

数控机床多维度多层次数字孪生建模方法及应用*

张雷^① 何佳豪^① 李智威^① 姚梦琪^② 王太勇^②

(^①天津商业大学机械工程学院, 天津 300134; ^②天津大学机械工程学院, 天津 300354)

摘要: 针对数字孪生建模技术在数控机床领域的工程实践中实施难度大、成本高等问题, 提出数控机床多维度多层次数字孪生建模方法, 并开发数字孪生系统, 实现数控机床运行过程的可视化。首先, 从物理实体、数字孪生模型、信息物理融合数据和服务 4 个维度以及几何、物理、行为和 数据 4 个层级构建数控机床数字孪生模型; 其次, 基于该方法设计并开发数控机床数字孪生系统, 实现数字孪生建模技术的软件化; 最后, 以某型数控机床为应用案例, 采用 NC 代码控制机床实体运动, 借助数字孪生模型与机床实体间的连接关系, 驱动机床模型进行运动仿真, 并将模型运行状态和各项数据进行可视化展示。结果表明系统各项功能均正常运行, 所提方法具备可行性, 为数字孪生建模技术在数控机床领域的工程应用提供参考。

关键词: 数控机床; 数字孪生; 可视化; 轮廓误差

中图分类号: TH166, TG659 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.10.007

Multidimensional and multi-level digital twin modeling method and application for CNC machine tools

ZHANG Lei^①, HE Jiahao^①, LI Zhiwei^①, YAO Mengqi^②, WANG Taiyong^②

(^①School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, CHN; ^②School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, CHN)

Abstract: Aiming at the difficulty and high cost of implementing digital twin modeling technology in the engineering practice of CNC machine tools, a multi-dimensional and multi-level digital twin modeling method for CNC machine tools is proposed, and a digital twin system is developed to achieve visualization of the operation process of CNC machine tools. Firstly, construct a digital twin model for CNC machine tools from four dimensions of physical entities, digital twin models, information physical fusion of data and services, as well as four levels of geometry, physics, behavior, and data. Secondly, based on this method, a digital twin system for CNC machine tools is designed and developed to achieve the software based modeling technology of digital twins. Finally, taking a certain type of CNC machine tool as an application case, using NC code to control the movement of machine tool entities, utilizing the connection relationship between digital twin models and machine tool entities, driving the machine tool model for motion simulation, and visualizing the model's operating status and various data. The results indicate that all functions of the system are operating normally, and the proposed method is feasible, providing reference for the engineering application of digital twin modeling technology in the field of CNC machine tools.

Keywords: CNC machine tools; digital twin; visualization; contour error

* 国家重点研发计划项目“高端装备智能运维数字孪生体建模理论”(2022YFB3303601); 内蒙古自治区自然科学基金面上项目“基于数字孪生的多轴高速加工轮廓精度动态控制方法”(2024MS05052); 天津市大学生创新创业训练计划项目“面向MR环境的智能制造系统数字孪生建模与人机协同建造方法”(202310069096)

随着航空、航天和新能源等领域的发展，零部件加工精度和加工质量的要求不断提高。数控机床作为工业母机，其加工精度、加工质量以及加工效率需要进一步提升。在智能制造的发展背景下，数控机床的智能化已成为其加工性能进一步提升的重要方式之一。数字孪生（digital twin, DT）作为智能制造的关键使能技术之一，能够利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据在虚拟环境中映射并反映物理实体全生命周期过程，具有高保真性和实时性。DT建模技术被认为是促进机床智能化的关键技术之一^[1]。

在DT建模方面，陶飞等提出了建立DT五维模型的理念，其中包括物理实体、虚拟实体、服务、孪生数据和连接5个维度，为DT建模的理论发展奠定了基础^[2]。在此基础上，该团队还提出了DT模型的构建准则，简称为“四化四可八用”，研究了DT模型构建的理论体系，进行了DT车间建模的初步探索^[3]。为数控机床的DT建模提供了参考。

在机床DT建模方面，Chen JH等以某铣床为具体对象，建立其理论模型，并与神经网络模型结合，研究了一种混合模型建模方法，迈出了机床DT建模的先进步伐^[4]。王春晓建立了数控机床的多领域模型，设计了模型的虚拟调试平台，验证了模型的有效性^[5]。肖通等从物理机床、数字孪生机床、服务模型3个方面阐述了五轴磨床DT模型的应用框架，发展了机床的DT建模技术^[6]。

此外，一些学者针对机床部件或系统研究了数字孪生建模方法。谭颢等研究了主轴系统的DT建模方法，以铣削过程中主轴系统的动力学特性为监测对象，建立了主轴系统虚实交互、深度融合的高保真DT五维模型，并验证了其可行性^[7]。巩超光等基于DT技术，以刀具磨损为主要表征因素，研究了动态多目标优化策略，基于不同种算法建立拟合模型，并进行参数寻优^[8]。江献良等针对直驱部件，建立了其DT虚拟模型，基于最小二乘法实现了参数更新与同步，利用速度控制器及卡尔曼扩张状态观测器提出了一种复合控制策略，从3个方面验证了该策略的有效性^[9]。张雷等建立了多轴进给系统的DT模型，包含5个维度和4项关键技术，为基于数字孪生的轮廓误差抑制奠定了基础^[10]。王旭初等综述了DT技术的发展和应用，分析了微细铣削方面的DT建模研究进展^[11]。张春霖等研究了一种刀具切削变工况DT模型，引入深度迁移学习

