

doi: 10.7690/bgzdh.2025.08.009

# 风洞模型尾撑控制系统设计与研究

罗 强

(中国空气动力研究与发展中心设备设计与测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为保证支撑装置在实现迎角  $\alpha$  和侧滑角  $\beta$  精确定位过程中, 按照要求的角速度匀速转动, 并保证在转动过程中模型中心不偏离风洞轴线, 对迎角  $\alpha$  机构、侧滑角  $\beta$  机构、Y 向升降机构速度和位置运动关系进行数学分析。进行复杂运动的详细解算, 对多轴联动速度和位置控制方法进行深入研究, 采用控制虚拟主轴。结果表明:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、Y 机构位置随动的方法, 实现了迎角  $\alpha$ 、侧滑角  $\beta$  和 Y 向机构的高精度速度和位置控制, 精度均控制在  $0.02^\circ$  和 2 mm 以内, 满足设计要求。

**关键词:** 风洞; 尾撑; 运动控制; 运动关系; 多轴联动

中图分类号: TP27 文献标志码: A

## Design and Research of Wind Tunnel Model Tail Support Control System

Luo Qiang

(Facility Design and Measurement Technology Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to ensure that the support device rotates at the required angular velocity in the process of realizing the precise positioning of the angle of attack  $\alpha$  and the angle of sideslip  $\beta$ , and to ensure that the center of the model does not deviate from the axis of the wind tunnel in the process of rotation, the mathematical analysis of the speed and position motion relationship of the angle of attack  $\alpha$  mechanism, the angle of sideslip  $\beta$  mechanism and the Y-direction lifting mechanism is carried out. The complex motion is calculated in detail, and the multi-axis linkage speed and position control method is studied in depth. The virtual spindle is controlled. The results show that the method of  $\alpha$ ,  $\beta$ , Y mechanism position follow-up realizes the high-precision speed and position control of angle of attack  $\alpha$ , sideslip angle  $\beta$  and Y mechanism, and the accuracy is controlled within  $0.02^\circ$  and 2 mm. Meet the design requirements.

**Keywords:** wind tunnel; tail support; motion control; motion relationship; multi-axis linkage

## 0 引言

风洞模型姿态角控制精准度对优良模型试验数据的获取至关重要。文献[1]表明, 模型试验误差大多可以追溯至模型姿态误差。模型俯仰角  $\alpha$  与模型偏航角  $\beta$  是最重要的 2 个模型姿态角, 长期以来, 技术人员设计了不同形式的机械结构和控制方法以实现模型  $\alpha$ 、 $\beta$  控制, 但常规控制方法中, 大多是实现  $\alpha$  或  $\beta$  的单自由度控制。对于同步控制来讲, 需依赖于大量复杂的数学运算, 实施比较困难, 而且角度定位控制精度大多达不到先进指标要求, 最为重要的模型安全保护问题也未有明确涉及<sup>[2]</sup>。

笔者为风洞研制的这套新型尾撑控制系统设计了一种多自由度模型支撑机构同步运动控制方法, 实现了对模型俯仰角与偏航角的同步精确、安全、高效控制。

## 1 尾撑控制系统的基本要求

该尾撑系统位于高速试验段内, 采用立板上下

伸缩的机构方案, 由迎角机构和侧滑角机构和 Y 向机构组成。迎角机构采用 TPM 机电一体作动器驱动滚珠丝杠螺母副实现迎角运动。侧滑角机构位于迎角机构后方, 由 2 套摇臂机构共同实现侧滑角运动。采用一体化行星滚柱电动缸驱动, 缸内集成的角度编码器反馈电机旋转角度。变角度机构安装于 Y 向机构的立板之上, 可通过螺旋升降机驱动完成上下运动, 实现改变迎角后模型参考点的 Y 向位置补偿。总体结构如图 1 所示。

