

文章编号 1004-924X(2024)17-2654-09

基于激光干涉的多轴运动平台垂直度测量

罗凯元, 郑文炜, 杨霖*

(工业和信息化部第五研究所 计量检测中心, 广东 广州 511370)

摘要: 测量垂直度误差的常用方法有实物量具法、体积测量法、CCD 测量法、平面光栅测量法、激光跟踪仪测量法和激光干涉仪测量法等, 这几种方法普遍存在操作不简便, 使用成本高或无法实现在线测量等缺点。为此, 提出了一种基于激光干涉仪原理的多轴运动平台垂直度在线测量方法, 利用激光器、五角分光棱镜、五角棱镜、直线度干涉镜、直线度反射镜等组件构建了一种多轴激光干涉垂直度测量装置。通过光路设计, 可以将此装置搭建于被测多轴运动平台上, 从而实现高效率、高精度的垂直度在线测量。最后通过与花岗石角尺测量垂直度的方法进行精度比对测试。测试结果表明, 偏差为 $1.4''$, 归一化偏差 $E_n < 1$, 结果较理想, 证明了方案的可行性。

关键词: 计量学; 激光干涉仪; 垂直度; 多轴

中图分类号: TB921 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243217.2654

Perpendicularity measurement of multi-axis motion platform based on laser interferometry

LUO Kaiyuan, ZHENG Wenwei, YANG Lin*

(Calibration and Testing Center, the Fifth Electronic Research Institute of MIIT,
Guangzhou 511370, China)

Corresponding author, E-mail: yanglin@ceprei.com

Abstract: Perpendicularity error is a critical geometric error in multi-axis motion platforms, indicating the vertical deviation of machine tool components during movement. This deviation significantly affects spatial positioning errors, particularly as the stroke length of the moving axis increases. Various methods exist for measuring perpendicularity error, including physical gauges, volumetric measurements, CCD measurements, planar gratings, laser trackers, and laser interferometry. However, these methods often suffer from drawbacks such as operational inconvenience, high costs, or inability to perform online measurements. This paper presents a multi-axis laser interferometric device for measuring perpendicularity, utilizing components like laser emitters, pentagonal beam splitters, prisms, straightness interferometers, and reflectors. With a well-designed optical path, this device can be integrated into the multi-axis motion platform, enabling efficient and precise online measurement of perpendicularity. A comparison test against a granite protractor showed a deviation of $1.4''$ and a normalized deviation $E_n < 1$, confirming the method's

收稿日期: 2024-03-13; 修订日期: 2024-03-18.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2022YFF0606000)

feasibility and accuracy.

Key words: metrology; laser interferometry; perpendicularity; multi-axis

1 引 言

在现代数控加工领域,大型多轴移动平台扮演着至关重要的角色,常用于进行复杂曲面的加工任务。多轴移动平台通常需要在长行程、大跨度和高负载的条件下工作,这给机床的主要支撑部件带来了巨大的挑战。机床的主要支撑部件,如导轨和滑块等部件容易出现磨损,而横梁则会因为高负载产生形变。这些问题会导致机床各部件之间的位置关系发生改变,从而严重影响机床的加工精度^[1]。在众多影响加工精度的因素中,垂直度误差是一个尤为严重的问题。目前,垂直度误差指的是机床的运动部件在其运动轨迹上的垂直偏差,这种偏差随着运动轴行程的增加,会对空间定位误差产生更大的影响^[2]。

传统方法在处理垂直度误差时,往往将其视为一个静态的量,即认为在整个行程中垂直度误差是恒定的^[3]。因此,工程人员通常会在局部范围内进行测量,并据此评估整个行程的垂直度误差。然而,最新的研究成果揭示了一个不同的实际情况:多轴运动平台的垂直度实际上会随着工作台与导轨相对位置的变化而变化^[4]。这意味着为了达到日益严格的加工精度要求,需要对多轴移动平台的垂直度误差进行在线测量,从而进行更为精确的实时检测和补偿。

目前,大多数测量都是静态的,即被测对象在测量过程中不变化或没有明显的变化;同时,测量大多是“离线”的,而不是“在线”的,为了能在生产、科研或工程中实现实时测量,引入了在线测量的概念,即在生产加工的同时实现测量。从而实现降低消耗,减少成本、提高生产效率与生产质量等目的。对于多轴运动平台的在线几何误差测量,较为成熟的方案有利用激光干涉仪与准直仪对工作台的六自由度进行测量^[5],但针对垂直度误差的在线测量方案却较为欠缺。

