

基于西门子 Trace Service 数控机床五轴联动精度 评估模块二次开发

费亚 李颖 陶文坚 蒋云峰 周昕

(成都飞机工业集团有限责任公司, 四川 成都 610092)

摘要: 以西门子 840D sl SINUMERIK Operate 为系统应用框架, 基于 Trace Service 数据采集功能, 开发了一种以空走 S 试件轨迹为对象的数控机床五轴联动精度评估模块。针对 Trace Service 数据采集机制进行核心原理分析, 通过 S 试件轨迹运行过程的数据需求, 梳理数据采集流程并设计坐标轴数据采集子模块, 再将数据采集结果进行分析提取进行坐标轴向刀尖点的转换, 结合图形数字化手段完成轮廓误差图形与指标展示, 综合实现数控机床五轴联动精度的评估。该模块利用 S 试件优秀的联动精度评估性能, 集成高效数据采集与轮廓评估展示, 避免了传统模式下采集和评估过程的繁琐性, 有效提升了评估过程的经济性与效率。

关键词: Trace Service; S 试件; 联动精度评估; 二次开发

中图分类号: TH161.5 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.06.018

Secondary development of five-axis linkage accuracy evaluation module of CNC machine tool based on Siemens Trace Service

FEI Ya, LI Ying, TAO Wenjian, JIANG Yunfeng, ZHOU Xin

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, CHN)

Abstract: This paper targets the Siemens 840D sl SINUMERIK Operate as the system application framework, and based on the Trace Service data acquisition function, a five-axis linkage accuracy evaluation module for CNC machine tools is developed, which targets the trajectory of S part as the object. Based on data requirements of the trajectory of the S part during operation, this paper analyzes the core principle of the Trace Service data acquisition mechanism, sorts the data acquisition process and designs the sub-module of the coordinate axis data acquisition through the data requirements of the trajectory of the S part during operation, analyzes and extracts the results of the data acquisition to convert the axis coordinates to tool tip points, and completes the display of graph and index of the contour error with the graphical-digital method, so as to achieve the evaluation of the five-axis linkage accuracy of the CNC machine tool. This module uses the excellent linkage accuracy evaluation performance of S part, integrates efficient data acquisition and contour evaluation display, avoids the fussy process of traditional acquisition and evaluation, and effectively improves the economy and efficiency of the evaluation.

Keywords: Trace Service; S part; linkage accuracy evaluation; secondary development

五轴数控机床因其位姿调节能力、加工效率及加工精度较传统三轴数控机床具有明显优势, 目前已成为航空、航天及多类国防科工领域加工复杂零件的主要机床设备^[1]。五轴联动精度是衡量五轴数控机床加工精度的关键性指标, 随着零件复杂程度增大及工艺技术的改进, 对机床精度和稳定性提出

了更高的要求。因此, 及时、快速评估数控机床五轴联动精度, 掌握机床联动精度状态和变化趋势, 对保证零件成品质量及生产制造快速响应具有重要意义。

目前, 对于数控机床的联动精度检测按照所采用的检测方式的不同可以分为基于仪器检测的仪器

法, 和基于加工试件检测的试切法^[2]。仪器法是指通过精度检测仪器对机床的各项精度指标进行检验。如 Renishaw 公司的激光干涉仪^[3]、球杆仪^[4-5], Etalon 公司的激光跟踪仪^[6-7], API 公司的 6D 激光干涉仪^[8], 荷兰 IBS 公司的五轴数控机床空间定位精度检测装置 R-test^[9] 等仪器被广泛应用于国内外制造企业。仪器法虽然准确、直观, 但仪器本身价格较高, 执行效率受限, 且检查结果很大程度依赖于操作人员的技术水平。试切法是指通过加工特殊几何特征的试件, 通过试件特征点理想位置 and 实际位置的偏差及机床的误差模型进行测量来辨识和检验机床精度。由美国国家航空航天局提出的 NAS979 试件、NAS 圆锥台试件^[10-11], Zhang Y 等设计的含有多种阶梯特征试件^[12], 德国 NCG 公司提出的 NCG2004 试件^[13] 以及日本京都大学 Ibaraki S 提出的方阶台阶试件^[14] 都是目前用于机床精度检验的特征试件, 并取得了良好的应用效果。由成都飞机工业(集团)有限责任公司提出的 S 形试件^[15-16] 具有薄壁、曲率变化不连续以及开闭角转换等特征属性, 能够很好地反映航空航天薄壁复杂曲面零件的加工能力, 对机床的五轴加工性能检验更为全面。试切法在实际应用过程中效果显著, 能很好地反映机床本身的精度水平, 但执行过程需要消耗额外的物料并占用机床工作时间, 经济效益尚显不佳。

为了快速评估数控机床联动精度, 解决仪器法与试切法存在的不足, 西门子数控系统借助数控机床内部传感器采集机床各轴运行数据, 开发了圆度测试功能^[17], 实现了任意两轴联动模式下圆轨迹误差评价, 但囿于算法局限, 该功能仅限于两轴联动精度评估, 对于五轴联动精度则至少需要 4 次圆度测试和换算工作, 使得该模块存在操作不便、评价效率低以及多次换算准确度下降等问题。李杰等^[18] 基于数控机床内置传感器与 S 试件, 设计了一种数控机床精度快速检测方法, 其轨迹位置数据采用西门子数控系统的 Servo Trace 功能人工采集获取, 再

