

文章编号 1004-924X(2013)08-2056-08

天文光学望远镜摩擦驱动滑移动态检测与修正

杨世海^{1,2,3*}, 王国民^{1,2}

- (1. 中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;
2. 中国科学院 南京天文光学技术研究所 天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:考虑滑移对摩擦驱动望远镜精度的影响,提出了天文光学望远镜摩擦驱动滑移动态检测与修正的控制方法。建立了滑移动态检测系统、正压力主动调节系统、负载波动模拟和检测系统。用钢带光栅尺检测动负载位置,由同轴安装的角度编码器检测主动摩擦轮位置,根据减速比 λ 的变化判断主动轮和从动轮之间是否发生了相对滑移。主控单元可编程多轴运动控制器(PMAC)用来实时控制正压力电机进行压力修正并随之修正系统控制算法以提供足够的摩擦驱动力来减轻、消除滑移现象。实验表明:该方法能及时修正望远镜驱动系统出现的滑移,从而提高望远镜跟踪精度及可靠性。在最严重滑移的情况下,系统可在 100 ms 内判断出滑移,74.2 s 完成校正并恢复望远镜的高精度跟踪。此方法既可用于单点摩擦驱动也可用于多点摩擦驱动,能够有效解决非线性干扰带来的滑移问题。

关键词:天文望远镜;摩擦驱动;滑移;非线性扰动;动态检测

中图分类号:TH751 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20132108.2056

Detection and correction of slippage from friction drive for astronomical optical telescope

YANG Shi-hai^{1,2,3*}, WANG Guo-min^{1,2}

- (1. *National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;*
 2. *Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;*
 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: shyang@niaot.ac.cn*

Abstract: As slippage influences the tracking error of a telescope with friction drive, a way to detect and correct the slippage of friction drive was proposed for astronomical optical telescopes. A slippage dynamic detection system, a normal pressure active adjustment system, and a simulation and detection system of load fluctuation were established. The position of dynamic load was measured by a tape encoder and the position of active drive wheel was measured by a coaxial angle encoder. Then, the slippage was detected by transmission ratio. The Programming Multiple Axis Controller (PMAC) was

收稿日期:2013-02-26;修订日期:2013-03-18.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 11073034; No. 10778630; No. 10903033);江苏省“333 高层次人才培养工程”资助项目

used as a main control unit to control the normal pressure motor to adjust pressure and the control algorithm was also modified. By above way, enough friction drive force was obtained and the slippage was alleviated or eliminated. Experimental results indicate that the way can correct the slippage in time, improve the tracking precision of the optical astronomical telescopes and increase the stability of the drive system. In the most severe case, the friction drive system can resume the high accuracy tracking by detecting the slippage in 100 ms and completing the correction in 74.2 s. The method can be used for both single-point friction drive and multi-point friction drive and can solve the slippage caused by nonlinear disturbance.

Key words: astronomical telescope; friction drive; slippage; nonlinear disturbance; dynamic detection

1 引言

摩擦驱动性价比极高,没有周期性累积误差,没有空回,望远镜运动时传动平稳、无振动、响应速度比较快,在低速下能够获得很高的传动精度,因此,很多大型天文光学望远镜采用了外圆滚动摩擦作为其主轴的驱动方式。口径4 m级的LAMOST望远镜^[1]、8 m级的Gemini望远镜^[2]、10 m级Keck望远镜^[3]都采用了摩擦驱动。

但是更大口径的天文望远镜却回避使用摩擦驱动。例如研制中的30 m望远镜TMT(Thirty Meter Telescope),采用直接驱动^[4],其中一个重要原因是摩擦驱动存在滑移现象。滑移包括弹性滑移、几何滑移和宏观滑移。宏观滑移即“打滑”,其原因是负载大于主动轮和从动轮间正压力 N 与摩擦系数的乘积,这是一种过载效应,此时两轮接触区内不存在粘连区。宏观打滑不严重时,传动不可靠且效率低。长期或严重滑移则会造成摩擦传动副的永久损伤。

