

doi: 10.7690/bgzdh.2023.12.018

一种异形的五自由度操作机设计

高荣钊, 吴继飞, 徐来武, 曾利权, 李玉平, 周方奇
(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对一些大型模型的风洞试验需求, 在特定风洞环境中设计五自由度操作机, 用于支撑试验模型开展风洞试验。通过分析模型的重力及气动载荷、操作机的安装及使用空间、指标要求, 采用串并联结构形式, 实现特定风洞环境中的五自由度操作机设计。有限元分析结果表明: 该操作机满足刚度、强度指标, 精度和行程满足要求, 能够实现一类模型的风洞试验需求, 具有重要价值。

关键词: 风洞; 操作机; 设计; 有限元分析

中图分类号: V211.74 **文献标志码:** A

Design of Special-shaped Manipulator with Five Degrees of Freedom

Gao Rongzhao, Wu Jifei, Xu Laiwu, Zeng Liquan, Li Yuping, Zhou Fangqi

(High Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to meet the requirements of wind tunnel test for some large-scale models, a five-degree-of-freedom manipulator should be designed in a specific wind tunnel environment to support the test model to carry out wind tunnel test. By analyzing the gravity and aerodynamic load of the model, the installation and use space of the manipulator and the index requirements, the series-parallel structure is adopted to realize the design of the five-degree-of-freedom manipulator in the specific wind tunnel environment. The results of finite element analysis show that the manipulator meets the requirements of stiffness, strength, accuracy and stroke, and can meet the requirements of wind tunnel test for a kind of model, which is of great value.

Keywords: wind tunnel; manipulator; design; finite element analysis

0 引言

2 m 自由射流风洞具有较大的试验舱, 为一些大型模型的风洞试验提供了极好的试验基础条件; 但该风洞不具备从试验舱上部安装模型装置。为满足一些模型安装在试验舱上部的需求, 需设计相应的支撑装置。该装置是五自由度操作机, 具有笛卡尔坐标系下 X (纵向)、 Y (横向)、 Z (垂向) 3 个线位移和 α (俯仰角)、 β (偏航角) 2 个角位移, 能改变模型的姿态, 具备一定的精度。

笔者基于某模型 (7 m×3 m×2 m) 进行气动试验的需求, 在试验舱上部狭小空间内, 确定的安装基座上, 采用串并联结构形式, 完成了五自由度操作机的结构设计、主要器件选型、精度分析等工作。该五自由度操作机不仅满足前述模型的试验需求, 还可作为 2 m 自由射流风洞一个基础装置, 供其他类似需求的风洞试验用, 只需要在接口和载荷等方面与之匹配就可行, 具有重要意义。

1 技术指标

技术指标如下:

俯仰角: $-4^\circ \sim 4^\circ$;

偏航角: $-3^\circ \sim 3^\circ$;

纵向行程: 0~500 mm;

横向行程: $-100 \sim 800$ mm;

垂向行程: 0~200 mm;

最大气动负载: 纵向 60 000 N、横向 60 000 N、垂向 85 000 N(向上)。

其中垂向行程是以装上模型后模型下表面为起点, 具体要求如下:

- 1) 俯仰角旋心: 模型下表面前缘中心点;
- 2) 抬头为俯仰正向, 反之为负向;
- 3) 偏航角旋心: 模型下表面流向中心线上, 距离前缘 3 m; 纵向行程沿喷管出口截面向顺气流方向;
- 4) 横向行程中轴面为起点, 向左 100 mm 向右 800 mm (面向来流观察);
- 5) 垂向行程, 喷管出口上缘以下 50 mm 为起点, 向上。

2 风洞环境条件

试验舱是所有试验模型安放与试验区域, 包括

下驻室、上舱体、大门、行吊等，舱体采用半圆形+矩形截面，壳体加强圈内置，外径 $\varphi 11\text{ m}$ ，有效使用内径 $\varphi 10\text{ m}$ ，有效使用长度 8.5 m ，总重约 910 t ，如图 1 所示。

