

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.02.006

偏振成像仪用联轴器的设计与性能测试

许孙龙, 孙亮*, 吴洋, 凌霄

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 联轴器是偏振成像仪转动部件的核心零件之一, 在仪器中承担传递扭矩、保障转轮高精度运转的功能。仪器本身特性要求联轴器具有较小的变形反作用力、长寿命以及较高的传动精度。针对特性要求, 首先设计了一款平行线切割式联轴器, 并针对联轴器工作特性进行了相应的仿真分析; 然后设计联轴器的相关性验证实验, 包括变形力测试、长寿命测试以及传动精度测试。测试结果显示: 在仪器装调误差范围内, 联轴器变形力最大为 10.75 N, 满足仪器轴承固体润滑膜层使用要求; 40000 次启停实验后传动能力无明显下降, 且传动精度为 4.684×10^{-5} , 满足仪器寿命末期的力矩传递与运行精度要求, 证明联轴器满足成像仪的寿命与性能要求。

关键词: 多角度偏振成像仪; 联轴器; 变形力; 寿命; 传动精度

中图分类号: O439; TH1

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)02-0117-06

Design and Performance Tests of Coupling for Directional Polarization Camera

XU Sunlong, SUN Liang*, WU Yang, LING Xiao

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The coupling is one of the core components of rotatable parts in directional polarization camera, which is responsible for transmitting torque and ensuring the high precision operation of the rotating wheel in the instrument. The characteristics of the instrument require that the coupling has small deformation force, long life and high transmission precision. According to these requirements, a parallel line cutting coupling is designed, and the simulation analysis is carried out. Then the performance of the coupling is designed, including deformation force test, long life test and transmission precision test. Test results show that when the camera is installed within the error range, the deforming force is no more than 10.75 N, which meets the needs of bearing in the camera. After the test of start-running-stop for 40000 times, the driving ability of coupling has no obvious drop, the transmission precision is 4.684×10^{-5} , which meets the requirement of the camera at the end of lifetime, and proves that the coupling meets the life and performance requirements of the camera.

Key words: directional polarization camera; coupling; deformation force; lifetime; transmission precision

基金项目: Supported by High-resolution Earth Observation System Major Project (Civil Part) China (高分辨率对地观测系统重大项目(民用部分), 30-Y20A19-9007-15/17)

作者简介: 许孙龙(1988-), 安徽桐城人, 硕士, 主要从事光学遥感仪器结构方面的研究。

E-mail: xusunlong@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2018-10-10; **修改日期:** 2018-12-18

* **通信联系人. E-mail:** sunleon@aiofm.ac.cn

1 引言

联轴器, 用来联接不同机构中的两根轴使之共同旋转以传递扭矩, 在传动机构中广泛使用, 是一种成熟的工业产品。除传递功率外, 弹性联轴器可改变系统频率分布, 通过移频实现减振和避免共振的作用; 有些联轴器如盖斯林格联轴器和橡胶联轴器具有较好的阻尼特性, 可以起到减振作用; 有些联轴器如膜片联轴器还可调整两轴的不对中, 使被联接的两个部件之间的动力传递平稳可靠, 减小冲击和动载荷^[1-3]。

GF-5 卫星的有效载荷偏振成像仪 (Directional polarization camera, DPC), 是通过检偏 / 滤光组件中转轮的连续转动对入射光进行光谱和偏振调谐, 利用面阵 CCD 探测器获取成像数据。在仪器的结构模式中, 使用平行线切割式联轴器来连接电机轴与转盘轴, 传递电机输出扭矩。联轴器是仪器的重要部件, 它的状态直接关系到仪器是否能够正常运行, 因为仪器的高精度需求以及航天产品的近乎于不可维修特性, 仪器对联轴器的使用寿命、传动精度以及联轴器的容差变形力有较高的要求。而国内外对于航天遥感仪器所使用微型联轴器缺少相关的研究, 缺少相应的参照样本, 因此需要进行针对性的研究测试, 确保仪器在寿命周期内能够保持高精度运行。