进行导出分析, 无法立即给出机床精度评估结果, 存在一定的输出滞后性, 不利于效率提升。

因此, 研制一款具有五轴联动精度评估能力, 评估效率、准确度及成本优良的数控机床五轴联动精度评估产品, 对于复杂航空航天零部件的精密加工具有非常重要的意义。本文充分对比现有五轴联动精度评估方法的优劣, 利用 SINUMERIK Operate 编程包 Create MyHMI/3GL 开发了一种针对西门子 840D sl 数控系统的五轴联动精度评估模块, 结合 S 形试件优秀的联动精度评估性能, 通过 Trace Service 功能获取过程中数控系统的内部传感器轴坐标数据, 结合相关轮廓误差评估手段, 最终实现快速评估五轴联动机床精度的目的。

1 软件设计

本模块结合现有五轴联动精度评估方法的优势与特点, 利用西门子编程包及 QT GUI 方式开发一种针对西门子 840D sl 数控系统的数控机床五轴联动精度评估模块, 实现五轴联动机床精度的快速评估, 其核心工作流程如图 1 所示。

根据评估流程, 本模块主要设计两个子模块: 坐标轴数据采集模块与联动精度评估模块。坐标轴数据采集模块是以 Trace Service 为基础实现机床运行 S 试件轨迹时, 各轴位置坐标数据的采集; 联动精度评估模块则是以各轴位置坐标数据为数据源做分析评估, 以图形数字化的方式完成机床五轴联动机床精度的评估。

2 Trace Service 数据采集机制

Trace Service 是一项应用在西门子数控系统上, 用于实时接收和记录格式化的 NCK 过程数据(包括系统变量、NC、PLC、轴、伺服等数据)的应用服务。用户可通过 Trace Service 提供的接口类: SITraceAdapter 和 SITraceQsessConn, 与内部应用或者与外部客户端协同配合, 将产生得到的数据进行

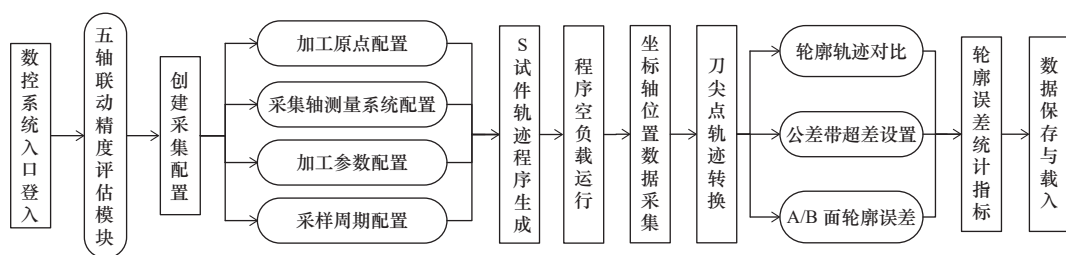


图 1 工作流程

进一步的诊断分析与拓展应用。

2.1 Trace 会话

应用 Trace Service 进行数据采集是通过 Trace 会话 (Trace Session) 来实现的。Trace 会话是一个有状态的对象, 用于执行特定的 Trace 采集过程。该逻辑对象提供针对过程的方法, 可将所需的所有资源与信息归总, 用以执行任务和保存结果。如图 2 所示为一个 Trace 会话所涵盖的内容。

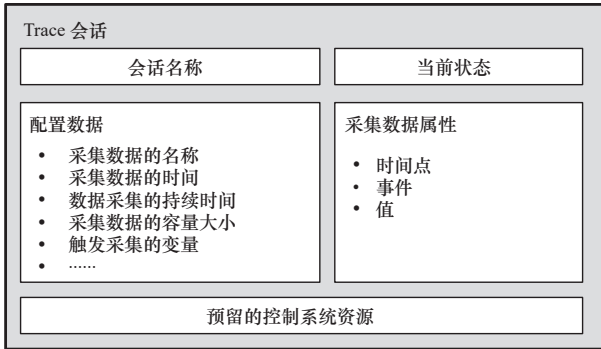


图 2 Trace 会话组成内容

Trace 会话的“状态”是 Trace Service 的一项重要内容, 它表征当前 Trace 会话执行的过程情况, 包含 Reserved 在内的 8 种状态, 所有状态如表 1 所示。客户端应用能够查询当前的会话状态并做出响应, 具体方式可通过调用 Trace Service 提供的 API 接口方法实现。

表 1 Trace 会话状态

| 会话状态 | 释义 |
|---------------|----------------------------|
| Reserved | 会话已创建, 但未经过配置 |
| Ready | 会话已经过正常配置, 并且预留了资源 |
| Armed | 会话就绪, 但不满足针对开始数据记录的触发条件 |
| Recording | 会话在控制系统上在后台采集数据 |
| Stopped | 会话数据记录中断, 或者满足会话结束条件 |
| Unloaded | 会话未在 NCK 控制系统中装载, 未预留资源 |
| Unloaded Data | 会话未在 NCK 控制系统中装载, 但预先采集了数据 |
| Fault | 在会话中出现一个阻碍进一步处理的条件 |

