

doi: 10.7690/bgzdh.2013.01.012

基于 Galil 运动控制器的风洞动态试验装置控制系统

梁频¹, 聂博文², 魏泳涛¹, 沈志洪²

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 中国空气动力研究与发展中心低速所, 四川 绵阳 622762)

摘要: 为提高动态风洞试验的质量和效率, 研制了某新型单自由度动态试验装置控制系统。该系统由运动控制器、伺服驱动器、上位计算机等组成, 主要用于控制平行四边形机构作正弦振荡运动。基于 Galil 运动控制器, 完成了控制系统硬件选型和软件设计。系统研制成功后已应用于多项型号试验, 结果表明: 系统达到了控制精度要求, 在试验效率方面有较大提高。

关键词: 风洞; 动态试验; 正弦振荡; 运动控制; Galil

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Control System of Dynamic Test System in Wind Tunnel Based on Galil Motion Controller

Liang Pin¹, Nie Bowen², Wei Yongtao¹, Shen Zhihong²

(1. College of Architecture & Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Low Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 622762, China)

Abstract: In order to improve the quality and efficiency of dynamic test in wind tunnel, control system of a new single-degree-of-freedom forced oscillation dynamic test system has been developed. The control system which consists of motion controller, servo amplifier, host computer etc, is used mainly to drive a parallelogram mechanism. Based on the Galil motion controller, hardware selection and software design are finished. Its application in the wind tunnel tests shows that the control precision can meet the system requirement, and the operating efficiency has been evidently enhanced.

Key words: wind tunnel; dynamic test; sine oscillation; motion control; Galil

0 引言

优良的机动性能特别是过失速机动性能, 是战斗机取得近距格斗空战优势的重要保障^[1-2]。世界新一代战斗机无一例外地将过失速机动性能作为重要的技战术指标。风洞大迎角动导数试验、大振幅振荡非定常气动力试验等动态风洞试验是获得飞机过失速机动飞行中的气动特性的主要途径。

动态风洞试验的共同特点是: 通过运动机构驱动飞行器风洞试验模型按照一定规律往复运动, 通过位移传感器和天平等仪器测量飞行器的动态气动特性。传统的动导数和大振幅振荡试验系统激振装置是通过直流电机驱动减速器, 减速器输出轴驱动凸轮, 将转动变成直线运动产生激振。这种传动方式由于传动单元多, 结构间隙大, 增大了试验数据的不确定度; 必须更换凸轮机构, 才能实现振幅调整, 难度大、耗时长; 因此, 笔者基于运动控制技术, 研制了一种单自由度俯仰动态试验装置控制系统, 以减小机械传动间隙, 实现振幅无级可调, 从而提高动态风洞试验的质量和效率。

1 技术指标

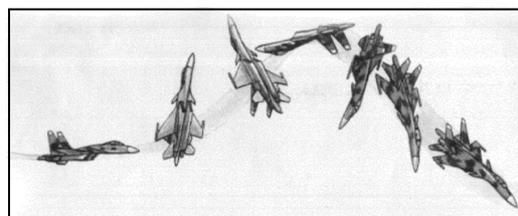
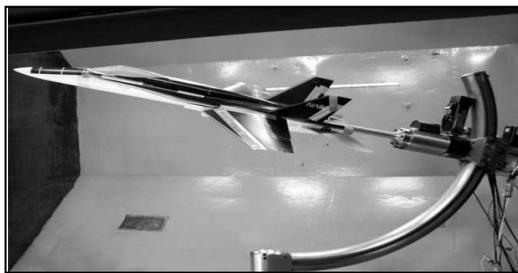


图1 战斗机典型机动动作

图2 NASA 兰利中心 12 英尺低速风洞滚转试验装置^[3]

动态风洞试验中战斗机典型机动动作如图 1, 低速风洞滚转试验装置如图 2, 其主要性能指标为:

- 1) 最大角振幅 40°;
- 2) 频率 0.2~4 Hz;