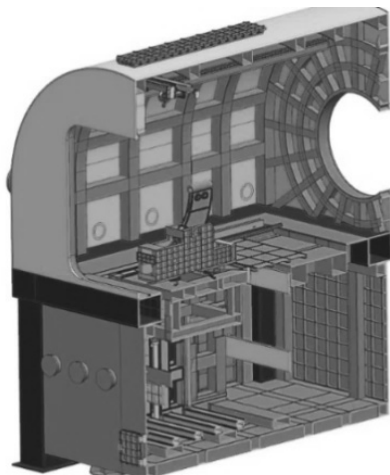


图 1 试验舱内部结构

3 总体设计

五自由度操作机的安装基础已指定，模型位置及行程范围已给定，机构自身尺寸大小和运动空间受到较大限制，横向最窄处仅 $3\ 000\text{ mm}$ ，垂向最大 $2\ 750\text{ mm}$ 。单纯的串联结构形式需要较大空间，不能实现。纯并联结构在结构强度及空间上都存在不足。

根据现场安装条件、使用工况以及使用要求等，经过反复迭代选型，采取串并联组合框架式结构，选择大载荷电动缸、直线导轨、圆弧导轨等承载能力强的传动零部件，可以满足载荷高、抵抗变型能力强、安全系数高的需求。

3.1 总体结构形式

机构主要由俯仰机构、偏航机构、垂向机构、横向机构、纵向机构等组成，结构如图 2 所示。最大外形尺寸为 $7\ 055\text{ mm}\times 4\ 045\text{ mm}\times 2\ 800\text{ mm}$ 。

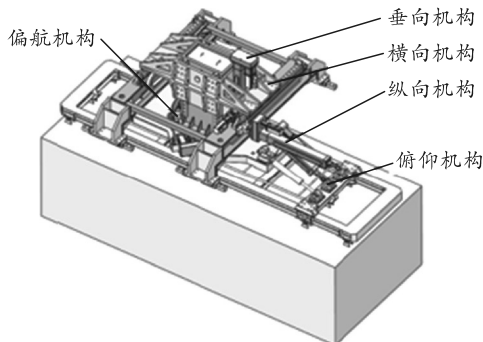


图 2 机构组成

与风洞安装基础直接相连的是操作机纵向机

构，横向机构重叠在纵向机构上，垂向机构在横向机构内部，这 3 个自由度相互独立、相互垂直，运动上没有耦合关系。垂向机构下部串联着偏航机构，偏航机构下方是俯仰机构。偏航机构运动会带着俯仰机构一起旋转，俯仰机构运动时，偏航机构及其他各自由度没有影响。图 3 为操作机简图。

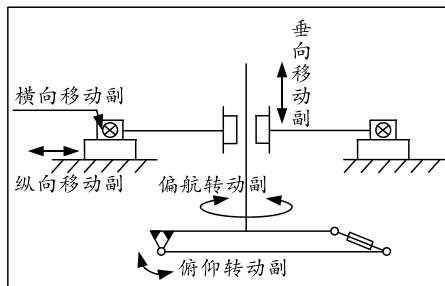


图 3 五自由度操作机简图

3.2 行程设计

由于模型俯仰旋心与五自由度操作机俯仰旋心不重合，机构运动时有些轴需要有补偿运动，因此其实际行程应大于目标行程。根据计算：纵向机构补偿行程为 $-144, 367\text{ mm}$ ，垂向机构补偿行程为 $-191.4, 58.3\text{ mm}$ 。在考虑机构实际运行空间及指标要求后，机构各自由度实际需满足行程^[1]范围如下：

- 俯仰角： $-4^\circ\sim 4^\circ$ ；
- 偏航角： $-3^\circ\sim 3^\circ$ ；
- 纵向行程： $0\sim 950\text{ mm}$ ；
- 横向行程： $-100\sim 800\text{ mm}$ ；
- 垂向行程： $-250\sim 210\text{ mm}$ 。

