

光纤传感器测量 V 带滑动角的研究

关祥毅

(哈尔滨商业大学轻工学院, 黑龙江 哈尔滨 150028)

摘要 根据摩擦带传动的蠕变原理可知, V 带传递功率与滑动角的大小密切相关。分析了传统滑动角计算公式的不足, 并提出了优化滑动角计算公式。介绍了光纤传感器测量位移的原理, 搭建了滑动角测量实验台, 运用数据采集卡进行了数据采集, 实现了瞬态滑动角大小的测量, 获得了不同负载下滑动角的变化规律。优化后的滑动角计算公式比传统计算值大, 与实验测量值的趋势相符, 大小接近。

关键词 光纤; 光纤传感器; V 带; 滑动角

中图分类号 TH139 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s208001

Study on the Measurement of V-Belt Sliding Angle Using Optical Fiber Sensors

Guan Xiangyi

(School of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150028, China)

Abstract According to the creep test principle of friction of V-belt driving, the power transferred is closely related to the belt sliding angle. The deficiency of conventional formula for calculating the sliding angles is analysed, and an optimized formula is introduced. Tests that fiber optic sensors are used to measure the belt sliding angles are carried out. Data acquisition is accomplished by high speed PCI interface card on computers in order to measure the magnitude of transient sliding angles. Then the sliding angle changes are correlated to the corresponding load conditions and an optimized formula for V-belt sliding angle calculation is obtained. It is found that the sliding angle calculated by the new formula is larger than by the traditional formula, but more approximate to the experimental values in both trend and magnitude.

Key words optic fiber; optic fiber sensor; V-belt; sliding angle

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 120.6650

1 引言

V 带传动是机械摩擦传动中的主要传动形式之一^[1]。带传动力学分析主要采用蠕变理论, 其认为带传动的动力是依靠滑动摩擦进行传输^[2]。因此, 滑动角的大小决定了带传动的最大传动力矩和传动效率。传统滑动角计算公式可参考文献^[3], 但其仅考虑了因带的拉力而产生的正应力, 没有考虑惯性力、弯曲应力。

为精确设计 V 带传递功率, 应对滑动角计算公式进行优化, 而验证滑动角计算公式的准确性, 需要测量出 V 带的滑动角。V 带在稳定运转阶段滑动角的测量比较困难, 国内外研究较少。郑大宇等^[4]

采用手持式非接触测速仪测出平带的速度, 通过比较速度差, 分析出滑动角的大小。但由于 V 带嵌入带轮轮槽之中, 不能够通过带的侧面测速, 此种方法不适用于 V 带滑动角测量。

光纤传感器以其体积小、质量轻、不受电磁干扰、对光源功率波动不敏感、可以实现绝对测量等优点得到了快速发展^[5,6]。传统接触式位移测量方法均不适用于测量高速旋转的 V 带位移, 而光纤传感器可进行非接触式测量, 同时具有精度高、高灵敏度和体积小等优点, 为测量 V 带径向位移提供了新的手段。

本文从分析传统滑动角计算公式的不足着手, 提出相应的解决办法, 进行实验设计, 给出实验结果。

收稿日期: 2012-05-25; 收到修改稿日期: 2012-07-10

基金项目: 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金(2010RFQXG015)资助课题。

作者简介: 关祥毅(1981—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事机械设计理论与理论等方面的研究。E-mail: guanxiangyi@126.com

2 优化 V 带滑动角计算公式

在文献[3]中,仅考虑 V 带的紧边与松边拉力的情况下,传统 V 带滑动角计算公式为

$$\beta = \frac{1}{\mu_v} \ln \frac{T_1}{T_2}, \quad (1)$$

式中 T_1 为 V 带的紧边拉力; T_2 为 V 带的松边拉力; μ_v 为当量摩擦系数。

由于(1)式没有考虑带的弯曲应力、惯性力,分析结果不够准确。现取 V 带在主动带轮上的微段为研究对象,在考虑弯曲应力、惯性力的情况下,进行力学分析。图 1 为 V 带单元体受力分析图,列 x 、 y 方向的力学平衡方程为

$$-T \cos \frac{d\theta}{2} + (T + dT) \cos \frac{d\theta}{2} - fr d\theta = mv dv \cos \frac{d\theta}{2}, \quad (2)$$

$$-T \sin \frac{d\theta}{2} - (T + dT) \sin \frac{d\theta}{2} + nds = -mv^2 \sin \frac{d\theta}{2} - mv(v + dv) \sin \frac{d\theta}{2}, \quad (3)$$