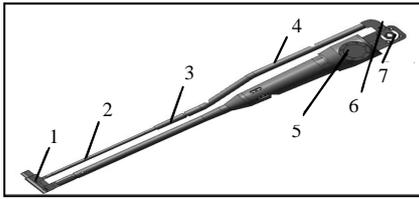
收稿日期: 2012-10-08; 修回日期: 2012-11-08

作者简介: 梁频(1975—), 女, 福建人, 硕士, 工程师, 从事风洞实验控制与测量研究。

3) 小振幅范围内 (小于 2.5°) 振幅精度为 3'。

2 装置结构

动态试验装置的俯仰振荡部件如图 3 所示, 主要由摇摆杆、支承座、主支杆、主接头、天平套筒、尾接头、下尾支杆、调节杆和上尾支杆等部分构成。平行四边形机构的 4 个铰接点分别为减速机转动中心、摇摆杆与尾支杆的铰接点、以及天平套筒上的 2 个铰接点。



1. 天平套筒; 2. 下尾支杆; 3. 下尾支杆; 4. 上尾支杆; 5. 支承座; 6. 摇摆杆; 7. 角度测量电位器。

图 3 俯仰运动部件

3 控制系统

3.1 功能与组成

动态试验装置控制系统主要用于控制俯仰振荡部件, 实现单点步进或正弦振荡运动, 以满足动导数、大振幅振荡等动态风洞试验角度控制要求。

控制系统采用了“IPC+运动控制器+交流伺服”的组成方式, 整体结构如图 4, 主要元件包括上位机、运动控制器、伺服驱动器、伺服电机及编码器和电位计。

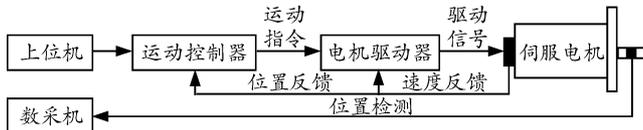


图 4 控制系统结构框图

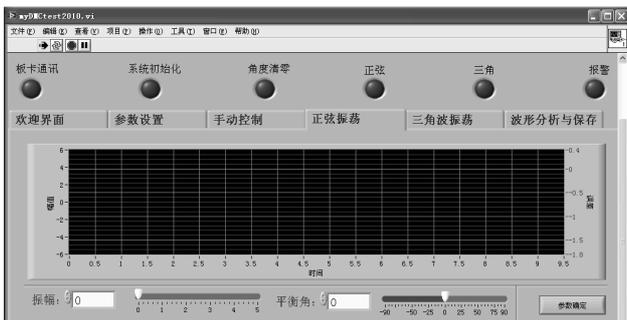


图 5 人机软件界面

上位机运行人机界面软件, 主要完成联机通讯、运动模式选择、运动参数设置和运动起停控制等 (图 5)。运动控制器安装于上位机插槽中, 通过高密度屏蔽电缆与互联模块连接, 主要完成运动轨迹生成和位置闭环控制。电机驱动器设置为速度控制模式, 进行速度闭环控制。电位计安装于运动装置之上,

直接测量获得运动角度检测信号。

可见, 驱动回路构成双环串级校准系统, 位置环的作用是保证系统稳态精度和动态跟踪性能, 速度环的作用是增加系统阻尼, 改善动态响应特性。角位移传感器信号与天平信号一起接入动态数据采集系统, 实现角位移信号与对应天平信号同步采集。

3.2 主要硬件选型

1) 运动控制器。

Galil 运动控制器是基于微处理器的精密运动控制器, 具有控制精度高、功能强大、兼容性好、使用方便等特点, 广泛应用于世界装备、半导体、医疗、航天等领域。考虑到系统的可扩展性, 选择 4 轴运动控制器 DMC-1842, 具有以下技术特点^[4]:

- ① 4 轴; ② PCI 总线; ③ 脉冲输出频率 3 MHz; ④ 4 路编码器输入, 12 MHz; ⑤ 16 路 I/O; ⑥ 伺服更新率 250 μs。

在本控制系统中, DMC-1842 作为下位机完成实时控制任务。在每个伺服周期内 (单轴为 62.5 μs), 执行一次位置闭环 PID 控制。利用“圆弧插补”和“虚拟轴”功能, 实现正弦振荡运动规划和位置闭环控制; 利用信号分配转接模块 PICM2900 与驱动器和外部 I/O 设备通信, 实现位置反馈、硬件限位和紧急停车等。

