

# 轮-带驱动系统单向离合器减振机理实验分析\*

张振<sup>1</sup> 丁虎<sup>1†</sup> 陈立群<sup>1,2</sup>

(1.上海大学 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072) (2.上海大学 力学系, 上海 200444)

**摘要** 以安装有单向离合器的轮-带驱动系统为研究对象,采用实验的方法研究系统中单向离合器对多楔带振动特性的影响.通过实验对比有无单向离合器的状况,明确单向离合器对轮-带动力系统的减振效应.并实验对比了多楔带初始张力对减振效果的影响.分析实验结果发现,装有单向离合器的轮-带驱动系统,多楔带的振动随转速变化呈现出非线性振动特性;单向离合器对轮-带动力系统多楔带的横向振动起到了显著的减振作用.

**关键词** 非线性振动, 轮-带驱动系统, 单向离合器, 实验, 减振

DOI: 10.6052/1672-6553-2018-021

## 引言

轮-带驱动系统广泛地存在于各种机械当中用于转动机械组件之间的动力传输.其具有传递率高、结构紧凑、装配简单及寿命长等优点,然而系统振动往往会引起传动带的振动进而导致噪音的产生及传送带的磨损等严重问题.为减少振动的不利影响,众多学者们对轮-带动力系统的动力学进行了大量的研究<sup>[1,2]</sup>.李晓军等<sup>[3]</sup>使用模态分析的方法研究平带驱动系统的耦合振动.王小莉等<sup>[4]</sup>通过对比计算与实验结果研究了单根多楔带传动系统带横向振动的计算方法.宫苏梅等<sup>[5]</sup>通过实验研究了平带在传动过程中存在的一些非线性现象.李占国等<sup>[6]</sup>通过 MFBDF (多柔性体动力学)刚柔耦合技术建立了汽车多楔带传动的动力学仿真模型,对汽车多楔带接触力和拉应力进行了传动性能仿真分析.任国强等<sup>[7]</sup>通过实验方法对多楔带系统带速损失进行了研究.刘伟等<sup>[8]</sup>研究了粘弹性传动带横向振动的分岔特性和混沌振动.这些研究都发现轮-带驱动系统中存在大幅度的横向振动.

另一方面,单向离合器在动力系统中的应用已经较为普遍,单向离合器主要安装于被驱动轮中,其作用原理为从被驱动轮的旋转中,将由系统振动引发的轮的旋转在非驱动方向上解耦出来.对含有

单向离合器的轮-带驱动系统也有不少的研究,Zhu 和 Parker<sup>[9]</sup>研究了含有单向离合器的轮-带动力系统的非线性动力学行为.张少飞等<sup>[10]</sup>建立了含有单向离合器装置的三轮-多楔带驱动系统的非线性旋转振动数学模型,并对其进行了动态特性求解以及参数优化设计.Ding 和 Li<sup>[11]</sup>对含有单向离合器的轮-带传动系统的静力学和动力学行为进行了研究.Ding 和 Zu<sup>[12]</sup>在考虑带的抗弯刚度条件下研究了轮-带传动系统的稳态响应.李大鹏等<sup>[13]</sup>应用谐波平衡分析方法研究了含有单向离合器、两滑轮及附件的轮-带驱动系统稳定稳态周期响应.Ding<sup>[14]</sup>研究了惯性激励下含有单向离合器的轮-带驱动系统的周期响应.以上的研究从理论上证实了单向离合器对轮-带驱动系统的减振功能.上官文斌等<sup>[15]</sup>通过解决机车加速异响建立了离合器减振特性模型并对其进行了优化.

在以往的研究中,尚未发现有通过实验的方法来研究单向离合器对轮-带驱动系统的影响的相关文献.因此,本文中我们通过实验手段,研究含有单向离合器的轮-带驱动系统的振动特性,并在有无单向离合器两种状况下对比研究了单向离合器对轮-带驱动系统的振动的影响,为含单向离合器的轮-带驱动系统的设计及应用具有重要的指导意义.