式中 T 为 V 带所受的拉力, m 为 V 带的线密度, v 为 V 带的线速度, r 为 V 带轮中心到带外表面的距离, f 为 V 带与带轮之间的摩擦力, n 为带轮所承受的正压力, $d\theta$ 为 V 带单元对应的圆心角。

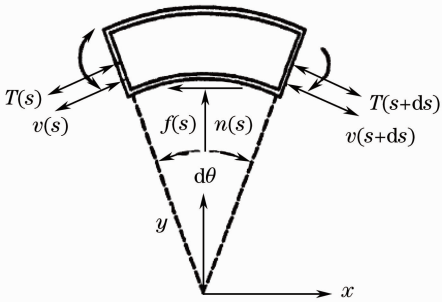


图 1 V 带单元体受力分析

Fig. 1 Force analysis of V-belt unit

因为 $d\theta$ 很小,可近似认为 $\cos \frac{d\theta}{2} \approx 1$, $\sin \frac{d\theta}{2} \approx$

$\frac{d\theta}{2}$ 。忽略无穷小量,(2)式和(3)式简化为

$$f = (T - mv^2)', \quad (4)$$

$$n = \frac{(T - mv^2)}{r}. \quad (5)$$

根据摩擦力计算公式 $f = \mu_v n$, 联立(4)式和(5)式得

$$\frac{d(T - mv^2)}{T - mv^2} = -\mu_v n. \quad (6)$$

由(6)式可得主动带轮滑动角计算公式为

$$\beta = \frac{1}{\mu_v} \ln \frac{T_1 - mv_1^2}{T_2 - mv_2^2}. \quad (7)$$

3 实验设计与结果分析

对 V 带传动整个运转过程进行分析后发现,带在张力一定的情况下,外表面在轮槽中的位置是确定的。而在 V 带运转之后,带在轮槽中的位置发生了变化。显然,滑动出现在带远离带轮中心的部分。如果采用光纤位移传感器测量出带在运转过程中相对于带在张紧情况下的位移差,就能够找到产生滑动的分界点,即可分析出带的滑动角。

现以主动轮为例说明滑动角的测量。在分析主动带轮的滑动角时,可以从紧边与带轮的接触点开始度量带的相对位置。如果运转过程中带的位置比静止时带的位置更靠近带轮中心,则没有产生相对滑动;如果带的位置远离带轮中心,则产生了相对滑动。

3.1 实验方案及方法

将传感器固定在 V 带传动实验台上。支架起到支撑环形导轨的作用,环形导轨上安装光纤传感器。安装过程中要保证环形导轨中心与带轮回转中心的同心度。图 2 为实验平台结构示意图。

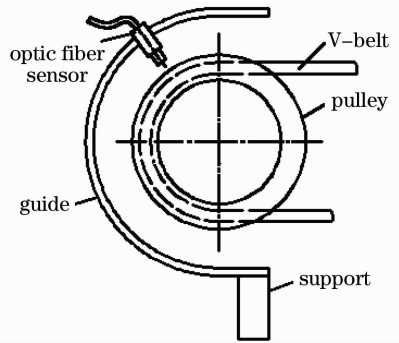


图 2 实验台结构示意图

Fig. 2 Diagram of bench structure

实验所采用的 V 带传动实验台参数如表 1 所示,其中 η 为传动比, D 为带轮直径, L 为带长。

表 1 V 带传动实验台参数

Table 1 V-belt drive bench parameters

η	D /mm	μ_v	L /mm	m /(kg/m)
1	140	1.75	2000	0.10

实验采用的是 P 系列非接触式光纤距离传感器,量程为 5~10 mm,测量精度为 0.2 μm ,传感器外形尺寸为 5 mm \times 10 mm \times 12 mm。其测量原理是通过从物体表面反射又被光纤接受的光强信号的变化来探测反射物的位移变化量,并以光功率损失状

态来表征^[7]。实验中,光纤传感器的光源为 LED 光源,光纤芯半径 a_0 为 $100\ \mu\text{m}$,中心波长为 $0.89\ \mu\text{m}$,调制参数 ζ 为 0.081 ,驱动电流为 $30\ \text{mA}$ 。

