

文章编号 1004-924X(2004)06-0592-06

大型天文望远镜高精度摩擦传动的研究

王国民^{1,2}, 姚正秋¹, 马礼胜¹, 李国平¹

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种大型天文望远镜高精度摩擦传动的检测机构,用来检测主、从动轮旋转轴线的扭转角。并设计了相应的调整机构。利用这套机构使得主、从动轮的扭转夹角控制在 30° 以内。实验结果表明,在运行过程中没有出现抖动现象。传动系统长时间平稳运行的低速可达 0.2 / s,运动位置精度 RMS 值为 0.01 左右。30 min 内低速可达 0.05 / s,位置精度 RMS 值为 0.009 左右。正弦运动幅值 30°,最大速度 36 / s,最大加速度为 0.18 / s²。这些指标满足了 LAMOST 天文望远镜的技术要求。克服了由于安装等原因导致旋转轴线之间存在扭转角,进而使得天文望远镜所跟踪的目标在视场中出现抖动,甚至严重会漂移出视场的局限,实现了外圆摩擦传动主、从动轮旋转轴线在空间平行的理想位置。

关键词:天文望远镜;摩擦传动;传动精度;精度分析

中图分类号:TH751 文献标识码:A

High precision friction drive of large telescope

WANG Guo-min^{1,2}, YAO Zheng-qiu¹, MA Li-sheng¹, LI Guo-ping¹

(1. *National Astronomical Observatories/ Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, CAS Nanjing 210042, China;*

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: A kind of optical detecting mechanism is proposed to detect the skew angle between the axes of contact roller and wheel in high precision friction drive system adopted in large astronomical telescopes. The mechanism to adjust the skew angle is also given. With the help of these mechanisms, the skew angle between roller and wheel axes is controlled below 30°. The results of experiments show that there is no skip during the movement and the friction drive can achieve high precision at ultra slow speed. The lowest long-steady velocity of the experiment drive system is 0.2 / s with corresponding precision 0.01 (RMS), and during 30 min the lowest steady velocity is 0.05 / s with corresponding precision 0.009 (RMS). The precision of the variable velocity motion is 0.1 (RMS) with the corresponding amplitude 30°, maximum velocity 36 / s, maximum acceleration 0.18 / s². All these experiment results meet the LAMOST's specifications. The problem of object image tracked by telescope stirring in the field of view, what is more, drifting off the field of view caused by skew angle between axes of contact roller and wheel is solved by these mechanisms.

收稿日期:2004-04-22;修订日期:2004-11-18.

基金项目:国家重大科学工程项目(0983)资助课题。

The axes of roller and wheel can be kept in the ideal position in friction drive system.

Key words: astronomical telescope; friction drive; drive precision; precision analysis

1 引言

天文望远镜是天文学家用来观测天空星体、探索宇宙奥秘的重要仪器。不但要有好的光学系统,而且要有高精度的传动系统对所观测的目标进行跟踪,取得有关被观测目标的信息。而天文望远镜大多是工作在低速状态。因此,平滑稳定的低速高精度传动系统对大型天文望远镜显得非常重要。LAMOST 是我国目前在建的大科学工程项目,是一架通光口径 4 m、视场 5° 的大型天文望远镜^[1]。其高度轴、方位轴和像场旋转驱动均采用摩擦传动^[2]。摩擦传动在国外天文望远镜上已有应用^[3-6]。在我国精密机械和精密仪器领域也有研究^[7-10],理想的摩擦传动主、从动轮旋转轴线在空间是平行的,但由于安装等原因两旋转轴线在空间存在扭转角。这一扭转角的存在会产生类似于扭轮摩擦传动的运动^[11-13],但由于摩擦传动主、从动轮的支撑是刚性连接的,因此,在运动过程中会出现抖动现象,从而影响传动精度。这一问题在国外大型望远镜跟踪过程中时有发生。为此,LAMOST 项目组织了摩擦传动中间试验,对摩擦传动的低速特性进行研究。针对扭转角问题,本文提出了一种用于检测和调整两旋转轴线扭转角机构。并通过摩擦传动试验进行验证。本文对这一机构和相关实验进行了介绍,同时对影响传动精度的主要因素进行了分析。