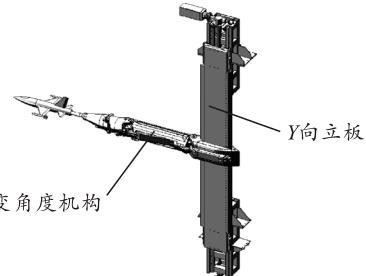


图 1 尾撑结构

整个系统为四轴位置闭环伺服系统, 四轴之

收稿日期: 2024-09-09; 修回日期: 2024-10-19

第一作者: 罗 强(1976—), 男, 四川人, 硕士。

间存在运动耦合, 需同步控制。其设计技术要求如表 1 所示。

表 1 风洞尾撑系统的主要技术指标

控制范围	机械精度/ (°)	控制精度/ (°)	控制速度/ ((°)/s)
俯仰角/(°)-15~35	± 0.02	± 0.02	1
偏航角/(°)-30~30	± 0.05(前 $\beta$ ) ± 0.025(后 $\beta$ )	± 0.02	1
滚转角/(°)0~360	-	-	手动

## 2 控制系统组成及运动关系分析

### 2.1 系统总体组成

风洞模型尾撑控制系统总体组成如图 2 所示, 主要包括控制柜(包括 PLC、人机界面、运动控制单元以及电源、继电器、空气开关等附件)、手操器、4 套交流伺服放大器与伺服电机等设备。其中 PLC 部分由 317T-CPU 模块、数字量输出/输入模块、伺服驱动系统接口模块等组成, 其中由于迎角  $\alpha$  和 Y 向升降机构、前后侧滑角  $\beta$  机构在运动过程中具有严格的速度和位置同步要求, 则选用功能强大的 T-CPU 来实现运动控制。

采用上位控制计算机为用户提供操作界面, 实现对迎角机构、侧滑角机构和升降机构的远程控制, 并实时显示各机构运动状态和伺服驱动器的工作情况。PLC 将各机构运动状态和驱动器运行情况等数据通过工业以太网传输给上位计算机, 上位机将控制指令通过工业以太网 Profinet 传输给 PLC。PLC 接到控制指令后会按照相应的控制策略通过运动控制单元进行速度控制或位置控制<sup>[3~5]</sup>。

### 2.2 机构运动关系分析

#### 2.2.1 迎角 $\alpha$ 与 Y 向机构运动关系分析

迎角机构简化后, 其几何关系如图 3 所示。

$$l = \sqrt{304.138^2 + 224.555^2 - 2 \times 304.138 \times 224.555 \times \cos(34.772^\circ + \alpha) - 175.285} \quad (1)$$

