

doi: 10.7690/bgzd.2015.01.017

飞机铁鸟舵面加载系统

陈建国, 司 冀, 白钧生, 王 靖, 聂高攀, 李鹏刚, 郝旭峰, 王宏利
(中国飞机强度研究所测控技术研究室, 西安 710065)

摘要: 设计飞机铁鸟舵面加载系统, 在地面模拟飞机飞行时舵面铰链力矩, 检测舵面收放性能。用 MOOG 多通道协调加载控制系统、计算机测控工作站、液压伺服加载、反射内存网、时钟同步网、以太网等先进装备和现代技术, 建立加载系统总体设计架构。论述铁鸟舵面加载的工作原理, 对各个分系统功能和接口进行界定, 对关键设备进行选型, 对加载安全保护措施进行说明, 描述加载系统的功能。基于本设计组建了某型号飞机铁鸟舵面加载系统。试验结果表明, 该设计合理、可行。

关键词: 飞机铁鸟; 舵面; 协调加载控制系统; 反射内存网; 时钟同步网; 被动加载; PID 控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Loading System for Aircraft Iron-Bird Control Surfaces

Chen Jianguo, Si Ji, Bai Junsheng, Wang Jing, Nie Gaopan, Li Penggang, Hao Xufeng, Wang Hongli
(Research Department on Measurement & Control Technology, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: The loading system for aircraft iron-bird control surfaces is designed for simulating the hinge moment on control surfaces on the ground and inspecting the performances of taking back and putting down of the control surfaces. In this paper, based on MOOG multi-channel coordinated loading control system, computer control station, hydraulic servo loading, reflective memory network, clock synchronization network, Ethernet and other advanced equipment and modern technology, the overall framework of the loading system was established. The working principle was discussed, the subsystems' functions and their interfaces were defined, the key equipment of it was selects, the safety protection measure of it was described. By this design in this paper, the loading system for the aircraft iron-bird control surfaces was constructed. Experimental results show the rationality and feasibility of this design.

Keywords: aircraft iron-bird; control surface; multi-channel coordinated loading control system; reflective memory network; clock synchronization network; passive load; PID control

0 引言

飞机铁鸟舵面加载即飞机飞控系统地面模拟试验舵面加载是飞机首飞前必须要在地面进行的飞机操纵机构功能试验。铁鸟舵面加载试验的特点是:

1) 加载点多: 小飞机 20 多个加载点, 大飞机有 40~60 个加载点;

2) 被动加载: 不同于飞机结构的静力和疲劳试验的主动加载;

3) 考核的是机构系统, 具有机构可靠性试验的性质(差别是铁鸟舵面加载是对飞机运动舵面气动铰链力矩进行模拟, 可靠性试验是模拟气动载荷);

4) 舵面运动速度快、往返时间短, 如主操纵面(副翼、方向舵、升降舵、扰流板等)从中立位置到极限位置运动时间一般在 1 s 左右。

目前, 关于飞机铁鸟舵面加载系统设计的文献相对较少, 并且主要集中在自研控制系统模块化设

计^[1-2], 舵面被动加载多余力的自制控制器补偿控制方法^[3-8]。这些问题的解决, 还不足以设计出实际飞机高性能的舵面加载系统。因为: 1) 舵面加载系统的加载点非常多, 常常需要多个甚至全部加载点同时加载试验, 自制控制系统的功能、稳定性和可靠性难以胜任这种高可靠性加载试验, 适宜选用 MOOG 或 MTS 航空级多通道协调加载控制系统; 2) 缺乏加载系统总体设计, 以及分系统功能和接口界定; 3) 对加载系统工作原理、系统功能、安全保护措施和关键设备选型等重要问题缺乏论述等。

为了使设计的铁鸟舵面加载系统能很好地进行铁鸟舵面加载试验, 具有先进性、稳定性和可靠性, 文中采用了电液伺服加载、MOOG 或 MTS 的多通道协调加载控制系统、反射内存网等成熟的先进技术, 设计飞机铁鸟舵面加载系统, 对上述问题的解决进行了全面的论述和说明, 本设计是源于某型号飞机飞控系统地面模拟试验舵面加载系统设计。

