

doi: 10.7690/bgzdh.2016.07.012

# 模型快速插入机构控制系统

杨海滨, 张 伟, 王晓宇, 邓章林, 李 娜  
(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为避免高超声速风洞测热试验时模型在投放前被加热引起的测量误差, 要求模型快速插入流场中间, 研制了模型快速插入机构。该机构采用气液增速缸和伺服比例换向阀驱动, 当风洞流场建立时由上驻室快速插入到试验流场中。控制系统运用计算机集中控制技术、电液伺服技术、交流伺服技术和工业现场总线技术, 建立了相互独立的各个运动自由度控制回路。系统通过高速的数据采集和模拟量输出、读取 CPU 工作频率等方式, 解决了模型快速插入和计时的难题。试验结果表明: 该机构能实现模型的快速插入, 动作过程响应迅速并运行平稳, 达到了预期技术指标, 说明该控制系统的设计是合理的。

**关键词:** 高速; 伺服控制; 流场; 插入; 模型  
**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Control System of Model Quick Insertion Mechanism

Yang Haibin, Zhang Wei, Wang Xiaoyu, Deng Zhanglin, Li Na  
(High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to avoid the measurement error brought by heating before heat test in hypersonic wind tunnel, it's essential that the model should insert into the flow field quickly. Accordingly the model quick-insertion mechanism has been developed. The mechanism, which is driven by gas-liquid increase-speed cylinder and servo proportion reversing valve, can quickly release the model when the flow field is built. The control system has adopted IPC centralized-control, electro-hydraulic servo, AC servo and industrial field bus technologies, so mutual independent multiple freedom motion control circuits have been built. By high-speed data acquisition and analog output, reading CPU work frequency etc, the control system has solved the difficult question of fast insertion and timing. The test results show that the mechanism can cut in the flow field quickly during heat test and operate stably. All the technical indexes have been meet. So, the design of the control system is reasonable.

**Keywords:** high-speed; servo control; flow field; insert; model

### 0 引言

高超声速风洞进行模型表面热传递试验时, 要求模型能快速插入风洞流场中心, 使模型表面在采集试验数据前受热时间尽量短, 达到瞬态加热的目的<sup>[1]</sup>。为此, 要在某高超声速风洞内设计一套模型快速插入机构, 该机构安装于风洞上驻室内。当高超声速流场建立时, 要求模型能从流场上方快速插入流场中心区域, 并且具备变换模型俯仰角  $\alpha$  的能力, 2 个运动自由度能够相互独立地进行控制; 因此, 笔者采用气液增速缸和伺服比例换向阀(简称比例阀), 结合现代智能控制技术设计了一套用于模型投放的快速插入机构, 从而实现在测热试验时模型从上驻室快速插入到流场中心。同时采用 PLC 结合电机伺服技术完成模型俯仰角  $\alpha$  的精确控制。该模型插入机构既能用于测热试验, 同时又具备常规测力、测压试验的能力。

### 1 主要技术指标及性能

1) 快速插入机构包括垂直向  $Y$ , 俯仰角  $\alpha$  2 个

自由度。

2) 各自由度技术指标:  $Y$  向行程 1 000 mm, 快速行程 800 mm, 全程精度要求  $\pm 1$  mm; 俯仰角  $\alpha$  行程  $-5^\circ \sim +40^\circ$ , 全程精度要求  $\pm 1'$ 。

3) 运动速度。 $Y$  向速度: 测热试验时, 机构从上驻室隔热板到风洞中心线(行程 800 mm)插入的时间不大于 0.3 s; 测力试验时机构插入时间为 3 s。俯仰角  $\alpha$  运动速度:  $3 \sim 10$  ( $^\circ$ )/s, 可程序设定。

4) 机构运行平稳, 响应迅速, 到达指定位置后不出现震荡。

### 2 控制系统总体方案设计

快速插入机构实物如图 1 所示。控制系统由工业控制计算机(简称工控机)、多功能 I/O 卡、电液伺服控制系统、西门子系列 PLC、电机伺服系统和操作台等组成。控制系统总体框图如图 2 所示。