分别对式(1)两边求导, 则求得丝杠移动速度与

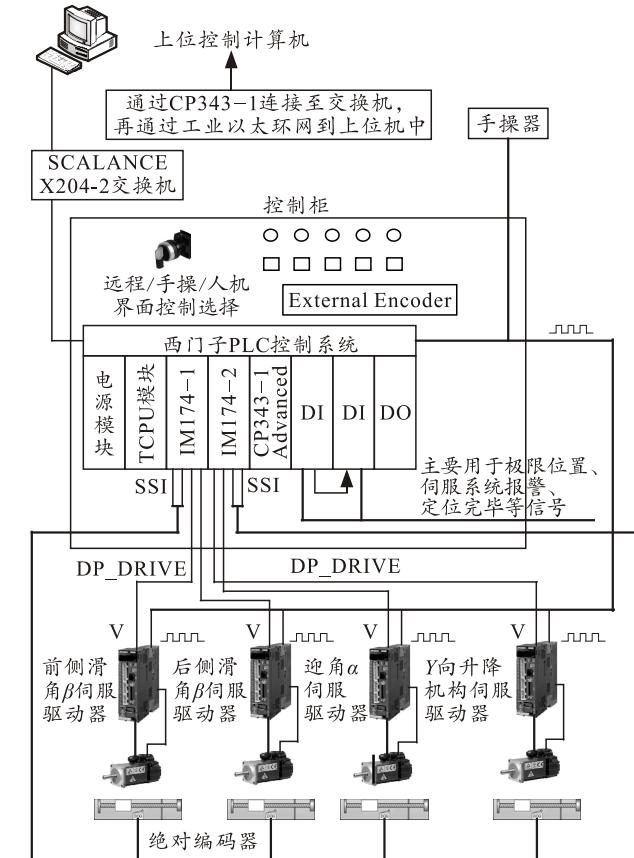


图 2 控制系统

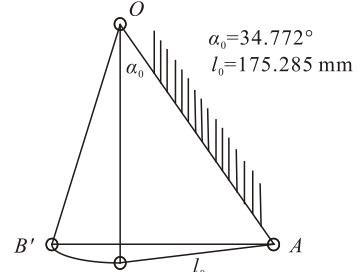


图 3 迎角机构理论尺寸

规定丝杠顺时针移动方向为正,  $\alpha$  增大为正, 则  $\alpha$  与  $l$  的关系如式(1)和图 4 所示。

迎角角速度之间的关系如式(2)和图 5 所示。

$$\frac{dl}{dt} = \frac{304.138 \times 224.555 \times \sin(34.772^\circ + \alpha)}{\sqrt{304.138^2 + 224.555^2 - 2 \times 304.138 \times 224.555 \times \cos(34.772^\circ + \alpha)}} \frac{d\alpha}{dt} \quad (2)$$

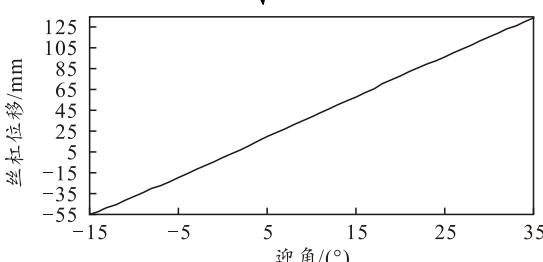


图 4 迎角与丝杠位移之间关系

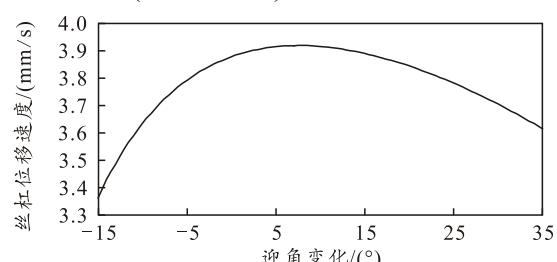


图 5 迎角与丝杠之间的速度关系

### 2.2.2 前后侧滑角机构运动关系分析

前侧滑角  $\beta_1$  从  $-60^\circ \sim 60^\circ$  的变化过程中, 后侧滑角  $\beta_2$  从  $-30^\circ \sim 30^\circ$  变化。由于  $\beta_1$  的大小由丝杠位移  $l_1$  决定, 它们之间的关系为式(3), 前侧滑角与丝杠的位移关系如图 6 所示。

$$\beta_1 = \arccos((160.078^2 + 950.842^2 - (962.521 + l_1)^2) / (2 \times 160.078 \times 950.842)) - 89.379^\circ \quad (3)$$

分别求导, 得到前侧滑角与丝杠的速度关系如式(4)和图 7 所示。

$$\frac{dl_1}{dt} = \frac{160.078 \times 950.842 \times \sin(\beta_1 + 89.379^\circ)}{\sqrt{160.078^2 + 950.842^2 - 2 \times 160.078 \times 950.842 \cos(89.379^\circ + \beta_1)}} \frac{d\beta_1}{dt} \quad (4)$$

