

钢带传动技术在惯性稳定平台中的应用

张杰¹, 仇振安², 李运动¹, 张妍³

(1. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000;

2. 陆航驻洛阳地区军代表机构, 河南 洛阳 471000; 3. 浙江工商大学, 杭州 310018)

摘要: 由于惯性稳定平台中的轴系精度直接影响产品的性能指标, 提出了一种采用钢带传动技术来提高稳定平台中轴系精度的设计方法。根据带传动设计特点, 对钢带传动技术的工作原理、实现方式、误差分析、仿真计算等进行了详细分析, 给出了设计要点和设计结果, 并对设计结果进行了试验验证。试验结果表明: 钢带传动机构运行平稳、可靠, 传动精度高, 满足产品稳定精度指标要求。

关键词: 惯性稳定平台; 钢带传动; 结构设计; 误差分析

中图分类号: TH13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)01-0089-04

Application of Steel Belt Transmission in Inertial Stabilized Platform

ZHANG Jie¹, QIU Zhen-an², LI Yun-dong¹, ZHANG Yan³

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China; 2. Military Representative Office

of Army Aviation in Luoyang, Luoyang 471000, China; 3. Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The shafting precision of the inertial stabilized platform has direct influence on the technical index of electro-optical reconnaissance system. A method was proposed for improving the shafting precision of inertial stabilized platform by using the steel belt transmission technique. Based on the belt transmission characteristics, analysis was made to the working principle, implementing methods, accuracy analysis, simulation and calculation of the steel belt transmission technology. The key points and result of design was presented, and experimental verification was carried out. The result showed that: the belt transmission mechanism is stable, reliable, and accurate in operation, which can satisfy the stabilization accuracy requirement of products.

Key words: inertial stabilized platform; steel belt transmission; structural design; accuracy analysis

0 引言

惯性稳定平台是以力矩电机为原动机, 陀螺为敏感元件的陀螺稳定装置^[1], 正是采用这种陀螺惯性稳定的方法, 才使得光学系统的视轴能精确地指向目标。从力矩电机到光学视轴之间的传动有很多种, 如带传动、链传动、齿轮传动、连杆传动等, 其中, 带传动技术应用越来越广泛, 钢带是继橡胶带、皮革带、纤维带、钢丝带之后, 弹簧钢金属材料在带传动上的应用, 具备传统带传动结构简单、传动平稳、造价低廉以及缓冲吸振等优点^[2-4]。同时, 钢带传动又具备弹性模量高, 弹

性变形小, 弯曲性能好, 无需润滑, 耐油、耐潮、耐高温, 维修量低, 可靠性好等优点^[5-7]。

目前, 钢带的应用主要集中在欧美及日本等发达国家, 尤其在精密传动上, 钢带传动越来越受到重视, 钢带精密传动的产品也层出不穷^[8-9]。

本文主要根据对钢带传动技术的研究, 提出了在惯性稳定平台中采用钢带传动实现两平行轴系往复精密传动的想法, 并探讨了实现方法、传动误差分析和结构固有频率的计算。

1 工作原理

钢带传动中, 主动轮和从动轮与钢带固连, 当主动轮运动时便带动从动轮随之运动, 这种结构形式传递运动较准确, 适用于有限转角范围内的正反转运动。

2 钢带传动结构设计

图 1 所示为惯性稳定平台结构简图,该平台利用反射镜稳定方式实现稳像,俯仰方向由电机轴和反射镜轴两个平行轴系构成,两轴系分别固定在基座上,通过钢带连接,由电机轴带动反射镜轴运动。

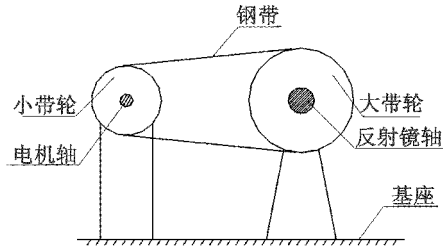


图 1 稳定平台结构简图

Fig. 1 Structural diagram of inertial stabilized platform

2.1 带轮尺寸及钢带传动比确定

带轮外形尺寸主要根据稳定平台的空间尺寸来确定,假设小带轮即主动轮转速为 n_1 、半径为 r_1 ,大带轮即从动轮转速为 n_2 、半径为 r_2 。如图 2 所示,若反射镜绕回转中心转动 β 角,则入射光线就绕回转中心转动 γ 角,即惯性稳定平台扫描视场角的变化量为 γ , $\gamma = 2\beta$ 。在惯性稳定平台中,反射镜转 γ 角即大带轮所在的反射镜轴系转 γ 角,为保证小带轮所在的电机轴系能实时反馈出反射镜的角度变化,小带轮转速和大带轮转速必须满足 $n_1 = 2n_2$,由此推出,钢带的传动比 $i =$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2}{r_1} = 2。$$

