

分类号：TP391

密 级：公开

学校代码：10363

学 号：2220110133



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于虚拟调试的五轴数控机床设计

论文作者 孙开亮

校内导师 钟相强（教授）

校外导师 吴亮发（工程师）

专业学位类别 机械

研究方向（领域） 数字孪生

论文提交日期：2025 年 5 月 20 日

分类号：TP391.9

单位代码：10363

密 级：公开

学号：2220110133

基于虚拟调试的五轴数控机床设计

DESIGN OF FIVE-AXIS CNC MACHINE TOOL BASED ON VIRTUAL DEBUGGING

学 生 姓 名：_____孙开亮_____

校 内 导 师：_____钟相强（教授）_____

校 外 导 师：_____吴亮发（工程师）_____

专 业 学 位 类 别：_____机械_____

研究方向（领域）：_____数字孪生_____

论文答辩日期： 2025 年 5 月 15 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：孙开亮

日期：2025年5月20日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在_____年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：孙开亮

指导教师签名：钟相强

日期：2025 年 5 月 20 日

日期：2025 年 5 月 20 日

基于虚拟调试的五轴数控机床设计

摘 要

五轴数控机床作为高端制造装备，其研发成本高昂主要源于传统模式下需反复制造物理样机进行调试与优化，导致材料、人力成本高且开发周期延长。虚拟调试技术通过构建高精度数字孪生模型，在虚拟环境中全面仿真验证机床的机械结构、控制系统及加工性能，有效替代物理样机调试，显著降低样机制造成本与调试费用，为五轴数控机床的高效开发提供创新技术路径。

为了高效设计五轴数控机床，采用西门子数字原生数控系统作为核心控制平台进行设计。主要研究内容如下：

首先，设计了立式双回转台五轴数控加工中心的进给轴机械结构和凸轮机械手刀库机械结构；基于 MCD(Mechatronics Concept Designer)机电一体化概念设计技术，对五轴数控机床的进给轴和凸轮机械手刀库进行构建，分析了凸轮机械手刀库虚拟调试刀具转移问题。

其次，构建了五轴数控机床的运动学模型，完成数控机床基本逻辑控制、凸轮机械手刀库控制、M 代码辅助功能等 PLC 控制程序；基于 CMVM(Create MyVirtual Machine)完成五轴数控机床调试，分析五轴联动 RTCP 功能；设计了全/半闭环功能快速切换的人机交互界面和边屏界面辅助工具；通过叶轮零件仿真加工验证，基于 ICP 迭代算法对比点云数据，获得所加工的叶片前缘处最大误差为 0.0431mm。

最后，通过软件在环虚拟调试技术，将 MCD 虚拟模型与 CMVM 数控系统的逻辑控制程序信号进行耦合，完成机械结构和数控系统的虚拟调试。通过集成 MCD、CMVM 和 SIMIT，全方位地对数控机床机械模型、逻辑控制功能以及自动化控制的准确性和可靠性予以验证。经过 SINUMERIK ONE 实物系统仿真加工验证：所设计的五轴数控机床满足复杂加工任务的要求。

所设计的虚拟五轴数控机床具有并行设计与跨部门协作功能，能够降低实验与试错成本、缩短研发周期，具有较高的工程实用价值，为我国高端数控装备的自主化研发提供了新的技术路径。

关键词：五轴数控机床，数字原生，虚拟调试，逻辑控制，并行设计

DESIGN OF FIVE-AXIS CNC MACHINE TOOL BASED ON VIRTUAL DEBUGGING

ABSTRACT

As a high-end manufacturing equipment, the high R & D cost of five-axis CNC machine tools is mainly due to the repeated manufacturing of physical prototypes for debugging and optimization in the traditional mode, resulting in high material and labor costs and extended development cycle. By constructing a high-precision digital twin model, the virtual debugging technology comprehensively simulates and verifies the mechanical structure, control system and processing performance of the machine tool in a virtual environment, effectively replaces the physical prototype debugging, significantly reduces the prototype manufacturing cost and debugging cost, and provides an innovative technical path for the efficient development of five-axis CNC machine tools.

In order to efficiently design five-axis CNC machine tools, Siemens digital native CNC system is used as the core control platform for design. The main research contents are as follows.

Firstly, the mechanical structure of the feed shaft and the mechanical

structure of the cam manipulator tool magazine of the vertical double rotary table five-axis CNC machining center are designed. Based on MCD (Mechatronics Concept Designer) mechatronics conceptual design technology, the feed shaft and cam manipulator tool magazine of five-axis CNC machine tools are constructed, and the virtual debugging tool transfer problem of cam manipulator tool magazine is analyzed.

Secondly, the kinematics model of the five-axis CNC machine tool is constructed, and the PLC control programs such as the basic logic control of the CNC machine tool, the cam manipulator tool magazine control, and the M code auxiliary function are completed. Based on CMVM (Create MyVirtual Machine), the debugging of five-axis CNC machine tools is completed, and the RTCP function of five-axis linkage is analyzed. The human-computer interaction interface and side screen interface auxiliary tool with full / half closed-loop function fast switching are designed. Through the simulation processing verification of impeller parts, based on the ICP iterative algorithm, the point cloud data is compared, and the maximum error at the leading edge of the processed blade is 0.0431 mm.

Finally, through the software-in-the-loop technology, the MCD virtual model is coupled with the logic control program signal of the CMVM CNC system to complete the virtual debugging of the mechanical structure and the CNC system. Through the integration of MCD, CMVM and SIMIT, the accuracy and reliability of the mechanical model, logic control function

and automatic control of CNC machine tools are verified in an all-round way. Through the simulation processing verification of SINUMERIK ONE physical system, the designed five-axis CNC machine tool meets the requirements of complex processing tasks.

The designed virtual five-axis CNC machine tool has the functions of parallel design and cross-department collaboration, which can reduce the cost of experiment and trial-and-error and shorten the development cycle. It has high engineering practical value and provides a new technical path for the independent research and development of high-end CNC equipment in China.

Kailiang Sun(Machinery)

Supervised by Xiangqiang Zhong

KEY WORDS: five-axis CNC machine tools , digital twins , virtual debugging , logic control , parallel design

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 数控机床研究现状	2
1.2.2 虚拟调试研究现状	4
1.3 研究内容安排.....	9
1.4 本章小结.....	10
第 2 章 五轴数控机床概念样机设计.....	11
2.1 五轴数控机床机械结构设计.....	11
2.2 五轴数控机床虚拟模型构建.....	13
2.2.1 五轴数控机床 MCD 环境搭建	13
2.2.2 凸轮机械手刀库调试问题分析	16
2.3 本章小结.....	17
第 3 章 五轴数控机床系统调试.....	18
3.1 五轴数控机床运动学模型设计.....	18
3.2 数控机床逻辑控制程序设计.....	21
3.2.1 数控机床设备组态	21
3.2.2 数控机床 PLC 基本程序.....	22
3.2.3 数控机床凸轮机械手刀库	23
3.2.4 辅助功能 M 代码.....	26
3.3 五轴数控系统参数调试.....	27
3.3.1 旋转刀具中心点的加工功能	29
3.3.2 RTCP 动态误差补偿的原理分析	31
3.4 数控机床人机交互界面设计.....	32
3.4.1 全/半闭环控制模式切换界面开发	34
3.4.2 扩展屏按键开发	38

3.5 五轴数控加工仿真验证.....	41
3.5.1 加工编程工艺	42
3.5.2 仿真验证	43
3.6 本章小结.....	47
第 4 章 五轴数控机床软件在环虚拟调试.....	48
4.1 五轴数控机床机电调试.....	48
4.2 基于 SIMIT 的数控机床信号耦合	50
4.2.1 信号接口耦合	50
4.2.2 SIMIT 信号耦合设计	51
4.3 软件在环虚拟调试.....	54
4.4 ONE 系统实验验证	57
4.5 本章小结.....	59
第 5 章 总结与展望.....	60
5.1 全文总结.....	60
5.2 工作展望.....	60
参考文献.....	62
攻读硕士学位期间发表的学术论文及成果.....	67
致 谢.....	68

名词解释表

专业名词	名词解释
SINUMERIK ONE	西门子最新数控系统
CMVM	西门子针对 ONE 系统机电一体化调试应用平台
SIMIT	自动化系统建模、测试和优化虚拟仿真调试软件
MCD	NX 机电一体化应用模块
SIL	软件在环虚拟调试方法
HIL	硬件在环虚拟调试方法
CMVM/3D Builder	CMVM/3D 仿真环境机床运动链构建平台
NCK	（数控核心单元）专注于运动控制和加工逻辑处理
HMI	人机交互界面
MCP	数控机床操作控制按键
RTCP	旋转刀具中心点
Easy Screen	西门子数控系统的 HMI 二次开发工具
Easy XML	西门子数控系统的 HMI 二次开发工具
ICP	迭代最近点算法

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

近年来，我国数控机床行业曾长期深陷中低端市场的困境，其生产模式高度依赖高资源消耗与能源投入，伴随而至的是严重的环境污染问题。这种粗放型的发展模式直接导致了行业内中低端产品产能严重过剩，而高端技术产品却供给不足，形成了显著的结构矛盾，严重制约了行业的可持续发展^[1-4]。

面对这一局面，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020 年）》明确提出以“绿色制造”与“智能制造”双轮驱动传统制造业转型升级的战略方向^[5,6]。作为高端装备制造业的核心载体，五轴联动数控机床凭借其高精度、高效率以及复杂曲面加工能力，成为航空航天、汽车制造等战略性新兴产业实现绿色制造的重要技术支撑。同时，五轴机床的复合加工能力显著提升了生产效率，是突破国外高端技术垄断、实现我国高端装备自主化的战略关键。

在此背景下，西门子推出的基于 SINUMERIK ONE 数字原生技术为五轴机床的研发提供了全新的创新路径。CMVM 通过构建机床的数字孪生模型，能够在虚拟环境中完成 NC 代码验证、运动干涉检测及 PLC 程序调试，大幅缩短研发周期并降低物理测试成本。利用 CMVM 的 3D 仿真功能，可以提前模拟铣刀在加工过程中与夹具和工件的运动轨迹，提前规避实际加工中可能出现的超行程或干涉问题。此外，将 CMVM、SIMIT 和西门子 MCD 机电一体化设计工具相结合，能够实现机械、电气与控制系统的多学科协同优化，从而全面提升调试五轴机床的整体功能。

针对我国五轴机床“高端不足”的困境，基于 SINUMERIK ONE 数字原生技术为国产化提供了重要突破口。可以模拟五轴机床的复杂运动链，验证防碰撞功能、刀具路径及工艺参数，确保实际加工中 NC 程序的一次性成功执行。这一技术的引入，不仅提升了研发效率，还显著降低研发成本和资源浪费。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 数控机床研究现状

我国数控机床在技术突破、产业规模和应用领域等方面取得了显著进展，但仍面临高端产品依赖进口和核心技术瓶颈等挑战。未来，智能化、数字化和绿色制造将成为主要发展方向，而数字孪生技术作为虚拟调试的核心手段，将在数控机床的研发、调试和优化中发挥重要作用。

蔡安江等^[7]提出了一种针对多主轴头数控机床的虚拟仿真加工平台构建方案，解决了现有技术中无法实现多主轴头切换调用的问题。Sun 等^[8]提出了一种基于数字孪生技术的机床调试方法，通过构建数字孪生模型进行虚拟调试，有效解决了传统调试方法存在的问题。Wei 等^[9]提出了一种保持 CNC 机床数字孪生模型一致性的方法，确保物理世界与数字世界的同步更新，旨在解决在使用过程中由于磨损、环境变化或其他因素导致的物理实体状态改变，从而影响到数字孪生模型准确反映实际情况的问题。

王俊杰等^[10]基于 NX MCD 的协同设计理论与方法，为五轴数控机床的虚拟调试提供了成熟的技术路径。通过集成机械、电子及控制系统的虚拟模型，可加速五轴数控机床的开发周期，同时确保各子系统（如主轴、进给系统、控制系统等）之间的兼容性和性能指标。

王金江等^[11]分析了机电系统内部复杂的耦合关系，然后采用多领域统一建模语言结合虚实映射策略构建了数控机床的数字孪生模型，实现了虚拟环境中机床行为的真实再现。

Ugarte 等^[12]研究如何在机床制造行业内实施基于数字孪生的虚拟调试方法，解决了当前机床制造行业面临的挑战，并为未来的智能化转型指明了方向。Vishnu 等^[13]建立一个数据驱动的数字孪生框架，用于预测数控机床加工过程中的表面粗糙度。通过集成实际加工过程中的实时数据流与虚拟环境中的模拟仿真，数字孪生不仅能够反映当前状态下的表面特性，还可以预见未来可能的变化趋势，从而为生产决策提供支持。

Witt 等^[14]提出了一种硬件在环虚拟调试方法，来应对模块化机床开发过程中遇到的技术挑战，而且也其他类型的复杂机电系统提供了借鉴。Wang 等^[15]