一般 Trace 的记录过程: “创建会话→配置数据→开始采集→记录数据→停止采集”, 以及过程中的“清除数据、装载/卸载、错误”等流程操作, 其状态关系如图 3 所示。

2.2 Trace 配置

一个 Trace 会话的执行需要将采集需求以 xml

格式进行加载。Trace 采集配置文件结构如图 4 所示, 涵盖的内容包括:

- (1) 采集过程基本配置 (时限, 频率, 容量.....)。
- (2) 待采数据信号配置 (信号名, 标识.....)。
- (3) 采集触发/停止信号配置。

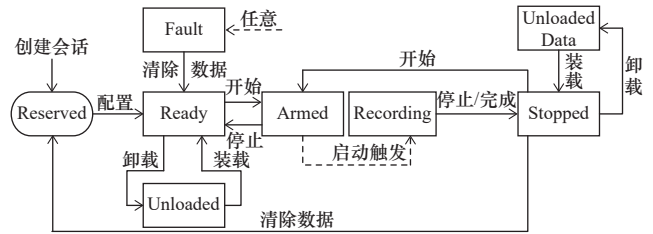


图 3 Trace 状态关系

```
<traceCaptureSetup
  <collectionSettings atCapacity="0x0000" powerOnStart="false" timeLimit="0" appendData="false" deferOffload="false" endless="false" capacity="3,2428800"
  autoStart="false" />
  <connectionSettings client="vslgibmnd" password="client" vslgibmnd="vslgibmnd" archSetting="NCK" expirationMode="0" sessionName="SimpleSession" />
  <sampleRateSettings syncSampleRate="0.000" loopSampleRate="0.000" />
  <signalSettings
    <signal eventChannel="1" domain="NCK_1" event="255" displayBus="5" description="Position actual value meas. system 2 (64 bit)" dataType="double" unitType="
    "posn" key="s1" name="/Nck/!S/ncKsrvDataActPosActIn64 [s1, 1]" />
    <signal eventChannel="1" domain="NCK_1" event="255" displayBus="5" description="Position actual value meas. system 2 (64 bit)" dataType="double" unitType="
    "posn" key="s2" name="/Nck/!S/ncKsrvDataActPosActIn64 [s1, 2]" />
    <signal eventChannel="1" domain="NCK_1" event="255" displayBus="5" description="Position actual value meas. system 2 (64 bit)" dataType="double" unitType="
    "posn" key="s3" name="/Nck/!S/ncKsrvDataActPosActIn64 [s1, 3]" />
    <signal eventChannel="1" domain="NCK_1" event="255" displayBus="5" description="Position actual value meas. system 1 (64 bit)" dataType="double" unitType="
    "posn" key="s4" name="/Nck/!S/ncKsrvDataActPosActIn64 [s1, 4]" />
    <signal eventChannel="1" domain="NCK_1" event="255" displayBus="5" description="Position actual value meas. system 2 (64 bit)" dataType="double" unitType="
    "posn" key="s5" name="/Nck/!S/ncKsrvDataActPosActIn64 [s1, 5]" />
    <signal eventChannel="1" domain="NCK_1" event="255" displayBus="5" description="Position setpoint controller input (64 bit)" dataType="double" unitType="
    "posn" key="s6" name="/Nck/!S/ncKsrvDataCmPactCtrlIn64 [s1, 1]" />
    <signal eventChannel="1" domain="NCK_1" event="255" displayBus="5" description="Position setpoint controller input (64 bit)" dataType="double" unitType="
    "posn" key="s7" name="/Nck/!S/ncKsrvDataCmPactCtrlIn64 [s1, 2]" />
    <signal eventChannel="1" domain="NCK_1" event="255" displayBus="5" description="Position setpoint controller input (64 bit)" dataType="double" unitType="
    "posn" key="s8" name="/Nck/!S/ncKsrvDataCmPactCtrlIn64 [s1, 3]" />
    <signal eventChannel="1" domain="NCK_1" event="255" displayBus="5" description="Position setpoint controller input (64 bit)" dataType="double" unitType="
    "posn" key="s9" name="/Nck/!S/ncKsrvDataCmPactCtrlIn64 [s1, 4]" />
    <signal eventChannel="1" domain="NCK_1" event="255" displayBus="5" description="Position setpoint controller input (64 bit)" dataType="double" unitType="
    "posn" key="s10" name="/Nck/!S/ncKsrvDataCmPactCtrlIn64 [s1, 5]" />
  />
  </signalSettings
  </collectionSettings
  <startTrigger pattern="I=0.000" patternQualifier="entered" repeatCount="1" combiLogic="and" delay="0" />
  <startTriggerCondition eventChannel="1" mode="equalTo" domain="" event="1" description="mslTrace" displayBus="0" key="s1" dataType="dword" bitMask="00000000"
  name="/Nck/!S/ansiTrace [s1, 1]" level="1" />
  </startTrigger
  </startTriggerCondition
  <stopTrigger pattern="I=0.000" patternQualifier="entered" repeatCount="1" combiLogic="and" delay="0" />
  <stopTriggerCondition eventChannel="1" mode="equalTo" domain="" event="1" description="mslTrace" displayBus="0" key="s1" dataType="dword" bitMask="00000000"
  name="/Nck/!S/ansiTrace [s1, 1]" level="0" />
  </stopTrigger
  </triggerSettings
</traceCaptureSetup
```