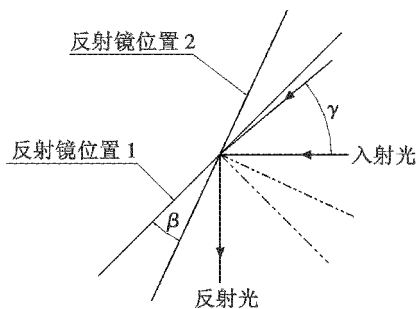


图 2 反射镜位置与光路位置关系

Fig. 2 The position relationship between the mirror and optical path

2.2 钢带与带轮联接

钢带与带轮之间的联接,有焊接、铆接、螺钉联接、V 形压板联接等,可根据实际情况确定。在传动过程中,钢带必须与主、从动轮表面始终保持紧密贴合。联接的可靠性直接关系到钢带受力的均匀性、安装与更换的方便性。

2.3 钢带预紧力

由传动原理可知,在钢带传动未开始之前,为了在

钢带与带轮之间产生必要的摩擦力,钢带应该被预先张紧。钢带的预紧力对其传动能力、寿命和轴系压力都有极大影响。预紧力不足,则传递载荷的能力降低,传动效率降低,钢带的磨损加剧;预紧力过大,则轴系载荷增大,轴承易发热磨损,带的寿命降低。张紧钢带所需的预紧力为^[10]

$$S_0 = \frac{bh^2[\sigma_b]}{6r} \quad (1)$$

式中: b 为钢带的宽度, $b = 15 \text{ mm}$; h 为钢带的厚度, $h = 0.4 \text{ mm}$; $[\sigma_b]$ 为钢带的许用弯曲应力, $[\sigma_b]$ 为 $785 \sim 1175 \text{ MPa}$; r 为主、从动轮的最小半径, $r = 15 \text{ mm}$ 。计算得 $S_0 = 32 \text{ N}$ 。

2.4 钢带有效拉力

在钢带传动过程中,当主动轮启动时,绕上主动轮一侧的钢带拉力将变大,绕出一侧的拉力会变小,从而在两边建立拉力差,当拉力差大到足以克服阻力矩时,从动轮开始转动。这个拉力差称为有效拉力。

由刚体绕定轴转动的微分方程得

$$J_2 \alpha = \sum M_z(F) \quad (2)$$

分析轴系受力情况可得

$$J \alpha = M_f + M_g + r_2 F_e \quad (3)$$

式中: J 为传动系统的转动惯量; α 为带轮的角加速度; M_f 为轴系的摩擦力矩; M_g 为轴系的不平衡力矩; F_e 为有效拉力。

根据数模分析计算结果,俯仰轴系的不平衡力矩为 $5 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$,转动惯量(折算到随动轴系)是 $32180 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$,角加速度 $60 (\text{°})/\text{s}^2$,轴系的摩擦力矩是 $18 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$,可以计算得钢带所需的有效拉力为 0.189 N 。可见,钢带所需的有效拉力是非常小的,对钢带的受力影响可以忽略不计。

2.5 张紧轮的设计

钢带在预紧力的作用下,运转一段时间后,会由于塑性变形而松弛,预紧力 S_0 会随之降低,当主动轮切换回转方向时,钢带就会产生空回现象,因此,为保证钢带传动过程中的拉力恒定,钢带两侧需要安装张紧轮以张紧钢带。张紧轮的布置应尽量靠近大带轮,如图 3 所示。

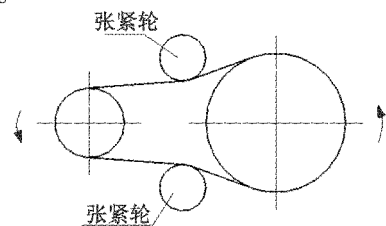


图 3 张紧轮的布置

Fig. 3 The layout of the tensioning wheel

3 钢带传动精度分析

3.1 钢带弹性滑动影响

由于钢带是弹性体,受力后要产生弹性变形,如图4所示。

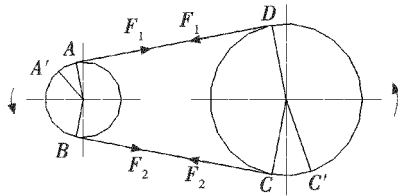


图4 钢带弹性滑动示意图

Fig. 4 The sketch map of steel belt elasticity sliding

分析采用的传动方式,虽然钢带在带轮上的包角很小,但不知道A点到A'点的角度的具体数据,因此无法判定钢带和带轮之间是否存在弹性滑动,为此,假设钢带中存在弹性滑动。下面对弹性滑动带来的误差进行计算,为了方便计算,假设拉力是突变的,即带绕过主动轮的包覆点后拉力由 F_2 突变为 F_1 ,这样计算误差将会大于实际误差。此传动误差为

$$\Delta\theta = \frac{F_e \theta r_1}{EA r_2} = \frac{F_e \theta}{2EA} \quad (4)$$

