

# 风洞 CTS 试验六自由度机构控制方法研究

车兵辉, 魏 然, 曾 伟

(中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对一种风洞 CTS 试验六自由度运动机构, 在分析机构的结构特点和运动关系的基础上, 对其控制方法进行研究; 六自由度运动机构由 3 个角位移和 3 个线位移组成, 首先建立机构的运动模型, 分析了各轴的传动关系和相互运动关系, 针对角度传动的非线性关系特点, 采用了基于虚拟轴的跟随控制方法, 实现了实际角度的匀速控制; 根据六自由度运动关系分析了位置 and 速度关系, 采用速度补偿的方法, 实现了六自由度的联动控制; 采用高性能的运动控制器和驱动器构成了角度双闭环控制系统, 实现了该机构要求的所有运动功能; 最后通过实验验证, 测量了角度控制精度, 结果表明角度控制精度都达到或超过了设计指标, 能够满足风洞 CTS 试验要求。

**关键词:** 六自由度; 虚拟轴; 非线性; 跟随控制

## Research on Control Method of Six Degree of Freedom Mechanism for Wind Tunnel CTS Test

Che Binghui, Wei Ran, Zeng Wei

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Aiming at a six degree of freedom motion mechanism of a wind tunnel CTS test, the control method is studied based on the analysis of the structural characteristics and kinematic relationship of the mechanism. The six degree of freedom motion mechanism consists of three angular displacement and three linear displacement. Firstly, the motion model of the mechanism is established, and the transmission relationship and mutual movement relationship of each axis are analyzed. According to the nonlinear relationship of angle drive, a follower control method based on virtual axis is adopted. Realize the uniform speed control of the actual angle. The relationship between position and velocity is analyzed according to the six degree of freedom motion relationship, and six degree of freedom linkage control is realized by speed compensation method. The high performance motion controller and driver are used to form the angle double closed loop control system, and all the motion functions required by the organization are realized. Finally, the accuracy of angle control is measured by experimental verification. The results show that the angle control precision is all or exceed the design index, and can meet the requirements of the wind tunnel CTS test.

**Keywords:** six-degree-of-freedom; virtual axis; nonlinearity; follow-up control

## 0 引言

风洞捕获轨迹试验 (captive trajectory simulation, CTS) 主要用于模拟外挂物模型从飞机上投放/发射的分离过程, 获取外挂物分离对母机安全性能影响评估数据<sup>[1]</sup>。捕获轨迹试验是由计算机控制的六自由度运动机构支撑外挂物, 使外挂物保持给定位置和姿态, 然后由外挂物内部的应变天平测量外挂物所受的气动载荷, 根据测量的气动载荷求解外挂物运动方程, 得到外挂物在下一时刻的位置和姿态, 控制六自由度运动机构到达相应的位置和姿态, 再根据气动载荷获得下一时刻的位置和姿态, 如此往复的测量和计算, 逐点获得外挂物运动轨迹<sup>[2]</sup>。因此, 捕获轨迹试验的核心是六自由度运动机构的设计和控制<sup>[3]</sup>。六自由度运动机构由 3 个线位移和 3 个角位移组成, 从结构上可分为并联机构和串联机构, 结构形式由安装空间和控制的复杂度决定<sup>[4]</sup>。

本文分析了一种串联结构的六自由度运动机构位置关系和速度关系, 结合机构特点, 对其控制方法进行研究。

## 1 系统总体方案

六自由度运动机构可以在风洞试验段内实现前后 (X)、上下 (Y)、左右 (Z) 3 个方向的线位移运动和俯仰 ( $\alpha$ )、偏航 ( $\beta$ )、滚转 ( $\gamma$ ) 3 个方向的角位移运动试验装置。能够在计算机控制下实现给定速度控制和精确定位控制。

根据风洞结构和试验要求, 该六自由度试验装置的总体结构如图 1 所示。

角位移部件实现 3 个角度变化, 通常称为三转角头, 下方的支撑平台实现 3 个位移变化, 称为移测架。该装置采用串联结构, 之下而上以依次为 Z 向、Y 向、X 向、偏航  $\beta$ 、俯仰  $\alpha$ 、滚转  $\gamma$ 。Z 向、Y 向、X 向机构采用丝杠螺母传动, 将电机角位移转换为线位移。偏航  $\beta$ 、俯仰  $\alpha$  采用电动缸串联布置的轴叉式结构, 由电动缸驱动角度旋转机构沿旋转轴旋转, 以实现角度的偏转, 角度编码器布置在旋转轴上, 测量的角度即为机构的实际角度。滚转  $\gamma$  机构由直流伺服电机搭配谐波齿轮减速器驱动模型支杆实现转动,

