

引文格式: 李俊, 靳淇超, 陈泽忠, 等. 一种基于测量运动学建模的接触式测头测量坐标的方法[J]. 航空制造技术, 2025, 68(20): 148–154, 161.

LI Jun, JIN Qichao, CHEN Zezhong, et al. A new approach for measuring part coordinate of touch-trigger probe based on measurement kinetics modeling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(20): 148–154, 161.

一种基于测量运动学建模的接触式测头测量坐标的方法*

李俊¹, 靳淇超¹, 陈泽忠², 方涛³, 贺朝霞¹

(1. 长安大学, 西安 710000;

2. 浙江高档数控机床技术创新中心有限公司, 台州 312115;

3. 西北工业大学, 西安 710072)

[摘要] 在数控机床接触式测头执行零件测量及表面加工质量检测的过程中, 对于待测表面坐标范围已知的工件, 测量零件坐标的测量效率不高。为了解决这个问题, 提出了一种基于测量运动学建模的接触式测头轴向测量坐标的方法。根据机床数控系统的速度控制特性和接触式测头测量零件坐标的工作原理, 创建了测量运动学和测量误差的模型, 并提出了高速测量下补偿测量误差的方法。在一台 FANUC 数控系统的 Bridgeport 立式数控铣床上, 使用 Renishaw 接触式测头对该方法进行验证性试验。试验结果表明, 该方法能高速高精测量零件坐标; 与现有方法相比, 在测量精度一致的情况下, 该方法将测头测量工件的时间从 9.31 s 缩减到了 0.36 s。

关键词: 机内测量; 接触式测头; 高精度测量; 高速测量; 机床运动学

中图分类号: V261.2

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.20.148

A New Approach for Measuring Part Coordinate of Touch-Trigger Probe Based on Measurement Kinetics Modeling

LI Jun¹, JIN Qichao¹, CHEN Zezhong², FANG Tao³, HE Zhaoxia¹

(1. Chang'an University, Xi'an 710000, China;

2. Zhejiang Advanced CNC Machine Tool Technology Innovation Center, Taizhou 312115, China;

3. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] During the coordinate measurement and surface quality inspection processes conducted by touch-trigger probe on CNC machine tools, conventional measurement methodologies demonstrate suboptimal efficiency when acquiring workpiece coordinates for components with predefined surface coordinate ranges. To address this problem, an axial measurement coordinate optimization method based on kinematic modeling of the probe-workpiece interaction is proposed. First, based on the kinetics model of the CNC control system and the probe measuring mechanism, a probing kinetics model and a measuring error model are built. A high feedrate measuring error compensation method is proposed. Then a group of tests are carried out with a Renishaw OMP probe on a Bridgeport vertical milling machine to verify this proposed approach. The tests results demonstrate that this approach can precisely measure parts coordinates in high feedrate. Compared to the existing methods, this method reduced the measurement time for workpieces from 9.36 s to 0.36 s with the same measuring precision.

Keywords: On-machine measurement; Touch-trigger probe; Precise measuring; High feedrate measuring; Machine kinetics

* 基金项目: 陕西省自然科学基金青年项目(2021JQ-284)。

接触式测头在机测量系统的应用为工件的加工质量检测 and 机床几何误差补偿提供了一种有效方法^[1]。与离线测量方式相比,在机测量方式减少了工件转移与定位的时间,避免了二次装夹引起的定位误差,对保证加工质量,提高生产效率具有重要意义^[2-3]。

目前对于接触式测头的研究集中在提升测量精度和优化测量效率方面^[4]。在提升测量精度方面,Li等^[5]提出了接触式测头预行程误差的精确补偿方法,通过加权最小二乘法和双三次插值法构建测头的3D误差模型以提升测量精度;Wozniak等^[6]通过测量不同类型的测头在不同接口类型下传递触发信号的时间建立了预行程误差的数学模型;Li等^[7]主要考虑探针的弯曲和机床运动轴加速度,建立了刚柔耦合预行程误差模型以提高测量精度;杨勇明等^[8]在磨齿机在机测量系统中建立了基于BP神经网络的综合预行程误差预测模型,并通过试验验证了模型的有效性;Kong等^[9]建立了端面齿轮在机测量位置误差模型,通过补偿探针移动方向误差提高了测头测量端面齿轮齿面偏差的精度。

在优化测量效率方面,Fu等^[10]提出了一种基于图像的SMC量化模型,可在数控加工后对曲面的质量进行在机测量,提升了测量效率;Zhao等^[11]主要考虑测量速度、触发力方向、探针长度和待测工件的几何特征,提出了预行程误差的校准模型并进行了试验验证。庄其鑫等^[12]通过减少红宝石测球触碰点和控制机床旋转轴方向变化提升了测量精度和效率,并通过试验证明了方法的可行性;Onishi等^[13]提出了一种新型自校准方案,用于从测头测量误差中分离工件几何误差与机床运动学误差;Wu等^[14]提出了一种薄壁件自适应采样方法,在有限元方法的基础上建立了加工变形预测模型,提高了薄壁件测量的采样效率和结果稳定性。

