

双列有限转角钢带系统的动力学仿真与分析

宋新鸿

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年10月10日; 录用日期: 2025年10月29日; 发布日期: 2025年11月7日

摘要

基于刚柔耦合动力学理论, 使用RecurDyn多体动力学软件建立双列有限转角钢带系统虚拟样机, 仿真分析了钢带系统不同预紧力下的传动特性, 研究了预紧力与传动精度的关系、预紧力对主动轮扭矩的影响。结果表明, 双列有限转角钢带系统传动比普通平台精度高, 预紧力增大有助于减小扭矩波动但可能引入精度波动。

关键词

有限转角钢带, RecurDyn, 预紧力, 仿真分析

Dynamic Simulation and Analysis of Double-Row Limited-Angle Steel Belt System

Xinhong Song

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: October 10, 2025; accepted: October 29, 2025; published: November 7, 2025

Abstract

Based on the rigid-flexible coupling dynamics theory, a virtual prototype of the double-row limited-angle steel belt system was established using the RecurDyn multi-body dynamics software. The transmission characteristics of the steel belt system under different preloads were analyzed through simulation, and the relationship between preload and transmission accuracy, as well as the influence of preload on the driving wheel torque, were studied. The results show that the double-row limited-angle steel belt system has higher transmission accuracy than ordinary platforms; increasing the preload helps reduce torque fluctuation but may introduce accuracy fluctuation.

文章引用: 宋新鸿. 双列有限转角钢带系统的动力学仿真与分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(11): 102-109.

DOI: 10.12677/mos.2025.1411643

Keywords

Limited-Angle Steel Belt, RecurDyn, Preload, Simulation Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

有限转角钢带传动技术使用高强度薄钢带缠绕在带轮上, 并使用紧固件固定钢带两端(如图 1 所示), 利用钢带的弹性变形与高抗拉强度在有限角度内实现精确的位移传动。有限转角钢带传动具有传递力矩大、传动精度高、结构简单、噪声小、无磨损等优点[1], 有限转角钢带传动方式可以实现稳定平台角度的准确传动与对目标的稳定跟踪, 主要用于伺服稳定平台与光瞄反射镜稳定系统中[2]-[4]。然而, 传统的单列有限转角钢带传动结构存在一定的局限性, 最大旋转角度受到固定方式的限制, 难以满足多工况下大角度调控的需求。双列有限转角钢带传动结构通过在带轮两侧中心布置两条独立钢带, 采用并联布局有效扩大了系统可旋转角度。这种设计继承了单列有限转角钢带系统的性能优势, 同时显著拓展了应用潜力。尽管双列结构展现出优势, 但对双列有限转角钢带传动结构的研究相对匮乏, 特别是对其在往复运动时的传动特性认识不足, 需进一步系统研究。

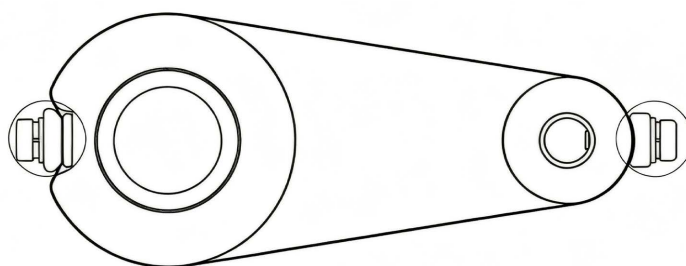


Figure 1. Single-row limited-angle steel belt
图 1. 单列有限转角钢带

钢带传动技术的研究涵盖了传动机理、精度分析、动力学特性等多个方面。蔡宗耀[5]等人系统介绍了钢带传动的一般设计方法, 讨论了通过对钢带传动进行补偿使其成为精密传动的技术途径。陈志平[6]等对钢带机理进行深入分析后, 提出将带轮滚筒设计成腰鼓形状以有效抑制钢带卷边的创新方法, 同时对长距离钢带传动进行计算, 验证了钢带传动的精密性。在精度影响因素研究方面, 李伦平[7]探讨了在精密光学仪器中影响钢带传动精度的因素, 证实钢带厚度对传动精度存在较大影响。潘炳财[8]以钢带传动的惯性稳定平台为研究对象, 综合考虑传动钢带的弹性和预紧力等影响因素, 使用 MATLAB/Simulink 软件进行联合仿真, 分析了钢带在不同刚度下对稳定精度的影响规律。张海峰[9]等通过对输送钢带进行力学特性分析, 明确了初始拉力、钢带厚度和滚筒直径是影响钢带应力变化的主要因素。有限转角钢带传动技术采用高强度薄钢带缠绕在带轮上, 利用紧固件固定钢带两端, 依靠钢带的弹性变形与高抗拉强度在有限角度内实现精确位移传动。张杰[10]等人为提高惯性稳定平台的轴系精度, 提出了一种采用钢带传动技术的设计方法, 并对其工作原理、实现方式、误差分析和仿真计算进行了详细分析, 试验验证表明该钢带传动机构运行平稳且传动精度高。针对特殊应用需求, 李国慧[11][12]等通过对传统钢带传动机

