

计算机集成制造系统  
*Computer Integrated Manufacturing Systems*  
ISSN 1006-5911, CN 11-5946/TP

## 《计算机集成制造系统》网络首发论文

题目：基于数字孪生的铣刀状态实时监控研究  
作者：刘明浩，岳彩旭，夏伟，张俊涛，刘献礼  
收稿日期：2022-03-15  
网络首发日期：2022-07-25  
引用格式：刘明浩，岳彩旭，夏伟，张俊涛，刘献礼. 基于数字孪生的铣刀状态实时监控研究[J/OL]. 计算机集成制造系统.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220725.1410.002.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 基于数字孪生的铣刀状态实时监控研究

刘明浩，岳彩旭<sup>+</sup>，夏 伟，张俊涛，刘献礼

(哈尔滨理工大学 先进制造智能化技术教育部重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘 要：**针对机械加工过程中面临的制造过程不稳定、数据时效性差、实时监控可视化效果弱等问题，本着“虚实结合、以虚控实”的总体思想，提出了基于数字孪生的铣刀状态实时监控方法，构建了物理空间和虚拟空间共生互控的数字孪生体。首先，搭建了基于数字孪生五维模型的铣刀状态监控系统结构模型，明确了五层系统架构的组成部分；其次，分别阐述了实现孪生系统框架的三个关键技术：数控机床的数字空间搭建、多源异构数据的传输及管理、数字孪生驱动的铣刀状态监测；最后，以某薄壁件铣削加工为应用案例，验证了该监控方法的可行性与有效性，并为全面管控高档数控机床加工过程提供了一种新途径、新思路。

**关键词：**数字孪生；铣刀状态监控；五轴数控机床；三维可视化

**中图分类号：**TP391.9；TH164

**文献标识码：**A

## Real-time monitoring of milling tool state based on digital twin

LIU Minghao, YUE Caixu<sup>+</sup>, XIA Wei, ZHANG Juntao, LIU Xianli

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Considering the defects in mechanical processing, including unstable manufacturing, poor data timeliness, and weak real-time monitoring visualization, in light of the principle of “combining the real with the virtual, controlling the real with the virtual”, this paper proposes a real-time monitoring method for milling cutter status based on digital twin technology and constructs digital twins of co-existence and mutual control of physical space and virtual space. First, it builds a structural model of a milling cutter status monitoring system based on a digital twin five-dimensional model and defines the composition of the five-layer system architecture. Second, it elaborates three key technologies to realize the twin system framework, namely, the digital space construction of CNC machine tools, the transmission and management of multi-source heterogeneous data, and the digital twin-driven milling cutter condition monitoring. Last, it describes the milling of a thin-wall part to demonstrate the feasibility and effectiveness of the monitoring method, with a view to providing a new approach and idea for the comprehensive

收稿日期：2022-03-15；修订日期：2022-07-01。Received 15 Mar. 2022; accepted 01 July 2022.

基金项目：国家自然科学基金国际合作重点资助项目(51720105009)；黑龙江省优秀青年基金资助项目(YQ2019E029)。**Foundation items:** Project supported by the International Cooperation and Exchanges of National Natural Science Foundation, China (No.51720105009), and the Outstanding Youth Fund of Heilongjiang Province, China(No.YQ2019E029).

---

control of high-grade CNC machine tool processing.

**Keywords:** digital twin; milling cutter status monitoring; five axis CNC machine tools; 3D visualization

## 0 引言

随着“工业 4.0”、“中国制造 2025”等战略政策的提出,智能制造引领的第四次工业革命已经到来。智能制造系统利用新一代信息技术整合了加工过程中的设备资源,实现生产流程的状态感知、工业互联和数据挖掘,基于加工过程对数据进行分析,实现了生产流程的优化迭代、自主决策等智能服务<sup>[1]</sup>。同时,大数据、边缘计算等技术也为智能制造的实现提供了强有力的支柱。然而,在实现智能制造的过程中,面临着物理空间与数字空间之间交互、融合的难题,为此提出了数字孪生(Digital Twin, DT)的解决方法<sup>[2]</sup>,数字孪生的出现为智能制造的实现开辟了新途径。

数字孪生概念最早由 Grieves 于 2003 年提出,被认为是数字空间中物理实体的映射模型<sup>[3]</sup>,对推动传统制造业生产模式的转变具有重要作用。数字孪生技术利用新一代的信息技术构建一个虚拟模型来描述物理对象的特征、性能、行为和规则,然后监控和控制物理对象的行为<sup>[4]</sup>,该技术是在信息世界中表征、模拟、优化和可视化物理世界的重要手段<sup>[5]</sup>。数字孪生系统的本质是一个由物理实体与虚拟模型结合得到的、可持续优化的功能系统<sup>[6]</sup>,在数字空间中构建能够实时反映物理系统的状态、行为并能准确预测其未来状态、行为的模型,从而辅助用户做出最优决策。

伴随着新一代信息技术的快速发展,传统制造业正转向智能化、信息化,并已迈进数字化的时代<sup>[7]</sup>,而数控机床作为制造业的“工业母机”,其智能化程度对智能制造的实施具有重要影响<sup>[8]</sup>。数控机床是现代制造业的核心,通过建立数控机床的数字孪生体,可以在虚拟空间中映射物理机床的加工过程,并在实际加工过程中对物理机床的运行状态进行实时监控<sup>[9]</sup>。机床状态监测与工业互联网技术、传感技术和数据处理技术的深度融合具有重要的研究意义,可以加快数控机床智能化的发展,促进智能制造的实施<sup>[8]</sup>。

数字孪生技术得到了业界的高度关注,国内外的专家学者已开始探索数字孪生技术在产品全生命周期管控和车间可视化监控等方面的应用<sup>[10]</sup>。宗学妍<sup>[11]</sup>将数字孪生应用于车间运行的模拟与监控,在一定程度上实现了对车间生产状态及参数的全视图监控;数字孪生车间的概念是陶飞等人<sup>[12,13]</sup>首先提出的,阐述了数字孪生车间的构成、实现原理、特点和关键技术等,其团队为数字孪生技术在车间等场景的应用提供了工具、理论模型和标准的参考;Zhao 等<sup>[14]</sup>针对物理空间与虚拟空间的数据融合问题,提出了一种加工过程中多源异构数据的层次模型和映射策略来生成 DT 数据,分析了

DTPM 在工艺规划中的指导和可视化功能；Liu 等<sup>[15]</sup>提出了刀具全生命周期各个阶段的数字孪生数据流框架，搭建了将实际刀具磨损数据和虚拟刀具磨损数据融合交互的虚拟刀具测试平台；赵浩然等<sup>[16]</sup>提出了基于实时加工数据的三维实时监控方法，实现了对车间全要素的动态监控，但没有考虑将指标变化的预测模型反馈给物理车间进行优化；在加工航空航天结构件领域，卢山雨等<sup>[17]</sup>构建了基于增强现实的数字孪生加工系统，实现了孪生数据的可视化，但在人机交互等方面仍存在不足。

综上所述，目前相关专家学者的研究内容集中于数字孪生模型定义、系统框架构建等方面，多数人仅仅讨论了抽象的数学或逻辑模型，研究尚且停留在理论阶段，数字孪生的落地应用方面仍处于起步阶段<sup>[7,10]</sup>。在生产制造领域，多数学者是以宏观的角度将数字孪生应用于对车间调度、车间生产监控等方面，而落实到具体加工装备如数控机床的研究较少，尤其是更为具体的铣削加工应用。基于此，本文遵循“虚实结合、以虚控实”的总体思想，将虚拟仿真与物理机床设备相结合，利用数字孪生概念对数控机床进行开发。针对数控机床铣削加工过程，提出了一种三维可视化实时监控的方法，借鉴数字孪生五维模型<sup>[18]</sup>搭建了数控机床数字孪生体系架构，构建的基于真实机床行为实时镜像映射的虚拟仿真环境，基本满足对机床的三维实时可视化监控、状态预测、故障预警等要求。最后通过实例应用验证了数字孪生系统的可行性和有效性，可以为复杂装备的数字孪生系统的框架构建、状态预测与运行监控提供借鉴和参考。

