

文章编号 2095-1531(2015)06-0895-14

# 大型望远镜交流伺服控制系统综述

邓永婷\*, 李洪文, 王建立

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 本文主要介绍了当前国际上地基大口径望远镜交流伺服控制系统的发展现状, 详细论述了望远镜驱动方式的选择、交流永磁同步力矩电机的应用情况、控制系统的硬件组成以及伺服系统的控制策略。讨论了大型望远镜交流伺服控制系统设计的难点及未来发展趋势, 为大型望远镜交流伺服控制系统的设计提供一定的参考。

**关键词:** 大型望远镜; 交流伺服系统; 永磁同步力矩电机; 综述

中图分类号: TH75 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20150806.0895

## Overview of AC servo control system for the large telescope

DENG Yong-ting\*, LI Hong-wen, WANG Jian-li

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: dyt0612@163.com

**Abstract:** In this paper, the AC servo control system for the large ground based telescopes is introduced. The choice of telescope drive modes, the application of permanent magnet synchronous motor (PMSM), the hardware structure of control system and the control strategies of servo system are discussed in detail. And the difficulties and future trend of large telescope AC servo control system are also discussed. These discussions provide some reference for the design of large telescope control system.

**Key words:** large telescope; AC servo control system; permanent magnet synchronous torque motor; overview

收稿日期: 2015-06-15; 修订日期: 2015-07-23

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目 (No. 065X32CN60)

Supported by the Third-stage Innovation Engineering Project of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (No. 065X32CN60)

## 1 引言

大型望远镜是集光学、机械、电子学于一体的综合观测系统,用来探测空间目标、探索宇宙奥秘的重要观测设备,至今已经有几百年的发展历史。随着空间目标观测需求的提高,对望远镜的口径、分辨率、探测能力的要求越来越高。从1609年的第一台伽利略望远镜到正在建设的30 m望远镜(TMT),望远镜的口径平均每60年增加一倍,但是从20世纪中期开始,望远镜的口径每16年增加一倍<sup>[1-2]</sup>。

随着望远镜口径的不断增大,对望远镜的跟踪精度提出了更高的要求,平滑、高精度的传动系统是保证望远镜低速、平稳跟踪空间目标的重要措施。

望远镜的主要传动方式有涡轮蜗杆传动、摩擦传动、齿轮传动和直接驱动<sup>[3]</sup>。直接驱动方式以其安装简单、维护方便、无齿轮间隙和低速爬行的优点,近年来在大型望远镜中得到了较多的应用,例如E-ELT(42 m)、TMT(30 m)、JELT(30 m)等<sup>[3-7]</sup>。

在直接传动方式中,通常采用力矩电机作为执行机构,传统的有刷直流力矩电机以其控制技术成熟和简单的优点,在国内外的望远镜上得到了广泛的应用,例如,中国科学院长春光机所的718经纬仪、中国科学院成都光电所的778经纬仪、印度理工大学的50/80 cm施密特望远镜等<sup>[8-10]</sup>。随着望远镜口径和负载的增大,要求电机提供的力矩超过 $10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,有刷直流力矩电机在功率、体积、散热和低速性能方面已经不能满足大型望远镜高精度跟踪的要求。这是因为大型望远镜的电机驱动电流较大,同等功率条件下有刷直流力矩电机的体积较大;有刷直流电机的绕组产生大量的热量,在没有冷却设备条件下将影响望远镜成像光路;有刷直流力矩电机存在机械电刷和换向电火花,降低了电机的寿命和系统的可靠性,同时对望远镜低速跟踪产生力矩干扰和电磁干扰,影响望远镜的低速平稳跟踪

性能<sup>[11]</sup>。

鉴于上述有刷直流力矩电机在大型望远镜应用中存在的问题,国际上的大型望远镜开始采用交流永磁同步力矩电机作为直接驱动的执行机构,例如,西班牙10.4 m的GTC<sup>[12]</sup>、欧南台8.2 m的VLT<sup>[13]</sup>、日本天文台8.2 m的Subaru<sup>[14]</sup>以及美国的射电望远镜阵ALMA<sup>[15]</sup>。目前国内相关科研单位也开展了该方面的研究工作,例如,中国科学院下属南京天光所、成都光电所、长春光机所等<sup>[16-18]</sup>。永磁同步力矩电机相比于有刷直流力矩电机具有如下优点<sup>[19-20]</sup>:

(1)较高的气隙磁通密度、较高的功率密度、较高的力矩惯量比和较高的效率;

(2)取消了机械电刷,消除了因为机械换向产生的电火花和非线性力矩扰动,有助于提高望远镜低速跟踪性能;

(3)大功率的永磁同步力矩电机通常配套相应的冷却设备,能够及时消除电机热量对成像光路的影响;

(4)如果永磁同步力矩电机采用的是分段弧形拼接的形式,还具有拆装方便、可维护性高的特点。当某一弧段出现故障时,可以将该弧段拆除进行维修,其他弧段仍可正常工作,并不影响望远镜的正常观测使用。

由于交流永磁同步力矩电机在国内大型望远镜控制系统中的应用研究还处于初级阶段,如何设计大功率的望远镜交流伺服控制系统中成为亟待解决的问题。本文将对大型望远镜交流伺服控制系统作如下综述:(1)望远镜驱动方式的选择;(2)交流永磁同步力矩电机的应用情况;(3)交流伺服控制系统的硬件组成;(4)交流伺服系统的控制策略。在此基础上,总结大型望远镜交流伺服控制系统设计的难点及未来发展的趋势,为我国大型望远镜伺服控制系统的交流化提供一定的设计参考。

## 2 大型望远镜驱动方式发展现状

目前国际上的大型望远镜的驱动方式通常采

用齿轮传动、摩擦传动和直接驱动3种形式,为了更好的说明3种驱动方式,从建设费用、安全性、刚度和控制等方面对它们进行了比较<sup>[21]</sup>,如表1所示。由表1可以看出,直接驱动方式相比于其他两种方式,具有如下几方面的优势<sup>[15]</sup>:

(1)直接驱动方式在力矩传动方面是分布式

的,齿轮传动和摩擦轮传动方式是点对点的方式,分布式的传动方式具有传动精度高、传动刚度好的特点;