2 摩擦传动原理及机构介绍

2.1 外圆摩擦传动原理

摩擦传动实验的原理图如图 1 所示。驱动电机通过减速器驱动主动轮,主动轮在加力机构的作用下,通过主、从动轮之间的摩擦力带动从动轮。系统中配有控制系统的反馈元件:测速电机用于速度环反馈和高精度光学增量式码盘用于位置环反馈。图 2 是中间实验装置照片。

2.2 光学检测、调整机构

理想摩擦传动的主、从动轮旋转轴线在空间应该是平行的。但由于安装等原因它们在空间存在夹角。夹角示意图如图 3 所示。主、从动轮旋转轴线在径向的夹角称之为倾斜角,在切向的夹角称之为扭转角。扭转角的存在会引起传动系统发生突跳,从而影响传动精度。倾斜角的存在影响接触面积,对打滑率产生影响,也会影响传动刚度^[10]。

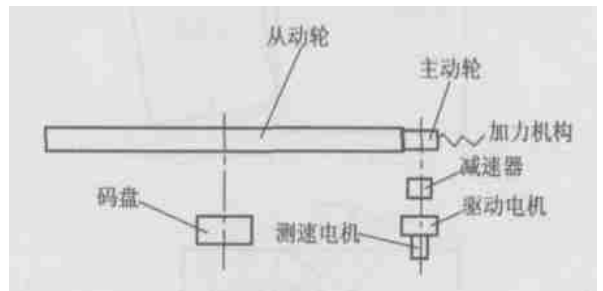


图 1 摩擦传动原理图
Fig. 1 Schematic diagram of friction drive

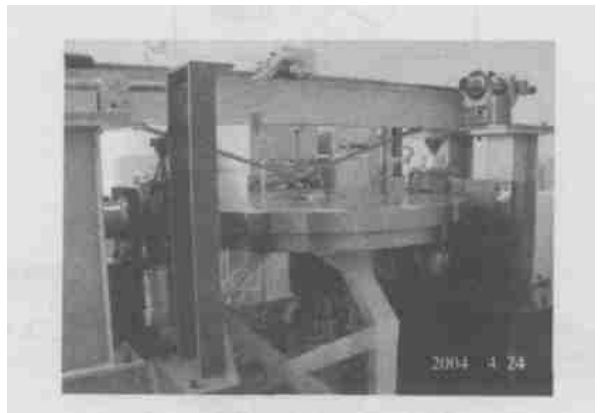


图 2 实验装置照片
Fig. 2 Picture of experiment equipment

为了克服倾斜角,本文实验装置中主动轮用 65 Mn 钢制成的弹性板支撑,如图 5 所示。钢板法向刚度为 32.5 Kg/mm。切向刚度为 1.85×10^4 Kg/mm。因此,在足够大的正压力作用下,由于弹性支撑板在摩擦轮径向的弹性变形,使得主、从动轮在径向能够很好地贴合,即倾斜角接近于零。