提出一种基于数字双驱动的虚拟调试方法，旨在通过构建高精度的 CNC 机床数字孪生模型，实现对机器工具复杂加工场景的模拟和控制参数的优化。利用多域统一建模语言结合的方法建立的数字孪生模型对复杂的加工场景进行虚拟调试，能够有效缩短响应时间，大幅降低总系统误差。

孙立鹏等^[16]利用 MCD 结合西门子的高端数控系统 SINUMERIK 840Dsl，实现对数控机床的高效虚拟调试。通过这种方式，不仅可以在设备实际安装之前验证控制系统逻辑和机械结构合理性，还能有效避免传统调试过程中可能遇到的各种风险。

林裕程等^[17]在不依赖实际物理硬件的情况下，对数控机床进行高效的虚拟调试。该研究旨在通过引入先进的虚拟调试技术，减少实物调试的时间成本和风险，同时提高产品的质量和市场竞争力。不仅为这一新兴领域内的持续创新开辟了道路，同时也为数字孪生驱动的虚拟调试技术提供了理论依据和技术支持，对于促进相关行业的数字化转型和技术进步具有重要意义。

Liu 等^[18]提出了一种基于数字孪生的随时间变化误差预测和补偿方法，旨在提高数控机床运动轴的加工精度。该方法通过建立数控机床运动轴的数字孪生模型，提出了基于热传递理论的时变误差模型和视觉模型来模拟机器工具的实际工作状态，实现了对随时间变化误差的准确预测与实时补偿。

数字孪生模型可以被集成到生产系统中，实现实时监测和控制。江雪梅等^[19]针对数控机床在加工过程刀具加工轨迹与工作台和夹具是否存在干涉现象，通过构建数控机床的数字孪生体，提出采用分级碰撞检测方法对加工过程中碰撞现象进行检测，能够提高机床加工效率，有效避免加工过程中碰撞现象，从而降低机床加工损坏率。成居宝等^[20]提出了针对数控机床特性的新型碰撞检测算法。旨在通过优化现有的碰撞检测技术，减少加工过程中的意外事故，提高生产效率，并保障操作人员的安全。不仅展示了基于数控机床特性的碰撞检测算法的应用潜力，而且也为未来的研究指明了方向。

综上所述，众多研究聚焦于五轴数控机床的虚拟调试、数字孪生技术应用等领域。现有文献大多是在数控机床已投入实际生产的背景下开展研究，其核心目标主要围绕现有机床的生产状态进行优化。当前研究在数控机床设计初始阶段的布局尚显不足，尤其是将机、电以及自动化联合设计方面，相关研究还有待填补

空白。鉴于此，后续研究将重点针对数控机床机、电以及自动化联合设计方面展开深入研究。

1.2.2 虚拟调试研究现状

作为数字经济领域的关键使能技术，数字孪生技术^[21-24]正展现出其独特价值与战略意义。通过构建与物理实体精准映射的虚拟镜像，不仅实现了复杂制造工艺的高保真虚拟仿真，更重要的是打通了产品设计、制造执行到运维服务的全价值链数据通道，形成了覆盖产品全生命周期的智能决策闭环。凭借其在多维度模型构建、异构数据融合、实时状态感知以及智能预测分析等方面的技术优势，数字孪生正逐步成为推动产业数字化转型的核心引擎。

由于不同行业、不同应用场景下对数字孪生技术需求的差异，以及技术本身在不同方向上的发展深化，数字孪生领域出现三种流派分别是数据派、连接派和仿真派。

数据派强调数据在数字孪生系统中的核心作用，认为通过收集、分析和利用物理实体的数据，可以实现对系统的精准控制与优化。这一理念与当前大数据、人工智能^[25]等技术的快速发展趋势相契合。数据派在国防装备^[26]、智慧城市^[27]等多个领域都有广泛应用。在这些领域中，数据是决策的重要依据，通过构建数字孪生系统并充分利用其中的数据资源^[28]，可以提高决策的科学性和准确性。

连接派主要依托于物联网技术，通过传感器、执行器等设备实现物理实体与虚拟实体之间的数据交互与控制^[29]。随着物联网技术的快速发展，连接派在数字孪生领域中的地位日益凸显。许多应用场景需要数字孪生系统能够实时反映物理实体的状态变化，并据此进行实时决策与控制。连接派通过实现物理实体与虚拟实体之间的实时数据交互，满足了这一需求。连接派的成功往往依赖于物联网带来的网络效应，即随着连接设备数量的增加，系统的整体效能和价值也会显著提升。

仿真派强调仿真的核心价值，依托系统仿真、方法论和计算机仿真软件等技术基础，通过可视化、交互性等方式，为复杂系统的设计与优化提供了强大的工具。航空航天等^[30]高端领域对系统安全性、可靠性要求极高，仿真技术能够在不破坏实际系统的情况下，对系统进行全面的测试与验证，因此在这些领域得到了

广泛应用。随着仿真技术的不断发展和提炼简化，其应用范围也逐渐向其他较低端行业拓展，形成了仿真派这一重要的数字孪生流派。

虚拟调试技术作为数字孪生仿真派的一支，主要分为软件在环虚拟调试和硬件在环虚拟调试两种，如图 1-1 所示。

Software-in-Loop (SIL): 也称为软件在环虚拟调试^[31]。控制器与被控对象均采用虚拟部件。由于模型是数字化的，因此可以方便地修改和优化，调试过程中不会出现硬件损坏或人员伤害的风险。

Hardware-in-Loop (HIL): 也称为硬件在环虚拟调试^[32]。在这种环境中，控制部分使用可编程逻辑控制器 (PLC) 等真实物理控制器，机械部分使用虚拟三维模型。由于引入了实际的 PLC 硬件，因此调试过程可以更接近实际的生产环境，可以验证 PLC 程序在实际硬件上的运行效果，包括通信、控制逻辑等方面。

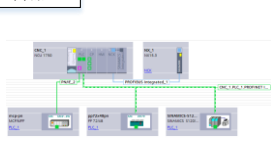
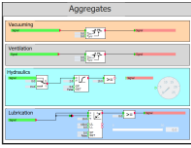
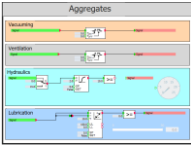
物理数控设备		硬件在环虚拟调试	软件在环虚拟调试
HMI		HMI	
控制器		控制器	
IO信号		IO信号 执行器传感器	IO信号 执行器传感器
执行器传感器			
物理机械设备		虚拟机械设备	虚拟机械设备

图 1-1 虚拟调试控制类型

陶飞等^[33-36]的研究系统性地阐述了数字工程的多领域应用前景，着重强调了机电一体化在现代工业发展中的核心地位，并前瞻性地指明了该领域未来的发展方向。其提出的数字孪生技术成熟度评估模型，为机电一体化设备在开发、运行和维护等全生命周期状态下的技术评估提供了科学依据，这一理论框架为后续研究奠定了坚实的基础。

Striffler 等^[37-39]深入研究了虚拟调试的技术内涵，从概念定义到实现路径进行了系统性梳理，特别对软硬件在环虚拟调试等不同层级的测试配置方法进行了详尽阐述，并着重分析了仿真模型构建中的关键技术要素，包括模型的层次化架构、细节粒度控制以及物理行为模拟等核心问题。在理论层面，为虚拟调试提供了系统化的技术框架；在实践层面，则为调试流程的优化提供了切实可行的技术路径。

Böttjer 等^[40]对制造业中单元级数字孪生应用进行了全面综述，数字孪生技术如何在制造单元层面，即单个机器、生产线或工作单元中发挥作用，并研究了其对于提高生产效率、优化维护策略以及增强产品和服务创新能力的影响。Chen 等^[41]设计了一种基于数字孪生技术的虚拟调试和监控平台，通过构建真实工业机器人系统的数字孪生模型，并利用 PLCSIM Advanced 进行高精度模拟，实现了整个工业机器人系统的全面测试。

刘梦园等^[42]在 NX MCD 中建立静态虚拟模型并设置运动学参数的方法，可直接应用于五轴数控机床的虚拟调试。通过 OPC UA 技术实现 PLC 控制与虚拟模型之间的实时数据传输，为五轴数控机床的虚实集成调试提供了技术参考。

张旭辉等^[43]利用即时外观建图技术重构三维环境，并通过虚拟传感器技术实现物理空间到虚拟环境的精准映射，为解决五轴数控机床虚拟调试中的定位精度问题提供了解决方案，尤其是在复杂加工环境下的仿真与调试。

周正飞等^[44]通过构建铣削场景模型并将其注入数字孪生模型，结合基于模型的整定算法和手动调优策略，为五轴数控机床的虚拟调试提供了场景化建模和算法优化的思路，有助于提高调试精度和效率。傅贵武等^[45]阐述的基于数字孪生技术的智能生产线建设流程，包括数字化建模、物理属性配置、信号点设置与外部控制信号映射等步骤，为五轴数控机床的虚拟调试提供了全流程建设指导，有助于优化调试方案并提升调试效率。马飞等^[46]提出的基于数字孪生的虚拟调试系统设计方法，为五轴数控机床的虚拟调试系统设计提供了完整的框架和通信接口方案。

Xu 等^[47]提出的一种基于 AR 技术的方法为五轴数控机床的虚拟调试提供了一种创新性解决方案，能够显著提升预检效率、智能化水平和调试精度，同时优化安装流程并解决设备缺失问题。这些优势为五轴数控机床的虚拟调试提供了新

的技术路径，有助于推动相关技术的进一步发展与应用。

随着智能制造技术的飞速发展和市场竞争的不断加剧，对于新样机新设备的灵活性、柔性和智能化需求也日益提高。在智能制造的背景下，机电一体化的概念也需要更深层次的要求。传统的设备开发流程已经无法满足当今智能制造的高速度发展，因此对于机械设计和电气设计的融合需求变得更加迫切。为了满足这些需求，就需要探索新的方法和技术，以实现更高效、更灵活和更智能的设备开发流程^[48]。

传统机床制造过程的主要挑战之一是每一步都依赖于前一步(规划、设计、驱动、装配、调试)^[49]。如图 1-2 所示。传统机床制造过程中所面临的依赖性和挑战是非常重要的。每一步都必须按照严格的顺序进行，而一旦某一步出现错误或延迟，整个流程都会受到影响。一方面，这种依赖性意味着任何一步的问题都可能导致后续步骤的延迟，从而使整个项目的交付时间延长；这对于制造商来说意味着额外的成本和资源的浪费。另一方面，这种依赖性也使得调试过程变得更加复杂；由于整个系统在最后安装和测试之前无法进行全面的测试，发现和解决问题会更加困难和耗时。

为了保持竞争力，应该进一步研究新的工具和技术，以缩短产品上市时间。这也需要在机器概念设计中尽早发现机器缺陷、故障和错误的方法。早期故障检测可以通过节省工程时间、材料，从而降低成本，避免在调试阶段进行纠正。在测试系统时，就需要不同工程学科之间的协作。

虚拟调试技术在设备开发时必不可少，因为所有功能都可以在开发过程的早期阶段进行测试。基于 SINUMERIK ONE 数字原生虚拟调试技术，可以实现早期（概念设计—机械设计—电气调试—3D 制造仿真）于一体的机电联合设计，如图 1-3 所示，可以开创机床开发、调试的新时代。将整个开发过程，包括机械设计、电气设计和自动化设计集成到一个仿真平台中，提供集成式并行机电联合设计进行验证。

