

# 基于车铣复合机床的凸轮轴在线测量工艺包设计

张德宝<sup>1</sup>, 魏兆成<sup>1\*</sup>, 彭东彪<sup>2</sup>, 刘宇<sup>1</sup>, 黄振楠<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116081; 2. 通用技术机床工程研究院, 辽宁 沈阳 110027)

**摘要:** 凸轮轴是发动机中的关键部件, 其轮廓加工精度直接影响发动机的性能, 现有凸轮轴在线检测方法受现场测量环境的影响无法进行广泛工程应用, 对此, 面向车铣复合机床提出了一种基于接触式探头的高效、高精度凸轮轴在线测量工艺系统。首先, 通过曲率差值方法对凸轮曲线进行测量点的选取, 确保测量点能够根据凸轮曲线的曲率变化自适应分布; 然后, 对选取的凸轮表面测量点进行测量路径规划, 并对探头球心坐标值进行半径补偿; 最后, 借助 Matlab 软件开发了相应的在线测量工艺包, 并在车铣复合机床上开展凸轮轴的在线测量实验。将得到的结果与三坐标测量机的测量结果进行对比, 结果表明在线测量与三坐标测量机上得到的结果误差均值为 0.009 2 mm, 验证了该方法的可行性和可靠性, 为后续的加工误差补偿提供了数据基础。

**关键词:** 在线测量; 工艺包设计; 车铣复合机床; 凸轮轴

**中图分类号:** TH161.11

**文献标识码:** A

**doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025077

**引用格式:** 张德宝, 魏兆成, 彭东彪, 等. 基于车铣复合机床的凸轮轴在线测量工艺包设计[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 672-679.

ZHANG Debao, WEI Zhaocheng, PENG Dongbiao, et al. Design of on-line measurement process package for camshafts based on mill-turn machines[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(6): 672-679.

## Design of On-Line Measurement Process Package for Camshafts Based on Mill-Turn Machines

ZHANG Debao<sup>1</sup>, WEI Zhaocheng<sup>1\*</sup>, PENG Dongbiao<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, HUANG Zhennan<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China;

2. General Technology Machine Tool Engineering Research Institute, Shenyang 110027, China)

**Abstract:** Camshaft is a key component in the engine, and its contour machining accuracy directly affects the performance of the engine. Existing on-line camshaft inspection methods are affected by the on-site measurement environment and can not be widely used in engineering applications, and in this regard, a highly efficient and high-precision camshaft on-line measurement system based on the triggering probe is proposed for the milling and turning composite machine tool. Firstly, the measurement points were selected by the curvature difference method to ensure that the measurement points can be distributed adaptively according to the curvature change of the cam curve; The selected cam surface measurement points are then subjected to measurement path planning and radius compensation of the probe sphere coordinates; Finally, the corresponding on-line measurement package was developed by the help of Matlab software and the on-line measurement experiments were carried out for the camshafts on the mill-turn machine tool. The results obtained were compared with those of the Coordinate Measuring Machine, and the results showed that the mean value of the error between the online measurement and the results obtained

收稿日期: 2024-12-30

作者简介: 张德宝(2000—), 男, 硕士生, 主要从事机床在线测量研究。E-mail: zhangdebao@mail.dlut.edu.cn。

\* 通信作者: 魏兆成(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事精密高效数控加工技术研究。E-mail: wei\_zhaocheng@dlut.edu.cn。

on the Coordinate Measuring Machine was 0.009 2 mm, which verified the reliability and feasibility of the method and foundation for subsequent milling error compensation.