4 主要部件详细设计

4.1 俯仰机构

俯仰机构主要由旋转组件、驱动机构、限位机构等组成，如图 4 所示。俯仰角度采用 2 组高精度倾角传感器进行实时位置反馈。俯仰机构的实际行程达到 $-4.5^\circ\sim 4.7^\circ$ ，满足要求。

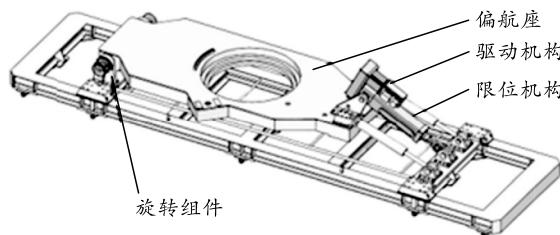


图 4 俯仰机构组成

伺服电机转动在螺旋丝杠传动机构作用下转换成电动缸伸缩运动，使得俯仰机构沿着位于前端的旋转轴产生角度运动，实现模型的俯仰角度变化。

4.1.1 旋转组件

旋转组件安装在偏航座前端，左右各一组。主要由俯仰轴、旋转支座、双列圆锥滚子轴承、轴承端盖、锁紧螺母、倾角传感器和线缆外罩等组成。该组件旋转中心为俯仰机构的旋心，距离模型旋心水平距离为 1 185 mm。

根据轴承受力情况，初选轴承为双列圆锥滚子轴承 352 124，基本额定动载荷 $C_{0r}=910$ kN， $C_r=508$ kN，对其进行受力校核。

轴承所受径向载荷为气动载荷和自重合力：

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_G^2} = \sqrt{60^2 + 70^2} = 92.2 \text{ kN}.$$

式中： F_x 为气动载荷， $F_x=60$ kN； F_G 为模型+中间件重量，3 维估算 $F_G=70$ kN。

$$Fa/Fr=60/92.2=0.65 > e.$$

计算轴向径向当量载荷为 224.2 kN。安全系数为 3.91。

4.1.2 俯仰驱动机构

俯仰驱动机构安装在偏航座后端，主要由电动缸支座、无油轴套、电动缸、减速机、伺服电机、电动缸铰链座和销轴等组成^[2]。

在无气动载荷、俯仰角度负向最大时，电动缸作用力最大。计算电动缸所需额定作用力为 124.2 kN。

4.2 偏航机构

偏航机构主要由回转轴承、驱动机构、测角组件和偏航座等组成，如图 5 所示。偏航角度采用 2 组高精度增量式编码器进行实时位置反馈。通过限位设计，能轻松实现偏航角行程要求。

