

# 粘弹性传动带非线性振动实验研究\*

张红星 张伟 姚明辉 刘彦琦

(北京工业大学机电学院,北京 100022)

**摘要** 利用实验方法研究粘弹性传动带的非线性振动. 实验装置中的粘弹性传动带是同步带,通过伺服电机进行驱动,当电动机转速在某一恒定值上下变动时,带中的张紧力也会呈现周期性变化. 通过改变传动带中张紧力的频率和幅值,得到了粘弹性传动带的频率响应曲线和周期运动、倍周期运动以及混沌运动的波形图和相图.

**关键词** 混沌运动, 非线性振动, 粘弹性传动带

## 引言

传动带系统在机械系统中是一个无法替代的传动装置,它可以代替齿轮传动和连杆机构传动等,但反之不然. 研究粘弹性传动带系统和轴向运动弦线的横向非线性振动及其控制问题具有着重要的理论意义和实际应用价值. 汽车发动机中的皮带驱动系统是汽车中的重要部件,它不可能利用其它传动装置来代替,其工作质量的优劣直接影响汽车及其发动机运行的平稳性,而皮带的横向非线性振动将影响发动机和整车的振动,加大汽车的噪声,降低汽车的行驶速度和平稳性. 在磁带存储装置中,磁带的横向振动可以导致信号失真并加速磁带的磨损.

传动带是由粘弹性材料构成的,其本构关系是非线性的. 传动带系统在高速运转时,将会产生很大的横向振动,皮带中的张力呈现出周期性的变化. 因此在传动带系统中必需考虑非线性因素的影响,而且是一个时变的非线性系统,呈现出分叉和混沌现象. 由于需要考虑粘弹性材料的非线性特性,以及主动轮、从动轮和张紧轮的影响,因此粘弹性传动带系统的非线性动力学分析是很复杂的.

对传动带的非线性振动的研究取得了许多研究成果,但大多数集中在理论研究. Pellicano<sup>[1]</sup>综述了2000年以前传动带的研究成果. Chen<sup>[2]</sup>综述了近年的研究情况. 在对传动带系统进行非线性振动理论研究时,张伟等<sup>[3,4]</sup>发现系统存在多倍周期,混沌等复杂的非线性振动. Wickert 和 Mote<sup>[5]</sup>研究了带有质量块的移动带的振动,并且利用实验方法分析了低速传动时带的振动状

态. Moon 和 Wickert<sup>[6]</sup>应用实验的方法研究了同步带的振动,在实验中他们使用了有偏心的同步带轮,通过改变转速调节传动带中张紧力的频率,从而得到了传动带在不同转速时的振动情形,发现了振幅的跳跃现象.

本文主要利用实验的方法研究粘弹性同步传动带的非线性振动. 首先设计和建立传动带振动实验平台,实验装置由三部分组成,机械部分,测量部分和控制部分. 利用伺服电机驱动传动带,在某一恒定转速附近,改变电机转速,则传动带中的张紧力会呈现周期性变化,从而改变了传动带中张紧力的频率和幅值. 通过激光位移传感器采集传动带振动位移信号,然后分析实验数据,得到了粘弹性传动带的频率响应曲线,周期运动、倍周期运动以及混沌运动的波形图、相图和功率谱,分析结果表明粘弹性传动带横向振动存在周期运动和混沌运动.

## 1 实验设备及原理

粘弹性传动带实验系统由三部分组成,机械部分,测量部分和控制部分. 图1所示为振动实验的装置组装图. 机械部分主要包括粘弹性同步传动带、主动轮、从动轮和伺服电机及其控制器. 伺服电机是安川公司的SGMPH-01AAA2S型伺服电机,控制器型号是SGDM-02ADA. 测量部分是由Keyence公司的激光位移传感器、传感器放大器及其控制器组成,激光位移传感器的型号为LK-G150H,其控制器的型号为LK-G3001. 信号采集和控制设备采用研华公司的PIC-1710B型多功能数据采集卡. 此外,还有一台处理和分析数据的微型计算机.