大型地平式天文望远镜通常运行在超低速下,速度一般不超过几十角秒/秒。在这样的低速下,滑移对望远镜动态性能有很大的影响,跟踪不平稳,星像在视场中抖动。

在实际工作中,大型天文望远镜运行时面临着许多非线性扰动导致摩擦驱动产生滑移,如风载、电机力矩波动、摩擦轮圆度、圆柱度等。另外,某些情况导致摩擦系数改变,致使摩擦驱动力变化,从而引起接触表面的相对滑移;主、从动轮接触表面粗糙度;大型天文望远镜一般需要打开圆顶,处于露天工作,摩擦轮接触表面间易污染杂质;某些寒冷气候甚至是极端气候(如南极Dome A)条件下,金属摩擦轮表面会结霜。

解决滑移的常用办法是增大主、从动摩擦轮间的正压力,但是此方法易引起摩擦表面的过度磨损。采用多点摩擦驱动也是解决滑移问题的有效方法,它通过减小滑移几率而减小传动误差。多点摩擦驱动所需要的正压力相对较低,可减少摩擦盘的磨损,且能提供多倍的摩擦力矩,从而获得更大的驱动加速度。不过,多点摩擦驱动需要控制系统增加闭环控制数目,成倍地增加本已昂贵的造价;多个电机闭环驱动同一高精度负载,存在同步问题。

中国科学院云南天文台的李祝莲、熊耀恒在1.2 m地平式望远镜伺服控制和传动系统中,分析单点和多点摩擦驱动的力学特性,提出通过传动比的变化来检测摩擦驱动中是否存在打滑^[5]。不过文章没有提出解决滑移的方法,目前也没有进一步研究的报道。Lick天文台在Shane 3 m和Nickel 1 m望远镜上也曾做过2种滑移的实测:一种是码盘对码盘的相对测量;另一种是码盘对固定基准点的偏差测量^[6]。可惜未能深入,也没有提出滑移解决方案。

对于摩擦驱动的宏观滑移, Juan Carlos González和Pedro Alvarez在10.4 m GTC望远镜设计报告书中,提出了采用自适应加压装置,但是他们并没有把这种思路付诸实践,而是基于对摩擦驱动滑移的分析,他们为GTC望远镜选择了直接驱动^[7]。

本文提出了一种滑移动态检测与修正的控制方法,并成功建立了一套滑移动态检测与修正控制系统。阐述了滑移动态检测与修正控制系统的原理、构成、实现以及实验。通过位置检测装置得到主动轮和从动轮的位置,通过传动比的变化检测是否发生滑移,通过正压力主动补偿和跟踪系统控制算法调整,消除滑移,保证望远镜平稳运

行。实验证明了该方法是正确可行的。

另外,本文还提出并建立了针对大口径摩擦驱动天文望远镜的负载波动动态模拟和检测控制系统,该系统是滑移动态检测与修正系统的实验基础。

2 摩擦驱动的实验装置及其原理

LAMOST 专门建立了一台 1 m 直径的摩擦驱动实验转台^[8-9],本文则在此基础上,设计制造了直径 8 m 的望远镜摩擦驱动仿真实验转台,采用 12° 的扇形架结构,如图 1 所示。旋转轴系用一组 SKF 精密角接触球轴承定位,并用推力球轴承承重。扇形架中间用滚动结构支撑。从动轮采用模块拼装式结构,通过螺钉安装在扇形架的右端。整个转台安放在实验室隔振基墩上。



图 1 8 m 望远镜摩擦驱动实验转台

Fig. 1 Friction drive turntable of 8 m telescope

8 m 望远镜摩擦驱动仿真实验转台采用的是外圆柱滚动摩擦驱动(R-R 型),如图 2 所示。在 2 个摩擦轮的接触处施加足够大的压紧力,当主动轮运动时就会产生摩擦力矩带动从动轮转动。摩擦驱动是依靠摩擦力来实现力矩的传递。