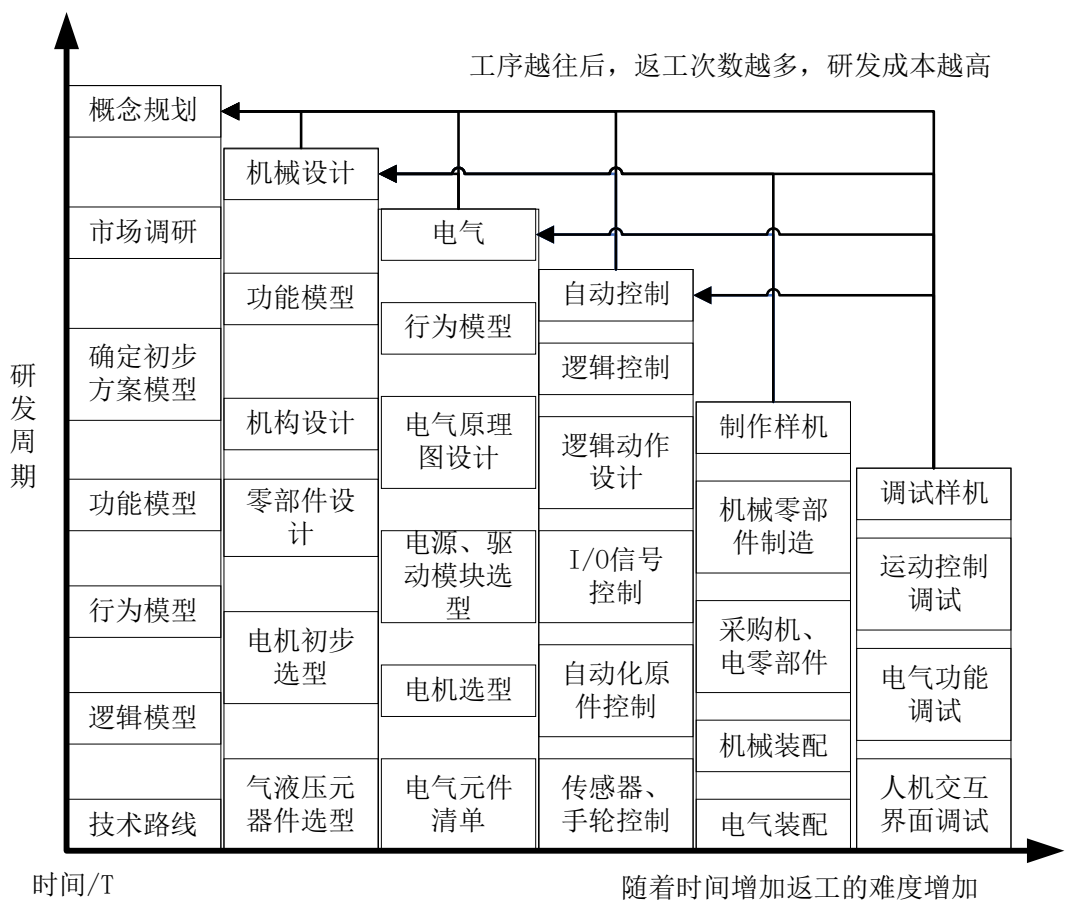


图 1-2 传统机电设备研发流程

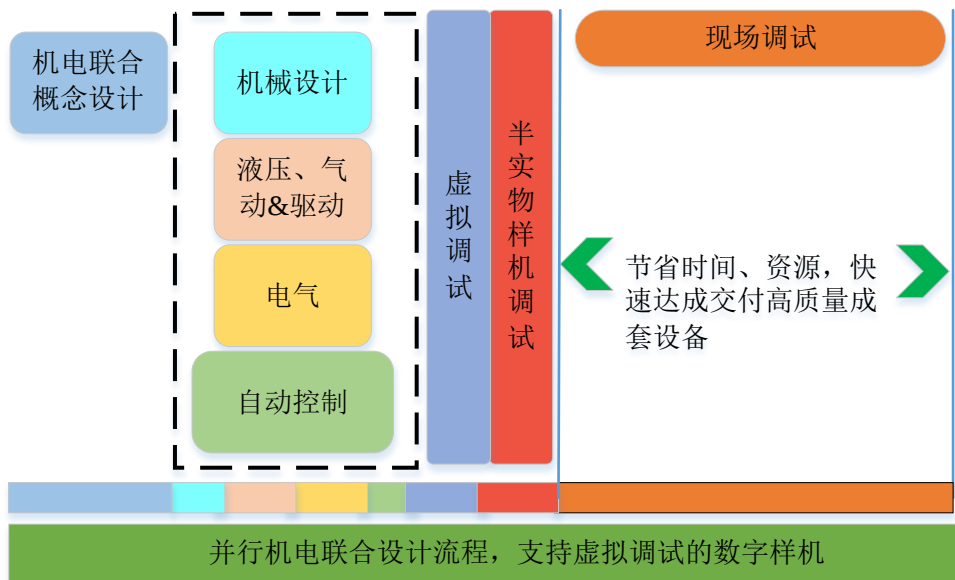


图 1-3 机电一体化联合设计及虚拟调试流程

该虚拟调试综合解决方案，成功地实现机械设计、电气设计和自动化设计的并行开发过程。通过模拟和测试，可以在设备开发阶段对机械方案的可行性进行修改和完善，确保设备的机构和软件控制逻辑的正确性。这不仅节约试错资源，

减少设备开发周期，而且提高样机开发的整体效率，缩短样机产品的上市时间。此外，虚拟调试过程的重复利用率非常高，可以快速地验证设备升级和柔性化需求。使得开发过程更加灵活，能够快速响应市场变化和客户需求。虚拟调试还提供对设备性能的全面评估，提前发现和解决潜在问题，为设备的稳定性和可靠性提供有力保障。

由于整体开发设计所使用的都是虚拟环境，使得调试时是无风险的测试环境，不会因调试错误而造成“飞车”事故，重者甚至造成人员伤亡。在虚拟环境中可以帮助工程师和设计人员对机床进行多次仿真实验，快速评估和改进机床结构、参数和工艺，以提高机床的精度、刚性、稳定性和生产效率。

1.3 研究内容安排

在五轴数控机床的初步设计阶段，通过机电一体化概念设计技术，构建一台虚拟五轴数控机床；依托 CMVM 平台对虚拟五轴数控机床进行调试与二次开发；为验证调试后的虚拟五轴数控机床是否能够胜任复杂加工任务对其进行全面的加工仿真验证。具体安排如下：

第 1 章 绪论。阐述了五轴数控机床在我国当前制造业转型升级背景下的研究必要性，重点分析了虚拟调试技术的研究目的及其对提升数控机床研发效率、降低调试成本的重要意义。通过系统梳理国内外文献，详细研究了数控机床在数字孪生、虚拟调试、故障诊断等关键技术领域的研究现状，总结了国内外学者在该领域取得的重要成果。

第 2 章 五轴数控机床虚拟样机设计。详细研究五轴数控机床概念样机的设计过程，设计立式双回转台五轴数控加工中心，并针对数字化模型，利用 MCD 机电概念设计搭建数字孪生虚拟环境。

第 3 章 五轴数控机床系统设计。基于第 2 章设计的数控机床三维数模，搭建数控机床的运动链、设计其逻辑控制功能、对五轴数控机床的 NC 系统进行调试、五轴联动误差补偿进行理论分析、开发数控机床人机交互界面。通过仿真加工叶轮零件，验证虚拟调试设计的数控机床的正确性和可靠性。

第 4 章 五轴数控机床软件在环虚拟调试。利用虚拟调试技术将数控机床的数字化模型运动数据与真实数控内核的 NC 系统逻辑控制信号进行耦合，实现对

数控机床机械模型、逻辑控制功能以及 NC 参数的全面验证。

第 5 章 总结与展望。通过虚拟调试技术设计数控机床所作的工作内容进行总结，对进一步优化完善数控机床设计工作的研究方向进行展望。

论文组织框架如图 1-4 所示。

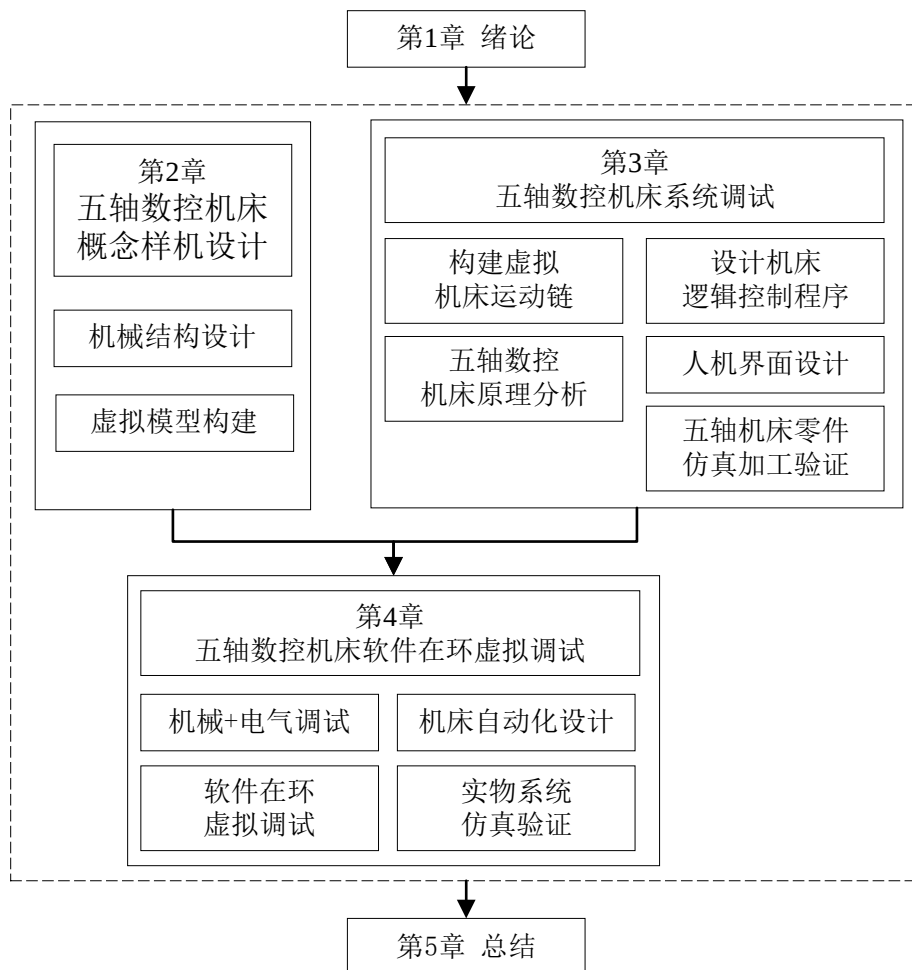


图 1-4 论文的组织框架

1.4 本章小结

以国家战略层面的智能制造政策为切入点，系统阐释数字化转型背景下五轴数控机床研发的时代必然性。针对传统五轴数控机床设计过程中存在的物理样机调试成本高、周期长等问题；通过系统梳理国内外虚拟调试技术在机床领域的相关文献，深入分析其应用现状与发展趋势，为后续研究提供坚实的学术支撑。

第 2 章 五轴数控机床概念样机设计

为满足复杂零件加工需求，设计了立式双转台结构的五轴数控加工中心，通过搭建五轴数控机床的虚拟仿真环境，可有效验证数控程序的正确性，显著提升加工安全性和效率。

2.1 五轴数控机床机械模型设计

五轴机床的结构形式多样，其基本构成是在三轴数控机床（由三个直线轴组成）的基础上，再增加两个旋转轴，从而形成五轴数控机床。按照主轴的空间布局方式，五轴机床可分为立式和卧式两大类。其中，立式结构有助于中小型零件的加工，而卧式结构适用与大型零件或箱体零件加工。

旋转轴配置是五轴机床的主要差异所在，主要可分为以下三类：

（1）双摆头型：这种类型的五轴机床将两个旋转轴集成于主轴头，其加工柔性较高，但刚性相对较弱，因此适用于大型复杂曲面零件的加工。

（2）双转台型：两旋转轴位于工作台，与双摆头型相比，这种类型的五轴机床刚性更好，但加工尺寸存在一定限制，更适合中小型精密零件的加工。

（3）单转台单摆头复合型：该类型结合了双转台型和双摆头型的优点，在加工精度和效率之间达成了平衡，是目前五轴机床中的主流结构形式。

立式双转台结构的五轴数控加工中心主要包含床身、X、Y、Z 轴直线运动平台、B 轴摆动部件、C 轴转动部件、主轴以及刀具模块等部分^[50]。直线运动平台运用滚珠丝杠传动结构，由伺服电机驱动高精度的滚珠丝杠运转，以此达成直线轴的精准运动。对于 B 轴而言是借助伺服电机驱动蜗轮蜗杆来实现摆动的；而 C 轴的旋转运动，则是由电机驱动工作台来完成。

为了实现刀具的自动更换，设计了凸轮机械手刀库，通过凸轮机构驱动机械手，精准完成抓刀和换刀动作。机械手的运动由伺服电机提供动力，控制凸轮盘旋转，将电机的连续转动转化为机械手的间歇性和规律性运动。机械手末端配备刀具夹持装置，通过弹簧夹头能够在换刀时牢固夹紧刀柄。刀盘的旋转采用蜗轮蜗杆传动进行精确分度，确保刀具更换过程的高效与精准。刀套的 90 度翻转由气缸驱动的连杆滑块系统完成，通过滑块在滑槽内的移动，实现刀套的旋转，进一步提升换刀过程的精度与可靠性。五轴机床的模型如图 2-1 所示。