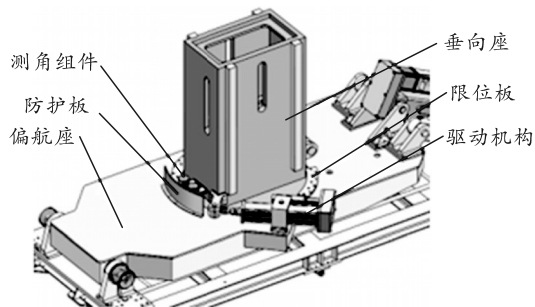


图 5 偏航机构组成

伺服电机驱动电动缸做直线运动，电动缸推杆伸缩驱动偏航机构旋转，实现偏航运动，设计了限位和测角组件实现偏航运动的角度和行程要求。

4.2.1 偏航驱动机构

偏航驱动机构安装在偏航座侧面，实现模型偏

航角度的调整，主要由电动缸支座、无油轴套、电动缸、减速机、伺服电机、电动缸铰链座和销轴等组成^[3]。

经计算电动缸作用力为 19 808 N，选择力姆泰克公司伺服电动缸 IMB50-10-200，额定推力 45 kN。电动缸安全系数 2.27。

4.2.2 回转轴承选型

回转轴承在动态试验时，受重力+气动载荷，受力如图 6 所示。

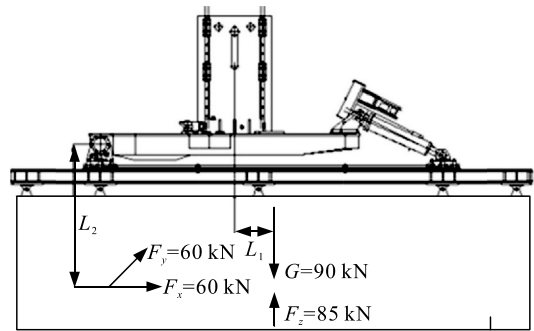


图 6 回转轴承受力

选择洛阳 LYC 轴承有限公司四点接触球转盘轴承 787/960G2，并根据其受力情况使用厂家计算公式进行安全校核，安全系数为 2.83。

4.3 垂向机构

垂向机构主要由驱动机构、直线导轨、垂向座和硬限位块等组成。通过控制系统驱动电机运动，可实现模型沿直线导轨做垂向方向移动。垂向机构组成如图 7 所示。

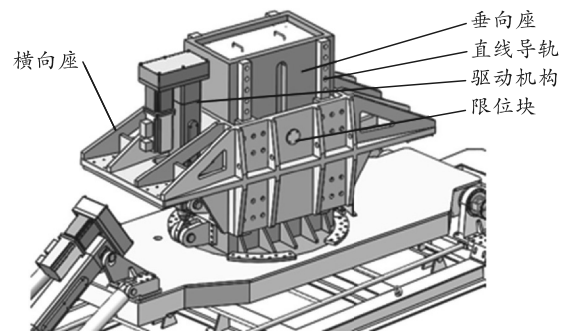


图 7 垂向机构组成

伺服电机安装在横向座上，伺服电机驱动滚珠丝杠运动，带动丝杠螺母上下运动，丝杠螺母固定在垂向座上，丝杠螺母上下垂向运动实现操作机的垂向运动。垂向机构与横向座之间通过直线导轨和滑块实现相对运动。

4.3.1 垂向驱动机构

垂向驱动机构安装在横向座侧面，主要由电动

缸支座、无油轴套、电动缸、减速机、伺服电机、电动缸铰链座、销轴和氮气平衡缸等组成。

根据使用工况，计算电动缸作用力为 90 400 N，据此进行伺服电机及减速器等选型。

4.3.2 垂向直线导轨选型

垂向机构直线导轨安装位置及受力情况如图 8 所示。

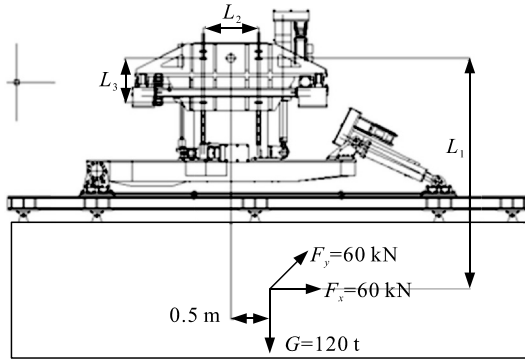


图 8 直线导轨受力

根据 THK 样本公式，计算滑块最大载荷：

$$P = \frac{F_x L_1}{n L_3} + \frac{F_y L_1}{n L_3} = \frac{60 \times 3}{4 \times 0.55} + \frac{60 \times 3}{4 \times 0.55} = 163.6 \text{ kN}.$$

式中 n 为受力滑块数量， $n=4$ 。

选择 THK 公司滚柱保持器型导轨 SRG85LC，计算得安全系数 6.05。

4.4 横向机构

横向机构主要由驱动机构、直线导轨、横向安装座、横向座和位置传感器等组成，如图 9 所示。伺服电机通过减速机驱动丝杠螺母，实现模型的横向运动。横向运动会带动垂向、偏航和俯仰机构整体运动，不影响纵向运动。