对于扭转角,本文提出了如图 4 所示的光学检测机构。主、从动轮上同轴安装有平面反射镜,

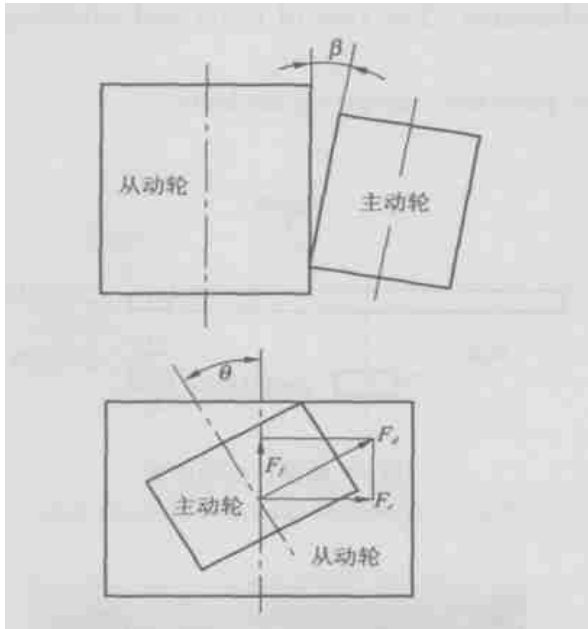


图 3 旋转轴线夹角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of skew angle

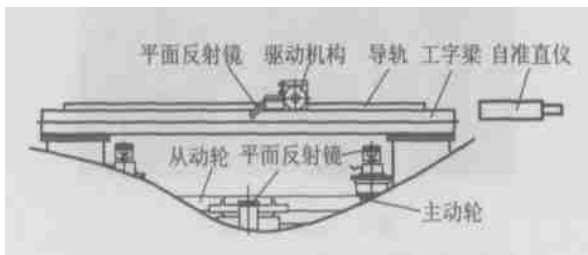


图 4 光学检测机构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of torsion angle testing

在主、从动轮上方安装高精度的滚动导轨副。导轨要严格通过主、从动轮旋转中心。导轨滑块上装有 45° 反射镜, 导轨滑块在驱动机构的作用下作往复运动。沿着导轨方向安放自准直仪, 自准直仪点光源发出的光通过 45° 反射镜、主从动轮的平面镜反射后在自准直仪中成自准直像。通过比较主、从动轮的自准直像可检测出它们相应旋转轴线的扭转角。自准直仪分辨率为 4', 通过此

装置检测出的角度误差在 30' 以内。检测出夹角后, 再通过调整机构进行调整。

调整机构如图 5 所示。调整以从动轮为基准对主动轮进行调整。主动轮传动箱通过左、右支撑板连于左、右支撑, 传动箱和左、右弹性板连成一体, 在调整螺杆的作用下可绕旋转支点上下转动。从而达到调整扭转角的目的。

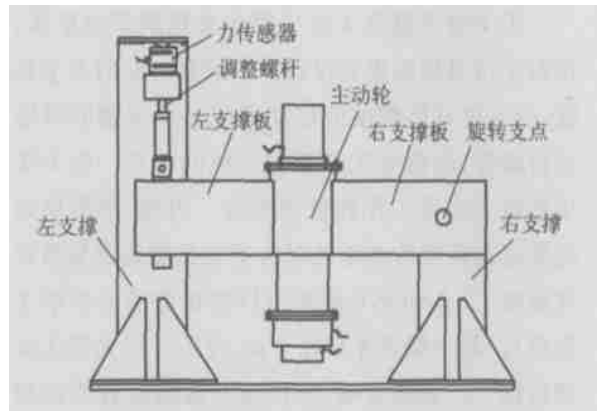


图 5 扭转角调整机构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of torsion adjusting mechanism

3 实验结果

3.1 匀速运动

采用上述检测调整机构对试验装置进行调整后, 在超低速下能够平稳运行, 没有出现突跳现象。长时间运行低速可达 0.2 /s。30 min 内低速可达 0.05 /s。且都有相当高的位置精度。共试验了 12 种不同的速度, 它们相应运行精度的 RMS 值、P-V 值如表 1 所示。实验数据在正压力为 200 N 时测得的 (正压力大小对传动精度也有影响)。0.05 /s、0.1 /s 的位置误差曲线如图 6、图 7。由曲线图可知, 本系统的低速特性性能较好。

表 1 精度-速度关系表

Tab. 1 Precision versus speed

速度 (/s)	位置精度 RMS (')	位置精度 P-V (')	速度 (/s)	位置精度 RMS (')	位置精度 P-V (')
0.05	0.009 0	0.085 6	10	0.105 8	0.831 4
0.1	0.008 7	0.087 3	15	0.157 8	1.209 4
0.2	0.008 3	0.088 9	30	0.254 6	1.757 2
0.5	0.012 4	0.161 2	60	0.513 8	4.535 7
1	0.013 9	0.211 5	90	0.814 5	5.637 3
5	0.041 6	0.321 9	120	1.267	7.108 6