**Key words:** on-line measurement; process package design; mill-turn machine tool; camshaft

## 0 引言

凸轮轴是发动机中的关键零部件,主要用于控制气门的开闭时刻,进而影响发动机的性能和燃油效率<sup>[1-2]</sup>。随着汽车发动机技术的不断进步,对凸轮轴的尺寸精度、几何形状等提出了更高要求,因此,亟需高效、便捷、高精度的检测技术来保证加工要求。在线测量技术<sup>[3-5]</sup>可有效减少装夹次数与辅助时间,且在加工后即可对零件尺寸精度进行及时检测,并反馈给加工现场来指导后续加工,在凸轮轴检测方面具有广泛的应用前景。

目前,国内外已有部分学者针对凸轮轴的在线测量进行了相关研究,主要涵盖非接触式和接触式测量两种方式,并且取得了一定成果。刘云龙等<sup>[6]</sup>基于空间解析几何理论和激光三角原理,提出了一种凸轮轴几何误差非接触在机测量方法,并设计了相关测量系统与数据处理程序。胡正乙<sup>[7]</sup>针对发动机凸轮轴的非接触检测,搭建了由线激光器、摄像机及计算机组成的线结构光测量系统,提出了一种基于线结构光的盘形凸轮测量方法。Ayub等<sup>[8]</sup>针对汽车凸轮轴开发了一种使用机器视觉的圆度误差在线检测系统,该系统由机器视觉、夹具、照明设备和用于圆度评估的图像处理软件组成。Cheng等<sup>[9]</sup>利用平面晶体产生高平行深度扫描激光的原理,开发了一款新型光电扫描曲轴和凸轮轴的在线测量系统。尽管上述凸轮轴非接触式在线测量方法具有测量效率高、过程简洁的优点,但是容易受测量环境及被测物体表面光泽和透明度等因素的影响,故这些方法还未广泛适用。接触式测量通常采用接触式测头来实现表面检测,测量精度更高且不易受测量环境及被测物体表面状态等因素的影响,然而,对于小批量、多品种凸轮轴的测量,测量效率还较低,主要依赖手动编程来完成。李静等<sup>[10]</sup>为了检测复杂轴类零件非圆轮廓表面,提出了一套接触式随动测量方案,并建立了随动接触测量装置引起的凸轮升程误差评估模型。该测量方法具有高精度及一次安装可完成检测的优点,但设备价格昂贵,成本较高。叶沐霖<sup>[11]</sup>搭建了一套基于数控磨床的凸轮轴升程误差在位测量装置并提出相应的升程误差在位检测方法,该装置充分利用机床结构特征,通过G代码控制测

头移动实现自动化在位测量,但是需要依靠手动编程来实现。

车铣复合机床因其高效、高精度和高柔性的优势,特别适用于凸轮轴等零件的加工<sup>[12]</sup>,基于这一背景,本文面向车铣复合机床提出了一种基于接触式探头的高效、高精度凸轮轴在线测量工艺系统。该系统只需输入被测凸轮轴的尺寸参数,即可自动生成相应的测量路径文件,无需操作人员进行手工编程。将测量文件导入到机床后,利用自带的高精度探头便可执行测量过程,操作方便、快捷。此外,该方法将凸轮轴的加工与测量相结合,无需中途拆卸,充分发挥了车铣复合机床加工凸轮轴的优势,此系统为后续的加工误差补偿提供了重要的数据支持,有助于确保凸轮轴加工精度的提升。

## 1 数控机床在线测量原理

数控机床在线测量系统通常由三部分组成:数控机床本体、计算机和测头系统<sup>[13]</sup>。工作原理如图1所示。触发式测头类似于加工刀具,通常存放在刀库中,使用时能够通过程序自动调出并安装在机床主轴上。具体实现过程如下:首先,在计算机上生成相应的测量程序,并通过串行通讯接口将测量程序传输到机床的数控系统,数控系统通过跳步指令控制测头按照预设路径移动,当测头接触到被测工件表面并且触发力达到设定阈值时,会产生触发信号并传递至接收器,接收器将信号传送到数控系统<sup>[14]</sup>;此时,数控系统会记录下当前测头中心的坐标值并通过串行接口将坐标值反馈到计算机;接下来,系统继续执行剩余的测量程序,直至完成全部检测任务。