2017-08-11 收到第 1 稿,2017-09-11 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金资助项目(11372171,11422214)

† 通讯作者 E-mail:dinghu3@shu.edu.cn

## 1 实验设备

为了研究含单向离合器的轮-带驱动系统的振动,建立了如图1所示的含单向离合器的轮-带驱动系统实验台.工程实际中,轮-带动力系统的驱动源主要有两种:电力驱动和燃油发动机驱动.为贴近工程实际,本实验采用三相异步电动机作为唯一驱动源,通过变频调速器来调控电动机的输出频率,进而控制驱动轮均匀加减速转动.本实验采用的传送带为多楔带,型号为KK-USA-Poly-V-Belt-PL1210,其主要材料为黑橡胶,主要参数为:楔距—4.7 mm,带高—10 mm,楔角—400,楔数—6.多楔带传动综合了三角胶带传动和平带传动的优点,在轮-带动力系统中的应用最为广泛.被动驱动轮一侧布置了传动轴箱,轴箱外安装有负载轮用以提供负载;另一侧布置了编码器,编码器与测量显示控制仪相连接用以实时观测被动驱动轮的转速.对轮-带驱动系统,轮带初始张力的影响是十分重要的,因此为使得轮带初始张力可以灵活调整,被动驱动系统被设计为可以相对移动,由此,通过调整被动驱动系统的位置控制两轮中心距的大小,进而调整轮带初始张力的大小.轮-带动力系统的振动主要由传送带的共振情况来描述,在实验台面上安装了激光位移传感器,用以测量多楔带中心位置的横向振动.

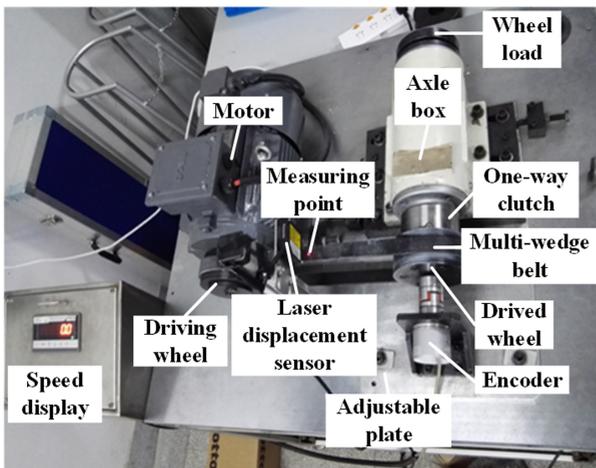


图1 含单向离合器的轮-带动力系统实验台

Fig.1 Test bench of pulley-belt system with one-way clutch

单向离合器被安装于被动驱动轮内,内接轴箱传动轴,如图2(a)所示.本实验采用的单向离合器型号为CKZ-A系列,为楔块式单向离合器,其内含两

套深沟球轴承支撑及油封.CKZ-A35100 型号单向离合器多用在包装、运输、冶金、矿山等机械上,起到防止逆转或超越运转的作用,适合应用于中速运行的场合.要检验单向离合器的减振效应,需要设计有无单向离合器两种状况下的对比实验.因此设计了如图2(b)所示的单向离合器的替换件,由于安装的需求,替换件必须要与单向离合器的装配尺寸保持一致,这使得两实验元件之间出现了不可避免的质量差,CKZ-A35100 型号单向离合器的标准质量为 3.6 kg,经测量替换件的质量为 4 kg,质量差为 0.4 kg.



(a) 单向离合器: CKZ-A35100  
(a) One-way clutch: CKZ-A35100



(b) 替换件  
(b) Replacment

图2 离合器和替换件

Fig.2 One-way clutch and replacement

## 2 实验原理

单向离合器轮-带动力系统实验原理框图如图3所示.

主要实验操作过程包括:

(1) 实验前调试:接入 BK 数据采集系统,检查各连接的可靠性以及整个实验系统的操作安全性,将控制器、记录仪等都调试到理想测量状态.

