

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2021.09.014

高精度角分度转台设计及其误差修正研究^{*}

李忠明^{1,2} 李俊霖¹ 韩 冰¹ 唐延甫¹ 杨永强^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 高精度转台在诸多领域有着广泛的应用, 为了提高其转台角分度精度, 提出了一种高精度角分度转台及其误差修正方法。首先, 介绍了转台的结构设计, 转台采用了蜗轮蜗杆传动、圆光栅测角的形式, 轴承采用了交叉滚柱轴环, 圆光栅采用了增量式, 对转台的载物台面进行了力学仿真分析, 考察了转台的静力学性能及模态特征; 然后, 利用多齿分度台和自准直仪对转台的测角精度进行了标定, 根据标定获得的误差分布规律, 采用基于查表的方法进行了误差补偿, 对于整数度之间无标定数据的部分, 采用线性插值的方法获得了误差修正量, 从而建立了完整的0~360°范围内的误差修正量数表; 最后, 分别利用多齿分度台和十七面体对误差修正效果进行了实验验证。研究结果表明: 利用该方法进行误差补偿, 测角最大误差由32.12"降低到1.95"; 同时, 查表法有效修正了测角误差, 使转台可以满足实际场合的使用要求。

关键词: 高精度转台; 测角精度标定; 圆光栅; 误差修正

中图分类号: TH712

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2021)09-1180-05

High precision angle indexing turntable and its error correction

LI Zhong-ming^{1,2}, LI Jun-lin¹, HAN Bing¹, TANG Yan-fu¹, YANG Yong-qiang^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: High-precision turntables have a wide range of applications in many fields, in order to improve the indexing accuracy of the turntable angle, a high precision angle indexing turntable and its error correction measurement were proposed. Firstly, the structural design of the turntable was introduced. The form of worm gear drive and round grating for angle measurement was adopted by the turntable. The cross-roller ring was adopted by the bearing, and the incremental type was adopted by the circle grating. The mechanical simulation analysis was carried out for the load table of the turntable, and the static performance and modal characteristics was investigated. Then, the angle measuring accuracy of the turntable was calibrated by using the multi-tooth dividing table and autocollimator. According to the error distribution law obtained by calibration, error compensation was carried out by the method based on lookup table. For the part without calibration data between integral degrees, linear interpolation method was adopted to obtain error correction, so as to establish a complete table of error correction within 0~360°. Finally, the error correction effect was verified by the multi-tooth indexing table and the optical polyhedron. The experimental results show that the maximum error is reduced from 32.12" to 1.95" by using this method. The method of lookup table corrects the angle measurement error effectively and makes the turntable meet the requirements.

Key words: high-precision turntable; angle measurement accuracy calibration; circular grating; error correction

0 引 言

高精度转台在光电测试、航空航天及精密仪器等

许多领域有着广泛的应用。高精度转台的测角精度直接影响系统的整体性能。同时, 随着科学技术的发展, 各类高精度转台的应用场合对其转台角分度精度的要

收稿日期: 2021-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51505076)

作者简介: 李忠明(1989-), 男, 辽宁丹东人, 博士研究生, 主要从事机电一体化技术方面的研究。E-mail: 549640152@qq.com

求也越来越高^[1-3]。

在 高 精 度 转 台 设 计 中 , 常 用 的 动 力 传 动 形 式 有 直 驱、蜗 轮 蜗 杆 传 动 和 齿 轮 传 动 等^[4-5]。 其 中 , 蜗 轮 蜗 杆 传 动 承 载 能 力 大 , 经 济 性 好 , 但 是 空 回 对 传 动 性 能 有 一 定 的 影 响 。 轴 承 常 采 用 气 浮 轴 承、密 珠 轴 承、转 台 轴 承、球 轴 承 组 等^[6-7] , 其 中 转 台 轴 承 在 性 能、成 本、空 间 等 方 面 的 综 合 比 较 下 具 有 较 大 的 优 势 , 单 个 轴 承 便 可 以 承 受 径 向 载 荷、轴 向 载 荷 及 力 矩 载 荷 , 安 装 使 用 方 便、旋 转 精 度 高 。