式中: r_1 为主动轮的半径; r_2 为从动轮的半径; θ 为主动轮的转角; A 为钢带的面积, $A = 6 \text{ mm}^2$; E 为钢带的弹性模量, $E = 195\,000 \text{ MPa}$ 。

滑动率为

$$\varepsilon = \frac{v_1 - v_2}{v_1} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{F_e l / 2EA}{l} = \frac{F_e}{2EA} \quad (5)$$

式中: Δl 为主、从动轮的传动弧长误差; l 为主动轮上的传动弧长。计算得 $\varepsilon = 0.81 \times 10^{-8}$,即钢带的弹性滑动造成的主、从动轮之间的滑动率不大于 0.81×10^{-8} ,故可不考虑 ε 对钢带传动精度的影响。

3.2 相位误差的影响

在换向的时候,由于松边要逐渐变为紧边,若钢带两侧的拉力差达不到临界拉力,则无法驱动从动轮,因此从动轮将会滞后主动轮一个角度,造成换向误差。显然,换向误差是启动误差的两倍。

钢带启动后,其中的拉应力为

$$\sigma = F_e / (bh) \quad (6)$$

则钢带的启动弧长误差为

$$\Delta l = \sigma L / 2E \quad (7)$$

式中, L 为钢带的有效长度, $L = 91.24 \text{ mm}$ 。

结合式(6)和式(7)可以计算得启动误差为 $0.1''$,可见是非常小的。

3.3 带轮加工误差的影响

由以上分析可知,钢带传动的实际传动比为 $i' =$

$\frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2 + h}{(r_1 + h)(1 - \varepsilon)}$,其中, ε 可忽略不计。在机械加工中,无论是钢带轮的直径还是其圆柱度都不可能与理论上一样,但可以将上述因素控制在一定范围内。

通常情况下,经过磨削加工,钢带轮相对综合误差最好可控制在 0.008 mm 内,故实际状态下,传动比为

$$i' = \frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2 + h + 0.008}{r_1 + h + 0.008} \quad (8)$$

最大传动比误差为 1.997 ,则钢带在 $\pm 5^\circ$ 范围内的传动误差为

$$\Delta\theta = \frac{5}{i'} - \frac{5}{i} = 5 \left(\frac{1}{i'} - \frac{1}{i} \right) = 0.0038^\circ = 13.68'' \quad (9)$$

4 系统固有频率的计算

系统的固有频率必须高于控制系统带宽的 $3 \sim 10$ 倍,而且越高越好,这样才能避免和控制系统发生共振并具有良好的动态响应。系统的固有频率有两个方面:1) 钢带-带轮组成的传动系统的固有频率;2) 轴系本身的固有频率。

4.1 钢带-带轮传动系统固有频率的计算

可以把系统中钢带简化为弹簧,钢带轮简化为质量,由此可以计算出钢带-带轮传动系统的固有频率。由系统固有频率的计算式可得

$$f_n = \omega_n / 2\pi = \frac{\sqrt{k/m}}{2\pi} \quad (10)$$

由胡克定律得

$$F_e = kx = k r_2 \phi \quad (11)$$

所以有

$$k = \frac{F_e}{r_2 \phi} \quad (12)$$

由刚体转动惯量的计算式可得

$$J = m r_2^2 \quad (13)$$

则

$$m = J / r_2^2 \quad (14)$$

联立式(9)、(10)、(12)可得钢带-带轮传动系统固有频率的计算式为

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{F_e r_2}{\phi J}} \quad (15)$$

式中: f_n 为系统的固有频率; ϕ 为从动轮转角, $\phi = 1.61\text{E} - 07 \text{ rad}$; J 为传动系统的转动惯量, $J = 32\,180\text{E} - 07 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。由此可得 $f_n = 526 \text{ Hz}$,可见钢带-带轮传动系统固有频率满足要求。