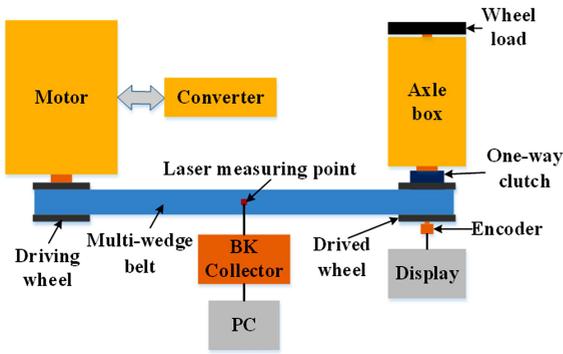


图 3 单向离合器轮-带动力系统实验原理框图

Fig.3 Principle diagram of the experiment for the pulley-belt system with one-way clutch

(2) 轮带初始张力调整:检测多楔带初始张力的大小,并对其进行适量的调整.多楔带上的初始张力大小可以通过测量静态下多楔带的振动频率来定义.给多楔带施加一个冲击激励,测得多楔带的衰减振动如图 4(a)所示,对所测得的时域数据进行快速傅里叶变换,由此得到了图 4(b)所示的频域图,如图中所示,此时多楔带静态下的基频为 60 Hz,此频率越大,则多楔带的初始张力越大.

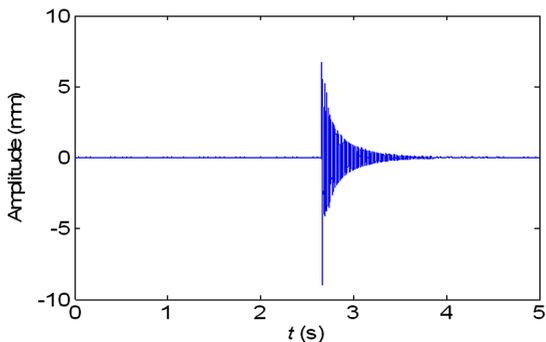
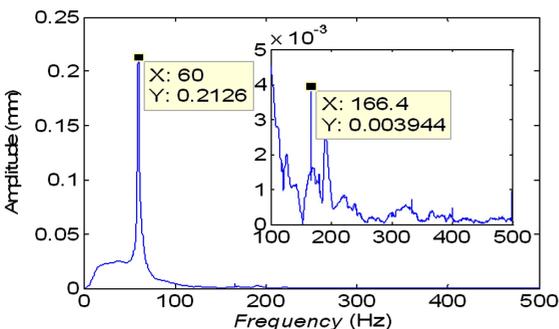
(a) 时域  
(a) Time domain(b) 频域  
(b) Frequency domain

图 4 多楔带基频

Fig.4 Fundamental frequency of the multi-wedge belt

(3) 数据采集:在变频调速器中输入控制曲线控制电机均匀加速转动,本实验中控制电机转速变化范围为 600~2200 rpm,对应的多楔带的传动速度为 3.927~14.399 m/s,采用激光位移传感器测量多楔带中心位置的振动位移变化,采样率设定为 512 Hz,采样时间为 220 s,采集到的数据由 BK 数据采集系统记录下来.

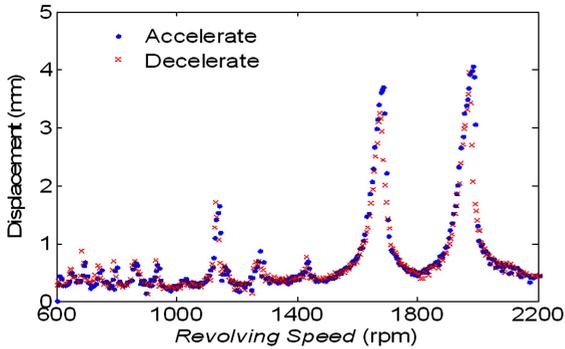
(4) 数据处理:将 BK 采集到的数据导入到 MATLAB 绘制多楔带中心位置处振动位移变化的时域图.将时域图的横坐标换算成电机轮的转速,而转速对应着激励频率,由此,可将时域图转化成多楔带中心位置处振动位移的幅-频响应曲线.处理所获得的时域数据,全局图每隔 1 s(局部图间隔为 0.5 s)取一个位移最大的数据点,将这些数据点绘制成散点图,由此可得到纵坐标只有位移的最大的幅频响应曲线.