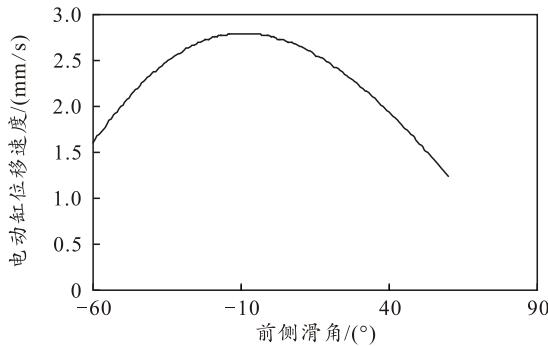


图 7 前侧滑角  $\beta_1$  与丝杠之间的速度关系

后侧滑角与丝杠的位移关系如图 8 所示。由于  $\beta_2$  的大小由丝杠  $l_2$  位移决定, 它们之间的关系为:

$$\frac{dl_2}{dt} = \frac{\sin(\beta_2 + 77.641^\circ)}{\sqrt{185^2 + 747.329^2 - 2 \times 185 \times 747.329 \times \cos(\beta_2 + 77.461^\circ)}} \frac{d\beta_2}{dt} \quad (6)$$

分别求导, 得到后侧滑角与丝杠的速度关系如图 9 所示。

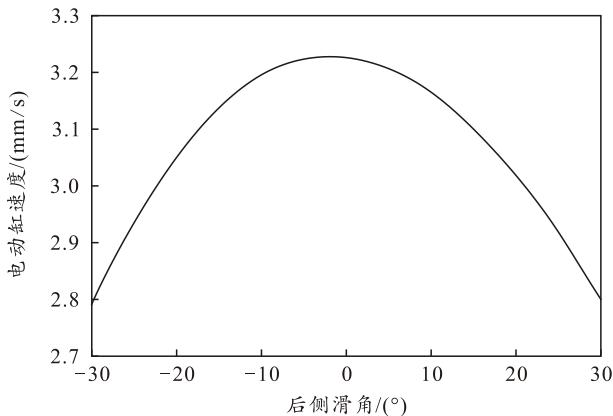


图 9 后侧滑角  $\beta_2$  与丝杠之间的速度关系

侧滑角与前后侧滑角之间关系:

$$\beta = \beta_1 - \beta_2 \quad (7)$$

由  $d\beta_1=0.02^\circ$ ,  $\alpha=0$  时, 要保证侧滑角  $0.05^\circ$  的精度指标, 极限情况下, 前侧滑电动缸的定位精度需达到  $0.055$  mm。由  $d\beta_2=0.02^\circ$ , 可推算出对后侧

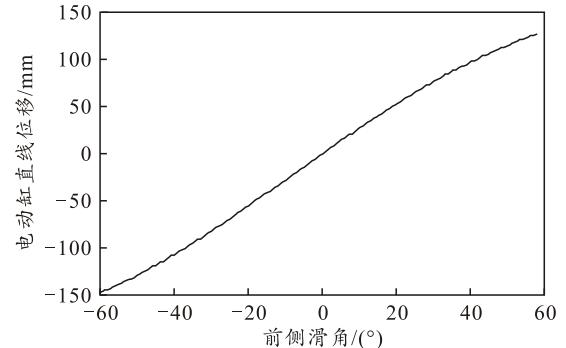


图 6 前侧滑角  $\beta_1$  与丝杠之间的位移关系

$$\beta_2 = \arccos((185^2 + 747.329^2 - (730.428 + l_2)^2) / (2 \times 185 \times 747.329)) - 77.641^\circ \quad (5)$$

