

行星滚柱丝杠传动效率试验台设计

刘柱,范元勋

(南京理工大学 机械工程学院,南京 210094)

摘要:针对行星滚柱丝杠承载能力大的特点,设计了一种可以满足高负载测试要求的行星滚柱丝杠效率测量试验台,主要包括机械结构、加载控制系统以及测试系统。在此基础上分析了试验测试系统测量误差并进行了消除。通过改变轴向载荷,对不同工况下行星滚柱丝杠传动效率进行测试。通过实际的效率测试试验证明了该试验台的设计及测试方法合理可靠。测试结果表明,在额定载荷条件下,行星滚柱丝杠的传动效率优于75%。为行星滚柱丝杠的进一步研究提供了参考。

关键词:行星滚柱丝杠;加载;效率;试验

中图分类号:TH132;TG65 文献标识码:A

Experimental Study on Efficiency Measurement of Planetary Roller Screw

LIU Zhu, FAN Yuan-xun

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Considering the characteristics of the high loading capacity of the planetary roller screw, a planetary roller screw efficiency measuring test system which can meet the requirements of high load test is designed, which mainly includes mechanical structure, load control system and data acquisition system. Based on this, the measurement error of the efficiency test process is analyzed and eliminated. The efficiency of the planetary roller screw under different conditions is tested by changing the axial load. Through the actual efficiency test, it is proved that the design of the test system and testing method are reasonable and reliable. The test results show that under the rated load conditions, the transmission efficiency of planetary roller screw is better than 75%. The study provides a reference for the further study of planetary roller screw.

Key words: planetary roller screw; load; efficiency; test

0 引言

行星滚柱丝杠主要由丝杠、滚柱和螺母三部分组成,具有将旋转运动转化为直线运动的特点^[1]。相比行星滚珠丝杠,其具有更高的承载能力及使用寿命。行星滚柱丝杠在精密传动领域特别是航空航天领域已经得到了越来越多工程师的关注和肯定。

行星滚柱丝杠的传动效率在实际工程运用中略低于行星滚珠丝杠,这也在很大程度上限制了其在精密传动领域中的使用。

近年来,国内外对行星滚柱丝杠的研究越来越多,其主要集中在结构参数设计^[2]、啮合分析^[3-5]、摩擦力矩及效率^[7-10]分析等方面。但是对行星滚柱丝杠效率的研究大多还停留在理论层面,对行星滚柱丝杠的试验设计方面研究很少。

本文通过对行星滚柱丝杠效率测试试验台进行设计,制订了测试方案,并对试验台测试误差进行了分析与消除,实现了对不同轴向载荷下行星滚柱丝杠传动效率的测试。

1 试验台设计方案

通过对行星滚柱丝杠效率试验台功能进行分析及细化。整个试验装置由驱动系统、加载系统、测量系统以及传动系统组成。其中,驱动系统由具有抱闸功能的伺服电机给丝杠提供转动力矩,按照实验需求,驱动电机需要实现精确正转、反转,所以在初始施加载荷时,电机抱闸限制丝杠转动,以保证在测试试验时,液压缸加载与电机驱动同步;加载系统主要是油压控制系统和伺服液压缸;测量系统由转速转矩传感器和轴拉压力传感器组成,分别测量行星滚柱丝杠的输入转矩和轴向载荷。试验装置整体示意图如图1所示。

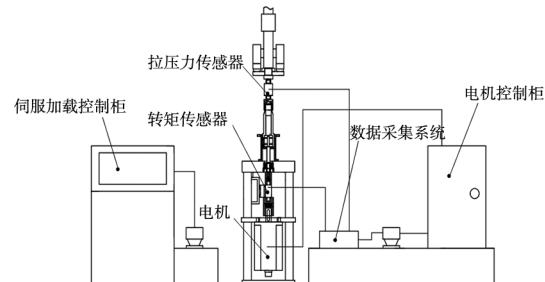


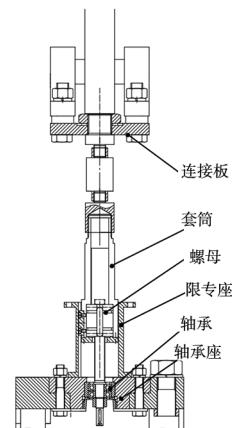
图1 试验装置整体方案示意图

收稿日期:2019-01-27;修回日期:2019-03-01

作者简介:刘柱(1992—),男,江苏盐城人,南京理工大学硕士研究生,研究方向为精密机械传动,(E-mail)2579091112@qq.com;通讯作者:范元勋(1966—),男,南京人,南京理工大学教授,硕士生导师,研究方向为机电系统设计等。

