

doi: 10.7690/bgzdh.2013.10.018

高超声速风洞五自由度机构技术改造

周晓刚, 胡明伦, 白本奇, 凌忠伟, 张伟
(中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 五自由度机构是某高超声速风洞的关键设备之一。针对风洞长期频繁使用五自由度机构暴露的问题, 对五自由度机构进行改造, 改造内容包括: 控制系统改造、Y 轴速度提升、隔热板机构改造和线缆更新。技改后对五自由度机构进行了测试和标模试验, 结果表明: 五自由度机构性能有明显提高, 标模测力试验结果良好、满足国军标值。

关键词: 高超声速风洞; 支撑模型机构; 运动控制

中图分类号: TJ861 **文献标志码:** A

Improvements of Five Degree of Freedom Support Mechanism in Hypersonic Wind Tunnel

Zhou Xiaogang, Hu Minglun, Bai Benqi, Ling Zhongwei, Zhang Wei
(China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The five degree of freedom mechanism is the important part of equipment in hypersonic wind tunnel. In order to solve the problems exposed during long-term and frequent using, technical improvements need to be done. The main content of the improvements includes renewing of control system, increasing of Y-axis motion speed, and improving of insulating heat board mechanism and cable renewing as well. The five-degree-of-freedom support mechanism has been checked out and applied to carry out a standard model test after technical improvements, the test results demonstrate that the performance of the support mechanism get improvement obviously, and the force measurement test results of the standard model are well which satisfy to the demand of national military standard.

Key words: hypersonic wind tunnel; support mechanism; motion control

0 引言

五自由度机构是某高超声速风洞的关键设备之一, 其作用是在风洞中支撑模型, 提供试验要求的运动姿态, 模拟在实际飞行中飞行器的姿态变化。该机构于 1995 年研制, 由于当时的设计条件限制, 以及风洞长期频繁使用, 五自由度机构逐渐暴露如下问题: FANUC-6ME 数控系统为封闭式控制系统, 各功能模块已固化, 操作使用不方便, 主要元器件严重老化, 故障频繁, G 代码编程, 移植性差, 无法维护扩展, 操作效率低; Y 轴电机功率过低, Y 轴上升速度过慢; 隔热板机构受加工质量的影响, 隔热效果不理想, 运动经常受卡阻, 给高马赫数条件下试验带来安全隐患; 由于线缆为普通线缆, 无法承受驻室内的高温烘烤, 出现过控制导线烧断的故障。为了解决上述问题, 由某专项技改课题支持对五自由度机构进行了技术改造^[1]。

1 改造内容

研制新的开放式控制系统和应用软件, 确保五自由度机构原有技术指标不变^[2]; 解决 Y 轴电机功率过低, Y 轴上升速度过慢问题, Y 轴最大运动速

度 $V_{y\max}$ 由 100 mm/s 提高至 250 mm/s; 改造隔热板机构, 在隔热板关闭时, 下驻室环境温度在 60 °C 以下; 提高隔热效果, 驻室内更新的线缆耐温不低于 250 °C。

2 改造方案

2.1 控制系统改造

选用美国 GALIL 公司 DMC-2180 独立型多轴运动控制器为核心单元, 配合 PDC 系列直流伺服驱动系统, 组成新的控制系统, 替代 FANUC 6ME CNC 系统。原理见图 1。

系统以 DMC-2180 独立型多轴运动控制器为核心, 通过互联模块 PICM2900, 连接 5 台 PDC 直流伺服单元, 构成对 5 台直流伺服电机的闭环位置伺服系统, 驱动 Y、X、 α 、 β 、 γ 的直流伺服电机, 完成对机构升降、沿风洞轴线移动以及模型姿态角的位置控制。工控机和控制器通过网卡通信。DMC-2180 独立型多轴运动控制器上专用 CPU 与 PC 机 CPU 构成主从式双 CPU 控制模式, 运动控制卡上专用 CPU 来处理所有运动控制的细节: 升降速计算, 行程控制, 多轴插补、复杂运动控制等, 无须占用