系统以工控机为核心, 通过内插多功能数据采集卡、模拟量输出卡和通信扩展卡来实现对系统的模拟量采集、伺服模拟量控制、数字量信号的控制

收稿日期: 2016-03-03; 修回日期: 2016-04-14

基金项目: 气动中心某专项课题

作者简介: 杨海滨(1972—), 男, 四川人, 工程硕士, 高级工程师, 从事风洞变配电系统以及高超声速风洞的自动控制研究。

以及与西门子 PLC 的通信等。

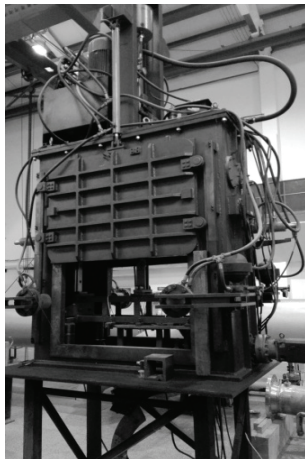


图 1 快速插入机构实物图

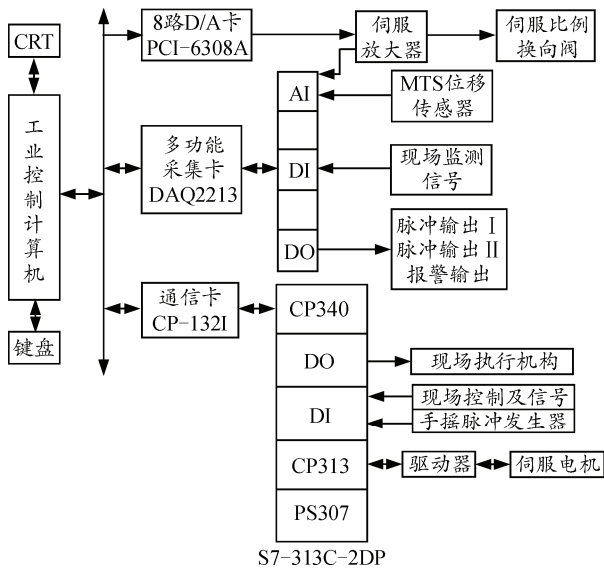


图 2 控制系统总体框图

模型的快速插入由电液伺服控制系统完成。本系统中，笔者采用气液增速缸、比例阀以及高精度位移传感器的方案来解决上述问题。插入机构的 I/O 信号由多功能数据采集卡高速采集。

模型的俯仰角  $\alpha$  控制由西门子 PLC、交流伺服驱动器以及西门子伺服电机完成。PLC 与工控机采用模块 CP340 进行通信。

操作台主要完成上电、主要信号显示、报警和急停等功能。

### 3 控制系统详细设计

#### 3.1 工业控制计算机

工控机是整个控制系统的核心，负责整个系统的数据采集、控制指令的发出以及机构运动的实时监控等。工控机内含以下智能控制卡：

1) 多功能数据采集卡：选用多功能卡

DAQ2213，该卡有 16 通道单端或者 8 通道双端的 16 Bit 分辨率，采样速率达到 250 kS/s。该卡将位移传感器输出的位移信号、伺服比例阀反馈信号等模拟量信号进行模数转换。同时通过该卡集成的 DI 单元对现场信号进行采集；DO 单元输出脉冲信号给数据采集系统。

2) 模拟量输出板：选用隔离型模拟量输出卡 PCI-6308A，该卡的 8 通道模拟量输出为 4~20 mA 电流输出，拥有 12 Bit 转换精度，模拟量输出建立时间小于 20  $\mu$ s，其主要作用是电液伺服系统提供控制信号。

3) 通信扩展卡：采用 PCI 总线卡，扩展 RS485 总线通信，实现与 PLC 的通信。

#### 3.2 电液伺服控制系统

模型的快速插入机构采用高速气液缸驱动，其原理是由气液缸上部的气液弹簧缸推动下部的双作用油缸(总行程 1 000 mm)完成投放动作，气液缸行程的最后 50 mm 留做预防过冲的缓冲行程(此时减振器起作用)。机构的液压原理如图 3 所示，系统由液压泵、液控单向阀、电磁换向阀、气液增速缸、节流阀、溢流阀、比例阀和辅助组件等组成。