策略，对不同工况下刀具的磨损状态进行监测^[12]。黄华等建立了机理和数据混合驱动的进给系统DT模型，基于最小二乘法增强模型的适应性^[13]。王艳青等基于分形理论和点云表面形貌模型重建方法，研究了滚动轴承的DT精细建模方法，相较于传统的光滑表面建模，该方法建立的模型能够更真实地反映滚动轴承的表面形貌特征^[14]。顾伟等依据DT五维模型，研究了一种针对滚动轴承故障诊断的DT建模方法，通过虚拟模型表征滚动轴承的疲劳失效过程^[15]。由上述研究可以看出，DT建模技术已经较好地应用于机床部件或系统的精细建模中。

在DT的融合应用方面，陶飞等提出了DT驱动的6条应用准则，讨论了DT的14个应用方向的初步设计、设想以及亟待解决的问题^[16]，在此基础上综述了DT在工业中的发展与应用现状^[17]。张雷等通过对机床智能化和DT特性的对比分析，确定了DT建模是实现机床智能化的一种使能技术^[1]，在此基础上提出了DT机床的内涵与体系架构，并提炼了DT机床的3项关键技术^[18]。Cai Y等面向信息物理制造提出了一种运用传感数据和信息融合集成技术建立DT虚拟机床的方法^[19]。张剑飞等基于DT开发了龙门铣床的仿真监控系统^[20]。

通过上述研究可以看出，DT建模技术在一定程度上促进了数控机床的智能化发展。然而，攻克的DT建模技术在数控机床的融合应用阶段存在实施难度大、成本高等问题。针对这一问题，提出一种切实可行的数控机床DT建模方法，并开发DT系统，实现数控机床运行过程的可视化呈现。首先，从物理实体、DT模型、信息物理融合数据和服务4个维度以及几何、物理、行为和数据4个层级构建数控机床DT模型。在此基础上，设计并开发数控机床DT系统，具体包括DT模型集成、数据融合与管理、轮廓误差预测以及可视化等功能模块。最后，以某型数控机床为具体对象，对所提方法和系统进行应用验证。

1 面向数控机床的多维度多层次数字孪生建模方法

考虑数控机床功能结构和状态数据的特点，提出了面向数控机床的多维度、多层次DT建模方法，技术框架如图1所示。

物理实体表示数控机床本体以及自身的各种静态属性数据、动态运行数据等，包含几何实体、运

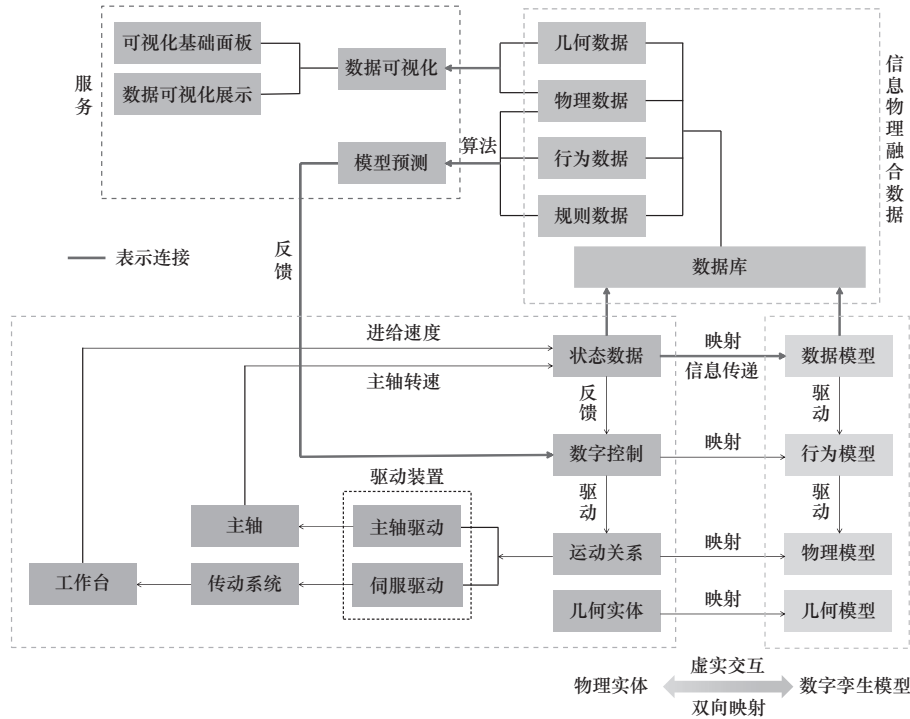


图1 数字孪生建模技术框架

动关系、数字控制和状态数据4个不同层级。几何实体为静态的机床实物，位于基础层级（简称几何层）。在几何层之上构建运动关系作为第二层级（简称物理层），并在第三层级（简称行为层）的控制下，驱动主轴和工作台运动。状态数据为最高层级（简称数据层），主要包含数控机床各类数据。

