

1. 一种用于对通过坐标测量设备对回射器目标的三维坐标测量中的误差进行校正的方法,所述坐标测量设备构造成将光的第一射束发送至所述回射器目标,所述回射器目标构造成将所述第一射束的一部分作为第二射束返回,所述方法包括以下步骤:

提供所述坐标测量设备,所述坐标测量设备具有第一轴杆、第二轴杆、第一马达、第二马达、第一角度测量设备、第二角度测量设备、测距仪和处理器,所述第一轴杆构造成围绕第一轴线旋转,所述第一轴杆由第一轴承和第二轴承支承,所述第一马达构造成使所述第一轴杆围绕所述第一轴线旋转第一角度,所述第一角度测量设备构造成测量所述第一角度,所述第二轴杆构造成围绕第二轴线旋转,所述第二轴杆由第三轴承和第四轴承支承,所述第二马达构造成使所述第二轴杆围绕所述第二轴线旋转第二角度,所述第二角度测量设备构造成测量所述第二角度,所述测距仪构造成至少部分地基于由第一光学探测器接收的所述第二射束的第一部分来测量从所述坐标测量设备到所述回射器目标的第一距离;

用所述第一角度测量设备测量多个第一角度;

在沿所述第一轴线的第二位置处测量多个第二位移,所述多个第二位移中的每者均与所述多个第一角度中的一个第一角度相关联,所述第二位移沿垂直于所述第一轴线的第二线取得;

在沿所述第一轴线的第三位置处测量多个第三位移,所述多个第三位移中的每者均与所述多个第一角度中的一个第一角度相关联,所述第三位移沿垂直于所述第一轴线的第三线取得,在所述第三线与所述第四线之间存在第二间距;

至少部分地基于所述多个第一角度、所述多个第一位移、所述多个第二位移以及所述第一间距确定补偿值;

将所述第一射束发送至所述回射器目标;

用所述第一角度测量设备测量第一回射器角度;

用所述第二角度测量设备测量第二回射器角度;

用所述测距仪测量所述第一距离;

至少部分地基于所述第一回射器角度、所述第二回射器角度、所述第一距离以及所述补偿值计算所述回射器目标的三维坐标;以及

将所述回射器目标的所述三维坐标储存在存储器中。

2. 根据权利要求1所述的方法,还包括以下步骤:

在沿所述第一轴线的第四位置处测量多个第四位移,所述多个第四位移中的每者均与所述多个第一角度中的一个第一角度相关联,所述第四位移沿垂直于所述第一轴线的第四线取得;

在沿所述第一轴线的第五位置处测量多个第五位移,所述多个第五位移中的每者均与所述多个第一角度中的一个第一角度相关联,所述第五位移沿垂直于所述第一轴线的第五线取得,在所述第四线与所述第五线之间存在第三间距;以及

在确定补偿值的所述步骤中,所述补偿值还至少部分地基于所述多个第三位移、所述多个第四位移以及所述第三间距确定。

3. 根据权利要求1所述的方法,其中,在确定补偿值的所述步骤中,所述补偿值包括所述第一轴线的多个倾斜角度,其中,所述多个倾斜角度中的每者均与所述多个第一角度中的一个第一角度相关联。

4. 根据权利要求 1 所述的方法,还包括以下步骤:

提供测试装置,所述测试装置构造成可移除地附接至所述第一轴杆,所述测试装置具有第一传感器和第二传感器;

将所述测试装置附接至所述第一轴杆,以便将所述第一传感器放置在所述第一位置处,以及将所述第二传感器放置在所述第二位置处;以及

其中,在测量多个第一位移的所述步骤中,所述第一位移由所述第一传感器测量,以及,在测量多个第二位移的所述步骤中,所述第二位移由所述第二传感器测量。

5. 根据权利要求 4 所述的方法,其中,在提供测试装置的所述步骤中,所述第一传感器与所述第二传感器是电容传感器。

6. 根据权利要求 5 所述的方法,其中,在提供测试装置的所述步骤中,所述第一传感器靠近第一球形表面,以及所述第二传感器靠近第二球形表面。

7. 根据权利要求 1 所述的方法,还包括以下步骤:

提供第一传感器和第二传感器,所述第一传感器位于所述第一位置处,以及所述第二传感器位于所述第二位置处;以及

其中,在测量多个第一位移的所述步骤中,所述第一位移由所述第一传感器测量,以及,在测量多个第二位移的所述步骤中,所述第二位移由所述第二传感器测量。

8. 根据权利要求 1 所述的方法,其中,在测量多个第一角度的所述步骤中,所述多个第一角度中的每个所述第一角度均是展开的,以提供多个第一展开角度,在循环连续的情况下,每个第一展开角度均是不同的。

9. 根据权利要求 8 所述的方法,其中,确定补偿值的所述步骤还包括计算基波正弦分量。

10. 根据权利要求 8 所述的方法,还包括测量所述第一轴杆围绕所述第一轴线的旋转次数的步骤。

11. 根据权利要求 10 所述的方法,还包括以下步骤:

提供旋转计数器;以及

用所述旋转计数器测量所述第一轴杆的旋转次数。

12. 根据权利要求 11 所述的方法,其中,在测量旋转次数的所述步骤中,所述旋转计数器包括第一计数器部分和第二计数器部分,所述第一计数器部分附接至所述第一轴杆,所述第二计数器部分附接至相对于所述第一轴杆的旋转静止的外壳,所述第一计数器部分和所述第二计数器部分构造成产生关于所述第一轴杆的每次旋转的信号,所述旋转计数器还构造成响应于所述第一轴杆的旋转方向,以便对于沿第一旋转方向的旋转而增加计数次数,以及对于沿与所述第一旋转方向相反的方向的旋转而减少计数次数。

13. 根据权利要求 12 所述的方法,其中,在测量旋转次数的所述步骤中,所述旋转计数器构造成在所述第一角度测量设备不可操作时测量旋转次数。

14. 根据权利要求 12 所述的方法,其中,在测量旋转次数的所述步骤中,所述旋转计数器由电池供电。

15. 根据权利要求 2 所述的方法,还包括以下步骤:

用所述第二角度测量设备测量多个第二角度;

在沿所述第二轴线的第五位置处测量多个第五位移,所述多个第五位移中的每者均与

所述多个第二角度中的一个第二角度相关联,所述第五位移沿垂直于所述第二轴线的第五线取得;

在沿所述第二轴线的第六位置处测量多个第六位移,所述多个第六位移中的每者均与所述多个第二角度中的一个第二角度相关联,所述第六位移沿垂直于所述第二轴线的第六线取得,在所述第五线与所述第六线之间存在第三间距;

在沿所述第二轴线的第七位置处测量多个第七位移,所述多个第七位移中的每者均与所述多个第二角度中的一个第二角度相关联,所述第七位移沿垂直于所述第二轴线的第七线取得;

在沿所述第二轴线的第八位置处测量多个第八位移,所述多个第八位移中的每者均与所述多个第二角度中的一个第二角度相关联,所述第八位移沿垂直于所述第二轴线的第八线取得,在所述第七线与所述第八线之间存在第四间距;以及

在确定补偿值的所述步骤中,还至少部分地基于所述多个第二角度、所述多个第五位移、所述多个第六位移、所述多个第七位移、以及所述多个第八位移、所述第三间距以及所述第四间距确定所述补偿值。

16. 一种用于测量回射器目标的三维坐标的坐标测量设备,所述坐标测量设备构造成将光的第一射束发送至所述回射器目标,所述回射器目标构造成将所述第一射束的一部分作为第二射束返回,所述设备包括:

第一轴杆、第二轴杆、第一马达、第二马达、第一角度测量设备、第二角度测量设备、测距仪、旋转计数器和处理器,所述第一轴杆构造成围绕第一轴线旋转,所述第一轴杆由第一轴承和第二轴承支承,所述第一马达构造成使所述第一轴杆围绕所述第一轴线旋转第一角度,所述第一角度测量设备构造成测量所述第一角度,所述第二轴杆构造成围绕第二轴线旋转,所述第二轴杆由第三轴承和第四轴承支承,所述第二马达构造成使所述第二轴杆围绕所述第二轴线旋转第二角度,所述第二角度测量设备构造成测量所述第二角度,所述测距仪构造成至少部分地基于由第一光学探测器接收的所述第二射束的第一部分测量从所述坐标测量设备到所述回射器目标的第一距离,所述旋转计数器构造成测量所述第一轴杆的旋转次数。

用于补偿激光跟踪仪中的轴承径向跳动的装置和方法

背景技术

[0001] 本公开涉及一种坐标测量设备。一组坐标测量设备属于通过将激光束发送到点来测量该点的三维 (3D) 坐标的一类仪器。激光束可以直接撞击到点上, 或者撞击到与点相接触的回射器目标上。在任一情况下, 仪器通过测量到目标的距离和两个角度来确定该点的坐标。用诸如绝对测距仪或干涉仪的距离测量设备来测量距离。用诸如角度编码器的角度测量设备来测量角度。仪器内的装有万向节的射束调向机构将激光束指引至兴趣点。

[0002] 激光跟踪仪是使用其发射的一束或多束激光束跟踪回射器目标的特定类型的坐标测量设备。与激光跟踪仪最密切相关的坐标测量设备是激光扫描仪和全站仪。激光扫描仪将一束或更多束激光束递送 (step) 至表面上的点。激光扫描仪拾取自该表面散射的光, 并且通过该光确定相对于每个点的距离和两个角度。在测量应用中最常用的全站仪可以用于测量漫散射目标或回射目标的坐标。在下文中, 术语激光跟踪仪在广义上用于包括激光扫描仪和全站仪。

[0003] 通常, 激光跟踪仪将激光束发送到回射器目标。普通类型的回射器目标是球形安装的回射器 (SMR), 其包括嵌入在金属球体内的立方隅角回射器。立方隅角回射器包括三个相互垂直的镜。作为三个镜交叉的公共交点的顶点位于球体的中心。由于立方隅角在球体内的这种布局, 使得即使 SMR 在旋转时, 从顶点到 SMR 所搁置的任意表面的垂直距离都保持恒定。因此, 激光跟踪仪可以通过跟随在表面上移动的 SMR 的位置来测量表面的 3D 坐标。另一种说法, 激光跟踪仪只需要测量三个自由度 (一个径向距离和两个角度) 来充分地表征表面的 3D 坐标的特征。

[0004] 一种类型的激光跟踪仪仅包括干涉仪 (IFM) 而不包括绝对测距仪 (ADM)。如果物体阻挡来自于这些跟踪仪中的一个跟踪仪的激光束的路径, 则 IFM 失去其距离基准。那么操作者在继续该测量之前必须跟踪回射器至已知的位置以重置基准距离。一种避开 (around) 该限制的方式是将 ADM 置于跟踪仪中。如在下文更加详细描述的那样, ADM 可以以点摄 (point-and-shoot) 的方式测量距离。一些激光跟踪仪仅包括 ADM 而不包括干涉仪。Bridges 等的美国专利 No. 7, 352, 446 (‘446) 描述了一种仅具有 ADM (并且没有 IFM) 的激光跟踪仪, 该激光跟踪仪能够精确地扫描移动的目标。在 ‘446 专利之前, 绝对测距仪太缓慢以至于不能精确地找到移动的目标的位置。

[0005] 激光跟踪仪内的万向节机构可以用于将激光束从跟踪仪指引至至 SMR。由 SMR 回射的光的一部分进入激光跟踪仪并且传递至位置探测器。激光跟踪仪内的控制系统能够用位置探测器上的光的位置来调整激光跟踪仪的机械轴 (axes) 的旋转角度, 以保持激光束在 SMR 中心上居中。以此方式, 跟踪仪能够跟随 (跟踪) 在兴趣物体的表面上移动的 SMR。

[0006] 诸如角度编码器的角度测量设备附接至跟踪仪的机械轴。由激光跟踪仪执行的一个距离测量和两个角度测量足以完全地确定 SMR 的三维位置。

[0007] 可获得或已提出了用于测量六个而不是普通的三个自由度的若干激光跟踪仪。在 Bridges 等的美国专利 No. 7, 800, 758 (‘758) 以及 Bridges 等的公开的专利申请 No. 2010/0128259 中描述了示例性的六自由度 (6-DOF) 系统。

[0008] 补偿参数是储存在跟踪仪可访问的软件或固件中的数值。将这些数值应用于原始跟踪仪数据,以提高跟踪仪的精度。跟踪仪的制造商以及在一些情况下的使用者通过执行被称为补偿过程的测量来找到补偿参数。当今,激光跟踪仪除了将补偿参数用于诸如轴线不垂直度以及轴线偏移的机械误差的消除(account for),以及消除诸如相对于跟踪仪万向节点的射束角度偏差与激光束偏移的光机误差。然而,在目前这代激光跟踪仪中,不包括消除轴承径向跳动的影响的补偿参数。这样的影响可以是相对大的。此外,轴承的径向跳动会降低角度编码器的补偿精度。需要能够实现补偿参数的采集与应用的过程,以使由轴承的径向跳动产生的误差最小化。

发明内容

[0009] 根据一实施方式,提供一种用于通过坐标测量设备对回射器目标的三维坐标测量中的误差进行校正的方法,该坐标测量设备构造成将光的第一射束发送至回射器目标,回射器目标构造成将第一射束的一部分作为第二射束返回,该方法的步骤包括:提供坐标测量设备,该坐标测量设备具有第一轴杆、第二轴杆、第一马达、第二马达、第一角度测量设备、第二角度测量设备、测距仪和处理器,第一轴杆构造成围绕第一轴线旋转,第一轴杆由第一轴承和第二轴承支承,第一马达构造成使第一轴杆围绕第一轴线旋转第一角度,第一角度测量设备构造成测量第一角度,第二轴杆构造成围绕第二轴线旋转,第二轴杆由第三轴承和第四轴承支承,第二马达构造成使第二轴杆围绕第二轴线旋转第二角度,第二角度测量设备构造成测量第二角度,测距仪构造成至少部分地基于由第一光学探测器接收的第二射束的第一部分来测量从坐标测量设备到回射器目标的第一距离;用第一角度测量设备测量多个第一角度;在沿第一轴线的第二位置处测量多个第二位移,多个第二位移中的每者均与多个第一角度中的一个第一角度相关联,第二位移沿垂直于第一轴线的第二线取得;在沿第一轴线的第二位置处测量多个第二位移,多个第二位移中的每者均与多个第一角度中的一个第一角度相关联,第二位移沿垂直于第一轴线的第二线取得,在第一线与第二线之间存在第一间距;至少部分地基于多个第一角度、多个第一位移、多个第二位移以及第一间距确定补偿值;将第一射束发送至回射器目标;用第一角度测量设备测量第一回射器角度;用第二角度测量设备测量第二回射器角度;用测距仪测量第一距离;至少部分地基于第一回射器角度、第二回射器角度、第一距离以及补偿值计算回射器目标的三维坐标;以及将回射器目标的三维坐标储存在存储器中。

[0010] 根据一实施方式,提供一种用于测量回射器目标的三维坐标的坐标测量设备,该坐标测量设备构造成将光的第一射束发送至回射器目标,回射器目标构造成将第一射束的一部分作为第二射束返回,该设备包括:第一轴杆、第二轴杆、第一马达、第二马达、第一角度测量设备、第二角度测量设备、测距仪、旋转计数器和处理器,第一轴杆构造成围绕第一轴线旋转,第一轴杆由第一轴承和第二轴承支承,第一马达构造成使第一轴杆围绕第一轴线旋转第一角度,第一角度测量设备构造成测量第一角度,第二轴杆构造成围绕第二轴线旋转,第二轴杆由第三轴承和第四轴承支承,第二马达构造成使第二轴杆围绕第二轴线旋转第二角度,第二角度测量设备构造成测量第二角度,测距仪构造成至少部分地基于由第一光学探测器接收的第二射束的第一部分测量从坐标测量设备到回射器目标的第一距离,旋转计数器构造成测量第一轴杆的旋转次数。

附图说明

[0011] 现参照附图,示出了示例性实施方式,所示的示例性实施方式不应被理解为对于本公开的整个范围的限制,以及其中,在若干附图中的元件标号相同;

[0012] 图 1 是根据本发明的实施方式的具有回射器目标的激光跟踪仪系统的立体图;

[0013] 图 2 是根据本发明的实施方式的具有六自由度 (six-DOF) 目标的激光跟踪仪系统的立体图;

[0014] 图 3 是描述了根据本发明的实施方式的激光跟踪仪的光学器件与电子器件的元件的框图;

[0015] 图 4 包括图 4A 和 4B,其示出了现有技术的远焦光束扩展器的两种类型;

[0016] 图 5 示出了现有技术的光导纤维光束发射器;

[0017] 图 6A-D 是示出了现有技术的位置探测器组件的四种类型的示意图;

[0018] 图 6E 和 6F 是示出了根据本发明的实施方式的位置探测器组件的示意图;

[0019] 图 7 是现有技术 ADM 内的电元件和电光学元件的框图;

[0020] 图 8A 和 8B 是示出了现有技术的光纤网络内的光纤元件的示意图;

[0021] 图 8C 是示出根据本发明的实施方式的光纤网络内的光纤元件的示意图;

[0022] 图 9 是现有技术的激光跟踪仪的分解视图;

[0023] 图 10 是现有技术的激光跟踪仪的横截面图;

[0024] 图 11 是根据本发明的实施方式的激光跟踪仪的计算元件与通信元件的框图;

[0025] 图 12 是根据本发明的实施方式的激光跟踪仪内的使用镜对光束进行调向的一些内部元件的立体图;

[0026] 图 13 是根据本发明的实施方式的激光跟踪仪内的一些元件的立体图;

[0027] 图 14 是根据本发明的实施方式的激光跟踪仪内的一些元件的立体图;

[0028] 图 15A 和 15B 是测量轴承误差的现有技术的装置的立体图;

[0029] 图 16A - 16C 是由车床主轴中的轴承误差的测量获得的数据绘图;

[0030] 图 17 示出了包含两个轴承的主轴的四次连续的旋转;

[0031] 图 18 是根据本发明的实施方式的激光跟踪仪部件与轴承径向跳动的测量装置的部分分解立体图;以及

[0032] 图 19 是根据本发明的实施方式的激光跟踪仪部件与轴承径向跳动的测量装置的部分分解立体图。

具体实施方式

[0033] 图 1 所示的示例性激光跟踪仪系统 5 包括激光跟踪仪 10、回射器目标 26、可选的辅助单元处理器 50 以及可选的辅助计算机 60。激光跟踪仪 10 的示例性装有万向节的射束调向机构 12 包括安装在方位基座 16 上并且绕方位轴线 20 旋转的天顶托架 (zenith carriage) 14。负载 15 安装在天顶托架 14 上并且绕天顶轴线 18 旋转。天顶轴线 18 和方位轴线 20 在跟踪仪 10 内部于万向节点 22 处正交地相交,所述万向节点处通常是用于距离测量的原点。激光束 46 基本上通过万向节点 22 并且正交地指向天顶轴线 18。换言之,激光束 46 处在与天顶轴线 18 近似垂直并且穿过方位轴线 20 的平面中。发出的激光束 46 通