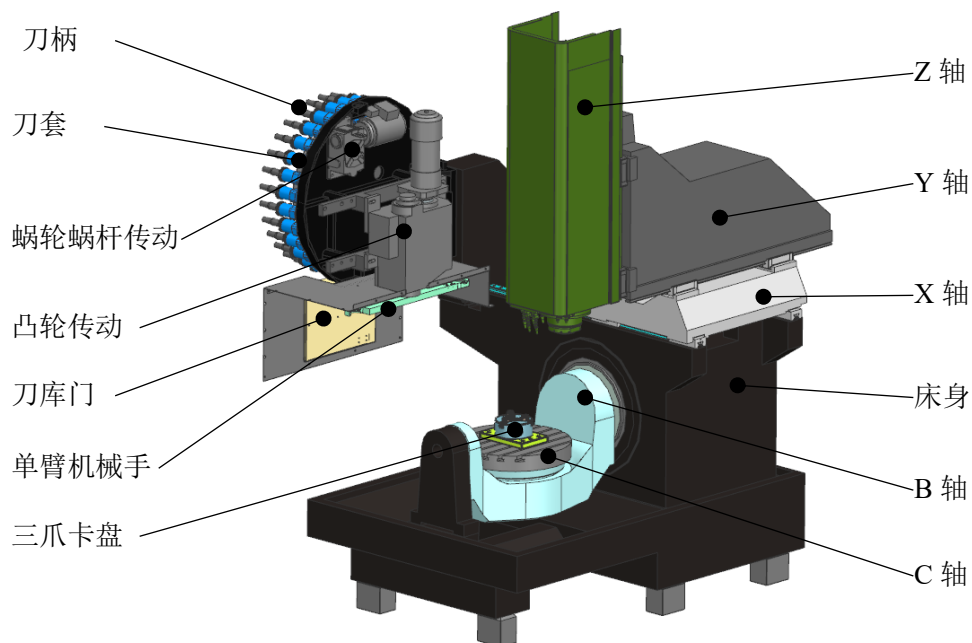


图 2-1 双转台型五轴数控加工中心

机床以床身作为主体结构，整体分为两条运动链。刀具链中，主轴主要用于安装刀具并执行切削加工，主轴附于 Z 轴上，Z 轴安装在 Y 轴上，Y 轴则安装在 X 轴上，最终 X 轴附于机床床身。工件链则负责装夹夹具和毛坯，同样具有重要作用，工件被放置在回转轴 C 轴上，C 轴安装在摆动轴 B 轴上，最后 B 轴附于机床床身。通过这种依附关系，形成稳定而高效的运动系统，确保各部件的协调和加工。机床的设计具体参数见表 2-1 所示。

表 2-1 五轴加工中心参数

机床技术参数	参数
X 轴限位/mm	-300~300 (mm)
Y 轴限位/mm	-200~200 (mm)
Z 轴限位/mm	150~550 (mm)
B 轴限位/($^{\circ}$)	-100~100($^{\circ}$)
C 轴限位/($^{\circ}$)	0~360($^{\circ}$)
工作台直径/mm	200 (mm)
T 形槽/mm	12 (mm)
最快移动速度	10000 (mm/s)
最快切削进给	8000 (mm/s)
主轴最大转速	18000 (r/min)
刀库	30 个刀位
刀柄	ISO40

2.2 五轴数控机床虚拟模型构建

MCD 是西门子旗下 NX 软件平台中的一个模块，专为机电一体化概念设计和虚拟验证而开发。MCD 的概念设计功能提供丰富的建模工具，可以基于此快速搭建不同方案的机床初步模型，设定各部件的基本参数和运动关系。这些模型虽然相对简化，但足以反映机床整体架构和关键性能指标。通过对机床的布局、坐标轴数量和行程等关键要素进行调整，可以创建多个概念设计模型。

2.2.1 五轴数控机床 MCD 环境搭建

在 MCD 环境中，搭建五轴数控加工中心的虚拟样机模型需要以下关键步骤：根据物理世界中数控机床的实际运动方式，完成模型的基本机电对象定义，并配置运动副和运动机构的耦合关系；定义传感器和执行器，以支持机床的运行时行为；设置信号的定义与连接，用于实现模型内部各部分的协调工作。通过上述步骤，可以构建一个完整的五轴数控加工中心的 MCD 环境，如图 2-2 所示。

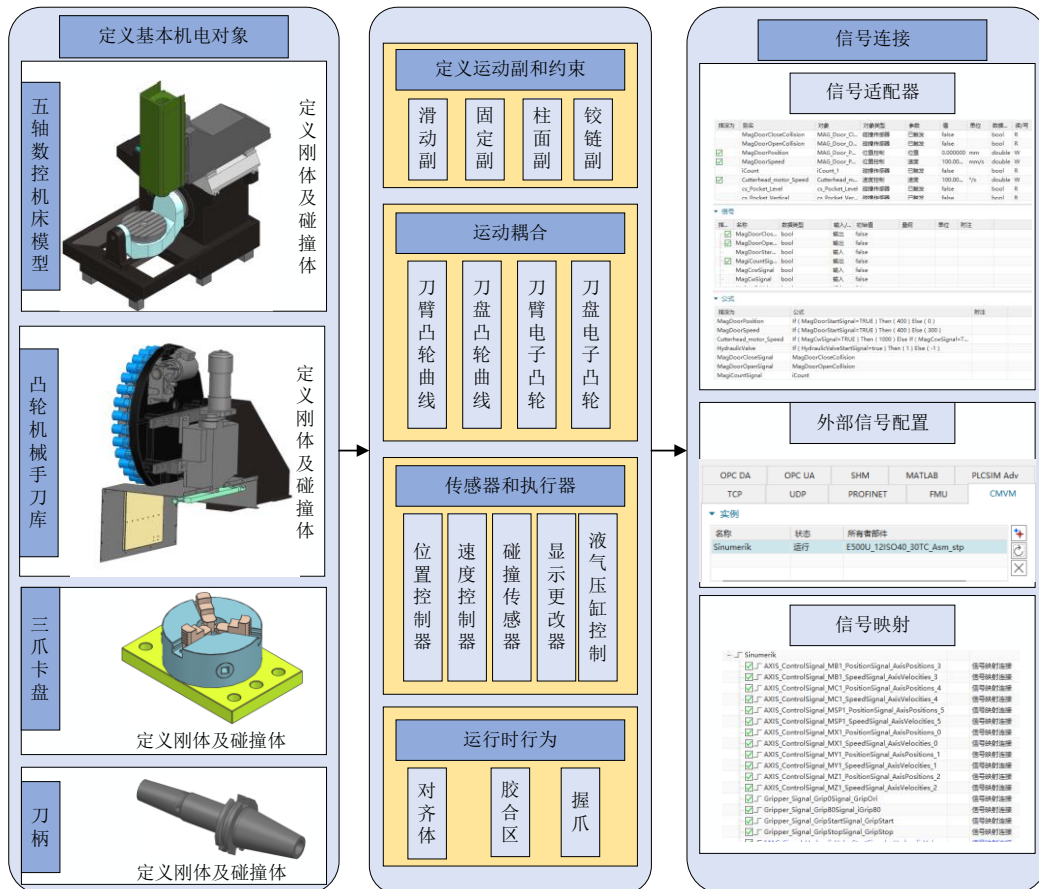


图 2-2 MCD 内环境搭建

（1）基本机电对象的设置

在数控机床虚拟调试环境中，需为运动部件构建对应的刚体模型及碰撞体。刚体模型通过质量、惯性矩等参数定义物体的动力学特性，使其在仿真系统中能够响应重力场或外部施加的力矩作用，实现真实物理运动规律的数字化特征。当两个刚体均配置碰撞体时，物理引擎才会建立二者间的相互作用关系，否则系统将忽略未定义碰撞体的刚体间潜在碰撞，导致仿真结果出现穿透现象。

（2）运动副设置

为了实现两个模型间特定的相对运动，需要限制其相对运动自由度，从而确保机械系统能够按照设计要求正常运行，如图 2-3 所示。在五轴数控加工中心中，不同部件的运动类型包括滑动副、铰链副、固定副和柱面副。例如，X/Y/Z 轴模型执行直线往复运动，应定义为滑动副；B 轴的摆动运动应定义为铰链副；C 轴和主轴因可实现无限限制回转，也应定义为铰链副；而机械手换刀装置同时具备回转与上下移动功能，应定义为柱面副。

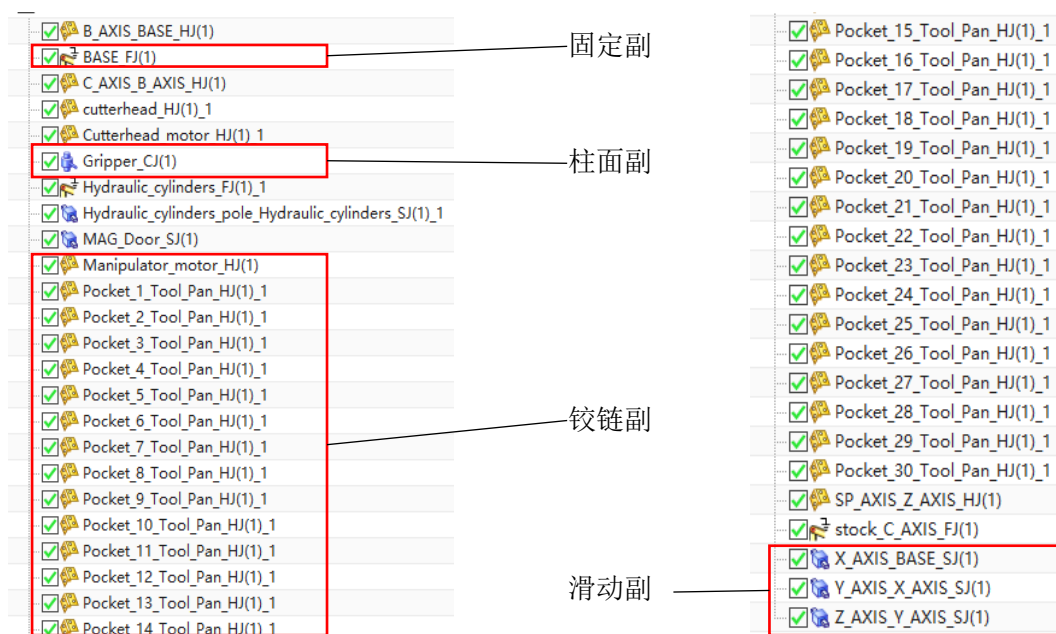


图 2-3 机械模型运动副

（3）执行器和传感器的设置

在 MCD 虚拟调试中，需要对三维模型的机电对象进行运动控制，使模型能够与真实设备运动情况相同。根据不同控制条件通过预定义的恒定速度控制模型进行运动或使用位置控制以预定义的速度驱动轴移动到预定义的位置。针对五轴数控机床其主要是由进给轴和主轴构成，因位置控制器同时具有速度和位置控制

方法，所以应为其添加位置控制器更加便捷。对于刀盘分度机构和机械手凸轮机构应在电机处添加速度控制以模拟电机运转状态，而在末端执行元件定义位置控制以仿真真实的运动。

为了和真实数控设备运行状态一致，还需要将碰撞传感器连接到几何体，以提供有关模拟过程中数控原件模型相互作用的反馈元件。例如通过刀具模型碰撞状态来触发条件语句，以此反馈给 PLC 表明相关动作完成，然后通过 PLC 与 NC 交互进行完成指定位置换刀功能。

(4) 仿真序列的建立

在五轴数控机床的换刀调试过程中，刀套在完成 90° 回转并到达换刀位置后，碰撞传感器检测到信号并反馈至 PLC，触发机械手电机启动，驱动机械手执行抓取刀柄动作。当机械手运动至刀柄位置时，PLC 切换控制逻辑信号，将刀柄从刀套转移至机械手。主轴刀具的装载与卸载过程与此类似，均通过传感器信号与 PLC 逻辑协同实现。

如图 2-4 所示。在仿真序列中，刀具转移功能通过传感器触发握爪动作实现。当刀套碰撞信号 cs_pocket 的值为 false 时，握爪的抓握状态被设置为 true，从而实现刀套对刀具的吸附功能。同理，刀套卸下刀具的动作也通过仿真序列控制握爪完成，当 cs_pocket 的值为 true 时，握爪的释放状态被设置为 true，从而实现刀具的卸下动作。

运行时参数						运行时参数					
设	名称	运算符	值	单位	输	设	名称	运算符	值	单位	输
☒	抓握	:=	true		☐	☒	抓握	:=	false		☐
☒	释放	:=	false		☐	☒	释放	:=	true		☐
☐	持续时间	:=	0.010000	s	☐	☐	持续时间	:=	0.010000	s	☐
☐	活动	:=	true		☐	☐	活动	:=	true		☐
编辑参数						编辑参数					
条件						条件					
如果	对象	参数	运算符	值		如果	对象	参数	运算符	值	
☐	If	cs_pocket	已触发	==	false	☐	If	cs_pocket	已触发	==	true

图 2-4 仿真序列控制抓刀

(5) 信号适配器的设置

信号适配器可以看作是一种生成信号的形成逻辑组织管理方式，通过输入输

出连接传送给 PLC 或者 MCD 模型系统中。通过模型特定位置如刀库门开关碰撞传感器与信号映射关系输出到外部逻辑控制器，通过数控机床控制面板或 NC 控制刀库门顺序执行动作；因 PLC 中刀盘和刀臂电机使用开关量控制，而 MCD 中的电机使用速度控制，所以应在公式中通过开关条件控制虚拟模型运动速度；其他相关信号根据数控机床真实应用条件进行构建后再与外部机床信号进行映射。

2.2.2 凸轮机械手刀库调试问题分析

数控机床的凸轮机械手刀库结构复杂，例如刀盘分度通过蜗轮蜗杆机构传动，刀臂机械手则采用平面槽轮与弧面凸轮相结合的方式，实现机械手的回转及上下运动，从而完成刀具在刀库与主轴之间的转移。在主轴、刀臂和刀套中，还包含大量机械弹簧机构，对内部运动模型进行仿真时，若逐一模拟所有运动副的连接方式，工作量巨大且意义有限。