2 需求分析与实验方案

2.1 需求分析与联轴器设计

2.1.1 需求分析

(1) 根据仪器轴系装调工艺, 在最恶劣情况下, 电机轴与转盘轴的径向误差为 0.02 mm, 电机轴与转盘轴的角度误差为 0.04°; 轴系润滑形式为 MoS₂ 固体润滑膜, 根据 MoS₂ 固体润滑膜的最大承载能力以及兰化所的使用建议, 长期运行时, 膜层受力小于 30 N 时, 轴承处于较好的工作状态, 所以当轴系装配处于极限误差状态时, 联轴器容差变形对轴承的反作用力应小于 30 N。

(2) 卫星的在轨八年长寿命要求, 对活动部件的设计与保障是极大的考验。根据 DPC 检偏滤光组件的在轨工作模式, 可确定电机重复启停是对联轴器寿命的最大考验。八年在轨期间, 检偏滤光组件电机共需启停 21250 次, 需要实验验证设计的联轴器是否满足要求。

(3) 根据仪器的实际使用需求, 转动周期稳定度优于 3.7×10^{-4} 。而负载与所选用的电机以及转速三者耦合, 恰处于步进电机的低频共振区间, 需要借助柔性联轴器的减震功能, 消减仪器转动部件的扭振, 确保仪器的转动周期稳定度。

2.1.2 联轴器设计

根据仪器对联轴器的性能要求, 选用平行线切割式联轴器作为产品用联轴器, 其优势在于可以吸收振动, 补偿径向、轴向以及角向偏差, 具有零回间隙, 支持正反转传动, 其良好的弹性对设备有较好的保护作用, 适合于小力矩的轴连接。针对仪器空间尺寸及电机输出力矩等相关因素, 调节切割尺寸, 最终设计联轴器如图 1 所示。设计平行线切割式联轴器采用一体化结构, 联轴器的中间部位切出互相平行的切口, 两端为轴孔, 基本尺寸类型: CIC-D25L31-11×11, 表示两轴孔的直径都为 11 mm, 外圆直径为 25 mm, 联轴器总长为 31 mm。两端轴孔与轴的固定采用夹紧和顶丝两种方式共同应用, 提高使用过程中的可靠性。

2.1.3 仿真分析

针对仪器使用的平行线切割式联轴器(下文称联轴器), 建模进行仿真分析, 计算分析其最大应力与疲劳寿命^[4]。

应用 NX.NASTRAN 8.5 软件对联轴器进行有限元疲劳分析, 网格划分如图 2(a) 所示, 有限元模型采取实体网格, 单元类型为 10 节点四面体单元, 共有 24536 个单元, 44733 个节点。坐标系方向定义如下: *Z* 轴由连接电机轴的孔端(以下称电机轴孔端)指向连接转盘轴的孔端(以下称转盘轴孔端), *X* 轴向为顶丝孔的轴向方向, *Y* 轴方向由右手定则确定。联轴器的材料为铝合金 2A14-T6, 主要的力学性能参数如表 1 所示。

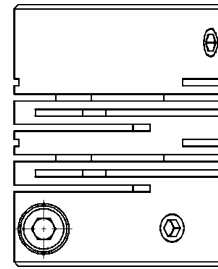


图 1 联轴器 CIC-D25L31-11×11 结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the structure of the coupling CIC-D25L31-11×11

表 1 材料力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of materials

Materials	Modulus of Elasticity	Poisson ratio	Density	Tensile strength	Yield strength	Fatigue Strength Coefficient	Fatigue strength exponent
Aluminum alloy 2A14-T6	72.4 GPa	0.33	2.8 t/m ³	470 MPa	415 MPa	1008 Mpa	-0.114

联轴器通过两端的轴孔分别与电机轴、转盘轴连接, 固定方式有顶丝和夹紧两种。考虑固定方式对分析的影响很小, 边界条件简化处理为: 转盘轴孔端施加固定约束, 电机轴孔端施加绕 *Z* 轴的 1.8 Nm 的扭矩载荷、沿 *OX* 轴正向的 0.02 mm 的强迫线性位移和绕 *OY* 轴的 0.04° 的强迫角位移。在上述边界条件下对联轴器的应力应变进行仿真分析, 给出联轴器结构的应力与变形图, 如图 2(b) 所示, 在平行线切割终止位置处有最大应力值 16.27 MPa。