图 4 采集配置文件结构

针对以 S 试件轨迹为基础的联动精度评估, 采集配置文件的采集对象信号为: <signalSettings>标签下的各个轴的控制器 (Position setpoint controller input) 与编码器/光栅尺 (Position actual value meas. system) 位置坐标数据; 采集触发/停止信号为 AN_SLTRACE, 其 BTSS 变量形式为: Nck/!S/anSLTrace [u1, 1], 该信号为 1 时启动采集, 为 0 时停止采集; 此外, 根据用户需求, 在<sampleRateSettings>标签内, 设置所需的采样频率。

完成采集配置文件的设置后, 通过 SITraceQ SessConn 对象进行加载, 等待触发后完成 Trace 启动, 即可实现西门子数控系统指定数据的采集任务。

3 坐标轴数据采集模块设计

为了实现数控机床五轴联动精度的评估, 需要获取各坐标轴在运行过程中的控制器与编码器/光栅尺位置坐标。利用 Trace Service 数据采集功能, 在坐标轴数据采集模块界面, 用户可根据实际采集

需求对坐标轴的测量系统、原点框架、加工参数以及采样周期进行设置，生成对应需求的 S 件检测程序进行校对、运行与自动采集触发，完成坐标轴位置数据的采集。

3.1 数据采集流程

坐标轴位置数据采集流程主要分 2 个步骤：生成 S 试件轨迹的加工程序，执行 Trace Service 数据采集功能。具体流程为：

首先根据用户的 S 形轨迹加工需求配置合适的参数要求生成标准 NC 程序，（NC 程序在 S 试件的轮廓首尾段落处插入有采集触发变量 AN_SLTRACE 的赋值语句，用于标识数据采集启停），程序校验无误后，加载至数控系统 NC，否则再次修改参数或程序进行重新生成。随后执行采集指令，模块创建 Trace Session 对象，并完成采集相关配置的加载，进入“Armed 准备采集”阶段。切换数控系统界面至 Auto 加工模式下，程序已经完成加载，处于待执行状态。执行 NC 程序时会根据采集触发变量 AN_SLTRACE 的值进行采集的开始与结束。当 AN_SLTRACE=1 时，采集开始；当 AN_SLTRACE=0 时，采集结束。等待 AN_SLTRACE=0 后，采集完成，生成对应数据采集结果文件。图 5 为采集流程。

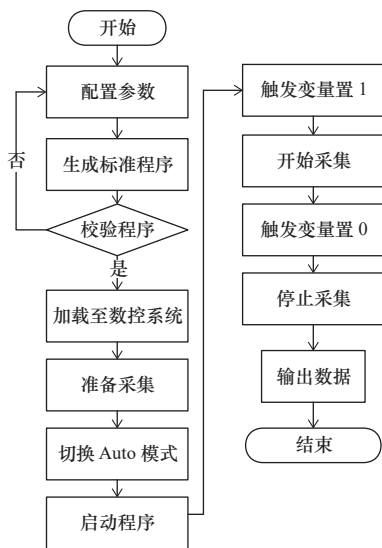


图 5 坐标轴位置数据采集流程

3.2 界面及功能设计

依据坐标轴位置数据采集流程，本模块的主要功能包括界面元素配置、NC 程序生成和数据采集 3 个部分。界面元素：测量对象、测量参数及采样周期；软键栏：数据采集操作、NC 程序生成、图形评估入口。界面构成如图 6 所示。



图 6 坐标轴数据采集模块界面构成

(1) 界面元素配置

该功能为用户提供坐标轴数据采集的需求配置。用户可通过采集需求在测量对象、测量参数及采样周期等界面元素中对 NC 程序、数据采集进行定义配置，包括加工原点选择、坐标轴测量系统选择、加工参数设置及采样周期配置。

(2) NC 程序生成

该功能提供 S 试件轨迹 NC 加工程序生成，为基于 S 试件特性评估机床联动精度提供加工基础，其涵盖程序生成、程序校验和程序加载 3 个功能部分。程序生成是依据 S 试件轨迹程序、用户配置的加工参数及采集触发变量自动生成 NC 程序；程序校验要求用户根据加工现场的环境特征对自动生成的 NC 程序进行校验，避免发生加工事故，如图 7 所示。程序加载则是将校验完成的加载至数控系统 NC 中，便于用户直接操作机床运行 NC 程序。

