

基于多面体和靶标的转台运动精度测量方法研究

林修文,罗道江,冯刚英

(中国电子科技集团有限公司第十研究所,四川 成都 610036)

摘要:针对工程实际中环扫天线转台的运动精度测量问题,设计一种基于多面体法和靶标法结合的运动精度直接测量法。采用“电子经纬仪+靶标”与“平面度检测仪+正多面棱体”组合搭建测量系统的方法,实现分别对转台输出主轴和旋转变压器轴的角位移检测;研究该方法的测量原理与实施步骤并对方法的不确定度进行分析。该方法相较于常规间接测量方法可以减少数据转换过程中的误差,增加测试结果的可信性。通过某环扫天线转台展开测试,实验结果表明:该方法能满足转台运动精度测量需求,具有易操作、高精度的特点。

关键词:运动精度;天线转台;多面体法;靶标法

中图分类号:TH132.46 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)06-0066-03

Research on Measurement Method of Turntable Motion Accuracy Based on Polyhedron and Target

LIN Xiuwen, LUO Daojiang, FENG Gangying

(The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: Aiming at the motion accuracy measurement problem of the scanning antenna turntable in engineering practice, designs a direct motion accuracy measurement method based on the combination of polyhedron method and target method. The method of combining "electronic theodolite + target" and "planarity detector + positive polyhedral prism" is adopted to realize the detection of the angular displacement of the turntable output spindle and the rotary transformer shaft respectively, the measurement principle and implementation steps of the method are studied and the uncertainty of the method is analyzed. Compared with conventional indirect measurement methods, the designed method can reduce errors in the data conversion process and increase the credibility of test accuracy. The experimental results from the test by a scanning antenna show that this method, being easy for operation and with high accuracy, can meet the needs of motion accuracy measurement of the turntable.

Keywords: motion accuracy; antenna turntable; polyhedron method; target method

0 引言

伺服转台可为环扫天线提供精确的方位和速率等输入信号,通过转台旋转带动环扫天线实现天线波束指向有规律的改变,转台的运动精度直接影响环扫天线指向精度。随着空天电子装备的迅速发展,天线性能指标要求不断提高,对天线转台运动精度的测量成了必需的工作。

目前,国内外对于精密转台运动精度测量尚未形成统一的标准,也没有成熟的商用设备^[1]。通常根据转台结构特点、使用性能要求以及具备的测量仪器情况,设计并搭建测量平台^[2]。由于测量环境和测量仪器的限制,大多采用间接测量的方法,再进行推导计算得到结果,难以保证测试精度的可信性^[3]。本文结合多面体法和靶标法直接对天线转台运动精度进行测量,减少了过程转换误差,并对测量方法展开了误差分析。

1 运动精度测量方案

1.1 测量装置的设计

本测量方法中用到的仪器主要有电子经纬仪、正多面棱体、平面度检测仪、千分表。

测量前,设备及仪器按如图1所示放置,其中电子经纬仪通过转接夹具固定在输出主轴的安装法兰上。装配过程中将千分表通过磁力吸附固定在转台上,测量电子经纬仪和主轴的同轴度,配合调整转接夹具的安装位置使同轴度达到千分表的最小分度值。然后在距离电子经纬仪 h 处放置平面靶标,转动电子经纬仪使得观测镜和靶标中心重合并置零电子经纬仪的读数。最后将正多面棱体装配在与旋转变压器轴回转中心同轴的位置上,平面度检测仪放置在正多面棱体附近,调整平面度检测仪观测镜中的

光管与正多面棱镜中任一镜面刻线重合^[4]。此时测量仪器的设置作为测量初始状态。

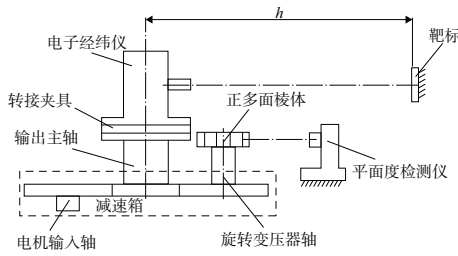


图1 多面体法和靶标法组合的测量系统

1.2 测量原理及过程

运动精度的测量原理是在 GJB1801—1993 中方法 104 的基础上进行延伸拓展^[5]。正多面棱体的面数通常有 8、12、24、36 等。记正多面体的面数为 n , 相邻两个面的夹角理论值为 $\alpha = \frac{360}{n}$ 。在完成测量初始状态的设置后, 按照下列步骤进行检测。

将电机输入轴顺时针转动, 带动正多面棱镜转动, 使平面度检测仪观测镜中的光管与正多面棱镜中相邻镜面刻线重合, 此时旋转变压器轴转动角度为 α 。将电子经纬仪逆时针旋转, 使观测镜和靶标中心重合, 记录此时主轴转动角度的读数 β_1 , 可以得到旋转变压器轴位置在 α 时, 运动精度误差值 $\varphi_1 = \beta_1 - \alpha$ ^[6]。