上述研究从不同角度出发,提高了接触式测头的测量效率与测量精度,但是在使用接触式测头沿轴向方向测量工件坐标或检测其加工尺寸精度时,对于待测量表面位置坐标范围已知的工件,原有的测量方法效率相对较低,为了解决此问题,研究拟构建测头轴向测量运动学模型,提出测量效率优化及误差补偿方法,通过激光干涉仪标定关键运动学参数并设计在机测量试验验证方法的有效性。

1 测头在机测量运动学模型建立

测头测量的过程本质上是测头跟随机床各运动轴移动并与工件接触、触发的过程。在建立测头测量的运动学模型时,以机床各运动轴的运动学模型为基础,进而分析测量误差补偿方法和测量效率优化方法。

1.1 测头沿轴向方向测量的工作原理

接触式测头沿轴向方向测量的工作原理如图1所示。

具体步骤为:首先,测头移动至初始点 z_a 准备测量;然后,机床Z轴带动测头向下移动并加速到给定的测量速度 v_m ,在红宝石球接触工件之后测头保持接触工件上表面的位置不动;机床Z轴保持向下移动的状态并开始压缩探针,当压缩量达到一定值时测头触发并将触发信号发送给机床;机床接收到触发信号后停止向伺服电机输出插补脉冲,机床的Z轴开始减速并通过系统变量记录机床主轴跳转时主轴参考点的Z轴坐标为 z_f ;之后Z轴运动速度逐渐减至0并停止在 z_g 。工件上表面在机床坐标系下的Z坐标为 z_0 。

$$z_0 = z_f + \mu_m - l \quad (1)$$

式中, l 为测头沿Z轴测量触发时探针的长度; μ_m 为测量速度为 v_m 时的测量误差。

1.2 机床Z轴的运动学模型

不同数控机床的运动轴有不同的运动学模型,由机床加减速控制方式确定。本次研究以Bridgeport VMC 1000 XP立式铣床为例,其操作系统为Fanuc Series 18i-M,运动轴最大运行速度为15000 mm/min。Fanuc数控系统机床加减速控制的方式由机床的系统参数[#1610]确定,包括线性加减速控制方式、S型加减速控制方式和指数型加减速控制方式^[15-16]。根据该操作系统Fanuc Series 18i-M的系统参数确定其加减速控制方式为线性加减速控制方式。

对于采用线性加减速控制方式的机床,其会根据数控指令调整插补脉冲,并根据插补脉冲输出速度脉冲,当插补输出为零时开始减速^[17]。当目标进给速度小于机床的最大进给速度且运行距离足够时,机床Z轴会先在一定时间内匀加速到给定的进给速度,随后进入匀速运动阶段,当到达机床计算好的减速点时,开始匀减速并在目标点处停止运动^[18],其运动轴的运动学模型如图2所示。

机床分别在指令速度 v' 和 v'' 下运行相同的距离。其中, t_0 为初始时刻; t_1' 为机床Z轴加速至 v' 的时刻; t_2'

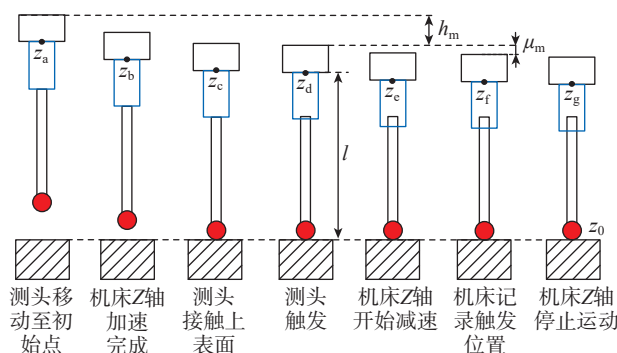


图1 测头沿轴向方向测量的工作原理

Fig.1 Working principle of probe measurement along the z-axis

和 t_3' 分别为机床 Z 轴以 v' 开始减速和最终停止运行的时刻; t_1'' 为机床 Z 轴加速至 v'' 的时刻; t_2'' 和 t_3'' 分别为机床 Z 轴以 v'' 开始减速和最终停止运行的时刻。机床运动轴在更大的运行速度下进给相同的距离需要的时间更短,效率更高。对于不同的目标进给速度,机床各运动轴加减速的时间由机床系统参数 [#1622] 确定,且保持不变。对于图 2 中的参数有如下关系。

$$t_1' - t_0 = t_1'' - t_0 \quad (2)$$

$$t_3' - t_2' = t_3'' - t_2'' \quad (3)$$

1.3 测头沿轴向方向测量时的运动学模型

综合考虑机床 Z 轴的运动学模型与测头沿轴向方向测量时的工作原理,建立测头沿轴向方向测量时的运动学模型,如图 3 所示。

记测量开始的时间为 t_a ; 机床 Z 轴加速到目标测量速度 v_m 的时间为 t_b ; 红宝石球接触工件上表面的时间为 t_c ; 测头触发的时间为 t_d ; 测头触发后将触发信号传递给机床,机床在 Δt_{de} 时间后接收到触发信号, Z 轴开始减速的时间为 t_e ; 机床记录触发位置的时间为 t_f ; 最终停止运行的时间为 t_g 。由式 (2) 与 (3) 可知,在不同的测量速