实验采用的光纤传感器射出端的场强分布公式为

$$\Phi(r, z) = \frac{I_0}{\pi\sigma^2 a_0^2 [1 + \zeta(z/a_0)^{3/2} \tan \theta_c]^2} \times \exp\left\{-\frac{r^2}{\sigma^2 a_0^2 [1 + \zeta(z/a_0)^{3/2} \tan \theta_c]^2}\right\}, \quad (8)$$

式中 Φ 为光通量密度, (r, z) 为光场中位置; I_0 为光源耦合到发送光纤中的光强; σ 为光纤折射率分布的相关参数, $\sigma = 1$; θ_c 为光纤最大出射角。

反射式特性调制函数通过光纤端出射光场的场强分布函数给出

$$\Phi(r, x) = \frac{I_0}{\pi\sigma^2 a_0^2 [1 + \zeta(x/a_0)^{3/2}]^2} \times \exp\left\{-\frac{r^2}{\sigma^2 a_0^2 [1 + \zeta(x/a_0)^{3/2}]^2}\right\}. \quad (9)$$

对于反射式光纤传感装置,接收光纤接收到的光强等于将发射光纤置于反射体镜像处时,其直接接收到的光强乘以反射体的反射系数 R 。因此,接收光纤接收到的光强为

$$I(r, 2x) = R \int_s \frac{K_0 K_1 I_0}{\pi \tilde{\omega}^2(2x)} \exp\left[\frac{r^2}{\tilde{\omega}^2(2x)}\right] ds, \quad (10)$$

式中 $\tilde{\omega}(x) = \sigma a_0 [1 + \zeta(x/a_0)^{3/2}]$, K_0 、 K_1 分别为光源光纤和反射接收光纤的本征损耗系数, s 为纤芯面。

在纤端出射光场的远场区,为了简化计算,可将接收光纤端面中心点处的光强作为纤芯面上的平均光强,同时在考虑到光纤的本征损耗下,光纤所接收到的反射光强可表示为

$$I(r, x) = \frac{I_0 K_0 K_1 R a_0^2}{\tilde{\omega}^2(2x)} \exp\left[-\frac{r^2}{\tilde{\omega}^2(2x)}\right]. \quad (11)$$

为了避免光纤损耗变化及光源起伏对测量结果的影响,该光纤传感器采用双路接收的主动补偿方式,具体为

$$I_1(x, r_1) = \frac{I_0 K_0 K_1 R a_0^2}{\tilde{\omega}^2(2x)} \exp\left[-\frac{r_1^2}{\tilde{\omega}^2(2x)}\right], \quad (12)$$

$$I_2(x, r_2) = \frac{I_0 K_0 K_1 R a_0^2}{\tilde{\omega}^2(2x)} \exp\left[-\frac{r_2^2}{\tilde{\omega}^2(2x)}\right]. \quad (13)$$

则两光纤接收强度之比为

$$I_1/I_2 = \exp\left[-\frac{r_1^2 - r_2^2}{\tilde{\omega}^2(2x)}\right], \quad (14)$$

式中 $\tilde{\omega}(x) = \sigma a_0 [1 + \zeta(x/a_0)^{3/2}]$, 且 $\sigma = 1$ 。由(14)式可知,接收光纤的比值只与光纤探头与镜面的距

离 x 、光纤芯半径 a_0 以及两光纤与光源光纤的传输轴之间的距离的平方差($r_1^2 - r_2^2$) 有关。

为了方便测量,需要将光强信号 I_1 通过光电探测器 PD_1 接收,将其转换为电流信号,再使用 I/V 电路把电流信号转换成电压信号,最后经过滤波器和放大器输入除法器,此时电压信号的比值表示为

$$V = \frac{V_2}{V_1} = \frac{I_2}{I_1} = \exp\left[\frac{r_1^2 - r_2^2}{\tilde{\omega}^2(2x)}\right]. \quad (15)$$

由(15)式中可知,当光纤间距 r_1, r_2 且光纤耦合条件一定时,两接收光纤的光强比仅与光纤端面到反射面的距离有关,而与光源强度,反射体的反射率和光纤传输损耗等因素无关^[8]。