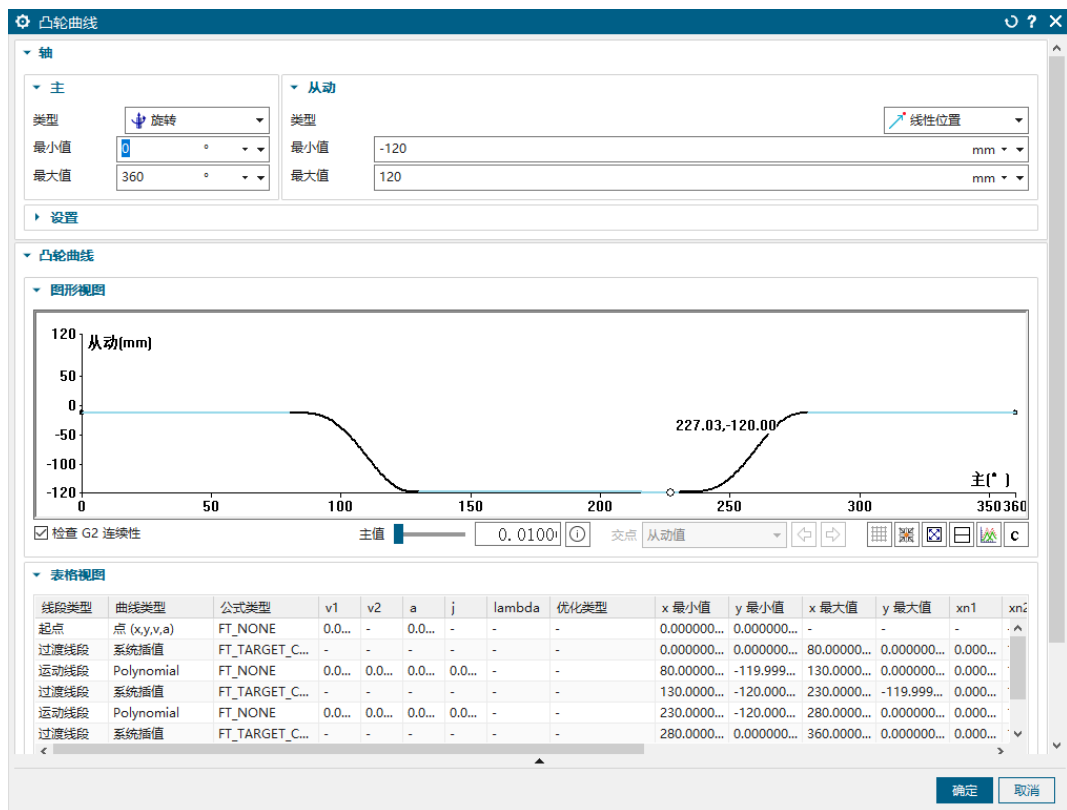


图 2-5 机械手运动凸轮曲线

如图 2-5 所示，在凸轮传动机构的仿真中，使用凸轮与从动件的碰撞接触方式，往往导致计算资源的高消耗。由于碰撞体难以完全包络复杂的凸轮模型，仿

真可靠性较低，易出现抖动和定位误差，从而导致失真现象的发生，进一步影响仿真效果和精度。为此针对刀盘蜗轮蜗杆机构分度传动和机械手回转及上下运动皆采用在 MCD 中绘制符合传动机构末端运动的凸轮曲线。

采用电子凸轮耦合原动件和末端机构运动副方式来替代中间大量的运动组件。主轴、刀臂、刀套中大量机械弹簧机构，主要功能是抓住刀具及换刀时进行刀具的转移，因此使用握爪或固定副代替复杂机械机构能够保证仿真时的精度，具体优缺点可见表 2-2 所示。

表 2-2 刀库机械结构调试优缺点

机械机构	缺点	解决思路	优点
刀盘凸轮传动机构	3D 图难以得到，自己绘图难度较大；若机械凸轮采用碰撞体运动仿真，精度和可靠性差	电子凸轮代替机械凸轮	省略复杂的机械结构，仿真精度高；MCD 集成强大的凸轮曲线绘制功能
刀臂凸轮机构	复杂的机械模型，即使有 3D 模型，凸轮仿真采用碰撞体运动仿真也难以实现	电子凸轮代替机械凸轮	省略复杂的机械结构，仿真精度高；MCD 集成强大的凸轮曲线绘制功能
弹簧机构(刀套/刀臂/主轴的抓刀及松刀机构)	碰撞体仿真精度和可靠性差	固定副 / 吸盘 / 握爪实现	省略复杂的机械结构，仿真精度高

2.3 本章小结

(1) 设计了配置凸轮机械手刀库的立式双转台五轴数控加工中心，通过 NX 进行刀库概念模型的设计。

(2) 基于 MCD 机电一体化技术构建完成数控机床虚拟运行环境，并对凸轮机械手刀库在虚拟调试时遇到的刀具从刀库到主轴换刀问题进行分析。

第 3 章 五轴数控机床系统调试

为开展后续数控机床加工仿真验证工作，以第 2 章所设计的五轴数控机床模型为基础，系统性地研究五轴数控机床在运动学模型设计、逻辑控制程序设计、系统参数优化以及人机交互界面开发等工作。

3.1 五轴数控机床运动学模型设计

数控机床的运动学模型是机床设计的重要组成部分。通过创建运动学模型，设计师可以在虚拟环境中模拟机床的运动特性，包括各个部件之间的相对运动关系、运动范围、方向等。这有助于发现设计中的问题，如碰撞、干涉、运动不流畅等，并进行优化设计，提高机床的性能和可靠性。通过运动学模型进行虚拟仿真和测试，可以验证机床的设计是否符合预期的功能要求。

为了在 CMVM 中获得更好的仿真效果，根据第 2 章设计的五轴数控机床三维模型，将各个部件模型（如床身、主轴、进给轴等）分别导出为 STL 格式文件。将这些文件导入到 CMVM/3D Builder 中，搭建数控机床模型的运动链，其专为 CMVM 的 3D 仿真环境设计，能够呈现更佳的仿真加工效果。

数字孪生技术体现的是真实机床的映射，因此运动链的搭建过程也是以真实机床坐标系为基础，机床的运动链经过相互叠加而成。运动链按照根树系统构成，数控机床按照执行元件末端不同，大体上可分为刀具运动支链与工件运动支链，运动支链中各轴系表述，见表 3-1。

表 3-1 运动支链坐标系

序号	坐标系缩写	坐标系名称	坐标系类型
1	MCS	机床坐标系	根坐标坐标系
2	XCS	X 轴坐标系	进给轴坐标系
3	YCS	Y 轴坐标系	进给轴坐标系
4	ZCS	Z 轴坐标系	进给轴坐标系
5	BCS	B 轴坐标系	进给轴坐标系
6	CCS	C 轴坐标系	进给轴坐标系
7	SCS	主轴坐标系	主轴坐标系
8	TCS	刀具坐标系	末端坐标系
9	WCS	工件坐标系	末端坐标系

根据模型的运动父子级关系，共搭建两条运动链：以 MCS 作为根树结构起点，一条以直线轴为主，附加一个旋转主轴的刀具链，

“MCS—>XCS—>YCS—>ZCS—>SCS—>TCS”；另一条以回转轴为主的工件链“MCS—>BCS—>CCS—>WCS”。两条运动支链的运动相互独立，可以形成机床运动学模型^[51]。如图 3-1 所示。

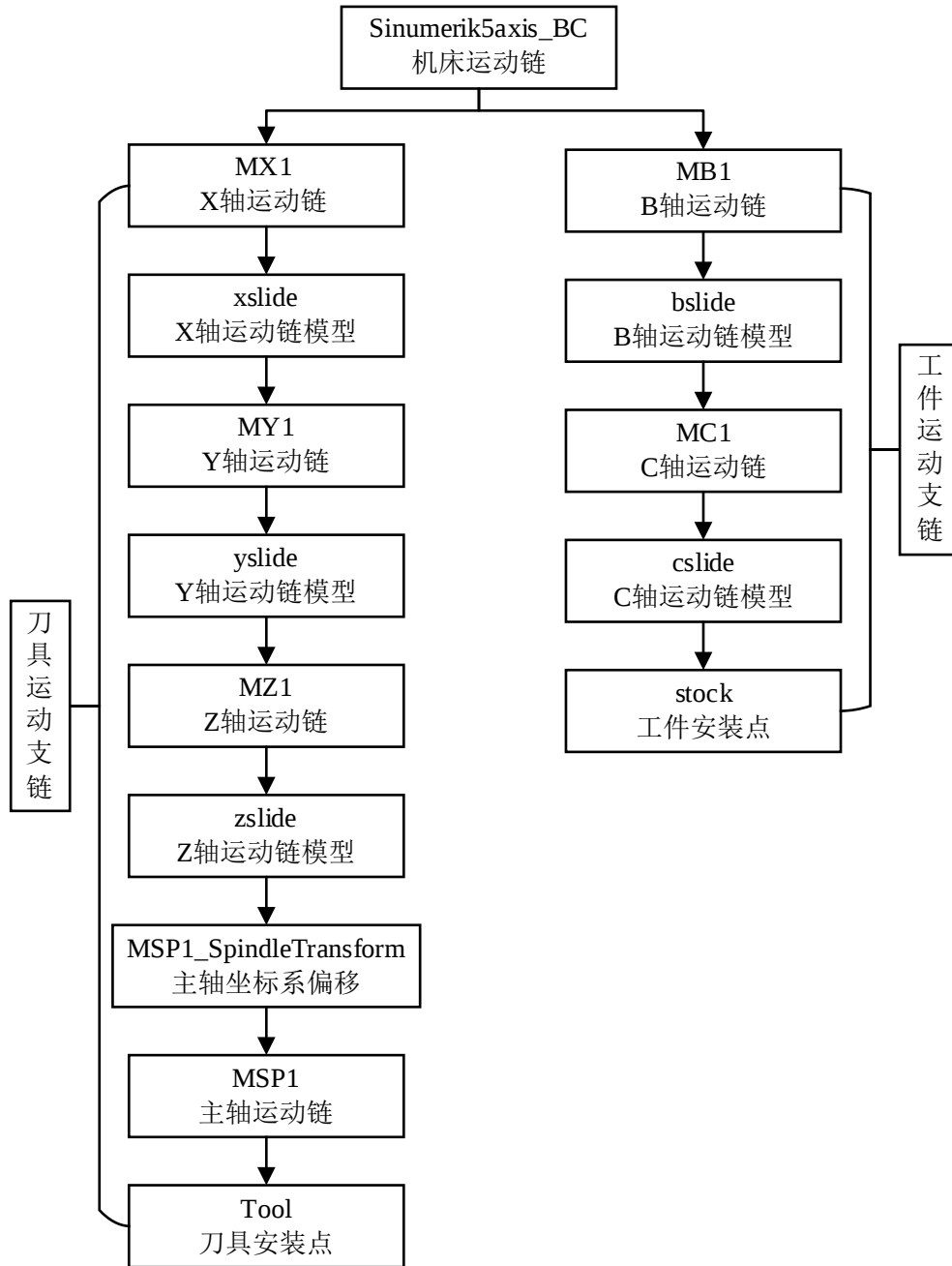


图 3-1 五轴机床运动链结构

在 BC 回转台数控机床中，由于其结构是由一系列的运动副组成的运动链，因此，其运动学计算可以通过空间运动坐标系的齐次坐标变换来实现。在这种结构的五轴数控机床中，运动变换矩阵被用于描述和计算机床各个轴之间的运动关系。

由第一条运动链，直线轴运动变换可知：直线轴（X、Y、Z）的运动变换矩阵用于描述刀具在空间中的平移运动。其齐次变换矩阵为：

$$T_{\text{trans}} = T_x(x) \cdot T_y(y) \cdot T_z(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

式中 X、Y、Z 分别表示沿 X、Y、Z 轴的平移量。

刀具长度补偿主要影响 Z 轴方向，补偿刀具长度 L。刀具长度补偿矩阵是一个平移矩阵，沿刀具轴线方向平移。因此，刀具长度补偿矩阵 T_{tool} 为：

$$T_{\text{tool}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

式中 L 为刀具长度，负号表示沿 Z 轴负方向补偿。

由第二条运动链，回转轴运动变换可知：对于 BC 回转台结构中的回转轴，包括绕 Y 轴旋转的 B 轴和绕 Z 轴旋转的 C 轴，其变换矩阵分别为：

B 轴（绕 Y 轴旋转）：

$$R_B(\theta_B) = \begin{bmatrix} \cos \theta_B & 0 & \sin \theta_B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_B & 0 & \cos \theta_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

式中， (θ_B) 为绕 Y 轴的旋转角度。

C 轴（绕 Z 轴旋转）：

$$R_C(\theta_C) = \begin{bmatrix} \cos \theta_C & -\sin \theta_C & 0 & 0 \\ \sin \theta_C & \cos \theta_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