三轴运动平台的垂直度,即三个平动轴(即直线运动的轴)之间的相互垂直关系,是影响平台性能的关键因素之一。这三个平动轴的垂直

度误差主要包括 3 个方向上的误差: δ_{xy} , δ_{xz} 和 δ_{yz} 。目前,测量垂直度误差的方法主要有实物量具法、体积测量法、CCD 测量法、平面光栅测量法、激光跟踪仪测量法和激光干涉仪测量法等。其中,实物量具法通常使用标准的直角尺和测微表来进行垂直度测量^[6]。这种方法属于直接测量,简单易懂,但其过程较为繁琐,只能实现离线测量。此外,由于容易受到人为因素的影响,实物量具法无法满足高精度测量的需求^[7]。体积测量法^[8-11]的优点在于测量效率高。目前,常用的方法包括 9 线法、14 线法、22 线法以及对角线法^[12]等。该方法操作较简便,多用于三坐标测量仪等精密测量仪器的调装;但存在操作周期长,需要用复杂的数学模型进行解耦,从而导致测量精度下降等缺点。

CCD 测量法^[13]基于平行光束的远场干涉衍射原理,采用涡旋位相板对激光光束进行位相编码,经涡旋位相板编码的激光光束在中央产生干涉暗斑,再将此暗斑投射到一个 CCD 探测器上,获得当前点的坐标值。该方法系统结构较简单,成本较为便宜、操作方便;但其测量精度较低,容易受环境震动等因素的影响、且测量范围小,仅适用于小行程的导轨垂直度测量。

运用平面光栅^[14]进行圆检验^[15-16]是一种用于评估数控机床精度的测试方法,它能够快速且精确地测量机床的运动误差。通过分析圆轨迹的几何特性来间接测量垂直度误差^[17-18]。当一个轴的理想直线运动受到另一个正交轴的影响而产生偏差,那么这种偏差在圆轨迹中表现为非理想形状,从而可以推算出垂直度误差^[19]。平面光栅的测量精度足够高且操作简便,但高精度平面光栅价格较高,在线测量的成本较高,无法大规模应用于工业领域。

激光跟踪仪通过激光跟踪安装在工作台上的反射靶球,可获得工作台坐标位置,通过坐标拟合可求解机床的多项几何误差。这种方法的优点在于架设调整简便,不用进行过多调整,效率较高^[20]。但激光跟踪仪测量时转角码盘存在

角度误差,几何误差的求解模型较复杂,制约了其测量精度,且成本较高,无法大规模应用。因此,该方法一般适用于大型机床等精度要求较低且测量范围较大的场合使用,对于一些要求较高的精密检测场景,则无法满足检测需求。

为了解决上述问题,激光干涉技术被引入到垂直度测量中^[21]。该技术具有高精度、高灵敏度的特点,能够突破实物量具的限制,实现全量程测量,在整个测量范围内都能保持高精度的测量。激光干涉仪在进行垂直度测量时,通常会单独测量二维平面内的轴间直线度误差,然后通过光学角尺来确定这些直线度误差之间的关系,从而得到垂直度的测量结果。然而,这种方法需要对 δ_{xy} 、 δ_{xz} 和 δ_{yz} 三个方向的误差分别进行测量,操作上较为繁琐,在线测量成本较高。

上述方法普遍存在操作不简便,使用成本高或无法实现在线测量等缺点。为了实现垂直度误差的高精度在线测量,本文提出了一种基于激光干涉原理的多轴激光干涉垂直度测量装置。该装置能够实现同时测量三轴间的垂直度误差。这种设计可以搭设在三轴运动平台的运动系统内,可实现在线测量,提高测量效率,降低操作复杂度,从而达到提高测量的准确性和设备的运行效率的目的。

2 原 理

2.1 激光干涉仪测量垂直度原理

利用激光干涉仪进行垂直度测量的基本原理是通过比较正交轴的直线度值从而确定正交轴的非直角度。垂直度测量由正交轴的两组直线度测量组成,直线度反射镜作为共同的参考基准,在测量过程中保持固定,且不进行调整;再利用五角棱镜作为光学角尺,用于在其中一次的直线度测量,允许调整激光束与轴的准直,其测量方法见图1。通过直线度测量可以得到每个轴向运动轨迹的拟合直线,从而得到斜率角 a 和斜率角 b ,即轴向的实际运动轨迹与理想直线轨迹之间的角度偏差,如图2所示。设光学角尺的角度误差为 θ ,则垂直度误差为垂直度误差,即 $\delta = \theta - a - b$ 。