高 精 度 转 台 常 采 用 圆 光 栅 作 为 角 度 编 码 器 。 转 台 的 角 分 度 精 度 主 要 受 转 台 轴 系 精 度、圆 光 栅 测 量 精 度 的 影 响 。 轴 系 精 度 与 零 件 制 造、安 装 及 轴 承 性 能 有 关 , 提 高 轴 系 精 度 , 有 利 于 提 高 转 台 的 角 分 度 精 度^[8]。 圆 光 栅 的 测 角 精 度 受 诸 多 因 素 影 响 , 如 圆 光 栅 的 安 装 偏 心、倾 斜、变 形 等 安 装 因 素 , 还 有 圆 光 栅 制 造 时 的 刻 线 误 差 和 电 子 细 分 误 差 等 , 其 中 , 安 装 因 素 对 圆 光 栅 测 角 精 度 影 响 比 较 大^[9,10]。

针 对 圆 光 栅 安 装 导 致 的 测 角 误 差 , 有 硬 件 补 偿 和 数 值 补 偿 两 类 方 法 。

(1) 在 硬 件 补 偿 方 面 , 文 献 [11] 采 用 四 读 数 头 对 称 布 置 , 采 用 基 于 遗 传 算 法 的 参 数 优 化 算 法 , 建 立 了 误 差 模 型 来 进 行 误 差 补 偿 。 文 献 [12] 提 出 了 一 种 利 用 双 读 数 头 平 均 误 差 补 偿 方 法 , 圆 光 栅 的 测 角 精 度 有 较 大 的 提 高 ; 但 是 硬 件 补 偿 对 读 数 头 的 安 装 位 置 要 求 比 较 高 , 成 本 也 较 大 。

(2) 在 数 值 补 偿 方 面 , 文 献 [13] 利 用 谐 波 分 析 方 法 来 建 立 误 差 补 偿 函 数 , 修 正 了 圆 光 栅 安 装 偏 心 导 致 的 测 角 误 差 。 文 献 [14] 提 出 了 一 种 确 定 圆 光 栅 安 装 偏 心 量 和 方 向 的 方 法 。 文 献 [15] 利 用 多 体 系 统 理 论 , 建 立 了 测 角 误 差 模 型 , 进 行 了 误 差 修 正 。

综 上 所 述 , 数 值 补 偿 的 方 法 大 部 分 是 修 正 圆 光 栅 安 装 偏 心 导 致 的 误 差 , 而 针 对 圆 光 栅 安 装 变 形 的 误 差 修 正 目 前 却 鲜 有 报 道 。

为 此 , 笔 者 设 计 一 种 蜗 轮 蜗 杆 传 动 的 高 精 度 转 台 , 根 据 标 定 后 得 到 的 误 差 分 布 规 律 , 提 出 一 种 基 于 查 表 法 的 角 分 度 误 差 修 正 方 法 , 并 分 别 采 用 多 齿 分 度 台 和 十 七 面 体 对 其 误 差 修 正 效 果 进 行 验 证 。

1 转台结构设计

该 转 台 主 要 由 : 蜗 轮 蜗 杆 组 件、圆 光 栅、交 叉 滚 柱 轴 环、电 机 等 组 成 , 转 台 结 构 的 实 物 图 如 图 1 所 示 。

此 处 , 笔 者 根 据 《机 械 设 计 手 册》^[16] 确 定 蜗 杆 的 模 数 为 2 mm , 蜗 杆 分 度 圆 直 径 为 22.4 mm , 传 动 比 为 1 : 180 , 蜗 轮 的 分 度 圆 直 径 为 360 mm , 中 心 距 为 191.2 mm 。

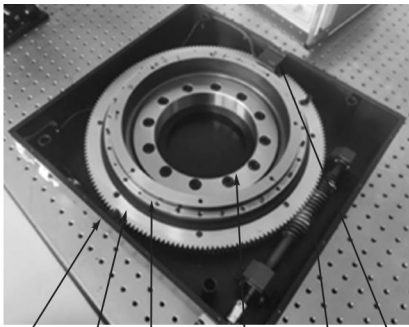


图 1 转台内部实物图

此 处 , 角 度 编 码 采 用 圆 光 栅 来 进 行 , 其 主 要 技 术 参 数 如 表 1 所 示 。

表 1 圆光栅主要技术参数

外径	线数	刻线精度	细分倍数	分辨率
300 mm	47 200	±0.73"	400	0.069"