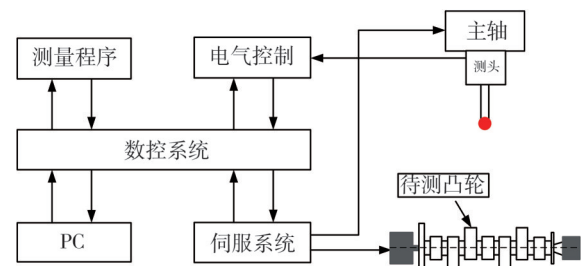


图1 数控机床在线测量工作原理

Fig. 1 Working principle of on-line measurement on CNC machine tools

## 2 在线测量关键技术

### 2.1 测点选取

每个工件的几何特征(如尺寸、形状、位置公差等)都有一定的关键点或特征,这些点反映了工件的主要质量指标。在线测量过程中,测量点的选取需要能够覆盖工件的关键几何特征,以确保测量结果能够准确反映工件加工之后的实际状态。如果测点过多,会导致测量过程过于繁琐,影响生产效率;如果测点过少,又可能无法全面评估工件的精度。因此,合理选择测点可以在保证测量精度的前提下,尽量减少测量点的数量,节约测量时间,提高生产效率。

在对凸轮轴曲面进行测量时,可以按照“曲面-曲线-测量点集”的次序进行分解,最终得到所需要的测点集合。由于凸轮曲面可以看作是通过一条凸轮型线进行阵列生成的,因此对曲面进行采样时,实际上只需对该凸轮型线进行采样点规划,从而使整个测量过程更加简化,并且可以有效地利用该曲线的几何特性来确定测量点的位置,最终生成精准的测量点集,如图2所示。

由图2(b)中可以看出,使用等间距法生成测量点时,凸轮基圆段曲线也布置了大量的测点,根据三个不共线的点可以确定唯一一个圆原理,基圆段曲线部分的测量点冗余较多,需要进行精简。曲率差值法是一种基于曲线上不同点的曲率变化来选择测量点的自适应分布方法。该方法通过分析曲率差异,在曲率变化较大的区域增加采样点的密度,而在曲率变化较为平缓的区域减少采样点的密度,从而实现测量点的自适应分布。

该方法的实现步骤如下:1)在曲线上根据相应的间距均匀地生成多个离散点;2)选取相邻三点 $P_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ 、 $P_i(x_i, y_i)$ 、 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 拟合得到一个圆,并根据下列公式求出该拟合圆的半径 $r_i$ 后,将其近似作为 $P_i$ 点处的曲率半径,则该点处的曲率 $\rho_i$ 便可以求出,依次类推计算出每个离散点处对应的曲率值;3)计算相邻两个离散点的曲率差值,设定所要保留的离散点数目。

$$\begin{cases} a_i = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}, \\ b_i = \sqrt{(x_i - 1 - x_{i+1})^2 + (y_i - 1 - y_{i+1})^2}, \\ c_i = \sqrt{(x_i - 1 - x_i)^2 + (y_i - 1 - y_i)^2}, \end{cases} \quad (1)$$

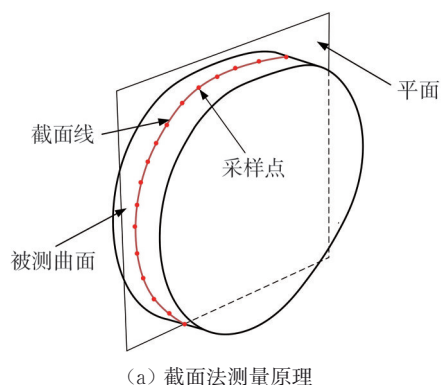
$$S_i = \frac{a_i + b_i + c_i}{2}, \quad (2)$$

$$A_i = \sqrt{S_i(S_i - a_i)(S_i - b_i)(S_i - c_i)}, \quad (3)$$

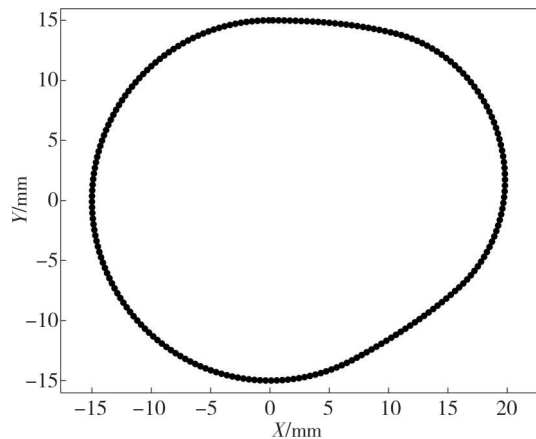
$$r_i = \frac{a_i b_i c_i}{4A_i}, \quad (4)$$

