



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103983219 A

(43) 申请公布日 2014. 08. 13

(21) 申请号 201410249777. 1

(22) 申请日 2014. 06. 06

(71) 申请人 中国科学院光电技术研究所  
地址 610209 四川省成都市双流 350 信箱

(72) 发明人 李杰 吴时彬 曹学东 朱文  
杨杰

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任  
公司 11021

代理人 宋焰琴

(51) Int. Cl.  
G01B 11/30(2006. 01)

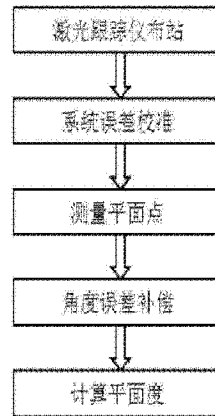
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种大尺寸平面度的在位测量方法

(57) 摘要

本发明提供一种大尺寸平面度的在位测量方法,包括步骤如下:在被测平面附近布置两站激光跟踪仪,且两站激光跟踪仪之间相对被测平面具有一高度差;对两站激光跟踪仪的系统误差进行自校准;将两站激光跟踪仪位于被测平面附近不同的两位置,并分别测量被测平面上相同被测点的坐标,分别得到两站激光跟踪仪的第一位置坐标数据和第二位置坐标数据;使用第一位置坐标数据对第二位置坐标数据进行误差补偿,得到补偿后的坐标数据;对补偿后的坐标数据进行计算,获得被测平面的平面度。本方法使用一站对另外一站测量数据误差补偿,提升平面度测量精度。本发明测量简单高效且易于实现,尤其对加工过程中大尺寸平面度的在位检测有重要的应用价值。



1. 一种大尺寸平面度的在位测量方法,其特征在于:该方法通过以下步骤完成:

步骤 S1:在被测平面附近布置两站激光跟踪仪,且两站激光跟踪仪之间相对被测平面具有一高度差;

步骤 S2:对两站激光跟踪仪的系统误差进行自校准;

步骤 S3:将两站激光跟踪仪位于被测平面附近不同的两位置,并分别测量被测平面上相同被测点的坐标,分别得到两站激光跟踪仪的第一位置坐标数据和第二位置坐标数据;

步骤 S4:使用第一位置坐标数据对第二位置坐标数据进行误差补偿,得到补偿后的坐标数据;

步骤 S5:对补偿后的坐标数据进行计算,获得被测平面的平面度。

2. 根据权利要求 1 所述的大尺寸平面度的在位测量方法,其特征在于,所述两站激光跟踪仪为在被测平面附近的第一位置布置一台第一站激光跟踪仪,之后将第一站激光跟踪仪移站至被测平面附近的第二位置称之为第二站激光跟踪仪。

3. 根据权利要求 2 所述的大尺寸平面度的在位测量方法,其特征在于,所述的第一站激光跟踪仪位于被测平面附近的第一位置,测量被测平面上被测点的坐标,得到第一位置坐标数据;所述第二站激光跟踪仪位于被测平面附近的第二位置,再次对测量被测平面上所述被测点的坐标,得到第二位置坐标数据。

4. 根据权利要求 1 所述的大尺寸平面度的在位测量方法,其特征在于,所述激光跟踪仪为使用两台激光跟踪仪,所述两台激光跟踪仪包括第一站激光跟踪仪和第二站激光跟踪仪。

5. 根据权利要求 4 所述的大尺寸平面度的在位测量方法,其特征在于,所述第一站激光跟踪仪位于被测平面附近的第一位置,第二站激光跟踪仪位于被测平面附近的第二位置,第一站激光跟踪仪和第二站激光跟踪仪分别测量被测平面上相同被测点的坐标,得到第一位置坐标数据和第二位置坐标数据。

6. 根据权利要求 3 或 5 任一项所述的大尺寸平面度的在位测量方法,其特征在于,所述第一站激光跟踪仪靠近被测平面放置,用以增加测量第一站激光跟踪仪与被测点连线在被测平面内投影长度的精度。

7. 根据权利要求 3 和 5 任一项所述的大尺寸平面度的在位测量方法,其特征在于,所述第二站激光跟踪仪与被测点连线在被测平面的法向上具有一高度差及角度,用以增加测量第二站激光跟踪仪与被测点连线在被测平面法向上高度差精度。