## 1 数控机床的数字孪生五维模型框架

### 1.1 数控机床的数字孪生系统结构模型

数控机床的数字孪生系统是在信息技术、传感技术的驱动下，通过建立物理机床与虚拟机床之间的网络层通讯，从而实现数字孪生系统的数据集成与融合；在机床孪生数据的驱动下，通过机床运动映射、机床状态监测、加工状态监测、加工参数优化与控制和刀具状态识别与预测等功能的运行，实现数控机床的三维可视化及实时交互，从而达到对机床加工过程全面管控的效果。

本文借鉴数字孪生五维模型，构建了数控机床的数字孪生系统结构模型如图 1 所示。其中，物理实体是数字孪生系统构造模型的基础，是实际存在的；虚拟实体是对物理实体的数字化镜像映射，是从时空角度与实际物体保持一致的三维模型；孪生数据是驱动，是数字孪生五维模型的核心；连接是虚与实互联互通的关键，实时、动态、交互的连接是数字孪生的动脉；孪生服务系统是包括数据连接、数据可视化分析和设备监控等服务的平台，是数字孪生的目的意义。虚拟机床在线监控物理机床并映射实时加工过程，通过建立机床通讯进而反向控制物理机床的状态和行为，接收来自多传感器信号和机床状态数据后能够在一定程度上指导加工的进行，有利于用户对加工工艺流程的全面管控，便于实时分析机床设备的运行状态以及工件加工的状态，并提高理解数控机床加工状态的

准确度和效率。

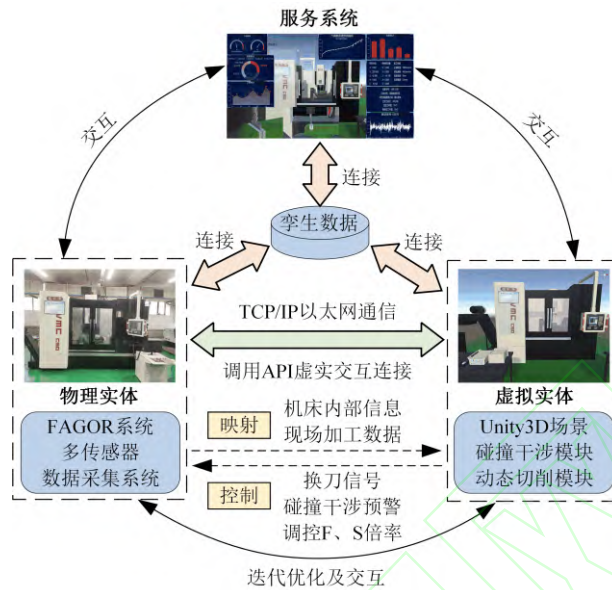


图1 数控机床的数字孪生系统结构模型

## 1.2 数控机床的数字孪生系统架构

数控机床的数字孪生系统架构如图2所示，该架构主要划分为以下5层：

### (1) 物理层

数字孪生系统中的物理设备主要包含数控机床、外部传感器、数据采集卡等设备，通过在机床上布置传感器和工业以太网连接，数字孪生系统将物理机床的行为实时映射到虚拟机床上。

### (2) 虚拟层

数字孪生系统中的虚拟模型是基于实际机床建模的三维渲染模型，根据生产阶段的不同而发生改变，为了实现物理机床到虚拟机床的真实有效的镜像映射，需要融合虚拟模型的结构与功能，以及根据真实机床的行为规则定义虚拟模型的控制准则。通过开放平台通信统一框架协议（OLE for Process Control Unified Architecture, OPC UA）建立以虚控实的机制，实现虚拟机床反向控制真实机床的行为。

### (3) 数据层

孪生数据是数字孪生系统运行的基础，主要包括采集加工现场的传感器数据如切削力、加速度等信号，以及机床设备内部的运行状态数据如主轴旋转速度、进给倍率、主轴位置坐标、程序号等信息。将采集的信号在MATLAB中完成小波降噪等预处理后进行时频域分析、傅里叶变换等分析，提取有效特征后传输至服务层。

### (4) 服务层



---

通过融合物理机床、虚拟机床以及孪生数据，在可视化软件中搭建数控机床数字孪生系统平台，面向铣削加工过程，可以达到切削过程可视化、加工状态透明化、设备管理智能化的效果。比如刀具磨损的状态分析可以进行机床加工过程中刀具的状态分类及预测，构建神经网络模型，经过一系列的网络参数优化和模型训练后应用于如切削力、温度、刀具磨损状态等预测，从而分析、判断加工装备的运行状态。预测信息为机床加工的状态预测和加工优化提供依据，通过不断优化改进模型，能够实现加工装备的智能决策。

#### （5）应用层

数字孪生系统的应用层作为物理机床、虚拟机床、服务平台、孪生数据以及两两交互连接的集成，是有效驱动整个系统运转的关键。针对铣削加工过程，调取孪生数据如机床内部数据、传感器数据等，并将其在可视化界面中动态实时刷新；通过切削加工过程仿真和机床主轴碰撞检测的实现，协助用户更好的了解和分析当前加工情况。