与物理实体的4个层级相对应的数控机床DT模型的4个层级分别为几何模型、物理模型、行为模型、数据模型。通过物理实体和DT模型之间的数据传输和信息传递，可使DT模型与物理实体同步运动，进而实现物理实体和DT模型之间的虚实交互、双向映射。

物理实体和DT模型产生的各类数据存入数据库中，与数据的规则、算法、标准等共同构成信息物理融合数据。

服务指DT具体应用的服务化封装，本方法中主要包括轮廓误差预测和可视化两部分。轮廓误差预测是指对DT模型运行状态进行预测并反馈给物理实体。可视化部分主要展示DT模型运行实况和数控机床运行相关数据。

1.1 物理实体

物理实体（physical entities, PE）是DT建模的基础。PE的几何层表示静态实物，包括底座、主轴、工作台和传动系统等，以及各个零部件之间的

装配关系。物理层是在几何层之上构建运动关系，建立机床零部件的约束条件。行为层在几何层和物理层之上附加控制逻辑。数据层存储数控机床的静态属性数据、动态运行数据以及其他相关数据。

1.2 数字孪生模型

数字孪生模型（digital twin model, DTM）的几何模型指创建数控机床实体的三维虚拟模型。通过构建零部件之间的从属装配关系，使其满足数控机床的模型特征及约束条件。物理模型在几何模型的基础上增加物理属性和运动关系，对虚拟模型创建坐标系，建立静力学、动力学关系，约束自由度、行程范围，使虚拟模型能够完成与数控机床实体相对应的运动。行为模型主要包括控制逻辑、代码运行机制、输入输出控制、虚实交互机制，用来控制物理模型运动，实现DTM和PE的虚实同步。数据模型接收PE的信息和数据，通过NC代码驱动行为模型，同时存储DTM的相关数据。

DTM与PE的映射关系如图2所示。图2a通过金字塔图表示PE和DTM的4个层级，金字塔由低到高为从基础层级到最高层级。图2b表示PE和DTM的结构关系。

1.3 信息物理融合数据

信息物理融合数据（cyber physical fusion data, CFPD）作为DT建模中承上启下的模块，主要包括

几何数据、物理数据、行为数据和规则数据 4 个部分。几何数据指机床及其零部件的几何尺寸、装配关系、坐标系、位置信息、约束条件（如工作台的最大位移、主轴最大转速）等，为静态属性数据。物理数据存储 PE 和 DTM 运动、控制部分的静力学、动力学关系，以及 PE 和 DTM 运行产生的位移、速度、加速度以及复杂约束条件等，为动态运行数据。行为数据存储 PE 和 DTM 运行机制、虚实交互机制的相关数据，信号传输协议以及零部件的磨损、更换数据。规则数据主要存储相关知识、标准、规则、算法和模型库等信息。4 个部分分别存入数据库的不同工作表中，方便服务模块对各类数据的调用。

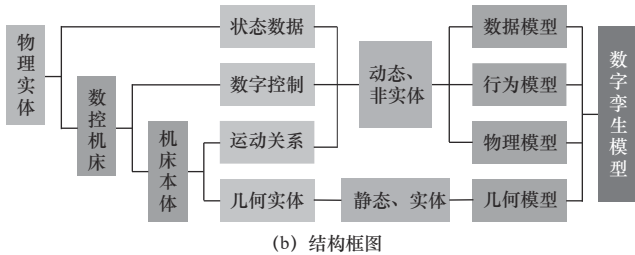
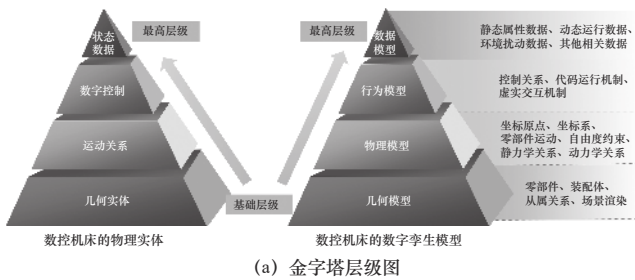


图 2 PE 和 DTM 映射关系

1.4 服务

服务（service, Ss）模块是 DT 建模中的具体作用模块，展现 DT 功能，包括轮廓误差预测和可视化两项服务。

1.4.1 轮廓误差预测模型

轮廓误差预测模型是指调用物理数据、行为数据、规则数据，通过群体智能优化算法或进化算法叠加机器学习算法来进行轮廓误差预测。可以依据输入的指令数据，得到预测的轮廓误差，从而判断机床是否正常工作。群体智能优化算法或进化算法主要用于参数的优化与调整，机器学习算法则用于对模型进行训练与测试。群体智能优化算法中粒子群优化算法（PSO）通用性强、需要调整的参数少、收敛速度快且不易陷入局部最优解。进化算法中遗传算法（GA）具有变异机制、可拓展性强的特点，可有效避免陷入局部最优。BP 神经网络是应用最