在线性静力学分析的基础上进行疲劳耐久性分析, 给出疲劳分析的寿命和安全系数云图, 分析结果如图 2(c) 所示, 在平行线切割终止位置处有最小的疲劳周期次 8.57×10^{12} 。

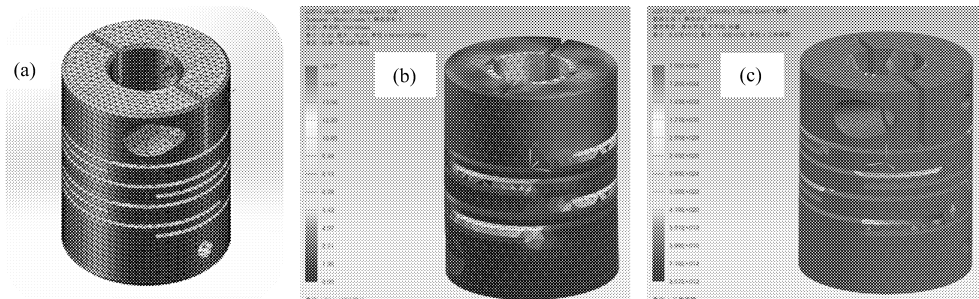


图 2 联轴器有限元仿真。(a) 网格划分; (b) 应力分布图; (c) 疲劳周期分布图

Fig.2 Finite element simulation of coupling. (a) Mesh generation; (b) stress pattern; (c) fatigue cycle profile

2.2 实验方案设计

2.2.1 容差变形力测试

为测试二轴位置误差引起的联轴器容差变形力，搭建了如图 3 所示的测量装置。

根据轴系装配工艺，在最恶劣情况下，电机轴与转盘轴的径向误差为 0.02 mm，电机轴与转盘轴的角度误差为 0.04°，当径向误差与轴的角度误差方向相同时，联轴器工作状态最恶劣，此时联轴器容差变形力达到最大值，是为测试目标。

用测力计分别模拟后端和前端轴承处的径向力，用 2 个千分表头测量模拟电机轴的方位，并由此计算电机轴角度误差和径向误差。当角度误差与径向误差达到最恶劣工况时，记录读数 F_1 、 F_2 ，如表 2 所示。

表 2 容差变形力测试结果

Table 2 Tolerance deformation test results

Test item	Test value			
F_1 (N)	3.75	4.0	4.0	3.75
F_2 (N)	10.75	10.5	10.75	10.75

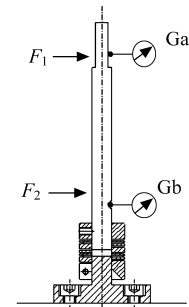


图 3 联轴器容差变形力测量示意

Fig.3 Flexible force measurement of coupling

2.2.2 联轴器的抗疲劳能力验证

步进电机启动或停止时，联轴器所受的扭转力远大于稳定运行时，因此，为校核联轴器的疲劳寿命，设计寿命周期内启停次数为考核目标。寿命周期内启停 21250 次，考虑地面测试以及一定的裕度，设定启停考核次数为 40000 次，采用如图 4 所示的实验装置。

