

# 三轮非圆同步带传动试验台设计与应用

孙新城<sup>1,2</sup> 陈建能<sup>1,3</sup> 武传宇<sup>1,3</sup> 肖达度<sup>1</sup> 叶 军<sup>1,2</sup>

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江工业职业技术学院汽车学院, 绍兴 312000;  
3. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018)

**摘要:** 为了测试三轮非圆同步带传动机构的传动性能,并获取其传动精度,设计了三轮非圆同步带传动性能测试试验台,并进行试验研究。三轮非圆同步带传动试验台以工控机为主控、步进电机为动力,能够实现转速、负载和中心距可调和试验数据采集、实时显示、统计和分析的功能。定义了传动周期偏差率和传动比精度偏差率两指标,用于衡量三轮非圆同步带的传动性能。试验表明,试验台能够完成不同工况的三轮非圆同步带传动测试,负载和速度均影响传动比精度偏差率和传动周期偏差率,对传动周期偏差率的影响更大;当转速在 0 ~ 300 r/min、转矩在 0 ~ 50 N·m 范围内时,试验所得主-从动轮传动比与理论传动比基本一致,主-从动轮传动周期偏差率为 0.80% ~ 4.80%、主-从动轮传动比精度偏差率为 0.18% ~ 1.23%;当转速为 80 r/min、负载转矩为 16.25 N·m 时,其传动比精度偏差率 0.18%、传动周期偏差率 0.80%,为此试验范围内的最佳传动工况。

**关键词:** 三轮非圆同步带; 非匀速传动; 试验台; 传动周期偏差率; 传动比精度偏差率

中图分类号: TH132.3<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298 (2021)01-0073-09

OSID:



## Design and Application of Three-pulley Noncircular Synchronous Belt Transmission Test Rig

SUN Xincheng<sup>1,2</sup> CHEN Jianneng<sup>1,3</sup> WU Chuanyu<sup>1,3</sup> XIAO Dadu<sup>1</sup> YE Jun<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China  
2. College of Automotive, Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China  
3. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to test the transmission performance of the three-pulley noncircular synchronous belt transmission mechanism and obtain its transmission accuracy, a three-pulley noncircular synchronous belt transmission performance test bench was designed and tested. The three-pulley noncircular synchronous belt transmission test bench was mainly controlled by an industrial computer and stepper motors. It can realize the functions of adjustable speed, load and center distance, real-time display, collection, statistics and analysis of test data. Two indexes of transmission cycle deviation rate and transmission ratio accuracy deviation rate were defined, which were used to measure the transmission performance of the three-pulley noncircular synchronous belt. It was found through experiments that the test bench can realize three-pulley noncircular synchronous belt transmission test under different working conditions, and the size of load and speed affected the transmission ratio accuracy deviation rate and transmission cycle deviation rate, and had more influence on the transmission cycle deviation rate. When the speed was in the range of 0 ~ 300 r/min and the torque was in the range of 0 ~ 50 N·m, the test drive-driven wheel transmission ratio was basically consistent with the theoretical drive ratio; the drive-driven wheel transmission cycle deviation rate was 0.80% ~ 4.80%. The accuracy deviation rate of the driving ratio between the main and driven wheels was between 0.18% and 1.23%; when the speed was 80 r/min and the load torque was 16.25 N·m, the accuracy deviation rate of the transmission ratio was 0.18%, and the transmission cycle deviation rate was 0.80%, which was the best transmission condition within the test range.

**Key words:** three-pulley noncircular synchronous belt; non-uniform speed transmission; test bench; transmission cycle deviation rate; transmission ratio accuracy deviation rate

收稿日期: 2020-02-15 修回日期: 2020-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675486, 51805487)和浙江省重点研发项目(2018C02046)

作者简介: 孙新城(1979—),男,博士生,浙江工业职业技术学院副教授,主要从事机构创新设计研究, E-mail: sunmeng862@163.com

通信作者: 陈建能(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事机构综合与分析以及农业机械装备技术研究, E-mail: jiannengchen@zstu.edu.cn

## 0 引言

非圆同步带传动机构能够很好地解决大中心距的非匀速传动工程问题<sup>[1]</sup>。作为一种新型非匀速传动机构,带轮的非圆特性使其在传动过程中带长实时变化量大,从而导致跳齿、振动等问题,难以精确实现非匀速传动,针对这一问题,浙江理工大学研究团队建立理论计算模型,进行了三轮非圆同步带传动机构研究。

何小晶<sup>[2]</sup>提出圆-偏心圆-非圆带轮传动机构,采用自由节曲线非圆带轮作为张紧轮来补偿非圆带传动过程的松弛量变化,以带长松弛量最小为目标优化张紧轮节曲线。但是,在优化过程中用户需根据松弛量变化特性调整张紧轮节曲线上的点,并进行拟合、迭代计算,其计算量大、耗时长,最后得出,3个轮的中心距为110 mm时松弛量为10.36 mm<sup>[2]</sup>,效果还不够理想。肖达度<sup>[1]</sup>针对圆-自由非圆-自由非圆三轮同步带轮传动机构建立了张紧轮优化模型,以曲率半径为优化变量建立寻优区域,通过构建自动优化算法实现非圆张紧轮自动寻优。当三轮的中心距为110 mm时,同步带带长松弛量可以达到0.03 mm,效果显著。在三轮非圆同步带传动机构中,通过对非圆张紧轮的优化,理论上能够保证一个转动周期内同步带带长的恒定不变,从而实现从动轮的精确非匀速传动。

在实际工程应用中,非圆同步带传动机构处于不同转速、不同负载等条件下,非圆同步带能否精确实现非匀速传动,以避免出现跳齿等现象,需要进一步试验<sup>[3-5]</sup>。为此,本文设计非圆同步带传动性能测试试验台,测试不同转速、不同负载转矩下的三轮非圆同步带传动的传动周期偏差率和传动比精度偏差率,为三轮非圆同步带传动的使用工况选择提供参考<sup>[6-7]</sup>。