$$\rho_i = \frac{1}{r_i}, \quad (5)$$

式中: $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 分别为3个离散点之间的距离值; $S_i$ 为3个离散点距离值之和的平均值; $A_i$ 为3个离散点所围三角形的面积; $r_i$ 为3个离散点所围三角形外接圆的半径; $\rho_i$ 为 $i$ 点处的曲率。



(a) 截面法测量原理



(b) 采样点均匀分布

图2 “曲面-曲线-测量点集”采样点生成

Fig. 2 Sample point generation of “surface-curve-measurement point set”

图3所示为根据曲率差值法选取测量点的原理。图中, $P_{i-1}$ 、 $P_i$ 、 $P_{i+1}$ 、 $\dots$ 为曲线上分布的离散点,以相邻的三点 $P_{i-1}$ 、 $P_i$ 、 $P_{i+1}$ 进行拟合得到一个圆,并以该拟合圆的半径近似作为点 $P_i$ 处的曲率半径,然后选取下一组相邻的3个点 $P_i$ 、 $P_{i+1}$ 、 $P_{i+2}$ ,根据上述方法得到点 $P_{i+1}$ 处的曲率半径,以此类推就可以求出曲线上所有离散点处的曲率半径,得到曲率半径之后即可得到所有点处的曲率值。

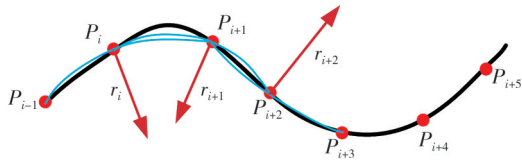


图 3 求解离散点曲率原理

Fig. 3 Solving the discrete point curvature principle

图 4 所示为曲率差值法选择测量点的算法流程图。

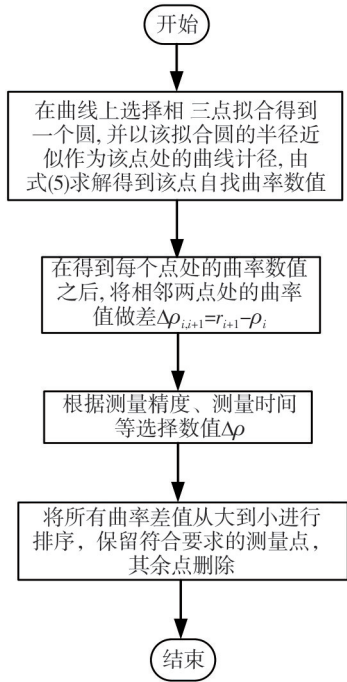
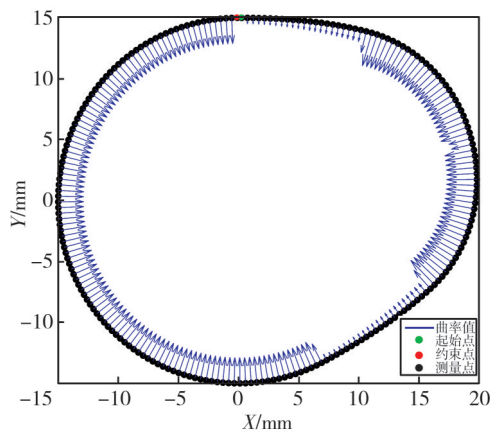


