基于DSP的大口径天文望远镜伺服控制的设计与实现

胡 伟[1]，王 莉[1]，张振超[2]，汪达兴[2]
（1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院，焦作 454100
2. 中国科学院国家天文台 南京天文光学技术研究所，南京 210042）

摘 要：大口径天文望远镜不仅聚光能力增强，且分辨能力也提高。天文望远镜是光、机、电多学科交叉的系统工程，其伺服控制系统的精度对整个望远镜的系统性能起到重要的作用。该文根据天文望远镜跟踪目标的特点，采用直接驱动控制技术，开发了新型的DSP的数字控制平台。DSP数字控制器系统完成伺服驱动电机的矢量控制，该系统能够满足大口径天文望远镜高精度跟踪，并满足天文观测的精密、宽调速参数要求。试验结果表明该系统控制器稳定性好、可靠性高，其控制精度达到了预期的效果。

关键词：大口径天文望远镜；直接驱动；超低速；永磁同步电机
中图分类号：TM351；TM341 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-6848(2010)08-0038-03

Design and Implementation of Servo Control System of the Large Aperture Telescope Based on DSP

HU Wei[1], WANG Li[1], ZHANG Zhen-chao[2], WANG Da-xing[2]
(1. *School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo* 454003, *China*; 2. *Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210042, *China*)

Abstract: Large diameter telescope strengthens the light gathering power and enhances the resolution capability. Astronomical telescope is an interdisciplinary systems engineering of optics, mechanics and electricity, its accuracy of servo control system played an important role for whole telescope system performance. According to the characteristics of astronomical telescope tracking target, this article used direct drive control technology and developed new DSP digital control platform, DSP system accomplied vector control of motor servo. This system can meet the needs of telescope high precise tracking, and satisfy astronomical observation exact observation, wide modulating velocity parameter requirement. Test results show that servo system has good stability, high reliability. The control accuracy has reached the desired effect.

Key Words: Large aperture telescope, Direct drive, Ultra low velocity, Permanent magnet synchronous machine (PMSM)

0 引 言

为了探索更早期的宇宙秘密，人们希望拥有更强集光能力的望远镜，而望远镜的集光能力是随着口径的增大而增强的。大的口径使得转动部分的体积更加庞大，重达数百吨，而且还必须克服风载。由于天体目标非常遥远，为了使得望远镜作补偿地球自转时对所观测天体进行精密跟踪，要求驱动达到角秒级的高精度，而且跟踪速度有时极低，甚至小于1″/s，因此伺服控制系统的精度对整个望远镜的系统性能起到重要的作用[1-2]。

传统的中、小型望远镜传动一般采用齿轮传动、蜗轮蜗杆副传动或摩擦传动。随着望远镜口径的增大，精度要求越来越高，高精度大尺寸的齿轮、涡轮的制造和运输都很困难。摩擦传动动态刚度差，有低速爬行和滑移现象，难以实现大尺寸高精度加工。因此必须有新的驱动方式来满足未来大口径望远镜跟踪要求。

目前国际上大型天文望远镜已经成功应用了直接驱动的控制技术(如西班牙10.4 m的GTC[7]、日本8.2 m的Subaru、欧南台(ESO)4架8.2 m VLT和射电望远镜阵ALAM)，未来更大的望远镜如GSMT

收稿日期：2010-01-22
修回日期：2010-02-01
基金项目：国家自然科学基金(10778629)；河南省控制工程重点学科开放实验室基金(KG2009-06)

(30 m)、GMT(26 m)等也都准备采用这种技术。这种电机目前还没有标准，都是根据需要单独研发的。由于资金和技术方面的原因，很难获得进口，发展大口径天文望远镜总是受到核心技术限制。

本文根据新型大口径天文望远镜跟踪目标的要求，采用直接驱动控制技术，省去了电机和负载之间的传动部分，将电机与负载直接耦合在一起，可以有效抑制齿隙、静摩擦转矩等非线性因素影响，提高了系统的可靠性，减少了维护时间和维护费用。控制器部分以高性能 DSP 为核心，以智能功率模块构成主电路，选用光电编码器检测转子位置，采用矢量控制算法。试验结果表明该系统控制器稳定性好、可靠性高，其控制精度达到了预期的效果。

1　大型天文望远镜直接驱动技术

随着望远镜口径的增大，要求的电机直径也相应的加大，所以为了方便加工、运输，降低成本，驱动电机采用单元电机分块设计思想，然后在现场组装。本文伺服电机定子由 15 块组成，转子由 4 块组成，采用内转子结构，电机为 3 相星形接法，如图 1 所示[3]。