过负载 15 围绕天顶轴 18 线的旋转以及通过天顶托架 14 围绕方位轴线 20 的旋转指向期望的方向。天顶角度编码器在跟踪仪内部附接至与天顶轴线 18 对准的天顶机械轴线。方位角度编码器在跟踪仪内部附接至方位轴线 20 对准的方位机械轴线。天顶角度编码器和方位角度编码器以相对高的精度测量天顶旋转角和方位旋转角。发出的激光束 46 行进至回射器目标 26, 该回射器目标 26 例如可以是如上所述的球面安装的回射器 (SMR)。通过测量万向节点 22 与回射器 26 之间的径向距离、绕天顶轴线 18 的旋转角度和绕方位轴线 20 的旋转角度, 能够在跟踪仪的球坐标系内找出回射器 26 的位置。

[0034] 如下文所描述的, 发出的激光束 46 可以包括一个或更多个激光波长。为了清晰和简明的目的, 在以下讨论中, 假定图 1 所示的这类型的调向机构。然而, 也可以是其他类型的调向机构。例如, 可以由绕方位轴线和天顶轴线旋转的镜来反射激光束。不论调向机构的类型如何, 本文中所描述的技术都是适用的。

[0035] 激光跟踪仪上可以包括磁巢 17, 以用于针对不同尺寸的 SMR——例如, 1.5、7/8 以及 1/2 英寸的 SMR——而将激光跟踪仪重置于“原始”位置。接通的跟踪仪回射器 19 可以用于将跟踪仪重置于基准距离处。此外, 如美国专利 No. 7, 327, 446 所述, 从图 1 的视图中不可见的跟踪仪上的反光镜可与跟踪仪上的回射器组合使用以使得能够执行自补偿。

[0036] 图 2 示出了与图 1 的激光跟踪仪系统 5 相似的示例性激光跟踪仪系统 7, 区别在于回射器目标 26 以六自由度探针 1000 替代。在图 1 中, 可以使用其他类型的回射器目标。例如, 有时使用猫眼回射器, 其为光集中于玻璃结构的反射性后表面上的小光点的玻璃回射器。

[0037] 图 3 是示出一种激光跟踪仪的实施方式中的光学元件与电元件的框图。其示出了激光跟踪仪的发射两种光波长的元件, 其中, 第一波长用于 ADM, 第二波长用于可见的指示器以及用于跟踪。可见的指示器使得使用者能够看到由跟踪仪发射的激光束点的位置。通过使用自由空间分束器将两种不同波长组合起来。电光 (EO) 系统 100 包括可见光源 110、隔离器 115、可选的第一光纤发射器 170、可选的干涉仪 (IFM) 120、射束扩展器 140、第一分束器 145、位置探测器组件 150、第二分束器 155、ADM160 以及第二光纤发射器 170。

[0038] 可见光源 110 可以是激光器、超辐射发光二极管或者其他发光设备。隔离器 115 可以是法拉第隔离器、衰减器或者其他能够减少反射回到光源中的光的设备。可选的 IFM 可以以多种方式构造。作为可能的实施方案的具体示例, IFM 可以包括分束器 122、回射器 126、四分之一波片 124、130 以及相位分析仪 128。可见光源 110 可以将光发射至自由空间, 然后光在自由空间中行进通过隔离器 115 以及可选的 IFM120。替代性地, 隔离器 115 可以通过光缆联接至可见光源 110。在这种情况下, 如下文中参照图 5 所讨论的, 来自于隔离器光可以通过第一光纤发射器 170 发射进入自由空间。

[0039] 光束扩展器 140 可以通过使用多种透镜配置设立, 而非如图 4A 和 4B 所示的两种通常使用的现有技术的配置。图 4A 示出了基于负透镜 141A 与正透镜 142A 的使用的配置 140A。入射到负透镜 141A 上的平行入射的光束 220A 从正透镜 142A 出来后成为更大的平行入射的光束 230A。图 4B 示出了基于两个正透镜 141B、142B 的使用的配置 140B。入射到第一正透镜 141B 上的平行入射的光束 220B 从第二正透镜 142B 出来后成为更大的平行入射的光束 230B。离开射束扩展器 140 的光中, 少量光从分束器 145、155 反射出来偏离 (on the way out of) 跟踪仪并且丢失。穿过分束器 155 的那一部分光与来自于 ADM160 的光相

结合,以形成离开该激光跟踪仪并且行进至回射器 90 的复合光束 188。

[0040] 在一实施方式中,ADM160 包括光源 162、ADM 电子器件 164、光纤网络 166、相互连接的电缆 165 以及相互连接的光纤 168、169、184、186。ADM 电子器件将电调制 (electrical modulation) 和偏压发送至光源 162,光源 162 例如可能是以近似为 1550nm 的波长操作的分布式反馈激光器。在一实施方式中,光纤网络 166 可以是示于图 8A 中的现有技术的光纤网络 420A。在该实施方式中,在图 3 中的来自于光源 162 的光行进穿过光纤 184,光纤 184 等同于图 8A 中的光纤 432。

[0041] 图 8A 的光纤网络包括第一光纤耦合器 430、第二光纤耦合器 436 以及低透射率反射器 435、440。光行进通过第一光纤耦合器 430,并且分裂成两条路径,第一路径通过光纤 433 到达第二光纤耦合器 436,第二路径通过光纤 422 与光纤长度均衡器 423。在图 3 中,光纤长度均衡器 423 连接至光纤长度 168,光纤长度 168 行进至 ADM 电子器件 164 的基准通道。光纤长度均衡器 423 的用途是使基准通道中的光穿越的光纤的长度和测量通道中的光穿越的光纤的长度等同。通过这种方式匹配光纤长度能够减小由周围温度的变化引起的 ADM 误差。由于光纤的光通道有效长度等于光纤的平均折射率乘以光纤的长度,因此这些误差可能增大。由于光纤的折射率取决于光纤的温度,因此光纤的温度的变化导致测量通道和基准通道的光通道有效长度的变化。如果测量通道中的光纤的光通道有效长度相对于基准通道中的光纤的光通道有效长度发生变化,则即使回射器目标 90 是保持静止的,结果也将会是回射器目标 90 的位置的明显移位。为了避开该问题,采取两个步骤。第一,使基准通道中的光纤的长度尽可能接近地等同于测量通道中的光纤的长度。第二,测量光纤与基准光纤尽可能并排地设定路线至如下程度,即,确保两个通道中的光纤具有几乎相同的温度变化。

[0042] 光通过第二光纤耦合器 436 行进并且分裂成两条路径,第一路径通向低反射光纤端接器 440,第二路径通向光纤 438,光从光纤 438 行进至图 3 中的光纤 186。光纤 186 上的光行进至第二光纤发射器 170。

[0043] 在一实施方式中,现有技术图 5 示出了光纤发射部 170。光从图 3 中的光纤 186 行进至图 5 中的光纤 172。光纤发射器 170 包括光纤 172、套圈 174 以及透镜 176。光纤 172 附接至套圈 174,套圈 174 稳定地附接至激光跟踪仪 10 内的结构。如果希望的话,可以对光纤的端部以一定角度进行打磨,以减小背向反射。光 250 从光纤的芯出来,该光纤可以是直径在 4 微米与 12 微米之间的单模光纤,其直径取决于所使用的光的波长以及光纤的特定类型。光 250 以某一角度发散并且截止于使其平行的透镜 176。通过 ADM 系统中的单光纤发射与接收光信号的方法在图 3 中参考 '758 进行了描述。

[0044] 参照图 3,分束器 155 可以是二向色性分束器,其传送与其反射的光的波长不同的波长。在一实施方式中,来自于 ADM160 的光经二向色性分束器 155 反射并且与通过二向色性分束器 155 传送的来自于可见的激光器 110 的光相结合。复合光束 188 离开激光跟踪仪作为第一射束行进至回射器 90,回射器 90 返回一部分光作为第二射束。第二射束的处于 ADM 波长的那部分经二向色性分束器 155 反射然后返回至第二光纤发射器 170,第二光纤发射器 170 将返回至光纤 186 中的光耦合。

[0045] 在一实施方式中,光纤 186 对应于图 8A 中的光纤 438。返回光从光纤 438 行进通过第二光纤耦合器 436 并且分裂成两条路径。第一路径通向光纤 424,在一实施方式中,该

光纤 424 对应于图 3 中的通向 ADM 电子器件 164 的测量通道的光纤 169。第二路径通向光纤 433, 然后到达第一光纤耦合器 430。离开第一光纤耦合器 430 的光分裂成两条路径, 第一路径通向光纤 432, 第二路径通向低反射比端接器 435。在一实施方式中, 光纤 432 对应于图 3 中的通向光源 162 的光纤 184。在大多数情况下, 光源 162 包含内置的法拉第隔离器, 该内置的法拉第隔离器使从光纤 432 进入光源的光的量降至最少。过量的光沿相反方向馈入激光器会使激光器去稳定化。

[0046] 来自于光纤网络 166 的光通过光纤 168、169 进入 ADM 电子器件 164。图 7 示出了现有技术的 ADM 电子器件的一实施方式。图 3 中的光纤 168 对应于图 7 中的光纤 3232, 图 3 中的光纤 169 对应于图 7 中的光纤 3230。现参照图 7, ADM 电子器件 3300 包括频率基准 3302、合成器 3304、测量探测器 3306、基准探测器 3308、测量混合器 3310、基准混合器 3312、调节电子器件 3314、3316、3318、3320、N 分频预分频器 3324 以及模数转换器 (ADC) 3322。频率基准例如可能是恒温控制晶体振荡器 (OCXO), 其将例如可能为 10MHz 的基准频率 f_{REF} 发送至合成器, 合成器产生两个电信号: 一个处于频率 f_{RF} 的信号, 两个处于频率 f_{LO} 的信号。信号 f_{RF} 行进至对应于图 3 中的光源 162 的光源 3102。处于频率 f_{LO} 的两个信号行进至测量混合器 3310 和基准混合器 3312。来自于图 3 中的光纤 168、169 的光分别出现于图 7 中的光纤 3232、3230, 并且分别进入基准通道和测量通道。基准探测器 3308 与测量探测器 3306 将光信号转换成电信号。这些信号分别由电子部件 3316、3314 调节, 并且分别被发送至混合器 3312、3310。混合器产生等于 $f_{LO} - f_{RF}$ 的绝对值的频率 f_{IF} 。信号 f_{RF} 可以具有例如为 2GHz 的相对高的频率, 而信号 f_{IF} 可以具有例如为 10kHz 的较低的频率。

[0047] 将基准频率 f_{REF} 发送至预分频器 3324, 预分频器 3324 将该频率除以整数值。例如, 10MHz 的频率可能被以 40 分配以获得 250kHz 的输出频率。在该示例中, 进入 ADC 3322 的 10kHz 信号将以 250kHz 的速率取样, 从而每周期产生 25 个样本。将来自于 ADC 3322 的信号发送至数据处理器 3400, 数据处理器 3400 例如可能是位于图 3 的 ADM 电子器件 164 中的一个或更多个数字信号处理器 (DSP) 单元。

[0048] 用于获取距离的方法是以针对基准通道和测量通道的 ADC 信号的相位计算为基础的。该方法在 Bridges 等人所拥有的美国专利 No. 7, 701, 559 (‘559) 中进行了详细的描述。该计算包括专利 ‘559 的等式 (1) - (8) 的使用。此外, 当 ADM 首先开始测量回射器时, 由合成器产生的频率改变若干次 (例如三次), 并且每种情况下都要计算可能的 ADM 距离。通过对比每个选定频率的可能的 ADM 距离, 消除了在 ADM 测量中的不定性。‘专利 ‘559 的等式 (1) - (8) 结合有关于专利 ‘559 的图 5 所描述的同步方法与专利 ‘559 所描述的卡尔曼滤波法, 使得 ADM 能够测量移动的目标。在其他实施方式中, 可以使用例如通过使用脉冲飞行时间而非相位差来获得绝对距离的测量的其他方法。

[0049] 返回光束 190 的穿过分束器 155 的那部分到达分束器 145, 分束器 145 将一部分光发送至射束扩展器 140, 将另一部分光发送至位置探测器组件 150。产生自激光跟踪仪 10 或 EO 系统 100 的光可以被认作第一射束, 从回射器 90 或 26 反射的那部分光作为第二射束。部分反射射束被发送至 EO 系统 100 的不同功能元件。例如, 第一部分可以被发送至诸如图 3 中的 ADM 160 的测距仪。第二部分可以被发送至位置探测器组件 150。在一些情况下, 可将第三部分发送至诸如可选的干涉仪 120 的其他功能单元。务必理解的是, 虽然在图 3 的示例中, 第二射束的第一部分和第二部分在分别从分束器 155 和 145 反射后被发送至测距

仪和位置探测器,但是光还可以是被传送而非反射至测距仪或位置探测器。

[0050] 图 6A-D 中示出了现有技术的位置探测器组件 150A - 150D 的四个示例。图 6A 描绘了最简单的实施方案,其中,位置探测器组件包括安装在电路板 152 上的位置传感器 151,电路板 152 从电子箱 350 获得电量并且将信号返回至电子箱 350,电子箱 350 可以反映在激光跟踪仪 10、辅助单元 50 或外部计算机 60 内的任意位置处的电子处理能力。图 6B 包括滤光器 154,该滤光器 154 能够阻止不希望的光波长到达位置传感器 151。还可以例如通过为分束器 145 或位置传感器 151 的表面涂覆适当的薄膜来阻挡不希望的光波长。图 6C 包括减少光束尺寸的透镜 153。图 6D 包括滤光器 154 和透镜 153 两者。

[0051] 图 6E 示出了根据本发明的实施方式的包括光调节器 149E 的位置探测器组件。光调节器包含透镜 153,还可以包含可选的波长滤波器 154。此外,其包括漫射器 156 和空间滤波器 157 中的至少一者。如上文所解释的,一种流行的回射器的类型是立方隅角回射器。一类立方隅角回射器是由三个镜制成的,每个镜均以直角接合其他两个镜。这三个镜在截交线处接合,该截交线可以具有有限厚度,光在该有限厚度内不能理想地反射回跟踪仪。该有限厚度的线在传播时发生衍射,使得当它们到达位置探测器之后,可能不会呈现为完全与在位置探测器处相同。而衍射光的图案一般将会背离完美的对称。因此,撞击位置探测器 151 的光可能具有例如在邻近衍射线处的光功率的下降或上升(热点)。由于来自于回射器的光的均匀性在回射器与回射器之间会有不同,还由于光在位置探测器上的分配可能因为回射器旋转或倾斜而变化,因此,包括漫射器 156 以提高撞击位置探测器 151 的光的平滑度是有利的。可以说,由于理想的位置探测器应当响应于矩心(centroid),并且理想的漫射器应当以点对称地散布,因此,不应当对由位置探测器给出的结果位置有影响。然而,在实践中,发现漫射器能够提高位置探测器组件的性能,可能是因为位置探测器 151 与透镜 153 中的非线性因素(不完整性)的影响。由玻璃制成的立方隅角回射器还可以在位置探测器 151 处产生不均匀的光点。光点在位置探测器处的变化相对于自六自由度目标中的立方隅角反射的光可以特别的突出,这可以从共同转让的美国专利申请——2012 年 2 月 10 日提交的 No. 13/370,339(‘339) 与 2012 年 2 月 29 日提交的 No. 13/407,983(‘983)——中更清晰地理解。在一实施方式中,漫射器 156 是全息漫射器。全息漫射器提供可控、越过指定的扩散角的单色光。在其他实施方式中,使用了诸如毛玻璃漫射器或“乳色玻璃”漫射器的其他类型的漫射器。

[0052] 位置探测器组件 150E 的空间滤波器 157 的用途为阻挡鬼射束,以防止其撞击位置探测器 151,其中,鬼射束可能是由例如来自于光学表面的不希望反射导致的。空间滤波器包括具有孔的板 157。通过将空间滤波器 157 放置在距透镜的距离大约等于透镜焦距处,当返回光 243E 靠近返回光其最窄处(位于射束的腰部)时返回光会穿过空间滤波器。以不同角度行进的射束撞击远离孔的空间滤波器,并且被阻挡而无法到达位置探测器 151,其中,射束以不同角度行进例如是由光学的反射导致的。图 6E 示出一个示例,其中,不希望的鬼射束 244E 自分束器 145 的表面反射,并且行进至空间滤波器 157,在空间滤波器 157 处被阻挡。在没有空间滤波器的情况下,鬼射束 244E 将会拦截位置探测器 151,从而致使位置探测器 151 上的射束 243E 的位置被不正确地确定。如果鬼射束位于相对于主光点较远的距离处,则即使是微弱的鬼射束也可以显著地改变位置探测器 151 上的质心的位置。

[0053] 本文所讨论的这类回射器——例如立方隅角回射器或猫眼回射器——具有对沿

平行于入射线的方向进入回射器的光线进行反射的特性。此外,入射线与反射线关于回射器的对称点对称地布置。例如,在开放式立方隅角回射器中,回射器的对称点是立方隅角的顶点。在玻璃立方隅角回射器中,对称点也是顶点,但是必须考虑这种情况下在玻璃-空气截面处的光的弯曲。在折射率为 2.0 的猫眼回射器中,对称点是球体的中心。在由对称地置于公共平面上的两个玻璃半球制成的猫眼回射器中,对称点是位于平面上并且处于每个半球的球心处的点。要点在于,对于通常与激光跟踪仪一起使用的回射器类型,由回射器返回至跟踪仪的光移位至相对于入射激光束的顶点的另一侧。

[0054] 图 3 中的回射器 90 的这一行为是激光跟踪仪跟踪回射器的基础。位置传感器具有位于其表面上的理想的折返点。该理想的折返点是这样的点,即,发送至回射器的对称点(例如,SMR 中的立方隅角回射器的顶点)的激光束在该点处将会返回。折返点往往靠近位置传感器的中心。如果激光束被发送至回射器的一侧,其将反射回另一侧并且从位置传感器的折返点出现。通过记录位置传感器上的返回光束的位置,激光跟踪仪 10 的控制系统能够引起马达朝向回射器的对称点移动光束。