广的机器学习算法之一，具有高度灵活性和较强的适应性。因此，这里选用 PSO 算法或 GA 算法优化 BP 神经网络来构建轮廓误差预测模型。BP 神经网络结构如图 3 所示，包括输入层、隐含层和输出层。

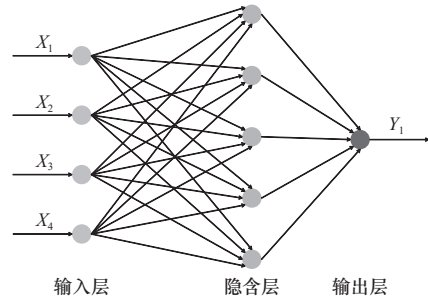


图 3 神经网络节点

PSO 算法优化 BP 神经网络的流程如图 4 所示。PSO 算法需先设置好种群规模、进化次数、个体最大值和速度最大值。初始化粒子和粒子速度，计算适应度值，而后更新粒子速度和粒子位置，进而更新粒子的适应度值。经比较后得到粒子个体最优适应度值和全局最优适应度值，得到最优参数。最后将最优参数赋给 BP 神经网络的权值和阈值，训练、预测得到预测差值。

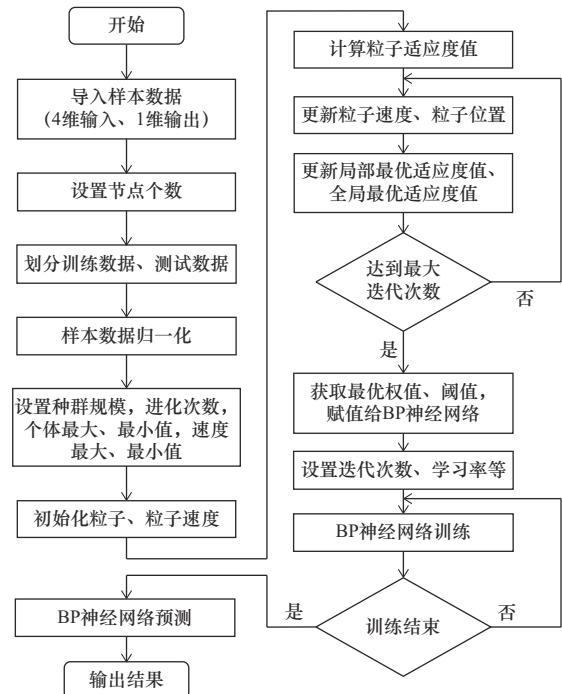


图 4 PSO 算法优化 BP 神经网络流程图

GA 算法优化 BP 神经网络的流程如图 5 所示。首先，根据拟合函数输入输出参数的个数确定 BP 神经网络结构，进而确定 GA 算法个体的长度。其

次，设置 GA 算法的交叉概率、变异概率以及边界条件。通过选择、交叉和变异操作找到最优适应度值对应的个体。最后，使用 GA 算法得到的最优个体对 BP 神经网络初始权值和阈值赋值，对网络进行训练后预测输出。

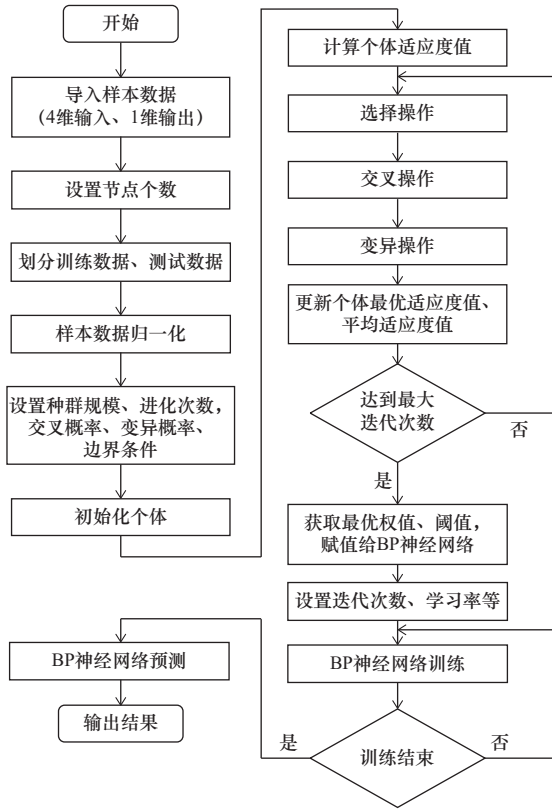


图 5 GA 算法优化 BP 神经网络流程图

1.4.2 可视化

数控机床可视化是通过创建一个可视化界面，将数控机床 DTM 的运行情况通过界面实时呈现。同时在界面中创建数据可视化面板，通过调用数据库和其他系统输入的部分几何数据和物理数据到数据可视化面板中，将数控机床的指令数据、实际位置数据以及轮廓误差数据等多种数据直观地呈现出来。

1.5 连接关系

DT 建模中 4 个维度之间的连接关系如图 6 所示。PE 中的数据和信息传递到 DTM，驱动 DTM 同步运动。PE 和 DTM 中的数据传输到 CPF 模块进行存储。Ss 模块利用 CPF 中的数据进行预测和可视化展示，最终反馈给 PE。