## 1 试验台设计

### 1.1 总体结构与工作原理

本试验台的作用是实现三轮非圆同步带传动在不同负载、不同中心距、不同传动比规律工况下的测试,因此要求该传动机构试验台的从动轮和张紧轮的相对位置、负载、转速都可调<sup>[8-10]</sup>。传动机构的简图如图1所示,主动轮是圆形的同步带轮1,从动轮是非圆的同步带轮2,以输出非匀速运动;张紧轮是非圆的同步带轮3,以补偿传动过程中的带长松弛量变化,保证传动的可靠性。

设计试验台转速调节范围为0~300 r/min,负载转矩调整范围0~50 N·m,中心距范围80~

520 mm,从而满足多种工况下非圆同步带传动的测试要求。试验台总体结构如图2所示,主动轮与步进电机通过联轴器连接作为动力输入端,非圆从动轮与电涡流测功机固联为负载转矩施加端,非圆张紧轮固定在调整架上;带轮的负载转矩、转速等被测量值实时显示在测量面板上。通过测功机模拟实际工况,对从动轮进行加载,模拟实际工况测试,记录从动轮的负载转矩、转速等参数,分析其非匀速传动的性能。

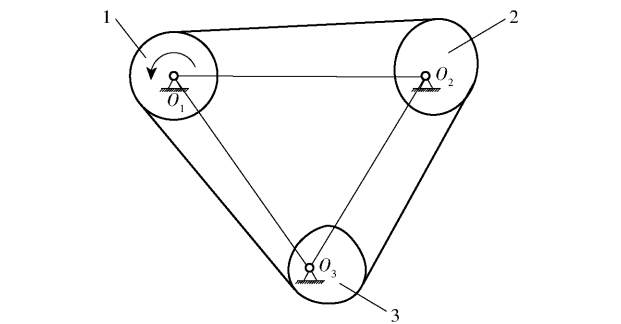


图1 三轮非圆同步带传动机构示意图  
Fig.1 Schematic of three-pulley noncircular synchronous belt transmission

1. 圆形同步带轮(主动轮) 2. 非圆同步带轮(从动轮) 3. 非圆同步带轮(张紧轮)

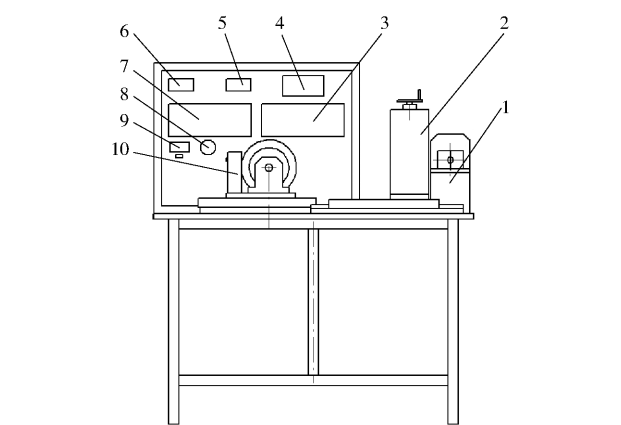


图2 试验台总体结构示意图  
Fig.2 Schematic of test rig summary structure

1. 主动端测功机 2. 张紧轮调节架 3. 从动轮转矩测量仪 4. 主动轮转矩测量仪 5. 从动轮角度测量仪 6. 主动轮角度测量仪 7. 加载控制器 8. 从动轮测矩仪 9. 脉冲发生器 10. 从动端测功机

### 1.2 传动原理与主要部件

为实现变速、变载的设计要求,选用130BYG350D型三相步进电机作为输入动力,通过扭矩传感器、光栅、测功机等传感器检测非圆同步带的输入和输出扭矩、速度变化情况,其传动路线为:输入电机输入动力,通过联轴器将动力传递给主动端测功机和主动轮,进一步通过同步带将动力传递到从动轮与从动端测功机,如图3。根据三轮非圆同步带传动的试验要求与传动原理选择试验台主要

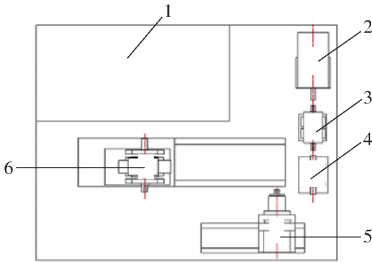


图 3 三轮非圆同步带试验台传动原理图

Fig.3 Transmission structure diagram of three-pulley noncircular timing belt test rig

1. 数据显示区 2. 输入电机 3. 联轴器 4. 主动轮与主动端测功机 5. 张紧轮与张紧轮支撑座 6. 从动轮与从动端测功机

部件及参数,具体如下:

(1)传动机构:圆形主动轮、非圆从动轮、非圆张紧轮均采用线切割,同步带采用模数为 3、齿数为 56 的模数制橡胶同步带。

(2)步进电机:130BYG350D 型交流步进电机,电机转速为 0 ~ 300 r/min。

(3)扭矩传感器:量程 50 N·m,转速范围 0 ~ 6 000 r/min,精度等级 0.5% FS,用于获取主动轮的实时转矩。

(4)速度传感器:圆光栅 10 000 线。

(5)数据采集设备:转矩转速测量仪分别输出一根 RS232 通信数据线,角度测量仪配有 RS485 通信数据线,并联后输出,接入 485 转 232 转换器后再插入计算机对应接口。

(6)负载转矩加载设备:CC - 50LF 型电涡流测功机,转矩量程 50 N·m,通过调节电流来调节加载力矩。

(7)其他设备:交流调速模块(用于调节交流步进电机的输出转速)和 220 V 开关电源。

1.3 机械结构与控制系统设计

试验台主要包括传动机构、驱动电机、扭矩传感器、速度传感器、中心距调整装置、负载加载控制设备和工控机,如图 4、5 所示。三相交流步进电机与圆形主动轮之间通过梅花联轴器相连,联轴器与圆形主动轮之间装有扭矩传感器和用于测速的光栅,由于步进电机的工作特性,可以较大范围输入转矩和转速;主动轮通过同步带带动从动轮和张紧轮转动。从动轮后端接有电涡流测功机和测速光栅,对主动轮通过同步带传递过来的转矩和转速进行检测并输出。为了分析负载转矩对非圆三轮同步带传动机构传动周期的影响,电涡流测功机通过调节电流来调节加载在从动轮上的负载转矩。