收稿日期: 2014-07-18; 修回日期: 2014-09-04

基金项目: 中国飞机强度研究所“十二五”“随动加载技术”项目 ZSTO-13-140-22 专项资助

作者简介: 陈建国(1963—), 男, 重庆人, 工学硕士, 高级工程师, 从事控制技术、结构疲劳与机构可靠性、飞机操纵面随动加载与被动加载技术研究。

1 加载系统架构设计

架构设计是加载系统总设计的关键，也是确保加载系统功能的基础。图 1 为铁鸟舵面加载系统架构。

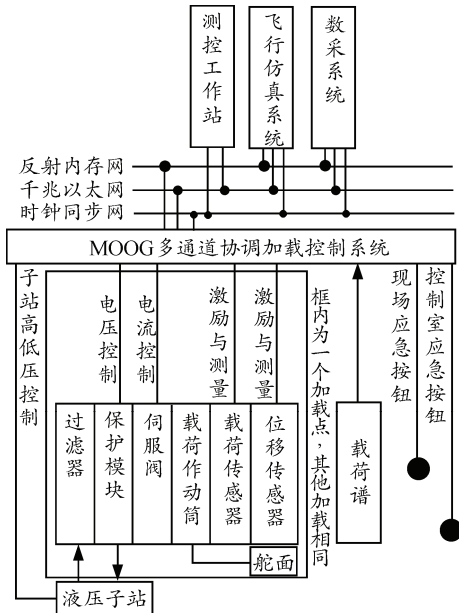


图 1 铁鸟舵面加载系统组成架构

1) MOOG 或 MTS 多通道协调加载控制系统(可以用一套，也可以主飞控舵面加载和高升力舵面加载控制各用一套，总控制通道数与舵面加载点相同)。每套控制系统均由实时加载计算机、伺服控制计算机、伺服控制板卡及辅件组成，并配备光纤反射内存网(卡)、时钟同步网(卡)、千兆以太网卡等；

2) 终端控制管理计算机为测控工作站；

3) 信号传输网络，包括光纤反射内存网、千兆以太网和时钟同步网；

4) 执行机构为伺服液压作动筒，每套作动筒配备有伺服阀、保护模块、过滤器、液压管路、作动筒固定支座等；

5) 信号检测装置，包括载荷反馈传感器、位移检测传感器；

6) 安全保护装置，包括限位保护监测开关、应急保护开关、软件保护判断逻辑等；

7) 载荷谱，包括基于飞行参数的舵面运动“角度-载荷”谱；

8) 软件，包括实时控制指令计算软件、管理软件和数据分析软件等；

9) 液压子站，由加载控制系统控制。

2 工作原理

从图 1 可知，通过时钟同步网络实现飞行仿真

系统、舵面加载控制系统、测控工作站等时钟的同步和统一；通过千兆以太网完成上述系统的数据交换和调用；通过光纤反射内存网，加载控制系统的实时计算机以内存共享方式，从飞行仿真系统和数采系统，实时获取飞行仿真系统的飞行参数，其中包括飞行高度、空速、加载舵面的动态运动角度等。

典型飞行模态参数：将代表飞机典型飞行状态的参数，如典型飞行高度、典型飞行空速等，定义为飞机典型飞行模态参数。在铁鸟舵面加载试验过程中，这类参数总是离散而有限的，因此，用

$H_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ，代表典型飞行高度；

$V_j (j = 1, 2, \dots, m)$ ，代表典型飞行空速；

.....

