

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.004

精密转台轴系设计分析与验证^{*}

石 冬^{1,2}, 周维虎^{2*}, 劳达宝²

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 中国科学院 光电研究院, 北京 100094)

摘要:针对由于测角传感器的精度不断提高,转台的回转精度和稳定性成为制约系统精度的主要因素问题,对转台轴系设计进行了深入分析研究。完成了一维精密转台的轴系结构设计,并对其进行了有限元分析。在此基础上,通过静力学分析,研究了主要零部件对轴系回转精度的影响情况;通过动力学分析,研究了轴系的固有频率及其振型。搭建了转台测角精度测试平台,采用了自准直仪结合多面棱体获取角度测量误差,并进行谐波误差补偿。研究表明,最终转台的角度精度达到 $\pm 1.5''$,证明该转台设计是可行的。

关键词:系统精度;精密转台;有限元分析;误差补偿

中图分类号:TH113;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0027-05

Analysis and verification of precision turntable shafting design

SHI Dong^{1,2}, ZHOU Wei-hu², LAO Da-bao²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the problems of rotary precision and stability of the turntable become major factors in the system accuracy with the development of the precision of angle sensor, the turntable shafting design was investigated. The shafting of one-dimensional precision turntable was designed and its finite element analysis was conducted. The influence on the rotary precision of the shafting caused by the main components was studied using static analysis; the dynamics of natural frequencies and mode shapes of shafting was analyzed. An angle measurement precision test platform of turntable was built. The autocollimator combined with multi-mirror polyhedron was used to get angle measurement error directly, and the error compensation of harmonic analysis was studied. The results indicate that the final angle precision reach to $\pm 1.5''$, proved the design of turntable is feasible.

Key words: system accuracy; precision turntable; finite element analysis; error compensation

0 引 言

随着社会的进步和科技的发展,精密转台轴系由单轴发展到多轴转台轴系,其综合精度也更高。目前主要采用有限元方法,应用 ANSYS 软件对模型进行分析。刘季^[1]对星载激光雷达转台结构进行分析时,提出了分布设计法,将重要的零件从模型中分离出来,对其分离单元进行单独分析,尽管该方法能提高分析的效率和准确度,但主要是针对分析简单的结构。潘健^[2]利用有限

元分析原理,对三轴仿真转台的机械结构进行了力学分析,并且用 ADAMS 软件对三轴仿真转台进行了动力学耦合作用的仿真分析,并提出了一些优化设计的建议。江爱林等^[3]采用有限元分析方法,采用三维实体模型,详细分析了混凝土泵车转台结构,通过有限元计算结果得到各因素对应力分布的影响规律,并对转台结构进行优化,对转台结构设计有指导意义。李燕^[4]主要研究了单轴转台的振动传递特性,重点从单轴转台模态试验、振动功率流传递特性及不同影响因素对单轴转台振动传

收稿日期:2014-09-24

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2011YQ12002);国家自然科学基金青年资助项目(61307095)

作者简介:石 冬(1988-),男,安徽安庆人,主要从事多维转台的优化设计与测角技术方面的研究。E-mail:shidong135@sohu.com

通信联系人:周维虎,男,教授,博士生导师。E-mail:zhouweihu@aoe.ac.cn

递特性的影响 3 方面进行了研究,并进行了试验分析与比较,为研究单轴转台振动传递问题提供重要参考依据。

圆光栅主要是采用莫尔条纹和光电转换技术将机械轴转动的角度量转换成数字电信息量输出的一种现代传感器。为了保证测角精度,加上环境振动对光栅测角影响特别大,系统对传感器相关机械件特别是转台轴系的设计要求也越来越高,能否保证达到最终的测角精度至关重要。在对精密转台轴系的结构进行详细设计后,需要采用计算机仿真来对设计进行分析和验证,同时对转台的主要零部件进行实体建模,以功能强大的有限元分析软件 ANSYS 为平台,对主要零部件结构进行分析计算,得到相应的结果可对初始设计的转台不足及缺陷进行修正,使之优化和完善。