然后通过同样的方法将旋转变压器轴再次转动 α , 操作电子经纬仪使观测镜和靶标中心重合, 记录第二次主轴转动角度的读数 β_2 , 可以得到旋转变压器轴位置在 2α 时, 运动精度误差值 $\varphi_2 = \beta_2 - 2\alpha$ 。

对于其他位置, 都通过上述方法依次进行测量和计算, 可以得到 $n-1$ 组正向误差值数据 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_{n-1}$, 其中 $\varphi_n = \beta_n - n\alpha$ 。

将电机输入轴逆时针转动, 采用相同的多面体法和靶标法可以得到主轴转动角度的读数 β'_n 和 $n-1$ 组反向误差值数据 $\varphi'_1, \varphi'_2, \varphi'_3, \dots, \varphi'_{n-1}$, 其中 $\varphi'_n = \beta'_n - n\alpha$ 。

对得到的正向和反向两组误差值数据采用极差原理求得正向运动精度 $\omega = |\varphi_{\text{Max}} - \varphi_{\text{Min}}|$ 和反向运动精度 $\omega' = |\varphi'_{\text{Max}} - \varphi'_{\text{Min}}|$ ^[7]。

2 不确定度分析

本测量方法的不确定度主要来自传动变压器轴和转动主轴两端的测量装置, 即多面体法和靶标法测量系统带来的不确定度。

2.1 多面体法不确定度分析

多面体法测量系统中的不确定度来源主要是平面度检测仪精度 γ_1 、多面棱镜的精度 γ_2 及观测误差 γ_3 。其中, 观测不确定度主要来自人自身的视觉误差, 人眼的分辨力为 $30'' \sim 60''$, 观测观测镜的放大率为 V , 可以得到观测不确定度 γ_3 :

$$\gamma_3 = \pm \frac{30'' \sim 60''}{V} \quad (1)$$

2.2 靶标法不确定度分析

靶标法测量系统中不确定度来源主要有电子经纬仪与输出主轴的偏心误差引起的不确定度和电子经纬仪对靶标过程中引起的不确定度。

电子经纬仪与输出主轴的偏心误差来源于装配过程中使用的千分表的最小分度值。如图 2 所示, 实线圆代表输出主轴, A 点为其轴心, 虚线代表电子经纬仪, B 点为其旋转中心, A 点与 B 点的距离 m 代表偏心的距离, r 代表使用千分表调整安装同轴度时接触点 (C 点) 与旋转中心 (B 点) 的距离, B 点到 C 点的方向代表与靶标对准的方向, 直线 AC 与 BC 之间的夹角 c 即是偏心引起的不确定度 γ_4 。

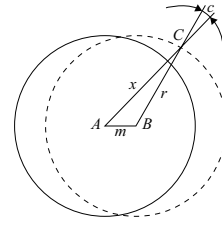


图2 偏心误差来源示意图

由余弦定理, 可以通过式 (2) 得到不确定度 γ_4 :

$$\gamma_4 = \cos^{-1} \frac{r^2 + x^2 - m^2}{2rx} \quad (2)$$

由均值不等式原理, 通过式 (3) 得

$$\gamma_4 = \cos^{-1} \frac{x - \frac{r^2 - m^2}{x}}{2r} \leq \cos^{-1} \frac{2\sqrt{r^2 - m^2}}{2r} = \cos^{-1} \frac{\sqrt{r^2 - m^2}}{r} \quad (3)$$

电子经纬仪对靶标过程中引起的角度误差来源于仪器误差和观测误差 γ_5 ^[8]。

仪器误差主要来源设备内部物理特性和加工装配引起的误差, 如图 3 所示, O 为观测镜观测点, D 为靶标中心, p 为仪器测量误差, 因此 $\angle DOD'$ 即为仪器误差引起的测量误差 γ_5 。

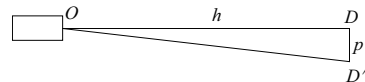


图3 仪器误差引起测量误差示意图

由三角定理, 可以通过式 (4) 得到 γ_5 :

$$\gamma_5 = \tan^{-1} \frac{p}{h} \quad (4)$$

2.3 运动精度测量方法总不确定度

根据引起运动精度测量方法不确定度的来源, 可以得到方法总不确定度 γ :

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 2\gamma_3^2 + \gamma_4^2 + \gamma_5^2} \quad (5)$$