2007-04-12 收到第1稿,2007-05-24 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金(10372008,10328204),北京市自然科学基金(3032006)和国家杰出青年科学基金(10425209)资助

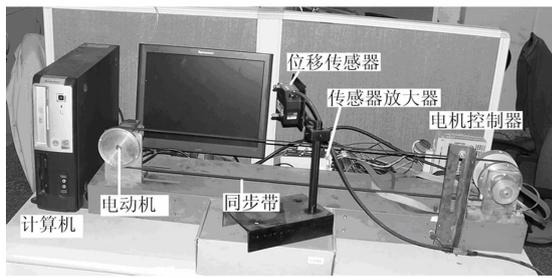


图1 实验设备

Fig.1 Experimental system

图2所示为实验系统示意图,计算机通过多功能控制卡输出一个-10~10V模拟量到伺服电机的控制器,电机的转速便会随电压的变化在-3000~3000rpm范围内线性变化,其中负号表示逆时针转动.激光位移传感器向传动带表面发出一束激光,然后通过镜头从另一个角度将带上的光斑投影到传感器内的线阵CCD上,检测/转换电路通过检测光斑的位置产生不同的电压值.通过计算机上的数据采集卡把电压值采集到计算机上,这样就可以计算出带的位移.本系统中的传感器距离粘弹性传动带 $80 \pm 40\text{mm}$ ,传感器将传动带的位移线性转换成-5v~5v的电压值.实验过程中采集卡的采样频率设定为800Hz.

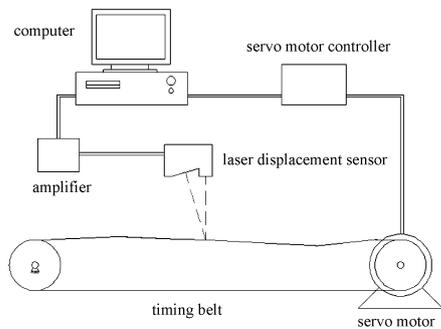


图2 实验系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental system

当改变驱动电机的转速时,带中的张紧力也会随之发生变化.给电机控制器一个偏置电压,然后在这个电压基础上加一个正弦电压,电机的转速也会在一个转速附近呈正弦变化,这时带中的拉力也会呈正弦变化.带中的张紧力由两部分组成,一部分是常力,包括预紧力和驱动负载转动的力,另一部分是由于驱动轮转速变化引起的动态惯性力.

## 2 实验结果与分析

本节对采集到的实验数据进行频率响应分析、相

图分析以及功率谱分析,从而确定传动带的振动响应.图3是传动带振动实验的频率响应曲线,从图中可以看出明显的跳跃现象.在27Hz~34Hz之间扫频,每次上升0.1赫兹.在从27Hz到30Hz扫频时系统表现出线性特征,随着振动频率越来越接近共振频率,振幅不断增大,但激励频率大于30Hz后振幅增大变得缓慢,当激励频率增大到31.6Hz时,振幅突然变小,从2.6mm降到0.4mm,继续增大激励频率到34Hz,振幅逐渐减小.当反向扫频时,我们发现当频率减小到30.1Hz时系统振幅突然增大,从0.6mm升至2.2mm.由此可以看出系统呈现出硬弹簧特性.