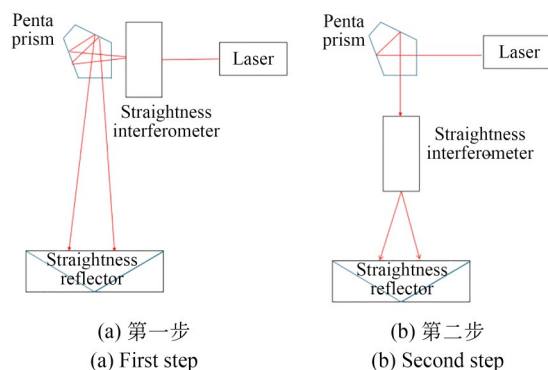


图1 垂直度测量方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of perpendicularity measurement method

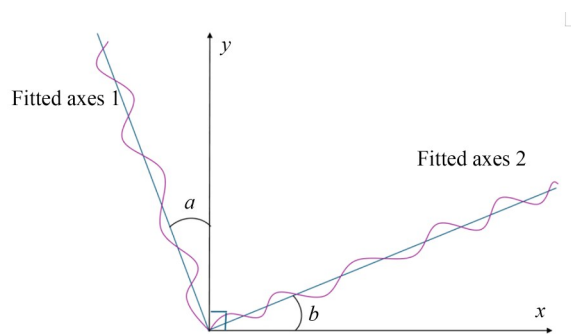


图2 垂直度误差拟合示意图

Fig. 2 Schematic diagram of perpendicularity error fitting

2.2 多轴激光干涉测量垂直度原理

多轴激光干涉系统垂直度测量是基于激光干涉仪测量垂直度的工作原理,利用五角分光棱镜^[22]将激光器发射出的激光进行多次分光,构建三轴间的互相正交的标准光路进行测量的方法。

五角分光棱镜是一种特殊的分光棱镜,在分光的同时还能保持其中一路出射光的光束与入射光之间保持互相垂直的关系,见图3。基于此特性可以构建一个参考标准,用于测量正交轴间的垂直度。

用经五角分光棱镜分光后的激光束测量各个平动轴的直线度,可以得到每个轴向的运动轨迹的拟合直线,从而得到与理想轨迹的斜率 k ,就可以进一步计算出各个轴之间的垂直度误差^[23]。

以 xy 轴间的垂直度误差 δ_{xy} 为例,首先将五角分光棱镜与直线度干涉镜搭载在 y 轴导轨上,五角分光棱镜随 y 轴的运动而运动,但与 x 轴的导轨保持相对静止。在 y 轴导轨的末端放置一个

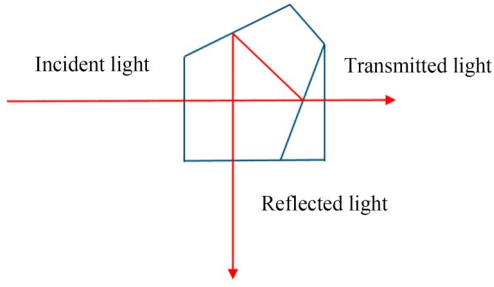


图3 五角分光棱镜示意图

Fig. 3 Schematic diagram of penta prism beamsplitter

直线度反射镜,以此可以通过激光干涉测量原理测得 y 轴的直线度,通过拟合可以得到斜率 k_y ,而经五角分光棱镜分出的另一束激光则与 y 轴呈垂直关系。将另一直线度干涉镜搭载于 x 轴的导轨上,随 x 轴工作台移动,末端放置一直线度反射镜,便可测得 x 轴的直线度,拟合得到斜率 k_x 。

由于五角分光棱镜本身存在制造误差,需提前通过校准得到棱镜本身的角度偏差 θ ,若两轴间的夹角为 α ,则垂直度误差为:

$$\delta_{xy} = \alpha - 90^\circ + \theta, \quad (1)$$

其中:

$$\alpha = 90^\circ - (k_x - k_y). \quad (2)$$

联立式(7)~式(8)得:

$$\delta_{xy} = \theta - (k_x - k_y). \quad (3)$$

同理,为了同时测量 δ_{xz} 和 δ_{yz} ,从上述光路中利用五角分光棱镜分别再引出 z 向激光。基于圆周封闭原则,利用3个五角棱镜则可构建标准的垂直角。 z 轴对 x 轴与 y 轴的垂直度可以看作相