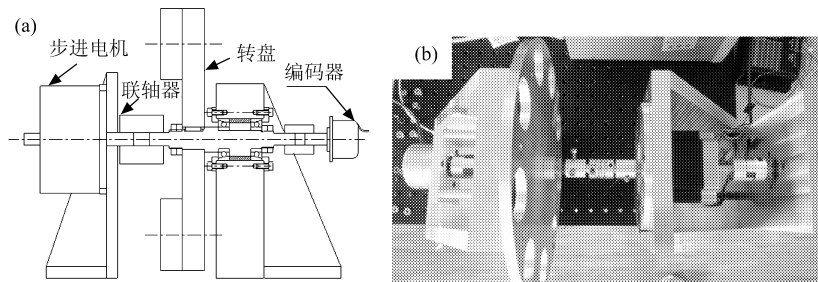


图 4 疲劳实验图。(a) 示意图；(b) 实验装置图

Fig.4 Fatigue diagram. (a) schematic diagram; (b) test plan

采用转动惯量与转盘部件相同的模拟负载盘，用联轴器连接驱动电机与模拟负载盘，如图 4(b) 所示。控制驱动电机启动并达到仪器的运转速度并转动 2 s，然后停止，停止时间 1 s，如此反复，直到启停次数达到寿命考核要求，检查联轴器是否有过疲劳现象（如裂缝或塑性形变），并通过提升砝码的方式检测联轴器的额定扭矩是否发生变化。

经过疲劳测试后，目视检查联轴器无变形，经过磁粉探伤检测无裂缝。采用提升砝码的方法检测联轴器的额定扭矩时，吊点距中心 125 mm，分别吊装 16 N 与 32 N 的砝码对应额定扭矩 2 Nm 与最大扭矩 4 Nm，多次反复吊装，均能顺利提升重物。由此可知，联轴器的抗疲劳能力满足要求。

2.2.3 联轴器对传动精度的影响

为验证联轴器的柔性对传动精度的影响, 搭建如图 5 所示的测试装置, 采用转动惯量与转盘部件相同的模拟负载盘以及双轴伸步进电机, 电机一端伸出轴连接编码器监测电机输出角度, 另一端通过待测联轴器连接转盘轴, 在转盘轴的尾端亦安装一编码器以监测通过联轴器后转盘端输出角度 [5]。

驱动步进电机工作时, 电机运行的角度 α 由电机端编码器读出, 而此时转盘转动的角度 β 由转盘端编码器读出, 故有电机运转角度 $A = \alpha x + 1 - \alpha x$, 转盘运转角度 $B = \beta x - \beta x + 1$, 二者之差值 $C = B - A$, 根据二者之间的差值 C 以及运转角度的变化趋势, 判断联轴器对传动精度的影响。对研制的平行线切割式联轴器进行测试, 测试采样频率 10 Hz, 测试结果与电机两端直联编码器的测试值进行比对。测试现场如图 4(b) 所示, 测试结果如图 6 所示。

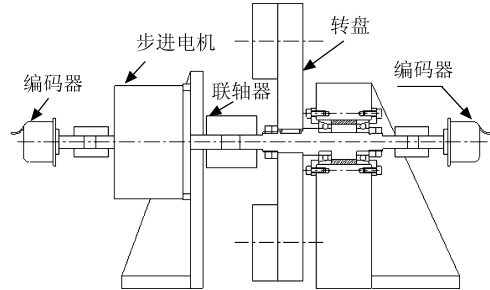


图 5 传动精度验证示意图

Fig.5 Schematic diagram of transmission accuracy verification

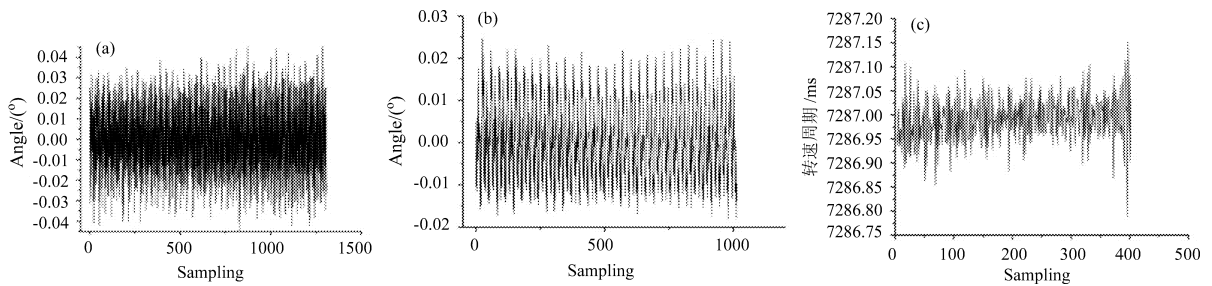


图 6 转动精度测试。(a) 使用联轴器; (b) 电机直联编码器; (c) 转速周期稳定度

Fig.6 Rotation accuracy test. (a) Use the coupling; (b) direct motor coder; (c) periodic stability of rotating speed