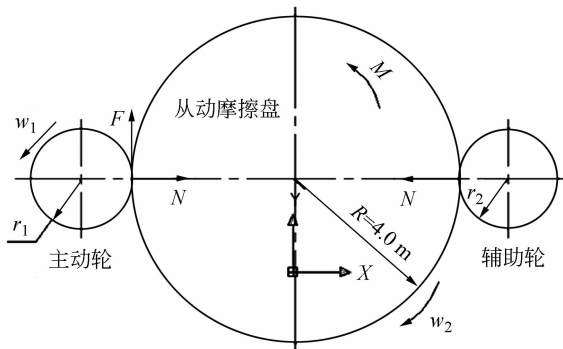


图 2 实验转台摩擦驱动原理图

Fig. 2 Schematic diagram of friction drive turntable

设负载力矩为 M , R 为从动轮半径, μ 为主从轮间的摩擦系数, K 为裕度系数,通常取 1.5~2.0。

忽略辅助轮转动时所产生的摩擦阻力矩,要实现运动传递,在主动轮和从动轮的接触点需要施加的正压力为^[10]

$$N = K \frac{M}{R\mu} \quad (1)$$

从图 2 的受力分析可以看出,辅助轮被用来抵消了正压力 N 。不过,主动轮作用在从动轮上的除了正压力外,还有圆周力 F 。

$$F = \frac{M}{R} < \mu N,$$

圆周力 F 无法平衡,其随负载力矩而变化,是作用在从动轮上的干扰力。

摩擦驱动必须保证主、从动摩擦轮间保持一定的正压力,以产生摩擦力来传递运动。但是主、从动摩擦轮的真实接触面积有限,尤其对于外圆滚动摩擦,理论上是线接触。大型天文望远镜是个大质量、大惯量的负载,为了驱动它,主、从动轮啮合点处必须保持比较高的压力,这容易引起摩擦轮表面过度磨损。摩擦驱动的天文望远镜主轴,需要施加的正压力少则几百公斤,多则 1~2 吨。

天文望远镜的使用还有个特点,它并非均匀使用摩擦盘,一般是对应天顶部分使用最多。长期使用后,大摩擦盘会变成椭圆或其他外形。这样使用弹簧等预紧加压的摩擦驱动,在不同的位置正压力会发生改变,使摩擦驱动力发生波动,从而影响到望远镜的跟踪平稳性和跟踪精度。

为了能够使大型摩擦驱动天文望远镜克服各种非线性干扰导致的滑移,获得高精度的低速跟踪性能,本文设计完成了一套负载波动和滑移动态响应控制系统,包括负载波动模拟系统、负载波动和滑移动态检测系统、正压力主动调节系统。

3 正压力主动调节机构

根据库仑摩擦定律,在摩擦系数一定的情况下,摩擦力与正压力成正比,摩擦力的大小可以通过正压力的调节进行改变。同理,改变摩擦系数,也可以改变摩擦力。这样,在以下情况下,正压力主动补偿就是一个可行的方法:(1)非线性干扰造

成的负载波动需要摩擦驱动力做出变化;(2)望远镜的主动轮、从动轮的摩擦系数改变而造成摩擦驱动力改变;(3)因为磨损等原因造成正压力的改变,影响到提供正常工作的摩擦驱动力。

摩擦驱动的望远镜一般按照所需的最大值,被动施加正压力。其中 LAMOST 采用了弹簧预紧加压的方式。此外,望远镜亦有采用液压、气压加力的方式。主、从动轮间正压力过小会引起摩擦副之间的相对滑移,正压力过大又会使接触表面产生塑性变形,并导致表面膜的破裂而黏着。一般来说,黏着磨损量和氧化磨损量都随着压力增加到某一临界值后迅速增大。如当压力超过金属材料硬度的 $1/3$ 时,其黏着磨损量急剧增加,严重时卡死。为解决这一难题,论文尝试以控制系统闭环的方式,主动实时调节正压力。如图 3 所示,正压力主动调节机构是随驱动负载波动而自动调节正压力的闭环控制系统。它接收系统中压力传感器反馈,根据理论或实验得到的最佳力矩或上位机命令力矩,得出正压力的修正值,而后通过控制系统驱动电机进行正压力调整,保证系统工作在最佳状态。