8. 根据权利要求 1 所述的大尺寸平面度的在位测量方法,其特征在于,其特征在于,所述激光跟踪仪测距模式选为干涉测距模式。

9. 根据权利要求 3 和 5 任一项所述的大尺寸平面度的在位测量方法,其特征在于,其特征在于,步骤 S4 所述误差补偿的步骤包括:

步骤 S41:分别用第一站激光跟踪仪的第一位置坐标数据及第二站激光跟踪仪测量的第二位置坐标数据拟合被测平面,得到拟合平面 A、B;计算第一站激光跟踪仪测量距离  $\rho_{1i}$  在拟合平面 A 面上投影长度  $l_{1i}$ ;以拟合平面 B 法向为坐标系 Z 轴,第二站激光跟踪仪自身坐标原点在拟合平面 B 面上投影点为坐标系原点建立坐标系,导出第二站激光跟踪仪测量第二位置球坐标的格式坐标数据  $(\rho_{2i}, \theta_{2i}, \sigma_{2i})$  及在拟合平面 B 上投影坐标  $(x_{2i}, y_{2i})$ ;

步骤 S42:根据投影坐标  $x_{2i}, y_{2i}$ 、投影长度  $l_{1i}$ ,计算第一站激光跟踪仪、第二站激光跟

踪仪自身坐标原点在拟合平面 A、B 上投影点在拟合平面 A、B 的转换关系,表示如下:

$$\min \rightarrow \sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_{2i} \times a + y_{2i} \times b + c)^2 + (-x_{2i} \times b + y_{2i} \times a + d)^2} - l_i)$$

其中  $i$  为被测点数,  $i = 1, 2, 3 \dots n$ ,  $a, b$  为被测平面坐标旋转系数,  $c, d$  为被测平面坐标变换平移系数;

步骤 S43: 将拟合平面 B 上投影坐标  $(x_{2i}, y_{2i})$  进行坐标变换, 得到变换坐标  $(x_{3i}, y_{3i})$ ;

步骤 S44: 将变换坐标  $(x_{3i}, y_{3i})$  转换成长度, 获得并计算转换后长度  $\sqrt{x_{3i}^2 + y_{3i}^2}$  与基准长度计算的偏差  $\Delta l_i$ ;

步骤 S45: 补偿第二站激光跟踪仪的俯仰角度偏差, 得到最终俯仰角度  $\theta_i$ ;

步骤 S46: 对最终俯仰角度  $\theta_i$  进行计算, 得到补偿后坐标数据值  $(x_i, y_i, z_i)$ , 并获取第二站激光跟踪仪测量的水平角  $\sigma_{2i}$ 。

## 一种大尺寸平面度的在位测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于精密测量领域,涉及一种大尺寸平面度高精度测量方法,尤其适用于加工过程中大尺寸平面度的高精度在位检测。

### 背景技术

[0002] 大尺寸平面是指几米乃至几十米的平面,相比于常规尺寸,大型工件难以移动,因此检测场合已经从计量实验室转向干扰因素众多的大型工业制造现场,测量设备、系统必须在现场进行组建、校准和量值传递。同时,极高的测量精度需求(微米级)、被测对象多样性、测量效率等也是进行大尺寸平面度测量时所面对的重要挑战,因此大尺寸平面度精密测量技术也一直是学术界、工业界关注和追求的目标。当前发展势头最好的几个重装技术及应用领域,如地基大型天文望远镜、电力能源设备制造及安装、船舶制造等,都对大尺寸平面度精密测量技术提出了迫切需求。在重大技术装备涉及的关键技术中,大尺寸平面度精密测量技术是其中的基础支撑技术之一,它为系统设计、制造工艺改进与完善、质量保证以及运行安全提供了必须的测量数据支持。

[0003] 从文献调研情况来看,大尺寸平面度主要有以下几种测量方法:

[0004] 利用三坐标测量机测量平面度具有较高的测量精度和相对较大的检测范围,可以编程自动完成测量,但仅可在实验室条件下对可移动工件进行测量并且仪器成本非常昂贵。