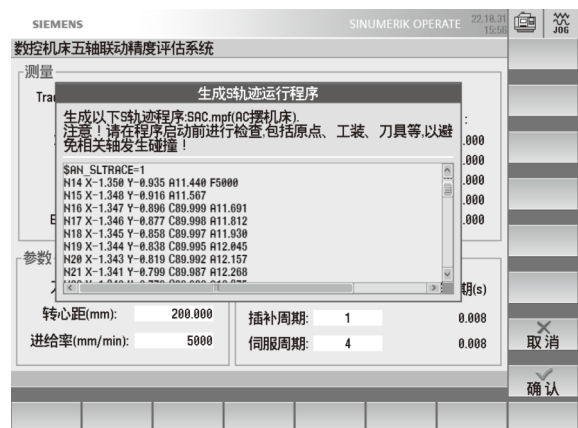


图 7 程序生成与校验

(3) 数据采集

数据采集功能通过用户在界面元素的配置，在后台生成对应的采集配置文件并完成加载，在 NC 程序运行后，由采集触发变量触发执行坐标轴位置

坐标的采集任务，采集结束后可形成 xml 结构格式的数据，如图 8 所示。采集过程中，可通过“Trace 状态”界面元素知晓当前 Trace 会话的状态，可通过“停止采集”、“初始化”软键停止、复位采集任务。

```

data:
machineParameter {offsetValue="0.000" toolLengthValue="55.000" offsetValue="0.000" offsetValue="54.000" yOffsetValue="182.000" offsetValue="180.000"
trafo5Value="200.000"/>
<traceData>
dataFrame
<frameHeader startTriggerInc="0.000000" startTriggerTime="0.000000" stopInc="0.000000" stopTime="0.000000" start="2023-10-18T17:01:16.000Z"/>
dataSignal eventChannel="1" domain="NCU" event="255" Interval="0.000000" description="Position actual value meas.system 2 (64 Bit)" display="5" key
="x1" unitType="pos" dataType="double" id="71" name="/Nck/150/ncKServoDataCncPosCtrlIn64 [x, 1]"/>
dataSignal eventChannel="1" domain="NCU" event="255" Interval="0.000000" description="Position actual value meas.system 2 (64 Bit)" display="5" key
="y2" unitType="pos" dataType="double" id="72" name="/Nck/150/ncKServoDataCncPosCtrlIn64 [y, 2]"/>
dataSignal eventChannel="1" domain="NCU" event="255" Interval="0.000000" description="Position actual value meas.system 2 (64 Bit)" display="5" key
="z3" unitType="pos" dataType="double" id="73" name="/Nck/150/ncKServoDataCncPosCtrlIn64 [z, 3]"/>
dataSignal eventChannel="1" domain="NCU" event="255" Interval="0.000000" description="Position setpoint controller Input (64 Bit)" display="5" key
="x4" unitType="pos" dataType="double" id="74" name="/Nck/150/ncKServoDataCncPosCtrlIn64 [x, 4]"/>
dataSignal eventChannel="1" domain="NCU" event="255" Interval="0.000000" description="Position setpoint controller Input (64 Bit)" display="5" key
="y5" unitType="pos" dataType="double" id="75" name="/Nck/150/ncKServoDataCncPosCtrlIn64 [y, 5]"/>
dataSignal eventChannel="1" domain="NCU" event="255" Interval="0.000000" description="Position setpoint controller Input (64 Bit)" display="5" key
="z6" unitType="pos" dataType="double" id="76" name="/Nck/150/ncKServoDataCncPosCtrlIn64 [z, 6]"/>
dataSignal eventChannel="1" domain="NCU" event="255" Interval="0.000000" description="Position setpoint controller Input (64 Bit)" display="5" key
="x7" unitType="pos" dataType="double" id="77" name="/Nck/150/ncKServoDataCncPosCtrlIn64 [x, 7]"/>
dataSignal eventChannel="1" domain="NCU" event="255" Interval="0.000000" description="Position setpoint controller Input (64 Bit)" display="5" key
="y8" unitType="pos" dataType="double" id="78" name="/Nck/150/ncKServoDataCncPosCtrlIn64 [y, 8]"/>
dataSignal eventChannel="1" domain="NCU" event="255" Interval="0.000000" description="Position setpoint controller Input (64 Bit)" display="5" key
="z9" unitType="pos" dataType="double" id="79" name="/Nck/150/ncKServoDataCncPosCtrlIn64 [z, 9]"/>
dataSignal eventChannel="1" domain="NCU" event="255" Interval="0.000000" description="Position setpoint controller Input (64 Bit)" display="5" key
="x10" unitType="pos" dataType="double" id="80" name="/Nck/150/ncKServoDataCncPosCtrlIn64 [x, 10]"/>
crc: f3="0.000000" f4="11.318000" f5="70.000000" f6="181.045000" f7="-7.696000" f8="529.538000" f9="11.318000" time="0.000000" f1="0.000000" f2="0.000000" f10=
"70.000000"/>
crc: f3="0.000000" f4="11.318000" f5="70.000000" f6="181.045100" f7="-7.696000" f8="529.538000" f9="11.318000" time="0.000000" f1="0.000000" f2="0.000000" f10=
"70.000000"/>
crc: f3="0.000000" f4="11.318000" f5="70.000000" f6="181.045200" f7="-7.696000" f8="529.538000" f9="11.318000" time="0.000000" f1="0.000000" f2="0.000000" f10=
"70.000000"/>
crc: f3="0.000000" f4="11.318000" f5="70.000000" f6="181.045300" f7="-7.696000" f8="529.538000" f9="11.318000" time="0.000000" f1="0.000000" f2="0.000000" f10=
"70.000000"/>
crc: f3="0.000000" f4="11.318000" f5="70.000000" f6="181.045400" f7="-7.696000" f8="529.538000" f9="11.318000" time="0.000000" f1="0.000000" f2="0.000000" f10=
"70.000000"/>
crc: f3="0.000000" f4="11.318000" f5="70.000000" f6="181.045500" f7="-7.696000" f8="529.538000" f9="11.318000" time="0.000000" f1="0.000000" f2="0.000000" f10=
"70.000000"/>
crc: f3="0.000000" f4="11.318000" f5="70.000000" f6="181.045600" f7="-7.696000" f8="529.538000" f9="11.318000" time="0.000000" f1="0.000000" f2="0.000000" f10=
"70.000000"/>