收稿日期: 2018-05-13; 修回日期: 2018-06-02。

作者简介: 车兵辉(1982-), 男, 陕西眉县人, 工程师, 主要从事低速风洞测控技术方向的研究。

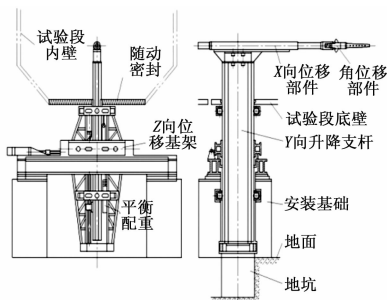


图 1 六自由度装置总体结构

环形角度编码器布置在  $\gamma$  机构外圈, 测量的角度即为机构的实际滚转角。三转角头机构如图 2 所示。该种结构的优点是装置外形尺寸小, 传动间隙小, 3 个角度运动相互独立, 无运动耦合<sup>[5]</sup>。

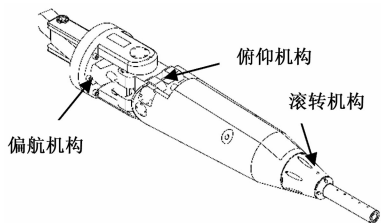


图 2 三转角头结构

## 2 运动学分析

该六自由度机构 3 个线位移均为线性传动结构, 通过直接控制电机的转角, 经由丝杠传动机构将角位移转换为线位移, 实现位移的控制。偏航  $\beta$ 、俯仰  $\alpha$  不是通过电机直接驱动的, 而是通过控制电动缸的位移, 经由电动缸螺母推动转轴旋转, 间接实现角度变化, 因此必须分析电动缸位移与角度的关系, 通过角度计算电动缸位移, 再控制电动缸位移变化, 实现角度控制。

### 2.1 运动学建模

由于偏航  $\beta$ 、俯仰  $\alpha$  传动结构原理相同, 下面以俯仰  $\alpha$  为例分析电动缸位移和角度传动关系。迎角机构简化后, 其几何关系示意图如图 3 所示, 实线表示迎角为零位时各部分的位置, 虚线为电动缸伸长移动  $s$  距离迎角转动  $\alpha$  后的位置, 规定电动缸伸长方向为正。

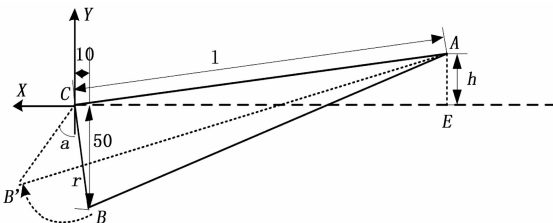


图 3 俯仰机构原理

建立以俯仰装置旋转轴在垂直平面上的投影  $C$  为原点, 两坐标轴分别与六自由度装置坐标系的轴向、纵向坐标轴平行的局部坐标系。俯仰装置在零位时, 电动缸两个端点分别记为  $A$ 、 $B$ 。其中  $A$  点位置固定不变, 电动缸可绕  $A$  点转动,  $B$  为关节连接端,  $B$  点位置可变。 $C$  为角度旋转中

心,  $E$  为固定点  $A$  在中心线上的投影, 由图 4 可知,  $A$  的坐标值为  $(-\sqrt{l^2-h^2}, h)$ ,  $B$  的坐标值为  $(-10, -50)$ ,  $A$ 、 $B$  间的距离为电动缸的长度, 可得:

$$AB = \sqrt{(-10 + \sqrt{l^2-h^2})^2 + (-50-h)^2} \quad (1)$$

其中:  $h$  为固定点  $A$  到中心线的距离,  $l$  为旋转中心到固定连接端的距离,  $r$  为角度旋转半径,  $h=12 \text{ mm}$ 、 $l=325.22 \text{ mm}$ 、 $r=50.99 \text{ mm}$ 。当俯仰装置旋转  $\alpha$  角度后,  $B$  移动到  $B'$ ,  $B'$  的坐标值为  $(r \cdot \sin(\alpha - \arcsin(10/50)), r \cdot \cos(\alpha - \arcsin(10/50)))$ ,  $A$ 、 $B'$  之间的距离为旋转  $\alpha$  角度后电动缸的长度, 可得:

$$AB' = \sqrt{(r \times \sin(\alpha - \arcsin(\frac{10}{50})) + \sqrt{l^2-h^2})^2 + (r \times \cos(\alpha - \arcsin(\frac{10}{50})) - h)^2} \quad (2)$$