3.2 实验过程

为保证测量精度,先将 V 带表面磨平,在其外表面贴反光材料,然后将其安装到带轮轮槽中。此带轮经过动平衡实验及精度测量,保证了实验精度。在从动轮处调整负载,控制带传动传递功率。带在张紧情况下,将光纤传感器上的光纤探测头用螺旋测微器推向 V 带外表面,直至刚好接触时停止。将光纤探测头向远离带表面调整,每隔 $200\ \mu\text{m}$ 记录一下主机上显示的两路电压比值,通过记录下的一系列数值,做出位移与电压比值的归一化曲线。运用拉格朗日反插值法求出归一化曲线线性部分的拟合公式。然后将光纤探测头放置在距离 V 带外表面 $3\ \text{mm}$ 位置,此时电压比为 0.477 。通电,启动实验台,当达到稳定运转阶段时,用光纤探测头沿半圆形导轨测量探头与带外表面的距离。通过测量可发现,整个接触弧部分被分成两半,一半是距离小于 $3\ \text{mm}$ 的部分,另一半是距离大于 $3\ \text{mm}$ 的部分。距离小于 $3\ \text{mm}$ 的部分所对应的圆心角即为滑动角。为了减小振动对测量的影响,需将安装光纤传感器的定位支架固定在实验台上,同时保证传感器与带表面间的绝对距离。

在工况下,为了做出归一化曲线,记录了光纤探测头、V 带外表面之间的距离与电压比的数据,如表 2 所示。

根据表 2 数据绘制出归一化曲线,如图 3 所示。运用拉格朗日反插值法,得出光纤探头和 V 带外表面之间的位移量与两路电压比值之间的归一化曲线线性部分的拟合公式为

$$x = -4.892y^3 + 7.406y^2 - 0.25y + 2.240, \quad (16)$$

式中 y 为两路电压比值, x 为光纤探头和 V 带外表面之间的位移量。

表 2 归一化曲线的测量数据

Table 2 Normalized curve of measurement data

Displacement /mm	0	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000	2.200	2.400
Voltage ratio	0	0.002	0.002	0.003	0.004	0.009	0.019	0.040	0.072	0.118	0.171	0.234	0.298
Displacement /mm	2.600	2.800	3.000	3.200	3.400	3.600	3.800	4.000	4.200	4.400	4.600	4.800	5.000
Voltage ratio	0.359	0.405	0.477	0.530	0.576	0.612	0.648	0.673	0.678	0.690	0.696	0.696	0.713

具体测量过程为:张紧带轮,固定探头位置,测量出电压比,转换为探头与V带表面距离。启动实验台,达到稳定运转时,测量出电压比。在环形导轨上移动探头,当显示电压比为静止电压比时,即找到发生滑动的位置,测得圆心角即为滑动角。

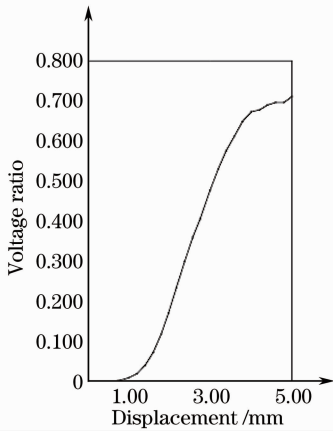


图 3 归一化曲线

Fig. 3 Normalized curve

3.3 实验结果

为充分反映V带传递功率与滑动角之间的关系,在一定张紧的情况下,转速分别为600、900、1500 r/min时,对实验台施加了不同的负载,测量出了滑动角的大小。将实验数据、传动滑动角计算公式、优化滑动角计算公式进行比较,具体数值如表3~5所示。其中P为V带传递功率, β_1 为传动滑动角计算公式的计算结果, β_2 为优化滑动角计算公式的计算结果, β_3 为实验测得结果。

表 3 600 r/min 时滑动角的大小

Table 3 Size of sliding angle when 600 r/min

P /kW	β_1	β_2	β_3
1.5	24.003	24.016	24.125
2.0	33.2074	33.226	33.323
2.5	43.790	43.819	43.996
3.0	56.823	56.867	56.881
3.5	74.917	74.995	75.213
4.0	108.810	109.036	111.226