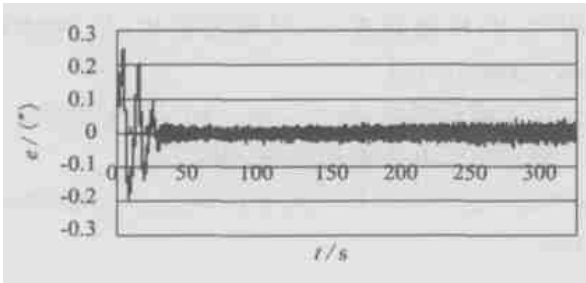


图 6 0.05 / s 位置误差曲线

Fig. 6 Position error curve(0.05 / s)

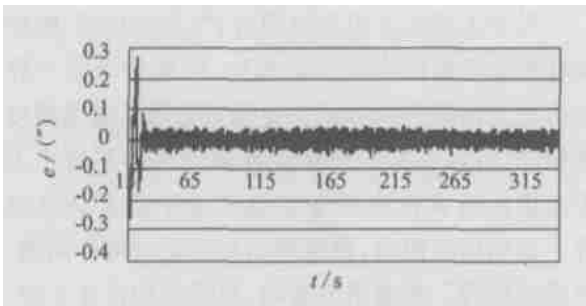


图 7 0.1 / s 位置误差曲线

Fig. 7 Position error curve(0.1 / s)

3.2 变速运动

望远镜在正常方位跟踪时一般以变速形态向前运动,即不反向运行。高度仅在过子午面时会短暂反向。因此,实验对这种变速运动进行了模拟。模拟的方法是在匀速的基础上加上正弦运动。变速运动的运行方程为: $S = 1800\sin(0.01t) + 18t$, S 单位为角秒。最大速度为 $36 / s$ (LAMOST 最大速度为 $15 / s$)。最大加速度为 $0.18 / s^2$ (LAMOST 最大加速度要求为 $2.65 \times 10^{-4} / s^2$)^[14]。变速运动的位移-时间曲线如图 8 所示。位置误差曲线如图 9 所示。图中只给出前 3 周期的曲线。变速运动共运行 1.5 h, 运行位置精度 RMS 值为 0.102 7。

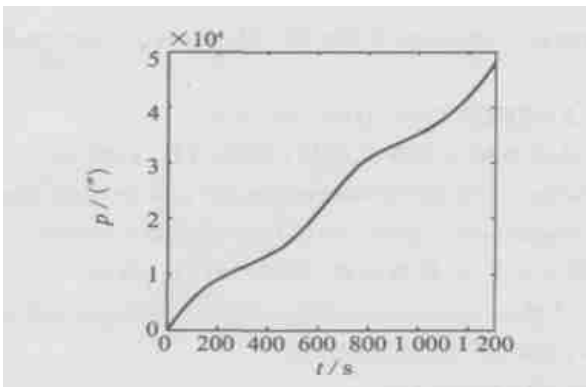


图 8 变速运动位移曲线图

Fig. 8 Position curve of variable motion

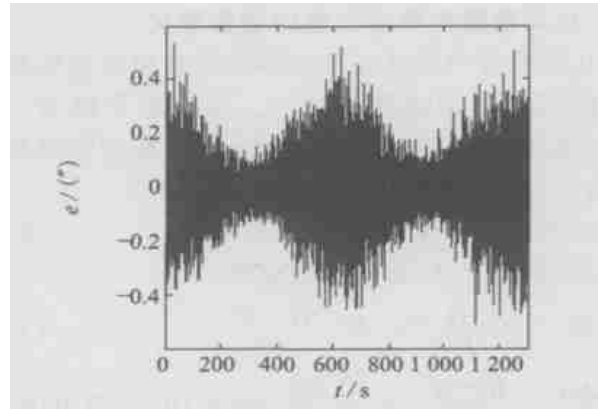


图 9 变速运动位移误差曲线

Fig. 9 Position error curve of variable motion

4 传动精度分析

除了上面提到的旋转轴线夹角影响传动精度外,由电机到从动轮之间的各个传动链环节误差也会对传动精度产生影响。有的是系统误差,如主、从动轮直径误差引起的传动误差。可通过控制修正值消除。有的则不是,下面对主要影响因素进行分析:

4.1 永磁直流伺服测速机组对传动精度的影响

由于机组转动的动力是由永磁电动机产生,因此,影响传动精度的主要是永磁电动机的运行性能。影响低速运行平稳性的直接因素是转矩脉动。包括齿槽效应引起的转矩脉动、摩擦转矩变化引起的输出转矩脉动等。当电机轴以恒角速度 ω_0 运行时,可以近似的认为扰动力矩 $M_d(t)$ 仅仅是时间 t 的函数^[15]。用一次谐波近似表示 $M_d(t)$, 即

$$M_d(t) = A \sin(\omega_z t), \quad (1)$$

式中, $\omega_z = \omega_0 Z$, Z 为电机转子齿槽数。由扰动力矩引起的相对角速度变化为:

$$\Delta \omega = \frac{M_d}{J \omega_0} = \frac{PAZ}{\sqrt{(\frac{2}{n} - \frac{2}{Z})^2 + 4 \frac{2}{n} \frac{2}{Z}}}, \quad (2)$$

式中, $|\Delta \omega|$ 是干扰力矩引起的角速度的模, $P = 1/J$, $n = (K_1 K_2 / J)^{1/2}$, $\omega_0 = K_T K_2 / 2 n J$

K_1 : 位置环增益 K_2 : 速度环增益 K_T : 速度反馈系数。

根据以上计算公式,代入实际参数,可计算出速度变化为: $\Delta \omega = 1.13 \times 10^{-3} = 1.13 \%$

4.2 从动轮径向跳动引起的速度变化

从动轮径向跳动误差会导致旋转半径发生变化从而引起传动速度波动^[8]。从动轮半径 $R = 500 \text{ mm}$, 径向跳动实测为 0.02 mm 。相应半径为 R , 由

$$R = R, \quad (3)$$

(、分别为 R 、 R 对应的角速度)

$$\text{得 } \frac{\omega}{\omega} = \frac{R}{R}, \quad \frac{\omega}{\omega} = \frac{R - R}{R}, \quad (4)$$

$$\omega = \frac{\omega}{\omega} = \left| \frac{R - R}{R} \right| = \frac{0.02}{500.02} = 4 \times 10^{-5} = 0.04 \% \quad (5)$$

4.3 主、从动轮滑动引起的误差

摩擦轮传动中存在 3 种滑动: 宏观滑动、几何滑动和微观滑动。本实验中通过正压力调整机构和光学检测调整机构避免了宏观滑动和主要的几何滑动。微观滑动是由材料弹性变形引起的, 其计算公式为^[10]

$$\omega_3 = \mu \left[\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{4N}{B} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{2(1 - \omega^2)}{E} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left[1 - \frac{Q}{\mu N} \right]^{\frac{1}{2}} \right], \quad (6)$$

式中: μ : 摩擦系数; R_1 、 R_2 : 主、从动轮半径; N :

法向压力; B : 接触宽度; ν : 材料泊松比; E : 弹性模量; Q : 合成切向力

代入设计参数, $\omega_3 = 2.26 \times 10^{-4} = 0.226 \%$

综合以上几方面的分析, 得:

$$\omega_{\max} = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1.13 \% + 0.04 \% + 0.226 \% = 1.4 \%$$