(2)直接驱动方式消除了齿轮间隙等非线性因素的影响,简化了伺服控制系统设计,提高了控制系统的跟踪精度。

表1 3种驱动方式的比较情况

Tab.1 Comparison of three drive modes

参数	齿轮传动方式	直接驱动方式	摩擦驱动方式
刚度	受力矩传送链路和结构变形的影响	较高,取决于于电机与结构的连接	受力矩传送链路和结构变形的影响
摩擦	在较好的润滑条件下可以忽略;取决于机械安装和接口耦合方式	不存在,因为没有直接接触	取决于机械安装和摩擦轮表面粗糙度
Stick-slip	可忽略,但总是存在;取决于机械安装和接口耦合方式	不存在,因为没有直接接触	总是存在,在方向上垂直于运动方向;有必要经常调整
齿隙	取决于齿轮传动比;需要校正	不存在,因为没有直接接触	取决于传动装置的传动比
控制带宽	取决于电机和结构刚度	较高	取决于电机和结构刚度
阶跃响应调节时间	取决于电机和结构刚度	较短,仅取决于附加结构刚度	取决于电机和结构刚度
抗扰动能力(风载)	存在稳定性问题	较好,响应速度快	存在稳定性问题
能量损耗			
— 平均值	— 低	— 较低	— 高,取决于摩擦
— 峰值	— 中等	— 较高	— 中等
温度控制	需要主动冷却	需要主动冷却	需要主动冷却
性能对机械的敏感度	敏感	敏感	非常敏感
性能对时间的变化	随着轴承和齿轮的安装变化而降低	取决于磁极的质量、密封和寿命	随着轴承和摩擦轮的安装变化而降低
可靠性	高,加工制造复杂	较高,加工制造复杂	取决于摩擦轮的加工
安全性	高	高	高
可维护性	高,电子学与电机兼容性不严格	中等,电子学与电机兼容性比较严格	中等,对摩擦轮接触面要求高
费用			
初级阶段	中等	高	低
全部过程	高	低	高

为了确保直驱方式的性能,需要尽可能的降低电机的齿槽力矩波动和系统的力矩扰动。在选择直驱力矩电机时,需要从以下几个方面进行考虑:

- (1) 定点精度和调节时间要求;
- (2) 望远镜远程安装的地点;
- (3) 供电网络的方便性和兼容性;
- (4) 望远镜的安装寿命;

- (5)系统的可维护性和检修周期;  
 (6)望远镜的初始预算和全过程预算。

### 3 交流永磁同步力矩电机发展现状

相比于有刷直流电机,永磁同步力矩电机属于交流控制的范畴,因此,在本文中基于永磁同步力矩电机的大型望远镜伺服控制系统称之为交流

伺服控制系统。随着望远镜口径和负载的增大,有刷直流力矩电机在功率、体积、散热和低速性能方面已经不能满足大型望远镜直驱控制系统的要求。因此,国际上的大型望远镜伺服控制系统采用了大功率交流永磁同步力矩电机作为执行机构,例如 GTC、VLT 和 ALMA 的方位轴和俯仰轴电机(PHASE 公司研发),Subaru 的方位轴和俯仰轴电机(三菱公司研发),如表 2 所示。

表 2 永磁同步力矩电机在大型望远镜中的应用情况

Tab.2 Application of PMSM in large telescopes

研制单位	望远镜名称	望远镜口径/m	电机研制公司
西班牙	GTC	10.4	意大利 PHASE
欧南台(ESO)	VLT	8.2	意大利 PHASE
日本天文台	SUBARU	8.2	日本三菱公司
美国	ALMA	射电望远镜阵	意大利 PHASE

GTC 望远镜采用了分段弧形拼接形式的永磁同步力矩电机,方位轴电机由 8 块弧形正弦电机拼接而成,转子安装直径为 15.5 m,方位轴电机由 4 台相同的驱动器驱动,峰值力矩达到 180 kN·m;俯仰轴电机由两台相同的电机驱动,每台

电机由 4 块弧形直线电机拼接而成,转子安装直径为 9 m,俯仰轴每台电机由 2 台驱动器驱动,峰值力矩可以达到 64 kN·m<sup>[22]</sup>。GTC 望远镜电机参数如表 3 所示,GTC 望远镜、方位轴和俯仰轴电机分别如图 1 和图 2 所示。

表 3 GTC 望远镜电机参数

Tab.3 Motor parameters of GTC

	方位轴	俯仰轴
磁极数/旋转角度跨度	2.36/360°	1.419/191.7972°
旋转直径/m	15.5	9
额定/峰值力矩/(N·m/N·m)	37.272/181.529	32.244/64.788
额定转速/最大加速度/((°)/s/(°)/s <sup>2</sup> )	2.2/0.47	0.65/0.19
最大齿槽力矩/(N·m)	197	219
力矩波动/%	额定力矩的 2.2	额定力矩的 1.47
低速位置跟踪精度/(")	0.003	0.0017

VLT 望远镜是世界上首台应用分段弧形拼接形式的永磁同步电机的大型天文望远镜,该望远镜两轴均采用了永磁同步力矩电机,方位轴采用了 16 块定子拼接的形式,转子磁极数为 520,由 4 台驱动器进行驱动,安装半径为 5 m;俯仰轴采用

了 2 台相同的电机,每台电机由 6 块定子组成和两台驱动器驱动,转子磁极数为 100,安装半径为 1 m<sup>[23]</sup>。VLT 望远镜电机参数如表 4 所示,VLT 望远镜和方位轴电机分别如图 3 和图 4 所示。



图1 GTC 望远镜  
Fig.1 GTC telescope

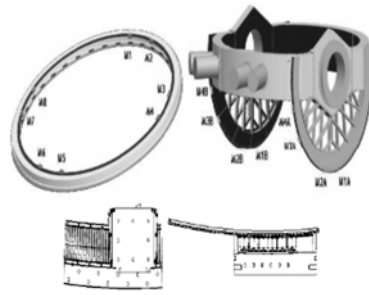


图2 GTC 望远镜驱动电机  
Fig.2 Drive motor of GTC

表4 VLT 望远镜电机参数  
Tab.4 Motor parameters of VLT

	方位轴	俯仰轴
主电源	8.8kVA 400VAC	18kVA 400VAC
	30A @ 50Hz	30A @ 50Hz
旋转半径/m	5	1
磁极数量	520	100
额定转速/最大加速度/ $((^\circ)/s/((^\circ)/s^2))$	2/0.4	1.5/0.3
最大齿槽力矩/%	额定力矩的 1.3	额定力矩的 1.5
力矩波动/%	额定力矩的 0.3	额定力矩的 0.5
低速跟踪精度	0.05"(RMS)	0.05"(RMS)