理的分析,针对变中心距的要求,提出了一种单钢带往复变中心距精密传动方案,通过受力分析计算从理论上证明了该传动的可行性与合理性。邓旭[13]等人则针对柔性基座中的钢带传动装置,重点分析了带轮廓形、钢带局部塑性变形和钢带弹性变形对传动比的影响,并提出了误差补偿的改进方案。鲁强[14]等进一步基于刚柔耦合理论,对有限转角钢带系统建立刚柔耦合动力学模型、钢带预紧张力计算数学模型,通过多体动力学仿真软件和物理样机实验开展预紧张力对系统输出特性影响的研究。

综上所述,钢带传动技术已形成较为完善的理论体系,但对双列有限转角钢带传动结构的研究尚待深入,需进一步探索其动力学特性。本文使用 RecurDyn 多体动力学软件,对双列有限转角钢带系统建立刚柔耦合动力学模型并进行仿真分析:首先在无预紧力工况下与普通平钢带系统进行对比研究,后续重点研究预紧力对系统精度及主动轮扭矩影响。研究结果可为后续有限转角钢带系统设计与优化提供参考。

2. 模型的建立

钢带在传动过程中经历大变形,力学行为呈现为高度非线性特征,是一个刚柔耦合动力学问题。因此,传统的纯刚性体模型难以准确描述其真实的动力学特性。所以本文建立双列有限转角钢带传动系统的刚柔耦合动力学模型,用于精确模拟钢带的大变形非线性行为。

RecurDyn 作为一款多体动力学仿真软件,处理接触问题能力是其核心优势之一。RecurDyn 可以便捷地定义运动副与各种参数等,并通过 MBD 和 MFBD 求解器进行快速准确的仿真。

RecurDyn 中的接触理论基于惩罚法。惩罚法的核心是通过计算物体之间的穿透深度来求解接触力。假设在物体之间存在一个非线性的弹簧,当两个物体发生几何上的重叠时,这时弹簧会被压缩,弹簧的压缩量即为穿透深度 δ 。所产生的法向接触力 $f_n = k \cdot \delta$ 。 k 是接触刚度系数。

实际的接触力计算公式会更复杂,通常会引入阻尼系数来模拟能量损失,计算接触产生的法向接触力 f_n 的公式为:

$$f_n = k_s \delta_c^{m_1} + C_d \frac{\dot{\delta}_c}{|\dot{\delta}_c|} |\dot{\delta}_c|^{m_2} |\delta_c|^{m_3} \quad (1)$$

式中: k_s 为接触刚度系数; δ_c 为接触穿透深度; C_d 为阻尼系数; $\dot{\delta}_c$ 为接触穿透深度的导数(接触点的相对速度); m_1 、 m_2 、 m_3 分别为刚度指数、阻尼指数、凹痕指数(当穿透值较小时避免接触力出现负值的情况,在默认情况下为 0)。

建立完整的传动系统模型导入软件中进行计算,会使计算时间变长,并产生冗余计算。所以本文实体模型简化为只包含钢带、主动轮和从动轮,钢带为柔性体,轮为刚性体。图 2 为双列有限转角传动系统刚柔耦合模型。基于 SolidWorks 建立双列有限转角钢带系统三维模型。并将模型导入 RecurDyn 动力学软件中进行前处理。使用 RecurDyn 软件中的 mesh 系统对钢带使用 Shell4 单元进行网格划分,划分完成共有网格数 43,576,节点数 43,575。