5 总 结

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直接驱动相比, 摩擦传动是一种性价比最高的传动方式。要想获得超低速高精度的传动, 有许多在一般精度要求的传动系统中不要考虑的因素在高精度摩擦传动中都要认真研究。如如何克服动、静摩擦引起的低速爬行问题、打滑问题等。实验研究表明, 只要结构设计合理, 并采用适当的检测调整机构, 摩擦传动也能得到很高的传动精度。完全能够满足天文望远镜的跟踪精度要求。目前超低速平稳运行速度可到 0.05 /s , 位置精度 RMS 值为 0.009 。这一试验的成功, 对其他精密机械传动和精密测量领域也有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] WANG SH G, SU D Q, CH Y Q, *et al.* Special configuration of a very large Schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation[J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35:5155-5161.
- [2] YAO ZH Q, LI G P. The tracking system of LAMOST telescope[J]. *SPIE*, 1998, 3352:560-571.
- [3] BRUNETTO E, KOCH F, MARCHET B. Friction drive and bogies for OWL's main axes, technological step backwards or cost effective alternative[J]. *SPIE*, 2003, 4840:497-508.
- [4] RAYBOULD K, GILLET P, HATTON P, *et al.* Gemini telescope structure design[C]. *SPIE*, 1994, 2199:376-392.
- [5] LEWIS H, LUPTON W, SIROTA M J, *et al.* Pointing and tracking performance of the W. M. Keck Telescope[J]. *SPIE*, 1994, 2199:117-125.
- [6] MANCINI D. The galileo national telescope (TNG) drive system[J]. *SPIE*, 1994, 2199:352-365.
- [7] 巫建坤, 刘国忠, 邓文怡. 提高滚轮法测量大直径精度的研究[J]. 北京机械工业学院学报, 1999, 14(2):25-29.
WU J K, LIU G ZH. The study of the method of improving the accuracy of the measurement for a large scale diameter using the roller method[J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 1999, 14(2):25-29. (in Chinese).
- [8] 张洪文, 丁亚林, 杨德军, 等. 一种相机外场照像试验转台驱动机构[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5):504-507.
ZHANG H W, DING Y L, YANG D J, *et al.* Drive mechanism of the experiment table used for camera's outdoor imaging test[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(5):504-507. (in Chinese)
- [9] 张建, 温坚. 爬行现象的微机检测和分析[J]. 光学精密工程, 1994, 2(6):107-112.
ZHANG J, WEN J. Method of detection and analysis for stick-slip motion by using microprocessor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2(6):107-112. (in Chinese)
- [10] 王建利, 李真, 张国雄. 滚动摩擦副打滑理论的研究[J]. 机械工程学报, 1997, 33(3):21-26.

- WANG J L, LI ZH, ZHANG G X. Study on the micro-creep in roll friction drive[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1997, 33(3):21-26 (in Chinese).
- [11] 戴一帆,李圣怡,罗兵. 扭轮摩擦驱动系统研究[J]. 国防科技大学学报,1999,21(2):85-88.
DI Y F, LI SH Y, LU B, et al. Research on twist-roller friction drive system[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1999, 21(2):85-88 (in Chinese).
- [12] 田军委,王建华,李平,等. 扭轮摩擦传动机构动力学分析[J]. 工程设计学报,2003,10(2):93-97.
TIAN J W, WANG J H, LI P, et al. Dynamic analysis of twist-roller mechanism[J]. *Journal of Engineering Design*, 2003, 10(2):93-97. (in Chinese)
- [13] HIROSHI MIZUMOTO, MAKOTO YABU YA, TATSUHITO SHIMIZU, et al. An Angstrom-positioning system using a twist-roller friction drive[J]. *Journal of the American Society for Precision Engineering*, 1995, 17(1):57-62.
- [14] 苏定强,王亚男. 大天区面积多目标光纤光谱望远镜(LAMOST)的跟踪运动[J]. 天体物理学报,1997,17(3):315-322.
SU D Q, WANG Y N. The tracking motion of the large sky area multi-object fiber spectroscopy telescope(LAMOST) [J]. *ACTA Astrophysica Sinica*, 1997, 17(3):315-322. (in Chinese)
- [15] 曾庆双,秦嘉川. 转台伺服系统低速性能分析[J]. 中国惯性技术学报,2001,9(2):64-69.
ZEN G Q SH, QIN J CH. Analysis on the low-speed function of turntable servo system[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2001, 9(2):64-69. (in Chinese)

作者简介:王国民(1967-),男,江苏海安人,高级工程师,在职博士生,主要研究方向为精密机械传动,机械设计与优化。

E-mail: gmwang @niaot. ac. cn