为了测得行星滚柱丝杠在重载下的传动效率,利用实验室现有 10t 液压伺服缸对滚柱丝杠进行轴向加载。因为本液压缸为竖直安装,所以试验台采用立式结构设计。

试验装置的丝杠处的机械结构如图 2 所示,丝杠安装在轴承座上,螺母与螺母套筒采用螺栓联接,螺母带动螺母套筒一起做轴向移动。螺母套筒上端与拉压力传感器通过螺纹配合,下端与限转支座通过导向键连接。



无论是测量行星滚柱丝杠的传动精度还是传动效率,都需要丝杠的正向转动和反向转动,由于行星滚柱丝杠行程比较短,如果不能准确控制电机的正反转很容易造成丝杠超过行程,会损坏行星滚柱丝杠;此外为了保证液压伺服系统在初始施加载荷时丝杠不发生转动,需要电机产生相应的力矩抵消丝杠由负载产生的转矩。

图 2 丝杠结构示意图 因此本实验采用带抱闸的伺服电机,电机型号为西门子 1FL6,驱动器型号为西门子 V90。驱动系统原理图如图 3 所示。

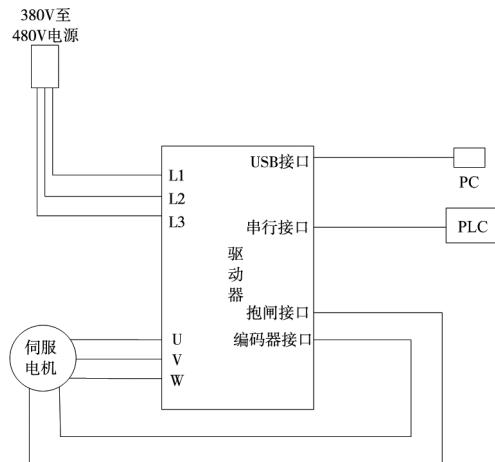


图 3 伺服电机驱动电路图

本试验台为立式结构,且需要承受拉压力较大,在实际测试过程中试验台会出现轻微倾斜现象,且 S 型比圆形拉压力传感器更容易出现更大的误差。因此本文选用了量程为 50000N 的圆柱形拉压力传感器。试验前预估本次实验需要的输入扭矩低于 15N·m,所以本实验采用由 Interface 公司生产的额定扭矩为 20 N·m 的转速转矩传感器。由东华 DH5922N 测试平台实时采集拉压力传感器与转矩传感器的数据,通过 USB 接口实现与上位机的数据传输。效率测试试验装置实物如图 4 所示,试验台整体部分与地面梯形槽固定,利用液压缸对试验台进行加载,装有驱动器和 PLC 的控制柜通过抱闸转动,数据采集卡采集压力和转矩

传感器测出的数据,PC 机负责编写 PLC 程序以及接收采集卡数据并存储。

2 传动效率测试原理与方法

2.1 传动效率测试原理

本实验的行星滚柱丝杠工作方式为:丝杠作为输入端做旋转运动,螺母为输出端做直线往复运动。通常情况下,传动效率定义为输出功率与输入功率的比值。由行星滚柱丝杠运动特点,推导出行星滚柱丝杠传动效率计算公式如下:

$$\eta = \frac{9.55 \times Fv}{Mn} = 0.00159 \times \frac{FP}{(M_{\text{测}} - M_{\text{阻}})} \quad (2)$$

式中, η 为行星滚柱丝杠传动效率; F 为螺母轴向载荷,; v 为螺母移动速度; M 为行星滚柱丝杠输入转矩, n 为丝杠转速, $M_{\text{测}}$ 为转速转矩传感器所测转矩, $M_{\text{阻}}$ 为试验装置阻力矩,由试验测得; P 为丝杠导程。