Π_{ij} 代表与 H_i 、 V_j 对应的典型飞行模态，实际铁鸟舵面加载试验仅有几种情况；

A_k 表示编号为 $k^{\#}$ 的舵面加载点， $k = 1, 2, \dots, N$ ， N 是舵面加载点数量，控制通道编号也为 $k^{\#}$ ；

β_k 表示加载点 A_k 对应舵面的运动角度。

图 2 为舵面运动及加载原理图。飞机操纵机构推动舵面运动，加载作动筒头部和尾部通过耳片分别固定在舵面上和铁鸟支持台架上。作动筒上配备有保护模块、伺服阀、过滤器、载荷传感器和位移传感器，加载作动筒采用载荷闭环控制。

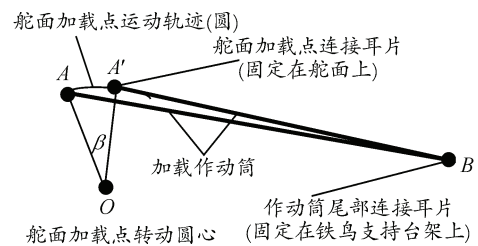


图 2 舵面运动及加载原理

舵面加载要求气动铰链力矩相等，对于飞行模态 Π_{ij} ，舵面偏转角度 β ，要求

$$\text{载荷} = \frac{\text{气动铰链力矩}}{O \text{到直线 } BA' \text{ 的距离}}$$

下面对载荷谱进行了进一步的描述。

载荷谱：加载点 A_k 的载荷 $F_{i,j,k}$ 是 Π_{ij} 和 β_k 的函数，即 $F_{i,j,k} = f(\Pi_{i,j}, \beta_k)$ 。在飞行模态 Π_{ij} 确定后，加载点 A_k 的载荷是舵面运动角度 β_k 的函数，而且，飞机设计方在大多数情况下提供的是离散数据对，即对于 A_k 和 Π_{ij} ，载荷谱为

$$\Sigma_{i,j,k} = \{(\beta_{i,j,k,l}, F_{i,j,k,l})\}$$

式中： $\beta_{i,j,k,l}$ 为舵面偏转角度离散值； $F_{i,j,k,l}$ 为与 $\beta_{i,j,k,l}$ 对应的载荷；增加下标 l 表示离散化，将 β_k 改写成 $\beta_{i,j,k,l}$ 是与 Π_{ij} 和 A_k 的下标对应，与具体飞行模态和具体加载点对应。

将载荷谱预先输入到 MOOG 控制系统，试验开始后，通过反射内存网，MOOG 控制系统的实时控制计算机能从飞行仿真系统、数采系统实时获取到飞行模态 Π_{ij} 和舵面运动角度 β_k 等参数，并解算出控制指令即载荷值。整个过程将在几百微秒到 1 毫秒时间完成。

加载系统工作过程和原理分析说明：

以单通道加载系统为例：对于加载点 A_k ，将载荷谱 $\Sigma_{i,j,k}$ 转换成 MOOG 控制系统的试验控制模型，预先输入到 MOOG 控制系统中。MOOG 控制系统的实时控制计算机，通过反射内存网从飞行仿真系统、数采系统以及综合试验管理系统实时获取到飞行模态 Π_{ij} （飞机的飞行状态参数，如飞行高度、空速等）和舵面运动角度 β_k 等参数，并依据试验控制模型计算出载荷值，实时向电液伺服阀提供控制指令信号，加载作动筒向运动舵面输出加载力（力反馈回路），并跟随运动舵面运动，从而模拟该运动舵面所受到的气动铰链力矩，即可检验气动铰链力矩作用下的飞控系统（机构）性能。

MOOG 多通道协调加载控制系统还可以实现对多个运动舵面的协调加载，使加载系统同时模拟多个或全部飞行剖面运动舵面的气动铰链力矩。

3 分系统功能与接口说明

测控工作站（控制终端）主要功能：参数设置（含谱和 PID 控制器设计即 PID 参数调试）、试验监控、数据处理和显示等。

加载控制系统主要功能：硬件配置、数据采集和测量、指令实时计算、指令分发、闭环控制、通过光纤反射内存网实时获取飞行仿真系统的飞行参数、油路控制等。

液压加载执行机构主要功能：对舵面进行加载，以及在异常卸载状态下，作动筒活塞杆灵活伸缩随舵面运动。尽管实际加载执行部件是载荷作动筒，但其加载功能是通过加载控制系统对伺服阀进行流