该试验台主要用于对理论设计的三轮非圆同步带传动精度测试,所以其控制方式采用开环控制。



图 4 三轮非圆同步带试验台主视图

Fig.4 Front view of three-pulley noncircular synchronous belt test rig

1. 主动轮角度测量仪 2. 从动轮角度测量仪 3. 主动轮转矩测量仪 4. 加载控制器 5. 从动轮转矩测量仪

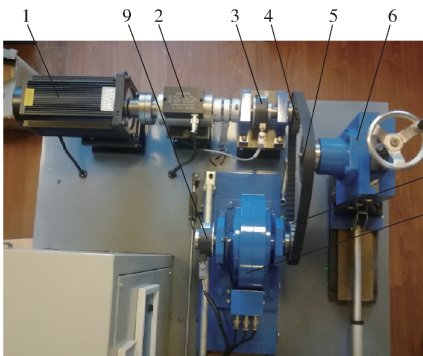


图 5 三轮非圆同步带试验台俯视图

Fig.5 Top view of three-pulley noncircular synchronous belt test rig

1. 输入电机 2. 联轴器 3. 主动端测功机 4. 主动轮 5. 张紧轮 6. 张紧轮支撑座 7. 从动轮 8. 从动端测功机 9. 扭矩传感器

作为动力输入的步进电机,由 220 V 电源供电,通过变压模块转成 10 V 电压供给调频模块,调频模块可调制出所需频率的方波送到控制器,控制步进电机按设定的转速旋转。

为了方便试验数据的采集、统计和分析,根据试验要求开发了基于 Matlab 的非圆同步带试验软件,对主-从动轮的输入、输出转速和扭矩以及速比等参量通过传感器进行实时采集,工控机上的主程序对采集的数据进行分析、处理,以曲线和数据的形式保存、显示,软件界面如图 6、7。

2 试验设计

三轮非圆同步带传动机构主要由圆形主动轮、非圆从动轮、非圆张紧轮、同步带组成,在实际应用过程中,由于主动轮与从动轮的传动比实时变化,所需的同步带理论带长在一定范围内变化,进一步引起输出转速、转矩随着输入转速和同步带张紧程度变化而变化<sup>[11-13]</sup>。

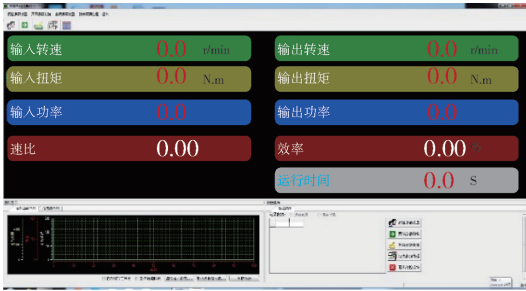


图6 试验测试软件数据采集界面

Fig.6 Data acquisition interface of test software

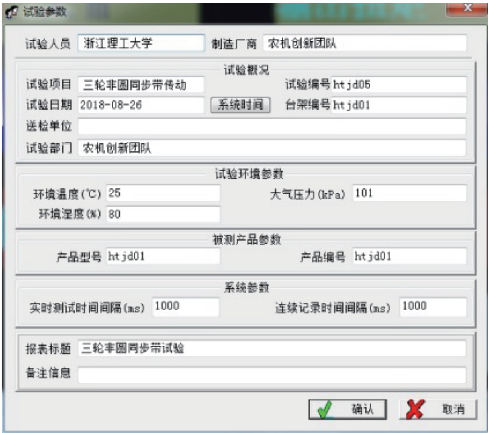


图7 软件试验参数设置界面

Fig.7 Software test parameters setting interface

为了方便对比,设计了4组中心距都相同的三轮非圆同步带传动机构,每组主-从动轮转角变化规律均为 $\varphi_2 = \varphi_1 + m\sin\varphi_1$  ( $m$  为非匀速变化系数,  $\varphi_1$  为主动轮转角,  $\varphi_2$  为从动轮转角),主动轮半径相同,具体参数如表1。根据表1参数利用前期建立的非圆同步带带长计算模型,计算得出其对应的理论带长变化如图8<sup>[1]</sup>,不同 $m$ 值对应的最大松弛量如表1。

表1 4组三轮非圆同步带传动机构参数及最大松弛量  
Tab.1 Parameters and maximum slack of four groups of three-pulley noncircular synchronous belt transmission mechanism

| 组号 | 非匀速变化系数 | 主动轮-从动轮中心距/mm | 主动轮-张紧轮中心距/mm | 从动轮-张紧轮中心距/mm | 主动轮半径/mm | 最大松弛量/mm |
|----|---------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|
| 1  | -0.2    | 110           | 110           | 110           | 30       | 0.858    |
| 2  | -0.1    | 110           | 110           | 110           | 30       | 0.379    |
| 3  | 0.1     | 110           | 110           | 110           | 30       | 0.166    |
| 4  | 0.2     | 110           | 110           | 110           | 30       | 0.725    |

由理论研究可知,在非圆同步带传动机构的一个转动周期内同步带带长实时变化,将一个周期内任意时刻的带长与初始带长之差称为带长松弛量。根据图8变化曲线可知,非匀速变化系数 $m$ 越接近0(即从动轮越接近圆),同步带带长松弛量变化越