分析表3~5的数值表明,优化滑动角计算公式计算出的数值大于传统计算公式的计算结果,原因为带在旋转过程中产生离心力,随着带速的增加,离

表 4 900 r/min 时滑动角的大小

Table 4 Size of sliding angle when 900 r/min

P /kW	β_1	β_2	β_3
2.0	21.137	21.149	21.266
2.5	26.959	26.974	27.221
3.0	33.207	33.227	34.201
3.5	40.060	40.085	40.996
4.0	47.784	47.816	47.926
4.5	56.823	56.867	57.285
5.0	68.011	68.074	69.920
6.0	108.817	109.037	112.201

表 5 1500 r/min 时滑动角的大小

Table 5 Size of sliding angle when 1500 r/min

P /kW	β_1	β_2	β_3
4	25.765	25.779	25.856
5	33.207	33.227	34.102
6	41.524	41.550	42.353
7	51.207	51.244	52.395
8	63.195	63.249	64.369
9	79.701	79.791	81.223
10	108.817	109.037	111.062

心力增大,使带和带轮之间的正压力减小,导致有效拉力降低。因此,在高速情况下,传递功率需要更大的滑动角参与传递动力;实际测量的滑动角与优化滑动角公式计算结果更为接近,且大于优化滑动角计算公式数值,产生原因为带轮长时间转动,表面粗糙度降低,当量摩擦系数变小,导致测量数值稍大;优化滑动角计算公式计算值稍大,有效地预防了打滑现象的出现,保证了传动安全;优化滑动角计算公式计算的数值更为精确,与传统公式计算结果相差约0.1%,为精密机械的带传动设计提供了参考。

4 结 论

在考虑带的惯性及弯曲应力的基础上,分析了V带的受力情况,并优化了V带滑动角的计算公式,为滑动角理论计算提供新依据。提出了采用光纤传感器测量V带传动滑动角的实验测量原理。对不同负载下的V带滑动角进行了测量。测量的实验结果与传统滑动角计算公式和优化滑动角计算公式进行了比较,结果表明,优化滑动角公式计算结

果更接近实验数据,实测滑动角值大于计算值。可以有效避免打滑现象,更加准确地计算带的传动功率,实现 V 带传动设计的精确化。

参 考 文 献

- 1 Wu Yizhen. The technology status and future prospects of transmission belt[J]. *China Rubber*, 2006, **22**(24): 16~22
吴贻珍. 中国传动带技术现状与未来发展[J]. *中国橡胶*, 2006, **22**(24): 16~22
- 2 J. N. Fawcett. Chain and belt drives, a review[J]. *Shock & Vibration Digest*, 1981, **13**(5): 5~12
- 3 Qiu Xuanhuai, Guo Keqian, Wu Zongze. Machine Design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. 176~178
邱宣怀, 郭可谦, 吴宗泽. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. 176~178
- 4 Zheng Dayu, Wang Xi, Guan Xiangyi. Computation and measurement of sliding angle of belt[J]. *Journal of Harbin University of Commerce(Natural Sciences Edition)*, 2008, **24**(5): 565~567
郑大宇, 王玺, 关祥毅. 平带传动的动角计算及测量的研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2008, **24**(5): 565~567
- 5 Wang Weiyu, Zhang Min, Tan Qiaofeng. Fitting calculation of white-light interferometric optical fiber Fabry-Pérot cavity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(5): 050602
王为宇, 张敏, 谭峭峰. 白光干涉光纤法布里珀罗腔的拟合求解[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(5): 050602
- 6 Zhu Tao, Xu Min, Rao Yunjiang *et al.*. Miniature humidity sensor based on all-fiber Fabry-Pérot interferometer formed by hollow core fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1592~1596
朱涛, 徐敏, 饶云江等. 基于空芯光纤的集成式全光纤法珀干涉式湿度传感器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1592~1596
- 7 Li Haiyan, Pu Zhaobang, Ge Wentao. Development and application of reflective intensity-modulated fiber optic sensing technique for displacement measurement[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(suppl.): 342~344
李海燕, 浦昭邦, 葛文涛. 反射式强度调制型光纤传感技术在位移检测中的发展和应用[J]. *光学技术*, 2005, **31**(suppl.): 342~344
- 8 Yuan Libo. Fiber-optic Bragg grating principle and its applications (I): fiber-optic Bragg grating principle[J]. *Optical Communication Technology*, 1998, **22**(1): 70~78
苑立波. 光纤光栅原理与应用(一): 光纤光栅原理[J]. *光通信技术*, 1998, **22**(1): 70~78

栏目编辑: 王晓球