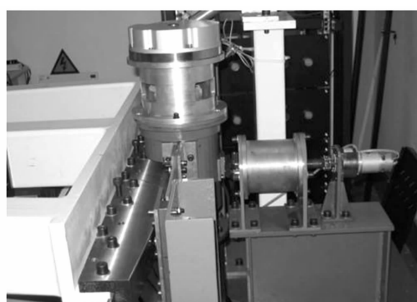


图 3 正压力主动调节机构实物图

Fig. 3 Normal pressure active adjustment system

可编程多轴运动控制器(PMAC)为正压力闭环主控单元,连续检测主从两轮间的正压力,将所测得数值与参考输入的正压力命令作比较,求得的误差信号经控制器的变换运算和放大器的放大后,驱动直流电机运动,使正压力能完全按照参考输入的要求去变化。采用双环控制,内环是电流环,外环是压力闭环。正压力闭环控制系统示意图如图 4 所示。

根据长期实验的经验数据和实时状态分析,可以控制直流电机将正压力精确地维持在某个值

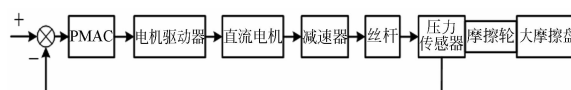


图 4 正压力控制系统示意图

Fig. 4 Block diagram of normal pressure control system

上;当负载因为磨损、热变形、加工精度等原因发生正压力改变时,压力闭环控制系统也可以主动实时调整电机进行加压或减压,以维持理想的摩擦驱动力。

4 负载波动模拟和检测系统的实现

滑移动态检测与修正的实验基础是负载波动模拟和检测系统,以模仿风载、惯量耦合、线缆变化阻力等非线性干扰造成的望远镜负载波动,从而人为造成滑移。

负载波动模拟系统用直流电机主动对摩擦驱动实验装置施加载荷,模拟负载的波动,如图 5 所示。其工作原理是:在摩擦驱动系统进行高精度、超低速跟踪时,工控机发出指令曲线,模拟非线性扰动,通过电机驱动器 Copley 421 驱动有刷直流电机,产生各种恒定的、变化的、周期性、非周期性的扰动力矩,用以测试各种扰动对摩擦驱动跟踪性能的影响。



图 5 负载波动模拟和检测机构实物图

Fig. 5 Simulation and detection system of fluctuating load

负载波动模拟系统主要包含工控机、DA 卡、有刷直流电机和电机驱动器。负载波动的检测系统主要包括 2 个扭矩传感器和 PMAC。扭矩传感器分别安装在主动摩擦轮和从动轮的旋转轴上。两个传感器的扭矩和扭矩差的变化反映了负载的波动情况。扭矩传感器的参数见表 1。

表 1 扭矩传感器主要技术参数
Tab.1 Parameters of torque sensor

扭矩传感器 RK-060	
量程/Nm	0~±20
输出电流信号/mA	4~20
精度/(%)	0.25
频率响应/μs	10
信号输出/V	1~5
供电电压/V _{DC}	24

Copley 421 驱动器供电为 24~180 V_{DC}, 连续输出电流为 5 A, 最大输出电流为 10 A。力矩电机连续堵转转矩 T=21 Nm。根据计算, 在工作加速度范围内, 8 m 望远镜摩擦驱动实验转台的负载转矩为 0.855 2~128.281 7 Nm。

力矩电机造成的力矩波动量

$$\frac{T}{M} = 16.4\% \sim 2\,455.6\% \quad (3)$$

当突加不同的脉冲力矩扰动时, 跟踪误差的曲线、速度曲线和扭矩差曲线如图 6 所示(8 m 望远镜摩擦驱动仿真实验转台控制程序实时屏幕截图)。

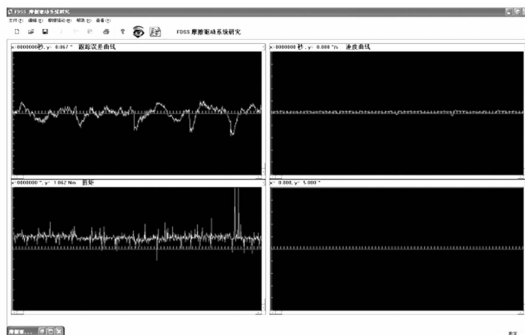


图 6 力矩扰动曲线

Fig. 6 Curve of torque disturbance

5 滑移动态检测与修正的控制系统

摩擦驱动天文望远镜滑移动态检测与修正的控制系统的结构如图 7 所示。根据机械设计, 主动轮的直径 d=25 mm, 从动大摩擦盘直径 D=8 000 mm, 所以摩擦驱动装置的减速比 i 为 320。