对于 xy 平面的垂直度,由于测量 δ_{xy} 平面时激光束已经准直,故 z 轴仅需考虑 z 轴 x 向和 z 轴 y 向两个方向各自的斜率 k_{z1} 和 k_{z2} ,此处设五角棱镜的角度偏差分别为 $\theta_a, \theta_b, \theta_c$,得:

$$\delta_{xz} = (\theta_a + \theta_b + \theta_c) - k_{z1}, \quad (4)$$

$$\delta_{yz} = (\theta_a + \theta_b + \theta_c) - k_{z2}. \quad (5)$$

3 多轴激光干涉测量垂直度

3.1 测量装置组成

基于上述工作原理,本文提出一种多轴激光干涉垂直度测量装置。该装置由激光器、五角分光棱镜、五角棱镜、直线度干涉镜和直线度反射镜组成。所有镜组及接收器均安装在多轴平台的导轨及平动轴的位置,避开工作区域,故不影响设备的正常生产加工,可实现在线测量;减少了垂直度误差周期性检测时间,由五角棱镜制造误差引入的误差分量属于系统误差,可在前期进行校准并修正,大幅提高了测量效率及测量精度。

如图4所示, $\lambda_1 \sim \lambda_3$ 表示五角分光棱镜, $\epsilon_1 \sim \epsilon_5$ 表示五角棱镜。由激光器发射激光束,经过 λ_1 将光束一分为二;一路光束经多个五角棱镜折射到 z 轴 x 向直线度干涉镜,用以测量 z 轴 x 向(z_1)的直线度;另一路继续经 λ_2 一分为二,其中一路经另外两个五角棱镜将激光束折射到 z 轴 y 向的直线度干涉镜,用以测量 z 轴 y 向(z_2)的直线度;剩下的一路激光束经 λ_3 继续一分为二,分别用以测

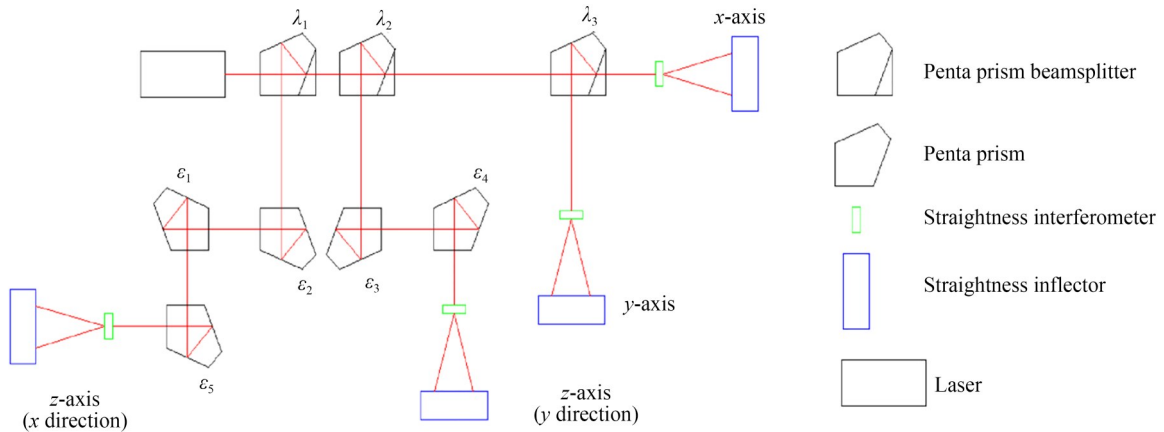


图4 垂直度测量装置光路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optical path for perpendicularity measurement devices