[0005] 激光跟踪仪是基于球坐标原理的柔性坐标测量仪器,通过测量仪器原点至靶标的距离及相对水平、俯仰角度,得到靶标的相对空间坐标位置。利用激光跟踪仪测量大尺寸平面度的方法具体又可分为单站激光跟踪仪法及多站激光跟踪仪法。单站激光跟踪仪法即利用激光跟踪仪球坐标测量功能直接测量平面度,这种测量方法相对来说较为简单,但往往受限于其测角误差,精度较差。多站激光跟踪仪法基于多边原理解算空间坐标,具备潜在的精度,但需要4台以上的激光跟踪仪同时进行测量,检测成本较高;同时该测量方法对各激光跟踪仪布站位置有严格的限制条件,检测过程相对复杂,还需进一步进行研究。

[0006] 转台-旋臂法依靠高精度转台及悬臂产生“理论”平面,并采用测微仪接触待测表面获取各点高差信息,通过数据处理获取平面度。这种检测方法相对比较简单,精度较高,适用于环状面平面度检测;在整面检测时校正、拼接程序较为复杂;同时在大尺寸检测时,由于悬臂过长会影响机械稳定性,进而损失测量精度。

[0007] 三点支承法以被测表面自为基准,不需要与任何基准相比较。该方法操作方便,检测结果直观,特别适合于加工人员使用,但是测量大圆环面时,机械工装质量较大不易操作,且该方法只能测量一个环带。

[0008] 液面测量法基于连通器等高原理,通过测量两个容器液面高度差变化进而计算平面度,是一种低成本的测量方法。液面测量法受温度等环境因素影响较大,液面稳定时间随着容器间的距离拉大不断增加,所以液面法测量效率、精度较低;同时液面法的使用约束条件较为严格,要求被测件调平,不能广泛应用。

[0009] 水平仪-跨桥法是一种基于斜率测量平面度的方法,将固定有水平仪的桥板置于被测平面上,按一定的布点形式首尾衔接地拖动桥板,测出被测平面上相邻两点连线相对测量基面的倾斜角,通过数据处理求出平面度。该方法适用于大、中型平面的平面度误差测量,精度较高;不足之处是测量效率较低,仅可测量连续型平面。

[0010] 综上所述,现有的大尺寸平面度检测方法由于适用尺寸、效率、精度、成本、技术等原因,已无法满足亟待解决的检测任务和测量难题。

## 发明内容

[0011] (一)要解决的技术问题

[0012] 为了克服现有技术存在的不足,本发明提供一种基于双站激光跟踪仪高精度的大尺寸平面度的在位测量方法。

[0013] (二)技术方案

[0014] 为达成所述目的,本发明提供一种基于双站激光跟踪仪的大尺寸平面度的在位测量方法,解决问题的技术方案是通过以下步骤完成:

[0015] 步骤 S1:在被测平面附近布置两站激光跟踪仪,且两站激光跟踪仪之间相对被测平面具有一高度差;

[0016] 步骤 S2:对两站激光跟踪仪的系统误差进行自校准;

[0017] 步骤 S3:将两站激光跟踪仪位于被测平面附近不同的两位置,并分别测量被测平面上相同被测点的坐标,分别得到两站激光跟踪仪的第一位置坐标数据和第二位置坐标数据;

[0018] 步骤 S4:使用第一位置坐标数据对第二位置坐标数据进行误差补偿,得到补偿后的坐标数据;

[0019] 步骤 S5:对补偿后的坐标数据进行计算,获得被测平面的平面度。

[0020] (三)有益效果

[0021] 本发明基于双站激光跟踪仪的大尺寸平面度高精度的在位测量方法,是基于误差补偿原理的测量方法,用一站激光跟踪仪测量数据补偿另一站激光跟踪仪的测量数据,从而达到高精度检测的目的。相对于传统测量方法,本发明测量过程中不需移动被测件,可以实现在位测量;仅需要二台激光跟踪仪(最少一台),节省了检测成本;测量无需复杂的调整,采样时间快,提高了检测效率;基于误差补偿原理,测量精度高。本发明的方法测量简单高效且易于实现,尤其对加工过程中大尺寸平面度的高精度在位检测有重要的应用价值。

## 附图说明

[0022] 图1为本发明大尺寸平面度测量方法的流程图;

[0023] 图2为本发明双站激光跟踪仪布站示意图;