收稿日期: 2013-04-11; 修回日期: 2013-05-22

基金项目: 总装部某专项技改子课题

作者简介: 周晓刚(1964—), 男, 湖北人, 硕士, 高级工程师, 从事常规高超风洞试验研究、机械设计、机电一体化系统研究。

PC 机资源。运行在工控机上的系统管理软件主要完成人机界面，程序编制，实时监控，系统维护，实验运行管理及与测控处系统上位机的通讯等任务。

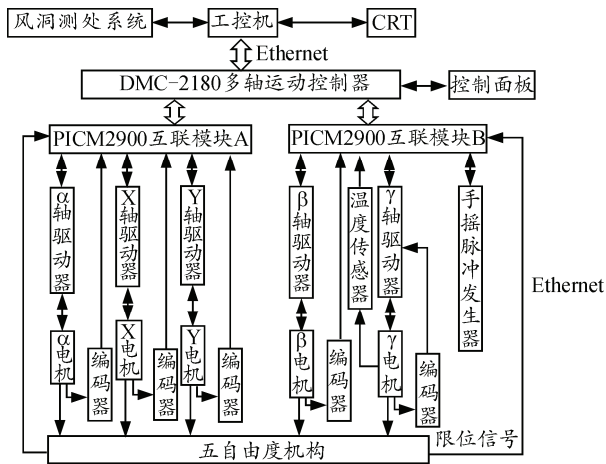


图 1 五自由度机构控制系统原理图

2.1.1 控制系统硬件集成

- 1) 控制器：用 DMC-2180 独立型多轴运动控制器替代 FANUC 6ME CNC 系统。
- 2) 伺服驱动：用 PDC 系列 PWM 直流伺服取代 SCR 直流伺服。
- 3) 示教操作：选用工业级一体化手持式手摇脉冲发生器。
- 4) 中间连接：选用高密度连线的互联模块 PICM2900，取代原有的中间过渡板。
- 5) 工控机：选用工控机作为人机界面和通信，通过软件和控制程序的开发，可显示各轴的位置命令、实际位置、误差、速度、报警诊断信息及 I/O 状态。

6) 电气控制柜：因各模块集成度的提高，IPC、DMC-2180、PDC、PICM2900 均安装在电器控制柜中。新电气控制柜面板上，保留原有 FANUC 6ME CNC 系统的部分功能按钮、开关和指示灯，如：启动、锁定、手脉、急停、超程解除等，其余功能按钮、开关通过工控机可视化界面实现。

2.1.2 控制系统软件功能

根据机构和风洞的特点，五自由度机构控制软件具有如下功能：系统自检、机构运行选择、参数设置、运行路径规划、实时处理、安全保护、在线帮助。控制系统改造的软件功能模块见图 2。

2.1.3 控制系统程序设计^[3]

五自由度控制软件中采用了基于 GALIL 两字符、VB、VC++ 3 种编程方式。根据这 3 种编程方式各自的特点以及采用不同的编程方式，实现五自

由度控制功能，其运动控制界面如图 3。在五自由度控制软件中：机构运行程序采用 GALIL 两字符命令集。手脉、点动、定义零点、回机械零点等功能采取基于 VB 的编程方式，优点是编程简单，方便，直观。而运动控制界面、仿真等功能采用 VC++ 编程，优点是性能稳定，可靠性高。

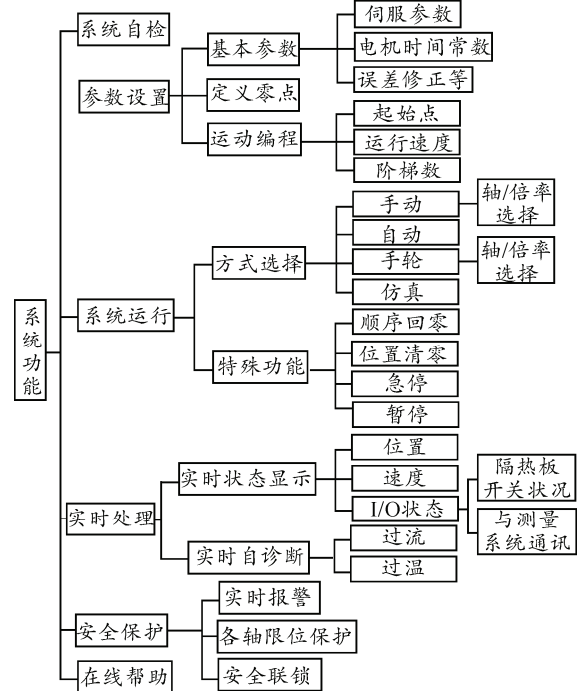


图 2 控制系统软件功能模块



图 3 五自由度机构运动控制界面

2.1.4 系统安全措施

- 1) 开机自检，故障显示功能。
- 2) 软件口令。在运行控制程序前输入口令，仅限于本岗位操作人员使用，避免误操作导致事故。
- 3) 软硬限位设置。设置各轴限位开关，当机构到达限位设定后，将自动回零；设置 X 轴、Y 轴限位开关，在危险状态时，X 轴、Y 轴可快速回机械零点；程序中对每个轴的运动范围、运动速度设置极限范围，编程时超出此范围就弹出消息框报警。
- 4) 暂停、回零功能。在机构运行过程中，如果出现危险情况或故障报警，如电机过流、过热等现

象时，可以先使机构暂停，然后各轴顺序回零。

2.2 Y 轴速度提升解决方案

1) 将现有 Y 轴电机更换为大功率、高转速的电机。根据数控机床伺服进给系统设计有关理论，直流伺服电机的选择应满足下列关系：

$$\begin{cases} J_r = J_m + J_l < 3J_m \\ M_a = M_{amax} + M_f + M_o < M_{max} \\ M_l < M_p \end{cases}$$

式中： J_m 为电机转动惯量； J_l 为负载惯量； J_r 为电机转动惯量与负载惯量之和； M_a 为快速启动时的力矩总和； M_{amax} 为快速启动时的最大加速力矩； M_f 为快速启动时的摩擦力矩； M_{max} 为伺服电机的最大转矩； M_o 为伺服电机预紧力矩； M_l 为伺服电机工作力矩； M_p 为伺服电机的额定转矩。