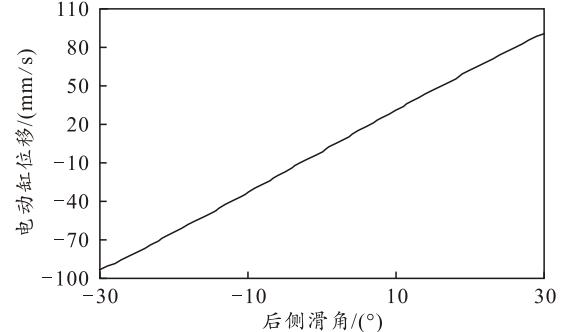


图 8 后侧滑角  $\beta_2$  与丝杠之间的位移关系

滑电动缸定位精度的要求, 约为  $0.065$  mm。

### 3 控制方法与控制策略

从以上分析看, 如果按照以上运动关系进行控制, 不仅运算复杂, 各自由度直线运行位移与目标角度间相互转换需要大量的数学推算, 而且不可避免会增大机构的加工、安装误差及计算误差, 降低控制精度。另外, 同步控制也不易实现, 且同步性不好。笔者设计的风洞模型尾撑机构同步运动控制方法包括: 建立机构支撑模型俯仰角、偏航角目标位置、速度与实际机构各自由度运动参数的映射关系; 利用实际测试值进行数据拟合, 简化数学推导过程, 优化机构各自由度运动控制精度; 利用机构各自由度轴的同步协调运动, 进行机构支撑模型的定位控制; 利用机构各自由度轴实时反馈参数, 进行支撑模型运动保护, 进而实现模型俯仰角与偏航角的同步协调控制, 提高控制精度、提升运行效率与可靠性<sup>[6]</sup>。

### 3.1 以虚拟轴为主轴的匀速变迎角控制方法

在多轴联动过程中, 侧滑角  $\beta=0^\circ$  时, 迎角  $\alpha$  丝杠机构、 $Y$  向升降机构的位置和运动速度关系都是随迎角  $\alpha$  变化而变化的。迎角  $\alpha$  是整个支撑系统的控制核心和控制主轴, 控制的首要任务就是实现迎角  $\alpha$  的匀速变化和准确定位。迎角  $\alpha$  定位过程不是靠电机驱动旋转轴直接实现的, 而是通过丝杠驱动实现迎角运动与定位。迎角  $\alpha$  与丝杠速度和位置是非线性关系, 必须通过控制丝杠严格按照式(1)和(2)才能实现迎角  $\alpha$  的精确定位和匀速变化, 这种非线性速度控制的实现是非常困难的<sup>[7]</sup>。通过深入分析, 提出了建立虚拟  $\alpha$  旋转轴的方法。在控制算法中, 建立一个假想的虚拟  $\alpha$  旋转轴, 同时建立  $\alpha$  丝杠机构与  $\alpha$  角度的凸轮曲线关系,  $Y$  向机构与  $\alpha$  角度的凸轮曲线关系。控制虚拟轴严格按照  $\alpha$  目标角速度旋转, 控制  $\alpha$  丝杠和  $Y$  向机构严格按照凸轮关系进行位置随动, 实现了多轴联动过程的非线性速度和位置联动。这样非线性速度控制就变成了位置随动控制, 从而大大简化了运算过程和提高了精度<sup>[8]</sup>。试验中, 迎角  $\alpha$  从  $-15^\circ$  到  $+35^\circ$  运动时, 各轴联动试验模型中心偏离风洞中心距离如图 10 所示。

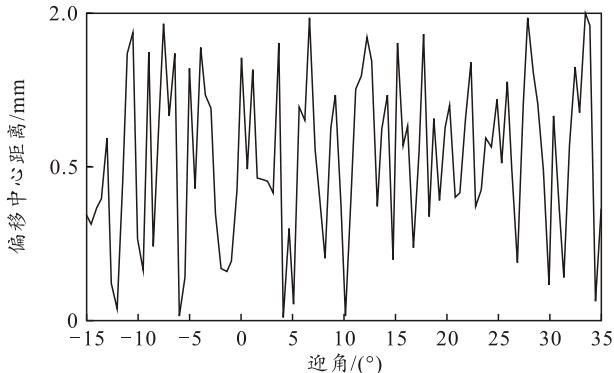


图 10 迎角运动时模型中心偏离风洞轴心距离

### 3.2 以虚拟 $\alpha$ 旋转轴为主轴的多轴随动控制策略

为维持  $\beta$  为一个不为 0 的常值角度, 除了  $\alpha$  机构与  $Y$  向机构联动实现  $\alpha$  角度变化外, 前后  $\beta$  也需跟随作补偿运动, 四轴作复合运动。虚拟  $\alpha$  旋转轴以迎角要求的理想角速度转动, 并在目标位置进行精确定位。在虚拟轴旋转过程中, 根据虚拟轴与迎角  $\alpha$  丝杠机构、 $Y$  向升降机构、前后侧滑角  $\beta$  机构的位置和运动速度关系, 不断计算出各机构的动态目标位置, 然后控制各轴实现以虚拟  $\alpha$  旋转轴为主轴的迎角  $\alpha$  丝杠机构、 $Y$  向升降机构、前侧滑角  $\beta$  机构位置随动<sup>[9]</sup>。多轴位置随动计算如图 11 所示。