2 数字孪生系统开发与应用验证

基于上述方法研究，结合数控机床的自身特点，

搭建 DT 系统架构，如图 7 所示，主要包括 DTM、数据融合与管理、轮廓误差预测以及可视化等功能模块。各功能模块之间通过数据传输建立联系。在虚拟数控系统中导入 NC 代码，使虚拟数控系统自动运行并产生运行数据，同时在数据库中对 CPF 相关数据进行集成与管理。通过虚拟数控系统驱动机床虚拟模型，完成虚拟模型的运动仿真。采用数据驱动算法预测机床轮廓误差，并对轮廓误差及机床运动的过程和状态数据进行可视化呈现。

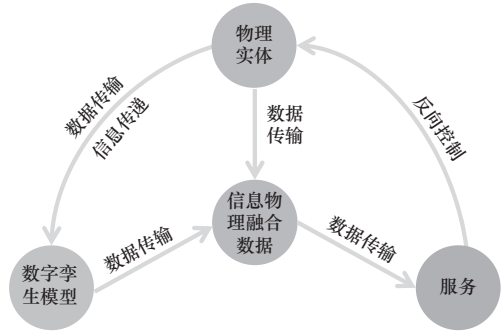


图 6 连接关系

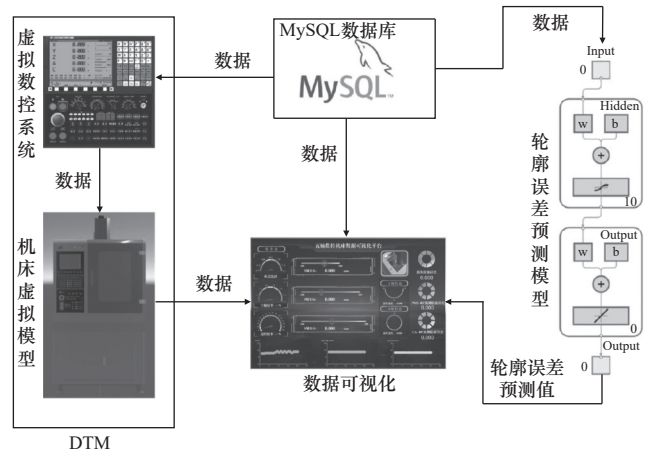


图 7 数字孪生系统架构图

2.1 数字孪生模型

从几何模型、物理模型、行为模型和数据模型 4 个层级依次构建数控机床的 DTM。

几何模型表示数控机床虚拟模型，仅具装配关系。几何模型构建步骤包括建立零部件模型、模型装配和虚拟模型渲染等。

物理模型主要指在几何模型的基础上添加物理属性和运动关系，使数控机床虚拟模型能够模拟真实机床的运动过程。数控机床共有 X、Y、Z、A、B 等 5 个运动轴，其中 X、Y、Z 进给轴均沿机床坐标系的相应坐标轴运动，不需单独设置其自身坐标系，A、B 旋转轴为绕着 X 轴、Y 轴的旋转运动，

需要对其设置自身坐标系。数控机床 DTM 的运动可视化界面如图 8 所示，在 DTM 运行时可直接切换到显示界面进行实时观察。

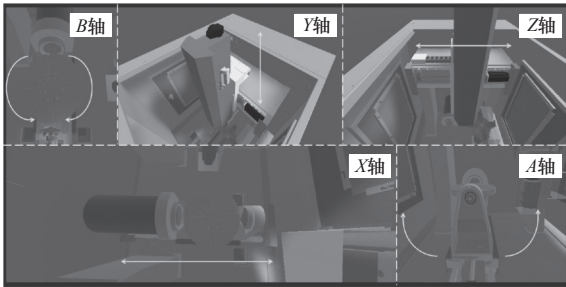


图 8 数控机床 DTM 界面

行为模型主要起到对机床 DTM 的控制作用。通过读取虚拟数控系统产生的运动指令，驱动 DTM 运动。指令读取成功后依据图 9 进行转换与处理，得到的结果为 DTM 各个轴的坐标信息。约束各轴的行程范围，确定各轴的最大行程，判断读取的数据是否超过边界值。如果未超过，则将位置信息赋给 DTM 的各进给轴，实现数据的更新以及机床的进给运动。若超过边界值，机床各进给轴仍会运动，当运动到边界位置时自动停止，并在控制台报错。