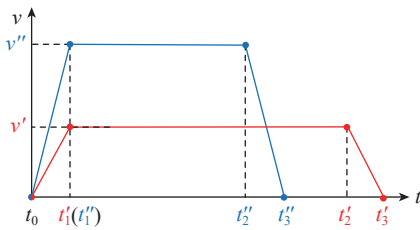


图 2 Bridgeport VMC 1000 XP 运动轴的运动学模型
Fig.2 Kinematic model of the Bridgeport VMC 1000 XP motion axes

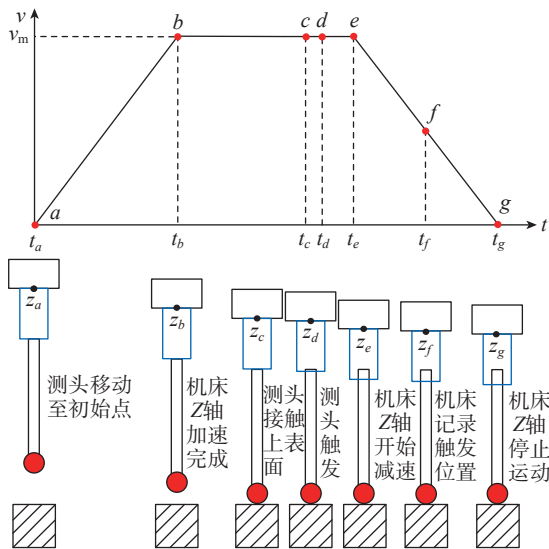


图 3 测头沿轴向方向测量的运动学模型
Fig.3 Kinematic model of probe measurement along the Z-axis

度下,机床 Z 轴加速的时间 Δt_{ab} 与减速的时间 Δt_{eg} 为定值;在不同的测量速度下,测头触发到机床 Z 轴开始减速的时间 Δt_{de} 与机床 Z 轴开始减速的时间到机床记录触发位置的时间 Δt_{ef} 是定值^[19-20],由信号传递方式和机床结构决定。

$$a_1 = \frac{v_m}{t_b - t_a} = \frac{v_m}{\Delta t_{ab}} \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{v_m}{t_g - t_e} = \frac{v_m}{\Delta t_{eg}} \quad (5)$$

式中, a_1 为 Z 轴加速时的加速度; a_2 为 Z 轴减速时的加速度。

根据测量运动学模型可以得到测量距离 h_m 和测量误差 μ_m 的数学表达式,即

$$h_m = \frac{1}{2} a_1 \cdot (t_b - t_a)^2 + v_m \cdot (t_d - t_b) = \frac{1}{2} v_m \Delta t_{ab} + v_m \Delta t_{bd} \quad (6)$$

$$\mu_m = v_m \Delta t_{de} + v_m \Delta t_{ef} - \frac{1}{2} a_2 \Delta t_{ef}^2 = v_m \cdot \left(\Delta t_{de} + \Delta t_{ef} - \frac{\Delta t_{ef}^2}{2 \Delta t_{eg}} \right) \quad (7)$$

2 测头测量效率的问题分析与优化方法

2.1 测头测量效率问题分析

由接触式测头沿轴向方向测量的运动学模型可知,机床 Z 轴加速到目标测量速度后会在此速度下匀速接近待测工件。为了避免测头在机床运动轴加速的过程中触碰待测工件^[21],用户测量时会选择相对保守的测量速度与测量距离,导致机床运动轴保持长时间的匀速运动状态,极大影响了测量效率。实际应用时只需保证测头在匀速状态下以目标测量速度接触待测工件即可。

在触发力方向保持不变的情况下,接触式测头的测量误差只与测量速度相关。对测量参数优化后,需根据式 (7) 预测对应测量速度下的测量误差,并对测量结果进行补偿,以保证测量精度。

2.2 测头测量效率优化方法

由接触式测头沿轴向方向测量的运动学模型可知,机床 Z 轴加速的时间 Δt_{ab} 、测头触发到机床 Z 轴开始减速的时间 Δt_{de} 与机床 Z 轴减速的时间 Δt_{eg} 为定值,提高测量效率等效于减小 t_d 与 t_b 的差。

测头沿着轴向方向测量时,测头接触上表面至测头触发需要的距离很短,可以把 cd 近似看作同一点, Δt_{cd} 忽略不计。可以通过增大测量速度或者减小测量距离来减小 Δt_{bd} 的值,以提高测量效率,当 Δt_{bd} 的值趋近于 0 时取得最小测量时间 t_{min} 。

$$t_{\min} = \Delta t_{ab} + \Delta t_{de} + \Delta t_{eg} \quad (8)$$

保持测量距离 h_m 不变, 不断增大测量速度, 当测量速度为 v'_m 时加速运行的距离为 S_1 , 机床 Z 轴加速到 v'_m 后与待测工件上表面之间的距离为 S_2 , Δt_{bd} 的值减小。继续增大测量速度至 v''_m 时, 满足式 (8) 的条件, 此时加速运行的距离为 S_3 。增大测量速度之后 Z 轴的运行情况如图 4 所示, 其中的参数关系为

$$h_m = S_1 + S_2 = S_3 \quad (9)$$

在相同的测量距离下, 增大测量速度, 保持加速的时间不变, 匀速运行的时间变短, Δt_{bd} 的值变小。当 b 、 d 两点重合时, 可取得最大可实现的测量速度 v''_m 。