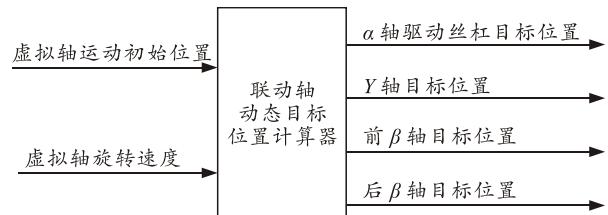


图 11 多轴联动随动目标动态计算

## 4 测试结果及分析

尾撑迎角精度如图 12 所示, 偏差小于  $0.01^\circ$ , 优于设计要求。

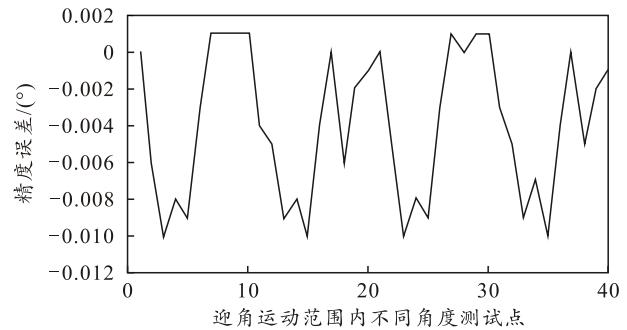


图 12 尾撑迎角精度测试数据

前侧滑角精度如图 13 所示, 大部分偏差小于  $0.015^\circ$ , 从测试结果来看, 整体偏差小于技术指标  $0.02^\circ$ , 满足设计要求。

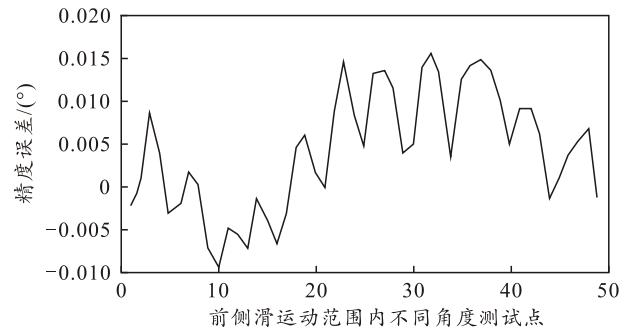


图 13 前侧滑角精度测试数据

后侧滑角精度如图 14 所示, 偏差小于  $0.015^\circ$ , 优于设计要求。因为后侧滑机构的刚度存在弱环节, 调节过渡时间比前侧滑机构长, 可以满足精度要求。

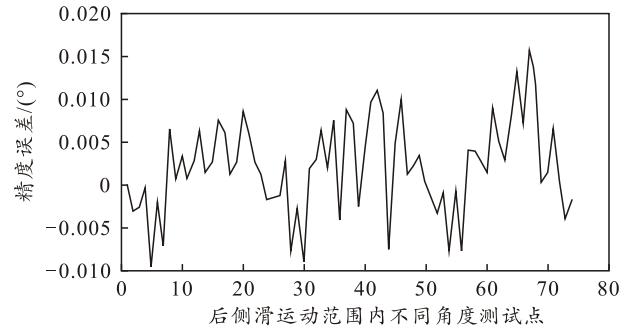


图 14 后侧滑角精度测试数据

侧滑角联动测试数据如图 15 所示, 绝大部分数据优于  $0.02^\circ$ , 有部分超出  $0.02^\circ$ , 但满足机械精度技术指标, 不影响整个机构的平稳、可靠运行。