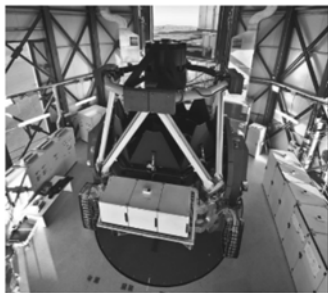


图3 VLT 望远镜  
Fig.3 Very large telescope

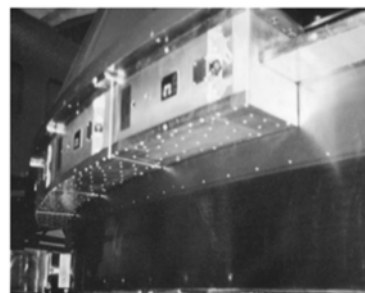


图4 VLT 望远镜驱动电机  
Fig.4 Drive motor of VLT

Subaru 望远镜仍然采用类似分段弧形拼接形式的电机,该望远镜两轴均采用了永磁同步力矩电机,方位轴和俯仰轴都是由4块定子拼接而成,方位轴的力矩达到  $81.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,俯仰轴的力矩为  $76.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。由于采用了直驱的方式,系统的结构刚度比原先的设计提高了40%,达到  $11.8 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ,方位轴和俯仰轴的锁定转子频率

分别提高到  $5.9 \text{ Hz}$ 、 $4.7 \text{ Hz}$ <sup>[24]</sup>。Subaru 望远镜及驱动电机分别如图5和图6所示。

ALMA 射电望远镜阵是由欧南台(ESO)设计的大型射电望远镜阵,该望远镜阵由24台12m口径的射电望远镜和一些小型射电望远镜组成。ALMA 望远镜的分段弧形拼接电机的设计借鉴了VLT 望远镜设计的成功经验,该射电望远镜的驱

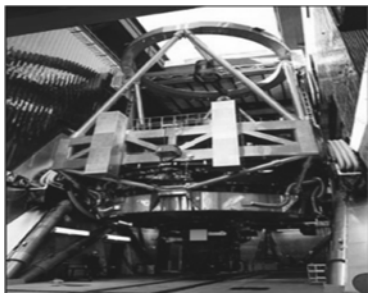


图5 Subaru 望远镜  
Fig.5 Subaru telescope

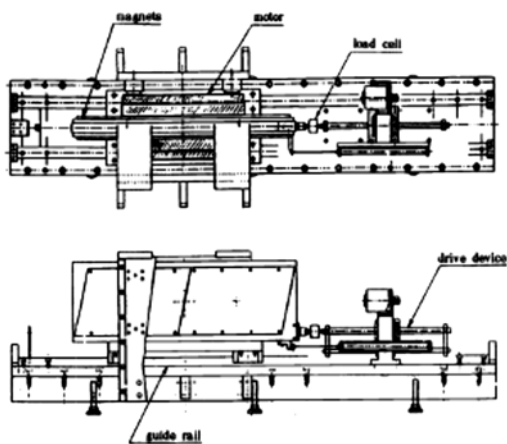


图6 Subaru 望远镜驱动电机  
Fig.6 Drive motor of Subaru telescope

动电机在方位轴最大角速度大于  $6^\circ/\text{s}$ , 最大角加速度大于  $18^\circ/\text{s}^2$ ; 俯仰轴在最大角速度大于  $3^\circ/\text{s}$ ,

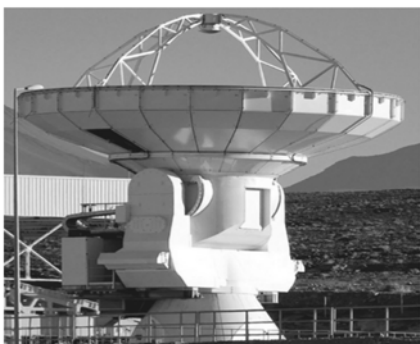


图7 ALMA 射电望远镜  
Fig.7 Atacama large millimeter array

最大角加速度大于  $9^\circ/\text{s}^2$  的条件下, 进行了优化设计。方位轴电机由 10 段双气隙定子组成, 运行范围为  $310^\circ$ ; 俯仰轴由 4 段双气隙定子组成, 运行

范围为  $49^\circ$ <sup>[25]</sup>。ALMA 射电望远镜驱动电机的定子和转子分别如图 7、图 8 和图 9 所示。

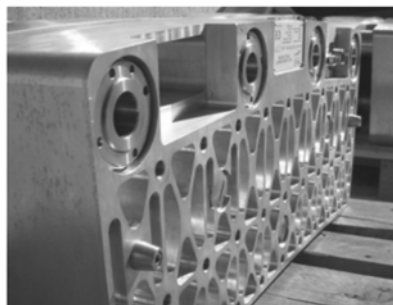


图8 ALMA 电机定子  
Fig.8 Stator of ALMA drive motor

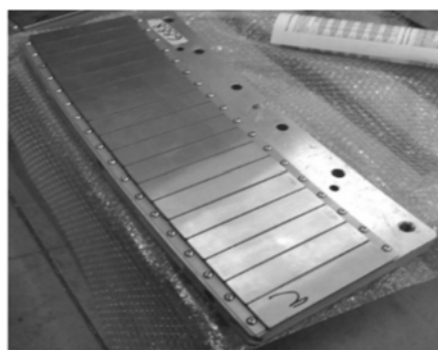


图9 ALMA 电机转子  
Fig.9 Rotor of ALMA drive motor

由美国、中国、加拿大、日本等国家正在联合研制的 30 m 望远镜 (TMT) 也将采用分段弧形拼接电机直接驱动的方式。由于望远镜的口径特别大, 驱动电机的定子和转子均采用分段弧形拼接



图10 TMT 望远镜  
Fig.10 Thirty meter telescope

的形式,文献[26]从力矩损耗、齿槽力矩波动、磁阻力矩波动、反电动势和磁通气隙等方面,对 TMT 望远镜的直驱电机选择进行了详细的说明。经过分析优化后,电机的峰值力矩效率可以达到 100%,幅值较小的应用力矩效率达到 49.6%,齿槽力矩波动为 0.1%,磁阻力矩波动为 0.3%。TMT 望远镜和电机模型如图 10 和图 11 所示。