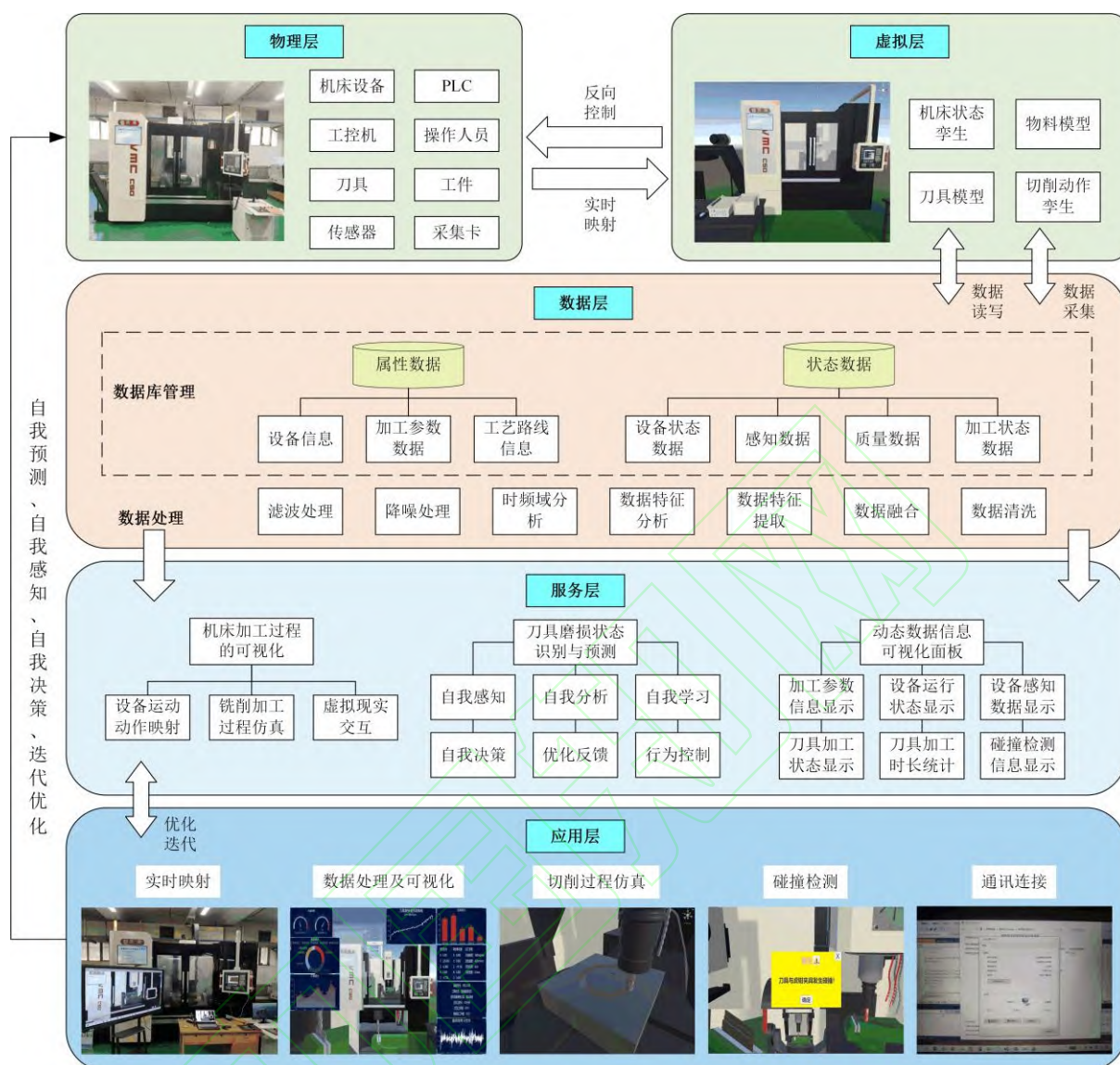


图 2 数控机床数字孪生系统总体框架

## 2 关键技术

数控机床数字孪生系统构建过程融合了机床数字空间搭建、多源异构实时数据的传输及管理、数字孪生驱动的机床加工状态监测与预测三部分。其中：机床数字空间搭建包括几何建模、场景搭建、行为逻辑模型构建三部分；多源异构实时数据的传输及管理，用于实现数字孪生系统的虚实交互；数字孪生驱动的铣刀状态监测，是基于加工的历史数据、运行实时数据驱动的加工状态分析方法，对刀具磨损状态进行有效分析和预测。

### 2.1 机床数字空间搭建

机床数字空间的构建流程如图 3 所示，由几何建模、场景搭建和行为逻辑模型构建三部分组成。

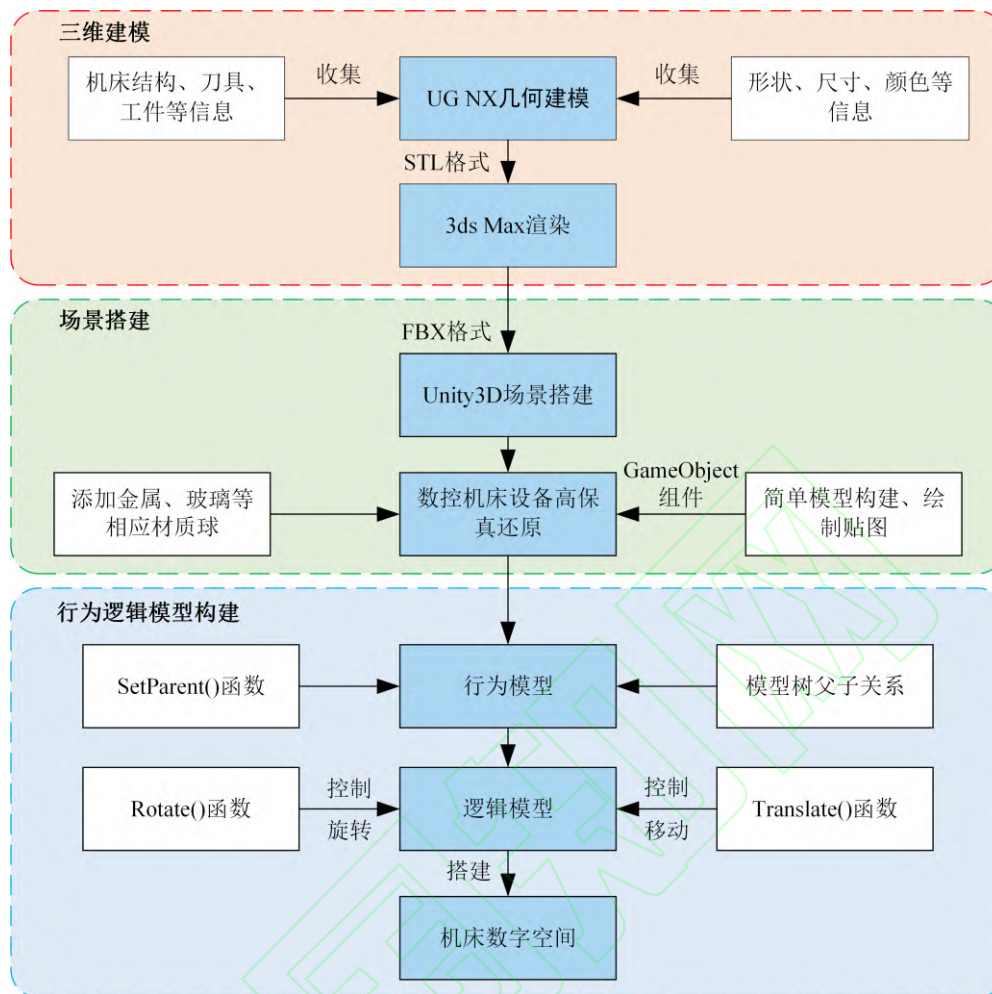


图3 机床数字空间建模流程

### (1) 三维建模

在开展建模工作之前首先要实地测量设备尺寸并记录外形特征，对设备整体拍摄高质量图片用于后续工作，这一阶段需要尽可能多的收集机床设备信息资料。随后在 UG NX 软件中按照尺寸比例绘制三维模型并导出 STL 格式文件，将此文件导入 3ds Max 软件中进行渲染，再将渲染后的 FBX 文件导出至 Unity3D。需要注意的是，由于工业制图软件导出的模型过于细致，导致存在大量三角面，该模型在 Unity3D 中运行时会严重影响电脑性能，甚至会影响后续的系统优化工作。为了解决上述问题，可以在 3ds Max 中对模型进行减面处理。

### (2) 场景搭建

场景搭建是机床数字空间构建中较为重要的环节，这一阶段需要进行虚拟空间的布置与功能设计。在细节处理方面，需要为场景中机床模型环境添加金属、玻璃、木质等相应材质球，并根据前期拍摄的高清照片调整其颜色与物理空间相符，设置粒子特效模拟切屑的生成，经过处理的 Unity3D



虚拟机床场景更具沉浸感。而对于辅助设施、地板、围墙等一些细节呈现要求不高的模型，可以利用 Unity3D 的 GameObject 组件进行创建。

### (3) 行为逻辑模型构建

完成场景搭建后，想要实现虚实交互的功能还需要构建行为逻辑模型，赋予数字空间的虚拟模型运动的具体行为和逻辑关系。通过外部传感器及机床通讯协议实时采集的数据、关联模型绑定的变量和所预设的行为动作，对数据驱动的数控机床进行铣削加工仿真。模型树的结构之间存在一定的父子关系，可以使用 C#语言编写 SetParent()函数建立两模型间的父子关系，例如刀具、刀柄、主轴的父子关系在换刀阶段有变化。机床模型的运动包括移动和旋转两类，使用 Translate()函数和 Rotate()函数实现主轴进给、主轴旋转等功能，通过规定主轴的移动限位、旋转速度调节、进给速度调节等规则，进一步完善机床数字空间搭建的内容。

## 2.2 多源异构孪生数据的传输及管理

实时数据是数字孪生系统的重要组成部分，也是驱动着车间三维可视化监控的动力源泉，对实时数据的采集、传输及预处理等技术是实现车间三维可视化监控的技术基础。对孪生数据进行挖掘，建立机床的数字孪生模型，为实现数控机床的智能控制建立数据支撑。虚拟机床与物理机床通讯及数据传输的流程如图 4 所示。

