

基于数字孪生的数控加工虚拟调试平台开发

刘杰

海宁跨界国际半导体制造有限公司，浙江海宁，314400；

摘要：随着制造业向智能化、数字化方向加速转型，数控加工的调试流程逐渐暴露出物理资源浪费、调试周期长与试错成本高等问题。数字孪生技术以其对物理实体的实时映射与高精度建模能力，为数控加工调试提供了一种全新的解决路径。本文以“数字孪生+虚拟调试”为核心，探讨面向数控系统的虚拟调试平台开发思路。文章系统阐述了平台的体系架构设计、关键技术实现与应用价值，结合实例验证其在提升调试效率、降低制造风险与推动智能制造方面的实践意义。研究表明，基于数字孪生的数控加工虚拟调试平台具备实时性强、交互性高与扩展性优等优势，是推动制造业智能升级的重要技术抓手。

关键词：数字孪生；数控加工；虚拟调试；智能制造；CNC；工业仿真

DOI: 10.64216/3080-1508.25.02.032

引言

传统数控加工调试过程中，程序开发、路径验证与设备对接多依赖实际机床的试运行，不仅存在试错代价高、资源占用严重的弊端，也严重制约了多批次、小批量定制生产的响应速度。而数字孪生技术的出现为解决这一瓶颈提供了新的技术手段。数字孪生通过在虚拟空间中构建与物理机床一致的数控模型，能够实现程序编制、运动仿真与逻辑验证的数字化同步，使加工调试流程得以前置、虚拟完成，显著缩短了实际机床上调试的时间，降低故障率与返工率。本文聚焦于基于数字孪生技术开发数控加工虚拟调试平台，围绕平台的架构、关键技术模块及其实际应用展开系统论述，旨在为推动数字制造与智能工厂建设提供可行路径与工程参考。

1 基于数字孪生的虚拟调试平台体系架构设计

1.1 平台架构总体构成

该虚拟调试平台运用的是一种‘物理实体 - 数据驱动 - 虚拟模型 - 反馈控制’四位一体的数字孪生系统结构呢，其整体架构被划分成了数据采集层、仿真建模层以及控制交互层这三大功能模块。数据采集层基本上是被部署在实际的数控设备还有其周边环境当中的，依靠嵌入式工业传感器、控制器通信端口以及边缘网关等这些硬件设施，能够实时去采集设备在运行过程里的关键参数，像是主轴转速、进给速率、轴向位置、切削负载等等，与此同时，还会对环境温湿度、振动状态这类会影响加工质量的外部因素加以监控。仿真建模层可以说是整个平台的‘虚拟中枢’了，借助像 SolidWorks、ANSYS 这样的

三维建模工具，还有 ADAMS、Simpack 等多体动力学平台，来构建和实际设备有着高度一致性的几何和动力学模型，并且针对加工路径、机床运动学、刀具行为等展开较为深入的解析以及嵌套方面的相关处理。

这一层还集成了 G 代码解析模块以及碰撞检测模块，能够达成对加工工艺逻辑的实时验证。控制交互层，承载着人与系统之间那种动态交互的关联，用户借助 HMI 界面，是可以完成诸如加工参数配置、程序验证、模拟运行还有故障排查等一系列操作的。与此同时，平台还支持和实际设备展开双向通信，以此来实现把仿真结果朝着物理系统进行反馈下发以及优化调整，进而构建起一个将虚拟与现实融合起来、具备高度协同性的孪生闭环。

1.2 虚拟数控模型构建机制

虚拟模型的构建属于实现高保真虚拟调试的基础性工作，其关键之处在于针对物理设备展开全面的参数采集工作，并且要完成建模复现。首先来讲，就数控机床而言，其有着诸多结构特征，像床身的具体尺寸、滑块的行程以及传动链参数等等，要利用三维建模软件来做精细化的建模操作，以此来保证几何外形以及运动约束能够保持一致。在此前提之下，依据电机的特性、伺服系统的响应情况以及实际加工负载方面的数据，去建立起一个涵盖质量、刚度、阻尼等诸多参数的动力学模型，从而能够反映出实际设备在开展加工过程当中的响应行为以及所具备的动态性能。

再者说，把控制程序导入机床可是模型行为还原的关键环节呢。平台能够加载像 Siemens、Mitsubishi 这类主流的 PLC 控制逻辑，以及 G 代码、M 代码等

数控加工指令,以此达成运动逻辑和驱动行为的同步映射。与此同时,引入高精度运动学引擎以及碰撞仿真模块之后,就可以针对刀具路径和工件模型之间的相对运动展开实时检测了,进而判断是不是存在干涉、越限或者潜在故障点的情况。虚拟建模可不能仅仅局限在机床本体上,还得把夹具布置、刀具系统、冷却液路径以及加工毛坯等附属元素都涵盖进去,这样一来,整个仿真系统便拥有了完整工序链模拟的能力,从而打造出一个能实现虚实高度契合且具备可预测性的加工验证平台。