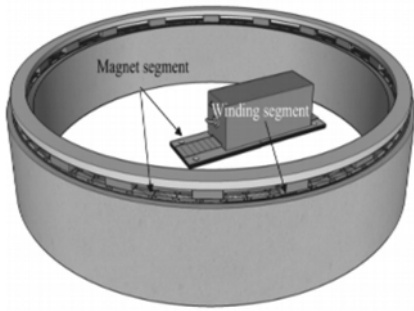


图 11 TMT 望远镜电机模型  
Fig. 11 Motor model of TMT

#### 4 大型望远镜交流伺服系统硬件发展现状

大型望远镜控制系统结构如图 12 所示,包括电机驱动器、控制器、位置编码器、测速电机等。虽然方位轴和俯仰轴可能有多个电机进行驱动,但是每个轴都只有一个单独的位置环和速度环。位置环的闭环通过获得位置编码器信号在伺服控制卡中实现,速度环通过测量转速计的反向信号实现闭环,每一个电机驱动器获得力矩指令后,进行电机的力矩闭环控制。此外,电机上还装有霍尔传感器,用于电机的方向鉴别和电机的平稳启动。上述控制系统采用的是力矩环、速度环、位置环三环控制,目前在大型天文望远镜中得到了广泛的应用,例如 Gemini、VLT、VST 等<sup>[27-29]</sup>。下面从望远镜控制系统的硬件组成—驱动控制器和位置传感器两方面进行研究现状概述。

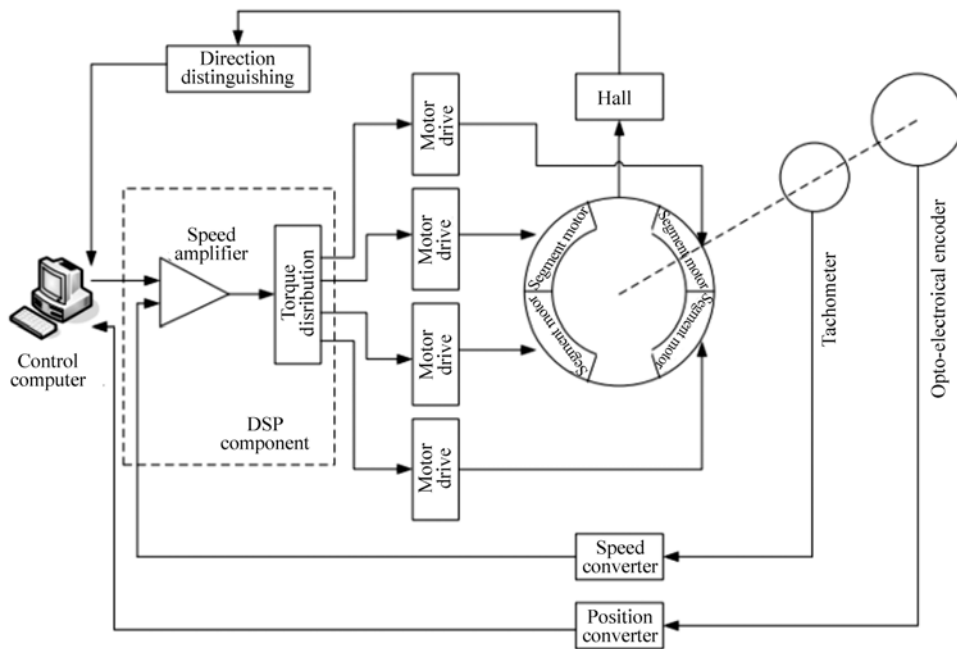


图 12 大型望远镜硬件控制系统框图  
Fig. 12 Hardware block diagram of large telescope

##### 4.1 大型望远镜交流伺服系统驱动控制器

大型望远镜伺服控制系统控制器主要完成反馈信号的通信、跟踪轨迹模型的计算、控制算法的计算以及系统的故障检测等功能。20 世纪 90 年

代,国际上大型望远镜伺服控制器通常是基于 VME 总线和 Motorola 26xx 系列的微型控制器,该类型的控制器还被大量应用于直流电机和步进电机控制系统。例如 VST 望远镜控制系统<sup>[30]</sup>,如