### 3 实验结果分析

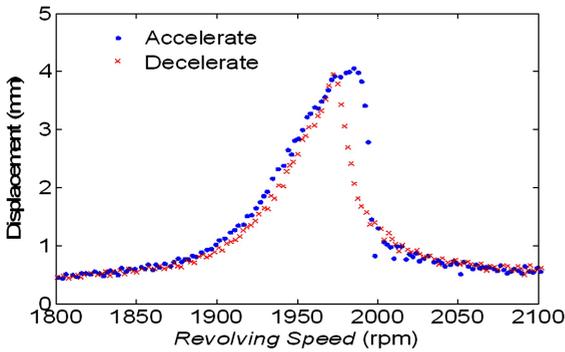
首先,研究多楔带中点处振动位移随激励频率变化的动态特性.在有单向离合器的状态下,测量了初始张力为基频 60 Hz 所对应的张紧力时多楔带中点处振动位移在电机均匀加速和匀减速过程中的变化情况,实验结果如图 5 所示.从图 5(a)可以看出均匀加速和均匀减速这两种状况下的幅-频响应曲线基本上是吻合的,图 5(b)为局部峰值处的放大图,可以看出两种状况下的幅-频响应曲线存在着差异,主要表现为:匀加速过程中,振幅缓慢增加到最大后会迅速下降,而匀减速过程中振幅缓慢增大到最大后又缓慢减小,这表明在含有单向离合器状态下,轮带驱动系统中多楔带中点处的横向振动呈现出非线性振动特性.对轮-带驱动系统,多楔带的初始张力是一个十分重要的参数,因此,有必要研究不同初始张力下,多楔带的振动特性.保持其他各参数不变,分别测量了有单向离合器状况下多楔带基频分别为 60 Hz、50 Hz 和 40 Hz 时多楔带中点的振动情况,实验结果如图 6 所示.

比较发现,随着初始张力的减小多楔带的共振峰出现了向左偏移的现象,这与轮带系统的共振特点,即初始张力越小其固有频率越小相吻合.初始张力的减小使得各共振峰值都有减小,尤其是第一个共振峰的峰值其减小幅度较大.基频为 40 Hz 时,在转速 2100 rpm 左右又出现一个较大的共振

峰,这是由于共振峰的偏移引起的,在 50 Hz 和 60 Hz 时测量到转速 2200 rpm 还没有测到此共振峰.为了解单向离合器对轮-带驱动系统的影响,保持其他参数不变,初始张力分别调整为基频 60 Hz、50 Hz 和 40 Hz 时,对比有无单向离合器两种状况下多楔带中点横向振动最大共振峰处的幅-频响应曲线,实验结果如图 7 所示.



(a) 全局图  
(a) Global figure



(b) 局部放大图  
(b) Local amplification figure

图 5 幅-频响应曲线

Fig.5 Amplitude frequency response

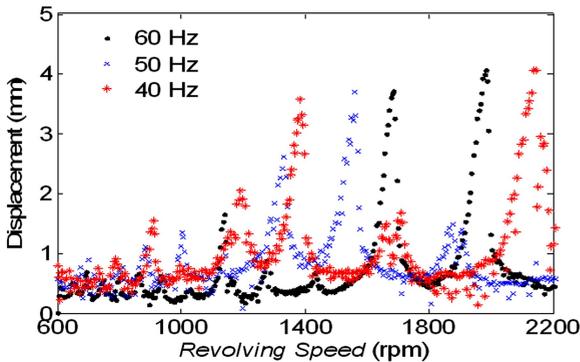
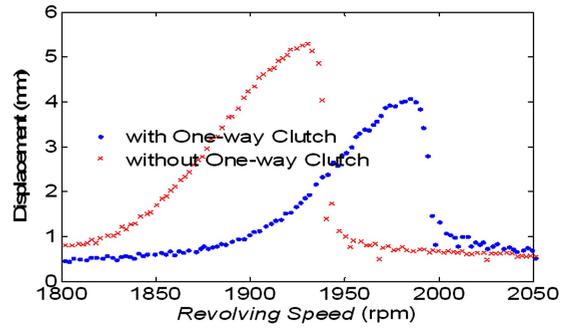
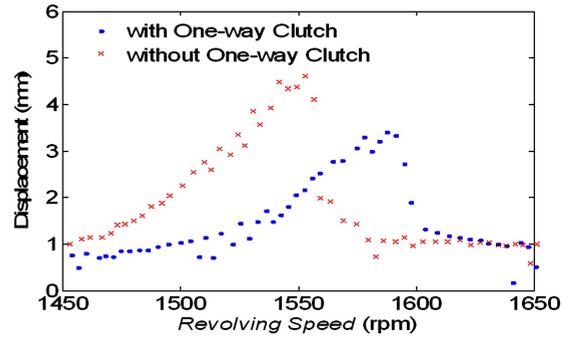