从图 6(a)、(b) 中可以看出, 平行线切割式联轴器其传动精度相对于电机直联编码器有所降低, 这是因为需要吸收振动的缘故降低了联轴器的周向刚度。为进一步校验平行线切割式联轴器对检偏滤光组件传动精度的影响, 在正样产品于全配重条件下进行转动周期稳定度测试, 结果如图 6(c) 所示。

根据测试结果计算, 正样产品在轨工作模式下使用平行线切割式联轴器, 转速周期稳定度为 4.684×10^{-5} , 优于设计指标的 3.7×10^{-4} , 满足产品的工作需求。

3 实验结果

整理针对联轴器的仿真分析结果与实验测试所得数据, 如表 3 所示。

表 3 联轴器性能测试数据总结

Table 3 Summary of performance test data of coupling

	Tolerance deformation force(N)	Rated torque (Nm)	Lifetime	Periodic stability of rotating speed
Product demand	≤ 30	≥ 2	≥ 21520	$\leq 3.7 \times 10^{-4}$
Measured value	≤ 10.75	≥ 2	≥ 40000	$\leq 4.684 \times 10^{-5}$

从表 3 中可以看出, 所设计的平行线切割式联轴器在传动能力、传动精度以及使用寿命上完全能够满足仪器的性能要求与寿命要求, 可保障仪器在轨稳定工作, 并达到预期的寿命要求。

4 结 论

通过对 GF-5 卫星偏振成像仪使用的联轴器设计阶段的校核以及针对联轴器的性能测试, 确定所设计的联轴器满足仪器使用要求, 保障仪器的性能与寿命要求; 其次, 为后续类似产品用联轴器的性能测试提供了参考依据。由于时间仓促, 在针对联轴器的性能研究中, 对平行线切割式联轴器如何消除转动部件因电机低频共振带来的扭振, 未作出量化分析, 在后续的研究中, 希望能够对联轴器的自身固有频率对步进电机的低频共振区间影响进行量化分析, 找出其中的规律并量化, 为类似产品的联轴器选型提供可靠依据。

参考文献:

- [1] Shi Gaoyi, Tang Jinsong, Yu Huaizheng, *et al.* *Couplings* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1988: 8-135 (in Chinese).
施高义, 唐金松, 喻怀正, 等. 联轴器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 8-135.
- [2] Zhuang Xianghua. *Couplings* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1986: 15-22(in Chinese).
庄祥华. 联轴器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1986: 15-22.
- [3] Liu Hui, Xiang Changle. Torsional vibration characteristic of powertrain equipped with different elastic couplings [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2009, **31**(3): 349-354(in Chinese).
刘 辉, 项昌乐. 弹性联轴器对动力传动系统扭振特性影响研究 [J]. 机械强度, 2009, **31**(3): 349-354.
- [4] Wang Sen, Wu Peng, Xie Huayin, *et al.* The Finite Element Analysis of Radial Stiffness for Flexible Coupling under Small Amplitude [J]. *Machine Design and Manufacturing Engeering*, 2015, **44**(4):9-12.
王 森, 吴 鹏, 谢华银, 等. 高弹性联轴器在微小振幅下径向刚度有限元分析 [J]. 机械设计与制造工程, 2015, **44**(4): 9-12.
- [5] Xie Huayin, Gao Dingyun. The researeh of dynamic characteristie of the elastie coupling [J]. *Drive System Technique*, 2004, **14**(3): 10-16(in Chinese).
谢华银, 高顶云. 弹性联轴器动态特性的试验研究 [J]. 传动技术, 2004, **14**(3): 10-16.