图 13 所示,该系统控制器采用 Motorola 公司的 MVME2600 芯片,实现了望远镜启动、跟踪、快速定向和精确定点模式的切换,优化了系统的采样

频率,完成了编码器数据的通信和系统自锁信号的读取。VST 望远镜控制系统的控制机柜和配电机柜分别如图 14 和图 15 所示。

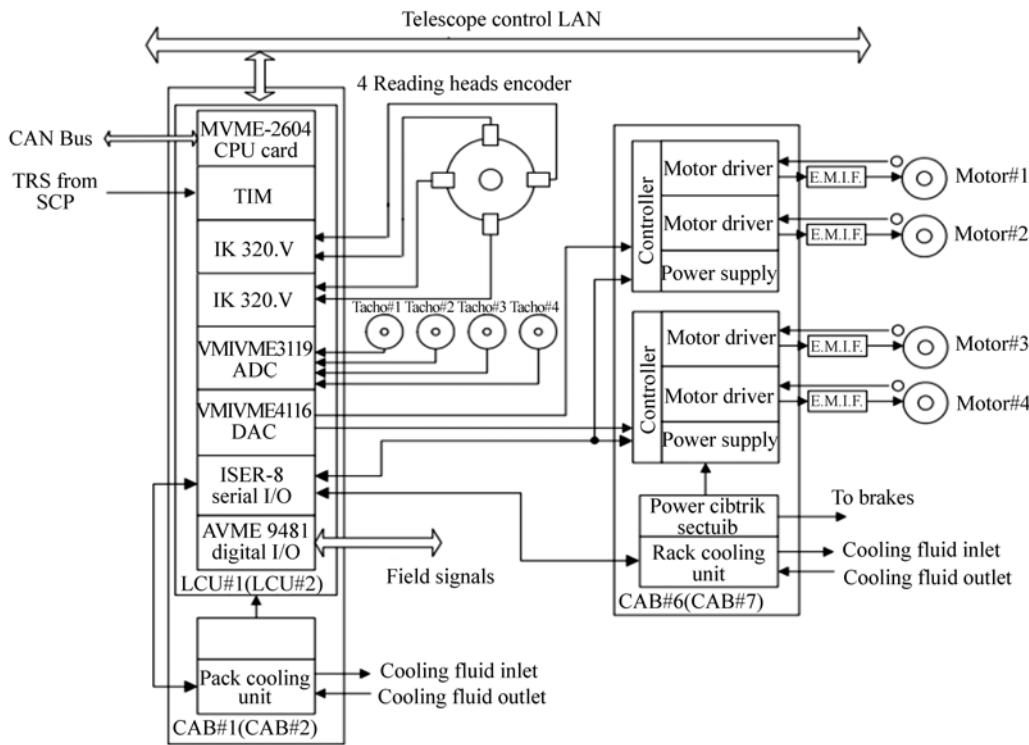


图 13 VST 望远镜硬件控制系统组成  
Fig. 13 Hardware block diagram of VST



图 14 VST 望远镜控制机柜  
Fig. 14 Control cabinet of VST

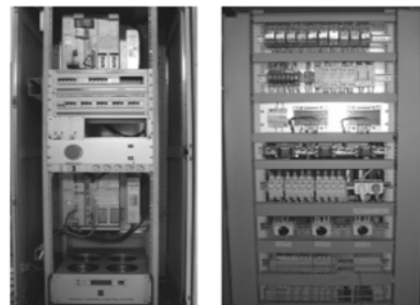


图 15 VST 望远镜配电机柜  
Fig. 15 Power cabinet of VST

随着微型控制器技术的发展,基于 VME 总线的新型伺服运动控制卡在望远镜伺服控制系统中得到了较多应用,该类型的控制器便于系统的集成和系统的更新。例如 GTC 望远镜伺服控制系统的控制器,其实时的硬件平台是基于 VME64 处理单元,控制板集成了 Motorola 公司的 MVME5100 芯片,通过网络与控制系统的其他部分进行通信。

GTC 望远镜方位轴和俯仰轴具有相同的控制单元,控制单元完成位置的闭环、运动控制和运动轨迹的跟踪功能<sup>[12]</sup>。近年来,基于 PLC 的运动控制卡在望远镜伺服控制系统中得到了应用,例如 VLT 望远镜由基于 VME/VxWorks 的控制系统更新为基于 PLC/EtherCAT 的控制系统。应用 PLC 控制有很多优点,最重要的是能够支持开放式的



通信协议,例如 EtherCAT、PLCopen(包含很多运动控制库标准)、和 OPC UA 通信协议。VLT 望远镜采用的是 EtherCAT 协议,这是因为 EtherCAT 协议非常灵活,支持分布式控制系统<sup>[31]</sup>。VLT 望远镜控制器实物图如图 16 和图 17 所示。

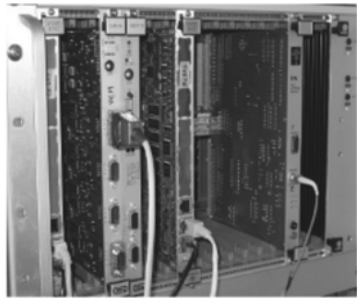


图 16 基于 VME/VxWorks 的控制器

Fig. 16 Controller based on VME/VxWorks

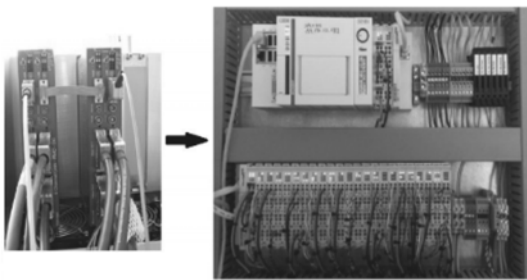


图 17 基于 PLC/EtherCAT 的控制器

Fig. 17 Controller based on PLC/EtherCAT

随着半导体技术的发展,半导体场效应管(MOSFET)、绝缘栅极晶体管(IGBT)等电力电子器件得到迅速的发展,并在变频控制领域得到广泛的应用。目前国外著名公司,如三菱、ABB、英飞凌、科尔摩根、Parker 等,在大功率驱动控制领域成绩显著。20 世纪 90 年代出现的智能功率模块(IPM)集过压、欠压、过温、过流保护功能于一体,在永磁同步力矩电机驱动领域得到了广泛的应用<sup>[32]</sup>。目前国际上的大型望远镜电机驱动器通常采用集成 IGBT 功率模块,如 GTC、LBT、VLT 等。在 VLT 望远镜的驱动器采用的是标准驱动技术 Digitax 750 VLT,该驱动器 PWM 频率范围为 8~16 kHz,IGBT 模块耐压为 1 200 V;LBT 望远镜采用的驱动器是 231P,该驱动器可以达到 1.8 kHz 的带宽,从而实现力矩的快速性响应。VST

望远镜采用 Moog 公司的 DBM04 驱动器<sup>[33]</sup>,VST 望远镜控制系统的控制驱动如图 18 和图 19 所示。

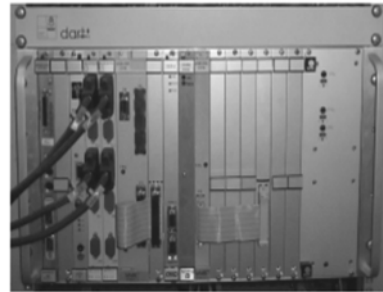


图 18 VST 控制器

Fig. 18 Controller of VST



图 19 VST 驱动器

Fig. 19 Driver of VST

#### 4.2 大型望远镜交流伺服系统位置编码器

当前大型望远镜通常采用光学编码器作为角度检测元件,光学编码器是由带有刻痕的圆光栅和读数头组成。编码器分为增量式编码器和绝对式编码器,主要的编码器提供商是 RENISHAW 公司和 HEIDENHAIN 公司,增量式编码器在系统上电时,无法确定绝对位置,但是如果提供了绝对位置参考,增量式编码器也可以用于绝对位置测量,两种编码器如图 20 所示。

绝对式编码器通常安装在大型结构上,用于绝对位置的测量,其绝对精度可以达到 1";增量式编码器具有更高的分辨率(小于 0.1"),用于望远镜的精密跟踪;钢带编码器属于增量式编码器的一种形式,其分辨率随着安装直径的增大而增大,如 VLT 望远镜方位轴、俯仰轴分别采用的是直径 7 和 1.6 m 的钢带编码器,钢带编码器的刻划精度为 40  $\mu\text{m}$ <sup>[34]</sup>。