钢带光栅尺安装在 R=3 600 mm 的位置, 但是钢带光栅尺的角度值和 R=4 000 mm 摩擦轮外圆位置处的角度值相同、角度变化值相同, 都反映从动轮的角度的真正变化, 所以主动轮同轴角

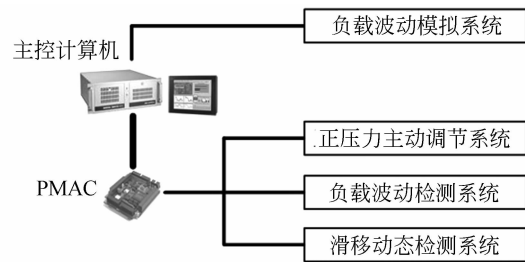


图 7 负载波动和滑移动态检测与修正系统的结构图
Fig. 7 Block of slippage dynamic detection and correction system

度编码器角度变化值与钢带光栅尺的角度变化值之比就是 λ。望远镜跟踪过程中, PMAC 根据 λ 的变化判断主动轮和从动轮之间是否发生了相对滑移。扭矩传感器辅助判断是否存在造成滑移的负载波动。滑移动态检测模型如图 8 所示。不过由于机械加工误差和弹性变形等原因, 即使摩擦驱动不打滑, 依然有 λ≠320。滑移修正的效果, 需要通过望远镜的跟踪误差、传动比是否恢复加以判断, 以最终确认是否应继续进行滑移修正。

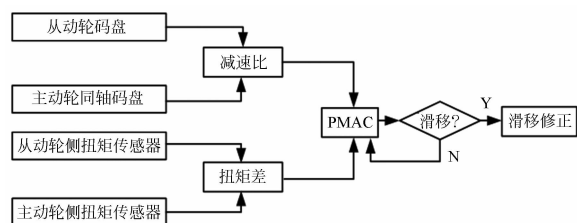


图 8 滑移动态检测模型

Fig. 8 Model of slippage dynamic detection

从动轮负载的位置由 RENISHAW RGH24 钢带光栅尺检测, 主动摩擦轮的位置由 HEIDENHAIN 角度编码器 RON905 检测。RON905 与永磁同步电机同轴安装, 其信号还进入 PHASE 无刷电机驱动器作为速度环的反馈。RGH24 钢带光栅尺信号和 RON905 信号通过编码器细分卡 ACC-51S 经过 4096 倍细分后输入 PMAC 2A-PC/104。PMAC 基于数字信号处理器 DSP, 是一种通用的运动控制器, 其功能强大, 集成了典型的控制算法^[11]。

PMAC 运动控制器实时控制正压力修正和系统控制参数的修正, 通过提供足够的摩擦驱动力以减轻甚至消除滑移现象。每一对摩擦驱动传动副对应一套正压力电机、电机驱动器、拉/压力传感器, 由 PMAC 运动控制器统一控制。

检测到滑移的同时,控制系统采用积分分离的算法,同时控制系统的速度限制会起作用,根据控制策略,电机转速被限制在 $|\omega_{\text{motor}}| \leq 2 * i * |\omega_{\text{command}}|$ 。摩擦驱动控制中引入积分环节的目的是为了消除静差,提高控制精度。但在滑移产生时,跟踪有很大的偏差,短时间内即会造成积分积累,致使输出的控制量极大,甚至出现超过执行机构允许的极限值,从而引起系统较大的超调,甚至导致系统振荡,这在望远镜跟踪过程中是绝对不允许的。此处采用积分分离控制的基本思路是:设定一个跟踪误差的极限值 $E_{\text{max}} > 0$ 。