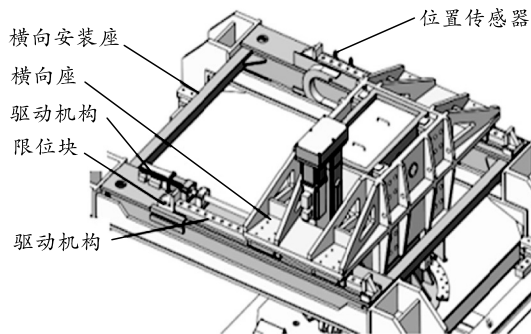


图 9 横向机构

4.4.1 横向驱动机构

为使机构整体结构尺寸紧凑，将横向驱动机构安装在横向座下方，位置传感器布置在横向座另一侧^[4]。

横向驱动机构主要由伺服电机、减速机、减速机座、联轴器、丝杠安装座、滚转丝杠和螺母安装座等组成。

根据使用工况，动态试验时气动载荷作用力较大，分析得丝杠作用力 F 为 61 324 N。

1) 滚珠丝杠选型。

根据丝杠作用力，选择 THK 公司滚珠丝杠 BNFN5016-2.5+1 200 L，导程 P 为 16 mm，额定动载荷 72.6 kN，额定静载荷 183.3 kN。计算得滚珠丝杠安全系数 2.98。

2) 伺服电机选型。

计算电机转矩：

$$T = \frac{FP}{2\pi\eta i} = \frac{61324 \times 0.016}{2 \times 3.14 \times 0.95 \times 35} = 4.7 \text{ Nm}.$$

式中： η 为丝杠效率，取 0.95； i 为减速比，初选 $i=35$ ；据此选择西门子伺服电机 1FL6067，计算安全系数为 2.03。

3) 减速机选型。

根据电动缸和伺服电机参数，选择精锐行星减速机 AB115-35-P2。

4.4.2 直线导轨选型

横向机构直线导轨安装位置及受力情况如图 10 所示。

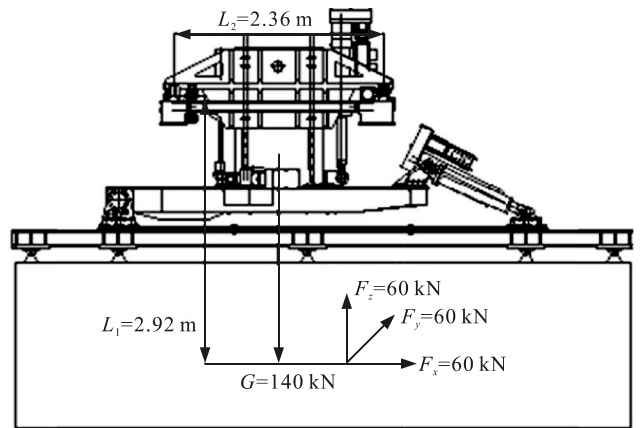


图 10 直线导轨受力

根据 THK 公式，计算滑块最大载荷为 176 kN，计算安全系数： $S = 990 / 176 = 5.6$ 。

4.5 纵向机构

纵向机构主要由驱动机构、直线导轨、纵向座等组成，如图 11 所示。以试验舱顶部的 2 根承重梁作为纵向机构安装的平台，也是整个五自由度操作机与风洞的安装基础。

伺服电机运转驱动丝杠螺母带动整个机构做纵

向直线运动，纵向机构与安装座之间通过导轨滑块实现相对运动，导轨固定在风洞安装基础上。

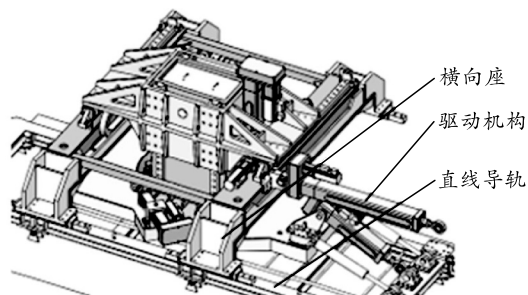


图 11 纵向机构组成

4.5.1 纵向驱动机构

纵向驱动机构安装在纵向座后侧，一端与安装基础连接，一端与横向安装座连接，实现模型纵向行程的调整，主要由电动缸支座、无油轴套、电动缸、减速机、伺服电机、电动缸铰链座和销轴等组成^[5]。