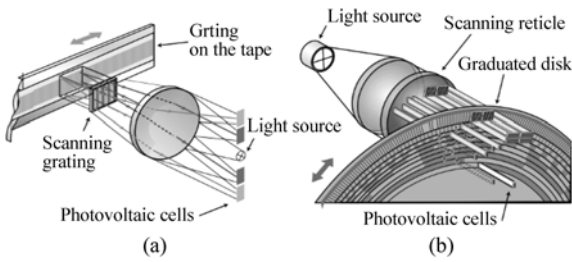


图20 增量式编码器(a)和绝对式编码器(b)

Fig. 20 Incremental encoder (a) and absolute encoder (b)

## 5 大型望远镜交流伺服系统控制策略发展现状

交流永磁同步力矩电机两种应用最广泛的控制策略为直接转矩控制和矢量控制<sup>[35-36]</sup>。在大型望远镜控制领域,许多先进的控制策略已经得到了成功应用,如LQG控制、 $H_\infty$ 控制、内模控制器以及滑模控制等<sup>[37-39]</sup>。望远镜伺服系统中采用上述控制策略主要目的是克服系统中的非线性力扰动因素,提高望远镜控制系统的位置跟踪精度。

### 5.1 直接转矩控制

直接转矩控制是由德国鲁尔大学 Depenbrock 教授于20世纪80年代提出。控制思想是采用磁场定向的方法,根据转矩和磁链的位置信息合成合适的电压矢量,从而达到对电机转矩和磁链的直接控制<sup>[40]</sup>。直接转矩控制方法以其良好的动态性能、鲁棒性、响应速度在永磁同步力矩电机的控制中得到了广泛的应用<sup>[41-42]</sup>。但是直接转矩控制中由于引入了反电压矢量将导致转矩和磁链的波动,从而影响永磁同步电机的控制性能。此外,直接转矩控制在实际应用过程中存在磁链观测困难,非线性振荡和参数扰动问题,因此很难实现永磁同步电机的高精度控制<sup>[43]</sup>。

### 5.2 矢量控制

矢量控制是由德国西门子公司 Felix Blaschke 于20世纪70年代提出,其控制的本质是通过坐标变换的方法将定子电流分解成相互垂直的转矩分量和励磁分量,然后对其进行独立控制,从而实现转矩和磁通的解耦控制<sup>[44]</sup>,矢量控制原理图如

图21所示。矢量控制以其调速范围宽、精度高、动态性能好的特点在精密机床和高精度机械加工领域得到了广泛的应用。矢量控制相比于直接转矩控制,具有转矩脉动小、启动性能好、过载能力强的特点,因此,在大型望远镜交流控制系统中得到了应用,如VLT望远镜、GTC望远镜等<sup>[45-46]</sup>。

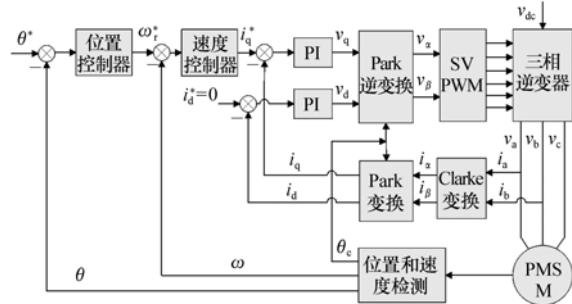


图21 永磁同步力矩电机矢量控制原理框图

Fig. 21 Block diagram of vector control for PMSM

### 5.3 LQG 控制

LQG (Linear-Quadratic-Gaussian) 控制以其带宽高、抗扰动能力强的特点在大型望远镜控制中得到了成功应用。文献[47]介绍了LQG在大型射电望远镜控制系统中的两种不同应用方法—LQG速度环控制器和LQG位置环控制器,分析比较了LQG控制器在速度环和位置环中的应用效果,得出了LQG控制器相比于PI控制器能够明显提高系统带宽、缩短调节时间。由于LQG控制器的设计需要望远镜的控制模型,因此,在控制器设计之前需要辨识系统的模型。

### 5.4 $H_\infty$ 控制

文献[48]讨论了 $H_\infty$ 控制在光学望远镜和射电望远镜控制系统中的应用问题, $H_\infty$ 控制器的结构与LQG控制器结构类似,但是两者的控制器参数计算方法不同。对于大型望远镜来说,跟踪误差主要是由于风载激励引起的,LQG控制器能够提高系统的跟踪性能,但是在控制过程中控制器的抗扰动性能没有直接表示出来; $H_\infty$ 控制器的设计兼顾了系统的跟踪性能和抗扰动能力。文献[49]介绍了 $H_\infty$ 控制器在大型射电望远镜中的设计方法,控制器设计时考虑了风载扰动的影响,相比于PI控制器和LQG控制器提高了系统的鲁棒性。

## 5.5 滑模控制

滑模控制属于变结构控制,它是一种不连续控制,系统的结构具有随时间变化的开关特性,其特点是根据被调量的偏差及其导数,使系统有目的沿着设计好的滑模面运动。这种滑模面是可以设计的,与系统的参数及扰动没有关系。因此系统具有很强的鲁棒性<sup>[50]</sup>。滑模控制不需要系统参数的在线辨识,近年来在交流伺服控制系统中得到了广泛的应用<sup>[51-53]</sup>。由于大型望远镜需要克服风载等扰动的影响,要求伺服控制系统具有很强的抗扰动能力,滑模控制器的强鲁棒性能够满足该方面的要求。滑模控制本质上是一种开关控制,使系统存在“抖振”问题,针对“抖振”抑制问题已有很多的解决方法,如饱和函数法、边界层法等<sup>[54]</sup>。将滑模控制应用到大型望远镜控制系统中,也需要解决控制器引起的抖振问题。文献<sup>[55]</sup>详细介绍了滑模控制在大型望远镜主轴控制系统中的应用,并给出了系统的跟踪效果。

## 6 大型望远镜交流伺服系统设计难点

大型望远镜伺服控制系统主要负责在补偿地球自转的同时克服系统内部和外部扰动,使望远镜达到定点和跟踪的指标要求。如果达到望远镜跟踪精度要求,交流伺服系统的设计存在如下难点:

(1)设计专用、高精度、集成化、大功率交流伺服系统驱动控制器。

### 参考文献:

- [1] ANDERSEN T, ENMARK A. *Integrated Modeling of Telescopes* [M]. Springer Science & Business Media, 2011.
- [2] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 328-336.  
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large telescope ground-based telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 328-336. (in Chinese)
- [3] 王国民. 天文光学望远镜轴系驱动方式发展概述[J]. 天文学进展, 2008, 25(4): 364-374.  
WANG G M. Review of drive style for astronomical optical telescope [J]. *Process in Astronomy*, 2008, 25(4): 364-374. (in Chinese)
- [4] SEDGHI B, MILLER M, BONNET H, et al.. Field stabilization (tip/tilt control) of E-ELT [J]. *SPIE*, 2010, 7733: 773340-12.
- [5] MACMYNOWSKI D G, BLAUROCK C, ANGELI G Z. Dynamic analysis of TMT [J]. *SPIE*, 2008, 7017: 70170W-12.
- [6] WOLTJER L. *Large Ground-Based Telescopes* [M]. Frontiers of Space And Ground-Based Astronomy. Springer Netherlands, 1994: 123-127.
- [7] 王富国, 杨飞, 赵宏超, 等. TMT 三镜系统的研究进展[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 644-650.

(2)研究简便、操作性强的控制模型辨识方法,将望远镜直流伺服系统的设计思路引入交流伺服的设计中。

(3)针对控制系统中的非线性力矩扰动,例如轴系摩擦力矩扰动、电机的齿槽力矩波动和风载力矩扰动,设计有效地控制策略以补偿上述力矩扰动的影响,提高伺服系统的跟踪精度。

## 7 结束语

综上所述,目前国际上在建的大型望远镜大多采用了基于分段弧形永磁同步力矩电机的直接驱动方式,也是国内大口径望远镜驱动形式的未来发展趋势,基于分段弧形永磁同步力矩电机伺服控制系统将成为研究的热点,研究的问题主要集中在以下方面:

(1)由于直驱电机采用分段弧形永磁同步力矩电机,如何解决多弧段直线电机同步运行问题,尚需进一步的研究。

(2)大型望远镜的俯仰轴通常采用2台永磁同步力矩电机,2台同步电机需要共轴驱动负载,要想实现两台电机的同步运行,我们需要进一步研究此类共轴伺服控制系统的分析和设计方法。

(3)当系统出现故障时伺服系统可能出现“飞车”事故,这将对望远镜上的光学系统和科学观测设备造成损坏,因此,需要详细研究大型望远镜驱动电机的“制动”措施和控制系统的保护措施。

- WANG F G, YANG F, ZHAO H CH, *et al.*. Process in TMT M3 system[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):644-650. (in Chinese)
- [8] 王建立. 光电经纬仪电视跟踪捕获快速运动目标技术的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
- WANG J L. Study on TV tracking system of O-E theodolite to track and acquire fast moving targets[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
- [9] 马佳光, 尹义林. 778 光电经纬仪跟踪控制系统[J]. *光学工程*, 1986, 1:50-60.
- MA J G, YIN Y L. The 778 tracking control system[J]. *Optical Engineering*, 1986, 1:50-60. (in Chinese)
- [10] KUMAR T S, BANAVAR R N. Design and development of telescope control system and software for the 50/80 cm Schmidt telescope[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(8):081607-081607.
- [11] 常九健. 基于弧形电机拼接的大型望远镜驱动技术研究[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2013.
- CHANG J J. New direct drive method for large telescope base on Arc PMLSM[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [12] FILGUEIRA J M, RODRIGUEZ D. GTC control system: an overview[J]. *SPIE*, 1998, 3351:2-12.
- [13] GUTIERREZ P. Standardization of direct drive servos in telescope applications[J]. *SPIE*, 2003, 4837:325-335.
- [14] NEGISHI S, KANZAWA T, TOMONO D, *et al.*. Subaru Telescope improved pointing accuracy in open-loop and Az rail flatness[J]. *SPIE*, 2006, 6267:62673K-10.
- [15] GIACOMEL L, MANFRIN C, MARCHIORI G. The European ALMA Production Antennas: new drive applications for better performances and low cost management[J]. *SPIE*, 2008, 7012:701236-11.
- [16] LI X, WANG D, SONG X, *et al.*. Research on large aperture telescope drive control technology[J]. *SPIE*, 2012, 8450:84505B-7.
- [17] JIAN C J, LI M W, LONG H J. Design and optimization of arc permanent magnet synchronous motor used on large telescope[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(5):1943-1947.
- [18] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于 DSP 和 FPGA 的望远镜伺服控制系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3):908-914.
- DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Design of Telescope servo system based on DSP and FPGA[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3):908-914. (in Chinese)
- [19] CONSOLI A, SCALBA G, SCARCELLA G, *et al.*. An effective energy-saving scalar control for industrial IPMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(9):3658-3669.
- [20] CICALA S, ALBINI L, PARASILITI F, *et al.*. Design of a permanent magnet synchronous motor with grain oriented electrical steel for direct-drive elevators[C]. 2012 XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), IEEE, Marseille, France, 2012:1256-1263.
- [21] GILMOZZI R. Science and technology drivers for future giant telescopes[J]. *SPIE*, 2004, 5489:1-10.
- [22] SU REZ M, ROSICH J, ORTEGA J, *et al.*. The GTC main axes servos and control system[J]. *SPIE*, 2008, 7019:70190J-12.
- [23] ERM T, GUTIERREZ P. Integration and tuning of the VLT drive systems[J]. *SPIE*, 2000, 4004:490-499.
- [24] MIYAWAKI K, ITOH N, SUGIYAMA R, *et al.*. Mechanical structure for the SUBARU Telescope[C]. 1994 Symposium on Astronomical Telescopes Instrumentation for the 21st Century. International Society for Optics and Photonics, Kailua, Kona, HI, USA, 1994:754-761.
- [25] MARCHIORI G, RAMPINI F, LAPEYRE P. The European ALMA project: new design and technologies for innovative performances[J]. *SPIE*, 2008, 7012:70120P-9.
- [26] ERM T M, SEPPEY A. A cost effective direct drive option for the Thirty Meter Telescope[J]. *SPIE*, 2006, 6273:627335-8.
- [27] WILKES J D, CARTER C J, FOSTER A, *et al.*. Gemini mount control system: description and progress[C]. Optical Science, Engineering and Instrumentation 97. International Society for Optics and Photonics, San Diego, CA, USA, 1997:308-319.
- [28] BALLESTER P, DISARO A, DORIGO D, *et al.*. The VLT data quality control system[J]. *The Messenger*, 1999, 96:19-