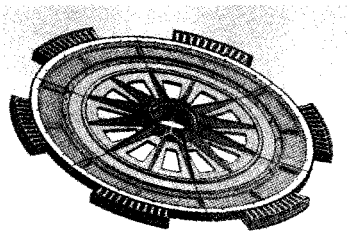

图 1　永磁同步电机模型

直接驱动将伺服电机与负载直接刚性联接，省去了中间机械传动和变换环节，减少了影响伺服系统性能的不利因素，为进一步提高系统性能创造了条件。对于大型天文望远镜而言，需要跟踪速度要求越来越低，直接驱动伺服电机的力矩波动和齿槽效应影响跟踪精度，为此本文采取以下一些措施用以减少电机脉动转矩：

(1)合理配置电机极数和槽数(本电机为 60 对极，165 槽)，使得电机极数和槽数的最小公倍数(LCM)较高，如图 2 所示(图中只画出了其中一个定子单元模型)

(2)磁极为采用 C 形结构，电枢绕组采用集中绕组方式，合理选择永磁体宽度和齿槽宽度比；

(3)选择高质量材料，提高工艺加工水平，削弱机械加工和材料引起的转矩脉动；

(4)电机绕组采用星形接法，用以消除 3 次以及 3 的倍数的次谐波。

(5)运用 SVPWM 控制技术，调整电流或反电势波形，得到最佳电流及反电势波形，用于消除低速时电磁因素和电流换向引起的转矩脉动[4]。

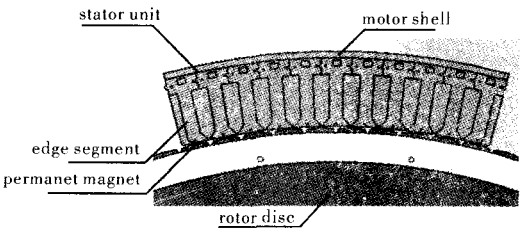

图 2　单个定子单元模型

2　伺服控制器硬件设计

针对大口径天文望远镜伺服系统超低速动态性能和转速、转矩平稳性，本文提出了一种大口径天文望远镜全数字交流永磁同步电机伺服系统矢量控制方案。如前所述，对电机本体设计合理配置电机极数和槽数、将转子永磁体连续移位、合理选择永磁体宽度和齿槽宽度比等方法，消除齿槽转矩；对于纹波转矩，系统采用软件的方式加以削弱和补偿。

系统采用式光电编码器作为转子位置检测装置，编码器和电机本体采用一体化设计，避免了机械安装所带来的检测误差。控制器以 DSP TMS320F2812A 为核心控制单元，以智能功率模块构成主电路，利用其超强的数据处理能力和方便的外围设备来设计大口径天文望远镜 PMSM 全数字交流伺服系统。系统采用主从式结构，上位计算机系统通过串行通讯与下位计算机 DSP 的 SCI 模块连接。上位机实现控制系统的在线集中监控、综合管理、性能检测和安全保护等功能。下位计算机根据上位计算机的控制指令完成相应的控制算法，并对运动控制系统进行实时控制。系统的硬件结构框图如图 3 所示[5]。

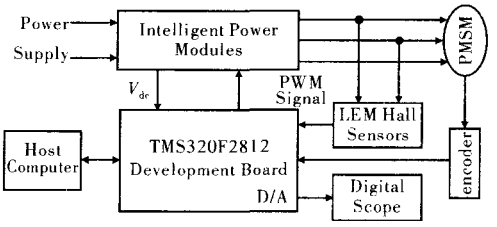

图 3　大口径天文望远镜伺服控制器硬件结构框图

3　伺服系统控制算法设计

由于永磁交流伺服系统是一个高阶、多变量、强耦合的非线性系统，用常规控制方法很难满足天文望远镜高精度、超低速和快响应的要求。本文结合空间矢量脉宽调制(SVPWM)的原理，调整电流或反电势波形，得到最佳电流及反电势波形，调制出

圆形定子磁链轨迹，有效减小转矩和磁链的脉动，极大提高系统的超低速动态性能和转速、转矩平稳性。矢量控制的永磁同步电机伺服系统原理图如图4所示[3]。其工作原理为：通过编码器检测电机转子空间位置，为了加快系统的响应速度，用位置数据处理单片机专门接收编码器信号，然后把它变换成位置信号、速度信号和换向信号后送到DSP，DSP经过计算得到转子速度和电角度，速度调节器输出定子电流q轴分量的参考值i_{qref}；由电流传感器测得定子相电流，分解得定子电压的dq轴分量u_{dref}和u_{qref}；将预测得到的空间电压矢量经过坐标变换后，形成SVPWM控制信号，经过智能功率模块控制电机运行。