```

图 8 数据采集结果

4 联动精度评估模块设计

联动精度评估模块是将坐标轴数据采集模块采集得到结果进行提取解析，获取到加工参数和各个坐标轴控制器与编码器/光栅尺的位置数据值，再将其进行刀尖点算法转换，输出成为 S 试件轮廓轨迹图形，并根据轨迹点位计算提取轮廓误差，辅以轮廓误差统计指标、公差带等对数控机床的五轴联动精度进行评估。

4.1 采集结果文件解析

图 7 所示的数据采集结果中含有诸多冗余信息内容，需要进一步解析、筛选才能获取实际建模分析的可用数据。在得到结果数据文件后，需要依据其记录的结构形式，将各个坐标轴的坐标值与加工参数进行提取，方能进行后续的刀尖点算法转换。数据中各个标签的含义如下：

(1) machineParameter: 加工参数

xOffsetValue、yOffsetValue、zOffsetValue、aOffsetValue、cOffsetValue/bOffsetValue: 原点值；
 toolLengthValue: 刀长；
 trafo5Value: 转心距。

(2) frameHeader: 采集基础信息（启停触发间隔、时间等）。

(3) dataSignal: 变量信息（通道、NCU 设备、采样周期、数据类型、数据描述等）。

(4) rec: 时间、记录值（fx 为采集的各个坐标值，x 与 dataSignal 里的 id 属性保持映射关系）。

4.2 刀尖点转换算法

提取到可用数据后，需要根据机床结构进行由轴坐标向刀尖点坐标的算法转换。该转换算法基于多体系统理论和齐次坐标变换方法，以龙门 AC 摆头五轴数控机床为例，刀尖点在 A 摆动坐标系下的坐标为 $P_{initial} = [0, 0, -L, 1]^T$ ，其中 L 表示刀尖点到 A 摆坐标系原点的距离。

根据龙门 AC 摆头五轴数控机床的拓扑结构，采用齐次坐标变换方法，从数控机床床身到刀具的运动传递矩阵可以表达为

$$T_0^5 = \prod_{i=0, j=1}^{i=4, j=5} T_i^j \quad (1)$$

其中， $T_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 、 $T_1^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 、

$T_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 、 $T_3^4 = \begin{bmatrix} \cos C & -\sin C & 0 & 0 \\ \sin C & \cos C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 和

$T_4^5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A & 0 \\ 0 & \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 分别为机床各进给轴运动

矩阵，x、y、z、C 和 A 分别为机床各进给轴的运动输入参数。

那么，刀具的位置可表示为

$$P = \prod_{i=0, j=1}^{i=4, j=5} T_i^j P_{initial} \quad (2)$$

利用式 (2) 可计算得到的数控机床运行 S 试件轨迹的刀尖轨迹点集合。

4.3 界面及功能设计

联动精度评估模块采用 QcustomPlot 图形显示库完成轨迹轮廓的图形显示，其主要功能包括 S 试件轮廓轨迹显示、A/B 面轮廓误差显示、公差带设置与显示和轮廓误差数据统计。界面元素：轮廓轨迹对比、A/B 面轮廓误差、公差带设置、轮廓误差统计指标。软键栏：图像刷新、结果保存、结果加载。界面构成如图 9 所示。