1) $|e(k)| \leq E_{\text{max}}$, 保持原有控制算法, 积分起作用。

2) $|e(k)| > E_{\text{max}}$, 取消积分作用。

当滑移导致跟踪误差超过允许值时,取消积分作用,避免积分造成过大的超调量而降低系统稳定性,采用高增益的 PD 控制保证较快的动态响应。当滑移得到修正后,再次引入积分控制,以便消除静差,提高跟踪精度^[12]。滑移动态检测与修正的控制方法如图 9 所示。

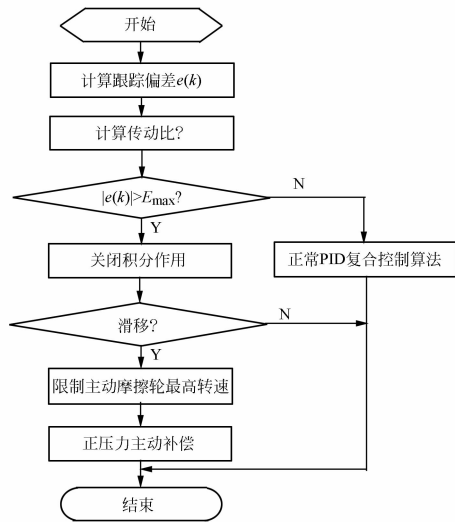


图 9 滑移动态检测与修正的控制方法

Fig. 9 Method of slippage dynamic detection and correction

6 实验与分析

为了验证滑移动态检测与修正方法的可行性,进行了如下实验。摩擦驱动实验转台稳定运行一段时间后,通过负载波动模拟系统,人为施加

一定大小的干扰转矩,如图 10 所示。该波动转矩达到一定值时会造成主动轮和从动轮之间发生宏观滑移。

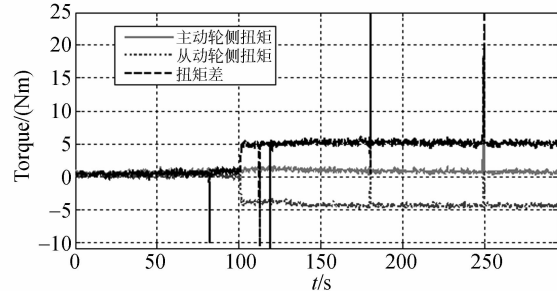


图 10 滑移过程扭矩变化曲线

Fig. 10 Curve of torque during slippage

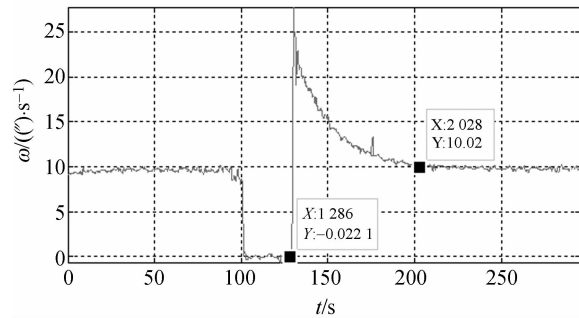


图 11 摩擦驱动从动轮速度曲线

Fig. 11 Velocity curve of driven wheel

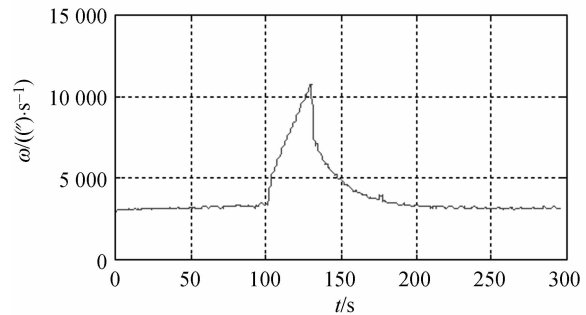


图 12 摩擦驱动电机速度曲线

Fig. 12 Velocity curve of motor

滑移动态响应系统实时监测传动比的变化,并驱使正压力主动调节系统工作。图 11 和图 12 显示了宏观滑移产生前后的摩擦驱动从动轮速度曲线和主动轮电机速度曲线,从曲线中可以清楚地看出打滑从轻微到严重的过程。图 13 显示了宏观滑移产生前后的摩擦驱动从动轮和主动轮位置曲线。