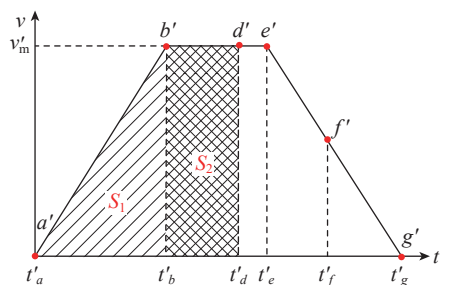
$$v''_m = \frac{2h_m}{\Delta t_{ab}} \quad (10)$$

保持测量速度 v_m 不变, 不断减小测量距离, 当测量距离为 h_1 时, 加速运行的距离为 S_4 , b 、 d 之间的距离为 S_5 , Δt_{bd} 的值减小; 继续减小测量距离至 h_2 时, 满足式 (8) 的条件, 此时 Δt_{bd} 的值为 0, 加速运行的距离为 S_4 。减小测量距离之后, 机床 Z 轴的运行情况如图 5 所示, 其中的参数关系为

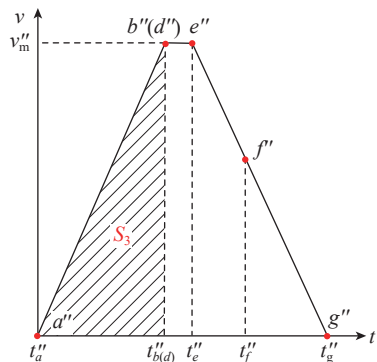
$$h_1 = S_4 + S_5 \quad (11)$$

$$h_2 = S_4 \quad (12)$$

在相同的测量速度下, 减小测量距离, 加速的时间保持不变, 匀速运行的时间变短, Δt_{bd} 的值变小。在测



(a) 测量速度为 v'_m 时, Z 轴运行的时间-速度关系



(b) 测量速度为 v''_m 时, Z 轴运行的时间-速度关系

图 4 提高测量速度之后 Z 轴的时间-速度关系

Fig.4 Time-velocity relationship of the Z-axis after increasing measurement speed

头加速到给定的测量速度时恰好触发的情况下, 可取得实现测量速度 v_m 需要最小的测量距离 h_2 。

$$h_2 = \frac{1}{2} v_m \Delta t_{ab} \quad (13)$$

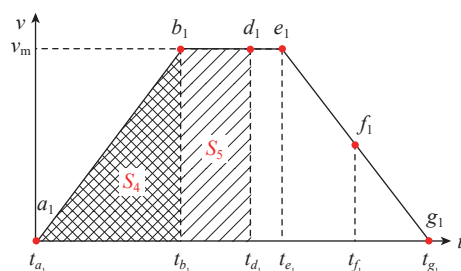
3 测头测量运动学模型参数标定

由测头沿轴向方向测量的运动学模型和式 (7)、(10)、(13) 可知, 要确定一定测量距离下可实现的最大测量速度和加速到某一测量速度需要的最小测量距离, 需要 Δt_{ab} ; 要确定测量误差, 需要标定 Δt_{de} 、 Δt_{ef} 、 Δt_{eg} 。下面设计激光干涉仪标定试验, 对运动学参数进行标定。

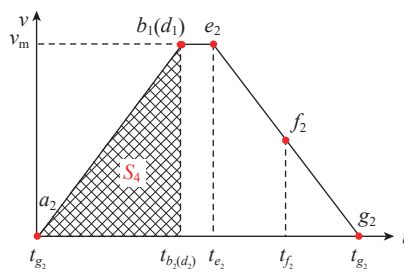
3.1 标定试验设计

为了得到这些参数, 试验以 Bridgeport VMC 1000 XP 为试验载体 (其操作系统为 FANUC Series 18i-M), 以 Mitutoyo 60.012 mm 环规为待测工件, 通过标准棒标定环规上表面在机床坐标系下的 Z 坐标, 在手轮模式中采用 Renishaw OMP40-2 光学机内测头测量环规的上表面, 以确定测头触发时探针的长度。编写测量程序使用 Renishaw OMP40-2 光学机内测头在不同测量距离和测量速度下测量环规的上表面, 同时使用 Renishaw XL80 激光干涉仪 (频率 50000 Hz) 记录测量过程中机床 Z 轴的运行情况, 并将数据导入到电脑中。测量参数选择如表 1 所示。

使用测头在 Bridgeport VMC 1000 XP 中进行测量时, 机床会将测头触发时 Z 轴的位置记录在系统变量 [#5063] 中, 试验环境如图 6 所示。



(a) 测量距离为 h_1 时, Z 轴运行的时间-速度关系



(b) 测量距离为 h_2 时, Z 轴运行的时间-速度关系

图 5 减小测量距离之后 Z 轴的时间-速度关系

Fig.5 Time-velocity relationship of the Z-axis after reducing measurement distance