本研究基于飞秒激光跟踪仪的工作原理和性能要求,进行一维精密转台轴系的结构设计与建模,利用 ANSYS 有限元分析软件对转台进行静动力学仿真分析,最后通过实验对转台测角系统进行测试。

1 测角转台结构

转台主要由轴系、有刷电机、固定光栅和读数头的固定端、定子固定架、电机转子与轴连接的转接件及其它相应的零部件组成。轴系设计的主要要求是轴系精度高、跳动小、旋转摩擦力小,电机及光栅安装要求保证同轴度。该轴系采用配对使用的精度等级为 4 级的角接触球轴承,可以同时承受径向载荷和单向的轴向载荷,通过调整螺母来调节轴承预紧力,通过增加预紧力来提高轴承的旋转精度。轴承固定方式采用两端固定方式,主要作用是为了限制轴的轴向运动。轴和轴套选用 GCr15 轴承钢材料,通过精密加工保证轴与轴套椭圆度及其滑动配合间隙,轴系添加仪表油保证其灵活转动。在电机工作时,为了保证电机与中间托板的同轴度一致,对定子固定架的加工要求比较高。

电机的安装主要应保证转子与定子同心,以保证转子与定子四周的间隙均匀。由于该转台结构为轻负载高精度系统,本研究采用定制的永磁式直流力矩电机,通过设计转接件使电机转子与主轴连接,电机直接驱动转轴转动,这种驱动方式具有运行可靠、维护简单、振动小、机械噪声小、传动精度高、结构紧凑等特点,两个转接件选用 1Cr18Ni9Ti 隔磁材料。

一维精密转台轴系结构如图 1 所示。

2 转台静力学分析

2.1 有限元模型的建立

该部分对一维转台进行静力分析,主要采用实体

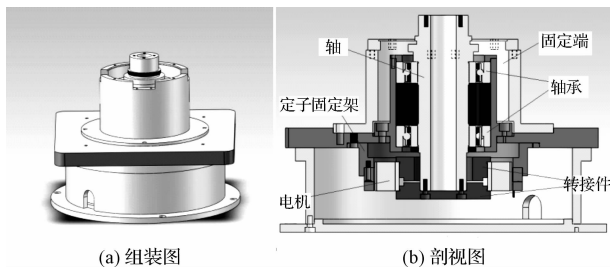


图 1 一维精密转台轴系结构图

单元,尽量简化各构件的实体模型,方便分析计算。为了保证分析结构更加准确,建模时力求保证系统完整,使模型尽可能详细和合理。具体的方法是:几个重要的部件均在保证其质量和转动惯量与原型等效,进行等效模型简化。如直流力矩电机、轴承作为对称分布的集中质量单元;将所有的倒角和过渡圆角都简化为直角,来提高模型的计算速度;对结构上的孔、部分台阶特性等效的基础上尽量简化。针对该一维转台轴系,本研究先在 SolidWorks 进行简化,将转台底座、底壳、中间托板以及固定光栅读数头的固定端建模为一体,之后导入到 ANSYS 软件中,采用 Solid187 单元来进行处理,通过定义材料的模型,再对模型网格化^[5-6]。

网格化模型如图 2 所示。

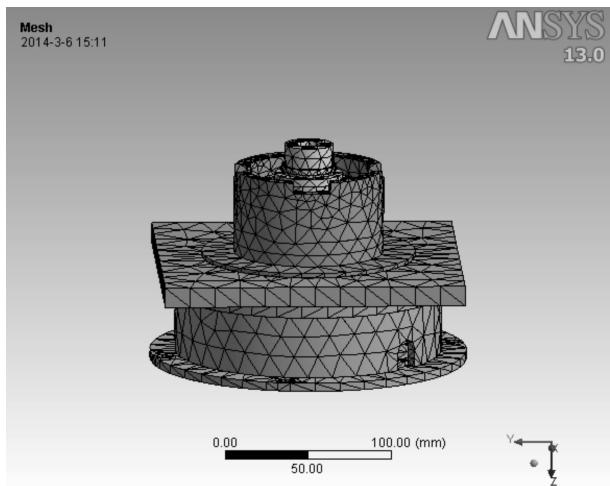


图 2 转台的有限元模型

2.2 静力学仿真分析

仿真的主要目的针对该一维转台是分析主要构件在静力环境下变形情况。所有分析模型的静力施加载荷相同,即施加垂直方向向上的重力加速度 g ,模拟结构重力;对电机驱动扭矩进行载荷设置;通过对轴承、电机以及底座分别施加约束,最终求解转台在静力载荷下的位移变形分析,转台位移变形图如图 3 所示。

