偏航运动中频率响应很低。它主要取决于某伺服传动机构的等价负载,其负载比期望值高且使响应降低。

分析显示出:采用二阶超前能改善性能,且能补偿实测的(相似)二阶动特性(图 7)。按 AGARD AR—144 来测量最后验收试验(参考 5);也能检测该超前的影响。

图 8 显示出与 4 自由度移动系统相比,改善了垂直位移的工作范围。特别是在低频区(从 0.05 到 0.3Hz),可能产生更好的运动品质。

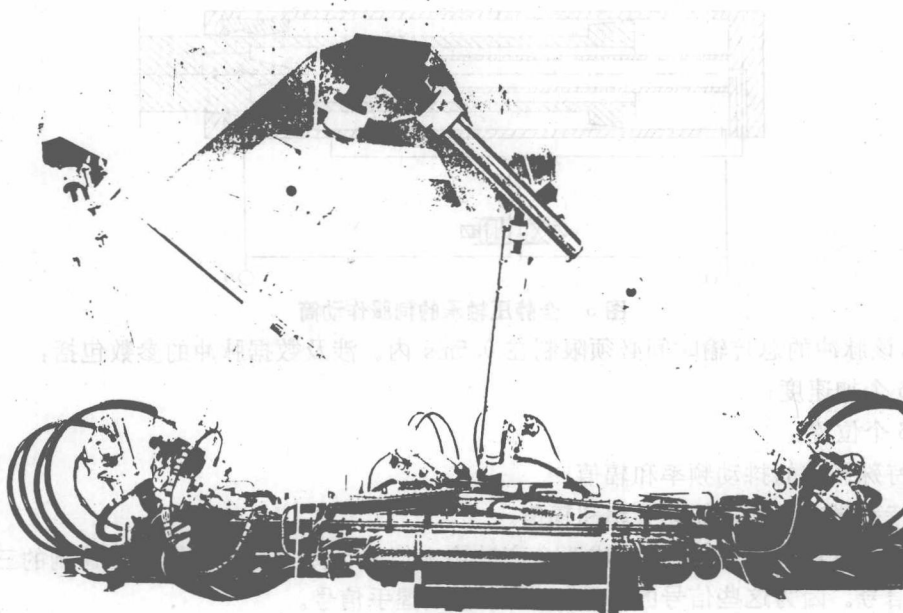


图6 高带宽六自由度运动系统的机械结构

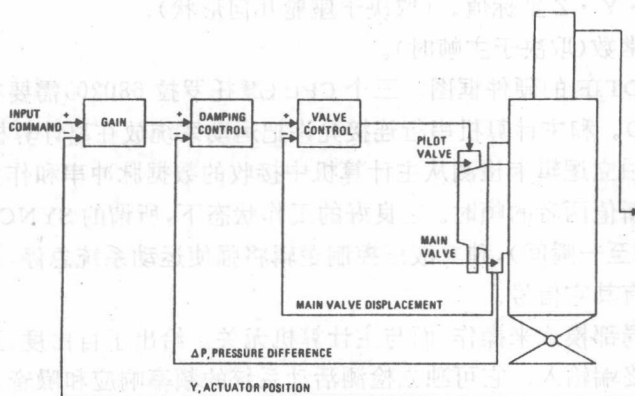


图7 伺服动作筒控制回路方块图

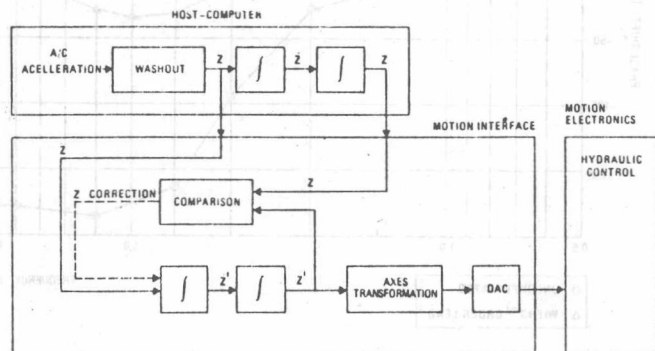


图 8 运动界面,功能要求

5 接口系统

新运动系统(MS6DOF)的安装能促进新飞行模拟接口系统(FSIS)的发展。

FSIS 不仅包括主计算机、活动系统、座舱和视景系统之间的接口,而且也确定人机接口,如控制框(CD6DOF)和声音系统。

除了研究人机特性,还需要研究现代航空电子技术。为了实现这些目标,模拟器通过标准总线(如 ARINC 和 MIL 1553,连接控制、数据处理)来支持现代航空电子设备。