在测量距离分别为 0.3 mm、0.5 mm、0.8 mm 的情况下,分别以不同的测量速度进行测量,每次测量结束后记录机床系统变量 [#5063] 和测量结束时机床 Z 轴的位置。利用激光干涉仪记录的数据,绘制测头测量过程中机床 Z 轴运动的时间-位移和时间-速度关系图,并在图中标注测头触发的位置与机床记录的触发位置,如图 7 所示。

3.2 试验数据处理

在不同测量距离与测量速度下,采集到机床 Z 轴的运行情况。通过试验数据得到各个测量情况下机床 Z 轴的运动学模型参数,如图 8 所示。

对各个测量距离和测量速度下的数据去除离群点,取平均值之后汇总,得到测头测量运动学模型参数取值,见表 2。

4 试验验证

Renishaw 测量程序中的测量距离为 4 mm,测量速度为 30 mm/min。由式 (10) 和表 2 可知,在测量速度为 30 mm/min 时,可以将测量距离调整为 0.019 mm;在测量距离为 4 mm 时,可以将测量速度调整为 6283 mm/min。但为了保护测头,试验时选取测量速度为 1000 mm/min。

表 1 激光干涉仪标定试验测量参数选择
Table 1 Selection of measurement parameters for laser interferometer calibration experiment

测量参数	取值
测量距离/mm	0.3, 0.5, 0.8
测量速度/(mm/min)	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900



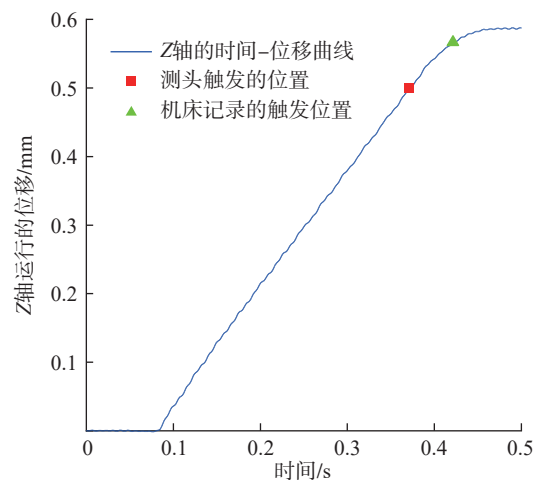
图 6 使用激光干涉仪标定测头测量运动学模型参数
Fig.6 Calibration of kinematic model parameters for probe measurement with a laser interferometer

将工件坐标系原点设置在待测工件上表面,选取 10 个测量点,分别编号 1~10,其在工件坐标系下的坐标如表 3 所示。

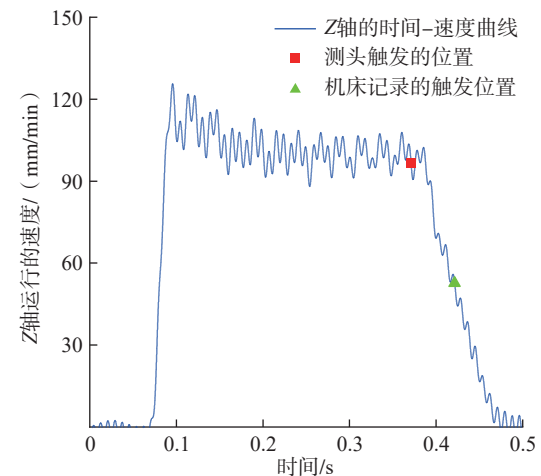
以机床坐标系的原点为测量程序的起始点和终止点,分别采用 Renishaw 测量程序和优化测量参数之后的测量程序测量 10 个测量点,通过机床 PMC 计时器记录测量时间消耗,测头以测量初始点为起点,以测头向下运动停止为终点进行测量,如图 9 所示。

测量时通过机床系统参数记录各个测量程序的测量结果和测量时间,根据式 (7) 分别对不同程序的测量结果进行补偿并将结果汇总,如图 10 所示。

由图 10 (a) 可知,在优化测量距离和测量速度之后,接触式测头仍可以保持较高的测量精度。由图 10 (b) 可知,在优化测量参数之前测量程序测量一个点平均需要 9.31 s,在优化测量参数之后测量一个点平均需要 0.36 s。