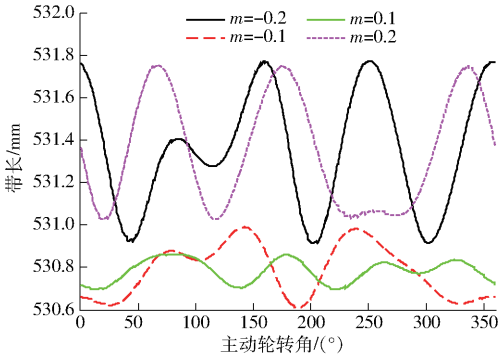


图8 不同 $m$ 值时三轮非圆同步带带长变化曲线

Fig.8 Variation curves of belt length of three-pulley noncircular synchronous belts at different  $m$  values

小,带长波动越小,带传动理论精度越高。

以 $m = 0.1$ 的三轮非圆同步带传动机构作为试验对象,进行不同转速、转矩、负载的试验研究,同步带轮如图9所示,具体试验步骤如下:

(1)将加工好的 $m = 0.1$ 三轮非圆同步带轮安装在试验台架上,紧固连接件,安装同步带,调整试验台参数。

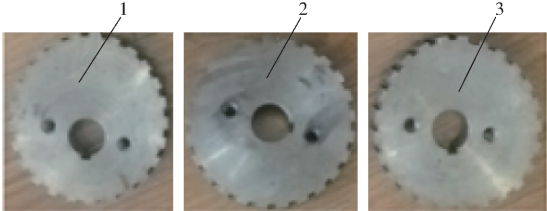


图9  $m = 0.1$ 的三轮非圆同步带轮

Fig.9 Noncircular synchronous belt pulley with non-uniform speed variation coefficient  $m = 0.1$

1. 张紧轮 2. 主动轮 3. 从动轮

(2)根据设计时确定的初始相位,调整非圆从动轮、非圆张紧轮的初始位置,使同步带初始时刻处于张紧状态。启动试验台,通过仪表读取此时主动轮与从动轮的转矩、转速,打开工控机上的软件,读取串口数据并采集测试。

(3)调整输入电机转速至80 r/min,在步进电机转矩输入范围内,使电涡流测功机产生3种不同的负载转矩,再用扭矩测试仪和测速光栅检测主动轮和从动轮的转矩、转速和角位移,并通过工控机上的测试软件进行记录、统计、分析。

(4)记录好相关数据后,将电机输出转速依次调节为100、120 r/min,重复步骤(3)。

(5)通过检测软件对采集的数据进行拟合,将拟合结果和理论结果进行对比、分析。

3 试验结果与分析

三轮非圆同步带传动过程中同步带松弛量变化影响同步带传动精度<sup>[14-15]</sup>。同步带带长松弛量主

要受相邻两带轮中心距、非圆带轮节曲线形状、负载转矩和速度的影响,对于设计好的非圆同步带传动机构,在实际应用中带轮中心距、非圆带轮节曲线形状在试验过程中是固定不变的,负载转矩和速度的变化成为实际应用中影响传动精度的主要因素<sup>[16-18]</sup>。本次试验在不同速度工况下通过加载不同负载转矩测试分析三轮非圆同步带的传动精度。

3.1 传动精度指标

本文提出用传动比精度偏差率和传动周期偏差率来衡量三轮非圆同步带传动精度。

传动比精度偏差率  $p$  表达式为

$$p = \left| 1 - \frac{1}{720} \sum_{n=0}^{720} i_n \right| \times 100\% \tag{1}$$

其中

$$i_n = \frac{\varphi_{2ns}}{\varphi_{2nl}}$$
$$\varphi_{2nl} = \varphi_{1nl} + m \sin \varphi_{1nl}$$
$$\varphi_{1nl} = n \frac{2\pi}{720}$$

式中  $i_n$ ——从动轮任意时刻实际转角与理论转角之比

$\varphi_{1nl}$ ——主动轮在某一瞬时的理论角位移

$\varphi_{2ns}$ ——从动轮在某一瞬时的实际角位移

$\varphi_{2nl}$ ——从动轮在某一瞬时的理论角位移

传动周期偏差率  $q$  表达式为

$$q = \left| 1 - \frac{T_s}{T_l} \right| \times 100\% \tag{2}$$

式中  $T_l$ ——三轮非圆同步带传动机构的理论传动周期

$T_s$ ——三轮非圆同步带传动机构的实际传动周期

3.2 空载试验

为了验证所设计加工的  $m = 0.1$  的非圆同步带轮组是否正常传动,满足试验要求,首先对该组带轮进行转速为 80 r/min 的空载试验。将传感器采集的数据传输到工控机,用软件对试验离散数据点拟合并将拟合曲线与理论曲线对比。图 10 所示为主动轮和从动轮传动比的离散数据点、拟合曲线和理论曲线。

如图 10 所示,试验传动比离散数据点大体呈现一定规律性趋势,并在极小误差范围内波动,数据具有统计分析意义,试验离散点数据拟合的实际传动比曲线与理论传动比曲线趋势相同,传动比规律基本相同<sup>[19-21]</sup>。可见该组非圆带轮可以用于三轮非圆同步带传动传动精度测试。

3.3 负载和转速试验

非圆同步带传动过程中传动比按设计规律实时

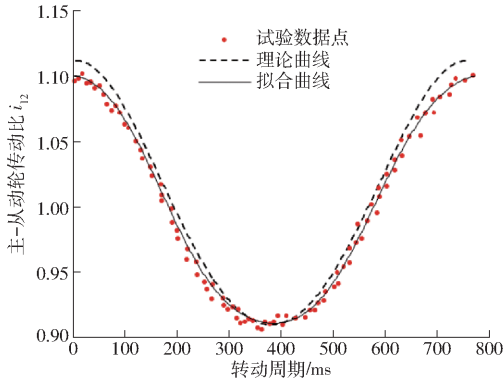


图 10 主动轮与从动轮传动比数据曲线

Fig. 10 Data curves of transmission ratio between driving and driven pulley under no-load condition