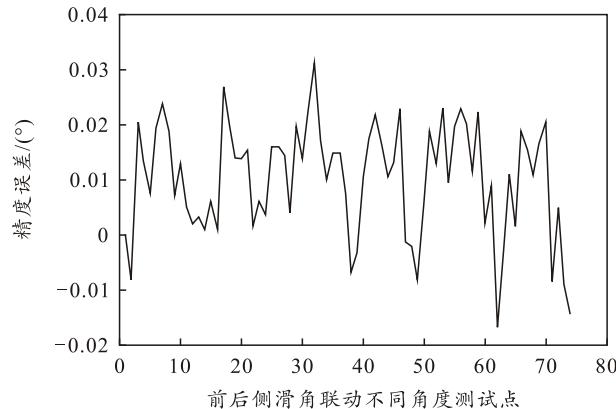


图 15 前后侧滑角联动精度测试数据

$Y$  向精度如图 16 所示, 考虑到测量绝对零位可以变更至  $-0.05$  位置, 其精度满足设计要求。

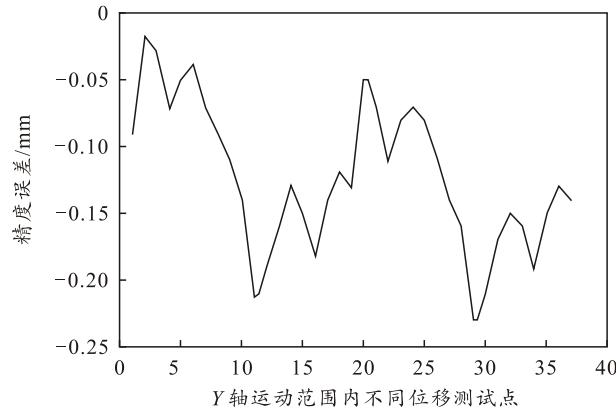


图 16  $Y$  向机构精度测试数据

## 5 结束语

风洞尾撑控制系统通过建立虚拟轴和借助实测数据进行数据拟合的方式, 省略了各自由度直线运行位移与目标角度间相互转换所需的大量数学推

算, 大大简化了运算过程。通过引入高精度测试仪器实测方式, 将各自由度实际直线位移值与其引起的实际模型姿态角变化量间建立映射, 通过插值拟合获取对应函数关系, 可大大降低机构加工、安装误差及计算误差, 提高控制精度。引入虚拟轴、电子凸轮等新的控制方式, 同步控制易于实现, 且同步性好。在机构运行过程中, 实时监测各轴运行同步性、角度变化均匀性、模型中心与风洞轴线偏移量等参数指标, 可大大降低机构发生受力不均、振动过大、触碰洞壁等事故的机率。通过对尾撑控制系统的功能、安全性和技术指标的测试表明: 该系统功能全面、安全可靠, 绝大部分指标达到或优于设计要求。

## 参考文献:

- [1] 刘彦鹏. 运动控制新技术及其应用[J]. 装备制造技术, 2009(8): 124-126.
- [2] 吴林, 谭营, 唐建. 运动控制技术发展与展望[J]. 机床与液压, 2011, 35(7): 231-233.
- [3] 田宇. 伺服与运动控制系统设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 16-18.
- [4] 吴君. 多轴运动控制系统的应用与设计[D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文, 2011: 25-42.
- [5] 樊留群. 实时以太网及运动控制总线技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009: 194.
- [6] 原继萍, 刘海亮. 数字式 PID 控制算法研究[J]. 航天控制, 2010, 28(5): 9-11.
- [7] 西门子公司. 西门子 S7-300 系统参考手册[M]. 北京: 西门子自动化与驱动集团, 2012: 10-200.
- [8] 西门子公司. STEP7 VS.1 编程手册[M]. 北京: 西门子自动化与驱动集团, 2012: 40-60.
- [9] 肖亮亮. 基于虚轴法的多轴同步运动控制系统设计[D]. 浙江: 浙江理工大学, 2009.