[0024] 图3为本发明双站激光跟踪仪布站原理图;

## 具体实施方式

[0025] 下面结合附图详细说明本发明技术方案中涉及各个细节问题。应指出的是,所

描述的实施例仅旨在便于对本发明的理解,而不起任何限定作用。

[0026] 如图 1 示出本发明基于双站激光跟踪仪的大尺寸平面度高精度在位测量方法,本方法是基于激光跟踪仪球坐标原理及高精度测距特性,在平面度测量时,利用合理布站,使用其中一站测量数据对另外一站测量数据进行误差补偿,从而提升平面度测量精度。本发明方法实施实施例如下:该方法通过以下步骤完成:

[0027] 步骤 S2:在被测平面 3 附近布置两站激光跟踪仪,且两站激光跟踪仪之间相对被测平面 3 具有一高度差;

[0028] 其中,所述两站激光跟踪仪为在被测平面附近的第一位置布置一台第一站激光跟踪仪 1,之后将第一站激光跟踪仪 1 移站至被测平面附近的第二位置称之为第二站激光跟踪仪 2。

[0029] 其中,所述两站激光跟踪仪为使用两台激光跟踪仪,所述两台激光跟踪仪包括第一站激光跟踪仪 1 和第二站激光跟踪仪 2。

[0030] 请见图 2 示出本发明方法在被测平面附近对双站激光跟踪仪进行合理布站的具体实施例做法为:

[0031] 两站激光跟踪仪应相对被测平面 3 应满足一高度差。两站激光跟踪仪包括第一站激光跟踪仪和第二站激光跟踪仪,其中:第一站激光跟踪仪,用以增加测量第一站激光跟踪仪 1 与被测点连线在被测平面 3 内投影长度的精度;第二站激光跟踪仪 2 与被测点连线在被测平面 3 的法向上具有一高度差及角度,可提高测量第二站激光跟踪仪 2 与被测量点连线在被测平面 3 法向的高度差的精度。

[0032] 除上述激光跟踪仪进行布站方式之外,布站组合方式还是如下的一组组合方式:(a) 第一站激光跟踪仪靠近被测平面 3,第二站激光跟踪仪 2 位于被测平面 3 上;(b) 第二站激光跟踪仪 2 靠近被测平面 3,第一站激光跟踪仪 1 位于被测平面 3 上。

[0033] 为方便说明,将三维测量进行二维简化,具体原理如附图 3 所示: $\Delta z$  为被测点的高差测量不确定度, $\Delta d$  为被测点在平面上径向投影长度的测量不确定度,第一站激光跟踪仪 1 或第二站激光跟踪仪 2 的测量距离  $\rho$  在被测平面 3 中的投影长度  $l$  为:

[0034]  $l = \rho \sin \theta$ , 其投影长度的测量不确定度  $u_l$  表示如下:

$$[0035] \quad u_l = \sqrt{(u_\rho \sin \theta)^2 + (\rho \cos \theta u_\theta)^2},$$

[0036] 其中  $u_\rho$  为测距误差, $u_\theta$  为测角误差, $\theta$  为测量距离  $\rho$  在与被测平面 3 法向的夹角。当第一站激光跟踪仪 1 接近被测平面 3 放置时,投影长度的测量不确定度  $u_l \approx u_\rho$ , 由于激光跟踪仪采用干涉测量测距,因此对被测平面 3 内投影长度具备较高的测量精度。

[0037] 第一站激光跟踪仪 1 或第二站激光跟踪仪 2 测量被测平面 3 内被测点的高差  $z$  表示如下:

$$[0038] \quad z = \rho \cos \theta,$$

[0039] 其高差  $z$  的测量不确定度  $u_z$  表示如下:

$$[0040] \quad u_z = \sqrt{(u_\rho \cos \theta)^2 + (\rho \sin \theta u_\theta)^2} \approx \rho \sin \theta u_\theta,$$

[0041] 当第二站激光跟踪仪 2 远离被测平面 3 并与其保持一角度时,高差  $z$  的测量不确定度  $u_z$  显著减小,因此对与被测平面 3 的高差具备较高的测量精度。