量控制（指令与载荷反馈相减作为误差，通过加载控制系统的控制回路和 PID 控制器计算出与闭环误差对应的控制指令，由伺服控制板卡 SCU 向伺服阀提供控制电流），同时借助过滤器、保护模块、传感器等部件合理配合才得以实现加载功能。

MOOG 多通道协调加载控制系统主要由实时加载计算机、伺服控制计算机、伺服控制板卡及其他附件组成，是一个有机整体。

各种计算机（含控制系统的实时加载计算机）通过千兆以太网连接成网络，并通过时钟同步网连接实现时钟同步。

加载控制系统的实时加载计算机通过光纤反射内存网实时获取飞行仿真系统的飞行参数，接口是光纤反射内存卡 PCI-5565PIORC。

实时加载计算机控制伺服阀、液压管路电磁阀是通过伺服控制板卡经过信号处理、放大、接口连接和信号传输来实现的。

4 关键设备选型

基于加载系统架构设计，合理选择关键设备是确保加载系统质量、稳定性和可靠性的关键。下面给出关键设备选型方案。

1) 多通道协调加载控制系统：选择 MOOG 或 MTS 航空级多通道协调加载控制系统（包括硬件和软件 2 部分），硬件配置方面控制通道数与加载点相同（载荷反馈、位移检测和伺服阀控制通道均与加载点数相同），载荷传感器激励选用 10VDC，位移传感器激励选用交流 2.0~5.0 kHz、3.0~5.0 V，配备液压子站高低压控制和适当数量的应急开关；

2) 测控工作站：选择经过与控制系统联合测试的测控工作站（如 DELL、HP 等），配 WINDOWS 原装操作系统和工具软件；

3) 反射内存卡：GE 公司 PCI-5565PIORC 系列，64 M、128 M 或 256 M 均可；

4) 时钟同步卡：IEEE-1588 或 IRIG-B/NTP；

5) 作动筒与保护模块：选择 MTS、MOOG 或国产 173 厂（保护模块选中国飞机强度研究所）均可，但主飞控加载点作动筒因为运动速度快须采用双出杆对称缸；

6) 载荷传感器：美国 interface 轮辐式和柱式载荷传感器；

7) LVDT 位移传感器：美国 MEAS 原产 LVDT 位移传感器；

8) 液压子站：选择 MTS 或 MOOG 产品。

5 安全保护

安全保护是系统架构设计、分项设计和细节设计必须考虑的至关重要的问题。铁鸟舵面加载系统安全保护, 将从总设计、设备选型、试验设计和试验技术等多个方面进行充分考虑, 除选择优质、安全、可靠和性能稳定的设备、产品外, 还将采取下列具体措施:

1) 加载机构设计理论分析与数模检验: 基于舵面运动原理图和相关理论数据, 充分考虑加载变形、作动筒运动死区等因素设计作动筒的轴向尺寸, 将加载机构(作动筒、保护模块、伺服阀、直角旋转弯头、连接支座或耳片等)建立三维数模, 在铁鸟和台架数模上进行严格的运动分析计算和 CATIA 数模分析检验。

2) 加载过程中舵面运动状态监测: 在舵面安装极限状态限位开关; 基于作动筒位移传感器监测数据、载荷数据、飞行仿真系统飞行数据和关联设备角度数据等, 建立异常事件判据, 一旦到达门槛值, 加载实时计算机发出卸载保护指令; 对于襟翼、缝翼等具有多个加载点的舵面, 将对其两端运动协调性进行监测, 并实时保护, 具体根据作动筒位移量来进行计算和比较, 建立异常事件判据, 一旦到达门槛值, 加载实时计算机发出卸载保护指令;