由图 3 可以看出,最大变形出现在中间托板外缘,位移能接近为 1.988 8 mm,由于中间托板是承受下面的电机定子以及上面固定光栅及读数头的固定端,可

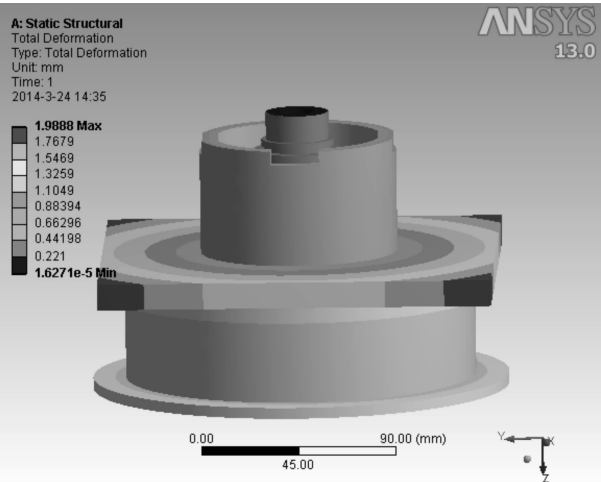
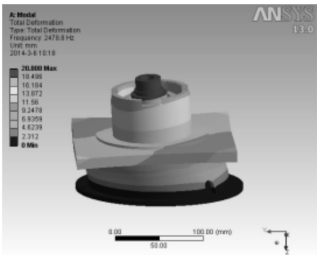
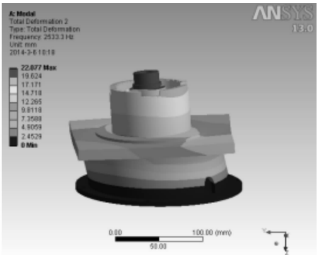


图 3 转台位移变形图

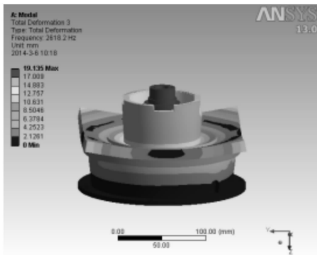
以知道中间托板的变形对轴系的回转精度有还是有很大的影响,研究者在设计时应加强其刚度。



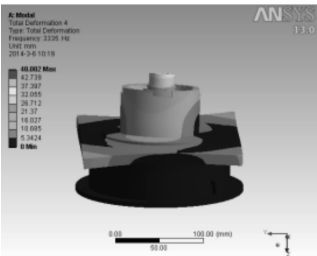
(a) 转台一阶振型图



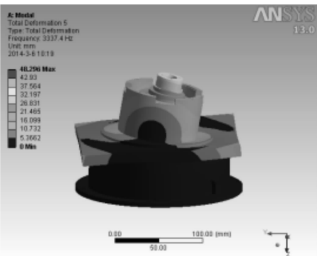
(b) 转台二阶振型图



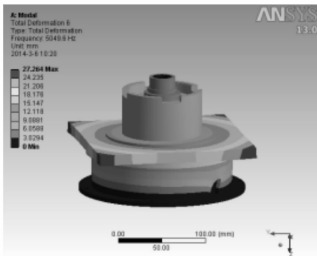
(c) 转台三阶振型图



(d) 转台四阶振型图



(e) 转台五阶振型图



(f) 转台六阶振型图

图 4 各阶振型图

表 1 转台各阶固有频率及振型特点

阶次	固有频率/Hz	振型特点
1	2 478. 8	轴系左右摆动
2	2 533. 3	轴系前后摆动
3	2 618. 2	轴系上下摆动
4	3 335. 0	轴上端及固定端前后扭转
5	3 337. 4	轴上端及固定端左右扭转
6	5 049. 6	中间托板扭转