变化,实现非匀速传动。根据理论分析结果可知,随着带轮转速变高,其动平衡性变差,振动变大,因此,非圆同步带传动适合低速传动工况。根据非圆同步带传动的实际应用工况,试验选取了 3 组低速工况 (80、100、120 r/min);该三轮非圆同步带试验台能提供最大负载转矩为 50 N·m,在同一转速下,选取 3 组负载转矩进行试验,分别是 8.12、16.25、24.36 N·m,并对试验结果进行分析。

(1) 主动轮转速 80 r/min

在该转速下,三轮非圆同步带传动机构的理论转动周期为主动轮转动一周所需要的时间  $T_{80}$ ,即

$$T_{80} = \frac{60\,000}{80} = 750\text{ ms} \tag{3}$$

在该转速下,分别对从动轮负载转矩为 8.12、16.25、24.36 N·m 进行试验,其试验数据如图 11、12、13 所示。

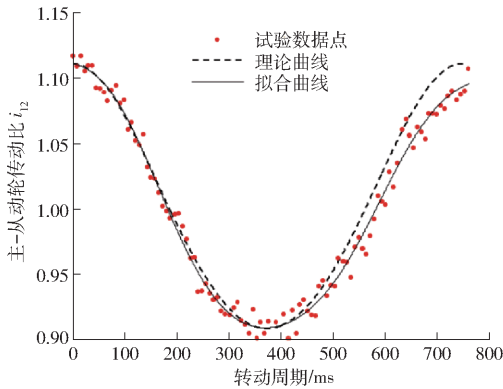


图 11 转速 80 r/min、负载转矩 8.12 N·m 时主-从动轮传动比曲线

Fig. 11 Driving - driven pulley transmission ratio curves when speed ratio was 80 r/min and load torque was 8.12 N·m

根据图11、12、13,将试验数据代入式(1)、(2),得三轮非圆同步带传动参数如表 2 所示。发现输入转速为 80 r/min 时,负载转矩对传动比精度偏差率和

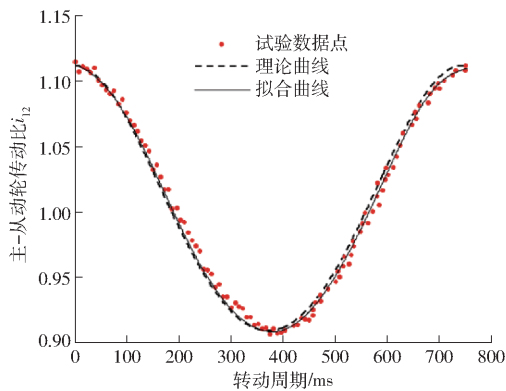


图12 转速 80 r/min、负载转矩 16.25 N·m 时  
主-从动轮传动比曲线  
Fig. 12 Driving – driven pulley transmission ratio curves  
when speed ratio was 80 r/min and load torque was  
16.25 N·m

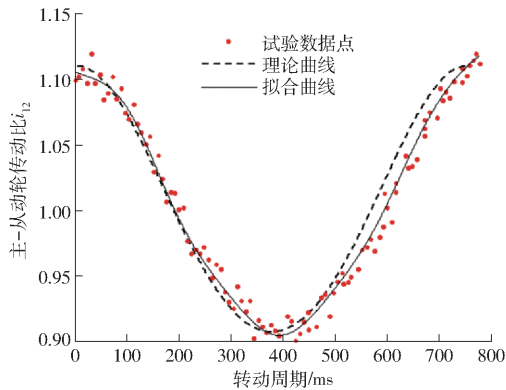


图13 转速 80 r/min、负载转矩 24.36 N·m 时  
主-从动轮传动比曲线  
Fig. 13 Driving – driven pulley transmission ratio curves  
when speed ratio was 80 r/min and load torque was  
24.36 N·m

传动周期偏差率都有一定影响,且对传动周期偏差率影响较大;当负载转矩为 16.25 N·m 时,其传动比离散数据点均布性最好、传动比精度偏差率最小,由于该负载转矩适中,使同步带带长松弛量最小,传动平稳。

表 2 转速 80 r/min 时不同负载转矩试验结果  
Tab.2 Comparison of different test conditions of  
load torque at speed of 80 r/min

| 负载转矩/<br>(N·m) | 理论周期/<br>ms | 实际周期/<br>ms | 传动比精度<br>偏差率/% | 传动周期<br>偏差率/% | 跳齿<br>现象 |
|----------------|-------------|-------------|----------------|---------------|----------|
| 8.12           | 750         | 760         | 0.32           | 1.33          | 无        |
| 16.25          | 750         | 756         | 0.18           | 0.80          | 无        |
| 24.36          | 750         | 772         | 0.56           | 2.93          | 无        |

(2) 主动轮转速 100 r/min

在该转速下,三轮非圆同步带传动机构的理论转动周期为主动轮转动一周所需要的时间  $T_{100}$ ,即

$$T_{100} = \frac{60\,000}{100} = 600\text{ ms} \tag{4}$$

当负载转矩为 8.12 N·m 时,三轮非圆同步带传动机构平稳运转,未出现跳齿现象,如图 14 所示。保持转速不变,负载转矩增加为 16.25 N·m,该传动机构仍旧平稳运转,也未出现跳齿现象,如图 15 所示;负载继续增加为 24.36 N·m,传动机构平稳性变差,并出现跳齿现象,如图 16 所示。

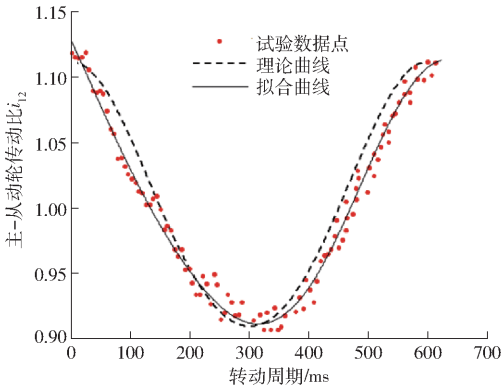


图 14 转速 100 r/min、负载转矩 8.12 N·m 时  
主-从动轮传动比曲线  
Fig. 14 Driving – driven pulley transmission ratio curves  
when speed ratio was 100 r/min and load torque was  
8.12 N·m