3 验证与分析

3.1 验证案例

以工程项目中某环扫天线转台作为验证案例, 按照本

文论述的方法进行运动精度测量,搭建的测量系统如图4所示。

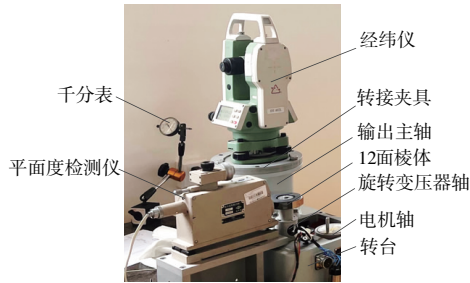


图4 某转台运动精度测量系统

本测量平台采用12面棱体,不确定度 $\gamma_1 = 2.9''$;平面度检测仪不确定度 $\gamma_2 = 1.2''^{[4]}$;取人眼的分辨力为 $60''$,观测观测镜的放大倍率 V 为20,通过式(1)可以得到观测不确定度 $\gamma_3 = 3''$;千分表最小分度值 0.001 mm ,千分表距离主轴旋转中心距离 r 为 100 mm ,通过式(2)、式(3)可以得到 $\gamma_4 = 2.1''$;经纬仪精度 p 为 0.002 mm ,靶标设置在距离经纬仪 5 m 的地方,通过式(4)可以得到 $\gamma_5 = 0.1''$ 。

由式(5)计算可知测量方法的总不确定度 $\gamma = 5.7''$ 。

对转台正向和反向分别每间隔 30° 依次进行测量,得到的数据如表1和表2所示。由表1得正向运动精度误差最大值为 $2'29''$;由表2得反向运动精度误差最大值为 $2'03''$ 。

表1 正向运动精度测试数据

项目	旋变轴位置											
	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
主轴读数	$29^\circ 59' 17''$	$59^\circ 59' 13''$	$89^\circ 59' 37''$	$119^\circ 59' 55''$	$150^\circ 00' 49''$	$180^\circ 01' 05''$	$210^\circ 00' 38''$	$239^\circ 58' 58''$	$269^\circ 58' 36''$	$299^\circ 58' 43''$	$329^\circ 59' 20''$	$359^\circ 59' 24''$
误差值	$-43''$	$-47''$	$-23''$	$-5''$	$49''$	$1'05''$	$38''$	$-1'02''$	$-1'24''$	$-1'17''$	$-40''$	$-36''$

表2 反向运动精度测试数据

项目	旋变轴位置											
	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
主轴读数	$329^\circ 59' 20''$	$299^\circ 59' 33''$	$269^\circ 58' 55''$	$239^\circ 59' 51''$	$210^\circ 00' 40''$	$180^\circ 00' 57''$	$119^\circ 59' 53''$	$239^\circ 58' 58''$	$89^\circ 59' 58''$	$59^\circ 58' 54''$	$29^\circ 59' 44''$	$359^\circ 59' 10''$
误差值	$-40''$	$-27''$	$-1'05''$	$-9''$	$40''$	$57''$	$39''$	$-7''$	$-2''$	$-1'06''$	$-16''$	$-50''$

3.2 案例分析

本案例以12面棱体作为旋变轴输入基准,按测量步骤读取电子经纬仪数值,得到正向和反向各12组运动精度误差值数据,对测量数据采用极差原理计算可以得到正向运动精度 $\omega = 2'29''$,反向运动精度 $\omega' = 2'03''$,满足转台的使用运动精度小于 $6'$ 的指标要求。

本案例中搭建的运动精度测量系统均采用常规检测仪器,测量系统的总不确定度达到 $5.7''$,满足工程项目中绝大部分的高精度测量需求。

4 结语

本文针对工程实际中环扫天线转台的运动精度测量问题,设计了基于“电子经纬仪+靶标”和“平面度检测仪+正多面棱体”组合搭建的测量系统,实现直接对转台输入端和输出端的角位移测量。相较于间接测量法,本方法可以简化测量数据处理步骤并减少中间推导过程中引入的误差,其结果具有计算方便和精度高的特点。本文详细论述了测量方法的步骤和不确定度的算法,最后采用常规检

测仪器按照该方法搭建的运动精度测量平台对工程中某环扫天线转台进行检测。由测量结果可以得出,本测量平台检测误差满足工程项目中的高精度测量要求。

参考文献:

- [1] 石照耀,徐航,韩方旭,等.精密减速器回差测量的现状与趋势[J].光学精密工程,2018,26(9):2150-2158.
- [2] 石健瑜,薛雅丽.低成本微型飞行器自动化测量平台的设计与搭建[J].机械制造与自动化,2021,50(4):60-63.
- [3] 崔勇,徐岩.精密转台角位移精度的测量方法研究[J].计量与测试技术,2012,39(2):1-2.
- [4] 王赴敏.多面棱体法测量传动箱运动精度的测量不确定度评定[J].计量与测试技术,2008,35(12):49-50.
- [5] GJB1801—1993 惯性技术测试设备主要性能试验方法[S].
- [6] 裴祖荣,陈清清,李敬杰.正多面棱体和多齿分度台角分度误差的互检[J].光电工程,2009,36(10):90-93,99.
- [7] 张功,张晓飞,王昱峰,等.角位置测量误差补偿方法研究[J].测试技术学报,2016,30(4):353-357.
- [8] 米阳,刘华军,张鹏.光电经纬仪靶场精度检测数据误差分析[J].光机电信息,2010,27(10):50-54.

收稿日期:2022-06-21