式中， (θ_C) 为绕 Z 轴的旋转角度。

第二条运动链（旋转轴）的矩阵方程：

$$T_{rot} = R_B(\theta_B) \cdot R_C(\theta_C) = \begin{bmatrix} \cos \theta_C & -\sin \theta_C \cos \theta_B & \sin \theta_C \sin \theta_B & 0 \\ \sin \theta_C & \cos \theta_C \cos \theta_B & -\cos \theta_C \sin \theta_B & 0 \\ 0 & \sin \theta_B & \cos \theta_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

刀具在机床坐标系下的位姿是通过综合考虑直线轴和回转轴的运动变换来确定。综合运动变换矩阵可以表示为：

$$T_{global} = T_{trans} \cdot T_{rot}^{-1} \cdot T_{tool} \quad (3-6)$$

3.2 数控机床逻辑控制程序设计

3.2.1 数控机床设备组态

在博途中编写 PLC 程序时进行组态设备是至关重要的一步，因为它直接关系到 PLC 控制系统与现场设备的正确连接和通信。设备组态是指在博途中配置和定义与 PLC 通信的硬件设备、I/O 模块、执行器等外部设备。设备组态的主要目的是让 PLC 控制系统能够识别并正确控制与之连接的所有硬件设备。这个过程涵盖了硬件地址的分配、设备类型的选择和 I/O 信号的映射。

设备组态配置了硬件参数后，PLC 程序中的输入输出信号就会与实际设备的物理信号挂钩。没有正确的设备组态，PLC 程序就无法与硬件设备正确交互，导致程序无法执行预期的控制功能。因此，设备组态是 PLC 编程过程中不可或缺的一部分。精确的设备组态可以避免因硬件配置错误或设备不兼容引发的系统故障，确保整个系统运行稳定。通过设备组态，可以更直观地配置硬件系统，减少手动配置和查找硬件文档的时间，提升开发效率。配置良好的设备组态使得系统更加易于维护。故障发生时，可以通过博图中的诊断功能快速定位问题，减少维修时间。

对一台五轴数控机床进行虚拟调试时，如图 3-2 所示。首先应根据现有的硬件设备配置 CNC 控制器，其次配置 I/O 模块，如 MCP 控制面板数字输入输出模块和用于读取限位开关、模拟量信号的输入输出模块 PP72/48；当想要扩展轴功能时，还需要配置 NX 模块。

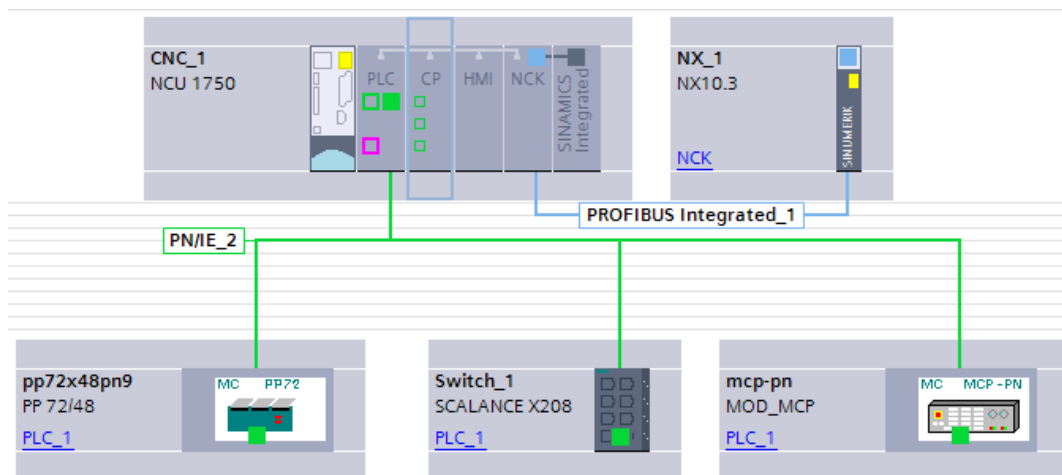


图 3-2 五轴数控机床设备组态

3.2.2 数控机床 PLC 基本程序

在 PLC 控制系统中，基本程序通过三个核心组织块（OB1、OB40、OB100）构建数据交互框架，实现与 NCK、HMI、MCP 等模块的信号传输与同步控制。ONE 系统数控机床 PLC 的基本程序结构如图 3-3 所示。操作系统根据预设触发条件主动调用组织块，用户程序 FC/FB 通过嵌套调用实现功能模块化。

OB1 主循环块作为程序执行入口，采用分层扫描机制：首层完成 NCK/PLC 接口信号交互，仅传输控制指令和关键状态信息（如运行模式、中断标志）；次层调用功能模块（FC/FB），通过参数化接口实现工艺逻辑处理。

OB40 中断事件块采用优先级抢占式处理机制：当检测到急停信号、通信超时等中断事件时，立即中断当前任务执行；通过栈结构保存现场数据，执行安全联锁程序后触发报警机制。

OB100 暖启动块在系统上电或复位时单次执行：完成 NC 与 PLC 的数据同步，通过 DB 块实现刀库位置映射等关键参数的持久化存储；调用 FC1 同步初始化程序，确保伺服轴零点校准与工艺参数配置的一致性。

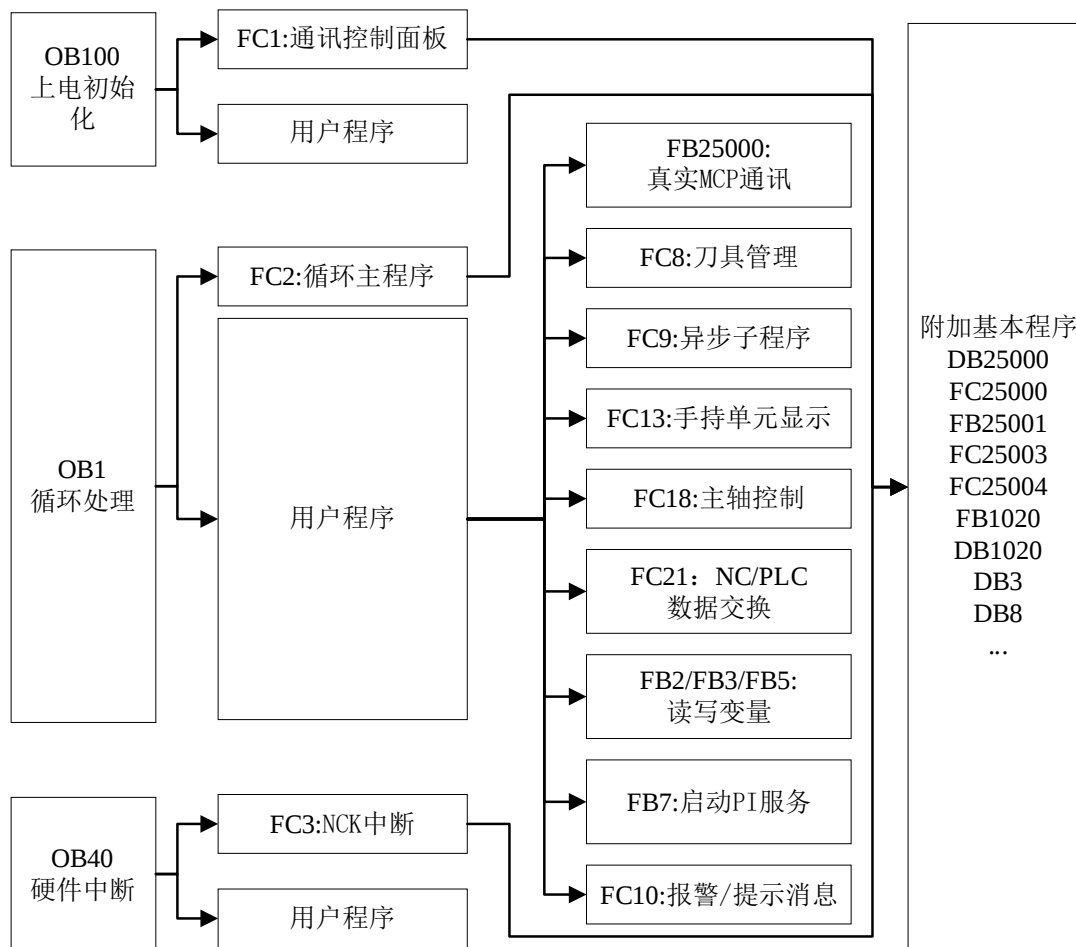


图 3-3 PLC 基本程序结构

3.2.3 数控机床凸轮机械手刀库

数控机床刀库能够依程序的控制，正确定位刀具，并进行快速换刀，从而减少换刀时间，提高生产效率。这对于批量生产和连续加工尤为重要。刀库采用智能化管理系统，可以准确记录和追踪刀具的使用情况，提供精确的刀具管理数据，确保加工过程的稳定性和准确性。不同类型的数控机床和加工工艺需要不同类型的切削刀具。刀库可以根据需求配置多种刀具，满足多样化的加工需求。刀库可以与数控机床进行联动，实现自动化的刀具更换和管理，减少人工干预和人为错误的可能性。因此对于高档数控机床而言，刀库是数控机床不可或缺的重要部件之一。

整个换刀过程的精准控制是由PLC和数控系统的换刀循环宏程序协同完成。在西门子数控系统中，PLC和NC之间需要进行大量的数据交换以实现机床的精确控制。包括机床状态信息、刀具信息、加工参数等多种类型的数据。对于刀库

而言，PLC 和 NC 之间的数据交换尤为关键，因为它直接关系到刀具的精确定位和快速更换。

西门子数控系统中存在高速数据交换区，这是 PLC 和 NC 共享的一块内存区域。双方可以通过这个区域进行数据的写入和读取。在刀库管理中，PLC 可以将刀具的位置信息、状态信息等写入高速数据交换区，而 NC 则可以从这个区域读取这些信息以控制刀具的更换和定位。

西门子数控系统提供了一系列系统变量和函数用于数据交换和处理。在宏程序中，可以通过调用系统变量和函数来实现与 PLC 和 NC 之间的数据交换。在进行刀库宏程序编写时，需要充分考虑到 PLC 和 NC 之间的数据交换需求。需要编写合适的代码来读取和写入高速数据交换区中的数据，并确保数据的准确性和实时性。

凸轮机械手刀库换刀流程如图 3-4 所示^[52-54]。当数控系统执行 TXX 指令时，NCK 触发刀位检索功能，将目标刀具号传输至 PLC 的刀位存储数据块。PLC 根据接收到的刀具号，控制刀盘电机进行分度，使刀库旋转至目标刀套位置。在刀库旋转过程中，采用最短路径算法（正转或反转）优化旋转方向，确保刀具快速、精准定位。刀具检索完成后，PLC 更新刀库状态，HMI 界面同步显示目标刀具位置，为后续换刀做好准备。

当数控系统执行 M6 指令时，系统调用 L6 换刀宏程序，并按以下逻辑执行换刀流程：

- （1）若目标刀具已在主轴上，则跳过换刀，直接继续加工；
- （2）若目标刀具存放在刀库中，则启动换刀流程；
- （3）若当前主轴上装有刀具（非 0 号刀），则执行卸刀操作，将主轴刀具归还至刀库空位；
- （4）若目标刀具既不在刀库，也不在主轴上，系统将触发报警，提示“刀具缺失”，并暂停加工流程。

当刀具正常存放于刀库且符合换刀条件时，系统首先控制 Z 轴移动至预设的换刀安全位置。当换刀刀套到达指定位置后，PLC 启动刀库门开启动作。待刀库门完全打开，PLC 控制刀套回转 90°，使其进入换刀姿态，为正式换刀做好准备。