[0042] 第一站激光跟踪仪 1 或第二站激光跟踪仪 2 布站位置的选择应遵循以上原则,但

并无严格空间位置要求,在实际测量时,可根据实际检测精度需求及条件选择布站距离。

[0043] 步骤 S2 :对第一站激光跟踪仪 1 及第二站激光跟踪仪 2 的系统误差进行自校准,具体的做法为:

[0044] 通过第一站激光跟踪仪 1 及第二站激光跟踪仪 2 的自校准软件进行系统误差补偿,如利用 API 激光跟踪仪的 Tracker cal 软件进行单点快速误差补偿或全范围补偿或 FARO 激光跟踪仪 MetroPro 软件的自补偿功能实现系统误差自补偿,并通过正反视测量功能检查补偿效果。

[0045] 步骤 S3 :将第一站激光跟踪仪 1 及第二站激光跟踪仪 2 位于被测平面 3 附近不同的两位置,使用第一站激光跟踪仪 1 及第二站激光跟踪仪 2 分别测量被测平面 3 上相同被测点的坐标,得到第一位置坐标数据和第二位置坐标数据。具体的做法有以下两种:

[0046] 1、当使用单台激光跟踪仪通过移站实现双站测量时,所述的第一站激光跟踪仪 1 位于被测平面附近的第一位置,测量被测平面上被测点的坐标,得到第一位置坐标数据;所述第二站激光跟踪仪 2 位于被测平面附近的第二位置,再次对测量被测平面上所述被测点的坐标,得到第二位置坐标数据。需借助工装复现被测点,工装在转站前后固定不动,第一站激光跟踪仪 1 及第二站激光跟踪仪 2 的靶标 4 可借助工装获取与被测平面 3 相关联的重复测量被测点。

[0047] 2、当使用第一站激光跟踪仪 1 及第二站激光跟踪仪 2 同时测量平面上的相同的被测点时,所述第一站激光跟踪仪 1 位于被测平面附近的第一位置,第二站激光跟踪仪 2 位于被测平面附近的第二位置,第一站激光跟踪仪 1 和第二站激光跟踪仪 2 分别测量被测平面上相同被测点的坐标,得到第一位置坐标数据和第二位置坐标数据。因选择静态测量模式,待靶标 4 稳定后,同时触发第一站激光跟踪仪 1 及第二站激光跟踪仪 2 对相同的被测点进行采样。

[0048] 在采样时均应使用激光跟踪仪干涉测距模式以实现高精度测量距离。

[0049] 步骤 S4 :使用第一站激光跟踪仪 1 测量的第一位置坐标数据对第二站激光跟踪仪 2 测量的第二位置坐标数据进行误差补偿,得到补偿后的坐标数据,具体的做法为:

[0050] 1、分别用第一站激光跟踪仪 1 的第一位置坐标数据及第二站激光跟踪仪 2 测量的第一位置坐标数据拟合被测平面,得到拟合平面 A、B;计算第一站激光跟踪仪 1 测量距离  $\rho_{1i}$  在拟合平面 A 面上投影长度  $l_{1i}$ 。以拟合平面 B 法向为坐标系 Z 轴,第二站激光跟踪仪 2 自身原点在拟合平面 B 上投影点为坐标系原点建立坐标系,导出第二站激光跟踪仪 2 测量球坐标的格式坐标数据  $(\rho_{2i}, \theta_{2i}, \sigma_{2i})$  及在拟合平面 B 上投影坐标  $(x_{2i}, y_{2i})$ ;

[0051] 2、根据投影坐标  $x_{2i}, y_{2i}$ 、投影长度  $l_{1i}$ ,计算第一站激光跟踪仪 1、第二站激光跟踪仪 2 自身坐标原点在拟合平面 A、B 上投影点在拟合平面 A、B 的转换关系,表示如下:

$$[0052] \quad \min \rightarrow \sum_{i=1}^n \left( \sqrt{(x_{2i} \times a + y_{2i} \times b + c)^2 + (-x_{2i} \times b + y_{2i} \times a + d)^2} - l_{1i} \right)$$

[0053] 其中  $i$  为被测点数,  $i = 1, 2, 3 \dots n$ ,  $a, b$  为平面坐标旋转系数,  $c, d$  为平面坐标变换平移系数。