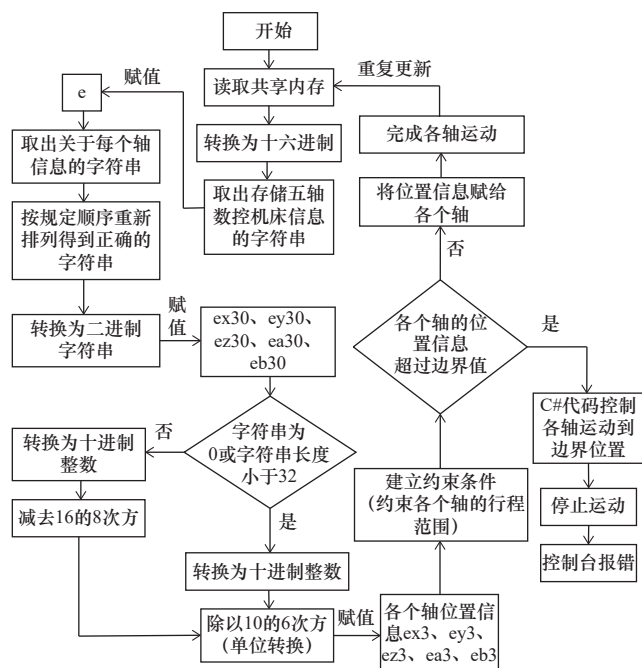


图 9 程序控制流程图

数据模型包括数控机床自身属性数据、控制数控机床运行所需的 NC 代码以及运行产生的位置、速度、倍率等信息。在构建行为模型时建立约束条

件所设定的边界值也属于数据模型的范畴。

2.2 轮廓误差预测

获取机床指令数据和实际位置数据，并根据指令数据与机床的插补周期求得机床运行时各点的进给速度、加速度、加加速度以及各点处指令轮廓的曲率半径。将这 4 种数据作为 4 个维度的输入数据，将计算得到的轮廓误差作为输出数据，即输出数据为一个维度。

轮廓误差预测所采用的数据集为 WM 轨迹数据（图 10），轨迹进给速度最大为 50 mm/s，加速度最大为 2 500 mm/s²，加加速度最大为 20 000 mm/s³。采用数控系统自带的插补算法进行插补，插补周期为 1 ms。数据总数为 30 384 组，设置 22 788 组为训练集，7 596 组为测试集，采用均方误差 MSE 作为评估模型轮廓误差预测值的标准。

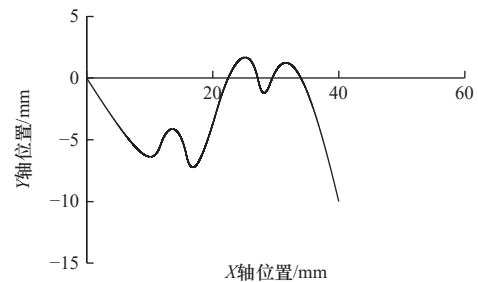


图 10 WM 曲线

采用 PSO-BP 神经网络模型和 GA-BP 神经网络模型进行轮廓误差预测，同时设置未经优化的 BP 神经网络模型作为对照组进行轮廓误差预测。BP 神经网络的输入层和输出层节点数应与输入数据和输出数据的维度对应，因此设置 BP 神经网络的输入层节点数为 4，输出层节点数为 1，隐含层节点数设置为 5。

GA-BP 神经网络模型中 GA 算法需设置的参数：种群规模、交叉概率、变异概率和迭代次数。种群规模的大小直接影响到算法的搜索能力和计算效率。交叉概率决定了染色体之间发生交叉操作的可能性，一般设置在 0.1 到 0.99 之间。变异概率决定了染色体上基因发生变异的可能性，一般设置在 0.001 到 0.1 之间。迭代次数应根据问题需求来设置以保证能找到最优解。因此，GA 算法的参数设置：种群规模为 20，交叉概率为 0.3，变异概率为 0.1，迭代次数为 100。

PSO-BP 神经网络模型中 PSO 算法需设置的参数：个体学习因子 c_1 、社会学习因子 c_2 、粒子群规

模和迭代次数。个体学习因子决定了粒子受自己历史最优位置影响的程度，社会学习因子决定了粒子受群体历史最优位置影响的程度。社会学习因子与个体学习因子一般保持相近或相等的值，取值范围设置为0.1~2。粒子群规模决定了算法中粒子的数量，从而影响算法的搜索能力和计算复杂度，一般设置取值为20~40。因此，PSO算法的参数设置： $c_1=c_2=1.49445$ ，粒子群规模为20，迭代次数为100。