(a) $h=0.5$ mm, $v_m=100$ mm/min 时 Z 轴运行的时间-位移曲线



(b) $h=0.5$ mm, $v_m=100$ mm/min 时 Z 轴运行的时间-速度曲线

图 7 测头测量过程中机床 Z 轴的运行情况

Fig.7 Behavior of the Z-axis during probe measurement

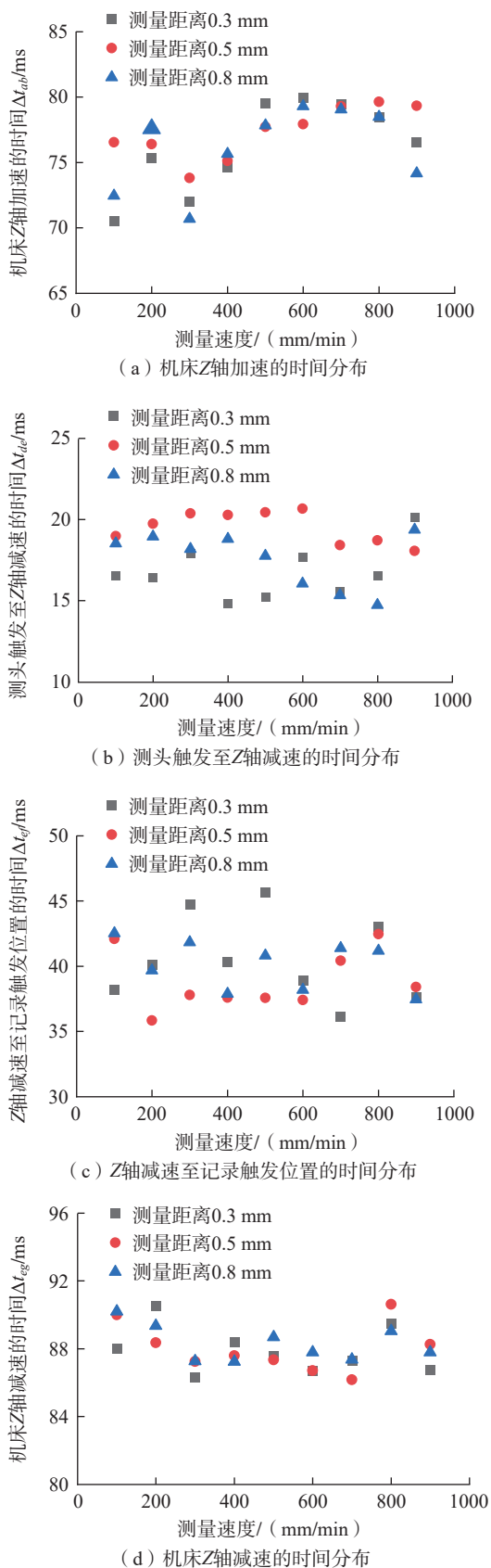


图8 不同测量速度下机床Z轴的运动学模型参数分布
Fig.8 Distribution of kinematic model parameters for the Z-axis under different measurement conditions

表2 测头测量运动学模型参数取值

Table 2 Values of kinematic model parameters of probe measurement

序号	变量	参考值/ms	测量值/ms
1	Δt_{ab}	90	76.39
2	Δt_{de}	—	19.05
3	Δt_{ef}	—	39.07
4	Δt_{eg}	90	88.18

表3 各个测量点在工件坐标系下的坐标

Table 3 Coordinates of each measurement point in the workpiece coordinate system

序号	X 坐标/mm	Y 坐标/mm	Z 坐标/mm
1	-25	-5	0
2	-20	-5	0
3	-15	-5	0
4	-10	-5	0
5	-5	-5	0
6	5	5	0
7	10	5	0
8	15	5	0
9	20	5	0
10	25	5	0

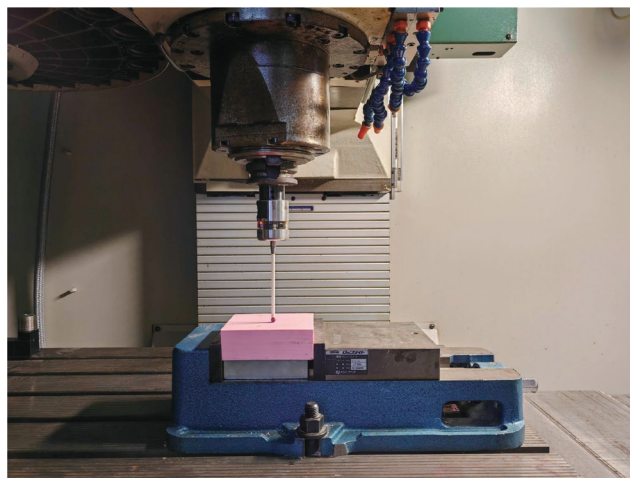


图9 接触式测头测量待测点

Fig.9 Using probe to measure the measurement points

综上所述,在测头沿轴向方法测量零件坐标时,本文所提方法可以在不影响测量精度的前提下提高测量效率。同时,该方法也可应用于多轴机床在机测量曲面零件,即控制测头沿着曲面法矢方向测量零件。

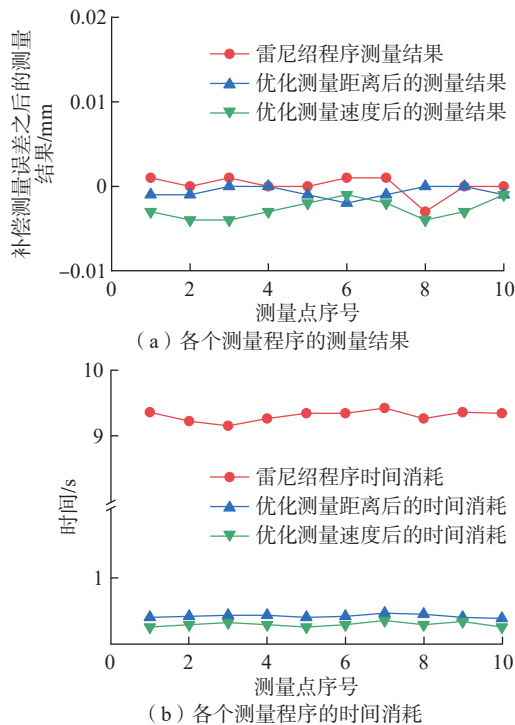


图 10 各个测量程序的测量结果和时间消耗
Fig.10 Measurement results and time consumptions of each measurement procedure