(1) 轮廓轨迹对比显示

根据数控机床的拓扑结构，将采集得到的坐标轴控制器与编码器/光栅尺位置数据进行刀尖点的坐标算法转换，得到对应的刀尖点位置数据，并将

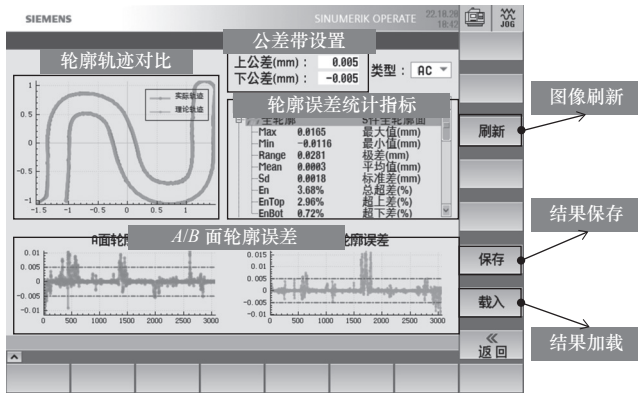


图9 轮廓轨迹数据分析模块界面

其图形化显示。

(2) A/B面轮廓误差显示

计算获取S试件轨迹轮廓误差数据集合，将其按S试件的内外面特征作为A/B面进行分割图形化显示，便于用户分析判断。

(3) 公差带设置与显示

用户可根据需求进行公差带的设置，设置后将公差带误差线显示在A/B面轮廓误差图中，用于直观判别轮廓的超差情况。

(4) 轮廓误差数据统计

轮廓误差统计指标区域会根据公差带的设置对轮廓轨迹误差的统计指标，包括最值、均值、极差

及超差率等进行计算并展示，供用户进行量化分析评估。

(5) 数据管理

集成检测结果数据的“保存”、“载入”功能可实现当次结果的数据+图片保存及历史数据的载入显示功能，如图10所示。

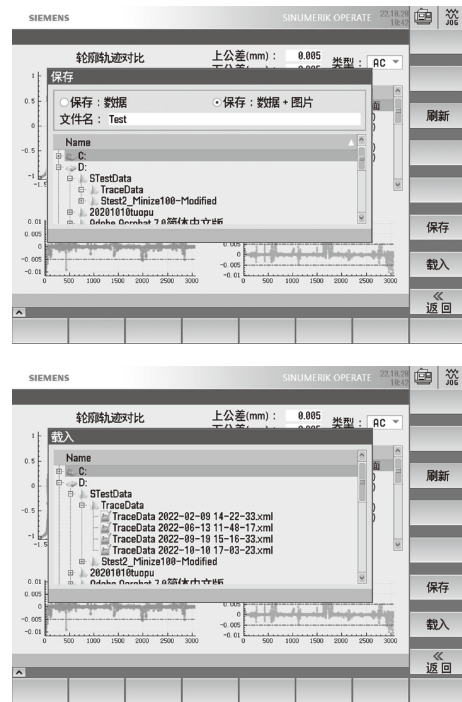
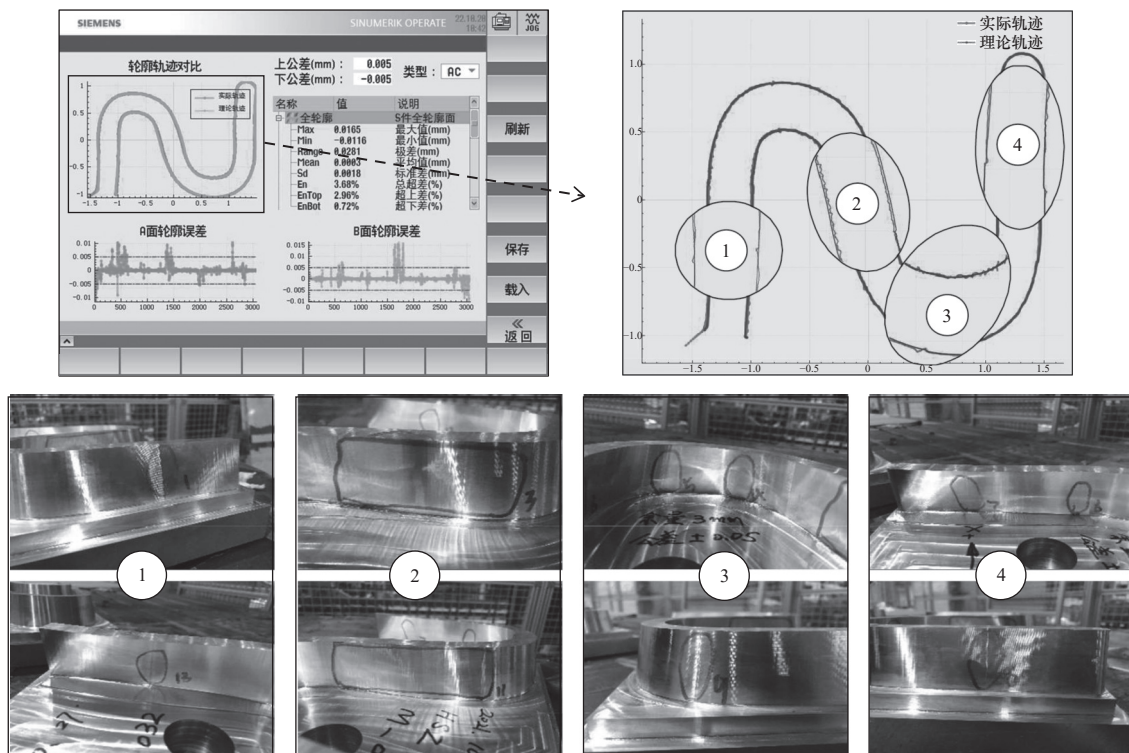


图10 数据管理



(a) 特征对比

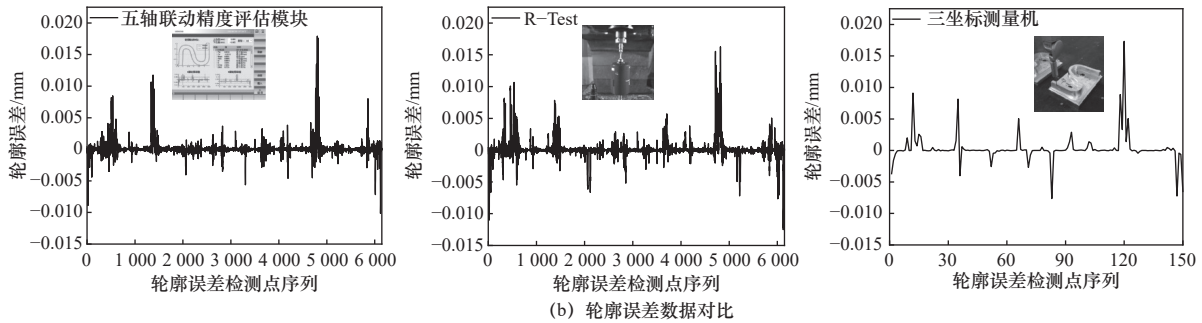


图 11 试验结果对比

5 评估效果验证

为了验证本模块对数控机床五轴联动精度评估的应用效果,课题组以某五轴数控机床为试验测试对象,采用实际试切与本模块的评估结果进行对比,结合 R-test 与三坐标测量机综合验证。模块的采集配置如图 6 所示。