纵向机构运动部分重量 $m=20\ 000\text{ kg}$ (含模型)，纵向方向从零到最大速度时间不高于 1 s ，即加速度 $a=20\text{ mm/s}^2$ ，纵向方向气动载荷 $F_x=60\ 000\text{ N}$ ，横向方向气动载荷 $F_y=60\ 000\text{ N}$ ，垂向方向气动载荷 $F_z=85\ 000\text{ N}$ ，导轨摩擦系数 $\mu=0.05$ 。

计算电动缸作用力：

$$F = mg\mu + ma + F_x + F_y\mu - F_z\mu = 68\ 950\text{ N}。$$

1) 电动缸选型。

根据电动缸作用力，选择力姆泰克公司伺服电动缸 IMB80-16-1000，额定推力 100 kN ，最大速度 226 mm/s ，额定输入扭矩 333 Nm ，额定动载荷 200 kN ，导程 P 为 16 mm ， 300 mm 导程误差 0.023 mm ，重复精度 0.02 mm ，配位置传感器。安全系数为 1.65 。

2) 伺服电机选型。

计算电动缸转矩：

$$T = \frac{FP}{2\pi\eta} = \frac{68\ 950 \times 0.016}{2 \times 3.14 \times 0.9} = 195.2\text{ Nm}。$$

式中 η 为电动缸效率， $\eta=0.9$ 。

初定减速比 $i=25$ ，计算伺服电机转矩：

$$T_d = T / i = 195.2 / 25 = 7.8\text{ Nm}。$$

选择西门子伺服电机 1FL6092。计算得电机安全系数为 2.14 。

3) 减速机选型。

根据电动缸和伺服电机参数，选择精锐行星减速机 AB180-25-P2。

4.5.2 直线导轨选型

纵向机构直线导轨安装位置及受力情况如图 12 所示。

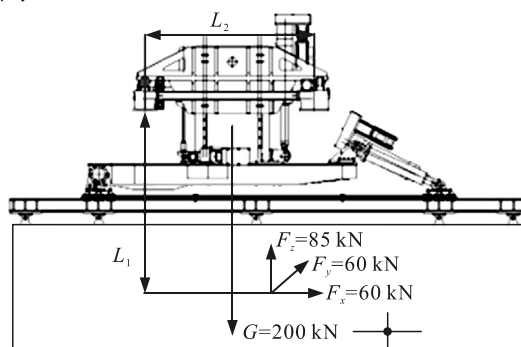


图 12 直线导轨受力

根据 THK 公式，计算滑块最大载荷为 74.7 kN 。选择该公司滚柱保持器型导轨 SRG85LC。安全系数为 13.25 。

5 有限元分析

默认试验舱壳体足够安全，只对五自由度操作机进行分析。使用软件对机构进行如下处理：

- 1) 对试验舱壳体侧壁进行固定约束；
- 2) 机构通过导轨滑块与试验舱段全接触，零部件之间全接触；
- 3) 载荷：模型自重 (5.2 t) + 气动载荷 (纵向 $60\ 000\text{ N}$ (顺气流方向)、横向 $60\ 000\text{ N}$ 、垂向 $85\ 000\text{ N}$ (向上)) + 机构自重。

计算结果：机构最大应力为 144 MPa ，该零件采用材料为 Q355B，安全系数为 2.46 。机构最大位移为 12.7 mm 。

6 模态分析

使用软件对五自由度操作机进行模态分析，计算结果：1~5 阶模态频率分别为 0.71 、 1.19 、 2.24 、 2.81 、 6.28 Hz ，最大为 6.28 Hz ，不与五自由度操作机工作环境典型频率重叠，无共振风险。

7 精度分析

7.1 纵向运动精度分析

纵向机构传动链由伺服电机+行星减速机+电动缸组成，位移控制采用电机编码器半闭环控制，传动误差主要由减速机反向间隙误差、电动缸全行程导程误差和电动缸安装座刚度误差组成，重复精度误差主要由减速机反向间隙误差、电动缸重复精度误差组成^[6]。