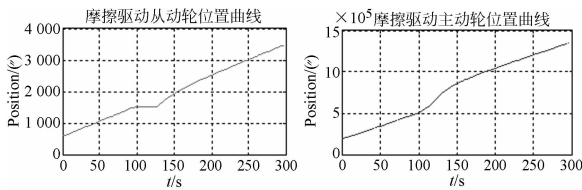
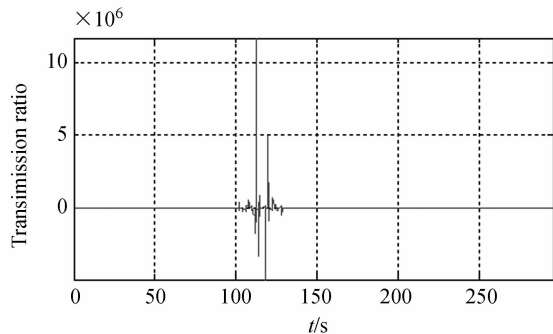


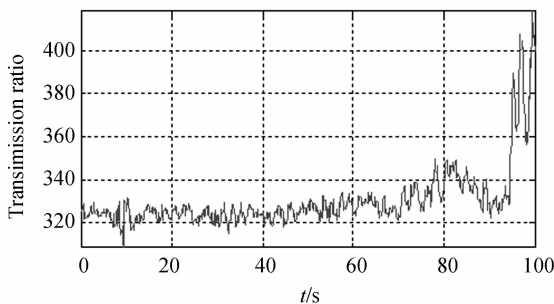
图 13 摩擦驱动从动轮和主动轮位置曲线

Fig. 13 Position curves of driven wheel and drive wheel



(a) 整个滑移过程传动比变化曲线

(a) Change curve of transmission ratio during slippage



(b) 滑移开始时的传动比变化曲线

(b) Curve of the transmission ratio at the beginning of slippage

图 14 传动比变化曲线

Fig. 14 Change curves of transmission ratio

当宏观滑移发生时,传动比剧烈改变,如图 14 所示,在 100 ms 内控制系统已经检测到滑移,但是为了清楚显示打滑过程,人为禁止了正压力控制系统进行动态补偿校正,打滑 30 s 后才加以校正。由于在宏观滑移时,传动比 $\lambda \rightarrow \infty$,在图 14 (a)中看不出正常工作时的传动比,图 14(b)截取了其中的一段,显示了从正常运行到开始滑移这个过程中传动比的变化。图 15 显示了滑移过程中正压力的校正。

控制系统在判断减速比异常时,根据控制策

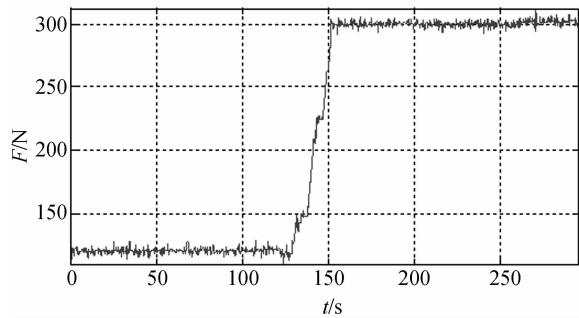


图 15 滑移时的正压力校正曲线

Fig. 15 Curve of normal pressure adjustment during slippage

略,电机转速限制: $|\omega_{motor}| \leq 2 * i * |\omega_{command}|$,不会如本实验这样加速到极大值。

另外开始校正后,由于主动轮电机超速,也会配合正压力控制进一步主动调速。本实验为更明显反映正压力控制的作用,禁止了主动轮电机主动调速,所以从开始校正滑移到恢复跟踪精度的时间比较长,用了 74.2 s。不同正压力、不同跟踪速度和不同扰动下,滑移的严重程度是不同的,滑移实际修正时间是有区别的。