圆 光 栅 安 装 在 旋 转 轴 上 , 直 接 检 测 旋 转 轴 的 转 动 角 度 , 避 免 了 蜗 轮 蜗 杆 空 回 对 转 台 角 分 度 精 度 的 影 响 ; 圆 光 栅 采 用 锥 面 安 装 形 式 , 有 一 定 的 自 定 心 效 果 , 同 时 利 用 螺 钉 的 顶 拉 来 调 整 圆 光 栅 的 位 置 状 态 ; 圆 光 栅 采 用 英 国 雷 尼 绍 公 司 的 RESM 系 列 增 量 式 圆 光 栅 ; 电 子 细 分 误 差 远 小 于 刻 线 误 差 及 安 装 误 差 , 可 以 忽 略 不 计^[17]。

交 叉 滚 柱 轴 环 采 用 THK 公 司 的 RU 型 产 品 , 该 型 号 是 内 外 环 一 体 式 , 使 用 简 便 , 安 装 状 态 对 性 能 几 乎 没 有 影 响 , 因 此 能 够 获 得 稳 定 的 旋 转 精 度 ; 交 叉 滚 柱 轴 环 内 环 固 定 在 转 台 底 板 上 , 外 环 与 旋 转 轴 及 蜗 轮 连 接 , 精 度 等 级 选 用 P4 级 , 较 好 的 轴 承 精 度 有 助 于 提 高 转 台 的 角 分 度 精 度 。

蜗 轮 蜗 杆 组 件 的 传 动 比 是 1 : 180 , 电 机 采 用 高 分 辨 率 型 五 相 步 进 电 机 , 基 本 步 距 角 0.36° , 200 倍 细 分 后 理 论 步 距 角 0.001 8° , 经 蜗 轮 蜗 杆 传 动 后 转 台 旋 转 轴 的 运 动 分 辨 率 0.036"。

2 转台仿真分析

在 实 际 使 用 过 程 中 , 振 动 及 形 变 会 对 高 精 度 转 台 的 测 角 精 度 及 正 常 使 用 产 生 一 定 的 影 响 , 需 要 对 其 进 行 模 态 分 析 及 静 力 学 分 析 , 并 且 考 察 转 台 的 实 际 使 用 情 况 。