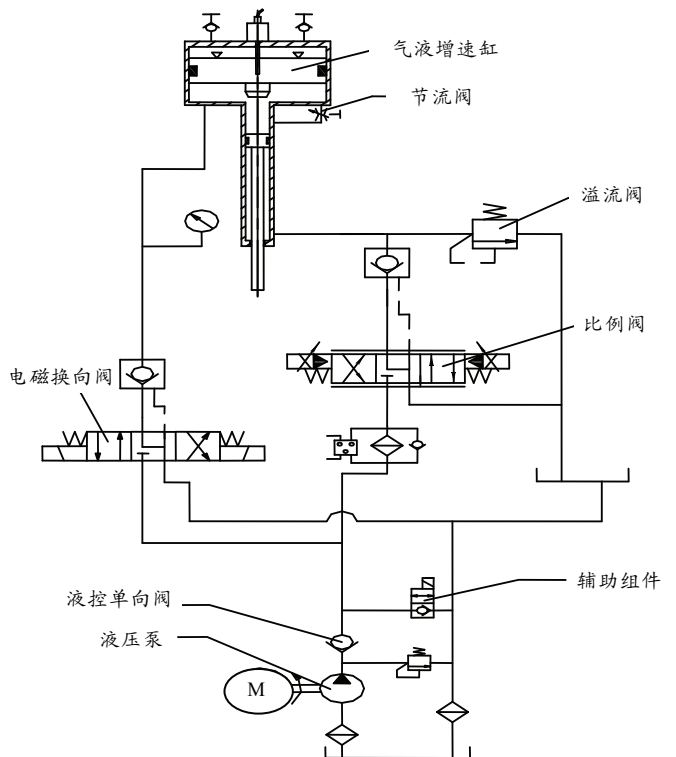


图 3 快速插入机构液压原理

动作前，气液增速缸的上腔氮气已具有一定的初始压力。当需要进行投放试验时，控制系统发出指令，使比例阀开启(由中位到排油位置)，液压油

从气液增速缸下腔迅速排出。此刻下腔油压接近于零，这样，装有模型的运动机构在压缩氮气的急速膨胀及自重的双重作用下产生很大的瞬间加速度，迅速使机构下降到一定位置。机构在接近终点位置时进入减速运动，控制方案采用半开环控制，即在程序里设置多个预先设置的位置控制点，在每个位置控制点，系统直接发出指令控制比例阀减小阀口开度，这样就减少了控制系统计算和数据交换时间。

比例阀为两级阀，可根据输入电信号提供方向控制和无补偿的流量控制<sup>[2]</sup>。输入信号以双闭环的形式精确地确定阀芯调节。由于动态性能高，响应快；因此，这类阀具有很高的性能，特别是应用在对要求动态响应高的位置和速度控制领域。

由于 Y 向位移具有快速性，选用美国 MTS 公司的磁致伸缩位移传感器，该传感器能承受高温、高压和高震荡的环境。传感器的模拟量输出更新时间快(更新时间 ≤ 1 ms)。

### 3.3 电机伺服系统

模型的俯仰角  $\alpha$  由电机伺服系统驱动。系统选用西门子 1FT6 系列交流伺服电机和 611U 伺服驱动器，伺服驱动器与西门子 PLC 自带的 DP 通信口采用 Profibus-DP 总线连接<sup>[3]</sup>，通过对 PLC 的编程来控制交流伺服电机，从而实现俯仰角的控制。交流伺服电机具有出力大、响应快、速度高、惯量小、转动平滑和力矩稳定的特点，与之配套的伺服驱动器自带位置闭环控制功能，构成精确的位置控制系统<sup>[4]</sup>。电机伺服控制原理如图 4 所示。

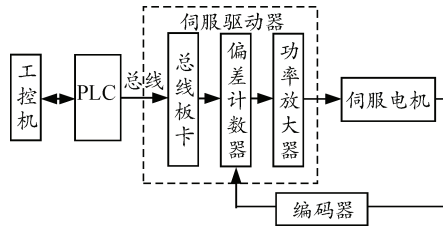


图 4 电机伺服控制原理

PLC 主机采用 313C-2DP。它与工控机的通信采用在 PLC 中插入西门子的通信模块 CP340，该通信模块支持 RS422/485 自由通信协议，可在工控机里通过编程实现与 PLC 的实时通信<sup>[5]</sup>。通过与 PLC 的通信，将控制信息发送给 PLC，再通过 PLC 来控制执行机构或者传送给 611U 伺服系统。通过通信也同时读取 PLC 中的信息，从而实现了对 PLC 及伺服系统的实时监控<sup>[6]</sup>。