本研究用模态分析的方法对转台进行故障诊断,可以发现转台结构动力学特性存在缺陷,找到影响转台可信性的原因及解决办法。笔者根据以上的转台模态信息对转台的动态性能进行评价。评价的具体原则是:转台的弹性模态频率应尽量避免开电动机经常工作频率范围及周围环境的振动频率范围;转台振型应尽

3 转台动力学分析

该一维转台轴系结合光栅来对角度进行测量,测量精度是评价转台的设计水平的高低,而转台的测量精度的一个重要指标是整个转台结构的稳定性,由于振动或外界环境会造成结构的共振或疲劳,从而破坏结构,通过了解结构本身具有的刚度特性即结构的固有频率和振型,就可避免在使用中因共振因素造成的损失。

目前,对结构动态性能研究的方法主要是模态分析法,也就是求解一维转台结构的固有频率和振型。转台轴系结构三维有限元模型如图 2 所示。本研究利用有限元分析软件对其进行模态分析,得出的前六阶固有频率下的振型情况如图 4 所示。转台各阶固有频率及振型特点如表 1 所示。

量光滑,避免有突变。

该精密转台轴系在工作时受到的外部激励主要是直流力矩电机,其工作频率在几十赫兹左右,转台放在实验室建筑内,环境不可避免地会给转台带来振动,总共的振动频率在 1 Hz ~ 200 Hz 范围^[7]。结合转台结构的固有频率及固有频率振型可以看出,转台的第一阶固有频率比外部激励频率要大很多,所以转台结构本身不会发生共振的,其结构设计是保守的。

4 精密转台测角系统精度实验及分析

为验证精密转台轴系设计的合理性,笔者对转台测角系统角位置误差进行实验分析。精密转台轴系测角系统采用雷尼绍 SiGNUM™ RESM 20 μm 圆光栅和对径

SR 双头读数,光栅环外径 52 mm,光栅刻线数 8 168,细分数 1 000,分辨率 0.16″。测试仪器包括:6 354 所 CSZ-1A 型 CCD 双轴自准直仪,二等 8 面棱体和二等 17 面棱体及夹具。转台测角系统精度实验图如图 5 所示。

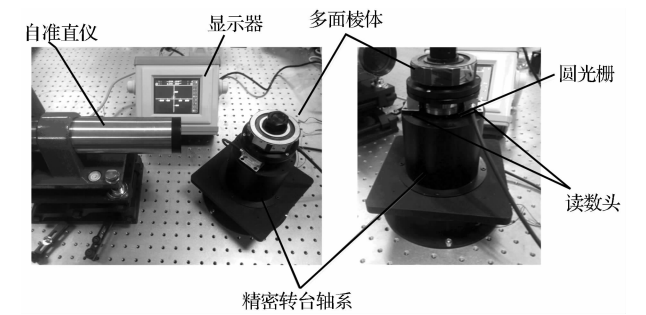


图 5 转台测角系统精度实验图

该实验主要采用 17 面棱体结合自准直仪对测角误差标定,建立误差补偿模型,并且采用 8 面棱体测量数据进行补偿效果验证,最终不能消除的误差主要是由轴系跳动引入的误差,也就是所需验证转台轴系的精度。

测试的步骤如下:

(1)搭建测试装置,将 17 面棱体安装在转台轴上端,将自准直仪安装在试验平台上,并使自准直仪对准 17 面棱体;

(2)用千分表粗调多面棱体中心线与旋转轴线的同轴度(≤20 μm),用自准直仪测多面棱体的偏摆度(≤20″);

(3)前面准备做好后,转动转轴,使自准直仪对准 17 面棱体的第一个工作面位置,读取自准直仪示数在 0 位置附近的读数,记录此时计算机显示的读数;重复上面实验,依次读取自准直仪读数对准棱体工作面时的计算机显示读数。通过 17 面棱体结合自准直仪测得五组误差数据,其误差平均值如表 2 所示。