结果显示:采用本模块输出的 S 轨迹图形与切削后的 S 试件的特征吻合,如图 11a 所示。在轮廓误差数据方面与 R-test、三坐标测量机保持较好的一致性,如图 11b 所示,最大轮廓误差的偏差在 10% 以内。此外,传统基于试切的评估方法平均耗时 1 h 以上,而本模块可在 5 min 内可完成所有评估操作,且无需额外耗材物料,显著提升了精度评估的经济性与效率性。

6 结语

本文以空负载 S 试件轨迹为评估载体,基于西门子二次开发软件的 Trace Service 功能采集运行过程中的坐标轴位置数据,通过多体系统理论与齐次坐标变换方法,结合轨迹轮廓及误差的图形指标分析,开发了一款集成于数控系统 HMI 上的五轴联动精度评估模块。该模块无需额外配置传感器,无需实际切削试件,集成程序生成、数据采集、分析评估等多项功能,实现了数控机床联动精度的高度自动化评估,有效改善了当前评估手段所面临的诸多难题,为复杂航空航天零部件的精密加工提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 李杰, 谢福贵, 刘辛军, 等. 五轴数控机床空间定位精度改善方法研究现状[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 113-128.
- [2] 赵万华, 张俊, 刘辉, 等. 数控机床精度评价新方法[J]. 中国工程科学, 2013, 15(1): 93-98.
- [3] 谢靖超. A/C双摆角铣头C轴精度控制技术研究与应用[J]. 制造技术与机床, 2021(2): 143-146.
- [4] 李伟, 梁睿君, 王志强. 基于840D数控系统温度补偿功能的误差补偿系统[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(2): 91-94.

- [5] 付国强, 饶勇建, 谢云鹏, 等. 几何误差贡献值影响下五轴数控机床运动轴误差灵敏度分析方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(13): 1518-1528.
- [6] 朱绍维, 李建东, 李连玉. 基于西门子VCS的大型五轴机床空间误差补偿[J]. 制造技术与机床, 2019(12): 36-40.
- [7] 姚立权, 张萌, 李刚, 等. 五轴联动数控机床空间综合误差解耦技术研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(5): 102-106.
- [8] 向华, 熊成, 陈国华, 等. 机床旋转轴转角定位误差测量与补偿方法[J]. 制造技术与机床, 2019(9): 157-161.
- [9] IBS Precision Engineering. Machine tool inspection and analyzer solutions [EB/OL]. <http://ibspe.com/category/machine-tool-inspection-and-analyzer-solutions.html>.
- [10] NAS 979, Uniform Cutting Tests, NAS 900 Series metal cutting equipment specifications[S]. NAS, USA, 1969.
- [11] Hong C, Ibaraki S, Matsubara A. Influence of position-dependent geometric errors of rotary axes on a machining test of cone frustum by five-axis machine tools[J]. Precision Engineering, 2011, 35(1): 1-11.
- [12] Zhang Y, Jianzhong F U, Chen Z. Identification of kinematic errors of five-axis machine tool trunnion axis from finished test piece[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(5): 999-1007.
- [13] NC-Gesellschaft. V. Testing guidelines and testing workpiece for high speed cutting (HSC) part I: milling cutters and machining centre[S]. NC-Gesellschaft-Anwendung Neuer Technologien, 2004.
- [14] Ibaraki S, Ota Y. A machining test to evaluate geometric errors of five-axis machine tools with its application to thermal deformation test[J]. Procedia Cirp, 2014, 14(6): 323-328.
- [15] Song Z Y Cui Y W. S-shape detection test piece and a detection method for detection the precision of the numerical control milling machine: USA, US20100004777[P]. 2010.
- [16] 宋智勇, 崔雅文. 综合检测数控机床精度的“S”形检测试件及其检测方法: 中国, CN100468038[P]. 2009.
- [17] 浦姣, 周亚雄, 杨林, 等. 基于西门子840D sl系统的回转工作台参与五轴插补的伺服优化[J]. 机械设计, 2019, 36(S1): 437-440.
- [18] 李杰, 陶文坚, 陈鑫进, 等. 基于内置传感器的数控机床多轴联动精度检测方法[J]. 制造技术与机床, 2020(8): 35-40.

第一作者/通信作者: 费亚, 男, 1990年生, 硕士, 工程师, 研究方向为数控机床精度补偿, 已发表论文 2 篇。E-mail: ffshooter@163.com

(编辑 李静)

(收稿日期: 2022-11-08)

文章编号: 20230618

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。