

doi: 10.7690/bgzdh.2013.06.002

## 一种滚转控制装置在高超声速风洞中的应用

刘刚<sup>1</sup>, 白本奇<sup>1</sup>, 冯明<sup>2</sup>

(1. 中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000; 2. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了在高超声速风洞试验中实现自动变滚转角度, 提出一种滚转控制装置的设计方法。对自动变滚转角的必要性进行分析, 采用内置中空式力矩伺服电机直接驱动模型转动, 对电机性能特征进行测试分析, 针对装置的抗电磁干扰措施和性能拓展情况, 在风洞试验环境下进行验证。试验结果表明: 该装置的应用能拓展试验能力, 提高试验效率, 降低试验成本, 具有较高的应用价值。

**关键词:** 高超声速风洞; 滚转控制装置; 中空电机; 自动变角度; 风洞应用

**中图分类号:** TJ86 **文献标志码:** A

## Application of Rolling Control Device in Hypersonic Wind Tunnel

Liu Gang<sup>1</sup>, Bai Benqi<sup>1</sup>, Feng Ming<sup>2</sup>

(1. High Speed Institute, China Aerodynamics Research &amp; Development Center, Mianyang 621000, China;

2. School of Mechanical Engineering, University of Science &amp; Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** For realizing automatic variable-angle in hypersonic wind tunnel, put forwards a design method of rolling control device. The necessary of automatic variable-angle was analyzed. An interior-type mid-empty torque servomotor is used to drive the system's spindle directly. The performance of servomotor was tested and analyzed. The anti-interference measures and performance expandability are validated in wind tunnel experiments. The test result show that, the rolling control device can expand experimental performance while improving experimental efficiency and reducing cost. It has high application value.

**Key words:** hypersonic wind tunnel; rolling control device; mid-empty motor; automatic variable-angle; wind tunnel application

## 0 引言

高超声速风洞主要承担我国航空航天飞行器的气动力和气动热试验研究任务, 其试验段尺寸小和流场温度高的特性对模型状态控制机构提出了苛刻要求。高超声速风洞高能耗和高试验成本的特点也要求风洞试验不仅要提高试验数据的准确性, 还要尽可能地提高试验效率<sup>[1-2]</sup>。

滚转控制装置用于自动改变模型的滚转角, 使得天平能够测量出作用在模型上的滚转力矩。以往在做试验时, 每转一次滚转角( $\gamma$ 角), 需要人工进行角度调整, 容易对天平精密元件造成影响, 试验效率低。目前, 常规的自动变角度滚转装置都是将电机置于风洞试验段外部, 通过减速机构和多个伞齿轮副组成传动机构控制模型滚转。这种装置不仅结构复杂, 堵塞度大, 而且齿轮传动回程间隙影响机构的定位精度, 很难满足 $1' \sim 3'$ 的控制要求。

针对上述问题, 笔者提出了一种新型滚转控制装置, 采用内置中空式永磁力矩伺服电机直接驱动模型转动<sup>[3]</sup>, 针对高温高压特殊环境下的控制系统进行了设计, 对电机性能特征进行了测试分析, 在

风洞试验环境下进行了应用验证。

## 1 结构设计

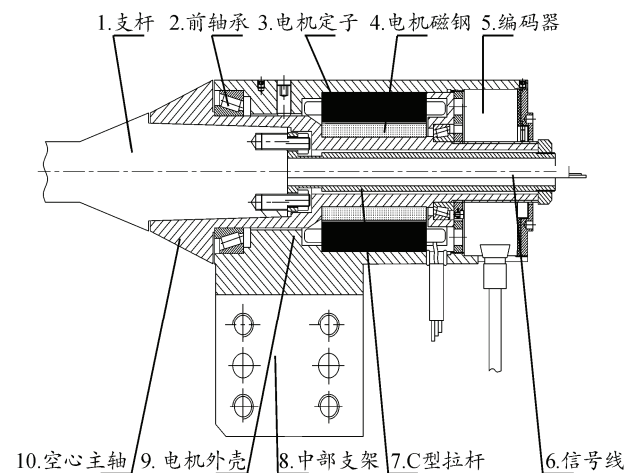


图1 滚转控制装置结构示意图

滚转控制装置应用环境为 $\phi 0.5$  m 高超声速风洞, 对堵塞度的要求 $\varepsilon \leq 0.07$ , 技术条件如下: 1) 外形尺寸 $\phi 90$  mm $\times 200$  mm; 2) 滚转力矩 $10$  N $\cdot$ m; 3) 定位精度 $\pm 3'$ 以内; 4) 在 $300$  °C环境下能正常工作; 5) 电机产生的电磁干扰不影响天平正常使用。