进行传动效率测试实验时,只需测出行星滚柱丝杠输出端的轴向载荷和输入端的转矩两组数据。

2.2 试验装置阻力矩测量

丝杠端输入扭矩误差主要由两个方面造成,一方面是测量系统存在的误差,另一方面是试验台的本身机械结构。对于测量系统存在的误差,主要通过选用高精度传感器和减少数据信号干扰等方式减小其误差影响;而机械结构造成的误差主要是试验装置中轴承和联轴器产生的。所以本次试验测得的扭矩值为联轴器阻力转矩、轴承阻力转矩与丝杠实际转矩之和。如图 5 所示。

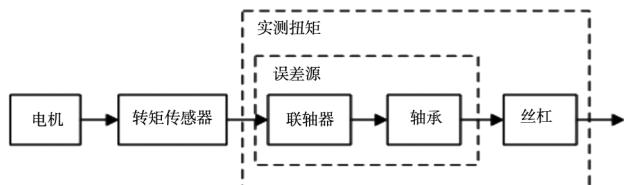


图 5 装置误差来源

对于联轴器的扭矩损耗可以查询生产手册得到不同扭矩下的扭矩损耗;为了测出轴承阻力矩对效率测试实验的影响程度,采用如图 6 所示的轴承安装方式将轴承安装在试验台上,对轴承外圈施加载荷 F ,通过电机驱动轴承内圈转动。

所测得试验装置阻力矩如图 7 所示,由图可以看出,轴承受到的轴向载荷越大,其产生的阻力矩也越大,所以在重载情况下,试验台中的轴承阻力矩不可忽略。

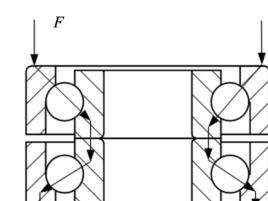


图 6 轴承安装示意图

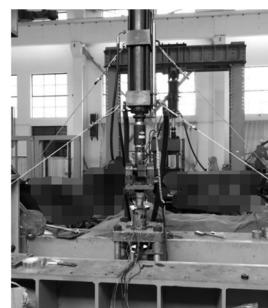


图 4 效率试验台实物图

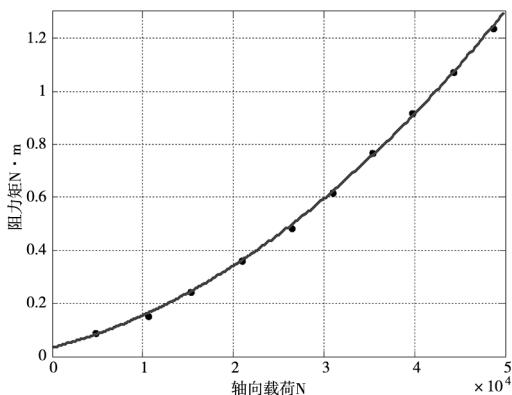


图 7 试验装置阻力矩

2.3 传动效率测试方法

完成试验台的安装后,为了保证本实验可以连续的数据采集,在伺服电机连续正反转动过程中,液压缸施加的载荷方向也应该随之改变,因此将液压缸的输出载荷设置为如图 8 所示的交变载荷。

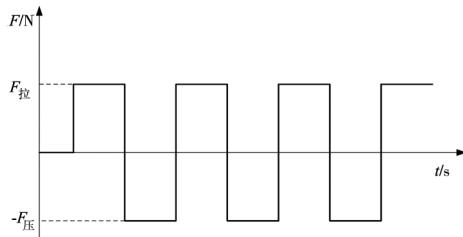


图 8 加载运动曲线

为了减少液压缸在施加交变载荷时对行星滚柱丝杠副造成的冲击和振动,应使液压缸的输出载荷平稳过渡到设定值。并且实验要求在低速的情况下完成以减小滑移现象对传动效率的影响^[11]。

利用数据采集卡对行星滚柱丝杠的轴向载荷和转矩该数据采集和纪录。

3 试验结果

对表 1 所示参数行星滚柱丝杠进行效率测试。

表 1 行星滚柱丝杠几何参数

几何参数名称	丝杠	滚柱	螺母
几何中经直径/mm	19.5	6.5	32.5
螺距/mm	0.4	0.4	0.4
螺纹头数	5	1	5
导程/mm	2	0.4	2
牙型半角/°	45	45	45