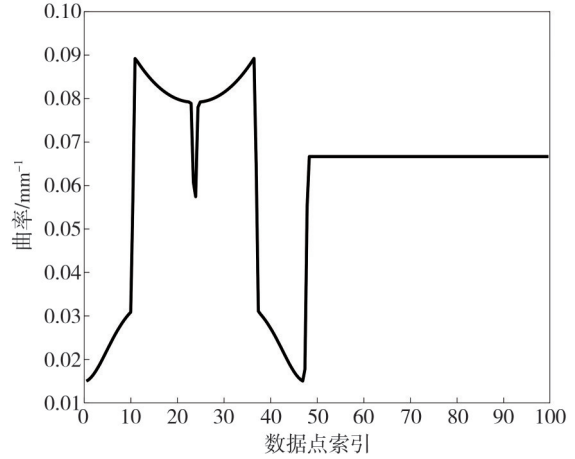
图 4 曲率差值法流程图

Fig. 4 Flow chart of curvature difference method

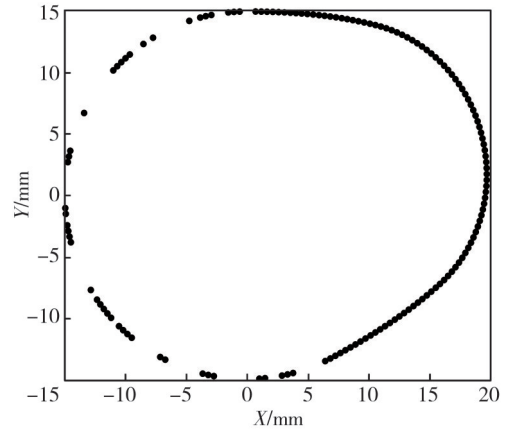
根据曲率差值法原理对凸轮曲线进行测量点的选取, 等间距分布生成了 216 个点, 采用上述方法后保留了 145 个测量点, 且大部分测量点都很好地符合凸轮曲线的曲率变化, 如图 5 所示。



(a) 均匀分布的采样点



(b) 曲线上各点处的曲率值



(c) 曲率差值法后剩余采样点

图 5 凸轮轮廓曲线上测量点选取

Fig. 5 Selection of measurement points on cam profile curve

### 2.2 测量路径规划

在线测量路径规划是指机床通过测量程序来控制测量设备的位置和运动轨迹, 以便在加工完成后对工件进行精确测量, 通过使用触发式测头对测量点进行在线测量规划的基本过程如图 6 所示。

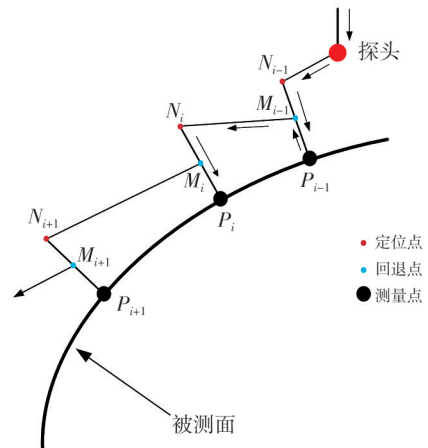


图 6 在线测量基本过程

Fig. 6 Basic process of on-line measurement

在对凸轮表面上的探测点 $P_i$ 进行测量时,机床主轴带动探头快速移动到定位点 $N_i$ ,然后沿点 $P_i$ 的法矢方向进行移动,直至探头接触到待测点并产生触发信号,机床停止运动并记录当前探头球心的位置坐标,紧接着机床主轴带动探头移动到回退点 $M_i$ ,此时完成一个待测点的测量过程。随后,机床主轴带动探头快速移动到下一个定位点 $N_{i+1}$ ,按照上述操作步骤完成对 $P_{i+1}$ 点的测量过程。完成对所有测量点的测量过程之后,需要在软件中对机床存储的坐标值进行相应的误差补偿,之后即可获得当前所有测量点的真实信息。

### 2.3 测头半径补偿

触发式探头在进行测量时,存储的坐标值为探头探针的球心坐标,待测点和球心坐标相差一个球心半径的距离,因此,需要沿待测点的法矢方向进行测头半径的补偿之后,才可以得到真实的被测点坐标值。