3) 异常事件保护控制策略: 对于每个舵面加载点, 设置载荷超差保护、超限保护; 保护模块设计两种功能: 保护模块的电磁阀 24VDC 电压提供供电时, 能使加载执行机构在控制系统的控制下动态实时加载, 24VDC 电压断开时, 保护模块使作动筒油缸 A、B 腔油路沟通, 并能进行回油补偿, 确保作动筒活塞杆在很小载荷作用下伸缩运动灵活; 设置足够的应急开关, 如在飞机的后机身、左右机翼和控制室等设置足够的应急开关。

4) 断电保护: 断电监测和保护, 是通过实时计算由软件来实现的; 另外, 控制系统及其相关设备均采用 UPS 电源供电, 确保断电后 5~10 min 系统能正常工作。

6 多余力控制策略

铁鸟舵面加载属于被动加载, 是在舵面操纵机构推动舵面运动过程中对舵面实施动态加载, 载荷随舵面运动角度变化(也随飞行模态变化)。舵面运动导致载荷作动筒两端连接孔之间的距离发生变化, 从而产生多余力。因此, 只有解决了多余力控制(或抑制)才能解决舵面加载精度问题。

实际工程控制中, 多余力控制(抑制)大多采用超前补偿控制技术, 也就是从控制回路和控制器参数设计 2 个方面来解决。

MOOG 和 MTS 多通道协调加载控制系统的控制回路是其最关键的核心技术, 经过数十年研制实践发展起来, 其中包含有超前控制补偿回路、提升控制系统鲁棒性和自适应性的多方面的反馈回路, 能很好解决铁鸟舵面被动加载的多余力控制问题。

使用 MOOG 或 MTS 控制系统解决多余力控制问题的具体做法是:

- 1) 增加和调节超前控制补偿回路的前馈控制参数 F;
- 2) 通过调节 PID 参数设计合理的控制器;
- 3) 对于不同舵面加载点通过模拟调试试验获取各通道控制器设计方法。

7 加载系统功能描述

上述设计的铁鸟舵面加载系统具有如下功能:

- 1) 数据实时交换、传输和时钟同步。

MOOG 协调加载控制系统的实时控制计算机安装反射内存卡和时钟同步卡, 通过反射内存网与飞行仿真系统和数采系统等采用内存共享方式进行数据实时交换; 另外, 通过时钟同步网和千兆以太网, 实现飞控系统内的计算机时钟同步和数据传输。

- 2) 单点加载和多点协调加载功能。

通过 MOOG 多通道协调加载控制系统的管理软件设置和启动执行不同的试验, 可以方便实现舵面单点加载和多点(包括全部舵面)协调加载。

加载控制功能主要包括: 试验资源管理、通道参数配置、载荷谱设置、系统反馈计算、控制策略闭环实时计算等功能。

所有加载通道支持以下 3 种工作方式:

① 主动方式: 加载系统能够主动地控制被加载对象按照正弦波、三角波、方波、阶跃等形式运动, 或按照试验要求主动输出载荷;

② 被动加载: 加载系统能够对收放运动的舵面进行被动式加载, 载荷谱为“角度-载荷”谱, 无时间概念;

③ 跟随功能: 加载系统能够对收放运动的舵面在无载荷即载荷为零情况下(含卸载保护工况)进行被动式跟随, 即载荷作动筒行程能在力非常小的情况下伸缩, 它是由保护模块卸载功能实现的。

加载系统能实现以下 2 种闭环控制式:

- ① 力闭环加载控制, 反馈信号可以是加载。

系统自身的力传感器反馈值，也可以是飞机作动筒上加装的力传感器反馈值；

② 位移闭环加载控制，反馈信号可以是加载系统自身的位移传感器反馈值，也可以是数采设备的测试传感器反馈值。

通道参数设置功能均通过控制软件实现，每次试验的通道参数设置能够存储，并支持重复调用。

每个加载通道可以按照飞机飞行状态参数(如：空速、高度、舵面偏角等)，根据预先输入的函数或表格实时解算出相应舵面的气动力载荷。其中，空速和高度等参数由飞行仿真系统提供，舵面运动角度可以通过作动筒上的位移传感器或数采系统测量数据计算得到，也可以通过飞行仿真系统获得。