[0055] 如果回射器以恒定速度相对于跟踪仪横向移动,则回射器处的光束将会在距离回射器的对称点的固定偏移距离处撞击回射器(在瞬变过程已经稳定之后)。激光跟踪仪根据从可控测量获得的比例因子以及根据从位置传感器上的光束至理想的折返点的距离对回射器处的该偏移距离做出校正。

[0056] 如上文所解释的,位置探测器执行两个重要功能——能够针对回射器的运动来跟踪和校正测量。位置探测器内的位置传感器可以是能够测量位置的任意类型的设备。例如,位置传感器可能是位置敏感探测器或光敏阵列。位置敏感探测器例如可能是横向效应探测器或象限探测器。光敏阵列例如可能是 CMOS 阵列或 CCD 阵列。

[0057] 在一实施方式中,不经分束器 145 反射的返回光穿过射束扩展器 140,从而变得更小。在另一实施方式中,位置探测器与测距仪的位置是相反的,使得由分束器 145 反射的光行进至测距仪,以及由分束器传送的光行进至位置探测器。

[0058] 光连续通过可选的 IFM、通过隔离器,然后进入可见光源 110。在该阶段,光功率应当足够小,以使其不会使可见光源 110 去稳定化。

[0059] 在一实施方式中,来自于可见光源 110 的光通过图 5 的射束发射器 170 发射。光纤发射器可以附接至光源 110 的输出或隔离器 115 的光纤输出。

[0060] 在一实施方式中,图 3 的光纤网络 166 是图 8B 的现有技术光纤网络 420B。此处,图 3 的光纤 184、186、168、169 对应于图 8B 的光纤 443、444、424、422。图 8B 的光纤网络与图 8A 的光纤网络相似,区别在于图 8B 的光纤网络具有单一光纤耦合器而非两个光纤耦合器。图 8B 相比于图 8A 的优点是简单;然而,图 8B 更可能具有进入光纤 422 与 424 的不希望的光学背反射。

[0061] 在一实施方式中,图 3 的光纤网络 166 是图 8C 的光纤网络 420C,在此,图 3 的光纤 184、186、168、169 对应于图 8C 的光纤 447、455、423、424。光纤网络 420C 包括第一光纤耦合器 445 和第二光纤耦合器 451。第一光纤耦合器 445 是具有两个输入端口和两个输出端口的 2×2 耦合器。该类型的耦合器往往通过如下方法制成,即将两个光纤芯紧靠彼此放置,然后在加热的同时拉延该光纤。通过这种方式,光纤之间的倏逝波耦合可以将理想的少量光分裂至邻近的光纤。第二光纤耦合器 451 是被称为循环器的类型。其具有三个端口,

每个端口均具有传送或接收光的能力,但只是沿指定的方向传送或接收。例如,光纤 448 上的光进入端口 453,并且如箭头所指示地朝向端口 454 传输。在端口 454 处,光可以传输至光纤 455。类似地,在端口 455 上行进的光可以进入端口 454,并且沿箭头的方向行进至端口 456,一些光可以在端口 456 处传输至光纤 424。如果只需要三个端口,那么循环器 451 可以经受比 2×2 耦合器更少的光功率的损失。另一方面,循环器 451 可能比 2×2 耦合器更昂贵,并且其可能经历偏振模色散,在一些情形下,偏振模色散会是疑难的。

[0062] 图 9 和 10 分别示出了现有技术激光跟踪仪 2100 的分解视图和横截面视图,该现有技术激光跟踪仪 2100 在 Bridges 等人所拥有的美国已公布专利申请 No. 2010/0128259 的图 2 和 3 中进行了描述。方位组件 2110 包括立柱外壳 2112、方位编码器组件 2120、上方位轴承 2114A 和下方位轴承 2114B、方位马达组件 2125、方位集电环组件 2130 以及方位电路板 2135。

[0063] 位编码器组件 2120 的用途是精确地测量支架 2142 相对于立柱外壳 2112 的旋转角度。方位编码器组件 2120 包括编码器圆盘 2121 和读取头组件 2122。编码器圆盘 2121 附接至支架的外壳 2142 的轴,读取头组件 2122 附接至立柱组件 2110。读取头组件 2122 包括电路板,一个或更多个读取头紧固于该电路板上。自读取头发送的激光在编码器圆盘 2121 上的细光栅线处反射。对由一个或更多个编码器读取头上的探测器拾取的反射光进行处理,以找到旋转的编码器圆盘相对于固定的读取头的角度。

[0064] 方位马达组件 2125 包括方位马达转子 2126 和方位马达定子 2127。方位马达转子包括直接附接至支架外壳 2142 的轴的永磁体。方位马达定子 2127 包括产生所述磁场的励磁绕组。该磁场与方位马达转子 2126 的磁体相互作用以产生所需的旋转运动。方位马达定子 2127 附接至立柱框架 2112。

[0065] 方位电路板 2135 表示通过诸如编码器和马达的方位部件提供电功能的一个或更多个电路板。方位集电环组件 2130 包括外部分 2131 和内部分 2132。在一实施方式中,导线束 2138 从辅助单元处理器 50 中出来。导线束 2138 可以将电能输送至跟踪仪或者将信号输送至跟踪仪以及从跟踪仪输出信号。导线束 2138 的导线中的一些可以被指引至电路板上的连接器。在图 10 所示示例中,导线沿方位电路板 2135、编码器读取头组件 2122 以及方位马达组件 2125 设置路线。其他导线设置路线通向集电环组件 2130 的内部分 2132。内部分 2132 附接至立柱组件 2110,并且因此保持静止。外部分 2131 附接至支架组件 2140,并且因此相对于内部分 2132 旋转。集电环组件 2130 被设计成在外部分 2131 相对于内部分 2132 旋转时允许低阻抗电接触。

[0066] 天顶组件 2140 包括支架外壳 2142、天顶编码器组件 2150、左天顶轴承 2144A 和右天顶轴承 2144B、天顶马达组件 2155、天顶集电环组件 2160 以及天顶电路板 2165。

[0067] 天顶编码器组件 2150 的用途是精确地测量负载框架 2172 相对于支架外壳 2142 的旋转角度。天顶编码器组件 2150 包括天顶编码器圆盘 2151 和天顶读取头组件 2152。编码器圆盘 2151 附接至负载外壳 2142,读取头组件 2152 附接至支架外壳 2142。读取头组件 2122 包括电路板,一个或更多个读取头紧固于该电路板上。自读取头发送的激光在编码器圆盘 2151 上的细光栅线处反射。对由一个或更多个编码器读取头上的探测器拾取的反射光进行处理,以找到旋转的编码器圆盘相对于固定的读取头的角度。

[0068] 天顶马达组件 2155 包括天顶马达转子 2156 和天顶马达定子 2157。天顶马达转子

2156 包括直接附接至负载框架 2172 的轴的永磁体。天顶马达定子 2157 包括产生所述磁场的励磁绕组。该磁场与转子磁体相互作用以产生所需的旋转运动。天顶马达定子 2157 附接至支架框架 2142。

[0069] 天顶电路板 2165 表示通过诸如编码器和马达的天顶部件提供电功能的一个或多个电路板。天顶集电环组件 2160 包括外部分 2161 和内部分 2162。导线束 2168 从方位外集电环 2131 中出来,并且可以输送电能或信号。导线束 2168 中的一些导线可以被指引至电路板上的连接器。在图 10 所示示例中,导线沿天顶电路板 2165、天顶马达组件 2150 以及编码器读取头组件 2152 设置路线。其他导线设置路线通向集电环组件 2160 的内部分 2162。内部分 2162 附接至支架框架 2142,因此只沿方位角旋转而不沿天顶角旋转。外部分 2161 附接至负载框架 2172,因此以天顶角和方位角旋转。集电环组件 2160 被设计成当外部分 2161 相对于内部分 2162 旋转时允许低阻抗电接触。负载组件 2170 包括主光学器件组件 2180 和副光学器件组件 2190。

[0070] 图 11 是描绘了尺寸测量电子处理系统 1500 的方块图。该电子处理系统 1500 包括激光跟踪仪电子处理系统 1510、外围元件 1582、1584、1586 的处理系统、计算机 1590 以及在以云状物表示的其它网络化部件 1600。示例性激光跟踪仪电子处理系统 1510 包括主处理器 1520、负载功能电子器件 1530、方位编码器电子器件 1540、天顶编码器电子器件 1550、显示器和用户界面 (UI) 电子器件 1560、可移除的存储硬件 1565、无线射频识别 (RFID) 电子器件以及天线 1572。负载功能电子器件 1530 包括多个子功能,这些子功能包括六自由度电子器件 1531、相机电子器件 1532、ADM 电子器件 1533、位置探测器 (PSD) 电子器件 1534 以及瞄准电子器件 1535。这些子功能中的大多数具有至少一个处理器单元,该处理器单元例如可以是数字信号处理器 (DSP) 或现场可编程门阵列 (FPGA)。电子器件单元 1530、1540 以及 1550 由于其在激光跟踪仪内的位置而如图所示出地分开。在实施方式中,负载功能 1530 位于图 9 和 10 的负载 2170 中,而方位编码器电子器件 1540 位于方位组件 2110 中,顶点编码器电子器件 1550 位于顶点组件 2140 中。

[0071] 多种类型的外围设备都是可能的,但在此示出了三个这种设备:温度传感器 1582、六自由度探头 1584 以及例如可以是智能电话的个人数字辅助 1586。激光跟踪仪可以通过多种方式与外围设备通信,包括通过天线 1572 的无线通信、借助于诸如相机的视觉系统、以及借助于读取激光跟踪仪相对于诸如六自由度探头 1584 的协助目标的距离和角度。外围设备可包括处理器。六自由度附件可包括六自由度探测系统、六自由度扫描器、六自由度投影仪、六自由度传感器以及六自由度指示器。这些六自由度设备中的处理器可结合激光跟踪仪中的处理设备以及外部计算机和云处理资源使用。通常,当使用术语激光跟踪仪处理器或测量设备处理器时,意味着包括可能的外部计算机和云支持。

[0072] 在一实施方式中,单独的通信总线从主处理器 1520 延伸至电子装置单元 1530、1540、1550、1560、1565 以及 1570 中的每者。每根通信线可具有例如三个串联线,包括数据线、时钟线以及框架线。框架线指示电子器件单元是否应注意时钟线。如果其指示应给予注意,则电子器件单元读取在每个时钟信号处的数据线的当前数值。时钟信号可对应于例如时钟脉冲的上升边缘。在一实施方式中,信息以信息包的形式通过数据线传输。在一实施方式中,每个信息包包括地址、数值、数据信息以及校验和。地址指示在电子器件单元内数据信息被指引的位置。该位置例如可对应于电子器件单元内的处理器子程序。数值指示

数据信息的长度。数据信息包括电子器件单元执行的数据或指令。校验和是用于使通过通信线传输的误差的几率最小化的数值。

[0073] 在一实施方式中,主处理器 1520 通过总线 1610 将信息包发送至负载功能电子器件 1530,通过总线 1611 发送至方位编码器电子装置 1540,通过总线 1612 发送至天顶编码器电子器件 1550,通过总线 1613 发送至显示器和 UI 电子器件 1560,通过总线 1614 发送至可移除的存储硬件 1565,并且通过总线 1616 发送至射频识别和无线电子器件 1570。

[0074] 在一实施方式中,主处理器 1520 还同时将同步(同步的)脉冲通过同步总线 1630 发送至电子器件单元中的每者。同步脉冲提供了通过激光跟踪仪的测量功能收集同步数值的方法。例如,一接收到同步脉冲,方位编码器电子装置 1540 和天顶电子器件 1550 就锁存住其编码器数值。类似地,负载功能电子器件 1530 锁存通过包含在负载内的电子装置收集的数据。当给出同步脉冲时,六自由度、ADM 以及位置探测器全部锁存数据。在大多数情况下,相机和倾斜计以慢于同步脉冲速率的速率收集数据,但可以将数据锁存在多个同步脉冲周期中。

[0075] 方位编码器电子装置 1540 和天顶编码器电子器件 1550 彼此分开,并且通过图 9 和 10 中示出的集电环 2130、2160 与负载电子器件 1530 分开。这是总线线路 1610、1611 以及 1612 在图 11 中被描绘为分开的总线线路的原因。

[0076] 激光跟踪仪电子处理系统 1510 可与外部计算机 1590 通信,或者其可提供在激光跟踪仪内的计算、显示以及 UI 功能。激光跟踪仪通过例如可以是以太网线路或无线连接的通信链路 1606 与计算机 1590 通信。激光跟踪仪也可通过通信链路 1602 与由云状物代表的其它元件 1600 通信,该通信链路 1602 可包括诸如以太网电缆的一个或更多个电缆以及一个或更多个无线连接。元件 1600 的示例是另一三维测试仪器——例如可由激光跟踪仪重新定位的关节臂 CMM。计算机 1590 与元件 1600 之间的通信链路 1604 可以有线的(例如以太网)或无线。坐于远程计算机 1590 的操作者可通过以太网或无线线路连接至由云状物 1600 代表的因特网,因特网相应地通过以太网或无线线路连接至主处理器 1520。以此方式,用户可控制远程激光跟踪仪的活动。

[0077] 图 12 示出了一种使用镜 1252 对来自于跟踪仪的光束 1251、1255 调向的激光跟踪仪 1250 的实施方式。组件 1256 可以包括各种光部件、电部件和机械部件,所述各种部件设计用于产生一束或更多束光束,控制光束的方向以能够跟踪回射器目标,以及测量相对于目标的距离。此外,激光跟踪仪 1250 内的功能包括使用马达以使轴杆 1260、1258 分别围绕第一轴线 1253 和第二轴线 1254 转动,以及使用角度编码器测量围绕第一轴线和第二轴线旋转的角度。图 12 的激光跟踪仪 1250 类似于图 9 和图 10 所描述的激光跟踪仪,其中具有万向节点 1261,机械轴线 1253 和 1254 在该万向节点 1261 处基本上相交。此外,在这两种类型的跟踪仪中,激光束穿过或至少基本上通过万向节点。

[0078] 使用具有万向节点但构造有些不同的其他机械装置是有可能的。例如,以下情况是可能的:沿着等同于 1254 的轴线在水平方向上发射光束,以及使镜相对于光束成 45 度角,以便使镜沿着与 1255 中的射束相同的方向对光进行反射。对于本申请,通过对准每条轴线的轴杆的旋转可以使围绕两条轴线中的每者的成为可能,其中,两条轴杆中的每者均安装在一对间隔的轴承上。

[0079] 在上述讨论中陈述过机械轴基本上相交于被称为万向节点的一点处。该两条机械

轴不一定正好相交于一点；而是两条机械轴之间有些微的间隔，该间隔位于两条轴线最接近的位置处，其被称为轴线偏移。为了校正由于轴线偏移引起的些微的误差，可以储存补偿参数以用于轴线偏移。然后，外部计算机或跟踪仪处理器中的软件可以校正由跟踪仪收集的数据，以移除由轴线偏移引起的误差。事实上，跟踪仪创建最佳跟踪仪的模型，在该模型中，两条轴线相交于理想的万向节点处。

[0080] 在上述讨论中陈述过来自于跟踪仪的光束穿过或至少基本上通过万向节点。在实践中，光束可以相对于万向节点些微地偏移。在一实施方式中，该偏移通过使用两个补偿参数 TX 和 TY 来消除。在理想的跟踪仪中，处于平面中的激光束包含垂直（方位）轴线，并且垂直于水平（天顶）轴线。在真实的跟踪仪中，激光束可以相对于该平面略微地成角度。该偏移可以通过两个补偿参数 RX 和 RY 消除。许多其他补偿参数也是可能的，并且可以使用不同的名称来描述这些参数。例如，可以用表示名义上垂直的轴线相对于九十度的偏差的轴线的非垂直度 (AXNS) 参数。可以是与镜相关的参数，例如，镜表面相对于水平轴线的位置。与激光跟踪仪相关的参数可以包括那些在 Muralikrishnan 等人的论文“ASME B89. 4. 19 Performance Evaluation Tests and Geometric Misalignments in Laser Trackers, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 114, 21-35 (2009)”中描述的那些参数。

[0081] 图 13 是根据一实施方式的激光跟踪仪内的选定元件 1300 的立体图。方位 / 基座组件 1310 包括方位轴杆 1312、第一轴承 1314A、第二轴承 1314B、角度编码器 1316 以及基座框架 1318。基座框架 1318 表示激光跟踪仪的相对于跟踪仪所在的环境固定的那部分。例如，在实践中，激光跟踪仪可以安装在仪器架上，同时基座框架 1318 相对于仪器架固定。轴杆 1312 围绕方位轴线 1350 作圆周运动 1351。角度编码器 1316 包括圆盘 1321 和读取头组件 1322。圆盘 1321 包括标记，在一实施方式中，该标记包括被远离圆盘中心指引的等间距的线。读取头组件 1322 包括一个或更多个光源。该光源或者被圆盘 1321 的表面反射，或者被传送通过圆盘。读取头组件还包括感测光在何时穿过了圆盘上的标记的一个或更多个光学探测器。在一实施方式中，圆盘安装在轴杆 1312 上，并且读取头组件安装在方位 / 基座组件的固定部分上。换言之，读取头组件附接为相对于基座框架 1318 静止。在替代性实施方式中，圆盘是固定的，读取头组件附接至轴杆。通过计算已穿过读取头组件 1322 上的一个或更多个光学探测器的线的数目，以及通过使用插补电子器件，编码器和相关的电子器件可以以相对高的精度确定轴杆 1312 的旋转角度。电信号从读取头组件 1322 通过电线 1324 行进至电子器件板 1325，电子器件板 1325 处理信号以确定轴杆 1312 的旋转角度。电子器件板 1325 可以包括如图 11 所示的处理器 1540。

[0082] 在一实施方式中，方位轴承 1314A、1314B 是角接触球轴承。该轴承可以具有作为单独的元件的内圈和外圈。在一实施方式中，每个轴承均标记有径向跳动高点。轴承 1314A、1314B 是旋转的，使得径向跳动高点处于方位轴杆 1312 上的相同角位置处。在一实施方式中，方位 / 基座组件构造成能够将可控预紧力施加至轴承 1314A、1314B。

[0083] 天顶 / 支架组件 1330 包括天顶轴杆 1332A 和 1332B、第一轴承 1334A、第二轴承 1334B、角度编码器 1336 以及支架框架 (yoke frame) 1338。支架框架 1338 表示随着方位轴杆 1312 一起旋转的激光跟踪仪的那部分。如上文所讨论的，支架框架是天顶托架组件的一部分。轴杆 1332A、1332B 以围绕方位轴线 1354 的圆周运动 1353 旋转。角度编码器 1336 包括圆盘 1341 和读取头组件 1342。圆盘 1341 包括标记，在一实施方式中，该标记包括被远