电动缸长度的变化量为:

$$\Delta s(t) = AB' - AB \quad (3)$$

将机构参数带入式 (1) ~ (3) 可得电动缸变化量与俯仰角  $\alpha$  的关系式为:

$$\Delta s(t) = \sqrt{108368.02585 - 33165.9356 \cos(80.8 + \alpha(t))} - 321.0327 \quad (4)$$

电动缸变化量  $\Delta s(t)$  与俯仰角  $\alpha$  的关系如图 4 所示。

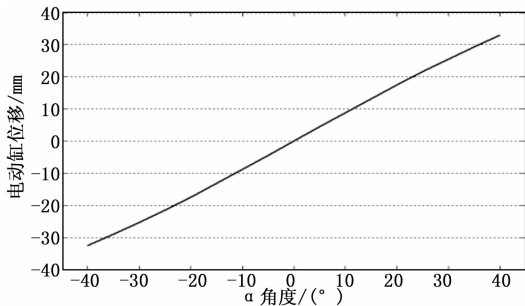


图 4 电动缸位移与俯仰角  $\alpha$  的关系

将式 (4) 两边求导可得角速度和丝杠速度关系:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{-65794.33 \times \sin(80.8 + \alpha(t))}{\sqrt{107498.2345 - 33029.28 \times \cos(80.8 + \alpha(t))}} \times \frac{d\alpha}{dt} \quad (5)$$

取角速度为  $4^\circ/\text{s}$  时, 电动缸速度和角度的关系如图 5 所示。

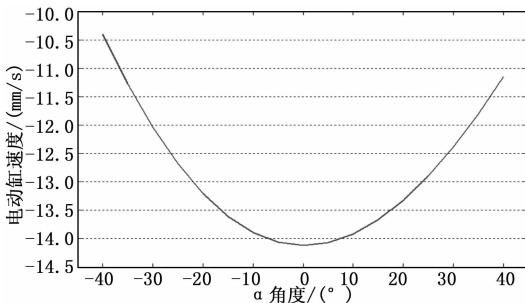


图 5 电动缸速度与俯仰角  $\alpha$  的关系

由角度和电动缸变化量之间的关系可知, 两者之间的

关系是一个非线性结构, 电动缸的速度随着角度的变化而变化。为此, 在进行角度控制时, 需根据角度位置和角度速度来确定电动缸的位移和速度, 且当角度的位置和速度变化后, 对电动缸的速度和位移也应进行调整, 以保证角速度不变。

### 2.2 运动关系分析

根据装置的结构, 设定三自由度转角头的偏航关节处为基点  $O$ , 俯仰关节处为中继点  $A$ , 滚转关节处为中继点  $B$ , 采用  $Z$  型支杆时模型中心基点为  $C$ , 绘制传动原理图, 见图 6。

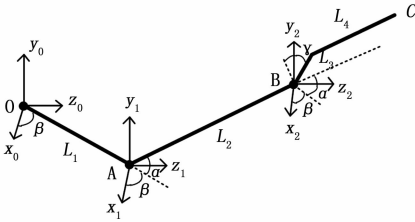


图 6 角度与线位移的传动原理

根据三自由度转角头装置的传动原理图, 建立该装置的动力学方程, 得到俯仰关节处  $A$  点、滚转关节处  $B$  点和模型中心点  $C$  的位置方程:

$$A: (l_1 \cos\beta, 0, l_1 \sin\beta) \quad (6)$$

$$B: (l_1 \cos\beta + l_2 \cos\alpha \cos\beta, l_2 \cos\beta \sin\alpha, l_1 \sin\beta + l_2 \cos\alpha \sin\beta) \quad (7)$$

$$C: (l_1 \cos\beta + (l_2 + l_4) \cos\alpha \cos\beta + l_3 \sin\beta \sin\gamma - l_3 \sin\alpha \cos\beta \cos\gamma - l_1 - l_2 - l_4, (l_2 + l_4) \cos\beta \sin\alpha + l_3 \cos\alpha \cos\gamma - l_3 \cdot l_1 \sin\beta + (l_2 + l_4) \cos\alpha \sin\beta - l_3 \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - l_3 \cos\beta \sin\gamma) \quad (8)$$