4.2 轴系固有频率的计算

采用有限元建模的方法,利用HyperWorks软件对轴系进行固有频率的计算。计算时假设零件之间均为刚性连接,螺栓连接简化为刚性单元。采用两端固支,

材料为钛合金,从而计算出扭转固有频率。

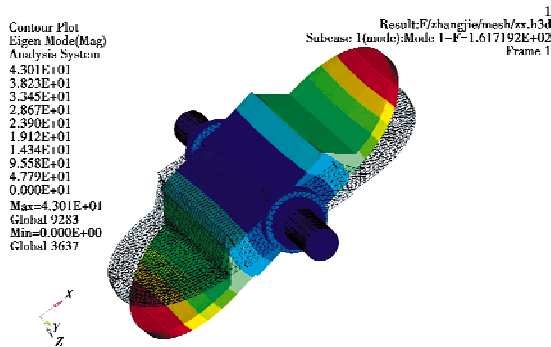


图5 从动轮轴系扭转固有频率计算结果

Fig. 5 The inherent frequency calculation result of driven wheel torsion

图5所示为从动轮系扭转固有频率计算结果。可见第一阶扭转固有频率为161.7 Hz,相当于控制系统的带宽的4.6~5.4倍,可以满足控制系统的需要。

5 设计实例

图6所示为稳定平台系统结构图。惯性稳定平台装调完成后,对精度指标进行了测试,主要测试结果如下:反射镜轴系回转精度15",电机轴轴系回转精度20",反射镜轴和电机轴的不平行度40",钢带传动误差26",满足设计要求。由式(9)计算可得,钢带在 $\pm 5^\circ$ 范围内的实际传动比为 $i' = 1.994$ 。

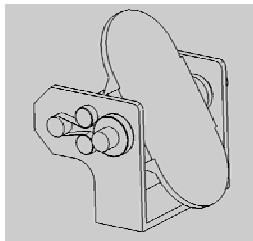


图6 稳定平台系统结构图

Fig. 6 The schematic diagram of inertially stabilized platform

稳定平台装进光机部件壳体中,根据设计要求,整个光机部件完成了随机振动等各项地面环境试验。

6 结论

本文所提出的钢带传动设计方法,已应用于某惯性稳定平台的系统中,能够精确地稳定来自空间的目标光束,并严格保持1/2关系,完成从动轴系与主动轴系同向随动。由此可见,钢带传动技术在惯性稳定平台中是完全可以实现和应用的,该结构既可满足主动轴系和从动轴系之间精密传动的要求,又具有钢带传动的优点,可为后续研究钢带传动机构提供技术支持。

参考文献

- [1] 杨业飞,申文涛. 惯性稳定平台中陀螺技术的发展现状和应用研究[J]. 飞航导弹,2011(2):72-79. (YANG Y F, SHEN W T. Research on the development status and application of gyroscope technology in inertial stabilization platform[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2011(2):72-79.)
- [2] 蔡宗耀,黄晓东. 钢带传动研究[J]. 机械制造,1997,35(3):11-14. (CAI Z Y, HUANG X D. The research for steel belt transmission[J]. Mechanical Manufacturing, 1997, 35(3):11-14.)
- [3] 杨祖孝. 设计钢带精密传动系统[J]. 机械制造,2001,39(4):22-23. (YANG Z X. Design of precision steel belt drive system[J]. Mechanical Manufacturing, 2001, 39(4):22-23.)
- [4] DECKER H. Sizing up metal belts[J]. Machine Design, 1996,68(9):8-12.
- [5] 童本康. 钢带精密传动的误差分析与参数计算[J]. 机械设计,1999,16(8):31-33. (TONG B K. Error analysis and parametric calculation for precision transmission of steel belt[J]. Machine Design, 1999, 16(8):31-33.)
- [6] 李伦平. 精密轴系中钢带传动的误差分析[J]. 机械工程师,2007(10):121-122. (LI L P. Error analysis of belt drive in precision shafting[J]. Mechanical Engineer, 2007(10):121-122.)
- [7] 陈志平,王炳源,张季平,等. 钢带长距离精密传动的应用研究[J]. 机械制造,2002,40(6):24-26. (CHEN Z P, WANG B Y, ZHANG J P, et al. Research on the application of long distance precision transmission of steel belt[J]. Mechanical Manufacturing, 2002, 40(6):24-26.)
- [8] 岳石锋,陈志平,孙亚良,等. 钢带传动研究的综述与展望[J]. 机械传动,2011,35(12):7-10. (YUE S F, CHEN Z P, SUN Y L, et al. Review and outlook of study on steel belt transmission[J]. Mechanical Transmission, 2011, 35(12):7-10.)
- [9] HILKERT J M. Inertially stabilized platform technology[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(1):26-46.
- [10] 徐峰,李庆祥. 精密机械设计[M]. 北京:清华大学出版社,2005. (XU F, LI Q X. Design of precision machinery[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)