现有接口转换接近于计算机的信号,它被限制在运动系统附近驱动一个座舱。新的接口系统能同时驱动更多的座舱。(一个运行,一个准备)。一个靠近座舱具有转换电子线路的总线结构最符合开始研究阶段获得的结论(图 9)。以下述方式改进运动接口,只要修改输入卡,即可适应新的接口系统。

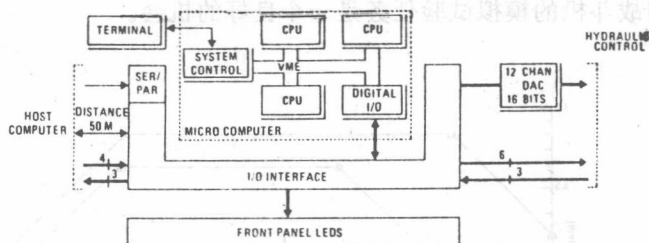


图 9 运动接口系统

发展 FSIS 项目。第一阶段是综合计算机、运动系统 MS4DOF,运输机座舱 CP2P,新控制框 CD6DOF 和声音系统。现有 4 个 DOF 移动系统 MS6DOF,单座战斗机座舱 CPIP 和现有控制框 CD4DOF,仍需连到主计算机系统像他们现在那样(图 10)。最后一项将它们加入新的 FSIS 中。

6 总结

根据我们对现有四自由度运动系统的经验,对具有改进能力的新运动系统拟订了技术条件(6 自由度,总垂直位移为 2.1m)。

采用全静压作动器得到了具有高带宽和低加速度噪声的运动系统,这对于满足像高

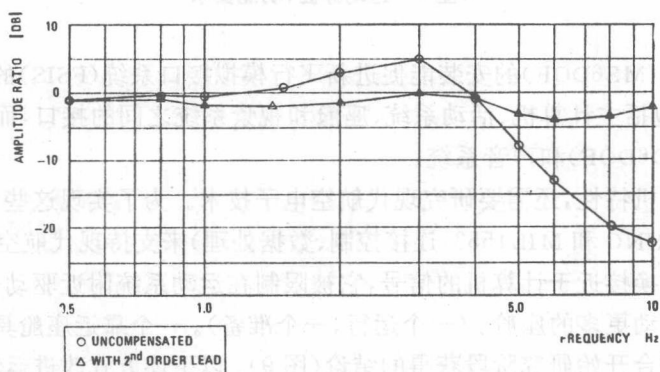
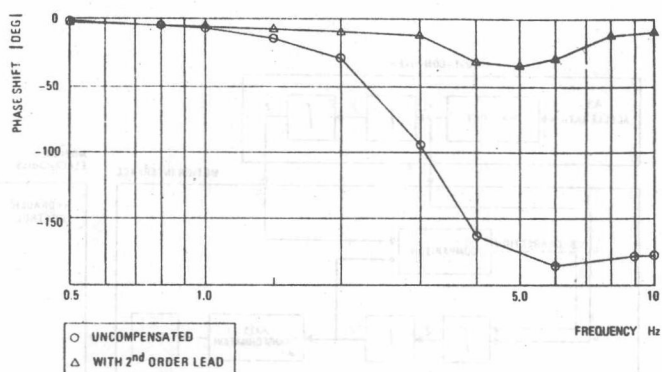


图 10 六自由度运动系统纵向轴频率特性

a. 相移

b. 幅值比

性能直升机和战斗机的模拟试验任务是一个良好的机会。

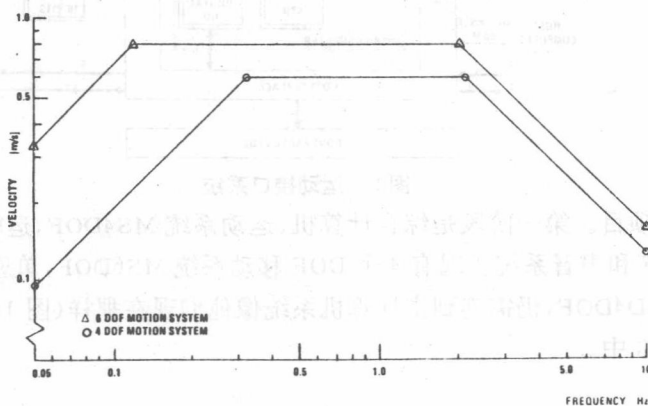


图 11 垂直工作范围