2) 伺服系统。

伺服系统设备包括伺服驱动器和伺服电机, 其选型应首先保证有足够的驱动力矩 (模型的惯性矩+气动荷载), 其次是电机的体积应尽量小。日本松下公司的交流伺服电机在相同功率下, 具有比其他品牌外形尺寸更小的特点。这有利于在装置设计时, 尽量减小装置的外形尺寸, 以减小对试验时流场的干扰, 从而减小装置对飞机模型气动力的影响。根据载荷估算结果, 选择松下 MSMA302 型交流伺服电机^[5]。伺服驱动器通过控制信号插头 X5 与 PICM2900 互联, 通过脉冲信号传输位置指令和反馈。

3) 电位计。

由于机构间隙和结构形变的影响, Galil 运动控制器通过反馈脉冲计算获得的飞机模型角度存在一定时延和误差。为此, 在机构旋转轴上 (尽量靠近运动终端) 安装 Novotechnik 公司的 GL-300 型电位计, 用于测量机构实际运动的角位移, 以检测和检验系统控制精度。GL-300 的主要技术参数如下:

- ① 安装孔径 Φ30 mm; ② 机械行程 348°; ③ 电气行程 340°; ④ 精度 0.03%; ⑤ 最高转速 130 r/min; ⑥ 模拟量输出; ⑦ 电阻值 20 kΩ。

将 GL-300 的模拟输出信号与天平信号一同送

入同一块数据采集卡，即可实现模型角位移信号与天平信号的同步采集。

3.3 软件设计

3.3.1 人机界面软件

Galil 运动控制器提供了 Windows 下的设备驱动程序和动态链接库，用户通过主程序调用相应的函数，发出运动控制指令，监视运行状态。

1) 软件功能。

人机界面软件主要具备以下功能：

- ① 欢迎界面，友好、直观地展示系统的组成和功能；
- ② 通讯功能，以 TCP/IP 方式与风洞试验管理机和运动控制器通讯，既可本机控制装置的运动，又可联机运行接收来自试验管理机的运动指令；
- ③ 控制参数设置，例如通讯参数、PID 参数、限位、最大加减速速度等；
- ④ 控制模式选择，提供单点步进、快速拉起和正弦振荡 3 种控制模式，操作人员只需制定相关参数，即可完成运动轨迹的规划；
- ⑤ 控制指令发出，操作人员可根据情况控制装置起动、停止、回零和紧停；
- ⑥ 控制系统状态监视，监视电机电流、转速、温度、冷却水压力等参数，并提

供安全报警；⑦ 控制结果分析，可记录和回放运动过程中的角度等运动参数，并与理论控制曲线比较，实时监控运动控制精度。

2) 软件实现。

人机界面软件的开发工具为 LabVIEW，其主界面如图 5 所示。整个 LabVIEW 框图程序的结构采用了生产者/消费者设计模式(事件)，如图 6。该模式将需要同时完成的任务划分为独立的并行循环，一个循环处理界面响应事件，另一个循环处理连续的数据采集和记录处理，2 个循环之间通过消息队列进行消息传递^[6]。程序启动时，界面初始化、板卡初始化、参数设置 3 个消息依次进入队列执行，然后，2 个循环均进入等待状态。当操作人员进行操作时，位于上方的循环将作出响应，如果所响应的事件是用户单击了手动控制的“确定”按钮、正弦振荡或三角波振荡的“开始振荡”按钮、波形分析与保存的“导入波形”按钮，则分别发出手动控制、正弦振荡、三角波振荡和波形分析消息。这些消息驱动位于下方的循环完成相关数据采集、显示和处理工作。