3种模型的轮廓误差预测结果如图11所示，PSO-BP神经网络模型预测轮廓误差的均方误差为

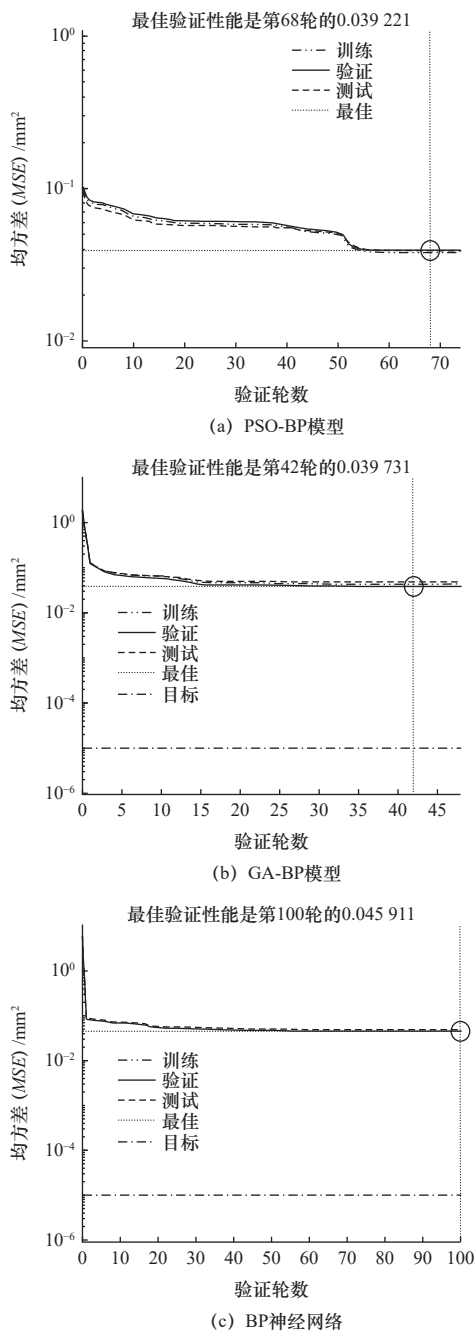


图 11 轮廓误差预测结果

3.92×10^{-2} ，GA-BP神经网络模型预测轮廓误差的均方误差为 3.97×10^{-2} ，而未经优化的BP神经网络预测轮廓误差的均方误差为 4.59×10^{-2} 。从预测结果上看，PSO-BP神经网络模型和GA-BP神经网络模型相较于未经优化的BP神经网络模型预测更精确。

2.3 可视化

可视化即将数控机床DTM的运行情况和数控机床的指令数据、实际位置数据等呈现在界面中。系统可视化界面包括名为“五轴数控机床数据可视化平台”的数据可视化面板和数控机床DTM运行界面。数据可视化面板(图12)最左侧放置3个可显示的仪表盘，中间位置3条横线表示DTM各轴的行程范围，面板最右侧显示数控机床轮廓误差，数值为轮廓误差数据集中真实数据与最大十位整数的比值。下方3张散点图展示轮廓误差数据集中末端20个数据，横坐标为数据序号，纵坐标为轮廓误差值。

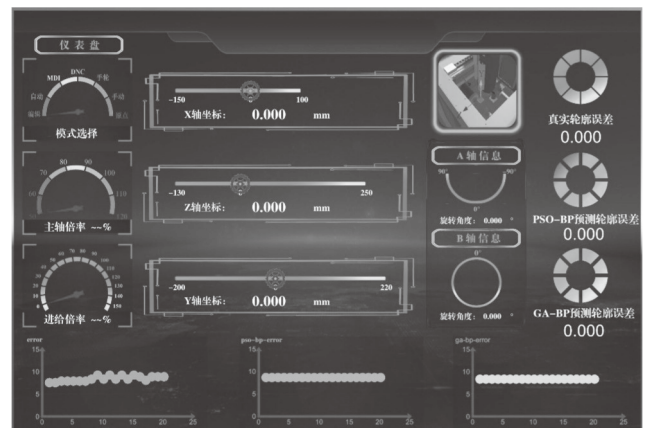


图 12 数据可视化面板

2.4 应用验证

以某型数控机床为具体对象(图13)，对上述所提方法和系统进行应用验证。数控机床处于空载状态，运行轨迹仍为图10所示曲线，轨迹运动参数与2.2节使用的WM轨迹运动参数相同。将机床数控系统调至循环启动状态，通过将NC代码(部分代码如图14所示)导入数控系统中，驱动数控机床运行。将NC代码同步导入DTM的虚拟数控系统中，通过虚拟数控系统产生指令数据。将指令数据传输到数控机床虚拟模型后，驱动虚拟模型运动从而实现运动仿真。

轮廓误差预测值从PSO-BP模型和GA-BP模型中输出，并和实测值一起在数据可视化面板显示。同时轮廓误差的真实值和预测值均以散点图的形式

呈现。通过与轮廓误差的实测值进行对比, PSO-BP神经网络和 GA-BP神经网络模型的预测准确度分别为 84.23% 和 89.35%。数控机床虚拟模型的安全门打开, 可实时观察到机床各轴的运动状态, X、Y、Z、A、B 这 5 个轴的位置信息均在数据可视化面板上显示。系统可视化界面如图 15 所示。



图 13 数控机床实体

```

%
(CUTTING TIME: 21.46)
N1 G40 G17 G49 G90 G80
N2 ( 日期2021-11-13 时间16:52:14 )
N3 ( 刀具名称=D10立铣刀 )
N4 ( 直径=10.00 下半径=0.00 刃长=50.00 刀长=75.00 )
N5 G91 G28 Z0.0
N7 G90 G54
N8 M03 S3000
N9 M08
N10 G00 X-59.997 Y-20.276
N11 G43 Z50. H01
N12 Z2.01
N13 G01 Z-.99 F1500.
N14 X-50.497
N15 Y50.003
N16 G02 X-50.003 Y50.497 I.494 J0.0
.....
  