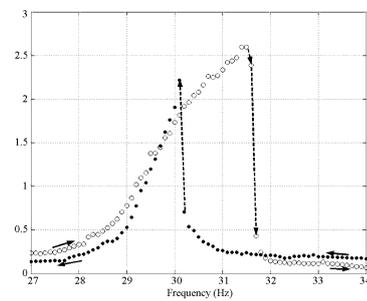


图3 幅频响应曲线

Fig.3 The frequency-response curves

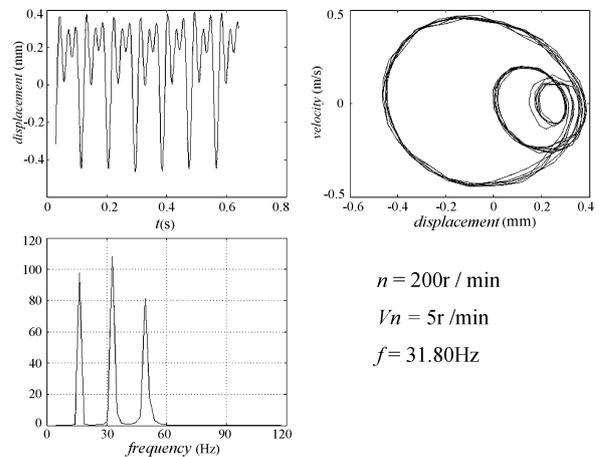


图4 3倍周期运动

Fig.4 Period 3 motion

当激励频率从31.6Hz继续增大,振幅跳低后,发现振动中含有三次谐波.如图4所示,这三幅图分别表示波形图、相图和功率谱图.

改变带的张紧力、转速和激励频率,电机的基本转速为600rpm,激励频率为16Hz~20Hz,转速变化为10rpm.图5表示激励频率为16.4Hz时,传动带振动呈现1倍周期运动.增大频率到18.94Hz时,传动带出现2倍周期振动,如图6所示.当激励频率增大至19.27Hz时,传动带出现混沌运动,如图7所示.

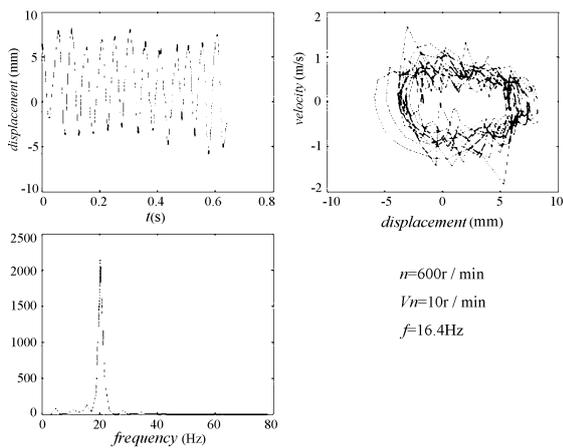


图 5 1 倍周期运动  
Fig. 5 Period 1 motion

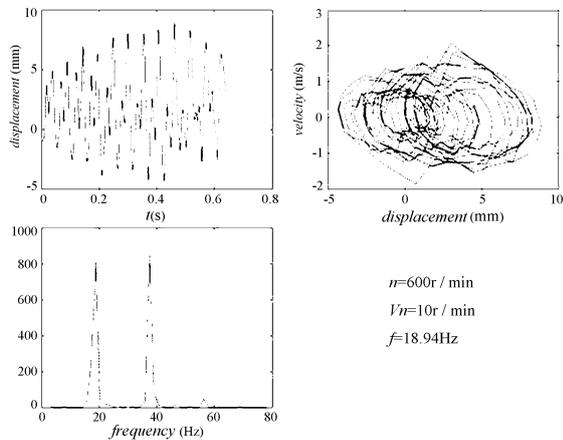


图 6 2 倍周期运动  
Fig. 6 Period 2 motion

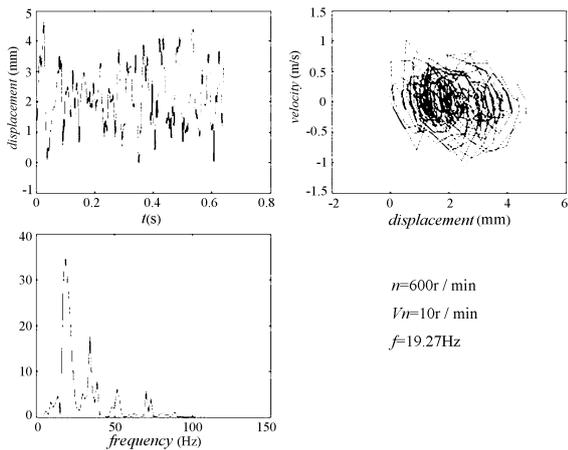


图 7 混沌运动  
Fig. 7 Chaotic motion

当在粘弹性传动带的二阶固有频率附近扫频时,发现传动带依次出现 1 倍周期运动,2 倍周期运动和混沌运动,每组数据的波形图、相图和功率谱图如图 8-10 所示.此时当激励频率为 43.47Hz 时,系统出现 2 倍周期运动.当系统频率为 43.67Hz 时,我们