- 21.
- [29] SCHIPANI P, BRESCIA M, CAPACCIOLI M, *et al.*. The VST telescope optomechatronic control system[J]. *SPIE*, 2007, 6719: 67190D-8.
- [30] MOLFESE C, SCHIPANI P, CAPACCIOLI M, *et al.* VST telescope azimuth and altitude axes control hardware[J]. *SPIE*, 2008, 7012: 70123L-7.
- [31] POPOVIC D, BRAST R, DI LIETO N, *et al.*. Motion control solution for new PLC-based standard development platform for VLT instrument control systems[J]. *SPIE*, 2014, 9152: 915209-12.
- [32] 范祝霞, 欧阳红林, 钱鋈, 等. 基于旋转变压器的 PMSM 驱动系统位置反馈的研究[J]. *电气传动*, 2010, 40(3): 40-42.
- FAN ZH X, OUYANG H L, QIAN J, *et al.*. Study on the position feedback of a resolved-based of PMSM drive system [J]. *Electricdrive*, 2010, 40(3): 40-42. (in Chinese)
- [33] MANCINI D, MOLFESE C, SCHIPANI P, *et al.*. VST telescope electronic hardware control system overall description [C]. 50 Congresso Nazionale della SAI Torino, 2006: 12-20.
- [34] RAVENSBERGEN M, MERINO R, WANG C P. Encoders for the altitude and azimuth axes of the VLT[J]. *SPIE*, 1995: 322-328.
- [35] LEONHARD W. Control of a Separately Excited DC Machine[J]. *Control of Electrical Drives*, 2001: 77-96.
- [36] PANDYA S N, CHATTERJEE J K. Torque ripple minimization in DTC based induction motor drive using carrier space vector modulation technique[C]. 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, IEEE, 2010: 1-7.
- [37] GAWRONSKI W, PEREZ-ZAPARDIEL P. Performance comparison of the LQG and PI controllers in wind gusts[J]. *IPN Progress Report*, 2007: 42-167.
- [38] GAWRONSKI W, ed. *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*[M]. Springer Science & Business Media, 2004.
- [39] 李洪文. 基于内模 PID 控制的大型望远镜伺服系统[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 327-332.
- LI H W. Servo system of large telescope based on internal model PID control method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 328-332. (in Chinese)
- [40] YUWEN H, CUN T, YIKANG G, *et al.*. In-depth research on direct torque control of permanent magnet synchronous motor[C]. IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IEEE, 2002, 2: 1060-1065.
- [41] UDDIN M N, CHY M M I. A novel fuzzy-logic-controller-based torque and flux controls of IPM synchronous motor[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, 46(3): 1220-1229.
- [42] 孙丹. 高性能永磁同步电机直接转矩控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- SUN D. High Performance Direct Torque Control for PMSM[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [43] 侯利民. 永磁同步电机传动系统的几类非线性控制策略研究及其调速系统的实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- HOU L M. Research on nonlinear methods of PMSM drive system and realization of speed control system[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010. (in Chinese)
- [44] 暨绵浩. 永磁同步电动机及其调速系统综述和展望[J]. *微特电机*, 2007, 35(3): 49-52.
- JI M H. Summarize and prospect of the PMSM system of frequency-conversion and timing[J]. *Micro Motor*, 2007, 35(3): 49-52. (in Chinese)
- [45] WIRENSTRAND K. VLT telescope control software; an overview[J]. *SPIE*, 1995, 2479: 129-139.
- [46] FILGUEIRA J M, I PUIG M P, GOMEZ-CAMBRONERO P, *et al.*. Architectural design of the GTC control system[C]. SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, Munich, Germany, 2000: 35-45.
- [47] GAWRONSKI W K, RACHO C S, MELLSTROM J A. Application of the LQG and feedforward controllers to the deep space network antennas[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1995, 3(4): 417-421.
- [48] GAWRONSKI W. *Modeling and Control of Antennas and Telescopes*[M]. Springer Science & Business Media, 2008.
- [49] GAWRONSKI W. Design and performance of the  $H_{\infty}$  controller for the beam-waveguide antennas[J]. *Jet Propulsion Laboratory, Tech. Rep*, 2011.

- [50] 孙宜标,郭庆鼎. 交流直线伺服系统的模糊滑模变结构控制[J]. 沈阳工业大学学报,2002,24(4):317-321.  
SUN Y B, GUO Q D. Application of digital image technique to metallograph processing[J]. *J. Shenyang University of Technology*, 2002, 24(4):317-321. (in Chinese)
- [51] EL-SOUSY F F M. Robust wavelet-neural-network sliding-mode control system for permanent magnet synchronous motor drive[J]. *IET Electric Power Applications*, 2011, 5(1):113-132.
- [52] ACARY V, BROGLIATO B, ORLOV Y V. Chattering-free digital sliding-mode control with state observer and disturbance rejection[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(5):1087-1101.
- [53] 曹小涛,孙天宇,赵运隆,等. 空间大口径望远镜稳像系统现状发展及趋势[J]. 中国光学,2014,7(5):740-748.  
CAO X T, SUN T Y, ZHAO Y L, et al.. Current Status and development tendency of image stabilization system of large aperture space telescope[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5):740-748. (in Chinese)
- [54] YANG J, LI S, YU X. Sliding-mode control for systems with mismatched uncertainties via a disturbance observer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(1):160-169.
- [55] SLOTINE J J E, LI W. *Applied Nonlinear Control*[M]. Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, 1991.

#### 作者简介:



邓永停(1987—),男,山东潍坊人,博士,主要从事大型望远镜精密跟踪控制及电子学设计方面的研究。E-mail: dyt0612@163.com



王建立(1970—),男,山东曲阜人,博士,研究员,博士生导师,主要从事大型望远镜总体技术方面的研究。E-mail:wangjianli@ciomp.ac.cn



李洪文(1971—),男,四川乐至人,博士,研究员,博士生导师,主要从事大型望远镜电控总体技术方面的研究。E-mail:lihongwen1970@yahoo.com