图 6 不同初始张力下多楔带的幅频响应

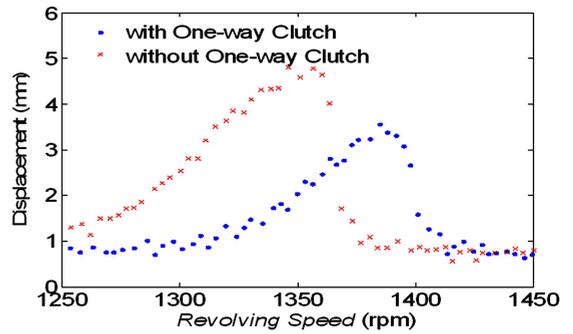
Fig.6 Amplitude frequency response of the multi-wedge belt under the different initial tensions



(a) 60 Hz



(b) 50 Hz



(c) 40 Hz

图 7 有无单向离合器的多楔带幅频响应

Fig.7 Amplitude frequency response of the multi-wedge belt with and without the one-way clutch

可以观察到,相比于没有单向离合器,含有单向离合器情况下,多楔带的幅-频响应曲线的最大共振峰值有着明显的减小.这表明单向离合器对轮-带驱动系统多楔带的横向振动起到了显著的减振作用.对于两条曲线之间存在的一定程度的偏移,可能是更换单向离合器后调初始张力时出现的实验误差所致,而单向离合器与替换元件之间的质量差也可能有一定的影响.

## 4 结论

通过实验研究分析了单向离合器对轮-带驱动

系统中皮带的减振机理,得到以下结论:

(1)研究单向离合器轮-带驱动系统均匀加速过程和均匀减速过程中多楔带的振动情况,比较发现多楔带的振动随转速变化呈现出非线性动态特性;

(2)对比系统均匀加速过程多楔带在三种不同的初始张力下的振动情况,发现随着初始张力的减小,多楔带的共振峰出现向左偏移的现象,且其各峰值有着不同幅度的减小;