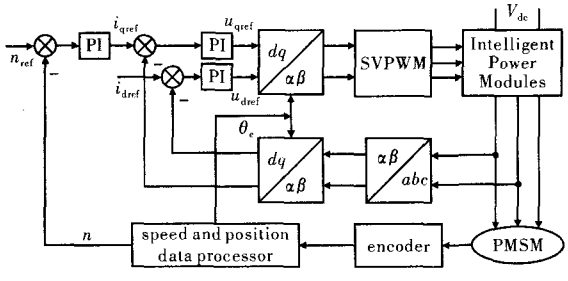

图4 永磁同步电机矢量控制原理

4 试验结果分析

实验中所使用的永磁同步电机，其参数见表1所示。

表1 永磁同步电机参数

极对数	60	额定功率/kW	2
额定电流/A	10	额定速度/rad·min^{-1}	4
额定电压/V	380	额定频率/Hz	1.533
转子电阻/Ω	36	互感/mH	10.28
定子漏感/H	1.8	转动惯量/N·m	15000

在望远镜运行中，由于天体目标十分遥远，一般情况下都处于匀速跟踪星体运动，并且跟踪运动的速度极低。为此研究了0.2″/s和1″/s运动速度下的直接驱动系统运行曲线和位置误差曲线，分别如图5和图6所示。在速度为0.2″/s时的误差RMS值为0.032″，在速度为1″/s时的误差RMS值为0.0237″。

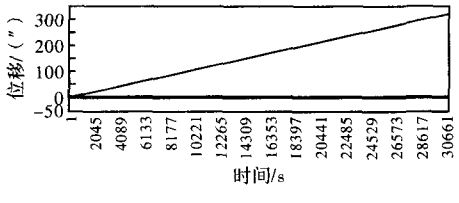

图5 1″/s位移曲线

图7为给定速度0.2″/s时通过数据得出的直接驱动系统转速曲线。转速数据是首先对位置数据对时间求导数，即对邻近的两次采样值相减，然后用相减值除以采样时间，在本系统中是10 ms。从总体上看，基本实现了速度的稳定。

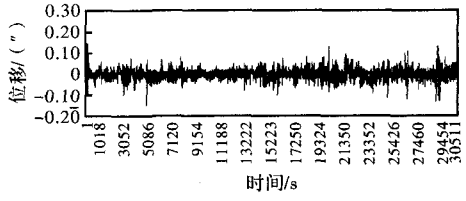

图6 1″/s位移误差曲线

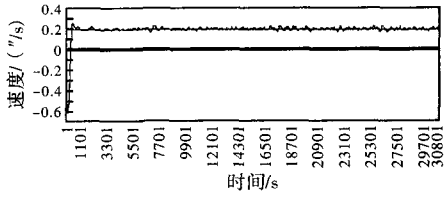

图7 0.2″/s速度曲线

5 结 论

对于大型天文望远镜而言，与齿轮传动、蜗轮蜗杆传动和电机摩擦传动相比，直接驱动具有很高的动态响应速度和加速度以及较高的刚度和定位精度，存在的主要问题是齿槽转矩和转矩脉动。本文根据新型大型望远镜的跟踪特性，采用直接驱动技术，设计出全数字永磁交流伺服控制系统。实验研究表明，低速可以达到0.2″/s，位置精度为0.032″(RMS)。表明直接驱动技术在低速下能稳定运行，响应迅速，动态特性好，可应用于大口径天文望远镜。

参考文献

[1] Kayhan Gulez, Ali Ahmed Adam, Halit Pastaci. A Novel Direct Torque Control Algorithm for IPMSM With Minimum armonics and Torque Ripples[C]. IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, APRIL 2007, 12(2):223-227.

[2] Li Su. Induction motor direct torque control[M]. Beijing: China Machine Press, 1994.

[3] Singh B. Singh B. P. Dwivedi S. DSP Based Implementation of Hybrid Speed Controller for Vector Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor Drive, Industrial Electronics[J]. 2006 IEEE International Symposium on, 2006, 3(6):2235-2241.

[4] Marco Quattri, Francesco Dimichino. Advanced Technology Optical Telescopes V[C]. Proc. SPIE 2199 1994:986-996.

[5] Changzhi Ren, Zhenchao Zhang. One direct drive system for telescope[C]. Proc. of SPIE 2008.

作者简介：胡 伟(1975－)，男，博士，副教授，从事现代交流伺服电机驱动，直接驱动控制和过程控制方面的教学和研究工作。