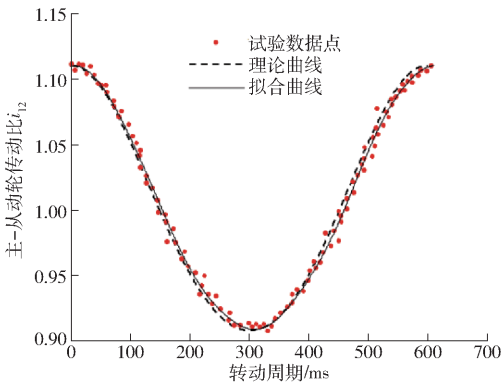


图15 转速 100 r/min、负载转矩 16.25 N·m 时  
主-从动轮传动比曲线  
Fig. 15 Driving – driven pulley transmission ratio curves  
when speed ratio was 100 r/min and load torque was  
16.25 N·m

根据图14、15、16,将试验数据代入式(1)、(2),得三轮非圆同步带传动效果如表 3 所示。发现输入转速为 100 r/min 时,负载转矩对传动比精度偏差率和传动周期偏差率的影响与输入转速为 80 r/min 时的规律相同,但是传动比精度偏差率和传动周期偏差率都更大,且开始出现跳齿现象。

(3) 主动轮转速 120 r/min

在该转速下,三轮非圆同步带传动机构的理论转动周期为主动轮转动一周所需要的时间  $T_{120}$ ,即

$$T_{120} = \frac{60\,000}{120} = 500\text{ ms} \tag{5}$$

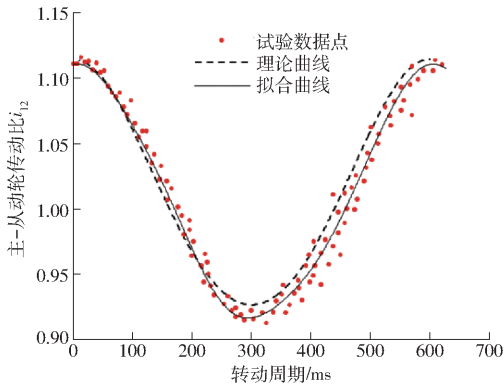


图 16 转速 100 r/min、负载转矩 24.36 N·m 时  
主-从动轮传动比曲线

Fig. 16 Driving – driven pulley transmission ratio curves  
when speed ratio was 100 r/min and load torque was  
24.36 N·m

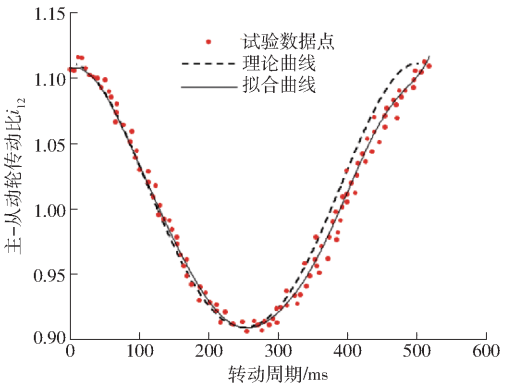


图 18 转速 120 r/min、负载转矩 16.25 N·m 时  
主-从动轮传动比曲线

Fig. 18 Driving – driven pulley transmission ratio curves  
when speed ratio was 120 r/min and load torque was  
16.25 N·m

表 3 转速 100 r/min 时不同负载转矩试验结果

Tab.3 Comparison of different test conditions of  
load torque at speed of 100 r/min

| 负载转矩/<br>(N·m) | 理论周期/<br>ms | 实际周期/<br>ms | 传动比精度<br>偏差率/% | 传动周期<br>偏差率/% | 跳齿<br>现象 |
|----------------|-------------|-------------|----------------|---------------|----------|
| 8.12           | 600         | 617         | 0.33           | 2.83          | 无        |
| 16.25          | 600         | 609         | 0.26           | 1.50          | 无        |
| 24.36          | 600         | 622         | 0.62           | 3.67          | 跳齿       |

当负载转矩 8.12 N·m 时,三轮非圆同步带传动机构平稳性变差,出现跳齿现象,如图 17 所示。负载转矩增加到 16.25 N·m,传动机构平稳运转,未出现跳齿现象,如图 18 所示。当负载增加到 24.36 N·m 时,传动机构平稳性又变差,且出现跳齿现象,如图 19 所示。

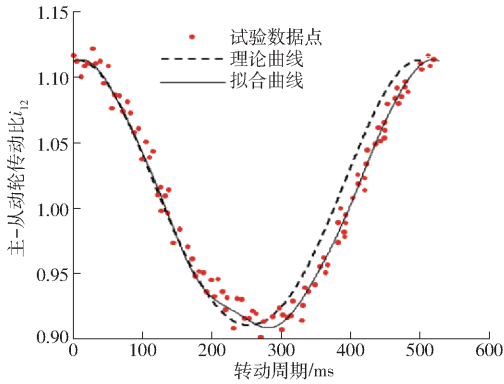


图 17 转速 120 r/min、负载转矩 8.12 N·m 时  
主-从动轮传动比曲线

Fig. 17 Driving – driven pulley transmission ratio curves  
when speed ratio was 120 r/min and load torque was  
8.12 N·m

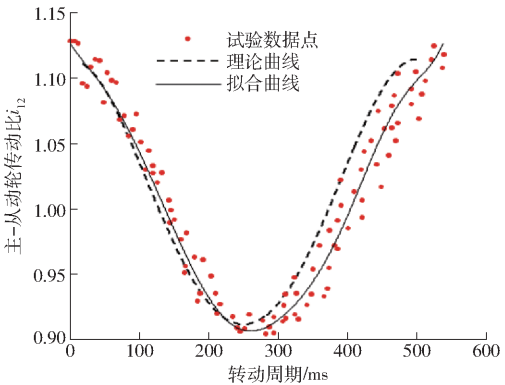


图 19 转速 120 r/min、负载转矩 24.36 N·m 时  
主-从动轮传动比曲线

Fig. 19 Driving – driven pulley transmission ratio curves  
when speed ratio was 120 r/min and load torque was  
24.36 N·m