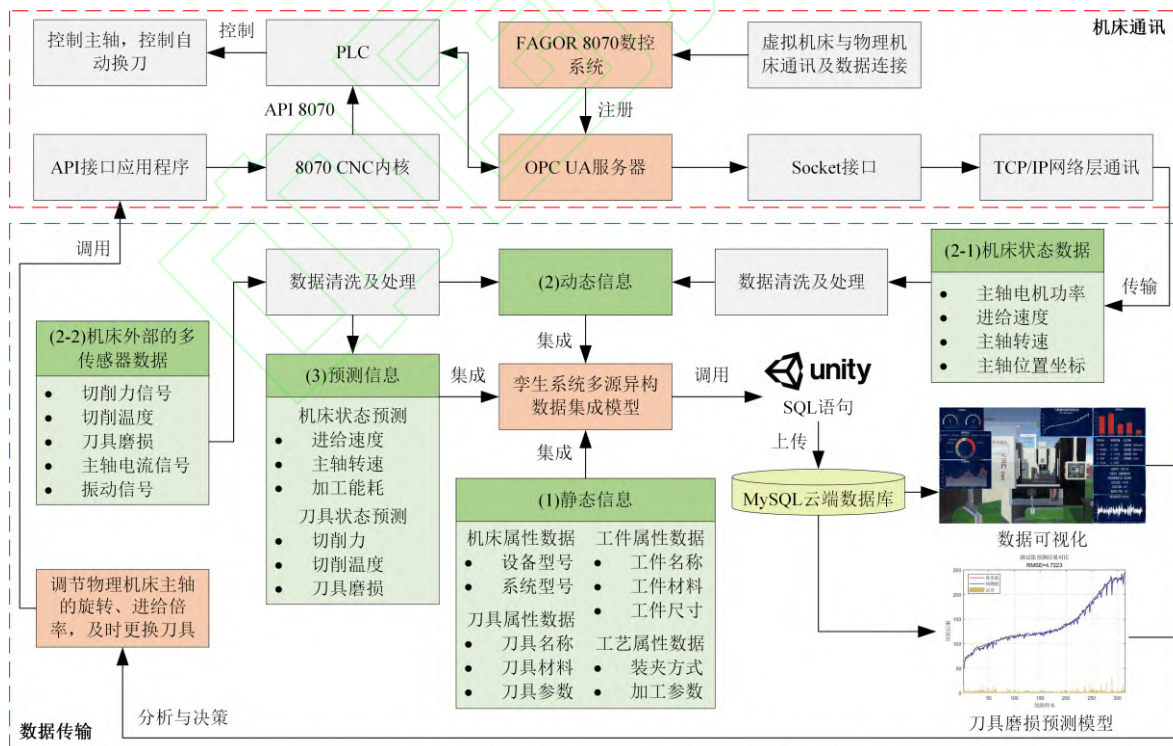


图 4 虚拟机床与物理机床通讯及数据传输流程

本文中机床设备虚实交互的实现过程如下：（1）在 FAGOR 8070 数控系统中注册 OPC UA 服务

---

器，这是实现数据在应用层的传输的基础，也是实现远程访问应用程序的前提条件；（2）物理机床与虚拟机床通过 Socket 接口建立 TCP/IP 的网络层通讯连接。Socket 是应用层和传输层之间的软件抽象层，它是应用程序之间利用数据通道进行信息交换完成通信的套接字，其本质是对 TCP/IP 封装好的 API；（3）利用 API 8070 建立 8070 CNC 内核和应用程序之间的连接访问，API 8070 是由众多 COM 对象组成，这些对象可以导出与 8070 CNC 内核通信的函数，8070 CNC 的所有变量都可以基于 OPC UA 传输协议通过 API 8070 连接到任何接口而进行访问。

物理机床与虚拟机床利用 Socket 接口建立通讯后，通过 FAGOR 8070 数控系统访问 OPC UA 服务器获取机床主轴位置坐标等机床运行状态信息，数字空间接收来自物理空间的多源异构数据并存入 MySQL 云端数据库。在 Unity3D 软件中利用 C# 语言编写的脚本调用相关 SQL 语句与 MySQL 数据库进行交互连接，从而实时获取多源异构数据信息，使用 XCharts 插件以文本面板、折线图、柱状图、饼状图、仪表盘等形式实现数据的可视化，可以帮助用户迅速、高效地查看数控机床加工的状态、进程，通过更准确的分析而做出最佳的决策，更为直观地展示故障信息、加工状态及设备运行状态等信息。

驱动数字空间的多源异构数据主要由静态信息、动态信息和预测信息三部分构成：（1）静态信息包括机床属性数据、刀具属性数据、工件属性数据和工艺属性数据四部分，这类信息在机床加工运行过程中是固定不变的，在加工前的准备阶段完成静态信息的录入及管理；（2）动态信息由机床状态数据和机床外接传感器数据组成，但基于传感器、数控机床通信模块以及人工采集等多种方式采集加工现场数据会产生空值、重复等错误，因此还需要以尽量减少原始信息损失为原则对数据进行过滤和清洗处理。这类信息会随着工件加工的进行发生变化，同时也会反映实时加工状态以及设备运行状态，而且对数据的准确性和实时性要求更高，因此动态信息是数字孪生系统中多源异构数据的重要组成部分；（3）预测信息由机床状态预测和刀具状态预测构成，以刀具磨损、切削力和切削温度的预测为主体，通过对多传感器采集数据的分析获得预测信息，进一步提高用户对多源异构数据的预测和决策的能力。静态、动态、预测信息集成构造为孪生系统多源异构数据集成模型，将数据划分为数值型、布尔型和字符串型，并上传至云端数据库。

虚拟机床会把刀具磨损状态、换刀信息以及碰撞报警信号等反馈给用户，通过调用 API 8070 接口函数调节机床主轴的旋转倍率、进给倍率，利用 PLC 控制主轴位置，从而实现对物理机床的反控行为。通过数字孪生模型来模拟物理机床的状态，并控制物理机床，即以虚控实，是数字孪生应用的重要研究内容。

### 2.3 数字孪生驱动的铣刀状态监测

刀具作为数控机床的关键部件，是保证加工质量、提高生产效率、降低生产成本的关键因素之一，也是最易损伤的部件<sup>[19]</sup>，在机械加工过程中，刀具磨损或破损会造成工件质量下降，甚至导致整个生产系统瘫痪，造成生产事故和经济损失，所以关注刀具的状态对于监控机床加工很重要。数字孪生驱动的机床加工状态监测与预测的实现流程如图 5 所示，数控机床数字孪生系统接收设备的多传感器数据后，在 MATLAB 软件中对信号进行初步的预处理并将处理后的数据导入训练好的深度学习模型中，在线处理和分析机床加工中监测的原始信号，预测刀具的磨损值，与 Unity3D 进行交互并实现数据的可视化。