(3)通过实验对比有无单向离合器状况下多楔带的振动情况,发现单向离合器对轮-带动力系统多楔带的横向振动起到了显著的减振作用。

## 参 考 文 献

- 1 Abrate S. Vibrations of belts and belt drives. *Mechanism and Machine Theory*, 1992,27(6):645~659
- 2 陈立群. 平带驱动系统的振动分析研究进展. 力学与实践, 2001,23(4):8~13 (Chen L Q. Advance in analysis of vibrations of serpentine belt drive systems. *Journal of Mechanics in Engineering*, 2001, 23(4):8~13 (in Chinese))
- 3 李晓军,陈立群. 平带驱动系统耦合振动的模态分析. 应用数学和力学, 2008,29(1):8~12 (Li X J, Chen L Q. Modal analysis of coupled vibration of belt drive systems. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2008,29(1):8~12 (in Chinese))
- 4 王小莉,上官文斌,花正明. 单根多楔带传动系统带横向振动的计算方法. 振动工程学报, 2010,23(6):606~615 (Wang X L, ShanGuan W B, Hua Z M. A method for calculating belt transverse vibration in serpentine belt drive systems. *Journal of Vibration Engineering*, 2010,23(6):606~615 (in Chinese))
- 5 宫苏梅,张伟. 平带系统非线性振动实验研究. 动力学与控制学报, 2014, 12(4):368~372 (Gong S M, Zhang W. Experimental study on nonlinear vibration of flat-belt system. *Journal of Dynamics and Control*, 2014, 12(4):368~372 (in Chinese))
- 6 李占国,张云贺,史尧臣. 基于 MFBD 的汽车多楔带动力学仿真分析研究. 机械传动, 2013,37(8):34~36 (Li Z G, Zhang Y H, Shi Y C. Study on Automotive Vribbed belt based on MFBD. *Journal of Mechanical Transmission*, 2013,37(8):34~36 (in Chinese))
- 7 任国强,黄杰东. 多楔带传动系统带速损失实验研究. 机械传动, 2015,39(11):132~134 (Ren G Q, Huang J D. Experiment research of the velocity loss of multi-wedge belt drive system. *Journal of Mechanical Transmission*, 2015,39(11):132~134 (in Chinese))
- 8 刘伟,张劲夫. 粘弹性传动带的分岔特性和混沌振动分析. 动力学与控制学报, 2005,3(3):63~68 (Liu W, Zhang J F. Analysis of bifurcation and chaotic motion on transmission visco-elastic belts. *Journal of Dynamics and Control*, 2005,3(3):63~68 (in Chinese))
- 9 Zhu F, Parker R G. Non-linear dynamics of a one-way clutch in belt-pulley systems. *Journal of Sound and Vibration*, 2005,279(1):285~308
- 10 张少飞,上官文斌,曾祥坤. 具有单向离合器的多楔带附件驱动系统旋转振动建模及参数优化设计. 振动与冲击, 2012,31(13):163~168 (Zhang S F, ShangGuan W B, Zeng X K. Rotational vibration modeling and optimization design of serpentine belt accessory drive system with one-way clutch. *Journal of Vibration and Shock*, 2012,31(13):163~168 (in Chinese))
- 11 Ding H, Li D P. Static and dynamic behaviors of belt-drive dynamic systems with a one-way clutch. *Nonlinear Dynamics*, 2014,78(2):1553~1575
- 12 Ding H, Zu J W. Steady-state responses of pulley-belt systems with a one-way clutch and belt bending stiffness. *Journal of Vibration and Acoustic*, 2014,136(4):041006
- 13 李大鹏,储德林,丁虎. 轮-带驱动系统稳态周期响应谐波平衡分析. 动力学与控制学报, 2015,13(6):424~430 (Li D P, Chu D L, Ding H. The frequency-response curve of a belt-drive system by using the harmonic balance method. *Journal of Dynamics and Control*, 2015,13(6):423~429 (in Chinese))
- 14 Ding H. Periodic responses of a pulley-belt system with one-way clutch under inertia excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 2015,353:308~326
- 15 上官文斌,郑若元,孙涛等. 基于解决汽车加速异响的离合器减振特性的建模及优化. 振动与冲击, 2015,34(19):115~119 (ShangGuan W B, Zheng R Y, Sun T, et al. Optimization of clutch vibration isolation performance based on trouble shooting for reducing abnormal noise during vehicle accelerating. *Journal of Vibration and Shock*, 2015,34(19):115~119 (in Chinese))

# EXPERIMENTAL STUDY ON VIBRATION REDUCTION MECHANISM OF PULLEY-BELT SYSTEM WITH A ONE-WAY CLUTCH\*

Zhang Zhen<sup>1</sup> Ding Hu<sup>1†</sup> Chen Liqun<sup>1,2</sup>

(1. *Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)

(2. *Department of Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

**Abstract** In this paper, a pulley-belt system with one-way clutch is taken as a research object. The influence of the one-way clutch on the vibration behavior of the multi-wedge belt is experimentally studied. The vibration reduction effect is confirmed by the contrast experiment between the pulley-belt system with one-way clutch and the one without one-way clutch. Moreover, the influence of the initial tension of the belt on vibration reduction effect is studied. For the pulley-belt system with one-way clutch, the experimental results show that the vibration of the multi-wedge belt presents the nonlinear vibration behavior with the change of rotating speed. Furthermore, the experiment finds that the one-way clutch can significantly reduce the transverse vibration of the multi-wedge belt.

**Key words** nonlinear vibration, pulley-belt system, one-way clutch, experiment, vibration reduction