观察到混沌运动.继续增大激励频率,粘弹性传动带的横向振动由混沌运动变成周期运动.

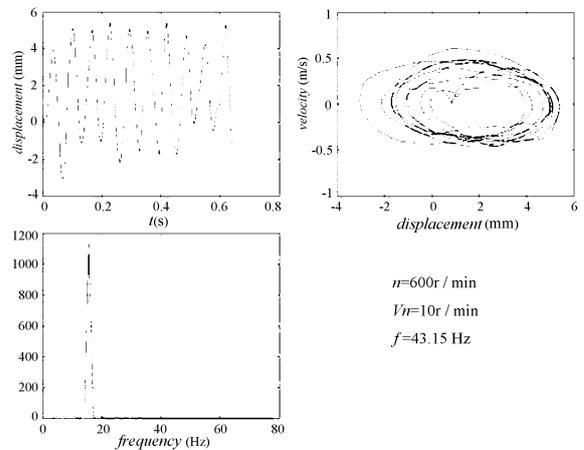


图 8 1 倍周期运动  
Fig. 8 Period 1 motion

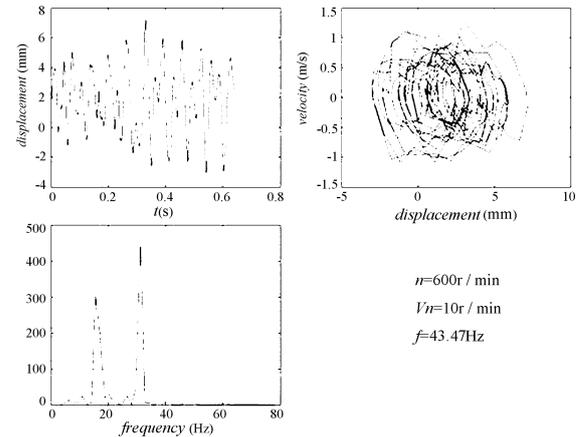


图 9 2 倍周期运动  
Fig. 9 Period 2 motion

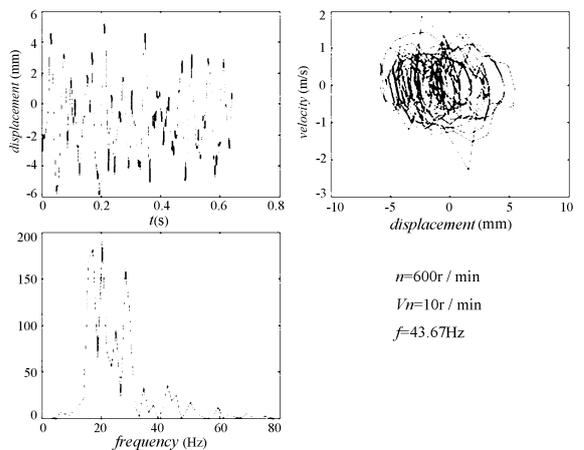


图 10 混沌运动  
Fig. 10 Chaotic motion

大多数情况下,我们观察不到粘弹性传动带的倍周期运动,而是由周期运动直接演变的混沌运动,图 11 和图 12 就是这种情况下的混沌运动.