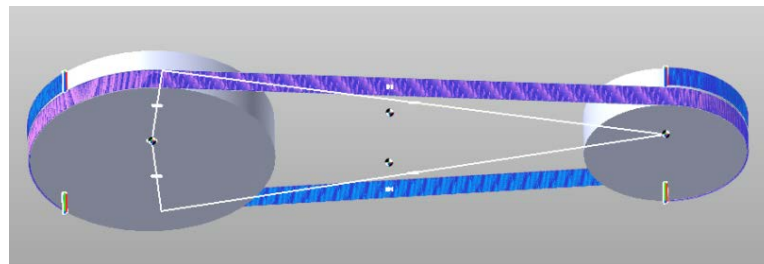


Figure 2. Steel belt system coupled model
图 2. 钢带系统耦合模型

为了验证双列有限转角传动系统一个完整周期的运行情况，本文采用 step 函数定义旋转角度，施加在主动轮旋转副上，模拟精密设备的启停、换向工况，具体函数如下：STEP (TIME, 0, 0, 2, 180D) + STEP (TIME, 2, 0, 6, -360D) + STEP (TIME, 6, 0, 8, 180D)。通过施加恒定的 1000 N·mm 的反向扭矩模拟负载。传动系统相关参数参考金嘉蕾[15]，具体如表 1 所示。根据主动轮运动函数，设定仿真时间 8 s，仿真步长 800 步，对双列有限转角钢带进行仿真。由于主动轮与从动轮传动比为 1:1.5 (直径 80:120)，得到的转动角度数据不直观，所以本文对从动轮角度数据乘 1.5 倍，以便图表数据对比直观显示。

Table 1. Relevant parameters of steel belt transmission system
表 1. 钢带传动系统相关参数

接触参数			
刚度系数/(N/mm)	100	动摩擦因数	0.3
阻尼系数/(N·s/mm)	0.01	静摩擦因数	0.45
刚度分量	1.2	静态门槛速度/(mm/s)	20
阻尼分量	1	动态门槛速度/(mm/s)	40
穿透分量	1		
带轮参数		钢带参数	
主、从带轮直径/mm	80/120	宽度/mm	10
中心距/mm	250	厚度/mm	0.2
长度/mm	22	阻尼系数	5×10^{-3}
密度/(kg/mm ³)	2.7×10^{-6}	密度/(kg/mm ³)	7.85×10^{-6}
杨氏模量/MPa	7×10^4	杨氏模量/MPa	2.06×10^5
泊松比	0.33	泊松比	0.285

3. 仿真结果分析

3.1. 与平钢带传动系统的对比分析

本文建立平钢带传动系统，使用与双列有限转角钢带系统相同的带轮、接触、动力参数(见图 3)。

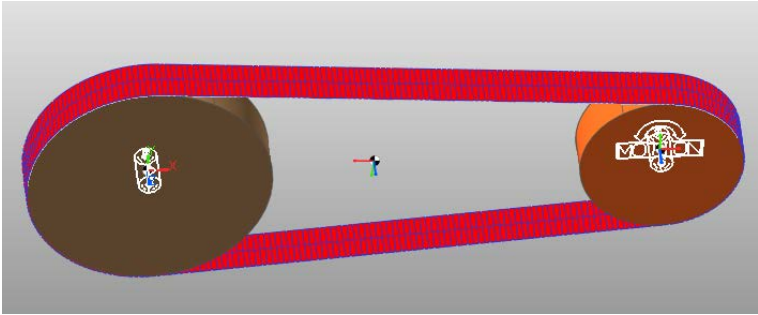
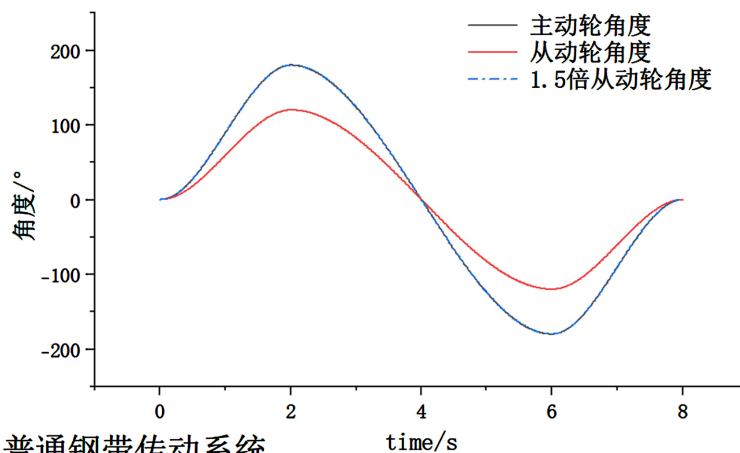