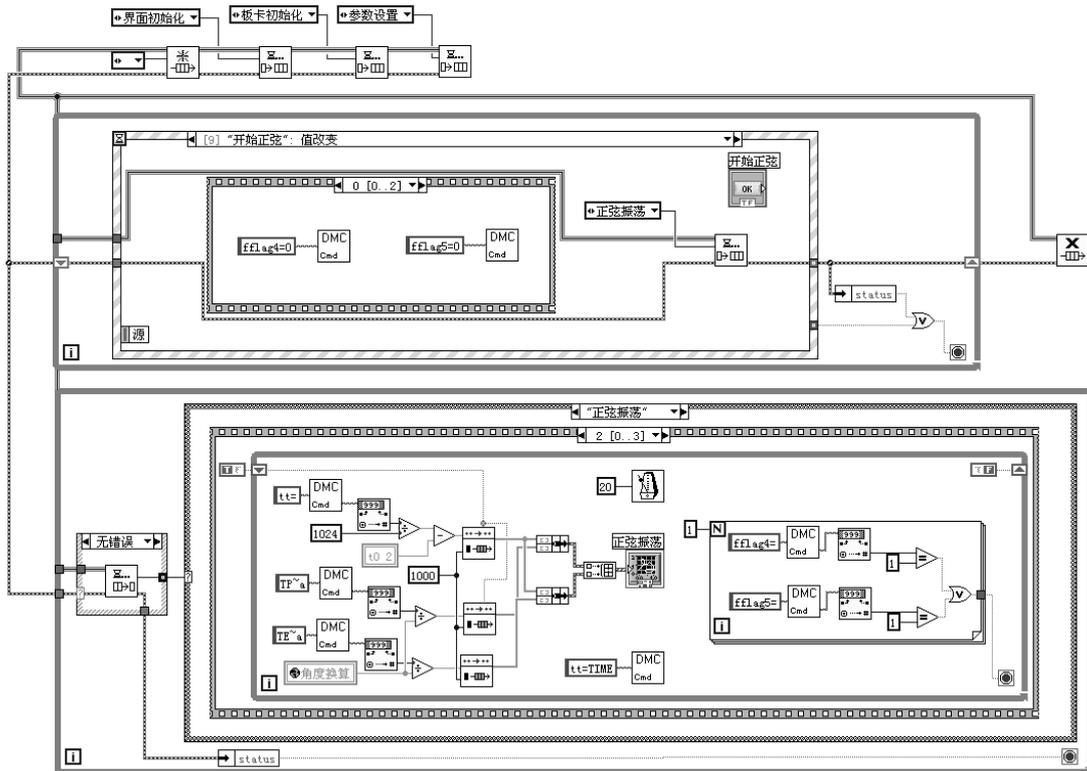


图 6 人机软件程序框图

调用的 Galil 库函数主要有：

- ① DMCOpen(USHORT usController, Hwnd hwnd, PHANDLEDMC phdmc)打开上位机与运动控制器之间的通讯连接；

- ② DMCDownloadFile (HANDLEDMC hdmc, PSZ pszFileName, PSZ pszLabel)将应用程序下载至运动控制器；

- ③ DMCCCommand(HANDLEDMC hdmc, PSZ

pszCommand, PCHAR chResponse, ULONG cbResponse)向运动控制器发送指令, 进行参数设置、启停控制和数据存储等;

④ DMCClose(HANDLEDMC hdmc)断开上位机同运动控制的通讯连接。

3.3.2 运动控制程序

Galil 运动控制器提供了功能强大且使用方便的编程语言, 使用户能快速编程来解决任何运动控制方面的难题。程序下载到运动控制器后, 无需外部干预, 即可执行。

1) 程序功能。

运动控制程序主要具有以下功能:

① 通讯功能, 与上位机通过 PCI 总线通讯, 实现程序上载和下载, 接收控制指令和参数设置命令, 反馈运动参数信息;

② 驱动参数初始化功能, 程序运行自动完成各个轴的使能、速度、加速度、PID、跟随误差等状态和参数设置;

③ 运动控制功能, 实现正弦振荡、快速拉起和单点步进、4 种运动模式的运动控制;

④ 安全保护功能, 监视运动控制器报警信息, 一旦出现报警, 自动进入相关错误处理子程序。

2) 程序实现。

正弦振荡运动是动态试验中最常用的运动状态之一。为了避免启动加速度过大造成的系统冲击, 运动规划时通常按余弦运动规律进行规划。利用 GALIL 提供的虚拟轴和圆弧插补功能, 可很好地实现余弦振荡运动轨迹规划。

假设要求 A 轴进行 10 个周期的余弦运动, 振幅为 1 000 cts, 频率为 20 Hz。为此, 可以规划 A 轴和 N 轴进行圆弧运动, 其中 N 轴为虚拟轴, 该轴没有编码器反馈, 也不会有脉冲输出。程序实现代码如表 1。