图7为测头半径补偿示意图,可以得到测头半径补偿的计算公式为

$$P_i = O_i - Rn_i, \quad (6)$$

式中: $P_i$ 为待测表面上的接触点; $O_i$ 为探针球心; $R$ 为探针半径; $n_i$ 为接触点处的法矢。

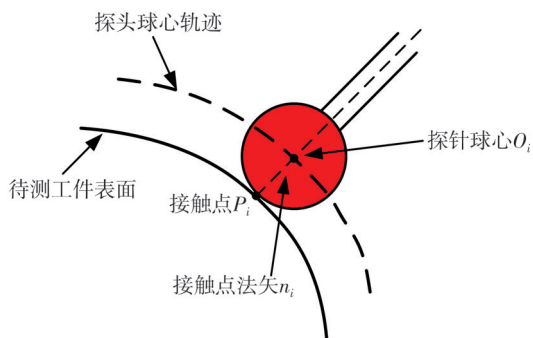


图7 测头半径补偿示意图

Fig.7 Schematic diagram of probe radius compensation

由公式可以看出,影响半径补偿精度的主要因素是各个测量点处法矢的计算。对于凸轮曲线来说,可以先将测量点进行拟合得到一条拟合曲线,然后求导得到每个测量点处的切线后再转换为该点处的法线近似作为该点处的法矢,计算公式如下。假设拟合后的曲线参数表达式为

$$P(t) = (x(t), y(t)), \quad (7)$$

$$T(t) = \frac{dP(t)}{dt} = \left( \frac{dx(t)}{dt}, \frac{dy(t)}{dt} \right), \quad (8)$$

则曲线上任意一点处的单位法矢可以由切向量旋转 $90^\circ$ 得到,

$$N_{\text{unit}}(t) = \left( \frac{-T_y}{\|N(t)\|}, \frac{-T_x}{\|N(t)\|} \right), \quad (9)$$

式中: $T_x$ 、 $T_y$ 为切向量在 $x$ 、 $y$ 轴上的分量; $N$ 为模长。

在得到各个测量点处的单位法矢后,即可对球心数据进行测头半径补偿得到真实的测点数据。

## 3 在线测量工艺包设计与实验

### 3.1 凸轮轴在线测量工艺包设计

本文基于Matlab GUI模块开发了相应的凸轮轴在线测量工艺包,具体过程如下:

1) 在Matlab命令窗口输入guide指令后启动GUIDE工具,随后选择“Blank GUI (default)”选项,进入GUI的初始开发环境。

2) 选择控件设计如图8所示,根据凸轮从动件的类型,分为“尖底从动件”“平底从动件”“滚子从动件”3个按钮。



图8 软件包主界面

Fig.8 Software main interface

3) 重新创建GUI初始开发环境,进行如图9所示的3种不同凸轮从动件类型的界面设计。每个界面都包含以下部分:凸轮基圆半径输入模块、测量探头半径输入模块、导入升程表按钮、生成测量路径文件按钮及测头半径补偿模块。

4) 完成界面设计之后编写主界面的程序及回调函数完成整个GUI界面的设计。



(a) 尖底从动件模块

(b) 平底从动件模块



(c) 滚子从动件模块

图 9 软件子界面

Fig. 9 Software sub-interface

### 3.2 凸轮轴在线测量实验

凸轮轴的加工实验采用OKUMA 车铣复合加工机床,并在此机床上进行后续的在线测量实验研究。实验材料选择6062 铝合金棒料,所要加工的凸轮轴基圆半径为15 mm,最大升程为5 mm,从动件类型为尖底从动件。在UG 软件中建立三维模型并生成相应的粗、精加工程序,仿真验证无误后,将NC 代码导入机床中进行实际加工。图 10 所示为凸轮轴的粗、精加工实验过程。



(a) 凸轮轴粗加工

(b) 凸轮轴精加工

图 10 凸轮轴加工实验

Fig. 10 Camshaft machining experiment

打开图 9(a) 中所示的尖底从动件在线测量模块,输入凸轮轴的基圆半径和测量探头半径之后,点击“导入升程”表按钮后载入升程表,数据如表 1 所示,点击“生成测量路径文件”按钮后即可生成相应的测量程序,输入基圆半径和测量探头半径的过程如图 11 所示。