表 2 17 面棱体标定的误差平均值

面序号	测量值/(°)	修正值/(″)	角误差 Δ/(″)
1	0.000 00	0.0	+0.27
2	21.176 35	-0.7	-0.27
3	42.352 80	-0.3	-0.12
4	63.528 92	-1.4	-0.50
5	84.705 28	-0.9	-1.52
6	105.881 30	-0.8	-3.05
7	127.057 90	-0.4	-2.41
8	148.234 70	+0.3	-2.85
9	169.410 90	-1.1	-2.25
10	190.588 20	+0.6	-1.07
11	211.764 30	-0.8	-0.97
12	232.940 70	-0.1	-1.89
13	254.117 00	+0.1	-2.39
14	275.293 70	+1.0	-2.00
15	296.469 80	-0.1	-2.96
16	317.646 20	+0.1	-3.26
17	338.822 90	-0.3	-1.63

(4)由 17 面棱体得到的五组数据,通过 Matlab 计算发现二阶和五阶幅值和相位基本不变,可以建立误差谐波补偿模型,如下式所示:

$$\varepsilon = 1.224 \cdot \sin((2 \cdot \theta + 29.185) \cdot \pi/180) + 0.487 \cdot \sin((5 \cdot \theta + 133.778) \cdot \pi/180) \quad (1)$$

得到标定的轴的角度误差曲线和谐波补偿模型补偿曲线如图 6 所示。

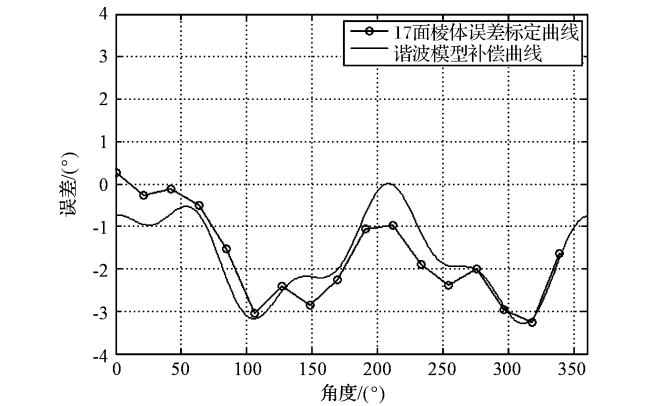


图 6 角度误差曲线和谐波补偿模型曲线

(5)重复上面的实验步骤,得到 8 面棱体结合自准直仪测得 5 组误差数据,其误差平均值如表 3 所示。

表 3 8 面棱体标定的误差平均值

面序号	测量值/(°)	修正值/(″)	角误差 Δ/(″)
1	0.000 01	0.0	+2.23
2	45.000 52	-0.7	+3.21
3	90.000 92	-0.2	+1.93
4	135.000 35	-0.8	+1.26
5	180.000 16	-0.6	-1.59
6	224.999 60	+0.3	+1.48
7	270.000 23	-0.4	-1.58
8	314.999 76	+0.7	+0.50

(6)通过误差谐波补偿模型,得到补偿前后的误差数据如表 4 所示。误差补偿前后对比图如图 7 所示。

表 4 轴角度误差及补偿后误差

面序号	测量值/(°)	补偿前误差/(″)	补偿后误差/(″)
1	0.000 01	+2.23	+0.95
2	45.000 52	+3.21	+1.06
3	90.000 92	+1.93	-0.93
4	135.000 35	+1.26	-0.58
5	180.000 16	-1.59	+0.25
6	224.999 60	+1.48	+1.08
7	270.000 23	-1.58	-0.26
8	314.999 76	+0.50	-1.56