笔 者 使 用 ANSYS 软 件 对 转 台 载 物 台 面 进 行 仿 真 分 析 。 其 中 , 台 面 的 变 形 分 析 如 图 2 所 示 。

转 台 的 应 力 分 析 如 图 3 所 示 。

转 台 的 变 形 分 析 如 图 4 所 示 。

台 面 选 用 2A12 铝 合 金 , 抗 拉 强 度 为 410 MPa , 屈

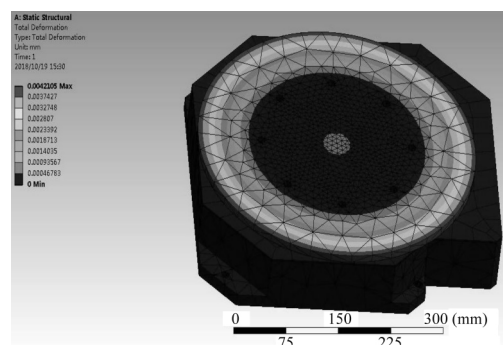


图2 台面变形分析

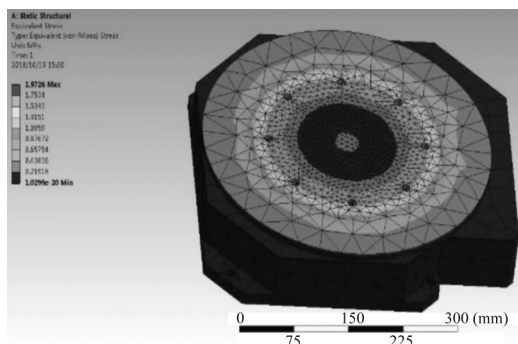


图3 转台应力分析

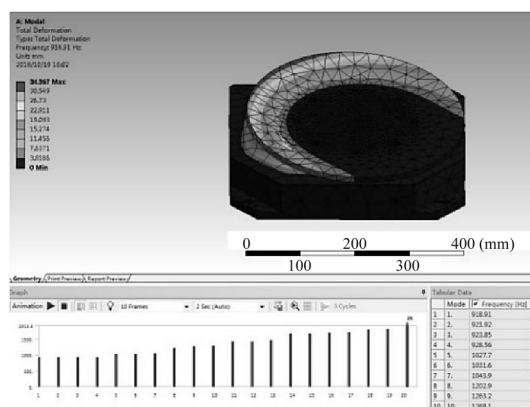


图4 转台模态分析

服强度为 265 MPa。

在实际使用时,转台的最大负载不超过 15 kg,故笔者对转台载物台面施加 150 N 的力。通过仿真分析可知,载物台面的最大变形为 0.003 7 mm,最大应力为 1.97 MPa,二者均远小于材料的强度极限。

3 标定及误差补偿

转台标定的原理示意图如图 5 所示。

转台标定的实物布局图如图 6 所示。

转台标定的具体步骤如图 7 所示。

接下来,笔者利用多齿分度台和自准直仪对转台进行具体的标定。

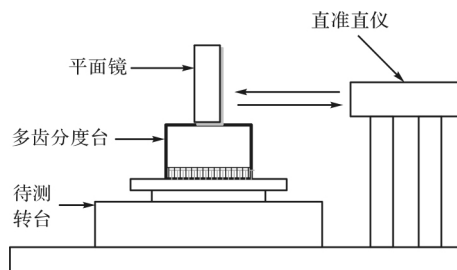


图5 转台标定原理图

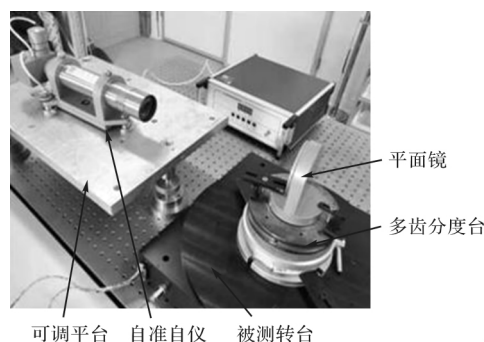


图6 转台标定布局图

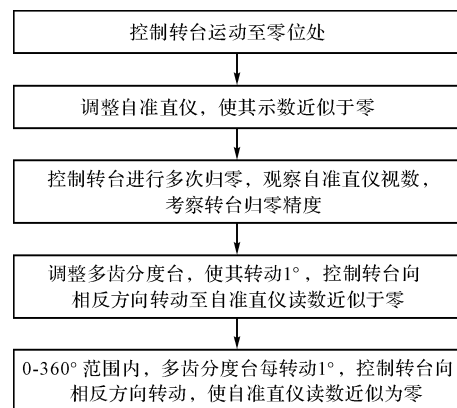


图7 转台标定步骤

笔者将多齿分度台固定于转台台面的中心,由于两者的偏心会对标定的精度产生干扰,此处需要保证多齿分度台与转台旋转中心的同轴度^[18];多齿分度台上放置反射镜,自准直仪与反射镜对准;当转台位于零位处时,调整自准直仪,使其视数近似为零。

当误差未修正时,由标定得到的最大测角误差是 32.12″。

转台归零精度如表 2 所示。

表2 归零精度

归零次数	自准直仪视数	归零误差
1	0.5	0.3
2	0.4	0.2
3	0.5	0.3
4	0.6	0.4
5	0.1	-0.1

转台的零位采用光电开关实现。转台的归零精度对于数值误差修正法至关重要,归零精度高,则数值误差修正方法的效果好。

首先,笔者考察转台的归零精度,转台位于零位时,自准直仪的度数为 $0.2''$,控制转台进行5次重复归零,自准直仪的读数如表2所示。转台的归零最大误差不大于 $0.5''$,具备较好的归零精度。

通过图7的标定步骤4,转台每次转过的角度与 1° 的差值,即是此位置的角分度误差,进而可以得到 $1^\circ \sim 360^\circ$ 范围内360个整度数位置的角分度误差。