### 3.4 机构的保护控制

由于机构的运动速度极快，必须采取相应的保

护措施<sup>[7]</sup>，包括：

- 1) 在投放机构与试验段之间设置隔热板。当隔热板关闭时，机构不能向下运动。
- 2) 设限位安全连锁，机构到达各运动自由度的正负向机械限位时安全连锁保护。
- 3) 设计锁紧机构的插销装置，当机构提到上驻室时不会下掉。
- 4) 设置机构过振安全连锁，当机构振动幅值超出软件预先设定值时，紧急停车。
- 5) 设置紧急停车安全连锁。

### 3.5 软件设计

系统中 PLC 主要完成模型的俯仰角  $\alpha$  的控制，PLC 的编程采用西门子编程软件 STEP7。模型的快速插入运动控制软件采用 VC++6.0 语言进行编写，根据图 5 的控制流程完成控制程序的编写。

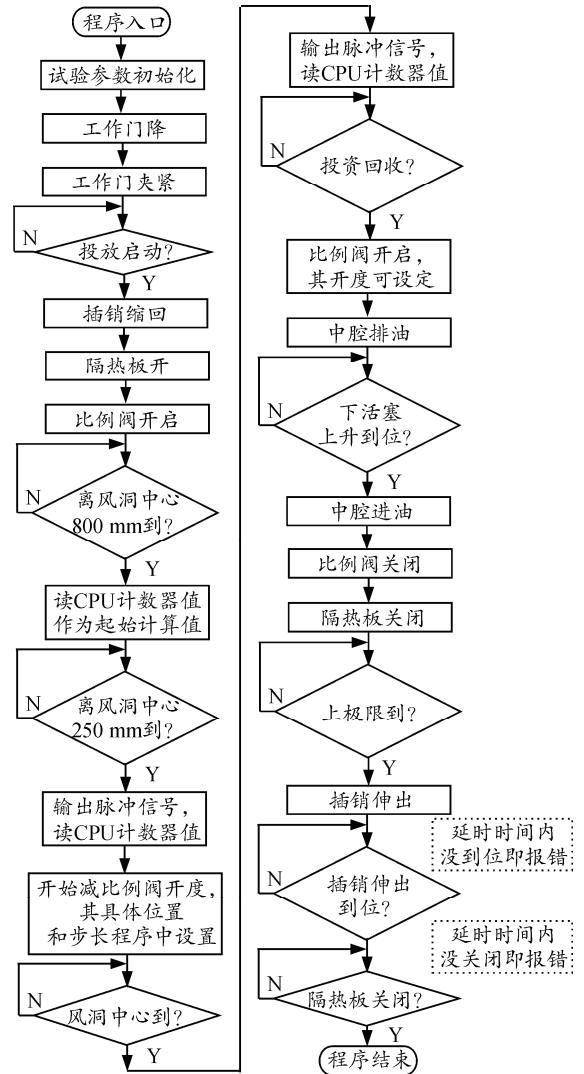


图 5 试验控制流程

控系统人机界面从功能块上划分，包含了登录界面、系统设置、测热试验及测力试验 4 个界面。

其中，登录界面包含系统的操作说明、用户管理等；系统设置包含系统参数设置、电机加速度及运动速度等参数设置；测热和测力试验界面内容有  $Y$  向位移值实时显示、各开关量信号和俯仰角度实时显示等。此外，可通过界面上的按钮直接对设备进行调整、控制等。测热试验控制界面如图 6 所示。

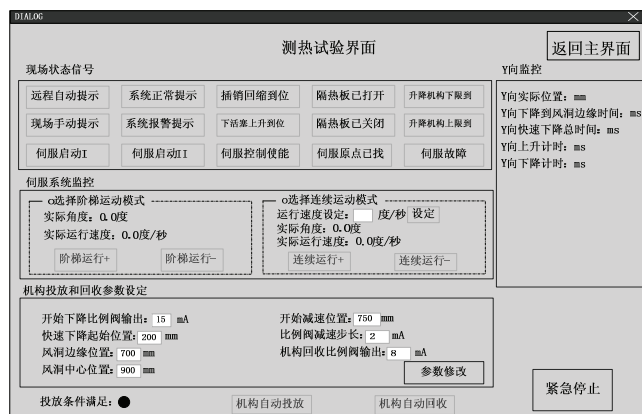


图 6 测热试验控制界面

## 4 关键技术难点及解决办法

### 4.1 数据采集和模拟量输出

系统要求测热试验中  $0.3\text{ s}$  内  $Y$  向行程  $800\text{ mm}$ ，虽然电液伺服系统采用气液增速缸的方案可以达到如此快的速度；但如此短时间内数据如何采集以及模拟量如何输出都是一个难题。