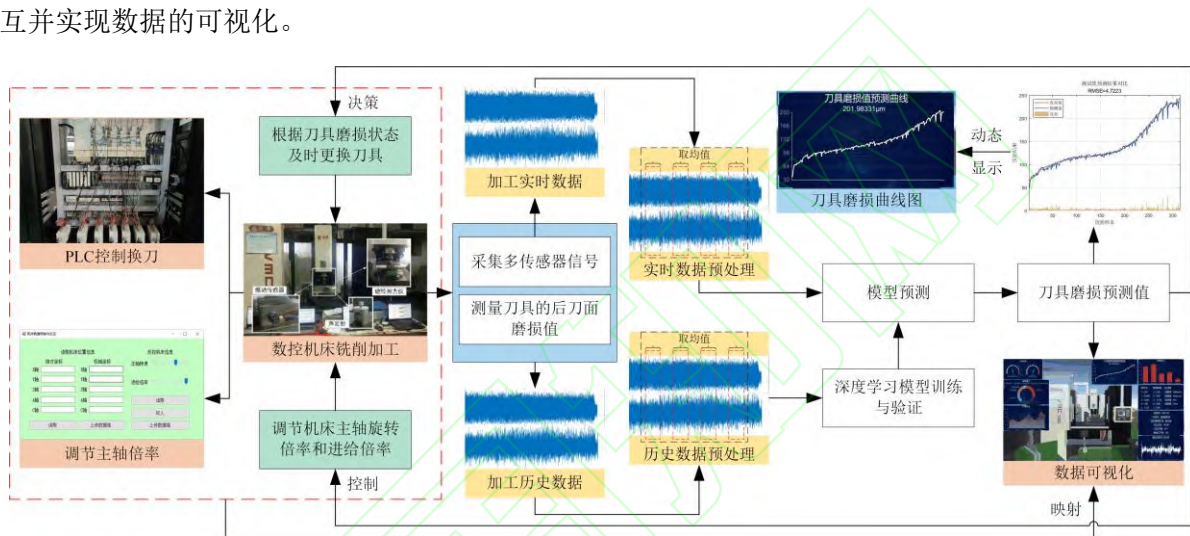


图 5 信号采集、数据处理及模型搭建流程

建立机床加工状态监测与预测模块的步骤如下：（1）利用多物理场传感器对力、加速度、声发射、主轴电流、机床功率等信号进行采集，记录每一次走刀数据，利用超景深显微镜每隔一段时间测量一次刀具后刀面磨损值，直至达到急剧磨损阶段后及时更换刀具进行反复实验；（2）在 MATLAB 软件中处理从物理机床传感器采集的感知数据，对原始信号进行数据截取、小波降噪、数据平均分组取均值等预处理；（3）利用加工历史数据集构建基于 CNN 卷积神经网络的深度学习模型，用于在线分析与预测刀具磨损值，对模型进行多次迭代训练并验证其损失函数与准确度，从而有效分析刀具所处的磨损阶段和磨损预测值，从而判断并执行相应的换刀决策；（4）Unity3D 和 MATLAB 之间通过脚本编程进行通信交互，Unity3D 作为客户端，MATLAB 作为服务端。将加工实时数据在 MATLAB 中处理后导入神经网络模型预测刀具磨损值，通过通信端口将实时数据传入 Unity3D 软件后利用 XCharts 插件实时显示刀具磨损曲线以及所处的刀具磨损阶段；（5）根据刀具磨损的状态，通过 PLC 控制物理机床设备对加工参数如主轴旋转倍率、进给倍率进行调整并及时控制机床换刀。

通过以上采集、分析、预测、决策四个阶段的迭代调整，可以不断地优化数字孪生驱动的铣刀



状态监测模型，进一步提高模型对刀具加工状态监测的准确度。智能感知拥有孪生系统紧急决策权限，根据深度学习模型设置预警阈值，当刀具磨损值超过阈值时，能够及时执行换刀或停机动作，降低管理人员的工作量，减少对突发事件的反应时间和处理时间。

3 数控机床数字孪生系统应用案例与分析

数控机床数字孪生系统的应用对象为 VMC-C50 拓璞五轴加工中心，数控系统为 FAGOR 8070，虚拟机床与物理机床的映射关系如图 6 的左侧所示，数控机床配有 X、Y、Z 三个直线轴和 A、C 两个回转轴，可以完成复杂曲面和箱体等盘类零件加工，数控机床的主要参数如表 1 所示。应用场景为薄壁件侧铣加工过程的监控，数字空间的虚拟场景布置如图 6 的右侧所示，右下角边框内为薄壁件铣削加工的去除工件材料放大图细节。

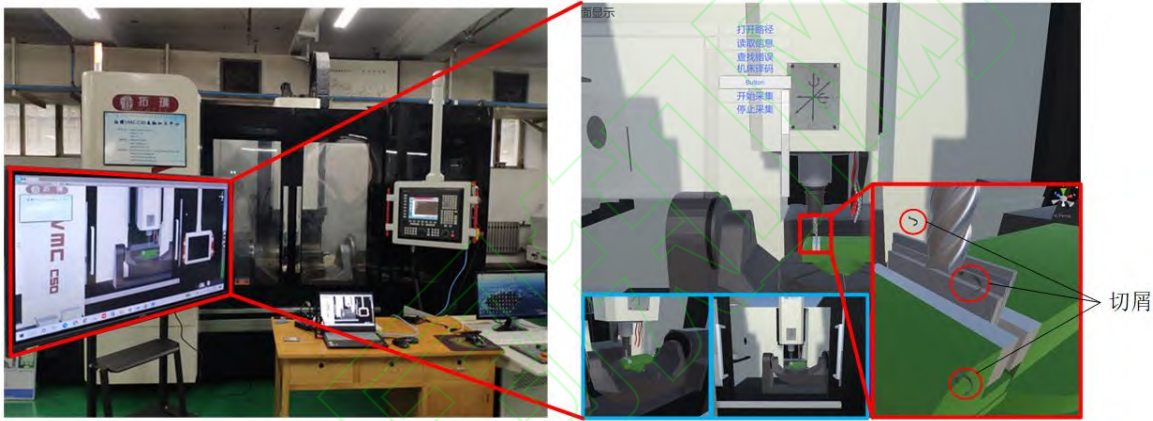


图 6 VMC-C50 拓璞五轴加工中心

表 1 机床主要参数

项目名称	参数
机床型号	VMC-C50
旋转工作台分度(°)	0.001
摇篮摆动轴（A 轴）摆动角度(°)	-25~+100
主轴最高转速(rpm)	15000
主轴额定扭矩(N·m)	54
主轴进给速度(mm/min)	1~6000
X/Y/Z 轴行程(mm)	1050/560/450
快速进给(m/min)	25
工作台旋转轴（C 轴）最大转速(r/min)	12

3.1 数控机床加工状态预测

本文采用 2010 年美国 PHM 协会举办的刀具磨损比赛的公开数据集构建了刀具磨损预测的深度学习模型，以此验证 2.3 节中提及的机床加工状态预测效果。数据集共记录了 c1-c6 共 6 把铣刀每次



---

走刀的传感器数据以及刀具磨损值，每把铣刀均进行 315 次走刀循环，记录了从新刀到严重磨损的过程，实验过程中采集了三向力、三向加速度和声发射三种信号、七个通道的数据。

### （1）数据预处理

由于在实际加工的采集过程中难免会存在一些环境噪声，直接将原始数据全部输入深度学习模型，既会影响预测模型的精度，也会影响模型的实时性，因此数据在输入模型之前需要进行一定的预处理，具体如下：

截取原始数据中间稳定部分的 10 万个连续采样点，对截取的数据片段使用阈值降噪法进行小波降噪滤波，小波基函数为“db5”，分解层数为 5 层，阈值选择软阈值。利用窗口函数平均分组，并取每一段的均值，为了兼顾计算速度和数据还原度，这里设置窗口数为 1000，得到（1000，7）的张量输入预测模型。

### （2）模型训练

本文利用 c1 和 c4 的数据作为训练集进行模型的训练，训练样本数为 630 个，c6 作为测试集验证模型的预测精度，测试样本数为 315 个。模型训练阶段的神经网络参数设置如下：采用 Adam 梯度下降优化算法，训练迭代次数设为 100 次，初始学习率为 0.001，经过 40 次训练后学习率下降，学习率下降因子为 0.5。基于卷积神经网络-长短时记忆（CNN-LSTM）的深度学习模型由三层卷积网络结构、两层长短时记忆网络和两层全连接层构成：第一层卷积核的大小为 5，卷积核的数量为 16，步长为 2；后两层卷积核的大小均为 3，卷积核的数量分别为 32 和 64，步长为 2；每层卷积层之间均采用最大池化层实现降维；两层长短时记忆网络隐藏层的神经元个数分别为 50 和 100；两个全连接层的神经元个数分别为 50 和 1；激活函数为 ReLU 函数；在 LSTM 层和全连接层之间加入保留概率为 0.5 的 Dropout 层以避免过拟合。

### （3）预测模型效果验证

经过上述的模型训练后将效果良好的网络结构保存，并应用于测试集的测试验证。预测结果如图 7 所示，其中红色曲线表示真实值，蓝色曲线表示预测值，橘黄色柱状图表示真实值与预测值误差的绝对值。根据图 8 可知预测曲线与真实曲线拟合度较好，在初期磨损和正常磨损阶段误差较小且波动较小。采用回归问题最常用的均方根误差（RMSE）这一指标验证模型的准确率，RMSE 值越小意味着模型预测效果越好，该模型在 c6 测试集上的 RMSE 值为 4.6914，预测效果良好。保存训练好的预测模型，处理单个测试集样本数据的用时在 12ms 左右，证明了该模型有较好的实时性，适用于工业实际生产过程中对刀具磨损的在线实时预测。