离圆盘中心指引的等间距的线。读取头组件 1342 包括一个或更多个光源。该光源或者被圆盘 1341 的表面反射,或者被传送通过圆盘。读取头组件还包括感测光在何时穿过了圆盘上的标记的一个或更多个光学探测器。在一实施方式中,圆盘安装在轴杆 1342 上,读取头组件安装在天顶组件的与方位轴杆 1312 一起旋转的部分上。换言之,读取头组件 1342 相对于支架框架 1338 静止。在替代性实施方式中,圆盘是固定的,读取头组件附接至天顶轴杆。通过计算已穿过读取头组件 1342 上的一个或更多个光学探测器的线的数目,以及通过使用插补电子器件,编码器和相关的电子器件可以以相对高的精度确定轴杆 1332 的旋转角度。电信号从读取头组件 1342 通过电线 1326 行进至电子器件板 1325,电子器件板 1325 处理信号以确定轴杆 1332 的旋转角度。电子器件板 1325 可以包括如图 11 所示的处理器 1550。天顶 / 支架组件 1330 可以包括产生光束 1360 的一个或更多个光源(未图示)。如上文所讨论的,光束 1360 可以基本上(真实地)穿过万向节点 1362。轴杆可以包含两个部分(1332A、1332B),该两个部分是共线的,另外,该两个部分在中心处由负载结构 1364 支承,该负载结构 1364 的一部分示于图 13 中。负载结构可以支承光源、诸如透镜和分束器的光学元件、位置探测器、控制系统、测距仪、电子器件以及诸如测斜仪和温度传感器的附属部件。替代性地,激光可以通过位于负载外侧的光纤或通过其他器件按路线通向负载区。

[0084] 在一实施方式中,天顶轴承 1334A、1334B 是角接触球轴承。该轴承可以具有作为单独的元件的内圈和外圈。在一实施方式中,轴承 1334A、1334B 是旋转的,使得径向跳动高点处于方位轴杆 1312 上的相同角位置处,以使轴承的径向跳动引起的角摆动最小化。在一实施方式中,方位 / 基座组件构造成能够将可控预紧力施加至轴承 1334A、1334B。

[0085] 图 14 是根据一实施方式的激光跟踪仪内的选定元件 1400 的立体图。图 14 的激光跟踪仪类似于图 13 的激光跟踪仪,除了图 14 的激光跟踪仪通过用镜 1462 对光束进行反射来部分地引导光束,而图 13 的激光跟踪仪直接将射束指引至负载结构 1364 的外部。方位 / 基座组件 1410 包括方位轴杆 1412、第一轴承 1414A、第二轴承 1414B、角度编码器 1416 以及基座框架 1418。基座框架 1418 表示激光跟踪仪的相对于跟踪仪所在的环境固定的那部分。例如,在实践中,激光跟踪仪可以安装在仪器架上,同时基座框架 1418 相对于仪器架固定。轴杆 1412 围绕方位轴线 1450 作圆周运动 1451。角度编码器 1416 包括圆盘 1421 和读取头组件 1422。圆盘 1421 包括标记,在一实施方式中,该标记包括被远离圆盘中心指引的等间距的线。读取头组件 1422 包括一个或更多个光源。该光源或者被圆盘 1421 的表面反射,或者被传送通过圆盘。读取头组件还包括感测光在何时穿过了圆盘上的标记的一个或更多个光学探测器。在一实施方式中,圆盘安装在轴杆 1412 上,以及读取头组件安装在方位 / 基座组件的固定部分上。换言之,读取头组件相对于基座框架 1418 静止。在替代性实施方式中,圆盘是固定的,读取头组件附接至轴杆。通过计算已穿过读取头组件 1422 上的一个或更多个光学探测器的线的数目,以及通过使用插补电子器件,编码器和相关的电子器件可以以相对高的精度确定轴杆 1412 的旋转角度。电信号从读取头组件 1422 通过电线 1424 行进至电子器件板 1425,电子器件板 1425 处理信号以确定轴杆 1412 的旋转角度。电子器件板 1425 可以包括如图 11 所示的处理器 1540。

[0086] 在一实施方式中,方位轴承 1414A、1414B 是角接触球轴承。该轴承可以具有作为单独的元件的内圈和外圈。在一实施方式中,轴承 1414A、1414B 是旋转的,使得径向跳动高点处于方位轴杆 1412 上的相同角位置处,以使轴承的径向跳动引起的角摆动最小化。在一

实施方式中,方位/基座组件构造成能够将可控预紧力施加至轴承 1414A、1414B。

[0087] 天顶/支架组件 1430 包括天顶轴杆 1432A 和 1432B、第一轴承 1434A、第二轴承 1434B、角度编码器 1436 以及支架框架 1438。支架框架 1438 表示激光跟踪仪的随着方位轴杆 1412 一起旋转的那部分。如上文所讨论的,支架框架是天顶托架组件的一部分。轴杆 1432A、1432B 以围绕方位轴线 1454 的圆周运动 1453 旋转。角度编码器 1436 包括圆盘 1441 和读取头组件 1442。圆盘 1441 包括标记,在一实施方式中,该标记包括被远离圆盘中心指引的等间距的线。读取头组件 1442 包括一个或更多个光源。该光源或者被圆盘 1441 的表面反射,或者被传送通过圆盘。读取头组件还包括感测光在何时穿过了圆盘上的标记的一个或更多个光学探测器。在一实施方式中,圆盘安装在天顶轴杆 1442 上,读取头组件安装在天顶组件的与方位轴杆 1412 一起旋转的部分上。换言之,读取头组件 1442 附接成相对于支架框架 1438 静止。在替代性实施方式中,圆盘是固定的,读取头组件附接至天顶轴杆。通过计算已穿过读取头组件 1442 上的一个或更多个光学探测器的线的数目,以及通过使用插补电子器件,编码器和相关的电子器件可以以相对高的精度确定轴杆 1432 的旋转角度。电信号从读取头组件 1442 通过电线 1426 行进至电子器件板 1425,电子器件板 1425 处理信号以确定轴杆 1432 的旋转角度。电子器件板 1425 可以包括如图 11 所示的处理器 1550。方位/基座组件 1410 可以包括产生光束 1460 的一个或更多个光源(未图示),该光束 1460 被镜 1464 反射。如上文所说明的,光束镜 1461 可以在万向节点 1462 处反射。轴杆可以包含两个部分(1432A、1432B),这两个部分是共线的,并且支承镜 1464。光源、光学器件以及电子器件可以存在于中空轴杆 1412 内,或由分束器和镜反射,以产生射束 1460 以及处理返回光。光学器件和电子器件还可以包括透镜、位置探测器、控制系统、测距仪、电子器件以及诸如测斜仪和温度传感器的附属部件。

[0088] 在一实施方式中,天顶轴承 1434A、1434B 是角接触球轴承。该轴承可以具有作为单独的元件的内圈和外圈。在一实施方式中,每个轴承均标记有径向跳动高点。轴承 1434A、1434B 是旋转的,使得径向跳动高点处于方位轴杆 1412 上的相同角位置处。在一实施方式中,方位/基座组件构造成能够将可控预紧力施加至轴承 1434A、1434B。

[0089] 图 15A 和 15B 是现有技术装置 3500 的立体图,该现有技术装置 3500 可以附接至激光跟踪仪以测量其所附接至的激光跟踪仪的轴承误差。该装置包括旋转组件 3510 以及固定组件 3540。旋转组件 3510 包括第一轴部 3512、第二轴部 3513、第一球体部分 3514 和第二球体部分 3516。第一轴部具有附接至旋转结构的表面 3511。在一实施方式中,表面 3511 附接至传递元件(未图示),该传递元件继而附接至测试下的旋转结构。在一实施方式中,球体被打磨至形状误差为 50 纳米或更少。第一球体部分 3514 具有第一大圆(equator)3515,该第一大圆 3515 是该球体的大的圆圈,并且被校准为垂直于第一和第二轴部。第二球体部分 3516 具有第一大圆 3517,该第一大圆 3517 是该球体的大的圆圈,并且被校准为垂直于第一和第二轴部。固定组件 3540 包括框架 3542 和刚性地固定至框架 3542 的多个电容传感器 3544、3545、3546、3547、3548。电连接 3534、3535、3536、3537、3538 分别从传感器 3544、3545、3546、3547、3548 行进至用于处理的电路(未图示)。在一实施方式中,电容传感器 3544、3545 被校准为在第一大圆的水平面处垂直于第一球体部分。略微地远离球体移动电容传感器 3544、3545,以防止其在旋转过程中与传感器相碰撞。电容传感器 3514 相对于电容传感器 3515 转动九十度。固定组件 3540 附接至非旋转结构。在一实施方式中,框架 3542

附接至保持旋转物体（主轴或轴杆）的固定结构。

[0090] 在一实施方式中，电容传感器 3546、3547 被校准为在第一大圆 3517 的水平面处垂直于第二球体部分 3516。略微地远离球体移动电容传感器 3546、3547，以防止其在旋转过程中与传感器相碰撞。电容传感器 3546 相对于电容传感器 3547 转动九十度。在一实施方式中，电容传感器 3548 被校准为沿着第二球体部分 3516 与第二轴部 3512 的轴。在替代性实施方式中，电容传感器 3548 不包括在装置 3500 中。在其他实施方式中，电容传感器对准一个或更多个圆柱形工件，而非球形工件 3514、3516。

[0091] 图 15B 描绘了旋转轴线 z 和旋转角度 θ 。角度 θ 是相对于与 z 轴线垂直的轴线 x 取得的。第一球体部分 3514 具有第一基准框架 3570，第一基准框架 3570 包括位于第一球体部分的球形表面的中心处的原点 3571。第一基准框架 3570 具有与第一和第二轴部相对准并且与轴线 z 相对准的轴线 z_1 。轴线 x_1 与电容传感器 3544 相对准，轴线 y_1 与电容传感器 3545 相对准。轴线 x_1 、 y_1 和 z_1 相互垂直。

[0092] 第二球体部分 3516 具有第二基准框架 3580，第二基准框架 3580 包括位于第二球体部分的球形表面的中心处的原点 3581。第二基准框架 3580 具有与第一和第二轴部相对准并且与轴线 z 相对准的轴线 z_1 。轴线 x_2 与电容传感器 3546 相对准，轴线 y_2 与电容传感器 3547 相对准。轴线 x_2 、 y_2 和 z_2 相互垂直。电容传感器 3548 在靠近第二球体部分 3516 的底部处与 z 轴线相对准。第一原点 3571 与第二原点 3581 之间沿 z 方向的距离为 L 。

[0093] 针对每个角度 θ ，装置 3500 为五个电容传感器 3544、3545、3546、3547、3548 中的每者测量五个位移。这些位移分别为 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 和 z_2 。从这些位移中，可以获得由轴承误差引起的倾斜角度 α_x 和 α_y ：

$$[0094] \quad \alpha_x = (\Delta x_1 - \Delta x_2)/L, \quad (1)$$

$$[0095] \quad \alpha_y = (\Delta y_1 - \Delta y_2)/L. \quad (2)$$

[0096] 在过去，轴承校准技术被最多地用于测量精密加工机床的高速主轴，特别是金刚石车削机床，但也包括各种车床、铣床、磨床等。往往首先执行轴承校准，以确保机床满足其技术规格，第二是找到机床设计的方式，以提高机床性能。由于机床不能在执行机械加工操作的同时进行调整，往往不可能在进行机械加工的同时校正机床的行为。

[0097] 对于质量轴承的任意 360 度旋转，通常情况是轴承误差几乎完全地作为旋转角度 θ 的函数重复。换言之，如果轴承在相同的 360 度的窗上前后移动，那么在任意给定角度 θ 的情况下，由电容传感器记录的误差的图案几乎相同。然而，大多数情况下的轴承误差在不同的 360 度周期中是不重复的。这种行为在 Eric R. Marsh 在美国精密工程协会的年会上作出的关于“精密主轴计量”（“Precision Spindle Metrology”）的专题报告中进行了解释，该专题报告于 2013 年 5 月 2 日访问自网址 <http://www.scribd.com/doc/132020851/Spindle-Tutorial>。现有技术图 16A、16B、16C 和 17 改编自该论文。

[0098] 图 16A 是由车床主轴中的轴承误差的测量获得的数据 3602 的绘图 3600。该绘图示出了自单一电容传感器获得的数据，该单一电容传感器的布置类似于图 15A 和 15B 的布置，但是其具有单一球体而非五个球体。在轴的 32 圈中观察到的最大值被看做大致处于 $\pm 600\text{nm}$ 的范围内。从该绘图中可以迅速得出的观察结果是轴的 32 圈中的每一圈的测得数值都是不同的。

[0099] 图 16B 是针对图 16A 中的方框 3604 内的三个周期的数据 3612 的绘图 3610。正弦

曲线 3614 与数据 3612 相对应,并且正弦曲线的平均值被取为线 3615。正弦曲线主要来自于很难将第一球体部分 3514 和第二球体部分 3516 理想地定位在旋转轴上的中心处。由于一般不可能将这些球体理想地定位在旋转轴上的中心处,因此在处理收集到的数据的过程中,基波正弦分量被移除。图 16C 是通过从测得数据 3612 中减去正弦曲线 3614 的数值而获得的轴承误差 3622 的绘图 3620。从收集到的数据中减去基波正弦分量只在电容传感器 3544、3545、3546、3547 上执行,而不是在电容传感器 3548 上执行,其中,电容传感器 3544、3545、3546、3547 测量径向(从一侧至另一侧)位移,电容传感器 3548 测量轴向位移。对于轴向位移,变化是有意义的,不能从收集到的数据中减去。

[0100] 一般而言,在旋转 360 度之后,轴承不返回至它们的初始位移。这一影响示于图 17 中,其示出了包含两个轴承的主轴的四次连续旋转。第一圈开始于最右侧方向的 0 度处,其中,误差为 0 与 -1 微米之间。其逆时针旋转,在 360 度之后,具有的误差为 0 与 +1 微米之间。第二圈的在零度的角度处的误差与第一圈在 360 度处的误差相同。通过研究这四圈,可以发现这四圈中没有具有相同误差的两圈。这些结果打破了经常持有的概念,即,轴承误差图案每 720 度重复一次。

[0101] 图 18 是选定的激光跟踪仪部件的立体图,该激光跟踪仪部件设置用于接纳如上文参照图 15A 和 15B 所描述的轴承测量装置 3500A 和 3500B。轴承测量装置 3500A、3500B 附接至电路 3590。装置 3500A 构造成附接至方位/基座组件 1310。示于图 15A 中的第一轴部 3512 构造成附接至示于图 13 中的方位轴杆 1312。箭头 1842 指示附接位置。可以添加转接器元件(未图示),以将第一轴部 3512 接合至方位轴杆 1312。框架 3542 接合至基座框架 1318,如箭头 1844、1846 所示。

[0102] 装置 3500B 可以是单独的轴承测量装置,或者其可以是在不同时间附接的用于执行轴承测量的装置 3500A。替代性地,可以进行测量关于单一轴线而关于非两条轴线的轴承误差的过程。箭头 1832、1834 和 1836 表示附接位置。

[0103] 轴承误差在任意 360 度的间隔之间一般是非常可重复的。然而,在不同的 360 度间隔之间可能会有显著的变化。为了基本上消除轴承误差,以下是有利的:将轴杆 1312、1332A、1332B 的旋转范围限制于针对该角度区域已经取得轴承校准数据那些角度区域中,以及在跟踪仪的操作过程中保持对轴杆的旋转角度的跟踪。即使是在跟踪仪电源关闭时也应当执行当前的 360 度的旋转间隔。在一实施方式中,这可以通过将非易失性旋转监视器与每条轴线相关联来实现。方位旋转监视器 1810 包括方位轴杆附件 1812 和固定框架传感器 1814。传感器每次经过该附件时,均会产生指示运动方向的信号。电子计数器保持对旋转次数的跟踪。许多不同的物理量可以通过传感器 1814 测量,这些物理量例如是电容、电感、磁性和光。如果旋转是在该范围(已经在其中取得了轴承校准数据的范围)之外,则会给予使用者报警信息。天顶旋转监视器 1820 包括天顶轴杆附件 1822 和支架框架传感器 1824。其以类似于方位旋转监视器的方式操作。电信号从传感器经过连接件 1816、1826 发送至用于处理的电路板 1325。电路板 1325 可以包括电池,以提供监视器的非易失性操作。

[0104] 可以使用其他设备来保持对轴杆的当前 360(度)范围的跟踪。例如,可以使用弹簧来提供与每个轴杆的旋转次数正相关的张力的可测量的量。还可以使用止挡部来将旋转的量控制于有限的范围。

[0105] 诸如角度编码器的一些角度测量设备被设计用于在 0 至 360 度之间测量。为了

保持对总的旋转角度的跟踪,通常会提到展开角度 (unwrapped angle)。例如,落在 0 度至比如 -10 度之间的角度具有读取为 (例如,由角度编码器显示) 350 度的包角 (wrapped angular),而展开值则为 -10 度。类似地,超出 360 度 10 度的角度则将具有显示为 10 度的包角以及 370 度的展开值。

[0106] 诸如 1810 的旋转监视器是双向计数器,这意味着其保持对正向计数和反向计数的数量的跟踪。完成五次正向旋转和两次反向旋转的轴杆则完成了 $5 - 2 = 3$ 次正向旋转。旋转的 (净) 数量可以与由诸如角度编码器的角度测量设备测得的 0 度与 360 度之间的角度相结合,以获得展开角度: 展开角度 = 包角 + (净旋转次数) (360), 其中,应当理解的是净旋转次数可以是正的或负的。

[0107] 图 19 是选定的激光跟踪仪部件的立体图,该激光跟踪仪部件设置用于接纳如上文参照图 15A 和 15B 所描述的轴承测量装置 3500A 和 3500B。轴承测量装置 3500A、3500B 附接至电路 3590。装置 3500A 构造成附接至方位 / 基座组件 1410。示于图 15A 中的第一轴部 3512 构造成附接至示于图 14 中的方位轴杆 1412。箭头 1942 指示附接位置。可以添加转接器元件 (未图示), 以将第一轴部 3512 接合至方位轴杆 1412。框架 3542 接合至基座框架 1418, 如箭头 1944、1946 所示。

[0108] 装置 3500B 可以是单独的轴承测量装置,或者其可以是在不同时间附接的用于执行轴承测量的装置 3500A。替代性地,可以进行测量关于单一轴线而非关于两条轴线的轴承误差的过程。箭头 1932、1934 和 1936 表示附接位置。