数据采集卡 DAQ2213 的采样速率达到  $250\text{ kS/s}$ ，A/D 转换时间小于  $4\text{ }\mu\text{s}$ ，系统中采用每  $100\text{ }\mu\text{s}$  对  $Y$  向位移和比例阀反馈信号采样一次，其中可根据反馈信号确定比例阀的阀芯是否动作正常。

系统中模拟量输出的电流信号给比例阀作为控制信号，模拟量输出卡 PCI-6308A 的输出建立时间小于  $20\text{ }\mu\text{s}$ 。这个电流信号是通过一个已预制的表格里的数值经过 D/A 转换后输出的，该数据可根据调试作实时修改，与  $Y$  向位移值一一对应。

测热试验中， $Y$  向下降指令启动后，程序启动时间计时，同时开始启动数据采集子程序，直到  $Y$  向抵达下极限后结束该子程序。在子程序执行过程中，首先将位移信号采集到工控机（时间约为  $10\text{ }\mu\text{s}$ ），采集到的数值经过处理后与设定值进行比较确定是否发出脉冲信号。在测热试验  $Y$  向下降过程中，每采集到的  $10$  个位置值存储一次（ $1\text{ ms}$  存储一次），以便在界面上实时显示。与此同时，该数据与预制表格的位置值进行比较，然后将其对应的控制信号赋值给 PCI-6308A。

整个行程运行时间约为：位移数据采集（ $10\text{ }\mu\text{s}$ ）+模拟量输出建立时间（ $\leq 20\text{ }\mu\text{s}$ ）+指令运行时间

（ $\leq 50\text{ }\mu\text{s}$ ）+比例阀响应时间（ $\leq 15\text{ ms}$ ）+下降行程时间约为  $260\text{ ms} \approx 280\text{ ms} < 300\text{ ms}$ 。

### 4.2 测热试验 $Y$ 向下降运行时间的测定

在启动下降程序之前，通过调用 PerformanceFrequency()函数读取当前工控机 CPU 的运行频率 Freq\_Val<sup>[8]</sup>，当  $Y$  向离风洞中心位置约  $800\text{ mm}$  并开始下降时给出计时信号，此信号通知程序调用 PerformanceCounter()函数读取当前工控机 CPU 的计数器的值存入 CPU\_Count\_Val1，当  $Y$  向下降至下极限（或接近下极限）时给出结束计时信号，此信号通知程序再次调用 PerformanceCounter()函数读取工控机 CPU 的计数器的值存入 CPU\_Count\_Val2。

最后通过计算公式：行程时间 =  $1000 \times \Delta\text{CPU}$  计数器值 / CPU 工作频率（即  $\text{Run\_Time} = 1000 \times (\text{CPU\_Count\_Val2} - \text{CPU\_Count\_Val1}) / \text{Freq\_Val}$ ），单位为  $\text{ms}$ ，通过这种方式，可以精确地计算出  $Y$  向下降的运行时间。

## 5 结论

该系统采用气液增速缸、伺服比例换向阀以及交流伺服技术，较好地实现了高超声速风洞试验时模型的快速插入和俯仰角的控制。插入模型时机构响应迅速，运行平稳，测热试验时能按要求时间运动到指定位置，并且到达后机构不出现振荡。运动速度和精度以及其余的技术指标都全面达到试验要求，圆满地保障了试验的完成。同时，该系统的运行对于那些要求机构能快速运动的自动控制问题具有一定的应用和推广价值。

## 参考文献：

- [1] 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 313-317.
- [2] 靳宝全. 基于模糊滑模的电液位置伺服控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 99-109.
- [3] 陈在平. 现场总线及工业控制网络技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 111-180.
- [4] 邓星钟, 周祖德. 机电传动控制[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995: 75-78.
- [5] 龚仲华. S7-300/400系列PLC应用技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 456-502.
- [6] 张立娟, 姜世公, 崔登祺, 等. 人体下肢运动康复训练机器人的设计[J]. 兵工自动化, 2015, 34(5): 50-53.
- [7] 周晓刚, 胡明伦, 白本齐, 等. 高超声速风洞五自由度机构技术改造[J]. 兵工自动化, 2013, 32(10): 66-68.
- [8] 张宏林. Visual C++ 6.0 程序设计与开发技术大全[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005: 80-170.