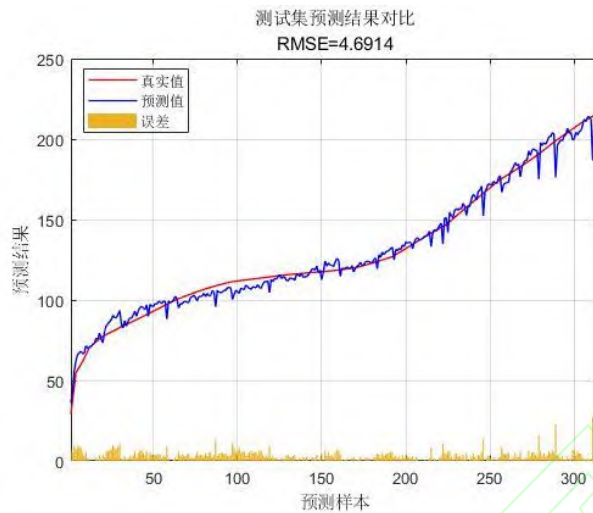


图7 模型预测结果

### 3.2 数控机床数字孪生系统功能

#### 3.2.1 切削加工映射

在本文中应用的铣削加工仿真主要分为两类：一是电主轴、刀具、刀库、换刀机械手等部件的运动仿真，二是动态的切削仿真。运动仿真的类型主要就是移动和旋转，在虚拟机床和物理机床建立通讯连接后，访问 OPC UA 服务器实时获取数控机床的主轴位置坐标、进给倍率和主轴旋转倍率等信息，随后将位置数据发送至 GPU 缓存区，经过多种变换矩阵的组合来表示虚拟模型在数字空间中的坐标变换，实现机床铣削加工流程的高度映射。切削仿真涉及到实时切削的动画效果，需要设计相应的算法，对系统的实时性要求也很高，这部分一直是切削加工仿真研究的重难点，动态切削算法的核心为判断刀具与工件模型的三角面的相对位置关系<sup>[20]</sup>，从而分析如何做布尔交运算操作，判断是否对工件模型进行切削处理，具体实现步骤如图 8 所示。

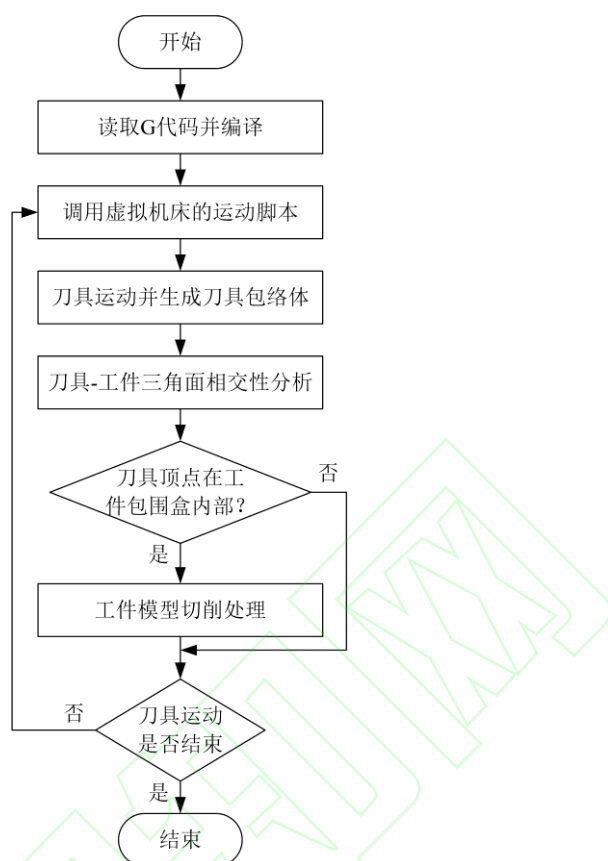


图 8 动态切削算法流程图

在本文中提出的切削加工仿真的特色在于实时交互以及逼近实际切削加工的体验，图 8 提及的实时切削运算也并非一直在后台运行而占用电脑性能，在工件周围有一层包围盒作为触发器，当检测到刀具模型后开启实时切削运算。依据刀具与工件的包围盒关系，经过切削运算后持续更新工件模型的点位信息，由此可以呈现出工件模型被旋转的铣刀模型去除的铣削加工过程，动态显示整个切削的实时映射过程。本文提出的切削算法可以满足大多数切削加工场景，包括直线走刀和圆弧走刀都可以实现，虚拟机床的切削加工效果如图 9 所示。

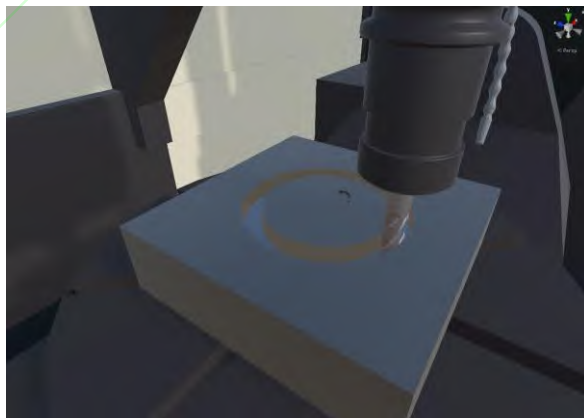
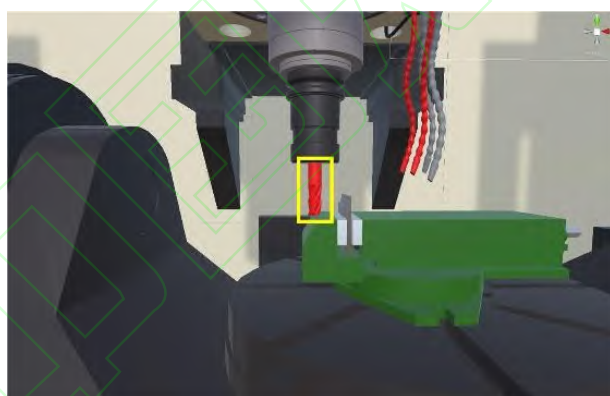


图 9 虚拟场景的切削效果

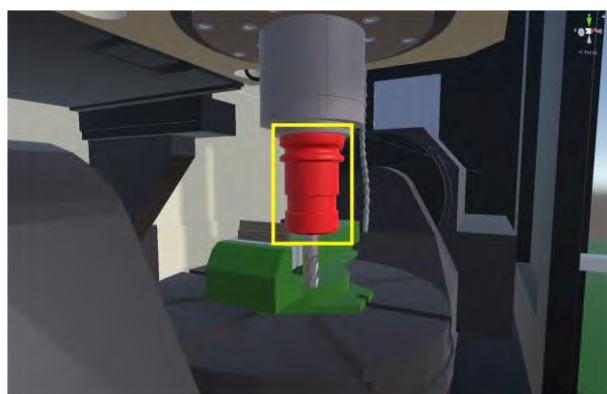
### 3.2.2 碰撞检测功能

在刀具-工件加工系统中，机床内部是不断运动的，一旦发生碰撞就会对生产带来不可挽回的代价，例如影响主轴精度。为了有效避免主轴撞机的发生，在加工准备阶段就利用碰撞检测模块进行验证是很有必要的，有效降低主轴撞机的风险系数，排查危险情况并预警，在一定程度上预测未来的加工情况，协助用户把握加工流程，提高生产的效率和经济性。