1.3 数据同步与反馈机制设计

数据同步机制的设计在很大程度上决定着数字孪生系统到底能不能真正达成虚拟与现实之间信息的双向流通这一目标。要想确保系统数据传输既具有实时性,又具备准确性,平台一开始便着手部署了工业边缘计算节点,该节点具备这样的能力,它可以对来自 CNC 控制系统的各种各样的数据展开即时的采集工作,还能对这些数据进行预处理,并且能给这些数据打上相应的标签。平台在相关操作中选用了诸如 OPC UA 以及 MTConnect 这类标准化协议,通过运用它们来达成对不同品牌控制系统之间数据格式的兼容效果。与此同时,平台还借助异构数据解码以及统一标准封装的方式,构建起一个统一的数据模型。在数据存储这个层面,平台采用的是高性能时序数据库,像是 InfluxDB 或者 TimescaleDB 之类的,凭借它们能够以微秒级的精度对机床各项运行状态予以记录,进而为历史趋势分析以及运行轨迹追溯提供有力的支持。

从另一个方面来讲,系统成功达成了让仿真模型和现实数据相互比对的功能,依照预先设定好的阈值去判定当下的运行状态有没有偏离理想的路径,要是出现了偏离的情况,那么便能够自动地触发预警或者给出优化方面的建议。再进一步来说,平台拥有向物理设备反向写入控制参数的本领,也就是说在虚拟环境中经过调试以及验证的有关路径、速度、进给等一系列的指令,可以通过按一下键的简单操作就下发到 CNC 控制系统当中去,而且是在不使实际设备的运行被迫中断的前提条件之下完成策略的切换或者参数的优化调整,如此一来,便切实构建起了具备闭环反馈特性的数字孪生调试链条。

2 关键功能模块开发与技术实现路径

2.1 加工路径规划与逻辑验证模块

路径规划以及逻辑验证模块属于调试平台的核心功能范畴,其对加工过程是否可行、是否安全起着直接的决定作用。平台依托主流的 CAM 系统,像是 UG NX、PowerMill 之类的,或者凭借自研的路径规划引擎,针对任何输入进来的零件三维模型,都能够自动去生成加工路径。在这个过程中,会把毛坯尺寸、刀具几何形状、进给策略等诸多因素都考虑进去,进而规划出最为理想的路径方案。所生成的 G 代码,一方面能够被导入到仿真模型当中以便进行路径预览,另一方面还可以借助平台内置的代码编辑器来开展语义解析、指令重组以及安全校验等工作。该编辑器具备多种功能,比如支持对代码逐句进行解析,能够将嵌套结构展开,还可以对跳转逻辑展开分析等,从而识别出代码里存在的诸如冗余命令、语法错误、逻辑死循环等一系列问题。

在开展路径仿真的时候,系统会把加工轨迹通过动画这种形式,动态地在机床虚拟模型的上面展示出来,能够展示出刀具和工件它们之间的相对运动状况,还有切削轨迹以及加工轮廓等情况,以此来助力操作者可以更为直观地去感知加工所达成的效果。碰撞检测这一模块呢,会实时对路径过程里机床各个部件相互之间存在的空间干涉风险加以监测,从而确保加工能够安全进行。并且呢,该模块还具备支持离线编程验证以及多路径策略比选这样的功能,如此一来便使得操作人员在实际的设备真正投入使用之前,就能够完成对最优方案的选取工作。

2.2 三维可视化人机交互界面

为了让操作者能够充分感知系统状态,并且实现灵活自如地操控,平台精心打造出了一个有着高交互性特点的三维可视化界面。这个界面是依托 Unity3D 或者 Unreal Engine 这类图形引擎来开展开发工作的,它能够针对 CNC 设备的几何模型、运动状态以及工件加工过程完成实时渲染任务。用户在相应的窗口当中,可以实现从任意角度去进行旋转、缩放以及切换等操作,还能通过点击的方式来查看局部结构的具体细节,甚至能够切换到剖面视角去仔细观察内部的运动关系。系统把 VR/AR 设备接口也都集成了起来,如此一来,用户便可以借助头戴式显示器顺利进入到沉浸式的操作空间当中,去模拟像零件安装、刀具更换以及冷却液注入等一系列的工艺过程,这在很大程度上提升了培训所具有的直观性以及操作方面的体验感受。在界面之中还嵌入了加工参数控制面板,这