[0109] 轴承误差在任意 360 度的间隔之间一般是非常可重复的。然而,在不同的 360 度间隔之间可能会有显著的变化。为了更加全面地消除轴承误差,以下是有利的: 将轴杆 1412、1432A、1432B 的旋转范围限制于针对该角度区域已经取得轴承校准数据那些角度区域中,以及在跟踪仪的操作过程中保持对轴杆的旋转角度的跟踪。即使是在跟踪仪电源关闭时也应保持对当前的 360 的旋转间隔的跟踪。在一实施方式中,这可以通过将非易失性旋转监视器与每条轴线相关联来实现。方位旋转监视器 1910 包括方位轴杆附件 1912 和固定框架传感器 1914。传感器每次经过该附件时,均会产生指示运动方向的信号。电子计数器保持对旋转次数的跟踪。许多不同的物理量可以通过传感器 1914 测量,这些物理量例如是电容、电感、磁性和光。如果旋转是在该范围 (已经在其中取得了轴承校准数据的范围) 之外,则会给予使用者报警信息。天顶旋转监视器 1920 包括天顶轴杆附件 1922 和支架框架传感器 1924。其以类似于方位旋转监视器的方式操作。电信号从传感器经过连接件 1916、1926 发送至用于处理的电路板 1425。电路板 1425 可以包括电池,以提供监视器的非易失性操作。

[0110] 可以使用其他设备来保持对轴杆的当前 360 (度) 范围的跟踪。例如,可以使用弹簧来提供与每个轴杆的旋转次数正相关的张力的可测量的量。还可以使用止挡部来将旋转的量控制于有限的范围。

[0111] 在一实施方式中,方位轴线和天顶轴线通过激光跟踪仪内的马达旋转。例如,马达可以是包括转子 2126 和定子 2127 的方位马达和包括转子 2156 和定子 2157 的天顶马达,如图 9 和 10 所示。在一实施方式中,旋转角度是通过角度编码器确定的,该角度编码器例如是如图 13 和 14 所示的方位角度编码器 1316、1416 以及天顶角度编码器 1336、1436。在一实施方式中,关于每个读取头的的数据记录在每个角度编码器中。如上文所讨论的,可以同

时或按顺序执行关于方位轴线和天顶轴线的轴承测量。在一些情况下,该数据可以是以后处理的原始读取头数据。同时,数据由一个或更多个轴承测量系统收集。

[0112] 轴承误差可以储存为可以用于再现误差值的图像或等式。为避免混淆,在下文中,将术语轴承误差称作径向跳动误差。这可以帮助消除与跟个别轴承相关联的误差的混淆,跟个别轴承相关联的误差通常不是从通过使用上文所述的方法收集的测量结果中得知。应当理解的是,本文所使用的术语径向跳动是指由轴承产生的误差的一般范畴,而不是指“总指示径向跳动”,“总指示径向跳动”是用于反映可以观察到的误差值的总范围。收集到的径向跳动值可以由包含在跟踪仪内的处理器使用,或者可以由外部计算机使用。示于图 11 中的任意处理元件本质上都可以用在包含轴承的径向跳动的计算中。

[0113] 轴承的径向跳动可以通过两种主要方式使用:第一,校正激光跟踪仪的基准框架,从而提高跟踪仪的测量精度;第二,提高角度编码器的读数精度。为理解轴承的径向跳动的这些用途中的第一种,要考虑当方位轴承不完美时,来自于跟踪仪的光束会发生什么。假设下轴承为理想的圆形,并且没有轴承误差。假设上轴承具有 2 微米的最大径向跳动误差,使得当来自于跟踪仪的光束指向零度(在跟踪仪的基准框架中)的方位角时,方位轴杆的倾斜比当方位角倾斜 180 度时向前远出 2 微米。进一步假设方位轴线上的轴承之间的距离为 0.5 米。这意味着相比于在射束指向朝后的方向的情况下的轴线的倾斜量,在射束指向朝前的方向的情况下的轴线的倾斜量为 $2 \text{ 微米} / 0.5 \text{ 米} = 4 \text{ 微弧度}$ 。估计激光跟踪仪的角精度的常见方法是执行被称为双面测试(two-face test)的步骤。双面测试的执行是通过首先在前视模式下将激光跟踪仪指向位于特定方向上的回射器。该前视模式是由跟踪仪的正常操作模式限定的。然后,通过如下步骤将跟踪仪放置于后视模式中:首先使跟踪仪的方位旋转 180 度,然后调整跟踪仪的天顶角,使之向后指向目标。回射器的横向(一侧至另一侧)坐标的差是反映跟踪仪测量中的误差的距离。该误差被称作双面误差。双面误差被认为是跟踪仪误差的敏感测量。假设在这种情况下天顶轴承与角度测量系统是完美的。进一步假设该测量是在距离为 6 米处进行的。双面误差为这一距离 $6 \text{ 米} \times 4 \text{ 微弧度} = 24 \text{ 微米}$ 。如果校正了轴承的径向跳动,那么将能够基本上消除这一 24 微米的误差。在该情况下应注意的是,该误差被发现处于垂直方向上,这通常与激光束的天顶运动相关联。换言之,表面上的误差可能是由天顶编码器的测量中的误差引擎盖的,而不是由方位轴承中的误差引起的。

[0114] 作为类似影响的另一示例,考虑如下情况:其中,在天顶轴线上的轴承中存在误差。考虑这一情况:其中,在前视模式下,光束以 45 度的天顶角以及零度的方位角向上指。然后,在后视模式下,方位角旋转至 180 度,而天顶角旋转至 -45 度。假设在天顶轴承中存在径向跳动误差,使得在前视模式下,左轴承以 +45 度的天顶角向上推动轴杆。轴杆将向下指向右侧,激光束将指向右侧(假设方位轴承是完美的)。在后视模式中,轴承将沿方位角旋转 180 度,然后反转天顶角。轴杆将向下指向左侧,来自于跟踪仪的光束将指向右侧。在该情况下,双面误差主要沿着水平方向。当在所述情况下时,这样的误差可能被错误地认为是出故障的方位角度编码器的结果。

[0115] 若干数学方法可以用于校正由光束的倾斜引起的误差,其中,光束的倾斜是方位轴杆与天顶轴杆的倾斜的结果。可以理解的是,可能使用的这些方法中的任意一种对应本领域的那些普通技术人员而言都是熟知的。可以使用的一种方法是首先消除方位轴线的倾

斜角度。可以使用等式 (1) 和 (2)。三个坐标 x 、 y 和 z 可以用于消除沿天顶轴线与方位轴线的轴承的径向跳动。例如,用于消除沿方位轴线的轴承误差的坐标可以是在随方位轴线旋转的基准框架中的 x 方向和 z 方向上。用于消除沿天顶轴线的轴承误差的坐标可以是在随支架(方位托架)轴旋转的基准框架中的 y 方向和 z 方向上。给定轴承误差的情况下,可以使用旋转矩阵来确定关于特定的方位角和天顶角的光束 1360、1461 的总体倾斜,其中,能够取得相对于轴承误差为零的理想射束的倾斜。通过使用标准 4×4 变换矩阵可以计算由轴承的径向跳动引起的光束的偏移量,在该领域中众所周知的是,使用标准 4×4 变换矩阵能够消除旋转和平移的影响。方位变换矩阵与天顶变换矩阵可以相乘,以获得系统变换矩阵。可以执行进一步的计算以消除诸如轴线偏移、轴线不垂直度以及如上文所讨论的其他参数的影响。

[0116] 轴承径向跳动的数据的第二种用途是校正角度编码器的读数中的误差。首先考虑如下情况:完美的编码器圆盘放置在轴线上,以及完美的读取头组件放置在相对于圆盘的旋转固定的框架上。如果不存在轴承的径向跳动,角度编码器的读数将是完美的。接下来,假设存在一些轴承的径向跳动。在这种情况下,编码器圆盘将相对于读取头移动。在具有单一读取头的系统读取头组件中,每当编码器圆盘沿垂直于读取头的位置处的线的方向移位时,将会观察到误差。如果多个读取头关于旋转轴对称地放置时,能够减少但不能大致消除由圆盘的运动引起的误差。通过获知轴承的径向跳动值,可以对编码器的读数进行校正以消除这些误差。

[0117] 如果允许轴杆旋转至任意角度(不限于特定的 360 度区域),则只可以校正轴承的径向跳动的同步的部分。在许多情况下,异步径向跳动大于(在一些情况下是远远大于)同步径向跳动,并且因此,确定关于方位和天顶轴线的 360 度旋转区域是可取的。

[0118] 本文所描述的发明的若干应用是有益的。在第一应用中,与采用其他方法相比,跟踪仪用于实现更高精度的三维测量。这些测量是以测距仪(ADM 或干涉仪)和两个角度编码器的读数为基础的。在第二应用中,跟踪仪只在被称为顺序多点定位的方法中用于进行距离测量。距离测量是通过将跟踪仪放置在至少三个位置或优选四个位置中实现的。轴承径向跳动的消除使得该测量具有高测量精确度。是用该结果确定的回射器目标的三维坐标会比通过包括角度编码器读数而可能获得的三维坐标具有更佳精确性。一种相关的方法是同步多点定位,在该方法中,由三个或更多个激光跟踪仪同时对宽角度回射器进行多重测量。轴承的径向跳动的补偿的另一潜在益处是由于所得的轴承精度通过轴承补偿过程得以提高,因此能够使用相对便宜的轴承。

[0119] 虽然上文的讨论已经重点强调了在多点定位测量的情况下校正轴承的径向跳动的重要性,但是在许多情况下,对角度测量的校正可能更重要。如今,激光跟踪仪中的适当补偿的角度编码器在测量天顶轴杆与方位轴杆的角位移中往往提供少于一弧秒的误差。在一些情况下,轴承可以比角度编码器更有助于回射器目标的三维坐标测量。确定角度编码器的角运动可以提供一种显著提高激光跟踪仪的角精度的方式,其中,角度编码器的角运动是两个轴杆的角位移(可能超过 360 度)的函数。换言之,在上述过程中收集的数据可以用于跟踪仪的动态模型中,以提高以下四种测量值:相对于回射器的两个角度(例如,垂直角度和水平角度),相对于回射器的距离,以及跟踪仪原点(明显的万向节点)的位置。

[0120] 尽管已参考示例实施方式描述了本发明,但本领域普通技术人员应当理解,在不

背离本发明范围的情况下,可做出多种改变并且可使用等同物代替其元件。另外,在不背离本发明的本质范围的情况下,可做出多种修改从而使得特定的情况或材料适合本发明的教导。因此,旨在使本发明不限于如设想用于执行本发明最佳模式所公开的特定实施方式,而是本发明将包括落入所附权利要求范围内的所有实施方式。此外,使用第一、第二等并不表示任何顺序或重要性,而是使用第一、第二等以区分一个元件与另一元件。另外,使用术语一、一个等并不表示限制数量,而是表示存在至少一个参考项目。

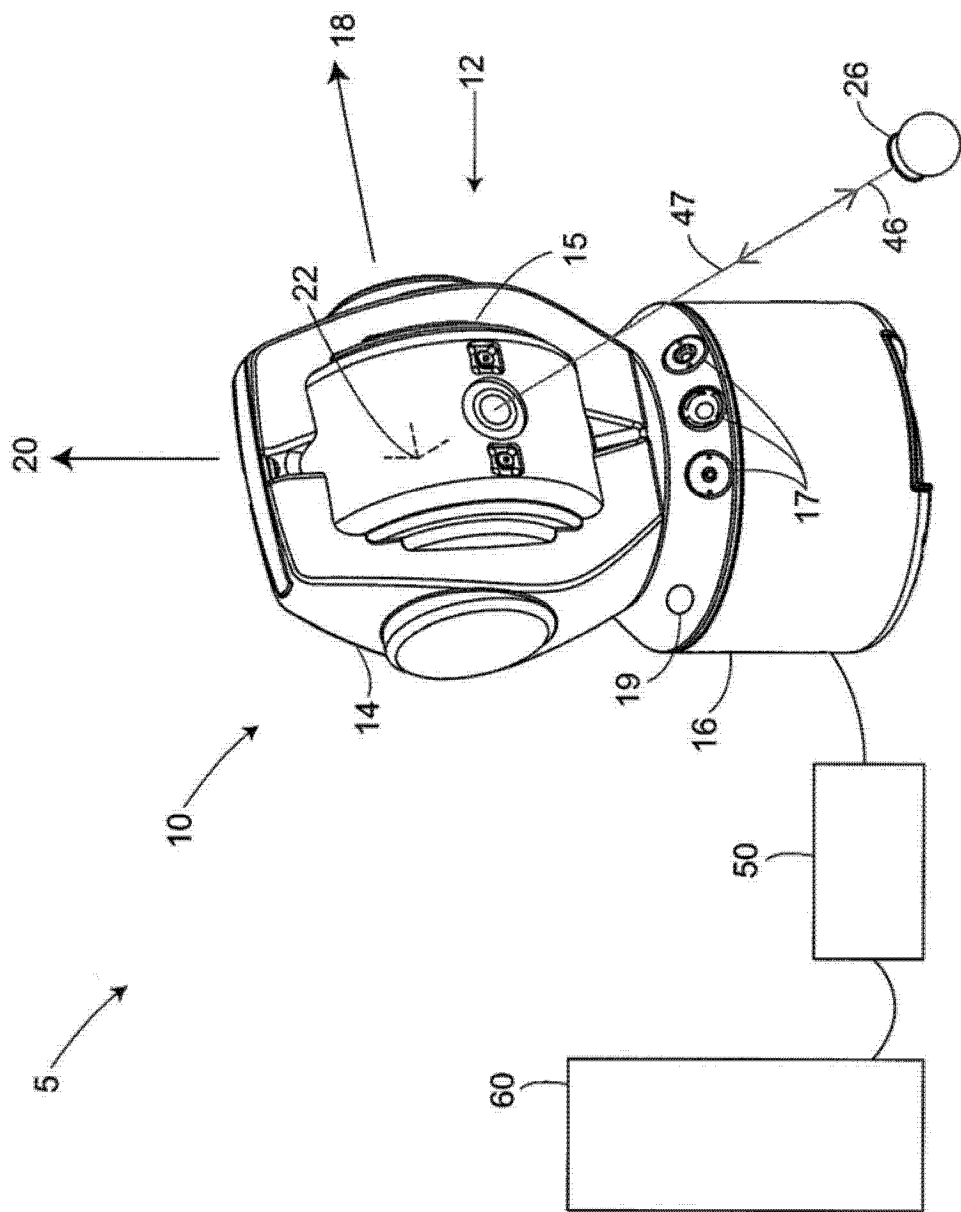


图 1

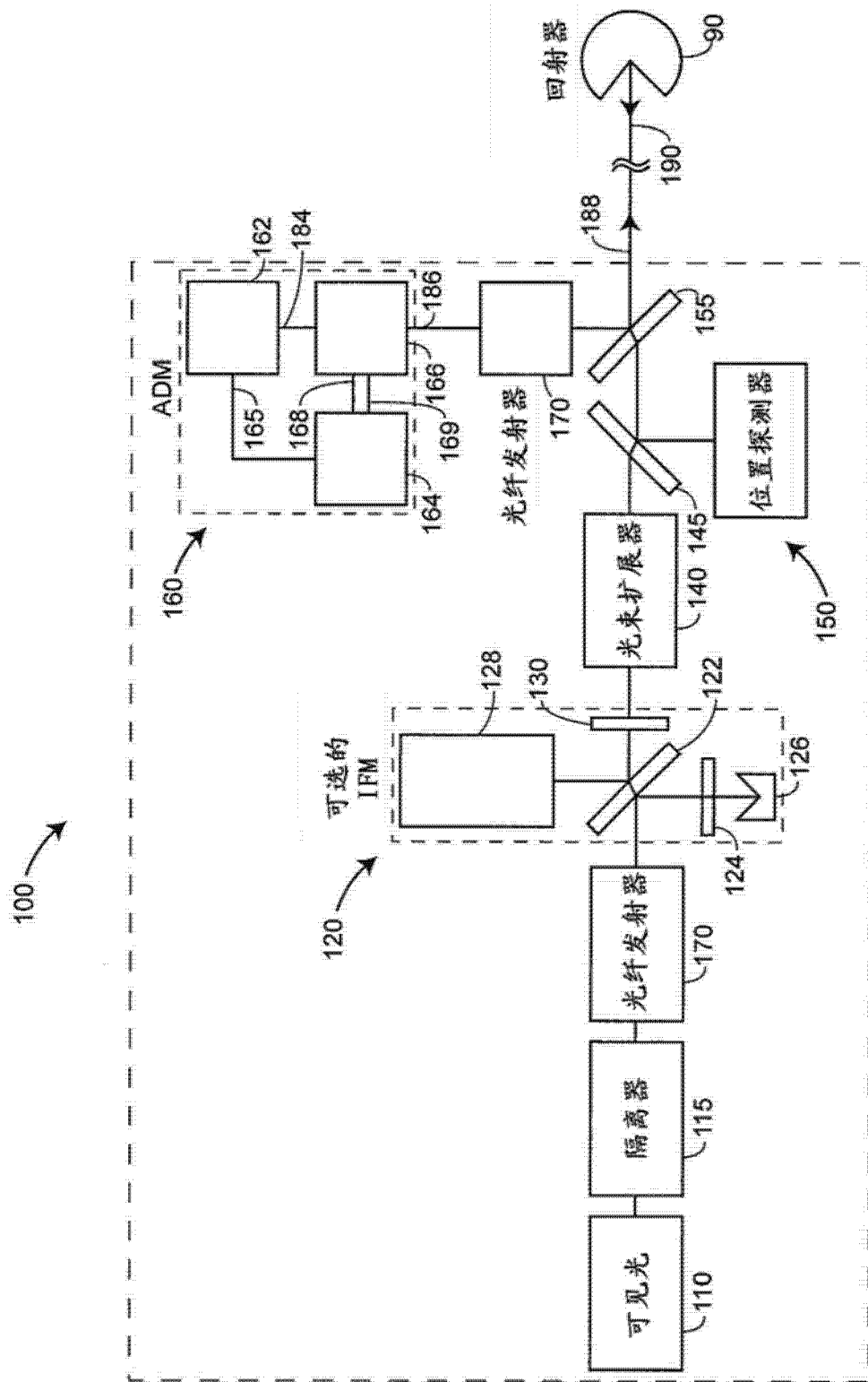
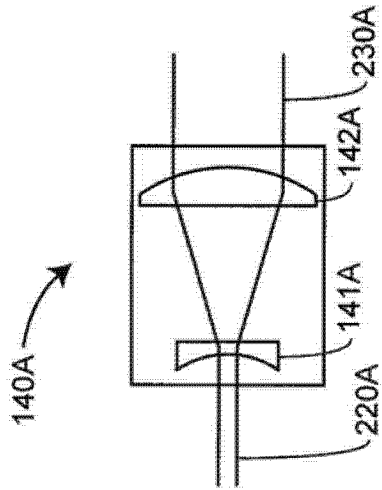
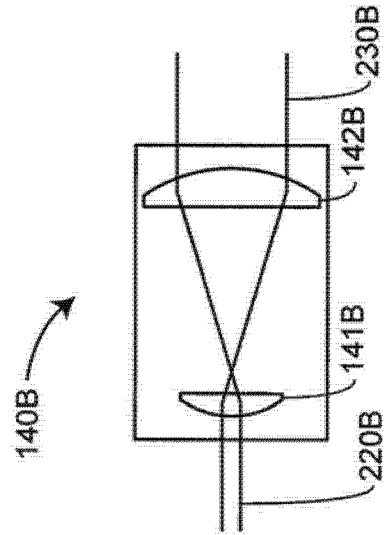