从  $C$  点的坐标可知, 当模型的姿态角发生变化时, 模型的位置也发生了变化, 而在试验中, 只变化模型姿态角时模型位置应保持不变, 因此在模型姿态角变化时, 线位移必须进行补偿, 保证模型中心位置不发生变化, 线位移的补偿量为角度变化后模型中心坐标值取反。对式 (8) 求导, 可得补偿速度为:

$$\Delta V_x = [- (l_2 + l_4) \sin\alpha \cos\beta - l_3 \cos\alpha \cos\beta \cos\gamma] \frac{d\alpha}{dt} + [l_3 \cos\beta \sin\gamma + l_3 \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - (l_2 + l_4) \cos\alpha \sin\beta - l_1 \sin\beta] \frac{d\beta}{dt} + [l_3 \sin\beta \cos\gamma + l_3 \sin\alpha \cos\beta \sin\gamma] \frac{d\gamma}{dt} \quad (9)$$

$$\Delta V_y = [(l_2 + l_4) \cos\alpha \cos\beta - l_3 \sin\alpha \cos\gamma] \frac{d\alpha}{dt} - (l_2 + l_4) \sin\alpha \sin\beta \frac{d\beta}{dt} - l_3 \cos\alpha \sin\gamma \frac{d\gamma}{dt} \quad (10)$$

$$\Delta V_z = [- (l_2 + l_4) \sin\alpha \sin\beta - l_3 \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma] \frac{d\alpha}{dt} + [(l_2 + l_4) \cos\alpha \cos\beta + l_1 \cos\beta - l_3 \sin\alpha \cos\beta \cos\gamma + l_3 \sin\beta \sin\gamma] \frac{d\beta}{dt} + [l_3 \sin\beta \sin\gamma - l_3 \cos\beta \cos\gamma] \frac{d\gamma}{dt} \quad (11)$$

在运动过程中要保持模型位置不变, 线位移的运动速度应随着角度的变化而变化。通过以上分析可知, 偏航  $\beta$ 、

俯仰  $\alpha$ 、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的控制过程可分为两个阶段, 一是运动过程中为速度控制, 二是接近目标点时为定位控制。

## 3 控制方法研究

### 3.1 偏航 $\beta$ 、俯仰 $\alpha$ 匀速控制方法

由传动原理可知, 偏航  $\beta$ 、俯仰  $\alpha$  是控制电动缸位移来间接实现角度控制的, 且两者之间的关系是非线性的。为了实现角度的匀速运动, 将角度假想为一个虚拟旋转轴<sup>[6]</sup>, 令虚拟轴按照匀速速度曲线运行, 根据角度的给定速度按照式 (5) 计算电动缸位移的运行速度, 根据角度的给定目标值按照式 (4) 计算电动缸位移, 控制电动缸按照该速度运行就可实现迎角的匀速运动, 并在接近目标点时, 按照电动缸位移进行定位控制。

为了保证机构运行平稳, 可将运动过程分为 3 个阶段, 既加速阶段、匀速阶段、减速阶段。按照加减速阶段的速度曲线又可分为线性加减速和非线性加减速, 典型的速度曲线有梯形和 S 形<sup>[7]</sup>。

本文采用梯形加减速曲线作为角度运动过程, 如图 7 (a) 所示。设加速度和减速度均为  $a$ , 匀速速度为  $V_m$ , 运动距离为  $S$ , 当前位置为  $S(t)$ , 当前时间为  $t$ , 当前速度  $V$ 。

当运动距离  $S < V_m^2/a$  时, 没有匀速过程, 只有加减速过程, 速度曲线为三角形, 如图 7 (b) 所示。

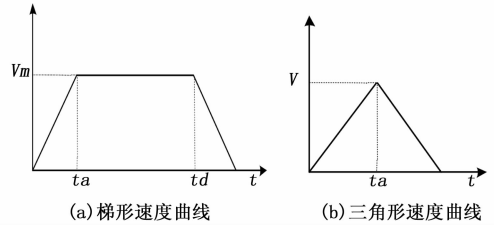


图 7 速度曲线

当  $S(t) \leq S/2$  时为加速过程,  $V = at$ ;