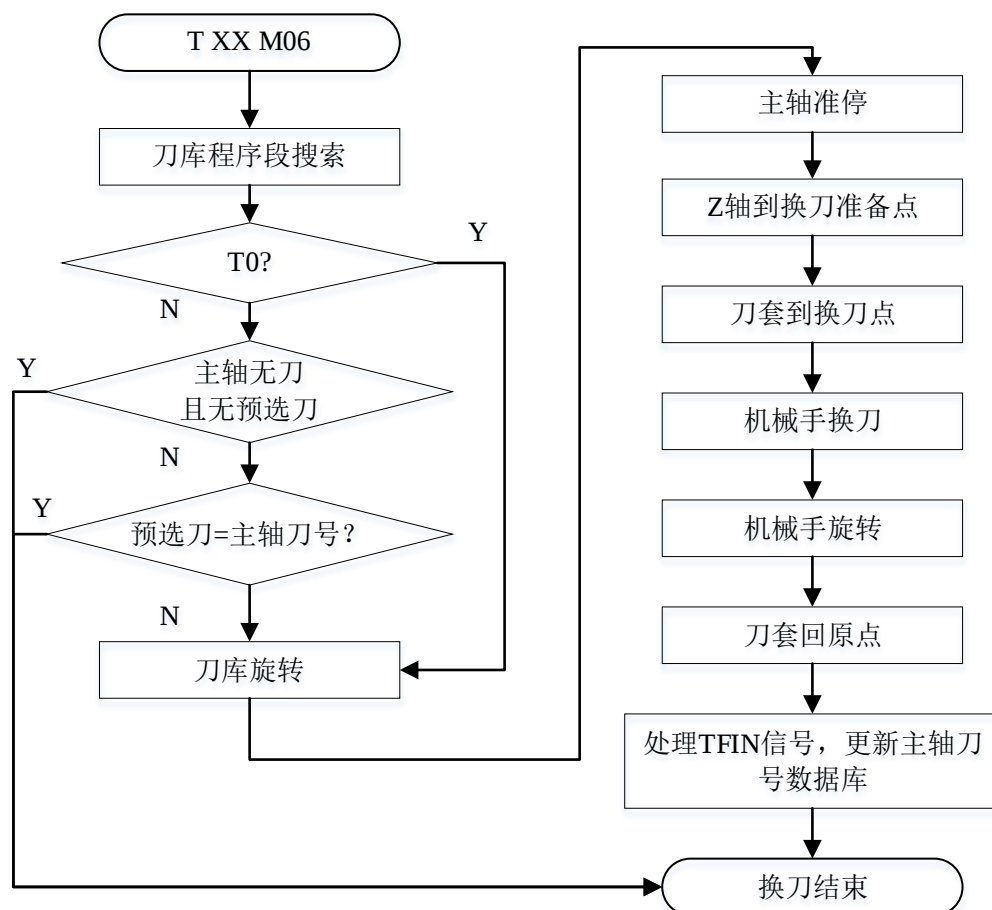


图 3-4 凸轮机械手刀库换刀流程

当刀库上的刀具完成 90° 翻转动作后, 机械手爪会分别夹持刀套上的刀具和主轴上的刀具。机械手完成夹刀动作后, PLC 会控制刀套和主轴上的刀具同时松开。机械手手臂通过机械凸轮机构向下伸出, 将刀库和主轴上的刀具同时取出, 完成卸刀动作。

卸刀完成后, 机械手手臂通过机械凸轮机构旋转 180° , 进行刀库侧和主轴侧的刀具互换。机械手手臂通过机械凸轮机构向上缩回, 将刀具同时装入刀套和主轴, 并夹紧。机械手再通过机械凸轮机构反向旋转, 回到起始位置, 完成换刀动作。

NCK 接收 PLC 反馈的换刀完成信号, 结束 M6 换刀宏程序, Z 轴就可以向下运动进行正常加工。主轴上换下的刀具连同刀套旋转至原点, 同时, PLC 存储当前刀库信息, 标志着换刀过程的完成。

3.2.4 辅助功能 M 代码

M 代码是一种在程序中编写的指令，用于控制与运动控制无关的设备开关或非机械性操作。通过执行特定的 M 代码，可以实现与运动轨迹无直接关系的操作，通常用于控制机床的外部设备或内部辅助系统。包括与加工过程相关的非机械性任务，如冷却液的开启与关闭、主轴的启停、换刀操作等^[55]。

在西门子 SINUMERIK ONE 数控系统中，M 代码可以通过 PLC 与外部设备直接进行交互，M 代码触发需要 PLC 的辅助控制。例如，执行换刀操作时，M06 指令会启动换刀过程，但实际的换刀动作需要 PLC 与伺服控制器或气动系统协同工作才能完成。换刀、冷却液、夹具等设备的控制逻辑和状态变更由 PLC 负责管理，而数控系统则通过 M 代码与 PLC 进行交互，从而实现这些功能的顺利执行。

随着智能制造技术的不断发展，数控机床的智能化水平显著提升，且其外围设备的配置愈加丰富，涵盖了夹具系统、机器人通信接口、自动化门控等多种附加功能。随着这些功能的增加，PLC 程序的控制逻辑面临更高的要求，需要处理大量特定的 M 代码指令，以实现复杂动作的精准协调。

以数控机床和外部设备机器人为例，数控机床和机器人各自的 PLC I/O 地址不仅用于控制自身的动作，还涉及彼此之间的数据交换。通过交换 I/O 数据，数控机床能够向机器人发送控制指令，并接收机器人执行完毕后的反馈信号。

数控机床通过 M 代码等方式输出请求信号，将输出信号设置为 TRUE，进而使 PLC 模块的输出端发出 DC24V 信号。当机器人的 PLC 模块接收到该电信号后，它会根据预设的控制逻辑，调整机器人的伺服电机进行位置控制。当机器人完成一系列操作后，机器人的 PLC 模块会发出 DC24V 信号传递给数控机床的 PLC 模块输入端。接着，数控机床完成下一个动作后，再向机器人发出控制信号，机器人则继续执行相应操作。如此循环往复，形成一个协调的控制过程，如图 3-5 所示。



图 3-5 数控机床与外部设备通信

3.3 五轴数控系统参数调试

数控机床的 NC 参数是确保其高效稳定运行的基础环节，鉴于各类机械结构如数控加工中心与车铣复合加工中心之间，不仅在命名上有所区分，更在核心层面如机床参考坐标系设定、复杂机械构造、专属电气控制架构以及独特的数控机床运动学模型等方面展现出显著差异。因此，深入掌握并实践调试 NC 参数显得尤为关键。

在调试五轴数控机床时，需要设定大量的参数，主要参数如图 3-6 所示。因为五轴机床的复杂性和多功能性，调试过程中的参数设定对于确保机床的精度、稳定性和安全性至关重要。

五轴数控机床涉及多个轴的协调工作，通常包括 3 个线性轴和 2 个旋转轴。为了实现精确加工，需要对每个轴单独设定参数，如轴名称、转速、限位等，并确保各轴之间的运动能够协调一致、顺畅无阻。

此外，五轴机床通常配备自动换刀系统，因此刀具管理显得尤为重要。不同刀具的尺寸、类型、位置等信息需要提前设定，确保刀库能够正常运行，且机床能够在加工过程中准确选择并使用合适的刀具。

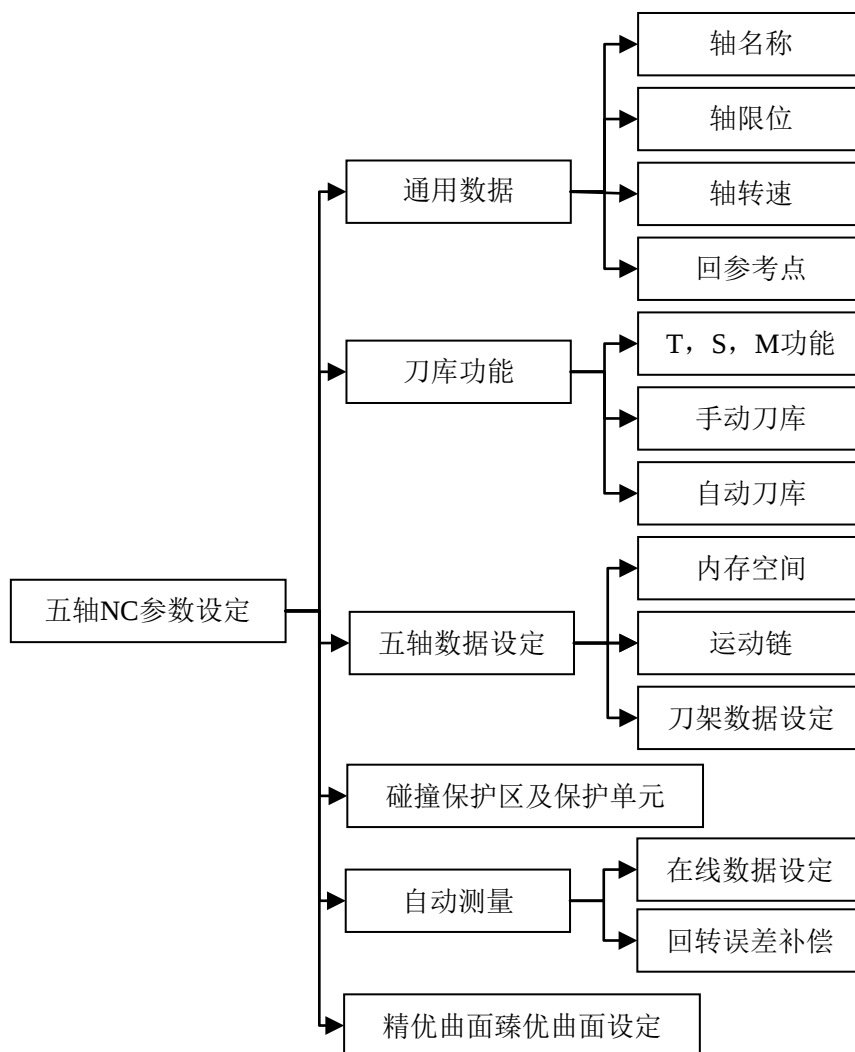


图 3-6 五轴 NC 参数结构

在 SINUMERIK ONE 数控系统中，需要定义与机床机械结构一致的模型运动链，以准确描述机床各个轴的协同运动。通过建立运动链，可以实现对五轴定向加工和五轴联动加工的精确控制。运动链的设定不仅是数控系统中最基本的参数配置，也是保证机床能够根据复杂的加工要求进行精确操作的核心。

五轴定向加工涉及到每个轴独立的控制，而五轴联动加工则要求多个轴同时协作、进行复杂路径的联动。因此，正确的运动链配置和五轴数据设定至关重要，确保机床的每一个动作都能按预期执行，避免因参数设定不当导致的加工误差或不稳定性。

在数控机床的运行过程中，确保机器和工件的安全始终是首要的考虑因素。为了有效防止可能的误操作或设备故障，应设定“碰撞保护区”和“保护单元”等保护机制。在机床运行时提供实时监控和保护，帮助预防不必要的碰撞事故，

降低设备损坏的风险，同时也能最大程度地减少操作人员可能遭受的伤害。

五轴加工要求极高的精度，因此需要设置回转误差补偿、臻优曲面、精优曲面优化等功能，来补偿由于机床误差或外部物理因素引起的加工偏差，从而确保加工结果的精确性。

此外，自动测量功能可以获取和分析加工过程中的关键数据，如工件的尺寸、位置误差及加工精度等，并将这些数据反馈到数控系统中，系统能够及时进行修正，确保加工精度。

3.3.1 旋转刀具中心点的加工功能

现代高端数控系统领域迎来了技术革新，其中 RTCP（Rotated Tool Center Point，即旋转刀具中心点）技术的开发与应用尤为瞩目。RTCP，通常也被业界形象地称为“刀尖点跟随功能”，它巧妙地解决了刀具在多维空间中的位置偏移问题，确保刀具的实际切削点能够精准地追踪预定的加工轨迹。这一技术的引入，不仅提升了加工过程的稳定性和精度，更成为区分“真五轴”与“假五轴”数控机床的重要标志之一，彰显了机床在复杂曲面加工领域的卓越能力。

在五轴加工技术中，RTCP 功能允许数控系统直接控制刀尖点的运动轨迹，而不是传统的控制主轴鼻端。如图 3-7 所示。在加工过程中，由于工件和刀具的复杂姿态和运动，数控系统需要精确控制刀具的轨迹和姿态。通过实时补偿由于刀柄转动所造成的刀具中心点各直线坐标的偏移，以保持刀具中心点以及刀具和工件表面实际接触点不变，从而改变刀柄与刀具和工件表面实际接触点处的法线之间的夹角，达到发挥刀具的最佳切削效率并有效避让干涉等目的。

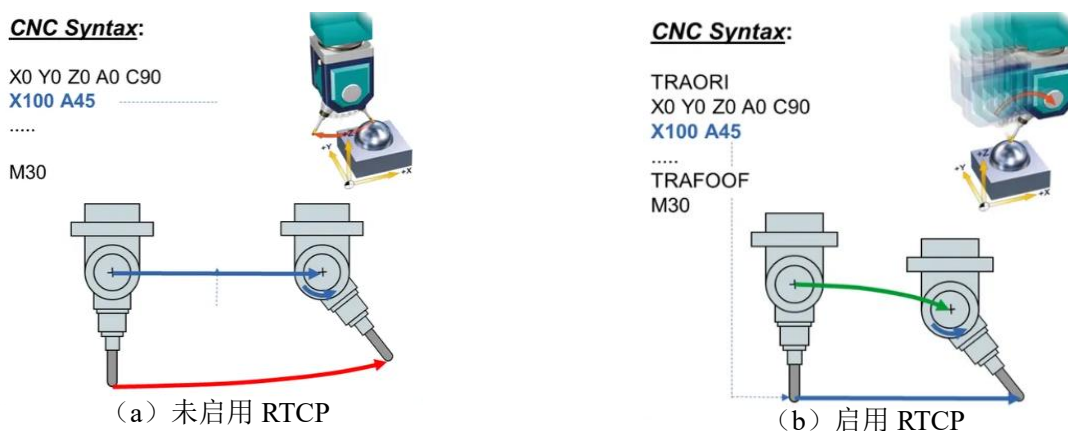


图 3-7 真假五轴联动的区别

要深入理解 RTCP 的功能，首先需明晰五轴数控机床中第四轴（B 轴）与第五轴（C 轴）的独特构造与相互关系。在典型的双回转工作台结构中，C 轴作为次级旋转轴，其运动机制紧密依赖于 B 轴（主旋转轴）的运动，意味着 B 轴的任何旋转动作都将直接塑造 C 轴的运动姿态，而 C 轴的转动则无法逆向影响 B 轴的状态。