表 4 转速 120 r/min 时不同负载转矩试验结果

Tab.4 Comparison of different test conditions of  
load torque at speed of 120 r/min

| 负载转矩/<br>(N·m) | 理论周期/<br>ms | 实际周期/<br>ms | 传动比精度<br>偏差率/% | 传动周期<br>偏差率/% | 跳齿<br>现象 |
|----------------|-------------|-------------|----------------|---------------|----------|
| 8.12           | 500         | 517         | 1.12           | 3.60          | 跳齿       |
| 16.25          | 500         | 511         | 1.01           | 2.20          | 无        |
| 24.36          | 500         | 524         | 1.23           | 4.80          | 跳齿       |

时规律相同;但是传动比精度偏差率和传动周期偏差率都更大,且出现跳齿现象的机率多。

3.4 试验分析

(1)不同负载、不同转速下所获得的实际传动比规律曲线都与理论传动比规律曲线趋势基本一致,证明了非圆三轮同步带传动试验台设计的合理性和正确性<sup>[21-23]</sup>。

(2)在输入转速相同情况下,施加给非圆从动轮的负载转矩影响着传动比精度偏差率和传动周期偏差率,且对传动周期偏差率的影响更大一些<sup>[24]</sup>。在 3 组

根据图17、18、19,将试验数据代入式(1)、(2)得三轮非圆同步带传动结果如表 4 所示。发现输入转速为 120 r/min 时,负载转矩对传动比精度偏差率和传动周期偏差率的影响与输入转速为80、100 r/min

不同速度工况下,都出现负载转矩为  $16.25 \text{ N}\cdot\text{m}$  时传动比精度偏差率和传动周期偏差率最小,这时主-从动轮传动比的试验值与理论值的吻合度最好、传动精度最高,如图 20 所示。由于该负载转矩适中,使同步带松弛量最小,传动平稳。

(3) 在从动轮负载转矩相同情况下,随着主动轮转速升高,传动比精度偏差率和传动周期偏差率都变大,其中传动周期变化率变大更明显,如图 21 所示,且速度越高越容易跳齿。

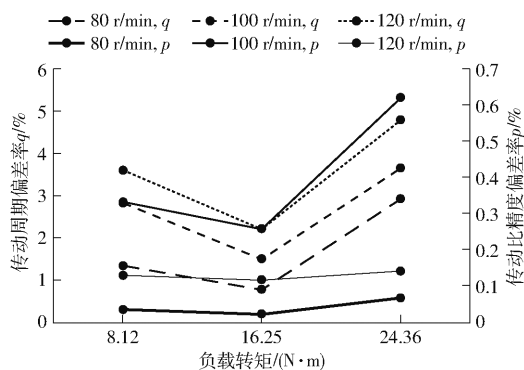


图 20 不同转速工况下传动周期偏差率与传动比精度偏差率曲线

Fig. 20 Curves of transmission cycle deviation rate and transmission ratio accuracy deviation rate under different speed conditions

## 4 结论

(1) 设计了三轮非圆同步带传动试验台,可实现主-从动轮中心距  $110 \sim 520 \text{ mm}$  可调、主动轮输入转速  $0 \sim 300 \text{ r/min}$  可调、非圆从动轮负载  $0 \sim 50 \text{ N}\cdot\text{m}$  可调等功能,能满足多种工况非圆同步带传动机构

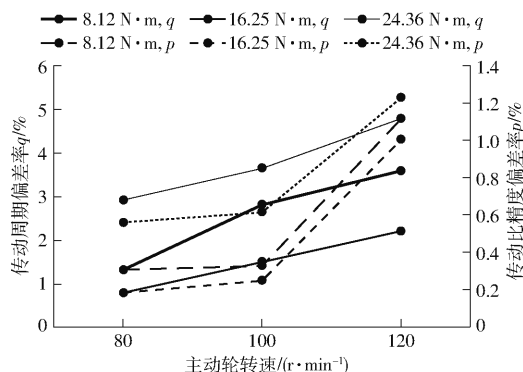


图 21 不同转矩工况下传动周期偏差率与传动比精度偏差率曲线

Fig. 21 Curves of transmission cycle deviation rate and transmission ratio accuracy deviation rate under different torque conditions

的试验要求,并能采集和实时显示主、从动轮的转速、转矩、功率等参数,配套开发的分析软件能够对采集的数据进行统计分析。

(2) 根据试验数据,当主-从动轮转角关系为  $\varphi_2 = \varphi_1 + 0.1 \sin \varphi_1$ 、输入转速在  $0 \sim 300 \text{ r/min}$ 、负载转矩在  $0 \sim 50 \text{ N}\cdot\text{m}$  范围时,三轮非圆同步带运转平稳,同步带传动周期偏差率在  $0.80\% \sim 4.80\%$  之间,传动比精度偏差率在  $0.18\% \sim 1.23\%$  之间;当转速为  $80 \text{ r/min}$ 、负载转矩为  $16.25 \text{ N}\cdot\text{m}$  时,其传动比精度偏差率  $0.18\%$ ,传动周期偏差率  $0.80\%$ ,为此试验范围内的最佳传动工况。