5 结论

(1) 综合接触式测头测量原理与机床运动轴运动学模型,建立了测头沿轴向方向测量的运动学模型。

(2) 根据接触式测头测量运动学模型,对测量误差进行了分析并提出了补偿方法。试验表明,当对测量结果进行误差补偿后,测量结果偏差均在 $4\ \mu\text{m}$ 之内,验证了该方法的有效性。

(3) 提出了基于接触式测头测量运动学模型的测量效率优化策略。试验表明,当对测量距离和测量速度进行优化后,系统在保持测量精度的前提下,该方法将测头测量工件的时间从 $9.31\ \text{s}$ 缩减到了 $0.36\ \text{s}$,验证了该方法的有效性。

参考文献

[1] DU Z C, GE G Y, XIAO Y K, et al. Modeling and compensation of comprehensive errors for thin-walled parts machining based on on-machine measurement[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(11): 3645–3656.

[2] 李禾, 贺永海, 袭萌萌, 等. 触发式测头在机标定方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(1): 34–36, 42.

LI He, HE Yonghai, XI Mengmeng, et al. Research on the on-machine calibration method of touch trigger probe based on diamond lathe[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(1): 34–36, 42.

[3] 胡思博, 乔虎, 张力, 等. 基于多色集合理论的机内测量规划研究[J]. 制造技术与机床, 2023(10): 158–163.

HU Sibao, QIAO Hu, ZHANG Li, et al. Research on in-machine measurement planning based on polychromatic sets theory[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(10): 158–163.

[4] ZHUANG Q X, WAN N, GUO Y H, et al. A state-of-the-art review on the research and application of on-machine measurement with a touch-trigger probe[J]. Measurement, 2024, 224: 113923.

[5] LI S M, ZENG L, FENG P F, et al. Accurate compensation method for probe pre-travel errors in on-machine inspections[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(5): 2401–2410.

[6] WOZNIAK A, JANKOWSKI M. Wireless communication influence on CNC machine tool probe metrological parameters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1): 535–542.

[7] LI S M, FENG P F, ZENG L, et al. A rigid-flexible coupling pretravel error model for a touch-trigger probe in an on-machine inspection system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(9): 2991–3003.

[8] 杨勇明, 汪中厚, 刘雷, 等. 磨齿机在机检测系统的测头综合预行程误差建模[J]. 机械工程学报, 2022, 58(21): 250–265.

YANG Yongming, WANG Zhonghou, LIU Lei, et al. Modeling of probe comprehensive pre-travel error for on-machine inspection system of gear grinder[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(21): 250–265.

[9] KONG W J, DONG J P, XIAO Y L, et al. A novel method to improve on-machine measurement accuracy for face gear tooth flank deviation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 128: 19–40.

[10] FU G C, SHENG B Y, LU Y K, et al. An image-based quantitative model of surface measurement complexity for on-machine measurement[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(5): 1473–1490.

[11] ZHAO B H, GAO F, LI Y. Study on pre-travel behaviour of touch trigger probe under actual measuring conditions[J]. Procedia CIRP, 2015, 27: 53–58.

[12] 庄其鑫, 莫蓉, 万能, 等. 基于可行图的五轴在机测量探针轴向优化方法[J]. 航空学报, 2020, 41(5): 423403.

ZHUANG Qixin, MO Rong, WAN Neng, et al. Stylus orientation optimization method in five-axis on-machine measurement based on feasible graph[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(5): 423403.

[13] ONISHI S, IBARAKI S, YAMAGUCHI M, et al. A self-calibration scheme for two-dimensional free-form probing measurement under the assumption of rigid-body machine kinematic model[J]. Measurement, 2023, 222: 113586.

[14] WU L, WANG A M, XING W H, et al. Adaptive sampling method for thin-walled parts based on on-machine measurement[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(5): 2577–2592.

[15] 王雪晴. 五轴数控机床后置处理及速度控制问题研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.

WANG Xueqing. Research on five-axis CNC machine tool post-processing and speed control[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.

[16] 高伟强, 江小成, 刘汝发, 等. 基于多项式的S曲线加减速运动控制算法构建[J]. 机床与液压, 2019, 47(4): 124–128.

GAO Weiqiang, JIANG Xiaocheng, LIU Rufa, et al. Construction of motion control algorithm for S-shaped curve acceleration and deceleration based on polynomial[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(4): 124–128.

(下转第 161 页)

compressive asymmetry in creep ageing behavior of Al-Cu alloy under different stress levels[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 843: 156157.

[22] LI Y, SHI Z, LIN J, et al. Experimental investigation of tension and compression creep-ageing behaviour of AA2050 with different initial tempers[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 657: 299-308.