在本文中实现的碰撞检测功能依赖于机床设备的虚实交互：一方面作为加工代码的辅助验证，判断走刀路径的安全性；另一方面基于历史加工数据与实时加工数据，精准映射加工过程，并提示用户加工状态以及机床设备运行情况，可调节预警阈值大小满足实际加工需求。主轴碰撞检测主要分为三类：刀具与夹具碰撞、刀具与旋转台碰撞、刀柄与工件碰撞。在图 10(a)、(b)中刀具与夹具、刀柄与工件发生碰撞时，图中边框内的刀具和刀柄部位渲染为红色以便于实时查看碰撞情况。发生以上三种类型碰撞后立即停止机床运行，同时以 20ms 内的响应速度弹出警示弹窗，通过改变刀具或刀柄部位的颜色以及弹出警示窗口的形式来提醒用户及时处理，弹窗警示图如图 10(c)所示，碰撞信息会实时上传到 MySQL 云端数据库如图 10(d)所示，通过布尔型的数据和时间戳记录某个时间点发生了哪一类碰撞。碰撞预警及信息上云在虚拟场景中进行验证如图 10 所示。

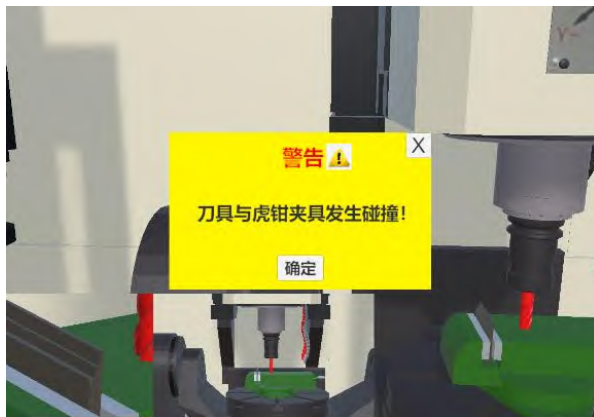


(a)刀具与夹具碰撞



(b)刀柄与工件碰撞





(c)发生碰撞时弹出警示窗口

Time	warning_shank_workpiece	warning_tool_turntable	warning_tool_damp
1/13/2022 10:43:38 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 10:43:40 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 10:43:41 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 10:43:42 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 10:43:43 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 10:43:44 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 10:43:45 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 10:43:49 AM	NULL	True	NULL
1/13/2022 10:43:50 AM	NULL	True	NULL
1/13/2022 10:43:51 AM	NULL	True	NULL
1/13/2022 10:43:53 AM	NULL	NULL	True
1/13/2022 10:43:54 AM	NULL	NULL	True
1/13/2022 10:43:55 AM	NULL	NULL	True
1/13/2022 11:09:28 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 11:09:30 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 11:09:31 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 11:09:32 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 11:09:34 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 11:09:44 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 11:09:47 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 11:09:48 AM	True	NULL	NULL
1/13/2022 11:09:49 AM	True	NULL	NULL

(d)碰撞信息上传云端数据库

图 10 机床碰撞检测验证

### 3.2.3 三维可视化效果

各种图表、文本显示框、报警弹窗、三维场景和局部放大图等元素共同组建了数控机床数字孪生系统的数据可视化面板如图 11 所示，可以根据需求独立地开启或关闭小窗视图，也可以在其他显示器集中显示。机床加工的监控情况可通过 PC 端和移动端进行实时查看，便于用户实时掌握机床运行情况。在图 11 的数据可视化面板中，在小窗口中实时显示主轴的位置坐标和加工参数，在小窗口中显示机床型号、设备运行状态等信息，在小窗口中显示来自加工现场传感器的数据波形。对实时采集的传感器信号进行数据预处理，将处理后的特征输入到在 MATLAB 软件中建立的刀具磨损预测模型，预测刀具磨损值与磨损阶段并在 Unity3D 中进行显示。以动态刷新图表的形式对各类实时数据进行统计分析处理，实现了对设备运行状态、任务进度、故障报警等信息有效的实时监控。

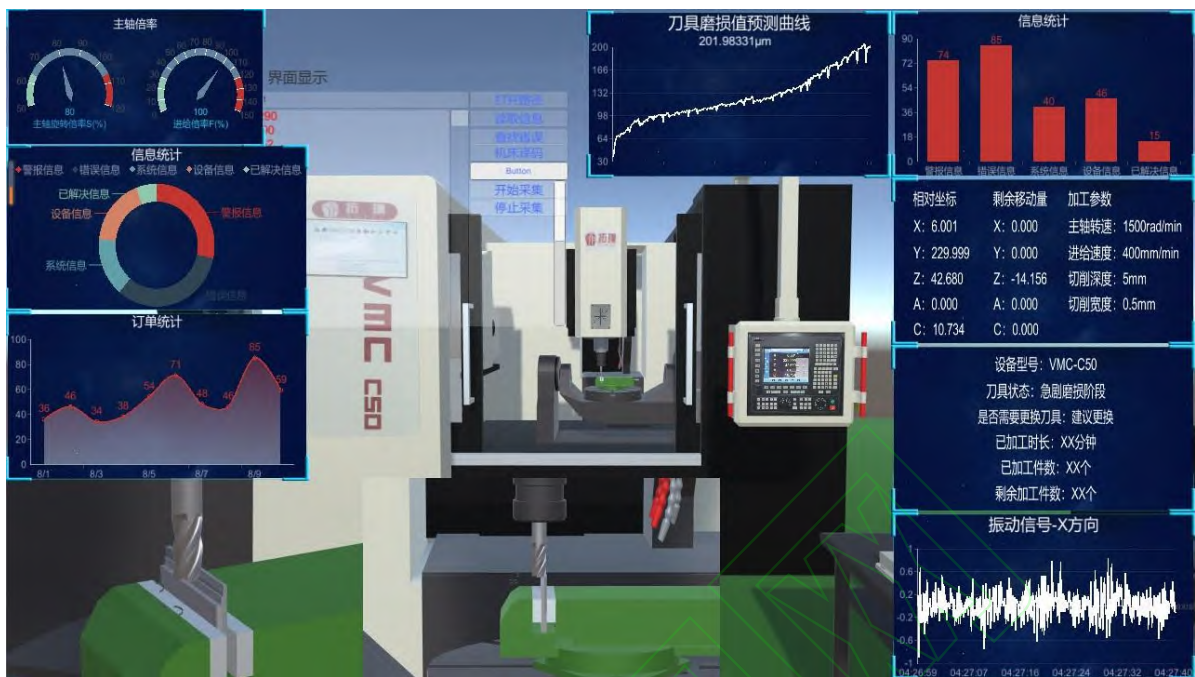


图 11 数字孪生系统数据可视化显示界面

### 3.3 数控机床数字孪生系统运行稳定性测试

登录进入系统后，操作虚拟机床执行译码并调出 Unity3D 自带的 Analysis 性能测试模块分析进行测试，通过该窗口可以查看内存、CPU、GPU、渲染等资源占用情况，进而分析铣削加工监控系统运行的稳定性。测试客户端的配置如下：CPU 为 AMD Ryzen7 4800H with Radeon Graphics 2.90GHz，GPU 为 NVIDIA GeForce RTX2060，显存为 6GB，内存为 16GB。在虚拟场景与机床完成通讯连接后，对同一段薄壁件侧铣加工代码进行 10 组对比测试，每组测试分别记录虚拟场景内主轴移动、刀具切入和刀具切出时的平均帧时数据，通过对比分析数据判断系统运行的稳定性，测试情况如表 2 所示。

表 2 铣削加工监控系统性能测试表

组号	移动平均帧时/ms	切入平均帧时/ms	切出平均帧时/ms
1	4.36	11.63	20.12
2	4.11	12.00	22.12
3	4.05	9.87	23.96
4	4.03	12.05	22.72
5	4.63	13.42	23.85
6	4.37	10.55	22.26
7	4.56	12.51	24.15
8	4.41	11.58	22.63
9	4.99	11.23	22.60
10	4.64	12.38	23.05

---

表 2 中记录的平均帧时这一指标表示的是可视化界面刷新一帧画面所用时间，如果人眼所看画面的帧率在 30fps 左右时，便可以判定该画面为是流畅的，若能够达到 60fps 则可以明显提升交互体验，但是超过 75fps 后就不易察觉到明显的变化，远远超过屏幕刷新率只会白白浪费计算机的图形处理能力，所以也并非系统可视化界面运行的帧率越高越好。