试验测得的数据如表 2 所示。

表 2 行星滚柱丝杠传动效率数据表

轴向载荷/N	测量转矩/N·m	转矩损耗/N·m	实际扭矩/N·m	效率/%
3784.62	1.490	0.071	1.419	0.848
7383.66	2.885	0.116	2.769	0.848
10204.15	4.079	0.157	3.922	0.827
12794.67	5.218	0.200	5.018	0.811
16997.69	6.835	0.278	6.557	0.824
18717.03	7.835	0.313	7.522	0.791
20331.64	8.350	0.348	8.002	0.808
23178.59	万方数据	0.414	9.057	0.814

计算得到行星滚柱丝杠传动效率与轴向载荷的关系如图 9 所示。

从图 9 我们可以看出,行星滚柱丝杠的实际效率最低为 80%。该样件理论传动效率为 88.07%,本实验在不同载荷测得的传动效率均低于理论数值,这是符合实际情况的,且差值都在可接受范围内。在理论计算中,还有好多因素没有考虑到:丝杠转动过程中,螺纹接触点处存在滑移现象,且轴向载荷越大,滑移现象越严重,相应的传动效率也会降低,与实际试验结果相符合;行星滚柱丝杠副传动不仅存在螺纹间的摩擦,还有滚柱两端齿轮与螺母之间的摩擦以及挡圈与滚柱之间的摩擦等,这些摩擦损耗在理论计算中并没有考虑到;试验台本身结构的震动和摩擦损耗等都会影响到其传动效率的测试。

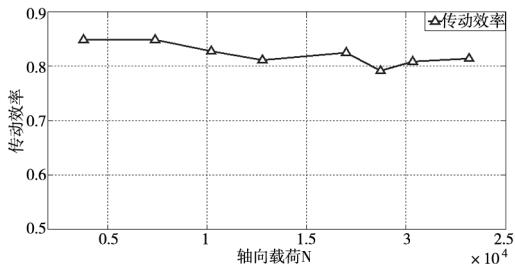


图 9 行星滚柱丝杠效率曲线

4 结论

(1) 文中通过对行星滚柱丝杠效率试验台进行设计,并考虑了实际存在的转矩测量误差,绘制出了在高负载下行星滚柱丝杠的传动效率曲线图;

(2) 对行星滚柱丝杠传动效率进行测试,试验结果表明,在重载情况下行星滚柱丝杠的传动效率可以稳定在 80% 以上。

参考文献

- [1] 刘更,马尚君,佟瑞庭,等. 行星滚柱丝杠副的新发展及关键技术[J]. 机械传动,2012,36(5):103-108.
- [2] 靳谦忠,杨家军,孙健利. 行星滚柱丝杠副运动特性及参数选择[J]. 制造技术与机床,1998(5):13-15.
- [3] 董永,刘更,马尚君,等. 行星滚柱丝杠副滚柱的设计方法与虚拟装配[J]. 机械设计,2013,30(8):53-57.
- [4] 赵英,倪洁,吕丽娜. 滚柱丝杠副的啮合计算[J]. 机械设计,2003,25(3):34-35.
- [5] Jones M H, Velinsky S A. Contact Kinematics in the Roller Screw Mechanism[J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(5):051003(1-10).
- [6] 付晓军,刘更,马尚君,等. 行星滚柱丝杠副螺旋曲面啮合机理研究[J]. 机械工程学报,2016,52(3):26-33.
- [7] Lemor P C. The roller screw, an efficient and reliable mechanical component of electro-mechanical actuators [C]. Energy Conversion Engineering Conference, Washington DC: IEEE, 1996:215-220.
- [8] 靳谦忠,杨家军,孙健利. 行星滚柱丝杠副摩擦机理研究[J]. 华中理工大学学报,1998,26(6):82-83.
- [9] Velinsky S A, Chu S, Lasky Ty A. Kinematics and Efficiency Analysis of the Planetary Roller Screw Mechanism[J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(1): 011016(1-8).
- [10] 马尚君,刘更,佟瑞庭. 行星滚柱丝杠副摩擦力矩及传动效率研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013, 45(11):74-79.
- [11] 贾民平. 测试技术[M]. 北京:高等教育出版社,2009.

(编辑 李秀敏)