控制系统提供力传感器和位移传感器的激励、反馈信号调理、实时计算、实时采集。

控制策略的闭环实时计算：主要完成伺服闭环的PID控制和多余力控制，所有控制参数都能数字可调，支持保存和重复调用。

3) 试验加载预显示、数据实时显示和处理。

① MOOG 控制系统具有试验加载谱的预显示功能即演示功能，以便方便检查即将进行的试验载荷设置的大小、方向和变化趋势；

② 加载试验过程中实时显示各种传感器检测的数据，以及基于各种测量数据的虚拟通道数据显示、图表处理等；

③ 通过脚本文件编制计算和控制语句，实现用户需要的各种复杂控制、显示和数据处理功能等。

4) 测控工作站控制。

测控工作站是人机界面的窗口，通过控制管理软件实现设置、控制和管理 MOOG 多通道协调加载控制计算机，完成上述各项功能。从图 1 可知，测控工作站通过千兆以太网与实时加载控制计算机连接和通信。

另外，可增加远程测控工作站，通过千兆以太网、时钟同步网，能够接收综合试验管理系统的时间同步信号，借助 MOOG 控制管理软件，也能够接收综合试验管理系统的远程控制(设置本地/远程切换开关，本地控制优先级高于远程控制)，包括“准备”、“启动”、“停止”、“应急停止”等控制，并及时做出响应和给出应答信息。同时，试验载荷数据可以发送给综合试验管理系统进行显示。

5) 资源管理功能。

具有用户权限管理、试验项目的新建和管理、

硬件资源的自动识别和自动检测、建立试验的逻辑通道和硬件的物理通道之间的对应关系、试验数据管理等功能。

6) 校准功能：用应变模拟仪能直接对控制通道进行校准。

7) 状态监测和安全保护功能。

载荷、位移数据实时监测和分析判断，舵面和作动筒极限位置监测，利用 MOOG 虚拟通道、计算技术和脚本文件方法，将实现更加复杂的异常事件分析判断。

设置充足的应急开关，便于现场和控制室的应急控制。

8) 配置 1 台标准的应变模拟仪，能够产生标准的应变信号，用于试验前对加载控制通道的工作状态进行检查。

9) 配置 1 台线控手柄，实现任意加载通道的步进控制，方便加载作动筒安装，手柄与物理加载通道之间的对应关系通过控制软件进行选择。

10) 解析模型控制功能：采用解析控制而不用插值计算指令，提升加载运行的平稳性和安全性。

8 结论

笔者基于某型号飞机铁鸟舵面加载系统实际设计，全面论述了加载系统总体设计架构、分系统功能和接口界定、加载工作原理、MOOG 控制系统多余力控制处理策略、安全保护措施和加载系统功能等，其合理性和可行性得到了验证。

参考文献：

- [1] 李生杰, 田剑波, 曹丹青, 等. 某型飞机铁鸟液压试验自动控制系统的实现[J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(6): 29-32.
- [2] 陆伟铭. 某型号飞机飞控加载系统的硬件架构[J]. 制造业自动化, 2012(8): 94-96.
- [3] 隋杰飞. 分布式舵面电液伺服加载系统的设计与实现[J]. 民用飞机设计与研究, 2011(2): 26-31.
- [4] 田涌. 飞控铁鸟台电液伺服加载系统的设计分析[J]. 液压与气动, 2010(10): 13-15.
- [5] 董胜, 袁朝辉. 舵机电液伺服加载复合控制方法研究[J]. 工程设计学报, 2013(6): 539-544.
- [6] 俞帅, 周竹. 起落架电液伺服加载控制系统设计与研究[J]. 液压气动与密封, 2011(2): 61-65.
- [7] 孟绪, 樊泽明. 被动式液压伺服加载系统控制的方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2012(2): 349-351.
- [8] 曾宪忠. 试验台多通道加载系统的控制方法研究[J]. 测控技术, 2013(8): 71-74.