里面涵盖了主轴转速、进给速率以及切削深度等能够进行调控的变量,用户可以在线对其做出修改,并且能够马上观察到虚拟仿真效果所发生的变化情况。除此之外,界面还集成了状态指示灯、告警提示框以及任务流视图等内容,进而实现从建模、编程、仿真一直到反馈的整个过程的可视化管理,从而给予使用者更为强烈的任务控制感觉以及反馈方面的认知。

2.3 运动控制与误差评估模块

平台所配备的运动控制模块,乃是达成仿真行为精准还原的关键技术所在。它把 CNC 插补算法加以集成,以此来模拟各式各样不同类型指令的执行流程,像直线插补、圆弧插补以及 NURBS 样条插补这些,并且引入伺服动态模型,用以反映各轴相互之间的响应特点以及存在的滞后行为。在每条加工指令具体执行的时候,会结合主轴转速、加速度方面的限制以及惯量匹配等情况,进而生成和实际设备相符一致的路径以及时间轨迹。基于此,误差评估模块会实时地对理想轨迹与仿真执行轨迹展开对比,输出诸如位置误差、速度偏差以及加减速震荡等一系列关键指标,而且还能够把误差数据通过热力图或者曲线图的形式呈现出来,从而突出那些存在问题的时间段以及空间点位,以便于后续做进一步的分析与改进。该模块还具备故障模拟的功能,通过设定像编码器失效、驱动器出现异常、轴向发生抖动等这样的一些情境,来验证系统处于故障状态下的自适应能力以及容错能力,它无疑是开展鲁棒性设计以及应急演练的得力工具。运动控制功能和误差分析功能相互结合起来之后,使得平台不但能够验证‘是否可以加工’这一点,而且还能够精准地去评估‘加工的效果究竟怎么样’,为达成精密制造以及实现质量闭环控制筑牢了十分坚实的基础。

3 平台应用成效与未来拓展方向

3.1 实际案例应用效果分析

在某高端装备制造企业展开的试点应用活动期间,平台被安置在了五轴加工中心前端的调试阶段当中。原本其调试周期平均算下来得要 12 个小时才行,然而在经过平台所开展的虚拟预调试操作之后,仅仅花费 3 个小时便能够在物理设备上顺利完成最终的验证工作了。操作员能够凭借三维界面去较为快速地了解零件的加工具体过程,并且还可以通过误差模拟这一方式及时对路径以及参数做出相应的调整,如此一来便成功避免了 2 次有可能会发生的潜在撞刀事

故。在平台完成部署之后,该企业的月度机床利用率提升了 12%,与此同时,调试错误率也下降了大概 60% 左右,这无疑给企业带来了颇为显著的经济效益,同时也为企业的生产活动提供了可靠的安全保障。

3.2 对制造模式的变革作用

在传统制造领域,产品设计环节、工艺规划方面以及设备调试阶段呈现出串行的关系模式,如此一来,设备调试这一环节便沦为了影响效率提升的瓶颈所在。本平台却能够突破时空方面的种种限制,达成所谓的“前置调试”以及“虚实同步”这样的效果,从而极大程度地缩减了研发所需要历经的周期时长,为柔性制造活动以及个性定制业务给予了极为重要的支撑力量。另外,该平台还拥有数字档案管理方面的能力,能够对每一个产品的调试轨迹情况以及优化的具体过程予以详细记录,借此不断积累相关的工艺知识内容,进而推动制造流程朝着标准化、知识化的方向发展,它无疑是构建智能工厂数字底座过程当中非常关键的一个环节部分。

4 结语

数字孪生技术正以前所未有的速度渗透进制造业的各个环节,其中以数控加工虚拟调试平台为代表的典型应用,充分展示了其在降本增效、优化流程与保障安全方面的巨大潜力。本文围绕平台开发的架构设计、关键模块与应用价值展开深入剖析,并在实践中验证了其现实意义。面向未来,虚拟调试平台不仅是智能制造的重要支撑工具,更将在推动工业软件自主化与构建工业元宇宙等前沿领域持续发挥核心作用。

参考文献

- [1] 江海凡,丁国富,肖通,等. 数字孪生演进模型及其在智能制造中的应用[J]. 西南交通大学学报. 2022, 57(6). DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20210202.
- [2] 方圆,刘江,吕瑞强,等. 基于数字孪生的设备加工过程监测技术研究[J]. 航空制造技术. 2021, (4). DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.04.091.
- [3] 肖通,江海凡,丁国富,等. 五轴磨床数字孪生建模与监控研究[J]. 系统仿真学报. 2021, 33(12). DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0534.
- [4] 傅贵武,王兴波,田英. 基于五轴加工中心智能生产线的数字孪生应用研究[J]. 工程设计学报. 2021, (4). DOI: 10.3785/j.issn.1006-754X.2021.00.051.