Y 向运动原理如图 4。经过详细计算^[4]，选取 FANUC 公司中惯量直流伺服电机 FB30M-2K 取代原有的 FB-25B。新电机性能参数：输出功率 4 kW，额定转矩 31.36 N·m，最大转矩 196.9 N·m，最高转速 2 000 r/min。

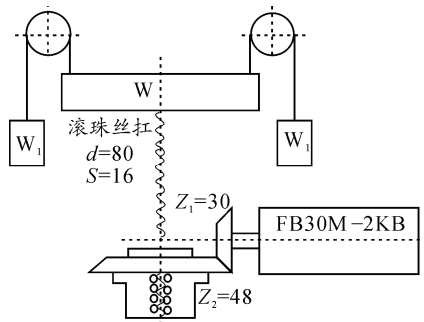


图 4 Y 向运动原理示意图

2) 为保证电机更新后机构运行可靠，还对 4 个点的配重进行精确调整，确保机构零位时平衡，以减轻启动载荷，总计增加配重重量 67 kg。

2.3 隔热板机构改造

1) 封闭原隔热板机构中副板遗留的空腔，减少中驻室与下驻室的热传导。

2) 对原隔热板上的加强筋尺寸重新布置，并加厚，提高其刚度，同时对钢板加工工艺，如热处理、焊接等提出严格要求，防止变形。

3) 布置强度较好的拨叉式限位开关。

2.4 线缆更新

将驻室内的控制导线和动力电缆全部更新为耐高温电缆。该电缆配置为可溶性聚四氟乙烯绝缘和护套，长期使用时最高工作温度 260 ℃。

3 测试和应用情况

机构静态测试情况：运动范围和运动速度与技改前一致，其中 Y 轴上升速度最大为 250 mm/s；各轴精度： $|\Delta\alpha| < 2'$ ， $|\Delta\beta| < 3'$ ， $|\Delta\gamma| < 3'$ ， $|\Delta x| < 0.15 \text{ mm}$ ， $|\Delta y| < 0.10 \text{ mm}$ ，满足国军标要求。

利用技改后的五自由度机构，风洞开展了标模试验。标模为 AGARD HB-2，天平为 5N6-20D，试验 $M_n=5$ ， $P_0=1 \text{ MPa}$ ， $T_0=85 \text{ }^\circ\text{C}$ ，试验攻角 $\alpha=-4^\circ\sim 14^\circ$ ，试验结果表明：本期标模测力试验结果良好，最大偏差为 $|\Delta C_N|_{\max} \leq 0.004 1$ ， $|\Delta C_A|_{\max} \leq 0.005 5$ ， $|\Delta X_{cp}|_{\max} \leq 0.001 8$ ，其结果满足国军标值。

五自由度机构投入使用后，已应用于多期风洞试验，涉及马赫数 5~10。在试验中，五自由度机构运动平稳灵活，模型姿态准确，机构运动精度高，下驻室隔热效果良好。通过多轴联动，确保模型在风洞流场中最佳位置，满足风洞试验的要求。

4 结论

经过机构静态测试、风洞标模试验和风洞试验应用结果表明^[5]：

1) 技改后设备运行良好，达到原批复技术指标和设计要求。所研制的控制系统技术先进、操作方便、功能齐全。五自由度机构运动正确、灵活、平稳，无爬行现象。

2) 五自由度机构 Y 轴运动速度由 100 mm/s 提高到 250 mm/s，升降时间由原来 10 s 缩短到 4 s 左右，不仅有利于设备的安全运行，还能节约气源。

3) FANUC-6ME 封闭式数控系统改造为以多轴运动控制器为核心的开放式控制系统，并具备五轴联动功能，同时也具备八轴联动扩展功能。

4) 隔热板机构运行灵活，隔热效果良好。在隔热板关闭时，下驻室环境温度小于 60 ℃，明显减轻高温对天平、5D 电机以及电缆的热辐射，提高下驻室内设备的寿命。

参考文献：

[1] 周晓刚, 胡明伦. $\Phi 0.5$ 米高超声速风洞五自由度机构技术改造实施方案[R]. 绵阳: CARDC-2, 2004.
 [2] 付增学. 俄罗斯气动试验设备汇编[M]. 北京: 国防科工委空气动力学专业组, 1996.
 [3] 周晓刚, 杨海滨, 黄昊宇. 风洞测控系统技术改造[J]. 兵工自动化, 2012, 31(1): 65-67.
 [4] 李泰安, 王路平. $\Phi 0.5$ 米高超声速风洞五自由度机构驱动力计算书[R]. 郑州: 郑州机械研究所, 1999.
 [5] 杨海滨, 周晓刚. $\Phi 0.5$ 米高超声速风洞测控系统性能提升[C]. 2012 年 08 月中国气动专委会测控六届三次技术交流论文集, 2012: 60-68.