转台测角系统中,由于光栅传感器本身、轴系在制造和安装过程中会存在一些误差,并且存在轴系变形、环境因素等的影响,在光栅测角中不可避免地出现测

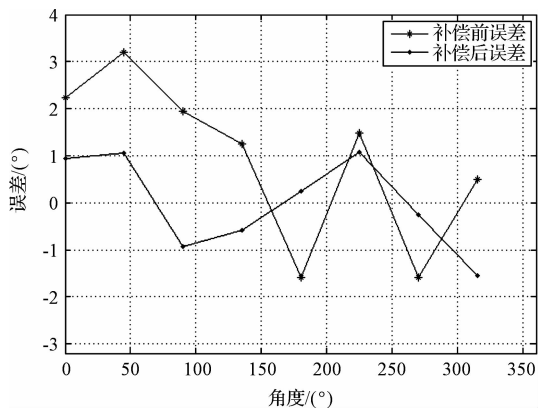


图7 角度误差补偿前后对比图

角误差。测角误差主要来源包括光栅传感器本身误差、安装误差,以及轴系跳动引入的误差^[8,9]。

光栅传感器本身的误差包括刻划误差和读数头电子细分误差,属于不变的系统误差^[10]。安装误差包括偏心、变形以及倾斜等引起的测角误差,这些误差一般不随时间变化,是测角系统不变的系统误差,可以用一系列谐波表示测角误差,找出其中幅值和初相位基本不变的谐波分量,建立误差谐波补偿模型,减小甚至消除这些系统误差^[11]。因此,残余的误差很大部分就是由于转台轴系跳动等因素引入的误差。

从以上标定的补偿前后的测角误差数据中,可以看出补偿前测角误差集中在 $(-1.59'', +3.21'')$,补偿后误差集中在 $(-1.56'', +1.08'')$,补偿前后峰峰值分别为 $4.80''$ 和 $2.64''$ 。实验结果表明,整个转台测角系统的精度为 $\pm 3.21''$,其中轴系跳动引入的误差,为 $\pm 1.56''$,验证了所设计转台的可行性,完全达到了该转台使用的测角传感器标称测角精度,可见该转台设计还是合理的。

5 结束语

在静力环境下,一维精密转台轴系的结构设计可以满足指标要求,变形较大的部位结构可进一步强化使用。

本研究采用有限元方法,应用 ANSYS 软件对一维精密转台轴系进行静态特性分析和模态特性分析,转

台在电机驱动下整个系统强度和刚度完全达到要求,并且计算出整个系统的固有频率研究结果表明,一阶固有频率在 2 400 Hz 左右,远大于测角转台实际的工作频率,能有效地避开共振区,保证转台结构测角精度。

为了验证该精密转台轴系设计是否能达到测角要求,本研究采用多面棱体和自准直仪获取转台测角系统的角度测量误差,并进行谐波分析,建立了误差补偿函数,并进行了试验验证,结果显示该转台设计还是合理的。

参考文献(References):

- [1] 刘 季. 星载激光雷达转台结构分析与优化[J]. 郑州轻工业学院学报, 2006, 21(1): 44-46.
- [2] 潘 健. 三轴转台结构静动特性分析与动力学仿真[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2009.
- [3] 江爱林, 曾洁如, 杨瞻勇, 等. 基于有限元的混凝土泵车转台结构研究与应用[J]. 科技创新导报, 2013, 12(1): 10-13.
- [4] 李 燕. 单轴转台系统振动传播特性及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学机电工程学院, 2012.
- [5] 钱冰哲, 潘高星. 恒压闭式静压转台液压系统设计[J]. 液压气动与密封, 2013(4): 18-19, 24.
- [6] 艾 敏. 二维转台结构分析及动力学仿真[D]. 长春: 长春理工大学光电工程学院, 2011.
- [7] 貂泽强, 余 锦, 聂树贞, 等. 高精度激光加工设备隔振系统的设计[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(21): 6082-6087.
- [8] 劳达宝, 周维虎, 李万红, 等. 基于遗传算法的柱面光栅测角技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 13-17.
- [9] ORTON P A. Automatic Self-Calibration of an Incremental Motion Encoder[C]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, Hungary, 2001: 1614-1618.
- [10] 李万红. 激光跟踪仪高精度测角误差补偿技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学科学与光电工程学院, 2014.
- [11] 赵人杰, 马文礼. 利用误差谐波补偿法提高金属圆光栅测角精度[J]. 仪器仪表用户科学与光电工程学院, 2009, 116(3): 69-71.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

石 冬, 周维虎, 劳达宝. 精密转台轴系设计分析与验证[J]. 机电工程, 2015, 32(1): 27-31.

SHI Dong, ZHOU Wei-hu, LAO Da-bao. Analysis and verification of precision turntable shafting design[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(1): 27-31.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>