1) 传动定位精度:

$$e_1 = \frac{\Delta\theta \times \ell}{360 \times i} + \frac{L_u \times V_{300p}}{300} + \alpha = 0.13 \text{ mm}。$$

2) 重复定位精度:

$$e_2 = \frac{\Delta\theta \times \ell}{360 \times i} + \beta \approx 0.02 \text{ mm} < 0.1 \text{ mm}。$$

式中: $\Delta\theta$ 为行星减速机反向间隙, 为 0.117° ; ℓ 为滚珠丝杠导程, $\ell=16 \text{ mm}$; i 为减速比, $i=25$; L_u 为丝杠有效行程, $L_u=1\ 000 \text{ mm}$; V_{300p} 为丝杠任意 300 mm 行程内允许的行程偏差; α 为电动缸安装座刚度误差, $\alpha=0.019+0.037=0.056 \text{ mm}$; β 为电动缸重复精度, 查得 $\beta=0.02 \text{ mm}$ 。

7.2 横向运动精度分析

横向机构传动链由伺服电机+行星减速机+滚珠丝杠组成, 位移控制采用电机编码器半闭环控制, 传动误差主要由减速机反向间隙误差、丝杠刚度误差和丝杠全行程导程误差组成, 重复精度误差主要由减速机反向间隙误差和丝杠刚度误差组成。采用纵向运动精度类似算法得传动定位精度 0.134 mm 、重复定位精度 0.04 mm 。

7.3 垂向运动精度分析

垂向机构传动链由伺服电机+行星减速机+电动缸组成, 位移控制采用电机编码器半闭环控制, 传动误差主要由减速机反向间隙误差、电动缸全行程导程误差和电动缸安装座刚度误差组成, 重复精度误差主要由减速机反向间隙误差和电动缸重复精度误差组成。采用纵向运动精度类似算法得传动定位精度 0.15 mm 、重复定位精度 0.02 mm 。

7.4 偏航运动精度分析

偏航机构传动链由伺服电机+行星减速机+电动缸组成, 位移控制采用电机编码器半闭环控制,

传动链误差主要由减速机反向间隙误差、电动缸全行程导程误差和电动缸安装座刚度误差组成。计算得传动定位精度 $0.3'$ 。

7.5 俯仰运动精度分析

俯仰机构传动链由伺服电机+行星减速机+电动缸组成, 位移控制采用电机编码器半闭环控制, 传动链误差主要由减速机反向间隙误差、电动缸全行程导程误差和电动缸安装座刚度误差组成。计算得传动定位精度 $0.12'$ 。

8 结束语

本方案充分合理利用现场空间及基础条件, 以串并联结构形式实现所有的运动行程, 并满足载荷要求, 安全系数较高, 标准件选型满足可靠性和先进性要求, 方案合理可行。结果表明, 该方法不仅满足当前模型试验需要, 而且为风洞提供了基础性能力条件, 满足同类试验的模型安装需要, 具有重要意义。

参考文献:

- [1] 黄叙辉, 庞旭东, 宋斌. 1.2 m 跨超声速风洞新型捕获轨迹系统研制[J]. 实验流体力学, 2008, 22(2): 95-98.
- [2] 周晓刚, 胡明伦, 白本奇, 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.
- [3] 白本奇, 朱卫东, 叶成, 等. 一种快速运动装置液压系统设计[J]. 机床与液压, 2015, 43(4): 95-97.
- [4] 王殿卫. 五自由度相机位姿变换机构的设计[D]. 天津: 天津理工大学, 2020.
- [5] 马宁宁, 吕刚, 梁波, 等. 回冲装置传动机构优化设计[J]. 兵工自动化, 2022, 41(9): 16-21.
- [6] 尹烁, 尹明富, 孙会来, 等. RRRPRR 型五杆机构研磨机的轨迹仿真研究及结构设计[J]. 机械设计与制造, 2022(3): 189-193.