Figure 3. Ordinary flat steel belt transmission system
图 3. 普通平钢带传动系统

经过仿真带轮传动角度如图 4 所示。对比平钢带传动系统与双列有限转角钢带系统发现：有限转角的从动轮紧跟主动轮轨迹，平钢带传动存在显著的传动滞后问题。有限转角带轮系统传动误差最大仅 0.446°，从动轮初始响应时小于 0.02 s，无滞后现象；平钢带传动系统存在显著弹性滑动，最大传动误差

达 32.628° ，初始响应滞后 0.05 s ，在 2 s 时主动轮达到最大值 180° 从动轮在延迟 0.2 s 后才达到最大角度，误差随主动轮位移累积呈线性增长趋势。

双列有限转角钢带传动系统



普通钢带传动系统

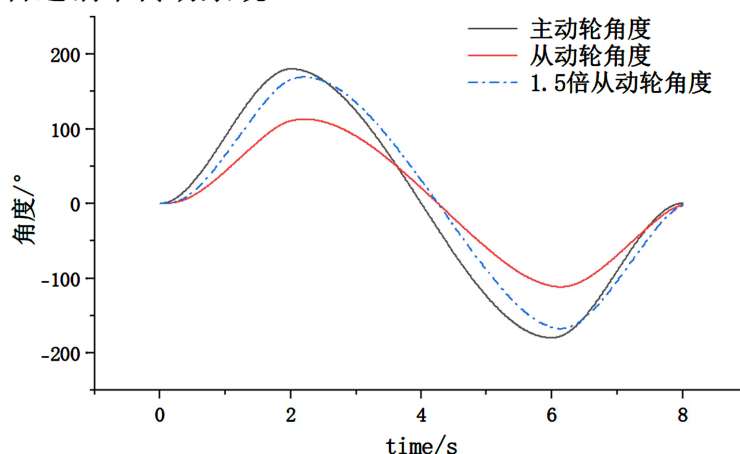


Figure 4. Transmission comparison diagram of two systems

图 4. 两组系统传动对比图

有限转角带轮系统在传动精度与动态响应上显著优于普通平带传动，可满足精密传动场景需求。无负载工况下，有限转角与普通平钢带传动系统主动轮输入完全一致，但从动轮传动性能差异显著。有限转角系统传动误差仅为普通带传动的 $1/73$ ，初始响应速度为普通平带传动的 3 倍。

3.2. 预紧力对传动精度的影响分析

影响钢带传动系统的输出精度和传动平稳性因素较多，其中钢带预紧力大小对系统的输出影响较大，需研究预紧力与输出特性的关系，对优化传动性能具有重要意义。本文通过施加初始位移添加预紧力，使用 RecurDyn 软件萃取出 0 N 、 39.6 N 、 158.21 N 三种预紧力工况。对比主动轮及负载不同时的转动角度可得，主动轮转动角度曲线与输入的函数一致，从 0 s 到 2 s 从 0° 增长到 180° ， 2 s 到 6 s 降至 -180° ， 6 s 到 8 s 增长至 0° 。从动轮转动角度与主动轮转动角度曲线从趋势上看基本一致(见图 5)。