图 3



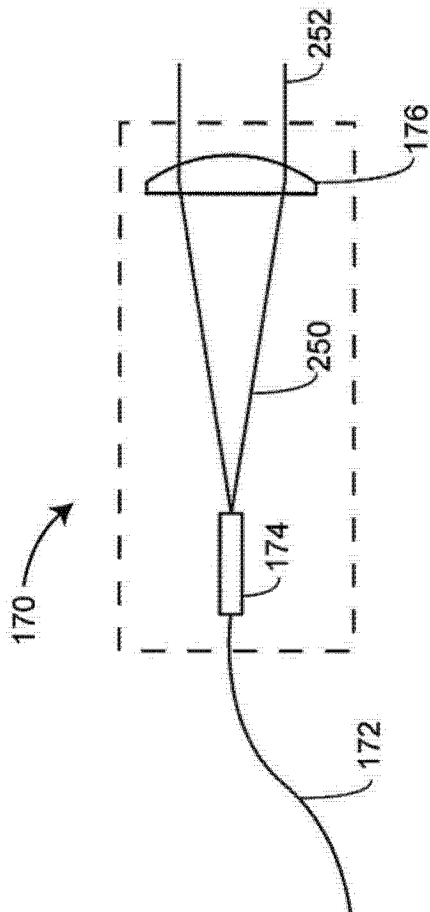
现有技术

图 4A



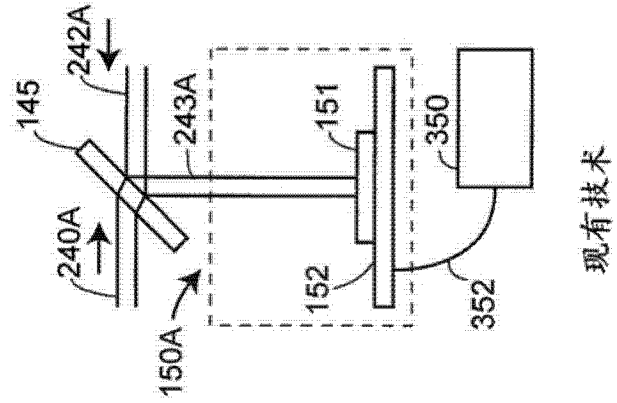
现有技术

图 4B



现有技术

图 5



现有技术

图 6A

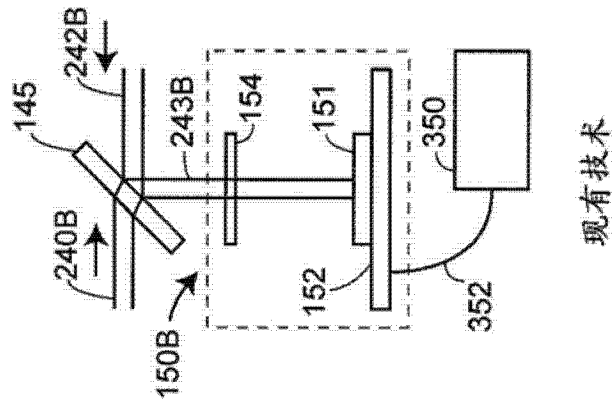


图 6B

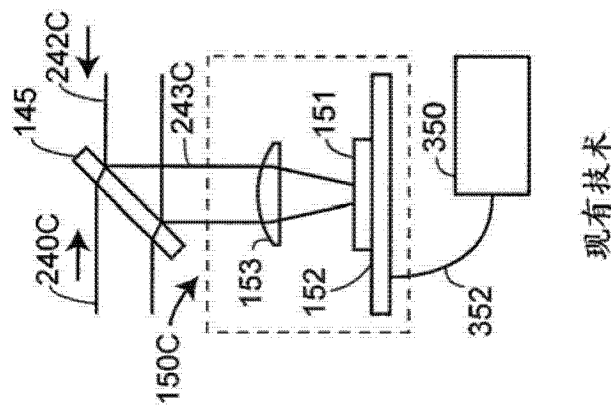


图 6C

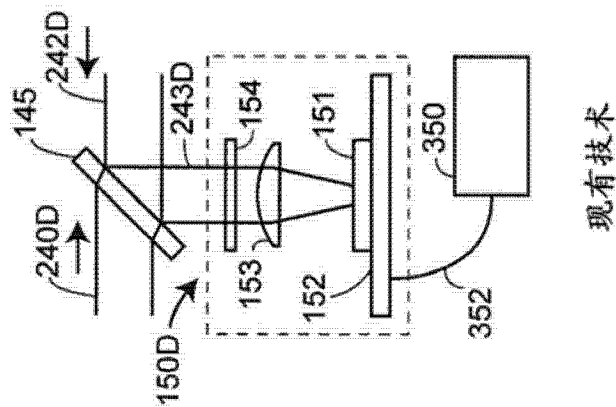


图 6D

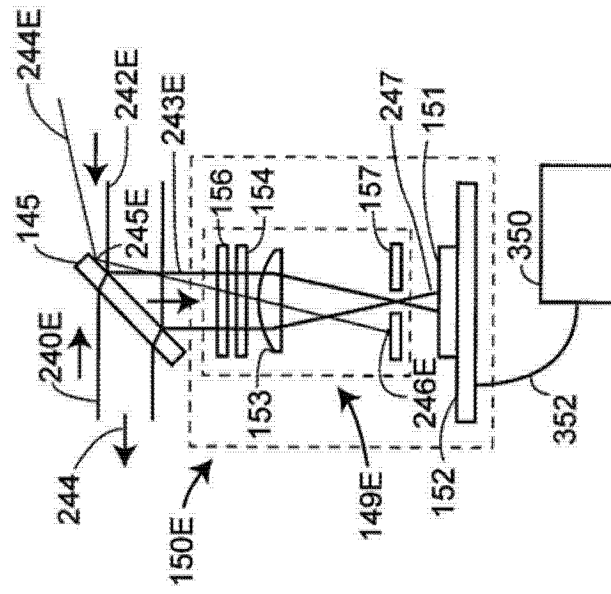


图 6E

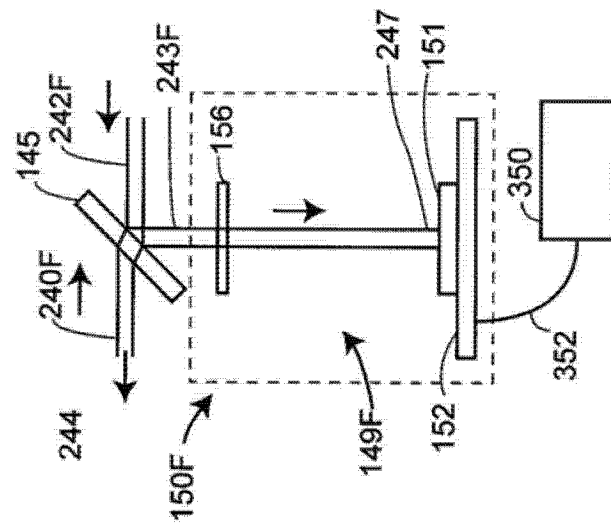


图 6F

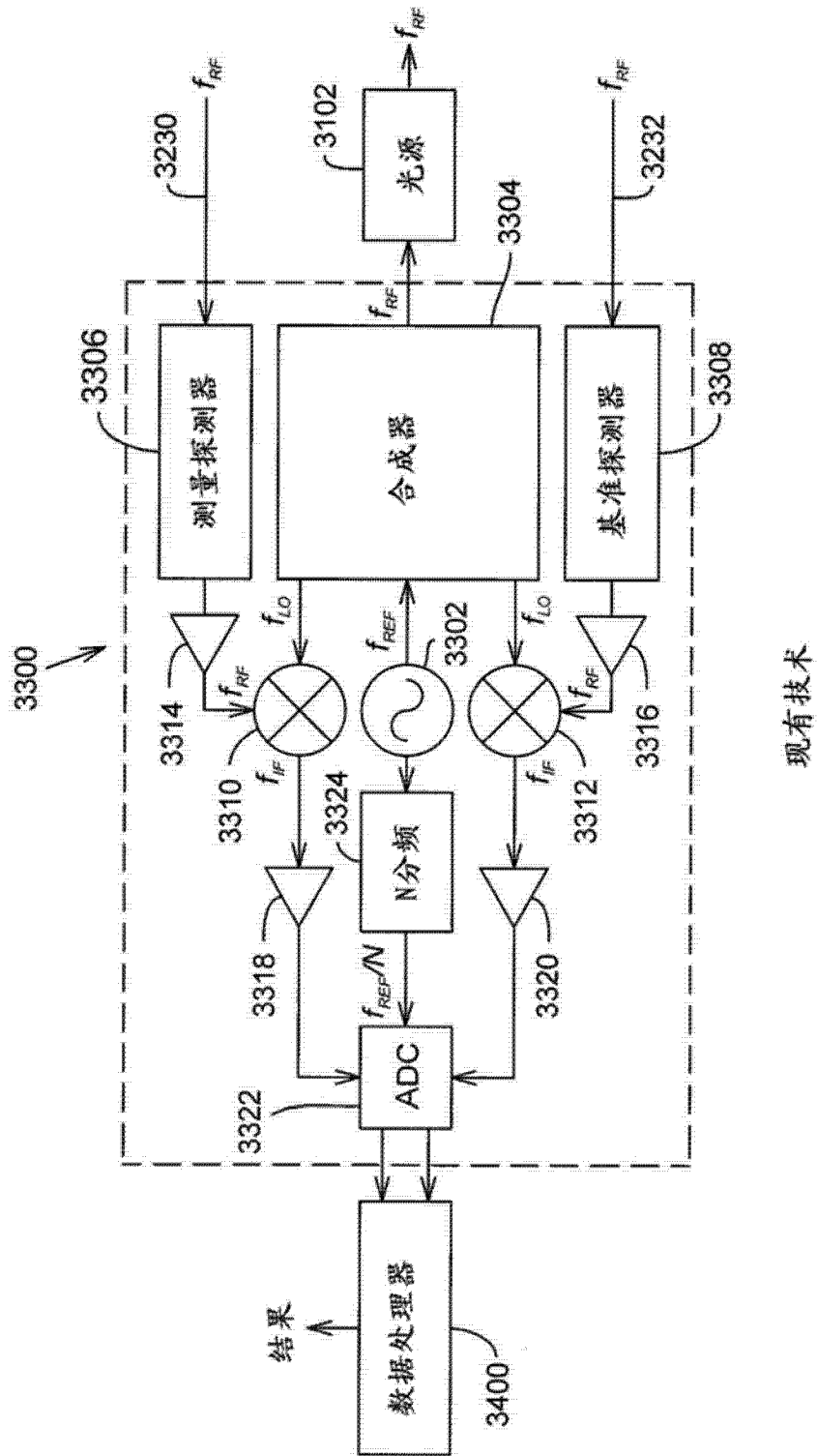


图 7

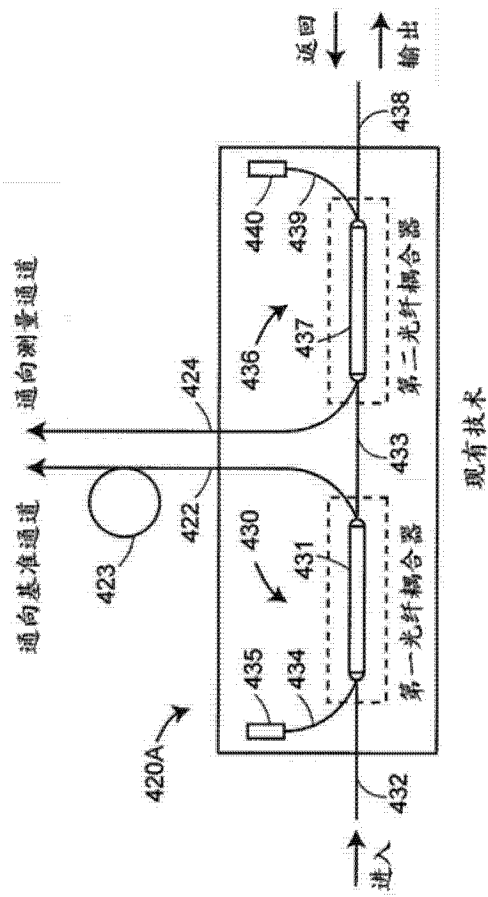