当  $S/2 < S(t) \leq S$  时为减速过程,  $V = a \sqrt{S/a} - a(t - \sqrt{S/a})$ ;

当运动距离  $S > V_m^2/a$  时, 速度曲线为标准的梯形曲线。

当  $S(t) < V_m^2/2a$  时为加速过程,  $V = at$ ;

当  $V_m^2/2a \leq S(t) < S - V_m^2/2a$  时为匀速运动过程,  $V = V_m$ ;

当  $S - V_m^2/2a \leq S(t) \leq S$  时为减速过程,  $V = V_m - a(t - S/V)$ 。

根据以上分析, 已知给定加减速速度、最大速度、运动距离, 就可计算出每时刻的运动速度, 按照角度和电动缸的速度关系函数就可计算出电动缸的运行速度, 按照采样间隔不断的刷新当前速度, 即可实现角度的匀速运动。

根据角度速度曲线计算电动缸速度曲线如图 8 所示。

将角度匀速控制问题转化为电动缸跟随角度的随动控制问题。控制流程如图 9 所示。

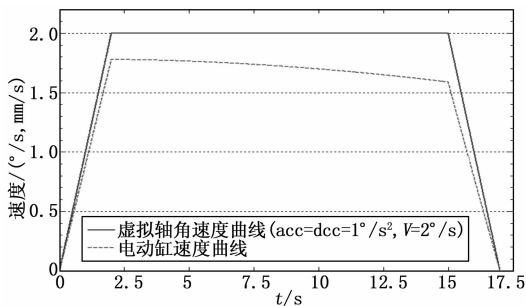


图 8 虚拟轴和电动缸速度曲线

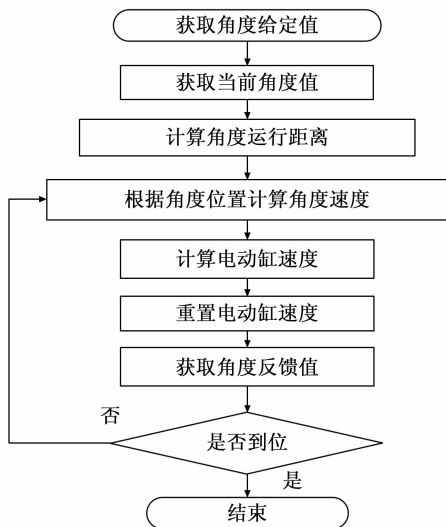


图 9 角度控制流程

控制的具体过程如下:

- 1) 根据角度给定值和当前值计算角度运行距离;
- 2) 根据角度位置、给定加减速度、匀速速度, 计算当前角度瞬时速度。
- 3) 根据角度瞬时速度, 按照式 (5) 计算出电动缸当前位置的瞬时速度;
- 4) 根据计算出的电动缸瞬时速度, 重置电动缸控制速度;
- 5) 读取角度反馈值, 与给定值比较, 判断是否到达目标值;
- 6) 不断重复 2) ~ 5), 直至达到角度最终目标值, 结束本次控制过程。

### 3.2 六自由度联动控制方法

在捕获轨迹试验过程中要求对模型姿态和位置同时控制, 既有角度控制又有位置控制, 为了真实模拟模型运动轨迹, 6 个自由度需要联动控制。从各轴的位置关系分析可知, 各自由度之间相互独立, 为了保证模型在运动过程中处于运动轨迹上, 在角度变化时, 模型位置要同时运动, 且位置要补偿角度变化造成的位置偏差。此时的位置运动距离有两部分组成, 一部分是位置目标值, 另一部分是位置补偿值, 可用下式表示:

$$S_{\text{距离}} = S_{\text{目标}} + S_{\text{补偿}} \quad (12)$$

其中:  $S_{\text{距离}}$  为线位移运动距离, 是线位移的控制量,  $S_{\text{目标}}$  为模型位置坐标给定值, 且按照匀速运动,  $S_{\text{补偿}}$  为线位移的补偿量, 由式 (8) 确定, 随着角度的变化而变化, 且运行速度也和角速度、角度值有关。

线位移的运行速度可表示为:

$$V_{\text{控制}} = V_{\text{给定}} + V_{\text{补偿}} \quad (13)$$

其中:  $V_{\text{控制}}$  为线位移的控制速度,  $V_{\text{给定}}$  为模型位置运动速度,  $V_{\text{补偿}}$  为线位移的补偿速度, 随着角度的变化而变化, 和角速度、角度值有关, 由式 (9) ~ (11) 确定。