量 x 轴与 y 轴水平方向的直线度。垂直度测量装置结构如图 5 所示^[24]。

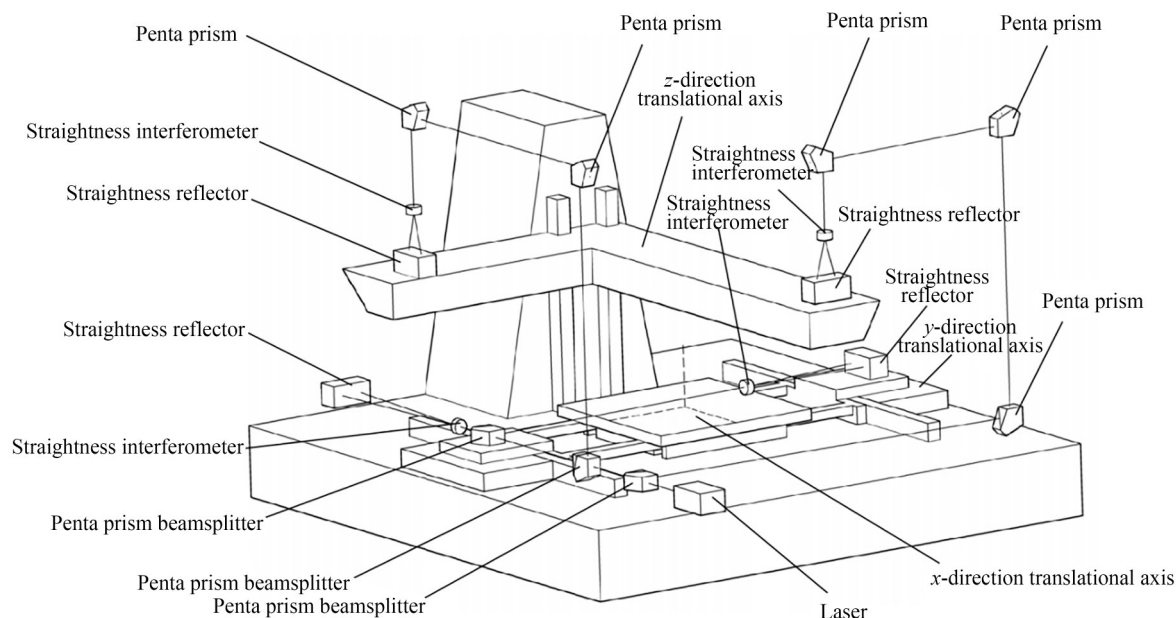


图 5 垂直度测量装置结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the perpendicularity measurement device structure

3.2 垂直度测量方案

首先,调整由 λ_1 分光出来的两路激光与平动轴导轨 x 轴与 y 轴平行准直,测量 y 轴直线度并拟合得到 y 轴光路的斜度 k_y ;利用装置中的五角棱镜等组件布局光路,在测量过程中不改变其他轴向的光路与基准轴间的位置关系;通过直线度干涉镜与直线度反射镜分别测得 x 轴、 z 轴的直线度,并拟合得到其光路的斜度 k_x, k_{z_1}, k_{z_2} ;由于垂直度光路由五角棱镜构成,故需引入五角棱镜的角度误差 θ ,则平动轴间的垂直度误差如下:

$$\delta_{xy} = \theta_3 - (k_y - k_x), \quad (6)$$

$$\delta_{xz} = (\theta_5 + \theta_4 + \theta_8) - k_{z_1}, \quad (7)$$

$$\delta_{yz} = (\theta_2 + \theta_6 + \theta_7) - k_{z_2}, \quad (8)$$

其中: δ_{xy} 为 x 向平动轴与 y 向平动轴间的垂直度误差, δ_{xz} 为 x 向平动轴与 z 向平动轴间的垂直度误差, δ_{yz} 为 y 向平动轴与 z 向平动轴间的垂直度误差, θ_3 为第 λ_3 五角分光棱镜的偏差, $\theta_5, \theta_4, \theta_8$ 分别为 $\epsilon_2, \epsilon_1, \epsilon_5$ 五角棱镜的偏差, $\theta_2, \theta_7, \theta_8$ 分别为 $\lambda_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ 五角棱镜的偏差。将测得的斜度代入式(6)~式(8),则可获得三轴间的垂直度误差。

4 实验

为了验证装置的有效性,利用实物量具与本装置进行对比测量,用 E_n 值评价测量结果。

4.1 误差分析

本装置的误差主要来源于直线度拟合误差与五角棱镜引入的误差。由于五角棱镜本身的特性,其安装误差对其偏转角度没有影响^[25],故仅考虑五角棱镜的制造误差。

直线度拟合误差引入的不确定分量主要为直线度测量的不确定度。经查激光干涉仪测量直线度的上级校准证书,它在 1 m 内的测量误差为 $0.6 \mu\text{m}$,故引入的不确定度分量 $u_1 = 0.2''$ 。

本装置采用 Newport 的 BPP-25.4 五角棱镜,该棱镜偏转角的允许误差为 $\pm 30''$,不加修正值会引入较大的偏角误差。通过准直仪及多齿分度台对其棱镜的实际转角偏差进行测量^[26]并加以修正。