在完成凸轮轴的加工实验之后,将刀具更换为测量探头。所使用的探头为雷尼绍 OMP-400 型探头,红宝石测球直径为 4 mm,使用标准球进行测头标定之后,导入通过本软件生成的测量程序,并在 VERICUT 中进行仿真以检查探针是否与凸轮轴发生碰撞,如图 12 所示,若仿真没有报错,则可在机床上进行实际的测量实验。测量完成后提取测量结果并在软件中进行测头半径补偿,之后就可以得到凸轮表面真实的数据坐标点。

表 1 凸轮轴升程数据表

Tab. 1 Camshaft lift data sheet

转角/(°)	升程/mm	转角/(°)	升程/mm
0	0.000 0	45	3.400 0
1	0.001 8	46	3.504 9
2	0.007 2	⋮	⋮
3	0.016 0	75	5.000 0
⋮	⋮	76	4.998 2
40	2.822 2	77	4.992 8
41	2.944 8	78	4.984 0
42	3.064 0	79	4.715 6
43	3.179 6	80	4.955 6
44	3.291 6	81	4.936 0



图 11 软件使用实例

Fig. 11 Examples of software usage

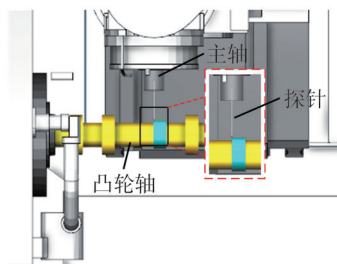


图 12 VERICUT 测量仿真

Fig. 12 VERICUT measurement simulation

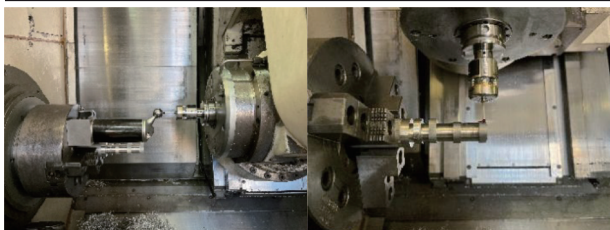
由于机床预行程误差的存在,在进行实际测量之前,还需要对测量探头半径进行标定以获取真实的测头半径,标定过程如图 13(a) 所示,图 13(b)所示为凸轮轴的在线测量实验过程。为了验证本文所提出的使用触发式测量探头对凸轮轴进行在线测量的准确性,将凸轮轴在 CIOTA-0101D 型三坐标测量机上再次进行测量,测量过程如图 13(c) 所示,测量结果如表 2 所示。

为了分析使用测量探头进行检测的精度,将在线测量得到的坐标值与三坐标测量得到的结果进行对比,表中的差值数据为补偿后的坐标值与三坐标测量值的空间距离。从表中可以看出,两组数据的误差均值为 0.009 2 mm,说明补偿之后的坐标值与使用三坐标测量得到的结果基本接近。

表2 在线测量与三坐标测量结果对比

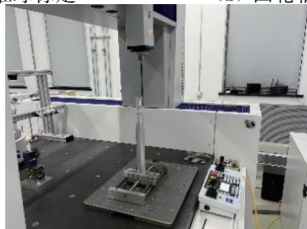
Fig. 2 Comparison of on-line measurement and CMM results

序号	探头球心坐标值/mm			补偿后坐标值/mm			三坐标测量值/mm			误差值/mm
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	
1	14.270	-2.812	-4.751	14.254	-4.812	-4.571	14.251	-4.819	-4.576	0.009 1
2	1.759	-12.934	-4.612	1.719	-14.934	-4.612	1.714	-14.942	-4.615	0.009 9
3	-11.562	-7.560	-4.668	-11.611	-9.559	-4.668	-11.618	-9.566	-4.671	0.010 3
4	-9.536	13.664	-4.675	-9.603	11.665	-4.675	-9.608	11.664	-4.676	0.005 2
5	15.765	2.369	-4.591	15.698	0.371	-4.591	15.693	0.364	-4.599	0.011 7