```

图 14 部分 NC 代码



图 15 系统应用验证界面

3 结语

在数控机床智能化发展的背景下, 针对 DT 建

模技术在数控机床工程实践中实施难度大、成本高等问题, 提出了一种切实可行的数控机床 DT 建模方法, 即多维度多层次数字孪生建模方法。基于所提方法, 设计并开发了数控机床 DT 系统, 主要包括: DT 模型集成、数据融合与管理、轮廓误差预测以及可视化等功能模块。以某型数控机床为具体对象, 对所提方法和系统进行应用验证。本文主要结论具体如下。

(1) 所提出的数控机床多维度多层次数字孪生建模方法, 重点考虑了数控机床的功能结构和状态数据的特点, 是一种简单可行的数字孪生建模方法, 为数字孪生系统的开发提供了参考。

(2) 所开发的数控机床 DT 系统完成了 DT 建模技术的软件化, 实现了数控机床的 DT 模型集成、运动仿真、轮廓误差预测以及可视化呈现, 这证明该系统具备较好的可实施性。

参 考 文 献

- [1] Zhang L, Liu J H, Wu X Q, et al. Digital twin-based dynamic prediction of thermomechanical coupling for skiving process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131: 5471-5488.
- [2] 陶飞, 张辰源, 张贺, 等. 未来装备探索: 数字孪生装备[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(1): 1-16.
- [3] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(1): 1-15.
- [4] Chen J H, Hu P C, Zhou H C, et al. Toward intelligent machine tool[J]. *Engineering*, 2019(5): 679-690.
- [5] 王春晓. 基于数字孪生的数控机床多领域建模与虚拟调试关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [6] 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.
- [7] 谭飏, 张宇, 刘丽冰, 等. 面向动力学特性监测的主轴系统数字孪生体[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(18): 2231-2238, 2246.
- [8] 冯超光, 胡天亮, 叶瑛歆. 基于数字孪生的铣削参数动态多目标优化策略[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 478-486.
- [9] 江献良, 陈凌宇, 郑杰基, 等. 基于数字孪生模型的直驱部件高精度控制方法[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(17): 98-109.
- [10] 张雷, 刘检华, 庄存波, 等. 基于数字孪生的多轴数控机床轮廓误差抑制方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(12): 3391-3402.
- [11] 王旭初, 白清顺, 王鹏, 等. 微细铣削的数字孪生建模技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(20): 56-64.
- [12] 张春霖, 周婷婷, 胡天亮, 等. 刀具切削变工况数字孪生模型构建方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(6): 1852-1866.
- [13] 黄华, 李嘉然, 赵秋柯, 等. 基于混合驱动的进给系统数字孪生模型自适应更新法[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(6): 1840-1851.
- [14] 王艳青, 同月晖, 马嵩华, 等. 滚动轴承数字孪生几何模型精细建模[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(6): 1882-1893.
- [15] 顾伟, 张文远, 王恒. 滚动轴承疲劳失效故障的数字孪生虚拟实体建

模 [J]. 机床与液压, 2023, 51(3): 193-199.

[16]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(1): 1-18.

[17]庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.

[18]张雷, 刘检华, 庄存波, 等. 数字孪生机床的内涵、体系架构及关键技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(6): 1983-1995.

[19]Cai Y, Starly B, Cohen P, et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 10: 1031-1042.

[20]张剑飞, 张铁良, 姜永增. 基于数字孪生的龙门铣床虚拟仿真监控系统

统 [J]. *高师理科学刊*, 2022, 42(11): 41-46, 56.

第一作者/通信作者: 张雷, 男, 1987年, 博士, 讲师, 研究方向为数字孪生技术、数控机床技术、制造过程监控与优化技术, 发表SCI/EI论文10余篇。E-mail: zhgraceli@tjcu.edu.cn

(编辑 李静)

(收修改稿日期: 2024-07-07)

文章编号: 20241007

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。

论文推荐

刘乐, 殷银银, 金宏, 等. 超大规格GH4169高温合金螺栓成形工艺及模具结构优化[J]. *制造技术与机床*, 2022, (4): 110-115.



扫码获取全文

超大规格GH4169高温合金螺栓成形工艺及模具结构优化

刘乐^{①②} 殷银银^{①②} 金宏^{①②} 关悦^{①②} 刘秀岩^③

- ①河南省紧固连接技术重点实验室
- ②河南航天精工制造有限公司
- ③航天精工股份有限公司

摘要 针对大规格GH4169高温合金螺栓成形难度大、模具易开裂寿命低等问题, 研究其成形工艺及模具结构。结合金属塑性成形理论, 提出其成形工艺方案。采用Deform-3D有限元分析软件对提出的工艺方案进行数值模拟, 分析了成形过程中的载荷-行程曲线、金属流动规律等, 根据成形工艺, 设计并优化相应模具结构, 最后进行了工艺试验。通过数值模拟, 获得了成形过程中的工艺参数, 揭示了GH4169高温合金螺栓成形过程的变形机理。采用双层预应力组合凹模时, 模具出现开裂, 模具结构优化后采用三层预应力组合凹模满足成形要求, 模具寿命较高, 小批量试制的GH4169高温合金螺栓锻件充填饱满, 所获数据与模拟结果基本一致。提出的GH4169高温合金螺栓成形工艺和模具结构是可行的, 成形出的高温合金螺栓符合航天领域实使用要求, 为大规格GH4169高温合金螺栓的生产提供一定的理论依据, 对实际生产及其他相似零件具有指导意义。

关键词 GH4169高温合金; 数值模拟; 模具结构; 工艺试验