此处使用精度为 $0.5''$ 的自准直仪及精度 $0.2''$ 的多齿分度台对五角棱镜的偏角进行校准。考虑测量重复性及标准器的示值误差的影响,用 GUM 法^[27]评定,五角棱镜角度测量误差引入的

不确定度分量 $u_2=0.3''$, 故合成标准不确定度 u_c 为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.4'' \quad (9)$$

按 $k=2$, 则有:

$$U_1 = 2u_c = 0.8'' \quad (10)$$

测量 xy 轴间的垂直度时仅需使用 1 个五角棱镜, 而测量 z 轴的光路最多需要用到 3 个五角棱镜, $k=2$, 故 z 向垂直度测量的不确定度为:

$$U_z = 2 \times \sqrt{u_1^2 + 3u_2^2} = 1.2'' \quad (11)$$

4.2 对比验证

为了验证垂直度测量装置及方案在直线轴间垂直度误差测量方面的准确性和有效性, 实验采用经广东省计量院检定合格的 00 级花岗石直角尺 ($500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$) 与分辨力为 $0.1 \mu\text{m}$ 的测微表组合的实物量具作为对比标准。

基本操作为先将花岗石直角尺放置于工作台上, 利用测微表将直角尺的一侧与一平动轴调平, 再将长度计固定于另一平动轴上, 使测头与另一直角边接触, 通过读取测微表的示值变化量计算得到垂直度测量结果。测量过程中, 直角尺的位置保持固定, 不能移动或调整, 以确保测量结果的稳定性和准确性, 实验装置见图 6。

该方法的主要不确定度来源为: (1) 测微表读数误差的引入不确定度; (2) 00 级花岗石直角尺角度允许误差引入的不确定度。按国家检定规程《JJG 7-2004 直角尺检定规程》要求, $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的 00 级花岗石的垂直度允许误差为 $4 \mu\text{m}$, 换算为角度为 $1.44''$, 测微仪的测量精度为 $0.5 \mu\text{m}$, 按 $0.5 \mu\text{m}/\text{m}$ 换算为角度则为 $0.10''$, 读数误差的不确定度分量包含测量重复性引入的分量及测微表示值误差引入的标准不确定度分量。综合考虑以上不确定度来源, 用 GUM 法评定得到该方法的扩展不确定度为: $U_2=1.6''$, $k=2$ 。

此处选择一个三轴运动平台作为实验对象, 对其 x 轴与 y 轴间的垂直度误差进行测量。在实验过程中, 取 x 轴和 y 轴 400 mm 的距离进行了 6 组垂直度误差测量并计算平均值。测量结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 本装置测得的 x 和 y 轴间垂直度误差平均值为 $a_1=15.13''$, 而利用实物量具测得的 x 和 y 轴间垂直度误差平均值为 $a_2=13.72''$;

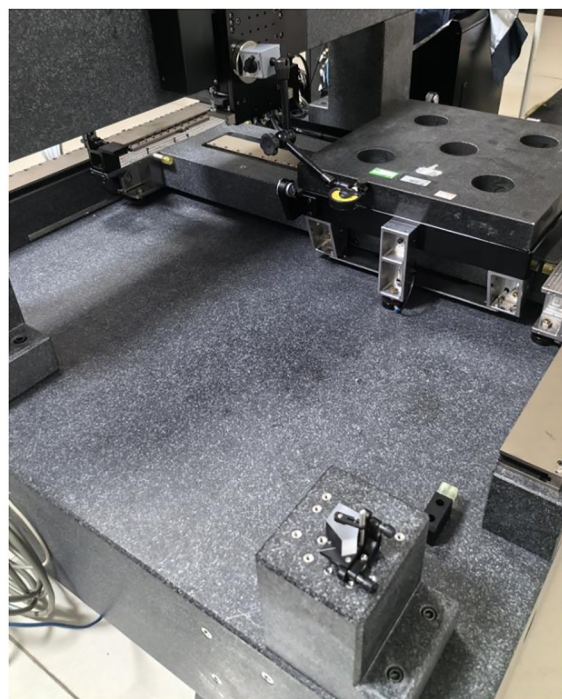


图 6 垂直度测量对比实验装置

Fig. 6 Photo of perpendicularity measurement comparison experiment devices

表 1 对比实验结果

Tab. 1 Comparison of experimental results (")