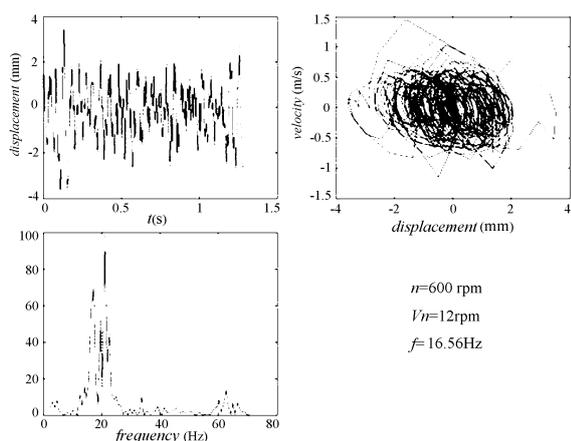


图 11 混沌运动

Fig. 11 Chaotic motion

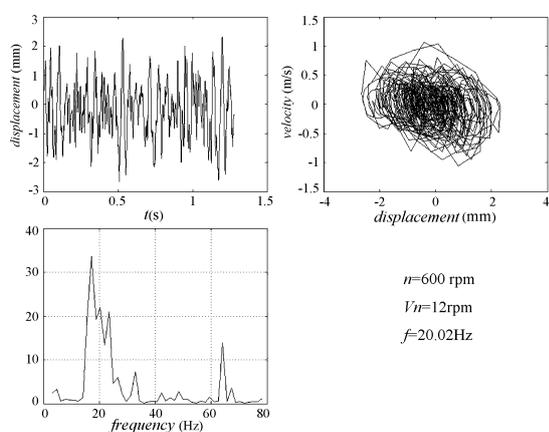


图 12 混沌运动

Fig. 12 Chaotic motion

### 3 结论

本文主要研究了不同转速条件下,激励频率对粘弹性传动带振动响应的影响. 频率响应曲线显示

系统呈现硬弹簧特性. 波形图、相图和频谱分析结果表明传动带系统存在周期运动,倍周期运动和混沌运动. 实验结果发现了传动带系统从周期到多倍周期再到混沌运动的演变过程. 在实验中还发现多倍周期运动并不是总在振幅较大时出现.

### 参 考 文 献

- 1 F. Pellicano and F. Vestroni Nonlinear dynamics and bifurcations of an axially moving beam. *Journal of Vibration Acoustics*, 2000, 122: 21 ~ 30
- 2 L. Q. Chen. Analysis and control of transverse vibrations of axially moving strings. *ASME Applied Mechanics Reviews*, 2005, 58: 91 ~ 116
- 3 张伟, 温洪波, 姚明辉. 黏弹性传动带 1:3 内共振时的周期和混沌运动. *力学学报*, 2003, 36(4): 443 ~ 454 (W. Zhang, H. B. Wen and M. H. Yao. Periodic and chaotic oscillations of a parametrically excited viscoelastic moving belt with 1:3 internal resonance. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 36(4): 443 ~ 454 (in Chinese))
- 4 W. Zhang and C. Z. Song. Research on higher-dimensional periodic and chaotic oscillations for a parametrically excited viscoelastic moving belt with multiple internal resonances. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2007, 17(5)
- 5 J. A. Wickert and C. D. Mote Traveling load response of an axially moving string. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, 149: 267 ~ 284
- 6 J. Moon, and J. A. Wickert. Non-linear vibration of power transmission belts. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 200: 419 ~ 431

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON NONLINEAR VIBRATION OF AN AXIALLY MOVING VISCOELASTIC BELT\*

Zhang Hongxing Zhang Wei Yao Minghui Liu Yanqi

(College of Mechanical Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** The nonlinear vibration of an axially moving viscoelastic belt as typical moving continua was experimentally investigated. The belt was driven by two pulleys, whose rotating speed slightly varied around the average speed. With the change of frequency, we obtained the nonlinear characteristic of the motion around the resonance area. Multi-periodic motion and chaotic motion were found.

**Key words** chaotic motion, nonlinear vibration, viscoelastic belt

Received 12 April 2007, revised 24 May 2007.

\* The project supported by National Natural Science Foundation of China (10372008, 10328204), National Science Foundation Science Foundation of Beijing (3032006) and National Science Foundation Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (10425209).