[23] ZHANG Q, ZHANG W Z, LIU Y Y. Evaluation and mathematical modeling of asymmetric tensile and compressive creep in aluminum alloy ZL109[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 628: 340-349.

[24] 杨松涛, 李继文, 魏世忠, 等. 纯铝板坯高温塑性变形行为及本构方程[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(9): 2126-2131.

YANG Songtao, LI Jiwen, WEI Shizhong, et al. Pyroplastic deformation behavior of pure molybdenum plate slab and constitutive equation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(9): 2126-2131.

[25] GUI Y W, LI Q A. Creep behaviors and microstructure evolution of Mg-5Y-2Nd-3Sm-0.5Zr alloys[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(10): 106531.

[26] OROZCO-CABALLERO A, MENON S K, CEPEDA-JIMÉNEZ C M, et al. Influence of microstructural stability on the creep mechanism of Al-7wt% Si alloy processed by equal channel angular pressing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 612: 162-171.

[27] WEERTMAN J. Steady-state creep of crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1957, 28(10): 1185-1189.

[28] LI L W, ZHOU D H, WEI C B, et al. Microstructure evolution and mechanical properties at ambient and elevated temperatures of in situ TiB₂/2219Al matrix composites during cold rolling[J]. *Metals and Materials International*, 2024, 30(10): 2791-2807.

[29] MILLIGAN B, MA D, ALLARD L, et al. Crystallographic orientation-dependent strain hardening in a precipitation-strengthened Al-Cu alloy[J]. *Acta Materialia*, 2021, 205: 116577.

[30] MURAYAMA M, HORITA Z, HONO K. Microstructure of two-phase Al-1.7 at% Cu alloy deformed by equal-channel angular pressing[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(1): 21-29.

[31] OH-ISHI K, HASHI Y, SADAKATA A, et al. Microstructural control of an Al-Mg-Si alloy using equal-channel angular pressing[J]. *Materials Science Forum*, 2002, 396-402: 333-338.

[32] 许晓嫦. 强变形诱导铝合金析出相低温回溶现象及应用基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.

XU Xiaochang. Basic investigation on the phenomenon of severe plastic deformation induced re-dissolution of precipitated phases at low temperature and its application[D]. Changsha: Central South University, 2008.

[33] VASIL'EV L S, LOMAEV I L, ELSUKOV E P. On the analysis of the mechanisms of the strain-induced dissolution of phases in metals[J]. *The Physics of Metals and Metallography*, 2006, 102(2): 186-197.

[34] 孙志强, 周文龙, 陈国清, 等. 时效成形对2324铝合金组织及性能的影响[J]. *材料工程*, 2009, 37(10): 73-76, 80.

SUN Zhiqiang, ZHOU Wenlong, CHEN Guoqing, et al. Effect of age-forming on microstructures and properties of 2324 Al alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009, 37(10): 73-76, 80.

[35] 彭北山, 刘志义, 宁爱林, 等. 应变能对Al-Cu合金强变形诱导析出相回溶的影响[J]. *材料热处理学报*, 2008, 29(6): 107-110.

PENG Beishan, LIU Zhiyi, NING Ailin, et al. Effect of strain energy

on sever plastic deformation induced dissolution of precipitation phase in Al-Cu alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, 29(6): 107-110.

通信作者: 王建国, 高级工程师, 主要从事电力设备失效分析研究。

(责编 阳光)

(上接第 147 页)

[17] 王洪纲. 热弹性力学概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.

WANG Honggang. Introduction to thermo-elasticity[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989.

[18] 陶文铨. 传热学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.

TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019.

[19] TAKEUTI Y, TANIGAWA Y. A new numerical method for transient thermal stress problems[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1979, 14(7): 987-1000.

[20] 包天南. 考虑热弹耦合效应的涡轮导向叶片热冲击数值研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.

BAO Tiannan. Numerical study on thermal shock of turbine guide vane considering thermoelasticity coupling effect[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018.

通信作者: 赵庆军, 研究员, 博士, 研究方向为叶轮机械气动热力学。

(责编 阳光)

(上接第 154 页)

[17] 陈绍春. 数控系统高速高精加工算法技术研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.

CHEN Shaochun. Research on high-speed and high-precision machining algorithm technology of CNC system[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.

[18] 程膺豪, 贾衡, 马欢, 等. 数控系统S型加减速控制方法研究[J]. *机电工程技术*, 2023, 52(4): 173-176, 215.

CHENG Yinghao, JIA Heng, MA Huan, et al. Research on S-type acceleration and deceleration control method of NC system[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2023, 52(4): 173-176, 215.

[19] 陈佳豪. 数控机床在机测量技术研究与应用[D]. 武汉: 湖北大学, 2024.

CHEN Jiahao. Research and application of on-machine measuring technology for CNC machine[D]. Wuhan: Hubei University, 2024.

[20] 孟士琦. 叶片压型模具在机测量系统分析与开发研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.

MENG Shiqi. Analysis and development of blade pressing molds on-machine measurement system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.

[21] QIAN X M, YE W H, CHEN X M. On-machine measurement for touch-trigger probes and its error compensation[J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 375-376: 558-563.

通信作者: 靳淇超, 高级工程师, 博士, 研究方向为先进制造技术。

(责编 阳光)