测量次数	实物量具	垂直度测量装置
1	13.81	15.12
2	14.43	15.43
3	13.40	15.22
4	13.71	15.12
5	13.65	14.87
6	13.32	15.02
平均值	13.72	15.13

两系统的测量结果对比偏差约为 $1.4''$ 。用归一化偏差^[28] E_n 评价测量结果, $E_n < 1$ 则满足要求。依据 E_n 值计算公式得到:

$$E_n = \frac{|a_1 - a_2|}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} = 0.8 \leq 1 \quad (12)$$

对比结果满足要求。

5 结 论

本文利用多轴激光干涉垂直度测量装置, 可以在多轴坐标运动系统中测得其工作空间中各

轴间的垂直度误差,并通过将光路与运动平台的运动系统相结合的方式实现在线测量。该方案为实现实时误差补偿提供了有力的保障,有助于多轴坐标运动系统的精度提升。最后,与

传统实物量具法进行对比测量,测得结果偏差为 $1.4''$,使用归一化偏差 E_n 进行评价,评价结果 $E_n < 1$,比对结果满足要求,证明了该装置的可行性。

参考文献:

- [1] 李焱,张磊,刘春时,等. 高速龙门五轴加工中心静刚度分析与结构优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(6): 9-11,16.
LI Y, ZHANG L, LIU C S, et al. Static rigidity analysis and structure optimization of 5-axis gantry-type machine center [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2011(6): 9-11,16. (in Chinese)
- [2] RAMESH R, MANNAN A M, POO N A. Error compensation in machine tools -- a review Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors [J]. *International Journal of Machine Tools Manufacture: Design, Research and Application*, 2000, 40(9):1235-1256.
- [3] 刘又午,章青,赵小松等. 基于多体理论模型的加工中心热误差补偿技术[J]. 机械工程学报, 2002, 38(1): 127-130.
LIU Y W, ZHANG Q, ZHAO X S, et al. Multi-body system-based technique for compensating thermal errors in machining centers [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(1): 127-130. (in Chinese)
- [4] 包丽,张洪军. 龙门式铣镗加工中心垂直度超差的工艺补偿研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(13): 14-18.
BAO L, ZHANG H J. Process compensation research of perpendicularity out-of-tolerance of gantry milling boring machining center [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2016, 44(13): 14-18. (in Chinese)
- [5] 林荣炜,程真英,何亚雄等. XY工作台六自由度误差在线测量和补偿[J]. 光学精密工程, 2023, 31(12): 1761-1773.
LIN R W, CHENG Z Y, HE Y X, et al. On-line six-degree-of-freedom errors measurement and compensation for XY stages [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(12): 1761-1773. (in Chinese)
- [6] 接明,王树杰,孙彦斌. 利用激光干涉仪对重大型数控机床两线性轴间垂直度测量方法的探索[J]. 计量技术, 2009(5): 32-36.
JIE M, WANG S J, SUN Y B. Research on the method of measuring perpendicularity between two linear axes of heavy and large CNC machine tools by laser interferometer [J]. *Metrology Technology*, 2009(5): 32-36. (in Chinese)
- [7] 李杰,陶文坚,徐强等. 一种基于激光干涉仪的大型龙门机床平动轴垂直度误差检测方法[J]. 制造技术与机床, 2020(10): 21-26.
LI J, TAO W J, XU Q, et al. A laser interferometer based linear axes squareness error identification method for large gantry machine tools [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2020(10): 21-26. (in Chinese)
- [8] CHEN G, YUAN J, NI J. A displacement measurement approach for machine geometric error assessment [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41(1): 149-161.
- [9] ZHU S, DING G, QIN S, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 52(1): 24-29.
- [10] WANG C. Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(10): 3933.
- [11] 李欢玲,吴洪涛. 三坐标数控机床的几何误差参数辨识[J]. 机械制造, 2008, 46(254): 5-7.
LI H L, WU H T. Error parameter identification for 3-axis NC machine tools [J]. *Machinery*, 2008, 46(254): 5-7. (in Chinese)
- [12] 任永强,杨建国,沈金华等. 基于体对角线的机床垂直度误差的高效测量分析[J]. 中国机械工程, 2005, 16(16): 1435-1438.
REN Y Q, YANG J G, SHEN J H, et al. Analysis on efficient measurement of squareness errors along body diagonals for machine tools [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(16): 1435-1438. (in Chinese)