然而，仅从角度曲线难以直观比较不同预紧力对传动精度的影响，因此进一步计算了传动误差(主动轮角度减去从动轮角度)。

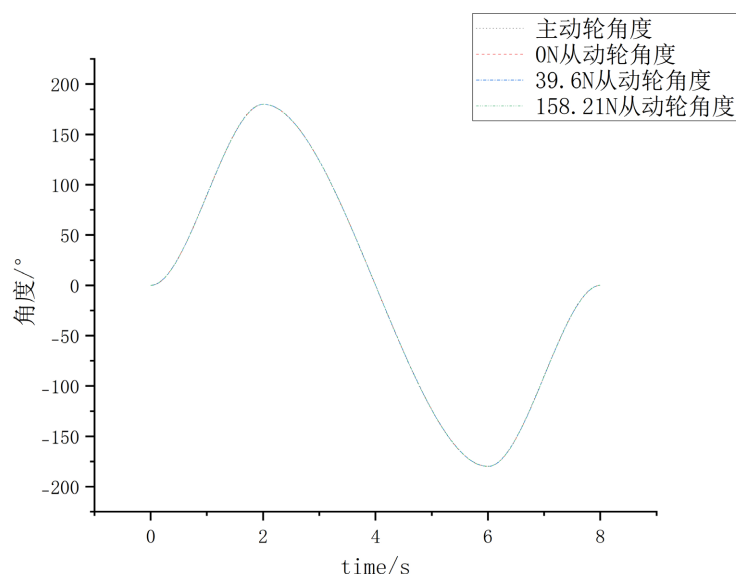


Figure 5. Preload vs. angle relationship diagram

图 5. 预紧力与角度关系图

从图 6 (左纵轴 - 差值、右纵轴 - 角速度) 中可知在本系统中。主动轮与从动轮转动角度误差系统差值最大在 0.5° 左右, 转动误差随着系统转动角速度提升而增大。预紧力不同时的三组数据均值都接近于 0。无预紧力时曲线平滑, 波动较小。预紧力为 39.6 N 时, 在 1.5 s、2.5 s、5 s、7 s 附近波动显著, 同样的预紧力为 158.21 N 时波动较大处与 39.6 N 时的情况基本一致且部分时间段内差值相对较大。施加预紧力并未提升动态精度, 反而引入了显著的波动, 导致精度下降。有预紧力的工况时, 预紧力消除了传动间隙, 并将带张紧, 提高了系统的传动刚度。也同时降低由钢带松弛带来的阻尼效应。在高刚度、低阻尼的特性下, 系统在加减速时产生的惯性冲击力极易激发系统的共振。对比结果表明, 随着角速度增加误差也不断增加, 这可能是由于系统惯性及钢带柔性在加速、减速阶段引发更明显的动态响应。

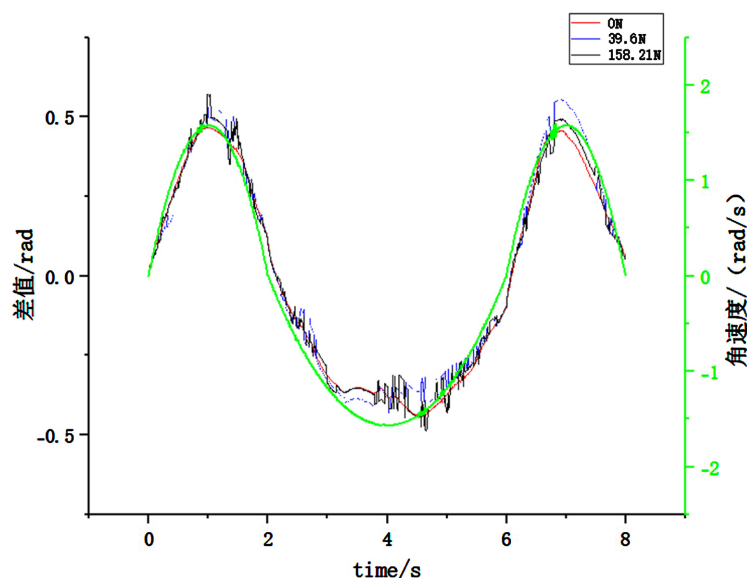


Figure 6. Angular difference diagram of driving and driven wheels

图 6. 主、从动轮角度差值图

3.3. 预紧力对主动轮扭矩的影响分析

图7为不同预紧力条件下钢带传动系统主动轮扭矩的变化情况。分析结果显示,随着预紧力的增大,主动轮扭矩的波动幅度逐渐减小。在未施加预紧力时,扭矩在0.91 s处出现最大峰值,达到23588.88 N·mm;在0~0.8 s、1~4.9 s、5.4~6.6 s以及7~8 s时间段内,扭矩变化较为平稳,波动不明显。当预紧力为39.6 N时,扭矩波动主要集中于1.2~1.5 s之间,其余时段波动幅度较小。而预紧力增至158.21 N时,波动主要出现在4.9~5.4 s区间。随着预紧力的提高,主动轮扭矩波动显著降低。