[0054] 3、将拟合平面 B 上投影坐标  $(x_{2i}, y_{2i})$  进行坐标变换,得到变换坐标  $(x_{3i}, y_{3i})$  表示如下:

$$[0055] \quad \begin{pmatrix} x_{3i} = x_{2i}a + y_{2i}b + c \\ y_{3i} = -x_{2i}b + y_{2i}a + d \end{pmatrix}$$

[0056] 4、将变换坐标  $(x_{3i}, y_{3i})$  转换成长度, 获得并计算转换后长度与基准长度的偏差  $\Delta l_i$  :

$$[0057] \quad \Delta l_i = \sqrt{x_{3i}^2 + y_{3i}^2} - l_{1i}$$

[0058] 5、补偿第二站激光跟踪仪 2 的俯仰角度偏差, 得到最终俯仰角度  $\theta_i$  :

$$[0059] \quad \theta_i = \arcsin((\rho_{2i} \sin \theta_{2i} - \Delta l_i) / \rho_{2i})$$

[0060] 6、对最终俯仰角度  $\theta_i$  进行计算, 得到补偿后坐标数据值  $(x_i, y_i, z_i)$

$$[0061] \quad \begin{pmatrix} x_i = \rho_{2i} \sin \theta_i \sin \sigma_{2i} \\ y_i = \rho_{2i} \sin \theta_i \cos \sigma_{2i} \\ z_i = \rho_{2i} \cos \theta_i \end{pmatrix}, \text{其中 } \sigma_{2i} \text{ 为第二站激光跟踪仪 2 测量的水平角。}$$

[0062] 步骤 S5 : 对补偿后的坐标数据进行计算, 获得被测平面的平面度, 具体的做法为 : 可将补偿后的数据导入激光跟踪仪测量软件计算平面度或自行编制程序进行最小二乘平面拟合并得到平面度数据。

[0063] 以上所述, 仅为本发明中的具体实施方式, 但本发明的保护范围并不局限于此, 任何熟悉该技术的人在本发明所揭露的技术范围内, 可理解想到的变换或替换, 都应涵盖在本发明的包含范围之内。



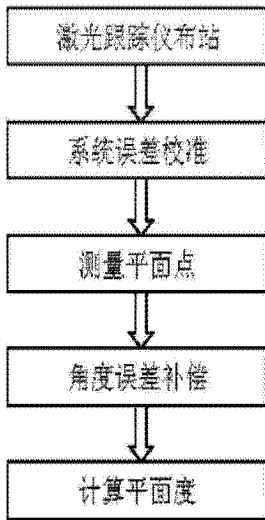


图 1

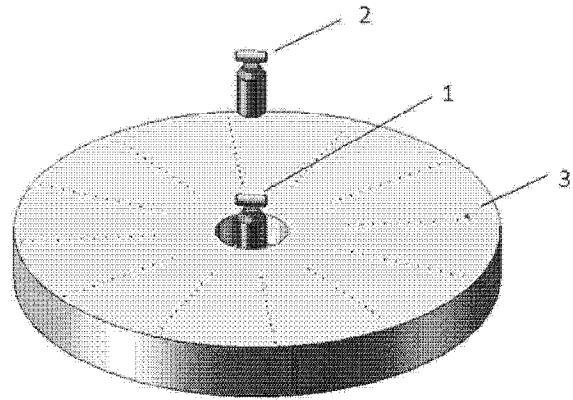


图 2

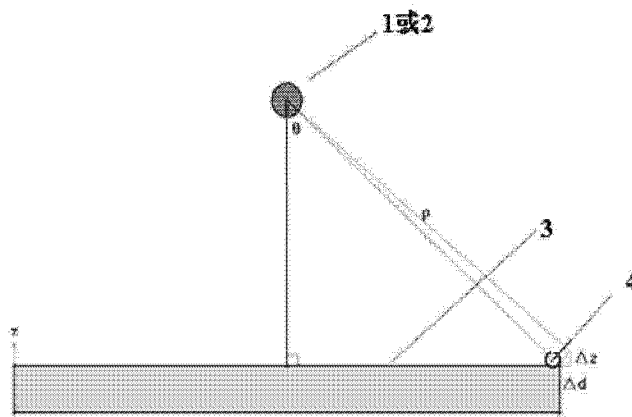


图 3