六轴联动控制流程如图 10 所示。

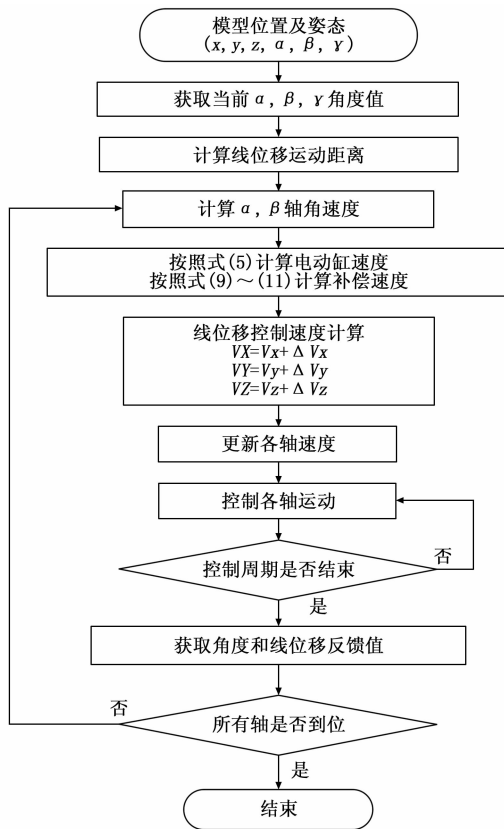


图 10 六轴联动控制流程

控制的具体过程如下:

- 1) 获取模型位置和姿态运动目标值;
- 2) 获取模型姿态当前值, 用于计算模型位置的补偿量和补偿速度;
- 3) 按照式 (8) 计算位置补偿量, 按照式 (12) 计算位置运动距离;
- 4) 根据  $\alpha$ 、 $\beta$  运动距离, 按照梯形速度曲线计算当前角度速度, 根据式 (5) 计算电动缸运行速度;
- 5) 根据式 (9) ~ (11)、(13) 计算线位移的补偿速度和线位移控制速度;
- 6) 向各轴控制器发送速度控制指令, 控制各轴按照给定速度指令运动;
- 7) 控制周期未结束, 则继续按照当前速度运动, 控制周期结束, 判断各轴位置是否到位, 若未到位, 则获取当

前线位移和角位移当前值;

8) 不断重复 4) ~7), 直至达到位置和角度最终目标值, 结束本次运动过程。

#### 4 控制系统实现

控制系统主要由主控计算机、运动控制系统、伺服驱动系统、安全保护装置等组成。系统采用“运动控制计算机+网络型运动控制器”的控制方式, 两者之间采用工业以太网进行通讯, 运动控制器控制指令采用脉冲方向信号, 系统结构如图 11 所示。3 个线位移采用交流伺服电机驱动的丝杠螺母机构+编码器反馈的半闭环控制结构实现。角位移采用双闭环控制, 电机编码器反馈运动速度和电动缸位移至驱动器, 构成速度环, 角位移采用角度编码器, 直接测量角度值, 反馈至计算机构成角度闭环控制<sup>[8-10]</sup>。以上位运动控制计算机作为控制中心, 实现速度计算、角度闭环控制、位置设定和显示、回零控制等功能。控制器实现使能控制、抱闸控制、限位等安全保护功能。

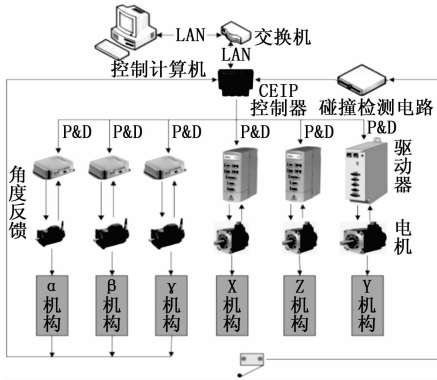


图 11 控制系统总体结构

伺服系统选用以色列 Elmo 公司的紧凑型和高智能直流伺服驱动器, 角位移选用 MAXON 公司 RE40 系列直流有刷伺服电机驱动, 线位移选用三菱交流伺服电机驱动。