(3) 负载和速度均影响传动比精度偏差率和传动周期偏差率,对传动周期偏差率的影响更大,因此,在非圆同步带轮的设计中应充分考虑应用工况的速度要求和负载转矩的大小。

## 参 考 文 献

- [1] 肖达度. 非圆三轮同步带传动优化方法及类多边形效应分析与应用研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2019.  
XIAO Dado. Non-circular three-wheel synchronous belt transmission optimization method and analysis and application of polygon-like effect [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019. (in Chinese)
- [2] 何小晶. 三轮式非圆同步带传动设计方法及关键技术研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2017.  
HE Xiaojing. Three-wheeled non-circular synchronous belt transmission design method and key technology research [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017. (in Chinese)
- [3] DUNKERLEY S. Mechanism[M]. New York: Read Books,1988.
- [4] MILLER F H, YONG C H. Proportions of elliptic gears for quick return mechanism[J]. Product Engineering, 1945, 10(2): 42 - 47.
- [5] 代丽,赵雄,赵匀. 偏心链轮传动机构的运动学分析及参数优化[J]. 农业机械学报,2009,40(12): 233 - 236.  
DAI Li, ZHAO Xiong, ZHAO Yun. Kinematics analysis and parameter optimization of eccentric sprocket transmission mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 233 - 236. (in Chinese)
- [6] 高雪强. 非圆齿轮传动技术概述[J]. 机械传动,2003,27(3): 5 - 8.  
GAO Xueqiang. Overview of non-circular gear transmission technology [J]. Mechanical Transmission, 2003, 27(3): 5 - 8. (in Chinese)
- [7] 赵秀文,赵玉梅,李明. 同步带传动的研究[J]. 吉林工学院学报(自然科学版),1996,17(3): 50 - 55.  
ZHAO Xiuwen, ZHAO Yumei, LI Ming. Research on synchronous belt transmission [J]. Journal of Jilin Institute of Technology (Natural Science Edition), 1996, 17(3): 50 - 55. (in Chinese)

- [8] 诸世敏,罗善明,余以道,等. 带传动理论与技术的现状与展望[J]. 机械传动,2007,31(1):92-96.  
ZHU Shimin, LUO Shanming, YU Yidao, et al. The status quo and prospect of belt transmission theory and technology [J]. Mechanical Transmission, 2007, 31(1): 92-96. (in Chinese)
- [9] 李宇鹏,赵文英,杨育林. 非圆带轮传动设计中的若干问题[J]. 机械工程师,1996(2):42-43.  
LI Yupeng, ZHAO Wenying, YANG Yulin. Some problems in the design of non-circular pulley transmission [J]. Mechanical Engineer, 1996(2): 42-43. (in Chinese)
- [10] 樊智敏. 同步齿形带传动应用研究的几个问题[J]. 青岛化工学院学报(自然科学版),2002,23(3):59-61.  
FAN Zhimin. Several problems in application research of synchronous toothed belt transmission [J]. Journal of Qingdao Institute of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2002, 23(3): 59-61. (in Chinese)
- [11] 吴序堂,王贵海. 非圆齿轮传动及其应用[J]. 机械设计,1995(7):39-42.  
WU Xutang, WANG Guihai. Non-circular gear transmission and its application [J]. Mechanical Design, 1995(7): 39-42. (in Chinese)
- [12] MILLER N R, ROSS D. The design of variable-ratio chain drives for bicycles and ergometers-application to a maximum power bicycle drive[J]. Journal of Mechanical Design, 1980, 102(2): 711-717.
- [13] FREUDENSTEIN F, CHEN C K. Variable-ratio chain drives with noncircular sprockets and minimum slack-theory and application[J]. Journal of Mechanical Design, 1991, 113(3): 253-262.
- [14] 吴序堂. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [15] 冯丽萍. 非圆链轮传动链条节线长度研究[J]. 机械,2005,32(6):7-9.  
FENG Liping. Study on the length of non-circular sprocket drive chain pitch line [J]. Machinery, 2005, 32(6): 7-9. (in Chinese)
- [16] 冯丽萍,郑甲红. 基于最小理论松弛量的非圆链轮传动节曲线综合[J]. 机械设计与制造,2005(6):43-44.  
FENG Liping, ZHENG Jiahong. Non-circular sprocket transmission pitch curve synthesis based on minimum theoretical relaxation [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2005(6): 43-44. (in Chinese)
- [17] 冯丽萍,郑甲红,胡建辉,等. 非圆链轮传动中理论松弛量的计算分析[J]. 陕西科技大学学报,2004,22(1):84-87.  
FENG Liping, ZHENG Jiahong, HU Jianhui, et al. Calculation and analysis of theoretical slack in non-circular sprocket transmission [J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2004, 22(1): 84-87. (in Chinese)
- [18] CARLO I, DAVIDE P. Designing synchronous belt transmissions with variable velocity ratio[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(1): 842-849.
- [19] ZHENG Enlai, JIA Fang, SHA Hongwei, et al. Non-circular belt transmission design of mechanical press[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 57(11): 126-138.
- [20] 曹利新,刘健. 非圆链(带)传动的速比函数计算方法研究[J]. 机械工程学报,2001,37(5):35-39.  
CAO Lixin, LIU Jian. Research on the calculation method of speed ratio function of non-circular chain (belt) transmission [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(5): 35-39. (in Chinese)
- [21] 孙新城,陈建能. 变松弛量自补偿的多轮式非圆同步带传动的设计方法:CN106949204B[P]. 2019-02-26.
- [22] 孙新城,陈建能. 巴斯噶非圆-巴斯噶非圆-非圆三轮同步带传动设计方法:CN106949204B[P]. 2019-02-26.
- [23] 陈建能,孙新城,陈礼群,等. 圆-傅里叶非圆-非圆三轮同步带传动设计方法:CN106949204B[P]. 2019-02-26.
- [24] 俞亚新,孟庆导,李彦良,等. 4LZ-4.6型全喂入收割机割台框架载荷谱测试与疲劳分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版),2016,35(5):720-725.  
YU Yaxin, MENG Qingdao, LI Yanliang, et al. 4LZ-4.6 type full-feed harvester header frame load spectrum test and fatigue analysis [J]. Zhejiang Sci-Tech University Journal (Natural Science Edition), 2016, 35(5): 720-725. (in Chinese)