- [13] 王阳恩. 一种小行程导轨垂直度测量方法[J]. 光电子·激光, 2013, 24(1): 119-122.
WANG Y E. Method for measuring the squareness of small-scale guide rails[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, 24(1): 119-122. (in Chinese)
- [14] 王磊杰,郭子文,叶伟楠,等. 超精密空间分离式外差利特罗平面光栅编码器位移测量系统[J]. 光学精密工程, 2022, 30(5): 499-509.
WANG L J, GUO Z W, YE W N, *et al.* Ultra-precision spatial-separated heterodyne Littrow grid encoder displacement measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(5): 499-509. (in Chinese)
- [15] BRYAN J B. A simple method for testing measuring machines and machine tools Part 1: Principles and applications [J]. *Precision Engineering*, 1982, 4(2): 61-69.
- [16] LAI J M, LIAO J S, CHIENG W H. Modeling and analysis of nonlinear guideway for double-ball bar (DBB) measurement and diagnosis [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 1997, 37(5): 687-707.
- [17] 沈云波,刘建亭,李济顺. 机床误差的正交光栅检测及分离[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 37-39.
SHEN Y B, LIU J T, LI J SH. Measurement and differentiating of machine tool errors by cross grid encoder [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2003, 24(3): 37-39. (in Chinese)
- [18] 朱俊豪,汪盛通,李星辉. 面向光刻机晶圆台的超精密光栅定位技术[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 320-336.
ZHU J H, WANG SH T, LI X H. Ultraprecision grating positioning technology for wafer stage of lithography machine [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 320-336. (in Chinese)
- [19] Test code for machine tools Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools: ISO 230-4: 2022 [S/OL]. [2024-03-13]. <https://www.iso.org/standard/79155.html>.
- [20] 韩林,米良,刘兴宝等. 应用激光跟踪仪的三坐标测量机几何误差检测方法[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 159-165.
HAN L, MI L, LIU X B, *et al.* Measurement method of geometric error of coordinate measuring machine using laser tracer [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(3): 159-165. (in Chinese)
- [21] 金黎雷. 激光干涉仪在XY工作台测量中的应用[J]. 电子工业专用设备, 2020(284): 37-41.
JIN L L. Application of laser interferometer in XY table measurement [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2020(284): 37-41. (in Chinese)
- [22] 蔡秀玉,刘根发. 一种五角分光棱镜: 201621335283.6[P]. 2017-06-13.
CAI X Y, LIU G F. A penta prism beamsplitter: 201621335283.6[P]. 2017-06-13. (in Chinese)
- [23] 郭敬滨,张国雄. 快速检测三坐标测量机垂直度误差的新方法[J]. 天津大学学报, 2003, 36(3): 293-295.
GUO J B, ZHANG G X. A method for fast measurement of squareness errors of CMM with Renishaw check gauge [J]. *Journal of Tianjin University*, 2003, 36(3): 293-295. (in Chinese)
- [24] 罗凯元,杨霖,郑文炜等. 一种三轴运动平台垂直度测量装置及方法: 202311450420.5[P]. 2023-12-29.
LUO K Y, YANG L, ZHENG W W, *et al.* A perpendicularity measurement device and method for 3-axis motion platform: 202311450420.5[P]. 2023-12-29. (in Chinese)
- [25] 温中凯,张庆君,李爽,等. 五棱镜角度制造误差对转向角的影响[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(3): 93-101.
WEN ZH K, ZHANG Q J, LI SH, *et al.* Impact analysis of the angular manufacturing error of pentaprism on the steering angle [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(3): 93-101. (in Chinese)
- [26] 孙振江. 五棱镜的测量及精度分析[J]. 宇航计测技术, 1985(4): 21-24.
SUN ZH J. Measurement and its accuracy analysis of the Penta-prism [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 1985(4): 21-24. (in Chinese)
- [27] 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1-2012 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2012.
Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement: JJF 1059.1-2012 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection

and Quarantine of the People's Republic of China, 2012. (in Chinese)

- [28] 计量比对: JJF 1117-2010 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010

Measurement Comparison: JJF 1117-2010 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2010. (in Chinese)

作者简介:



罗凯元(1994—),男,广东揭阳人,学士,工程师,2016年于广东技术师范大学获得学士学位,主要从事几何量计量方向的校准及研究工作。E-mail: 854386496@qq.com

通讯作者:



杨霖(1988—),男,江西东乡人,博士,高级工程师,2010年、2015年于清华大学分别获得学士和博士学位,主要从事光学精密计量测试、微纳米计量测试等方面的研究。E-mail: yanglin@ceprei.com