图 8A

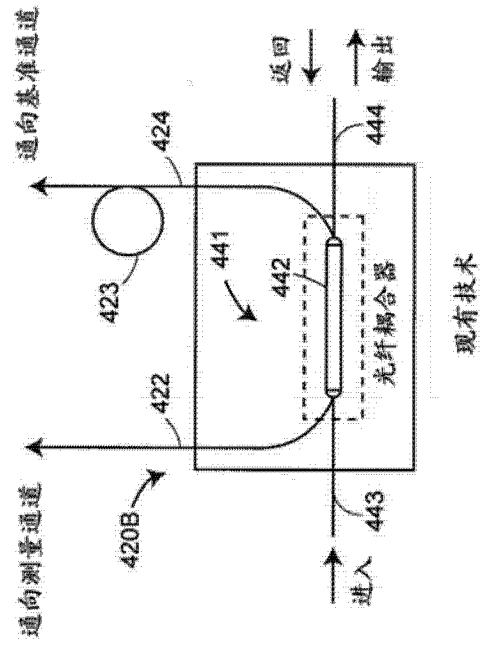


图 8B

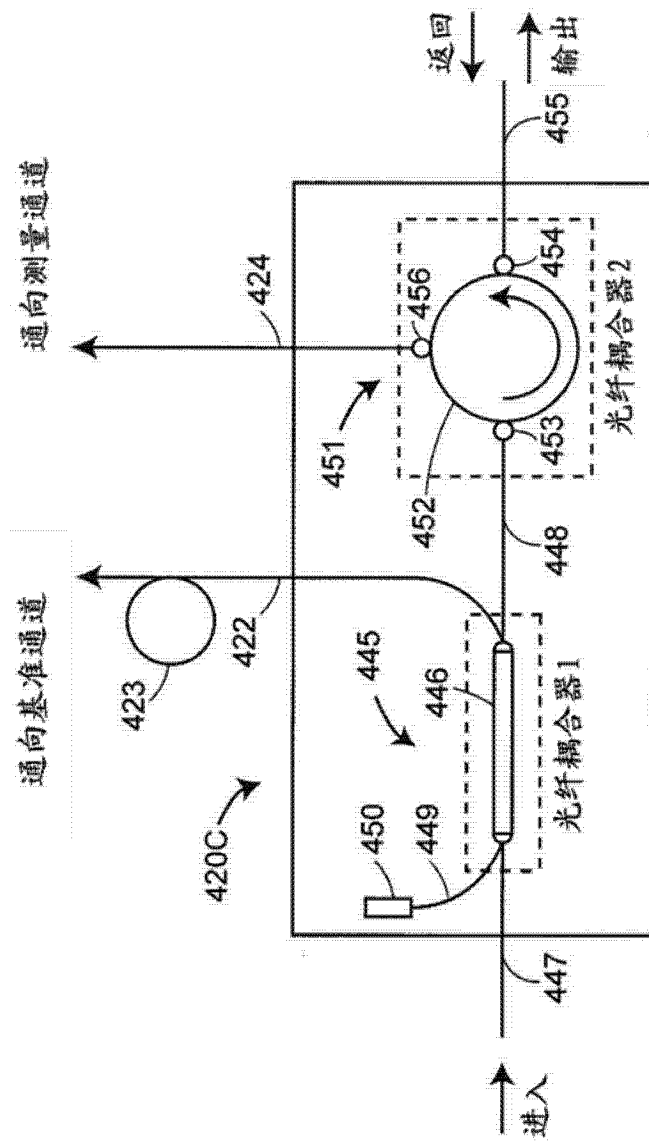
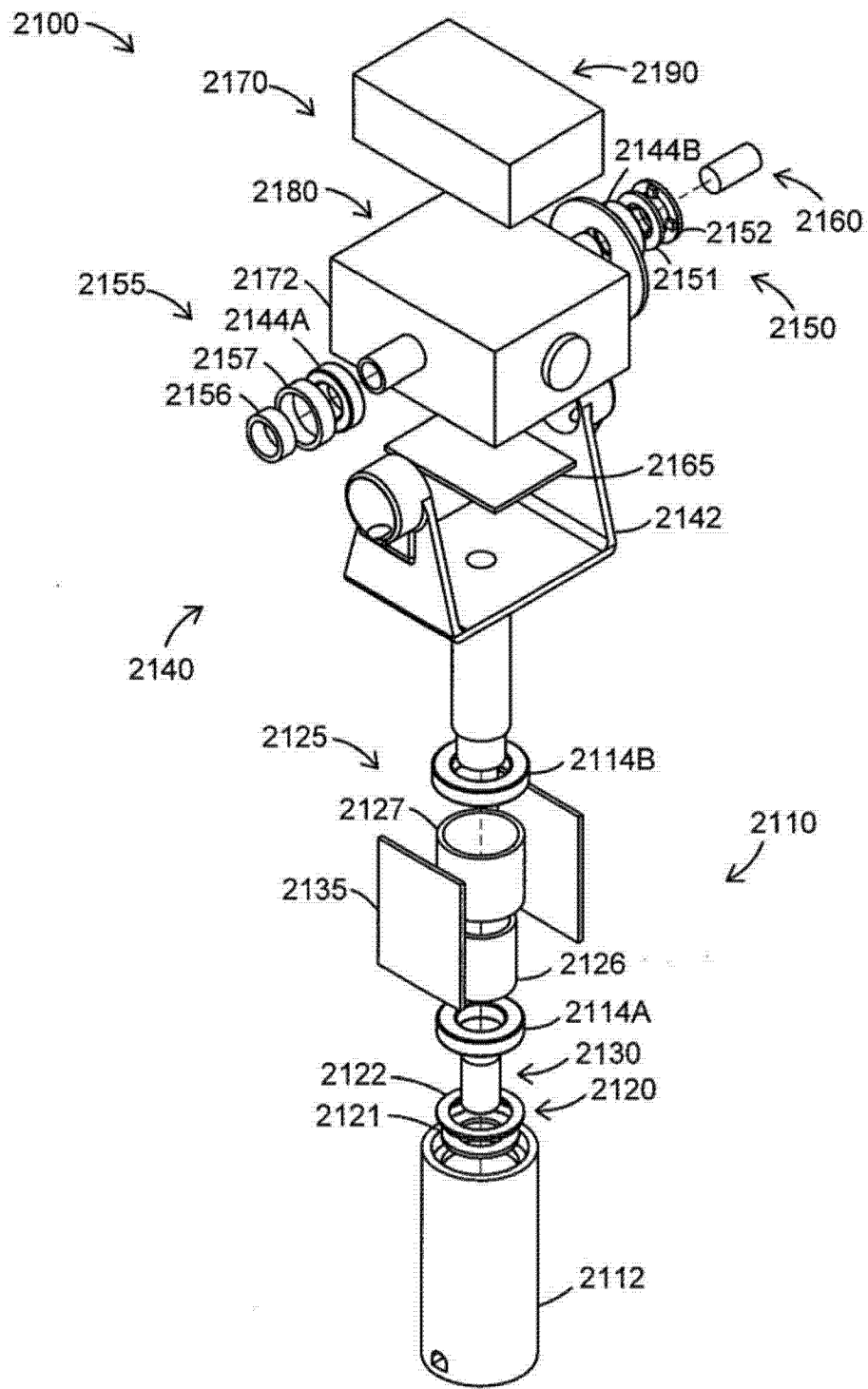
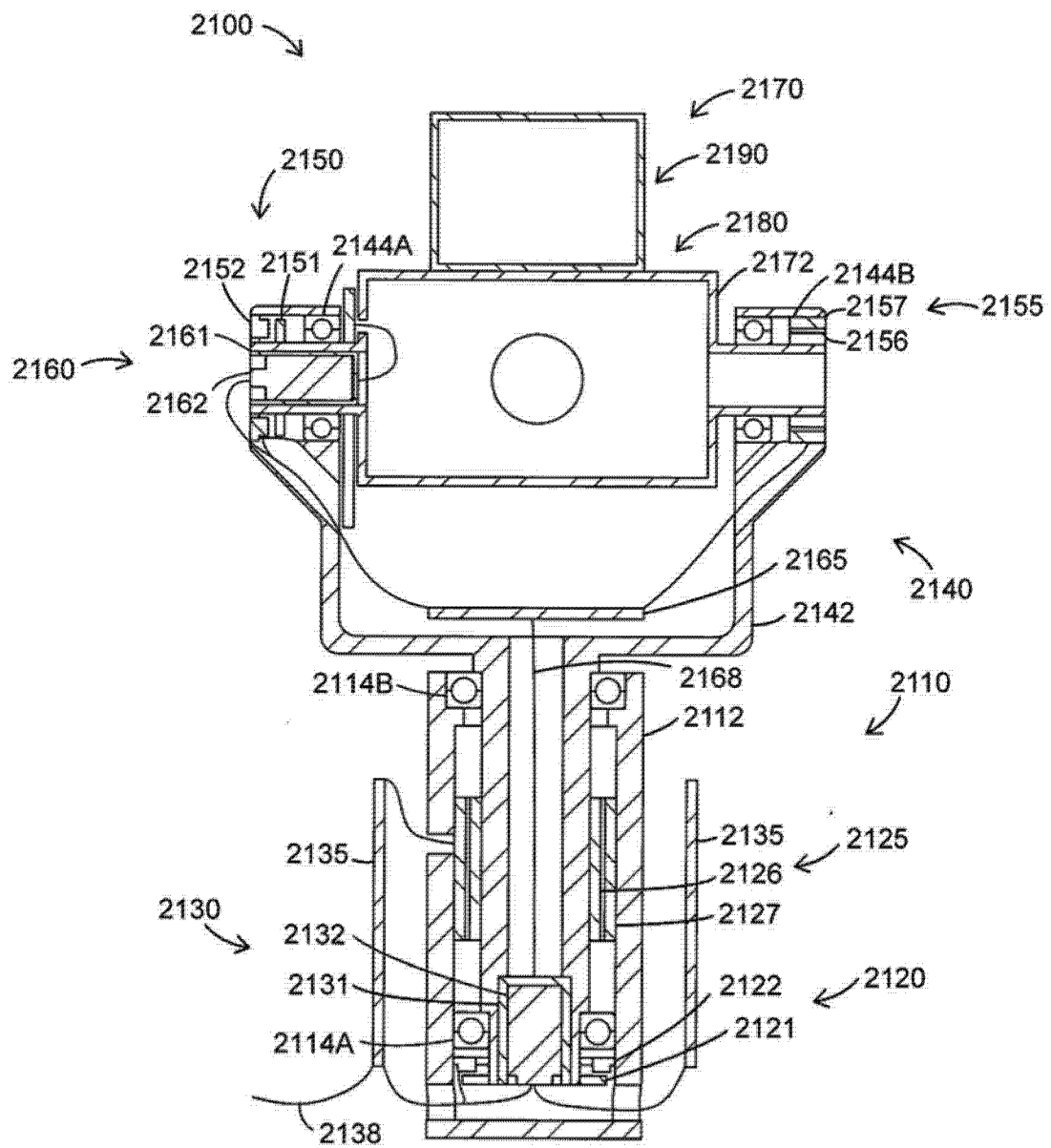


图 8C



现有技术

图 9



现有技术

图 10

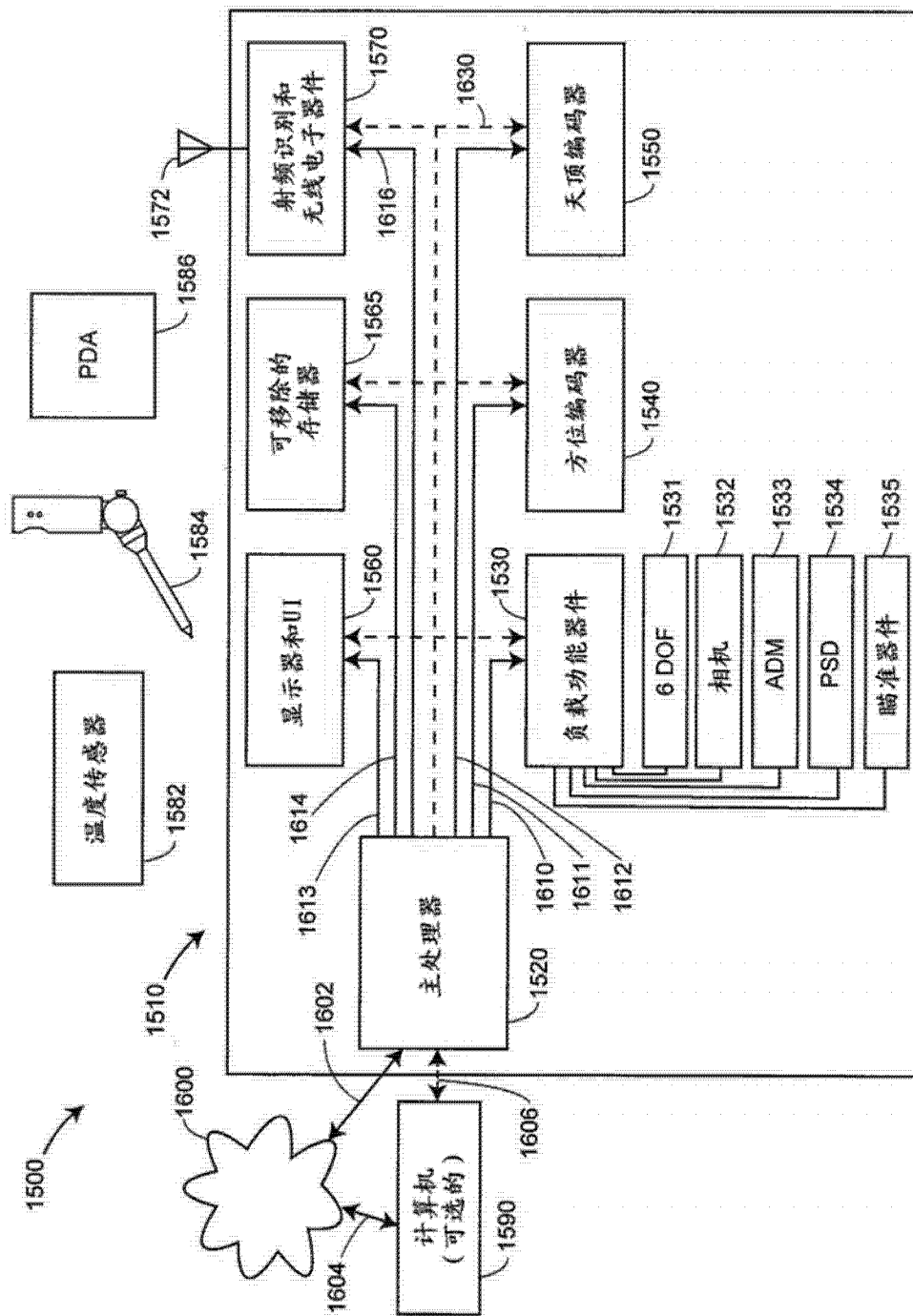


图 11

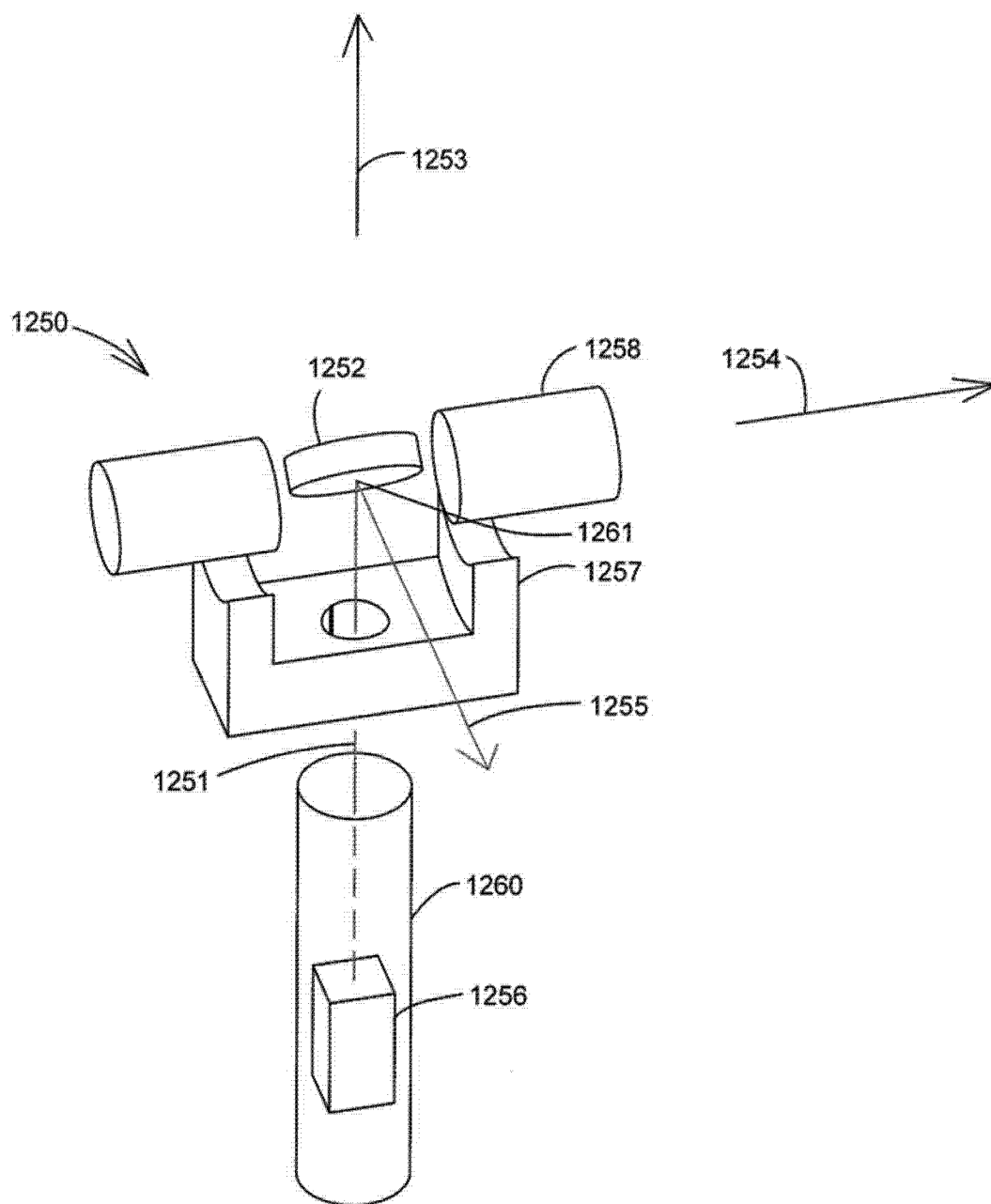


图 12

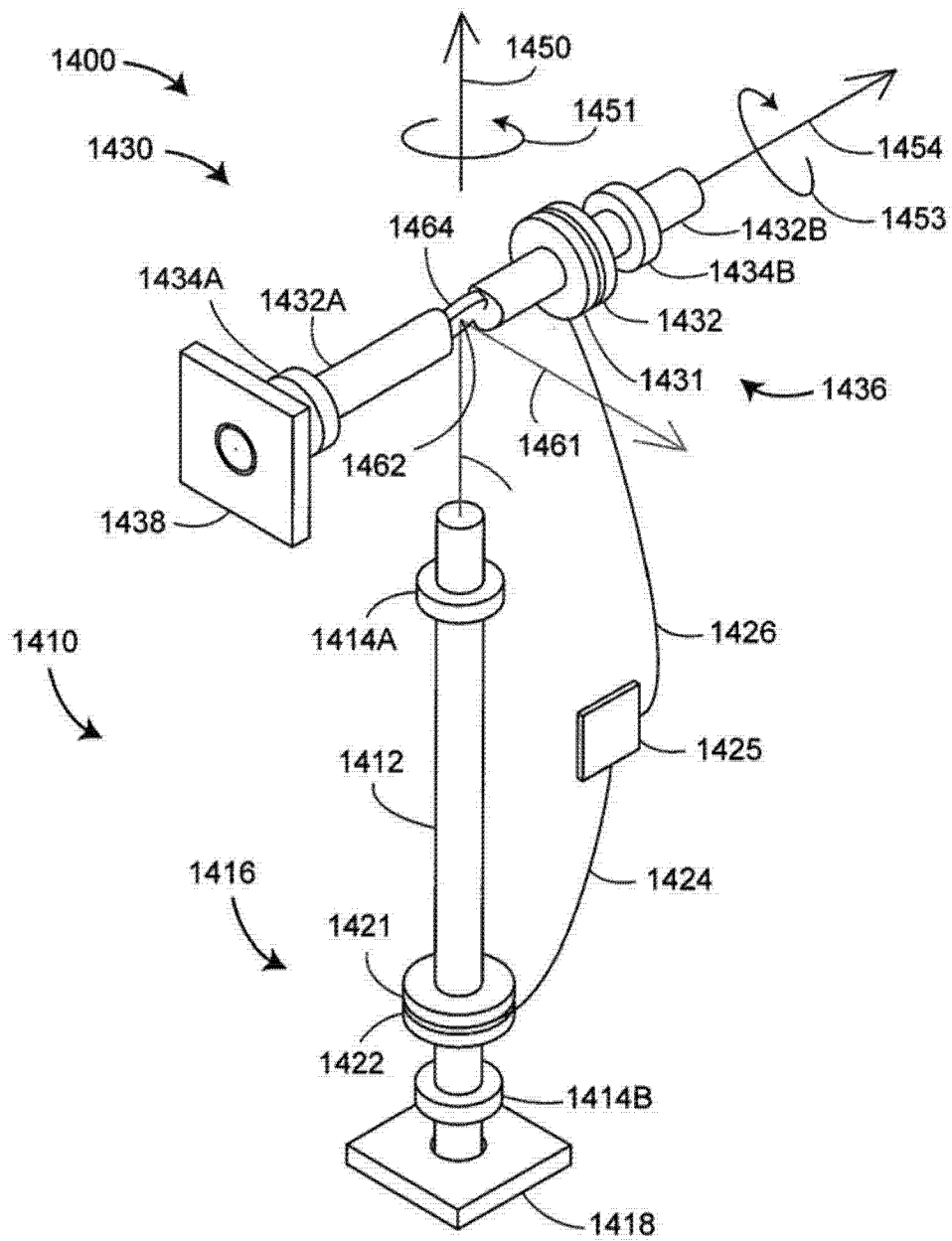
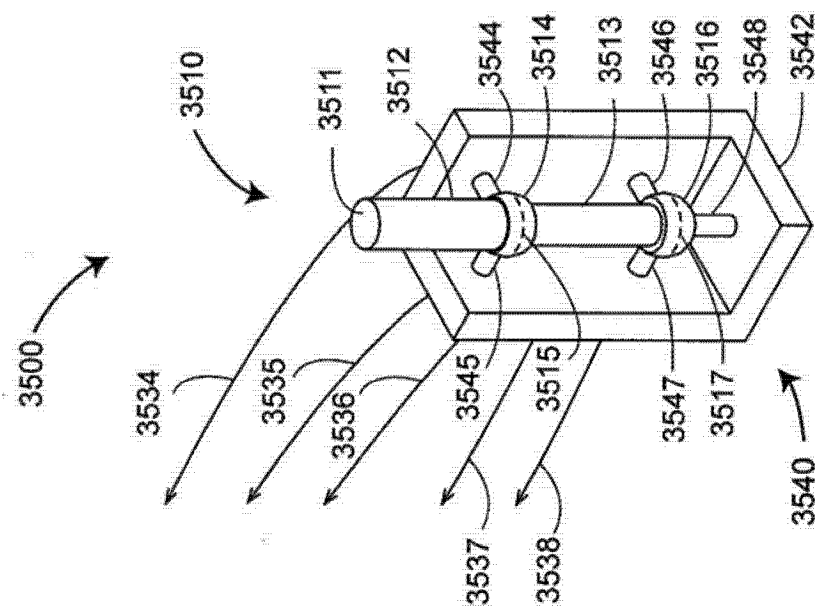
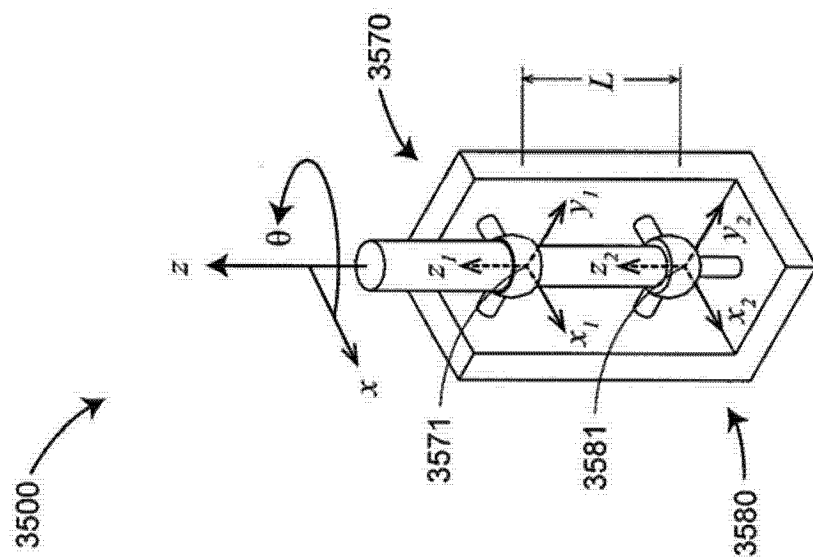