转台的角分度误差分布情况如图8所示。

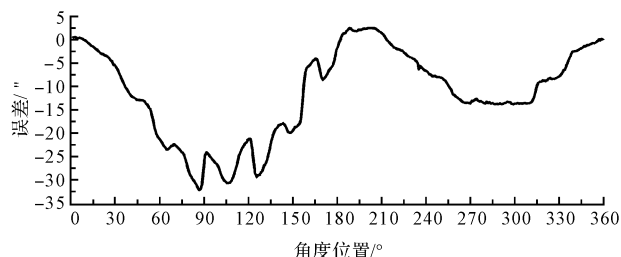


图8 转台角分度误差

根据360个角度位置的误差分布情况,结合圆光栅各种安装不当所导致的误差分布特点,可知圆光栅的变形对角分度精度的影响更明显,无法使用谐波分析等偏心误差修正方法来进行误差修正。

笔者采用查表法来进行误差修正,根据 $0 \sim 360^\circ$ 范围内360个整度数位置的误差,建立误差修正量的数表;利用相邻度数间的误差进行线性插值,得到了整度数之间的修正量,从而形成了完整的 $0 \sim 360^\circ$ 之间的误差修正量数表。

误差修正后的角分度误差分布情况如图9所示。

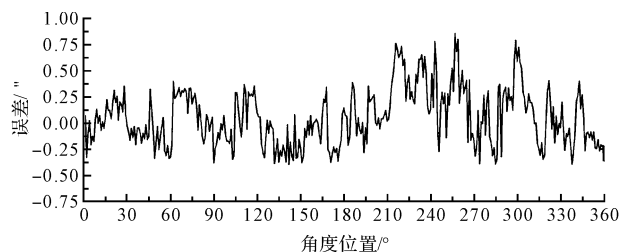


图9 转台角分度误差

4 实验验证

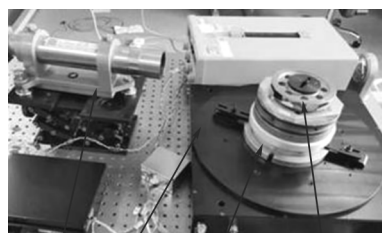
为了验证查表法的误差修正效果,笔者将 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围完整的误差修正量数表映射到DSP28377控制器中,即将360个整度数误差修正量写到DSP28377控制程序中,整度数位置的修正量可以直接使用,整度数之间的修正量利用相邻整度数修正值线性插值得到。

DSP28377控制器向转台发出目标角度位置时,需加上该角度位置的误差修正量,转台按照修正后的角度位置运动,运动完成后,控制器将转台返回的角度值减去误差修正量,便是真实的目标角度位置。

笔者利用多齿分度台和自准直仪对 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的360个整度数位置进行误差修正效果验证。由获得的数据可知,整度数位置的误差最大值为 $0.79''$,误差修正效果显著。

笔者利用多齿分度台和自准直仪对转台进行标定,考察整度数位置的误差修正情况;无法考察整度数之间的,利用线性插值得到误差补偿量。由于十七面体的每个面对应的度数都不是整度数,笔者采用十七面体和自准直仪来进一步考察转台的角分度误差修正情况。

利用十七面体和自准直仪标定转台的实物图如图10所示。



自准直仪 被测转台 多齿分度台 十七面体

图10 转台标定布局图

标定数据如图11所示。

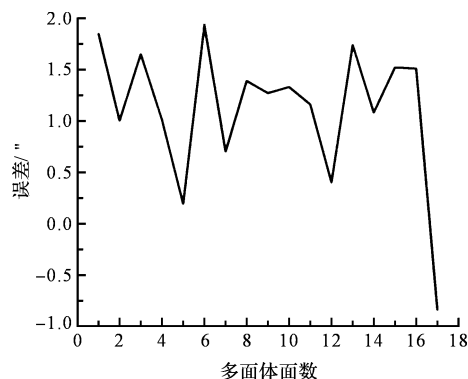


图11 转台角分度误差

十七面体安装在转台台面上,笔者利用千分表保证十七面体与转台旋转轴同心。

由图11可知转台角分度最大值为 $1.95''$,可见整度数之间的误差修正效果也比较好的。

5 结束语

本文提出了一种高精度角分度转台及其测角误差修正方法。转台采用蜗轮蜗杆传动、圆光栅测角的形

式圆光栅采用增量式,轴承采用交叉滚子轴环;利用自准直仪和多齿分度台对转台的测角误差进行标定;并分别利用多齿分度台和十七面体对误差修正效果进行验证。

研究结果表明:

(1) 通过仿真分析,验证了设计的高精度转台满足静力学性能和模态特征满足使用要求;

(2) 提出的利用自准直仪和多齿分度台的转台测角误差标定方法,可以得到 $0 \sim 360^\circ$ 范围内 360 个整数度位置的测角误差;

(3) 转台测角误差分布无明显规律,提出的一种基于查表的转台测角误差修正方法,修正前后,最大测角误差分别为 $32.12''$ 和 $1.95''$,误差修正效果比较好。

在后续的研究中,笔者将针对圆光栅局部形变导致的测角误差分布规律具有分段谐波分布的特点,对基于分段数学模型的误差修正方法进行更进一步的研究。

参考文献(References):

- [1] XU J M, LI Z, TANG H H, et al. Significant influence of non-linear friction torque on motion performance of tracking turntables [J]. *Tribology International* 2019(136): 148-154.
- [2] 杨礼康, 李 岸, 曹森龙, 等. 用于自动拍摄的转台装置研制 [J]. *机电工程* 2010 27(1): 94-96.
- [3] ZHAO Y, ZHAO H, HUO X, et al. Error analysis and error allocation for turntable system used in gyrowheel calibration tests [J]. *International Journal of Aerospace Engineering* 2017(6524782): 1-13.
- [4] 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* 32(1): 27-31.
- [5] 江 炜, 周维虎, 劳达宝, 等. 多光栅测角系统精密转台轴系设计 [J]. *仪表技术与传感器* 2018(9): 24-28.
- [6] 马智文. 蜗轮蜗杆驱动转台的结构可靠性设计及结合部参数识别 [D]. 昆明: 昆明理工大学机电工程学院 2015.
- [7] 刘延芳, 刘兴富, 齐乃明, 等. 主动补偿式超低干扰力矩气浮转台的设计 [J]. *光学精密工程* 2016 24(10): 2432-2441.
- [8] 姜登明, 魏 亮, 姚腾蛟, 等. 高精度转台装配误差分析和补偿 [J]. *导航与控制* 2015 14(3): 108-111.
- [9] 王福全, 王 珏, 谢志江, 等. 精密转台角分度误差补偿 [J]. *光学精密工程* 2017 25(8): 2165-2172.
- [10] 姚雪峰, 孙 慈, 杨 晋, 等. 高精度角位移平台的研制及误差补偿 [J]. *仪器仪表学报* 2016 37(5): 961-967.
- [11] 江 炜, 劳达宝, 周维虎, 等. 多光栅测角系统精密转台轴系设计 [J]. *仪表技术与传感器* 2018 9(9): 24-28.
- [12] 王 园. 双读数头圆光栅偏心参数标定修正算法 [J]. *工具技术* 2018 52(11): 142-146.
- [13] DENG F, CHEN J, WANG Y, et al. Measurement and calibration method for an optical encoder based on adaptive differential evolution-Fourier neural networks [J]. *Measurement Science and Technology* 2013 24(5): 55007.
- [14] SU Z K, QIU Z R, WANG C L, et al. A new method for circular grating's eccentricity identification and error compensation [C]. 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control 2015.
- [15] CHEN B K, PENG C Y, HUANG J. A new error model and compensation strategy of angle encoder in torsional characteristic measurement system [J]. *Sensors* 2019 19(3772): 1-14.
- [16] 闻邦椿. 机械设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社.
- [17] 周彬彬. 高精度圆光栅测角系统误差补偿技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学航天学院 2016.
- [18] 郭敬滨, 曹红艳, 王克新, 等. 转台分度误差检测及补偿技术的研究 [J]. *中国机械工程* 2014 25(7): 895-899.

[编辑: 杨骏泽]

本文引用格式:

李忠明, 李俊霖, 韩 冰, 等. 高精度角分度转台设计及其误差修正研究 [J]. *机电工程* 2021 38(9): 1180-1184.

LI Zhong-ming, LI Jun-lin, HAN Bing, et al. High precision angle indexing turntable and its error correction [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021 38(9): 1180-1184.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>