经对比 10 组测试数据可以分析，该数字孪生系统在机床运动仿真阶段运行很稳定，在刀具运动仿真阶段性能下降明显，因为这一阶段需要进行刀具与工件的切削运算和加工信号的采集与传输，会导致计算机 CPU、GPU 和内存的大量占用而影响系统运行的稳定性。对比 10 组记录的数据可以看到，每个运行阶段的平均帧时数据是比较稳定的，波动较小，其中运算量最大的是切削加工阶段，切出瞬间的平均帧时在 22ms 左右，换算为帧率为 45fps 左右，满足画面流畅的要求，实测的机床仿真运动延迟在 200ms 内。以上测试结果表明，本文提出的数控机床数字孪生系统可实施性好，设备模型还原度高，三维可视化效果良好，运动仿真流畅，数据采集、传输延迟低，该数字孪生系统的三维可视化监控可以提高监控效率，使得用户及时发现加工的异常状态。

#### 4 结束语

为了满足高档数控机床智能化发展的需求，本文针对机床运行状态实时监控等问题，分析了数控机床与数字孪生系统以及智能制造的关系，搭建了面向铣削加工优化的数控机床数字孪生系统，提出基于数字孪生技术的铣削加工三维可视化实时监控方法。在数字空间场景搭建、多源异构数据传输与管理、加工过程映射、刀具状态分析与预测、数据可视化等关键技术的支持下，完成对机床加工过程管控的实时化、智能化和透明化，实现了对数控机床全要素、全方位的实时监控。经测试验证，基于深度学习模型的刀具磨损预测的精度和实时性不错，整体系统运行稳定流畅，可视化效果好，交互体验良好，可为数字孪生技术应用于数控机床加工过程的三维可视化实时监控提供借鉴和参考，为加速数字孪生技术落地应用于传统制造业做出初步探索。

本文着重从系统框架搭建及实现的角度对数字孪生及其关键技术进行了阐述和探讨，后续的研究工作将完善优化该框架的整体流程，结合边缘计算开发面向多种加工场景的数字孪生系统；对如切屑形状、切屑流向、工件变形等问题进行研究，考虑利用降阶模型将切削过程的物理模型融入孪生系统；进一步提高刀具磨损预测模型的精度、泛用性和实时性，引入迁移学习解决数据集样本过少的问题；利用 5G、云服务、大数据分析等技术构建更完整、更成熟的数字孪生体系，从而让我们更好的了解现在的加工状态并精准预测未来加工状态。

---

## 参考文献:

- [1] ZHOU Ji, LI Peigen, ZHOU Yanhong, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing[J]. Engineering, 2018,4(1):11-20.
- [2] TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017,23(8):1603-1611. (in Chinese) . [陶 飞, 程 颖, 程江锋,等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017,23(8):1603-1611.]
- [3] Grieves M. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005,2:71-84.
- [4] XIE Yang, LIAN Kunlei, LIU Qiong, et al. Digital twin for cutting tool: Modeling, application and service strategy[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020,58(1):305-312.
- [5] YAO Pengfei, CHEN Zhengming, TONG Jing, et al. Virtual Simulation System of Cutter Suction Dredger Based on Unity3D[J]. Journal of system simulation, 2016,28(09):2069-2075+2084. (in Chinese) . [姚鹏飞, 陈正鸣, 童 晶,等. 基于 Unity3D 的绞吸式挖泥船虚拟仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2016,28(09):2069-2075+2084.]
- [6] FENG Wei, QIN Yu, ZHAO Shijun, et al. AAoT: Lightweight attestation and authentication of low-resource things in IoT and CPS[J]. Computer Networks, 2018,134:167-182.
- [7] TAO Fei, QI Qinglin, WANG Lihui, et al. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison[J]. Engineering, 2019,5(04):132-149.
- [8] XIAO Hui, JIANG Haifan, DING Guofu, et al. Research on Digital Twin-based Modeling and Monitoring of Five-axis Grinder[J]. Journal of system simulation, 2021,33(12):2880-2890. (in Chinese) . [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):2880-2890.]
- [9] HE Liujiang. Design and Implementation of Virtual Interactive System for CNC Machine Tools Based on Digital Twin[D]. University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese) . [何柳江. 基于数字孪生的数控机床虚拟交互系统设计与实现[D]. 电子科技大学, 2019.]
- [10] TAO Fei, MA Xin, HU Tianliang, et al. Research on digital twin standard system[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2019,25(10):2405-2418. (in Chinese) . [陶 飞, 马 昕, 胡天亮,等. 数字孪生标准体系[J]. 计算机集成制造系统, 2019,25(10):2405-2418.]
- [11] ZONG Xueyan. Design and Implementation of Workshop Job Simulation and Monitoring Based on Digital Twin[D]. University of Chinese Academy of Sciences (Shenyang Institute of Computing Technology, Cas), 2021. (in Chinese) . [宗学妍. 基于数字孪生的车间作业仿真与监控系统的设计与实现[D]. 中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所), 2021.]
- [12] ZHAO Rongyong, ZHANG Hao, FAN Liuqun, et al. The research about relationship of digital factory and virtual manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004,10:46-50,55. (in Chinese) . [赵荣泳, 张 浩, 樊留群,等. 数字化工厂与虚拟制造的关系研究[J]. 计算机集成制造系统, 2004,10:46-50,55.]
- [13] NING Ruxin, LIU Jianhua, TANG Chengtong. et al. Modeling and simulation technology in digital manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(7):132137. (in Chinese) . [宁汝新, 刘检华, 唐承统. 数字化制造中的建模和仿真技术[J]. 机械工程学报, 2006,42(7):132-137.]
- [14] ZHAO Peng, LIU Jinfeng, JING Xuwen, et al. The Modeling and Using Strategy for the Digital Twin in Process Planning[J]. IEEE Access, 2020,8:41229-41245.



- 
- [15] CHAO L, Vengayil H, ZHONG RY, et al. A systematic development method for cyber-physical machine tools[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018,48:13-24.
- [16] ZHAO Haoran, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. 3D visualization real-time monitoring method for digital twin workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019,25(06):1432-1443. (in Chinese) . [赵浩然, 刘检华, 熊 辉,等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019,25(06):1432-1443.]
- [17] LU Shanyu, LIU Shimin, DING Zhikun, et al. Modeling and multi-view interaction of digital twin machining system based on augmented reality[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021,27(02):456-466. (in Chinese) . [卢山雨, 刘世民, 丁志昆,等. 基于增强现实的数字孪生加工系统建模与多视图交互[J]. 计算机集成制造系统, 2021,27(02):456-466.]
- [18] TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2018,24(01):1-18. (in Chinese) . [陶 飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018,24(01):1-18.]
- [19] SUN Weiwei, HUANG Min, LI Kang. Research on tool condition monitoring method based on current signal[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2019,38(06):77-84+107. (in Chinese) . [孙巍伟, 黄 民, 李 康. 基于电流信号的刀具磨损状态监测方法研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019,38 (06):77-84+107.]
- [20] JIANG Xiaolong. Research and Development for Simulation System of CNC Machine Center[D]. Zhejiang University, 2014. (in Chinese) . [江笑龙. 数控加工中心仿真系统研究与开发[D]. 浙江大学, 2014.]

#### 作者简介:

刘明浩(1996-), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 研究方向: 数字孪生, E-mail: liuminghaoll@163.com;

+岳彩旭(1982-), 男, 山东聊城人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 先进制造、数字孪生, 通讯作者, E-mail: yuecaixu@hrbust.edu.cn;

夏 伟(1993-), 男, 黑龙江鹤岗人, 工程师, 硕士, 研究方向: 先进制造、数字孪生、机器视觉, E-mail: Xiawei@hrbust.edu.cn;

张俊涛(1996-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向: 数字孪生, E-mail: zhangjuntao199705@163.com;

刘献礼(1961-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 高效切削加工及刀具技术、智能制造, E-mail: xlliu@hrbust.edu.cn。