图 14



现有技术

图 15A



现有技术

图 15B

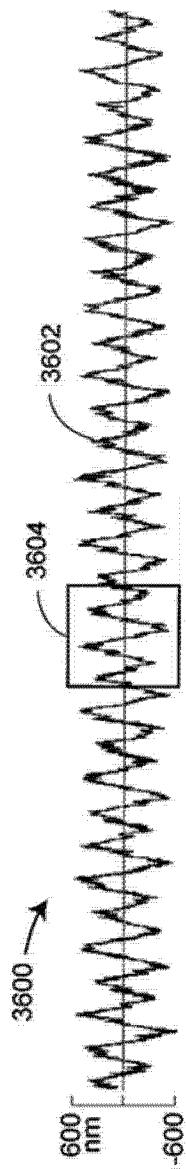
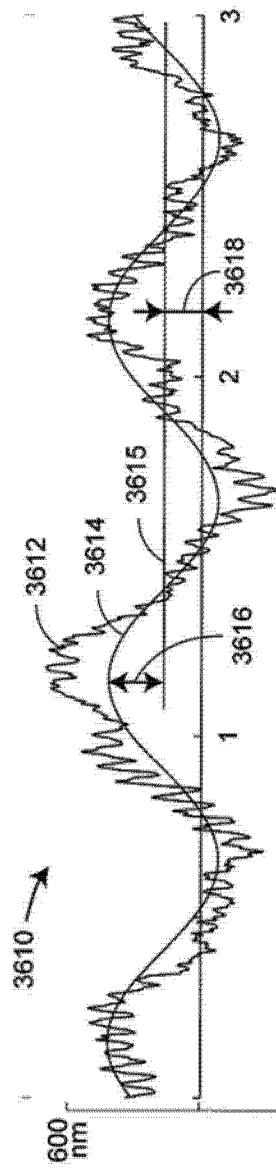
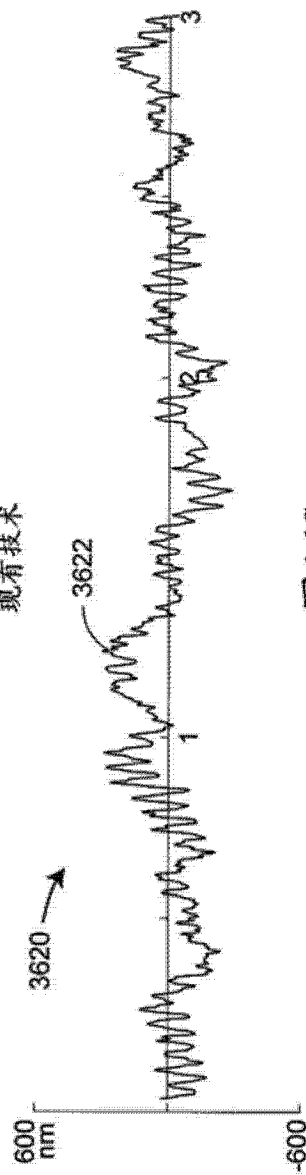


图 16A

现有技术

图 16B
现有技术图 16C
现有技术

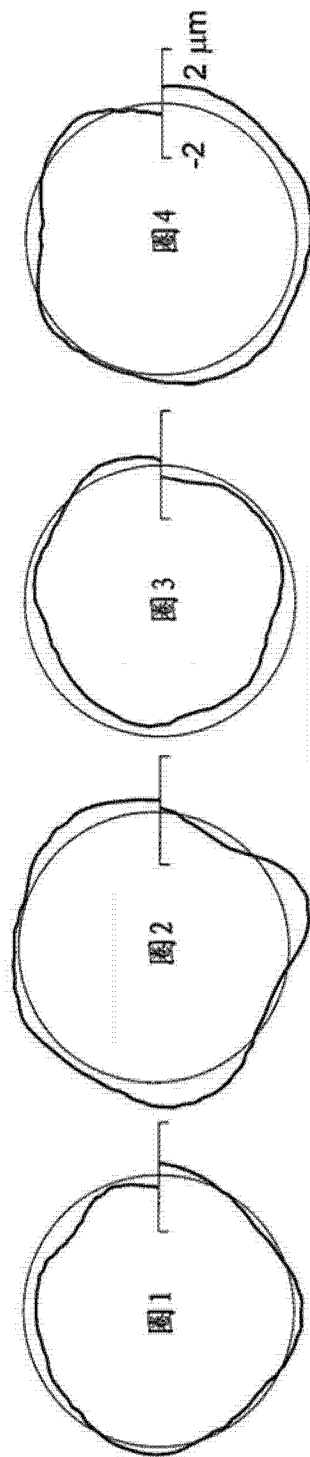


图 17

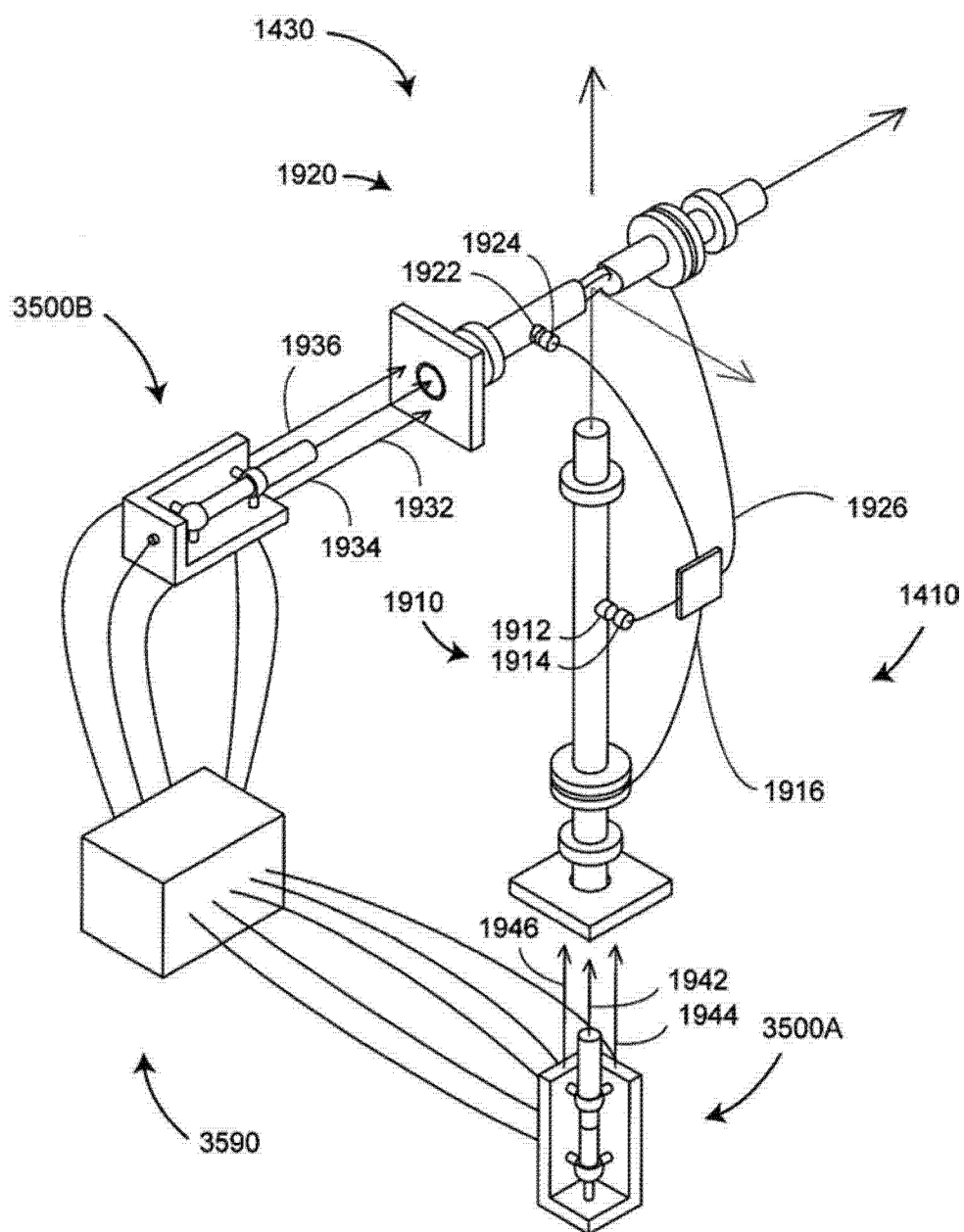


图 19

1. 一种用于对通过坐标测量设备对回射器目标的三维坐标测量中的误差进行校正的方法,所述坐标测量设备构造成将光的第一射束发送至所述回射器目标,所述回射器目标构造成将所述第一射束的一部分作为第二射束返回,所述方法包括以下步骤:

提供所述坐标测量设备,所述坐标测量设备具有第一轴杆、第二轴杆、第一马达、第二马达、第一角度测量设备、第二角度测量设备、测距仪和处理器,所述第一轴杆构造成围绕第一轴线旋转,所述第一轴杆由第一轴承和第二轴承支承,所述第一马达构造成使所述第一轴杆围绕所述第一轴线旋转多个第一角度中的一个第一角度,所述第一角度测量设备构造成测量所述第一角度,所述第二轴杆构造成围绕第二轴线旋转,所述第二轴杆由第三轴承和第四轴承支承,所述第二马达构造成使所述第二轴杆围绕所述第二轴线旋转多个第二角度中的一个第二角度,所述第二角度测量设备构造成测量所述第二角度,所述测距仪构造成至少部分地基于由第一光学探测器接收的所述第二射束的第一部分来测量从所述坐标测量设备到所述回射器目标的第一距离;

用所述第一角度测量设备测量多个第一角度;

测量多个第一位移,所述多个第一位移中的每者均与所述多个第一角度中的一个第一角度相关联,所述多个第一位移中的每者均沿垂直于所述第一轴线并且穿过所述第一轴线上的第一位置的多个第一线中的一个第一线取得;

测量多个第二位移,所述多个第二位移中的每者均与所述多个第一角度中的一个第一角度相关联,所述多个第二位移中的每者均沿垂直于所述第一轴线并且穿过所述第一轴线上的第二位置的多个第二线中的一个第二线取得,在所述第一位置与所述第二位置之间存在第一间距;

至少部分地基于所述多个第一角度、所述多个第一位移、所述多个第二位移以及所述第一间距确定补偿值;

将所述第一射束发送至所述回射器目标;

用所述第一角度测量设备测量第一回射器角度;

用所述第二角度测量设备测量第二回射器角度;

用所述测距仪测量所述第一距离;

至少部分地基于所述第一回射器角度、所述第二回射器角度、所述第一距离以及所述补偿值计算所述回射器目标的三维坐标;以及

将所述回射器目标的所述三维坐标储存在存储器中。

2. 根据权利要求1所述的方法,还包括以下步骤:

测量多个第三位移,所述多个第三位移中的每者均与所述多个第一角度中的一个第一角度相关联,所述多个第三位移中的每者均沿垂直于所述第一轴线并且穿过所述第一轴线上的第三位置的多个第三线中的一个第三线取得;

测量多个第四位移,所述多个第四位移中的每者均与所述多个第一角度中的一个第一角度相关联,所述多个第四位移中的每者均沿垂直于所述第一轴线并且穿过所述第一轴线上的第四位置的多个第四线中的一个第四线取得,在所述第三位置与所述第四位置之间存在第二间距;以及

在确定补偿值的所述步骤中,所述补偿值还至少部分地基于所述多个第三位移以及所述多个第四位移确定。

3. 根据权利要求1所述的方法,其中,在确定补偿值的所述步骤中,所述补偿值包括所述第一轴线的多个倾斜角度,其中,所述多个倾斜角度中的每者均与所述多个第一角度中的一个第一角度相关联。

4. 根据权利要求1所述的方法,还包括以下步骤:

提供测试装置,所述测试装置构造成可移除地附接至所述第一轴杆,所述测试装置具有第一传感器和第二传感器;

将所述测试装置附接至所述第一轴杆,以便将所述第一传感器沿所述多个第一线中的一个第一线放置,以及将所述第二传感器沿所述多个第二线中的一个第二线放置;以及

其中,在测量多个第一位移的所述步骤中,所述第一位移由所述第一传感器测量,以及,在测量多个第二位移的所述步骤中,所述第二位移由所述第二传感器测量。

5. 根据权利要求4所述的方法,其中,在提供测试装置的所述步骤中,所述第一传感器与所述第二传感器是电容传感器。

6. 根据权利要求5所述的方法,其中,在提供测试装置的所述步骤中,所述第一传感器靠近第一球形表面,以及所述第二传感器靠近第二球形表面。

7. 根据权利要求1所述的方法,还包括以下步骤:

提供第一传感器和第二传感器,所述第一传感器沿所述多个第一线中的一个第一线定位,以及沿所述多个第二线放置所述第二传感器;以及

其中,在测量多个第一位移的所述步骤中,所述第一位移由所述第一传感器测量,以及,在测量多个第二位移的所述步骤中,所述第二位移由所述第二传感器测量。

8. 根据权利要求1所述的方法,其中,在测量多个第一角度的所述步骤中,所述多个第一角度中的每个所述第一角度均是展开的,以提供多个第一展开角度,在循环连续的情况下,每个所述第一展开角度均是不同的。

9. 根据权利要求8所述的方法,其中,确定补偿值的所述步骤还包括计算基波正弦分量。

10. 根据权利要求8所述的方法,其中:

所述方法还包括测量所述第一轴杆围绕所述第一轴线的旋转次数的步骤;以及
所述确定补偿值的步骤还包括至少部分地基于旋转次数确定轴承误差。

11. 根据权利要求10所述的方法,还包括以下步骤:

提供旋转计数器;以及

用所述旋转计数器测量所述第一轴杆的所述旋转次数。

12. 根据权利要求11所述的方法,其中,在测量所述旋转次数的所述步骤中,所述旋转计数器包括第一计数器部分和第二计数器部分,所述第一计数器部分附接至所述第一轴杆,所述第二计数器部分附接至相对于所述第一轴杆的旋转静止的外壳,所述第一计数器部分和所述第二计数器部分构造成产生关于所述第一轴杆的每次旋转的信号,所述旋转计数器还构造成响应于所述第一轴杆的旋转方向,以便对于沿第一旋转方向的旋转而增加计数次数,以及对于沿与所述第一旋转方向相反的方向的旋转而减少计数次数。

13. 根据权利要求12所述的方法,其中,在测量所述旋转次数的所述步骤中,所述旋转计数器构造成在所述第一角度测量设备不可操作时测量旋转次数。

14. 根据权利要求12所述的方法,其中,在测量所述旋转次数的所述步骤中,所述旋转

计数器由电池供电。

15. 根据权利要求 2 所述的方法,还包括以下步骤:

用所述第二角度测量设备测量多个第二角度;

测量多个第五位移,所述多个第五位移中的每者均与所述多个第二角度中的一个第二角度相关联,所述多个第五位移中的每者均沿垂直于所述第二轴线并且穿过所述第二轴线上的第五位置的多个第五线中的一个第五线取得;

测量多个第六位移,所述多个第六位移中的每者均与所述多个第二角度中的一个第二角度相关联,所述多个第六位移中的每者均沿垂直于所述第二轴线并且穿过所述第二轴线上的第六位置的多个第六线中的一个第六线取得,在所述第五位置与所述第六位置之间存在第三间距;

测量多个第七位移,所述多个第七位移中的每者均与所述多个第二角度中的一个第二角度相关联,所述多个第七位移中的每者均沿垂直于所述第二轴线并且穿过所述第七位置的多个第七线中的一个第七线取得;

测量多个第八位移,所述多个第八位移中的每者均与所述多个第二角度中的一个第二角度相关联,所述多个第八位移中的每者均沿垂直于所述第二轴线并且穿过所述第八位置的第八线取得,在所述第七位置与所述第八位置之间存在第四间距;以及

在确定补偿值的所述步骤中,还至少部分地基于所述多个第二角度、所述多个第五位移、所述多个第六位移、所述多个第七位移、以及所述多个第八位移、所述第三间距以及所述第四间距确定所述补偿值。

16. 一种用于测量回射器目标的三维坐标的坐标测量设备,所述坐标测量设备构造成将光的第一射束发送至所述回射器目标,所述回射器目标构造成将所述第一射束的一部分作为第二射束返回,所述设备包括:

第一轴杆、第二轴杆、第一马达、第二马达、第一角度测量设备、第二角度测量设备、测距仪、旋转计数器和处理器,所述第一轴杆构造成围绕第一轴线旋转,所述第一轴杆由第一轴承和第二轴承支承,所述第一马达构造成使所述第一轴杆围绕所述第一轴线旋转第一角度,所述第一角度测量设备构造成测量所述第一角度,所述第二轴杆构造成围绕第二轴线旋转,所述第二轴杆由第三轴承和第四轴承支承,所述第二马达构造成使所述第二轴杆围绕所述第二轴线旋转第二角度,所述第二角度测量设备构造成测量所述第二角度,所述测距仪构造成至少部分地基于由第一光学探测器接收的所述第二射束的第一部分测量从所述坐标测量设备到所述回射器目标的第一距离,所述旋转计数器构造成测量所述第一轴杆的旋转次数,所述旋转计数器还构造成即使在设备电源关闭时也保持对当前的 360 度旋转间隔的跟踪。