(a) 标准球标定

(b) 凸轮轴在线测量



(c) 三坐标测量机检测

图13 实际检测过程

Fig. 13 Actual testing process

## 4 结论

本文针对传统凸轮轴零件在线测量时受测量环境影响而未能进行广泛工程应用的难题,提出了一种借助触发式探头对凸轮轴零部件进行在线测量的方法,介绍了在线测量时凸轮表面测量点选取、测量路径规划和测头半径补偿等关键过程。开发了专用的在线测量GUI界面,该软件界面只需导入相应的升程数据表并且输入与测量相关的参数就可以生成对应的测量程序。同时开展了相应的在线测量实验,通过与三坐标测量机上得到的测量结果进行比较得出两种检测方法的误差均值为0.009 2 mm,验证了本文提出的针对凸轮轴零件进行在线测量方法的可行性和可靠性。

### 参考文献:

- [1] 杨寿智, 邓朝晖, 刘伟, 等. 凸轮轴数控磨削轮廓误差分析与补偿[J]. 中国机械工程, 2016, 27(16): 2230-2235.  
YANG Shouzhi, DENG Zhaohui, LIU Wei, et al. Contour error analysis and compensation for camshaft CNC grinding [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(16): 2230-2235. (in Chinese)

- [2] LIU T, DENG Z, LUO C, et al. Chatter detection in camshaft high-speed grinding process based on VMD parametric optimization [J]. Measurement, 2022, 187: 110133.
- [3] 李文龙, 王刚, 田亚明, 等. 在机测量技术与工程应用研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(5): 14-35.  
LI Wenlong, WANG Gang, TIAN Yaming, et al. Research progress of on-machine measurement technology and its engineering applications [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(5): 14-35. (in Chinese)
- [4] WU Y T, LIU Z Y, DI C A. Design of the probe for measuring track size of electromagnetic railgun based on adaptive positioning [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2021, 12(3): 253-257.
- [5] 孙筱, 余厚云, 唐景杰. 大直径孔轴线快速测量方法[J]. 测试技术学报, 2024, 38(4): 387-394.  
SUN Xiao, YU Houyun, TANG Jingjie. Research on rapid measuring methods for large-diameter hole axis [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(4): 387-394. (in Chinese)
- [6] 刘云龙, 李国超, 周宏根, 等. 船用柴油机凸轮轴形位误差非接触在位检测方法研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 44-49.  
LIU Yunlong, LI Guochao, ZHOU Honggen, et al. On-machine measurement method of camshaft form and position error for marine diesel engines [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 35(4): 44-49. (in Chinese)
- [7] 胡正乙. 基于线结构光的盘形凸轮视觉测量技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [8] AYUB M A, MOHAMED A B, ESA A H. In-line inspection of roundness using machine vision [J]. Procedia Technology, 2014, 15: 807-816.
- [9] CHENG D L, WANG Y, REN Y J, et al. Implementation for high-precision and non-contact system for the measurement of crankshaft and camshaft [J].

- Advanced Materials Research, 2011, 301/302/303: 959-964.
- [10] 李静, 高华钰, 沈南燕, 等. 复杂轴类零件非圆轮廓接触式随动测量方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(5): 38-46.
- LI Jing, GAO Huayu, SHEN Nanyan, et al. Tracing measurement method for non-circular contour of complex shafts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(5): 38-46. (in Chinese)
- [11] 叶沐霖. 凸轮轴升程误差在位测量及补偿方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [12] SUN H, QIAO Y, ZHANG Z, et al. Research on geometric error compensation of ultra-precision turning-milling machine tool based on macro - micro composite technology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(1): 365-374.
- [13] 韩克平. 复杂薄壁件原位测量与轮廓误差评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [14] 陈岳坪, 卢海燕, 李书平, 等. 一种基于数控机床的复杂曲面在线检测方法[J]. 测试技术学报, 2015, 29(1): 78-82.
- CHEN Yueping, LU Haiyan, LI Shuping, et al. An on-line inspection method based on numerical control machines for complex surfaces[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2015, 29(1): 78-82. (in Chinese)