收稿日期: 2012-12-28; 修回日期: 2013-01-14

作者简介: 刘刚(1983—), 男, 贵州人, 本科, 工程师, 从事高速风洞测控技术、机电一体化设计研究。

图1为滚转控制装置结构示意图,采用中空伺服电机结构,一体化单轴驱动方式,装置外壳作为电机的定子,空心主轴作为电机的转子,降低了堵塞度,减少了传动环节,旋转角度直接由安装在空心主轴上的编码器读出,没有经过中间转换过程,达到了消除角度差异的目的。

## 2 电机设计

图2为力矩电机的截面图。考虑到电机力矩性能的实现及大载荷下电磁的稳定性,选择8极9槽分数槽结构。

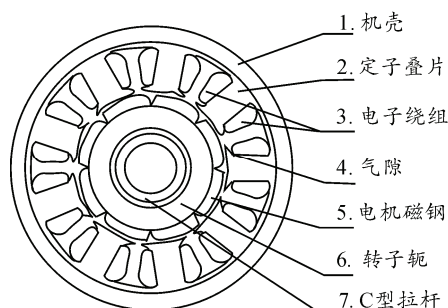


图2 电机截面

图3为电机中通过8.6 A电流时沿磁钢外表面一周的磁场强度分布,此时电机输出力矩达到10 N·m,电流产生的强磁场可能会对磁钢造成退磁损害,电机中磁钢最易发生退磁的部位是磁钢的外表面。由图3可以看出,磁钢外表面的最大的磁场强度约为750 kA/m,而设计选用的磁钢矫顽力为800 kA/m,因此不会对磁钢产生退磁作用。

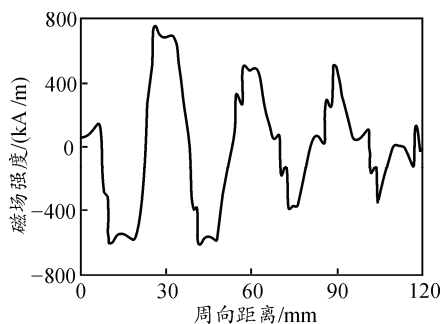


图3 磁钢表面沿圆周方向磁场强度分布

## 3 控制系统设计

### 3.1 系统原理

图4为滚转控制装置原理,计算机通过多轴运动控制器和互联模块与电机驱动器连接,向滚转机构发出指令同时实时监测机构的运行状态。滚转机构位置信号由编码器反馈给驱动器,实现机构的位置闭环控制。控制系统采集隔热板信号和电机内部

作为安全连锁,通过手摇脉冲发生器提供现场控制。

编码器规格为10 000线4倍频增量型编码器,控制系统可同时控制5个轴的运动,实现多轴联动。

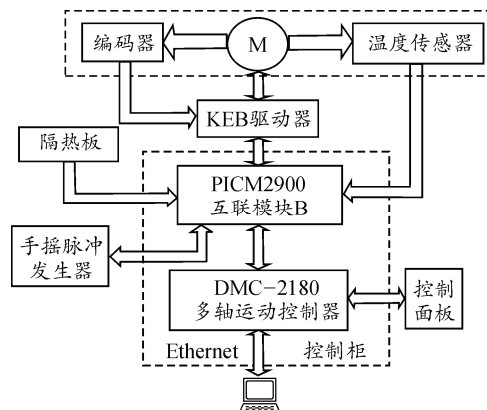


图4 滚转控制装置控制原理

### 3.2 电磁干扰的防护设计

风洞试验中内嵌在滚转控制装置中的天平信号为毫伏级的电压信号,容易受到电机电磁干扰的影响,在图2中,电机的机壳(过渡支架外壳)1和转子轭(中空主轴)6均采用了高导磁性合金钢,有效地降低了电机对外界的电磁干扰。此外,C型拉杆7也采用了高导磁性材料,对从其内孔穿过的天平信号线起到屏蔽作用,确保天平的信号传输不受电磁干扰。

### 3.3 耐热性能设计

滚转控制装置在高超声速风洞中的工况环境为: $p=0\sim 4$  Mpa,  $T=0\sim 340$  °C,高温高压的恶劣环境对电机是个严峻的考验,为降低热辐射和热传导的影响,采取了以下措施:

1) 在电机内部,电机设计耐热等级为最高级C级。定子绕组漆包线采用耐受温度为220~250 °C的高温线,磁钢选用最高工作温度达到180 °C的镍铁硼高温磁钢,采用合理的气隙宽度和磁钢形状阻滞线包热量向磁钢的传递,防止磁钢在高温下消磁。电机内绕组预埋有Pt100型温度传感器,可以提供温度报警功能。

2) 在电机外部,编码器与机壳之间,编码器与后端盖之间分别设计有隔热层,以防止高温气体对编码器的损害。此外,该装置还设计有可拆卸的夹层水冷套,在试验时起到冷却防护作用。