以上实验数据证明了摩擦驱动的滑移动态检测与修正的方法是可行的、有效的。

7 结 论

非线性干扰导致的滑移是影响摩擦驱动望远镜跟踪精度的重要因素。大口径望远镜由于体积庞大、负载惯量大、承受风载的面积大等原因,摩擦驱动中的滑移问题更为严重。本文阐述了滑移动态检测与修正控制系统的原理、构成和实现,并通过宏观滑移实验进行了验证。实验数据显示,在最严重滑移的情况下,系统可在 100 ms 判断出滑移产生,74.2 s 完成校正,恢复系统高精度跟踪。实验证明了摩擦驱动滑移动态检测与正压力补偿修正方法的可行性。另外,由于正压力可以随负载变化而自动增减,可以避免摩擦驱动装置安装时可能过度增加正压力而带来的毫无意义的过载、功率损耗和机械磨损。需要指出的是,本文的研究是一种探索和尝试,并非是滑移唯一解决方式,例如前文所述,采用多点摩擦驱动就是解决滑移和正压力问题的经典方法。不过,本文的研究完全可以用于多点摩擦驱动,两者并无矛盾。

参考文献:

- [1] CUI X Q, ZHAO Y H, CHU Y Q, *et al.*. The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope(LAMOST)[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(9): 1197-1242.
- [2] RAYBOULD K, GILLET P, HATTON P. Gemini telescope structure design [J]. *SPIE*, 1994, 2199: 376-391.
- [3] PIERRE Y B. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* [M]. New York: Springer-Verlag Inc, 2003.
- [4] NELSON J. TMT status report [J]. *SPIE*, 2006, 6267: 1-17.
- [5] 李祝莲,熊耀恒. 1.2m地平式望远镜伺服控制和传动系统的特性——单点和多点摩擦传动的力学特性(一)[J]. *天文研究与技术:国家天文台台刊*, 2005, 2(1): 54-59.
- LI Z L, XIONG Y H. The property of servo-control and drive system for 1.2 m Alt-Az telescope-mechanics characteristics of single and multi-point friction drives (1) [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2005, 2(1): 54-59. (in Chinese)
- [6] KIBRICK R, ALLEN S. Method for measuring and reducing slippage of friction rollers employed in off-axis coupling of position encoders to telescopes [J]. *SPIE*, 1990, 1236: 777-789.
- [7] GONZÁLEZ J C, GRAN P A. Telescope CANARIAS conceptual design [R]. 1997.
- [8] 王国民,姚正秋,马礼胜,等. 大型天文望远镜高精度摩擦传动的研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(6): 592-597.
- WANG G M, YAO Z Q, MA L S, *et al.*. High precision friction drive of large telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 592-597. (in Chinese)
- [9] 汪达兴,杜福嘉. 大型天文望远镜摩擦传动系统低速特性的研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 274-278.
- WANG D X, DU F J. Ultra-low speed research on friction drive for astronomical telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 274-278. (in Chinese)
- [10] 王国民. 超低速高精度滚动摩擦传动的研究及其应用[D]. 南京:中国科学院南京天文光学技术研究所, 2005.
- WANG G M. *Ultra-low velocity and high precision friction drive study and its application*[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology/Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [11] 韩佩彤,李新国,刘芸. 基于PMAC的伺服系统误差补偿方法研究[J]. *传感器与微系统*, 2012, 31(8): 12-14.
- HAN P T, LI X G, LIU Y. Research on error compensation method of servo system based on PMAC[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 31(8):12-14. (in Chinese)
- [12] 张斌,李洪文,郭立红,等. 变结构PID在大型望远镜速度控制中的应用[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1613-1619.
- ZHANG B, LI H W, GUO L H, *et al.*. Application of variable structure PID in velocity control for large telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1613-1619. (in Chinese)

作者简介:



杨世海(1973—),男,安徽凤阳人,博士,副研究员,2005年、2012年于中国科学院研究生院分别获得硕士、博士学位,主要从事天文仪器的精密测量和运动控制等方面的研究。E-mail: shyang@niaot. ac. cn



王国民(1967—),男,江苏海安人,博士,研究员,主要从事精密及新型传动技术、天文仪器与技术等方面的研究。E-mail: gmwang@niaot. ac. cn