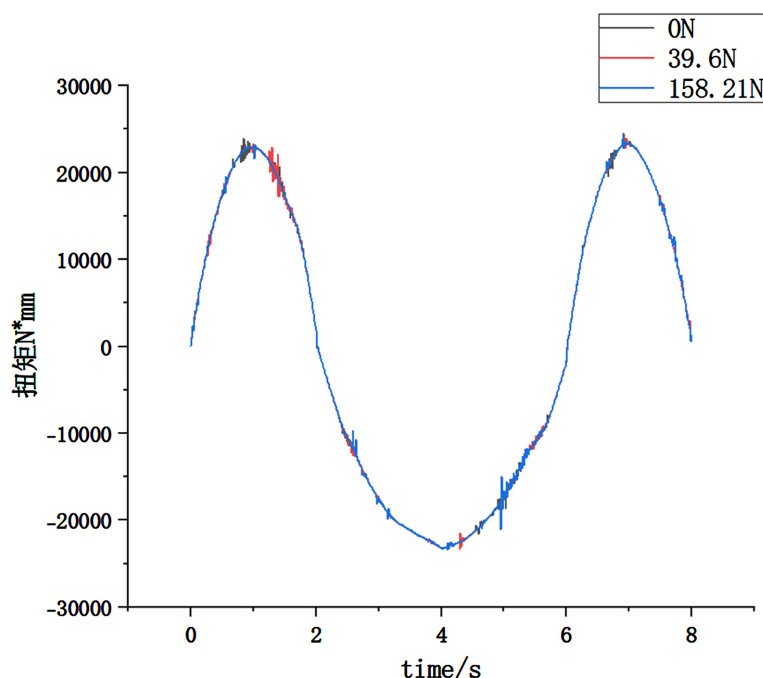


Figure 7. Diagram of the relationship between preload force and torque
图7. 预紧力与扭矩关系图

4. 结论

有限转角系统因无弹性滑动,传动精度高、响应无滞后,适用于高精度动态传动场景。普通平钢带传动因弹性滑动导致误差累积,较适用于低精度通用传动。两种系统的性能差异源于有限连接结构抑制滑动与普通带传动滑动有本质区别。

预紧力增大可能对传动精度产生负面影响,在设计中需在传动精度和扭矩平稳性之间取得平衡,并非越大越好。在负载相同的情况下,预紧力越大,带传动系统的扭矩表现越稳定,波动越小。

本研究通过刚柔耦合动力学仿真,揭示了双列有限转角钢带系统的基本传动特性以及预紧力的影响规律,为该系统的设计提供了参考。

参考文献

- [1] 李存建. 有限转角范围内的钢带传动设计[J]. 起重运输机械, 2007(7): 37.
- [2] Malueg, R., Colella, N.J. and Hakala, D.B. (1995) Stabilized Optical Tracking Platform for Airborne Applications. *SPIE Proceedings*, **2468**, 37-38. <https://doi.org/10.1117/12.210446>
- [3] Yoshioka, H., Shinno, H. and Sawano, H. (2015) A Low-Profile Planar Motion Table System Driven by Steel Belt. *International Journal of Automation Technology*, **9**, 739-745. <https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0739>

-
- [4] 马冉冉, 王彤宇. 基于 ADAMS 的二维跟踪转台动力学耦合分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(1): 79-84.
 - [5] 蔡宗耀, 黄晓东. 钢带传动研究[J]. 机械制造, 1997(3): 11-14.
 - [6] 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(6): 24-26.
 - [7] 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.
 - [8] 潘炳财, 方昉, 李小平. 传动钢带弹性对惯性稳定平台的稳定精度影响仿真分析[J]. 机械与电子, 2013(4): 24-27.
 - [9] 张海峰, 吴霁薇, 余家利, 等. 输送钢带的力学特性分析与仿真[J]. 机械传动, 2017, 41(3): 93-96.
 - [10] 张杰, 仇振安, 李运动, 等. 钢带传动技术在惯性稳定平台中的应用[J]. 电光与控制, 2016, 23(1): 89-92.
 - [11] 李国慧, 熊运昌, 李东如. 变中心距精密传动设计[J]. 机械工程师, 2012(1): 70-72.
 - [12] 李国慧, 熊运昌, 张建国. 单钢带变中心距精密传动的应用[J]. 机械设计与制造, 2012(7): 82-84.
 - [13] 邓旭, 袁野, 张凯, 等. 非圆钢带传动原理及误差分析[J]. 机械传动, 2022, 46(11): 40-46.
 - [14] 鲁强, 高志峰, 钟小兵, 等. 有限转角钢带的传动特性及预紧张力对输出特性的影响[J]. 兵工学报, 2022, 43(3): 676-685.
 - [15] 金嘉蕾. 钢带长距离传动的刚柔耦合动力学研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.