## 4 力矩性能测试及分析

图5为不同线电流下电机内部磁力线分布,由图5可以看出,随绕组电流的增加,其感应出的磁

感应强度也随之增加。

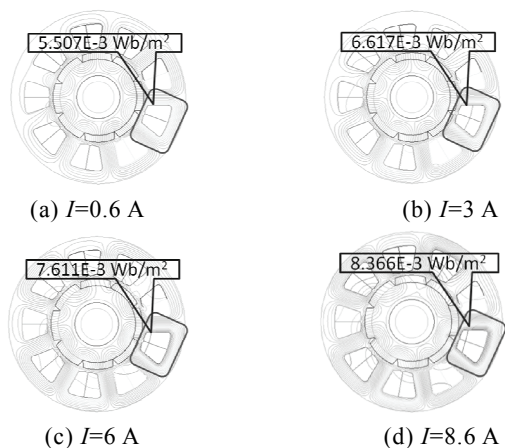


图 5 磁力线分布

图 6 同时给出了理论计算和实际测试得到电机的力矩与力矩常数同线电流之间的关系。由图可知：

1) 力矩随电流的增大而增大，当力矩达到 10 N·m 时，实际电流为 8.6 N·m。对于力矩和力矩常数，测量出的实际值同计算理论值在小电流时基本吻合，电流越大误差增大，这是由于理论计算时忽略了端部漏磁现象的影响，导致其随电流增大而产生的误差。

2) 力矩常数随电流增加而不断减小。随着绕组电流的增大，其感应出的磁感应强度也随之增强，使得电机定子的齿部磁场趋于饱和，导致磁阻增加，气隙磁通减少。根据力矩电机转矩计算公式：

$$T_m = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a - T_0 \quad (1)$$

其中： $p$  为极对数； $a$  为电枢绕组并联支路； $N$  为电枢绕组总导体数； $T_0$  为空载转矩，对任一特定电机，以上参数是确定的，由电机结构决定； $I_a$  为电枢电流； $\Phi$  为每极气隙磁通。电机的力矩常数为

$$C_T = \frac{pN}{2\pi a} \Phi - \frac{T_0}{I_a} \quad (2)$$

因此，力矩常数随气隙磁通的减小而下降。

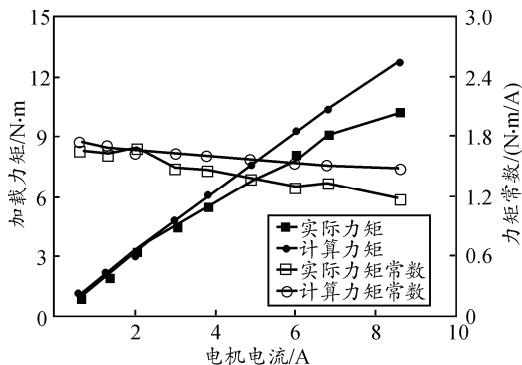


图 6 电流-力矩关系

### 5 风洞试验中的应用

#### 5.1 对天平信号的影响

图 7 为滚转控制装置照片，电机直接驱动配装在空心主轴上的天平与模型旋转，从而自动改变模型的滚转角度。



图 7 滚转控制装置照片

为检测滚转控制装置产生的电磁干扰对天平信号的影响，进行电机使能状态与未使能状态的对比。经过模拟实际吹风环境，测量系统现场采集天平初读数，随机选取 20 组数据，从天平 6 个元中选取影响量最大的 Y 元作对比，从图 8 可知：

1) 由于滚转控制装置设计采用的是交流伺服电机，使能后电机对天平信号有电磁干扰影响，Y 元读数的波动量增大。

2) 电机的电磁干扰对天平信号的最大影响量为 0.001 9 mV，不影响天平的正常使用。

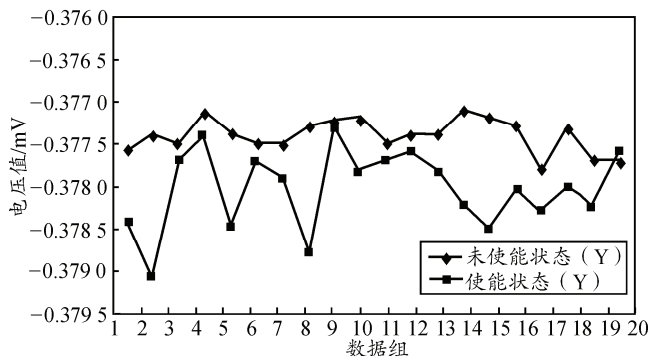


图 8 电机对天平的影响

#### 5.2 组合模拟实现大侧滑角

滚转控制装置在风洞中主要应用于自动变滚转角和联动实现大侧滑角。

目前受风洞试验段结构和模型支撑机构的限制，使得在风洞中直接实现大侧滑角变得困难，而通过采用  $\gamma$  角和  $\alpha$  角联动的方式可以组合模拟实现大侧滑角。