表 1 程序实现代码

指令	说明
VMAN	A、N 轴联动
VA68000000	最大加速度
VD68000000	最大减速度
VS125664	进给率 $VS=2 \times \pi \times R \times F$, R 为振幅, F 为频率
CR1000,0,3600	1 000 为圆弧半径, 0 为起始角, 3 600 为弧角
VE	矢量结束
BGS	开始矢量运动

其中, 通过 VS 指令设置了运动频率为 20 Hz, CR 指令的圆弧半径参数设置了振幅为 1 000 cts, 起始角参数设置了运动规律为余弦, 弧角参数设置了运动周期数为 10。可见, 通过设置 CR 指令中的圆弧半径参数和 VS 指令中的进给率参数, 可实现装置正弦振荡的振幅和频率无级可调功能。

4 控制效果及分析

图 7、8 为某型号飞机俯仰振荡试验过程中从电位计传感器读取、记录的装置角度运动轨迹与理论轨迹比较, 获得的控制误差。其中, 误差曲线呈正弦规律, 是由于测量运动曲线与理论曲线存在一定的相位平移造成的。将相位平移引起的误差扣除后, 振幅 4°, 频率 4 Hz 正弦振荡角度运动轨迹误差小于 0.05°, 振幅 30°, 频率 1 Hz 正弦振荡角度运动轨迹误差小于 0.1°, 达到动态试验角度控制精度要求。

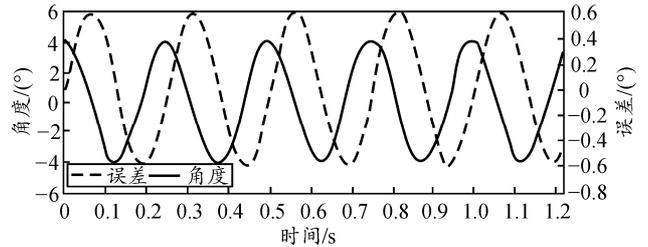


图 7 振幅 4°, 频率 4 Hz

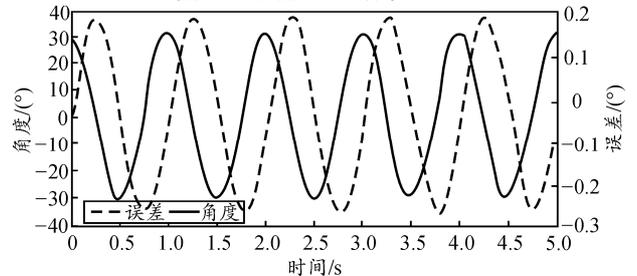


图 8 振幅 30°, 频率 1 Hz

5 结论

基于 Galil 运动控制卡的风洞动态试验装置控制系统采用先进的运动控制技术实现装置正弦振荡运动控制, 具有机械间隙小、控制精度高、振幅和频率范围宽、无级可调等优点。系统研制成功后, 已成功应用于多项型号试验, 结果表明, 该系统较大地提高了风洞动态试验的数据精度和试验效率^[7]。

参考文献:

- [1] Tamrat B F. The X-31: A Post-Stall Technology (PST) Fighter Close-in-Combat Results Assessment, and a Look at New CIC Performance Evaluation Metrics[C]. AIAA 2004: 2004-5273.
- [2] Alcorn C W, Croom M A, Francis M S, et al. The X-31 Aircraft: Advances in Aircraft Agility and Performance. Progress of Aerospace Science[J]. 1996, 32: 377-413.
- [3] Bruce Owens D., Brandon Jay M., Croom Mark A., et al. Overview of Dynamic Test Techniques for Flight Dynamics Research at NASA LaRC (Invited)[M]. 2008.
- [4] Galil Motion Control, Inc. DMC-18x2 USER MANUAL[S]. 2008, 3.
- [5] Panasonic, Inc. Minas A4 系列 AC 伺服驱动器技术资料编[S]. 2006: 3.
- [6] 阮奇桢. 我和 LabVIEW—一个 NI 工程师十年的编程经验[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 9.
- [7] 周述光, 梁勇. Φ3.2 米风洞单自由度动态试验系统调试报告[R]. 2011, 7.