控制器选用 COMIZOA 网络型运动控制器, 该控制器为模块化设计, 可构成基于 TCP/IP 的分布式控制系统。以 DSP 为核心, 系统集成度高、接口简单、开放性好, 能实现位置控制, 多轴同步等。

控制软件是基于 PC 机运行的上位机控制软件, 采用 LabWindows/CVI 开发环境, 通过以太网通讯访问 COMIZOA 运动控制器, 协调三转角系统、线位移系统的运动。同时可与风洞测控处系统试验管理机进行通信, 接受试验管理机的指令, 以实现整个风洞试验过程的自动化。系统具有单轴点对点、多轴联动等多种位置或速度运动模式, 协调控制六自由度完成试验运行流程。

#### 5 实验验证

为了检验上述控制方法的控制效果, 采用高精度倾斜仪(精度为 $1''$ )对偏航 $\beta$ 、俯仰 $\alpha$ 角度轴的实际运行角度进行测量, 并与名义角进行比较, 考核其角度定位精度。控制误差如图 12 所示。

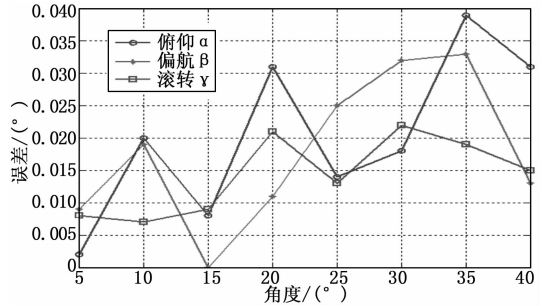


图 12 角度控制误差

控制系统按照角度匀速控制方法, 控制角度到目标位置, 然后读取倾斜仪测量读数。结果表明, 俯仰 $\alpha$ 角度控制最大误差为 $0.039^\circ$ , 偏航 $\beta$ 角度控制最大误差为 $0.033^\circ$ , 且两者控制误差都随着角度的增大而增大的趋势, 这可能是由于机构安装误差或机构变形所致。从整个机构运动范围而言, 所有角度控制精度都达到或超过了试验要求指标( $0.05^\circ$ ), 能够满足试验要求。

#### 6 结论

本文针对风洞 CTS 试验六自由度机构, 通过分析偏航 $\beta$ 、俯仰 $\alpha$ 轴的传动关系, 根据非线性传动关系的特点采用了基于虚拟轴的跟随控制, 实现了角度的匀速控制。为了满足试验要求, 定量分析了角度与线位移的运动关系, 在此基础上, 采用速度实时补偿的速度控制方法实现了 6 个自由度联动控制。采用高性能控制器和驱动器构成伺服控制系统, 采用 LabWindows/CVI 开发环境实现了角度匀速控制和六轴联动控制算法。实验验证结果表明, 角度控制精度都达到或超过了设计指标, 能够满足试验要求。

#### 参考文献:

- [1] 张威, 谭卫娟, 张祖庚. 捕获外挂分离轨迹的显示技术[J]. 飞机工程, 2007 (2).
- [2] 李周复. 风洞特种试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
- [3] 谭兴强, 谢志江, 岳茂雄. CTS 实验六自由度机械手快速跟踪插补控制方法研究[J]. 现代科学仪器, 2012 (3): 25-29.
- [4] 周润, 黄叙辉, 高荣钊, 等. 风洞 CTS 试验并联装置的速度控制方法[J]. 兵工自动化, 2017, 36 (4): 63-68.
- [5] 魏然, 车兵辉, 等. 用于捕获轨迹风洞试验的三自由度转头设计[J]. 实验流体力学, 2016, 30 (6): 91-97.
- [6] 褚卫华, 顾正华. 4 m×3 m 低速风洞大迎角装置运动关系分析与多轴联动控制策略[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (3): 671-674.
- [7] 杨鹏程, 佃松宜. 多轴协调运动控制在某连续式风洞应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (9): 3029-3034.
- [8] 杨海滨, 张伟, 夏洪亚. 某高超声速风洞五自由度机构控制系统研制[J]. 四川兵工学报, 2015, 36 (1): 102-105.
- [9] 李平, 黄叙辉, 周润, 等. 2 m×2 m 超声速风洞 CTS 测控系统研制[J]. 实验流体力学, 2015, 29 (4): 95-100.
- [10] 祝汝松, 王海, 王飞, 等. 捕获轨迹机构连续同步控制试验方式研究[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36 (10): 2053-2059.