当工件被稳妥安置于 C 轴转台上，B 轴的旋转不仅驱动着整个转台系统的转动，还间接地调整了工件相对于刀具的空间位置。这一动态变化，直接关联到直线轴（X、Y、Z）的编程与操作，因为刀具中心对工件的切削路径需随之调整，以维持精确的加工轨迹。然而，这种旋转带来的坐标变换往往伴随着复杂的位移计算，要求机床系统能够实时、准确地补偿这些由旋转引起的相对位置变动。

在多轴联动数控加工系统中，转动角度的改变会引起旋转坐标系与直线轴坐标系的动态偏移，因此精确确定旋转轴的真实基准点位置对保障加工精度具有关键作用。以典型双转台五轴联动机床为例，其第五轴(C 轴)的运动控制基准通常设定在工作台圆心回转中心线处，而第四轴运动控制基准则是第四轴旋转轴线与第五轴回转轴线的交汇点作为特征控制点。为实现五轴协同控制，数控系统必须建立两个旋转轴控制点之间的空间位置关系：当 B 轴和 C 轴处于零位位置时，需明确第四轴旋转坐标系的原点位置及其相对于第五轴的空间几何约束，同时还需掌握 B 轴轴线与 C 轴轴线之间的最小距离参数，该参数直接影响多轴联动控制的轨迹规划与奇异点规避策略。

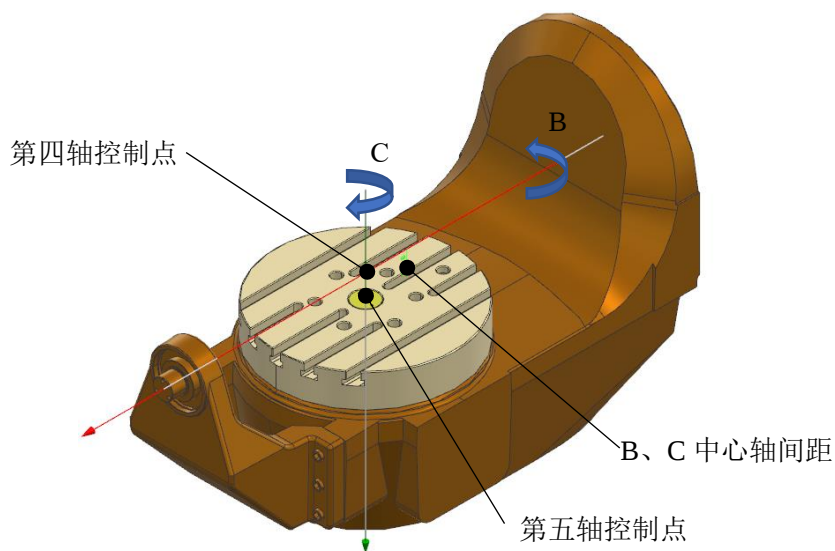


图 3-8 转台式五轴数控机床两回转轴

3.3.2 RTCP 动态误差补偿的原理分析

机床的精密性受到多方面因素的深刻影响,包括其各个构成部件的加工精度与装配精度的细微差异,以及长期服役后不可避免的磨损现象,这些共同构成了机床的结构误差根源。此外,数控系统的核心控制精度、伺服系统对指令的即时响应速度,以及反馈系统的精确性,均直接关联到机床在执行复杂加工任务时的运动精度。在机床以高速运转状态下,惯性力和摩擦力等动态效应显著增强,成为引发额外误差的重要因素。

根据机床结构可知机床零点分别是旋转 B 轴和 C 轴的回转中心的名义尺寸。受装配误差的影响,旋转轴 B 轴和 C 轴的回转中心轴线必为两条空间异面的正交直线,且存在偏差值。只有将这些名义尺寸和偏差值进行标定,以参数的形式补偿到数控系统中,数控系统才能明确刀尖点在机床坐标系下的位置和刀轴矢量,数控程序的指令位置才能经过数控系统内部坐标变换,准确地被转化为直线轴和旋转轴运动,从而保证五轴联动机床的动态精度。由 X 和 Y 两个方向视图表示机床零点到旋转轴 B 轴和 C 轴的回转中心的距离、两个旋转轴之间的位置偏差等位置矢量关系,如图 3-9 和 3-10 所示。

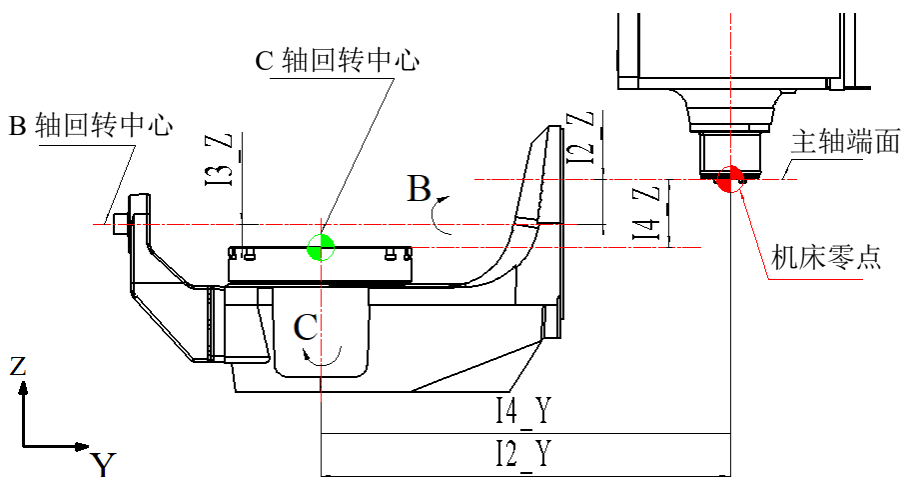


图 3-9 X 方向回转轴位置矢量关系

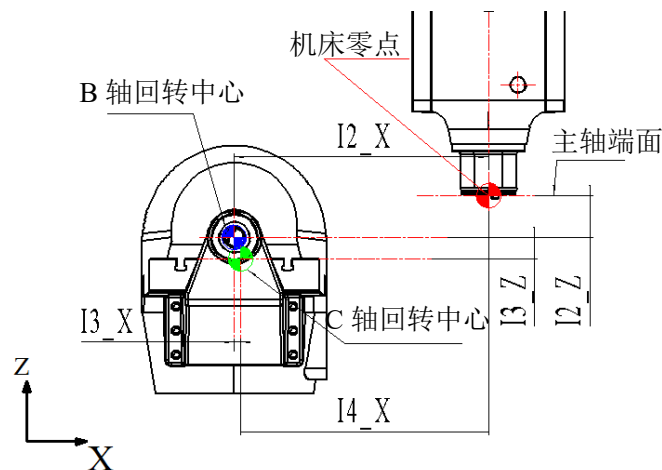


图 3-10 Y 方向回转轴位置矢量关系

I_2 代表机床参考点至第一回转轴旋转中心的直线距离；而 I_3 则代表从第一回转轴旋转中心至第二回转轴旋转中心的直线距离。 I_4 作为闭合矢量链，确保从机床参考点出发，经过两个回转轴后，能够以逻辑上闭合的方式回到起始点，其值等于 $-(I_2+I_3)$ 。

数控系统中，偏移矢量 I_2 至 I_4 的设定是基于回转轴处于未旋转的初始状态（即机床运动的起始位置）。偏移矢量的计算方式因回转轴结构的差异而异，但这些矢量始终紧密关联于机床的基本坐标轴（X、Y、Z），作为定位与运动的基准。

3.4 数控机床人机交互界面设计

西门子数控系统已经提供了强大且功能丰富的人机交互界面（HMI），但进行二次开发仍然有其必要性和优势^[56]。不同的用户和行业有不同的操作习惯和需求，通过二次开发，可以根据具体的应用场景和用户需求，定制专用的界面和功能，提高操作效率和用户体验。一些机床制造商或用户可能需要集成特定的功能模块，这些模块可能不在标准 HMI 中提供。二次开发可以将这些功能无缝集成到现有系统中。通过开发特定的界面和功能，机床制造商可以在市场上提供差异化的产品，增强产品竞争力。

数控机床的人机界面（HMI）可以分为软件 HMI 和硬件 HMI。设计符合人类需求和特点的“机”是人机界面设计的重要问题。常用的开发语言包括 Run MyScreens（Easy Screen）、Easy XML、Create MyHMI/PRO 和 Create MyHMI/3GL

等。其特点见表 3-2 所示。

表 3-2 ONE 数控系统界面开发方式

序号	开发方式	优点	缺点
1	Run MyScreens	Easy Screen 采用 ASCII 文件配置的方式进行编写, 用户可以使用 Notepad (记事本), 无需特殊软件, 降低了开发门槛。	某些复杂的交互逻辑或动画效果无法实现或需要额外的开发工作。
2	Easy XML	与 Easy Screen 相比, Easy XML 在代码量和变量灵活性方面更具优势。	代码量稍大, 逻辑更复杂, 门槛稍高, 较趋近于前端开发编程。
3	Create MyHMI/ PRO	简单, 易于学习, 功能模块化(拖拽和属性调整)提供了丰富的图形界面设计工具, 支持多种通信协议, 易于与 PLC 和 NC 系统集成。	开发软件收费, 插件包收费, 功能扩展性受到一定限制。
4	Create My HMI/3GL	编译型语言, 运行速度快, 适合高性能需求的应用。	开发软件收费, 插件包收费, 语法复杂, 由于需要编写更多的代码和进行优化, 开发周期相对较长。

综合比较来看, Easy Screen 通用性强, 实现成本低, 所以选用 Easy Screen 进行人机交互界面开发。采用西门子 Easy Screen 开发方式进行二次开发人机交互界面, 需要关注于其配置文件, 因其所有启动画面位置和编程文件都在配置文件中定义, 不同配置文件所起作用也不同。

对于采用 Easy Screen 进行二次开发主要有 ini 后缀文件和 com 后缀文件。easyscreens.ini 配置文件的主要功能是作为二次开发中配置启动文件, 比如用户需要在加工界面、诊断界面或设置界面不同位置进行启用自己所开发的画面; slamconfig.ini 配置文件的主要功能是作为启用文件入口按钮及按键图片相关状态; custom.ini 配置文件的主要功能是作为按下启用按钮后的启动显示画面, 设定启示标题及图片; com 后缀文件的主要功能是启动文件中针对数控系统进行二次开发的所有功能, 比如定义变量、读取或写入数控系统参数、监控系统状态和 PLC 控制逻辑交互等。

西门子数控系统对于 Easy Screen 二次开发, 每项配置文件放置的位置也有要求, 配置文件放置路径见表 3-3 所示。在 SINUMERIK 数据文件夹(系统 CF 卡)下有[oem]、[siemens]、[user]三个文件目录主要存放二次开发配置文件, 根据优先级原则[siemens]目录作为保存西门子系统软件预留配置文件为最低等级;

[oem]目录作为保存机床制造商的配置文件比[siemens]目录高一级；[user]目录作为用户所使用的开发放置路径享有最高等级，在配置文件相同的情况下优先将其作为启动文件。

表 3-3 二次开发配置文件路径

项目文件	功能	文件路径
ini 配置文件	描述用户界面嵌入 Operate 界面的位置，嵌入的方式以及相关的功能定义	[主路径]/user/sinumerik/hmi/cfg
com 配置文件	软键定义、界面布局、显示元素以及实现的具体功能	[主路径]/user/sinumerik/hmi/proj
图片文件	用户想要在界面中显示的图片	[主路径]/user/sinumerik/hmi/icoxxx
帮助文件	可在特定的窗口中通过内容或关键词目录调用所搜索的主题。	[主路径]/user/sinumerik/hmi/hlp

3.4.1 全/半闭环控制模式切换界面开发

在数控机床驱动控制系统中使用光栅尺高精度位置检测器，实时反馈机床的实际位置，并进行误差补偿的方式称为全闭环控制系统（即第二测量系统）；使用安装在伺服电机上的编码器进行位置反馈，间接检测机床位置的方式称为半闭环控制系统（即第一测量系统）。

全闭环模式适用于高精度和高稳定性的加工需求，如航空航天和精密模具等领域。而半闭环模式则适用于中低精度、成本敏感的加工场景，如一般机械加工和小型工厂等。通过切换界面，用户可以根据实际加工需求选择合适的控制模式，优化加工效率和成本。切换界面使数控机床更加灵活，能够应对不同的加工任务，满足多样化的生产需求。

这种灵活性对于中小型企业 and 多品种小批量生产的工厂尤为重要。在某些高精度加工任务中，全闭环模式能够发挥最大的性能优势，但在不需要极高精度的加工任务中使用全闭环模式可能会导致资源浪费。在不影响加工质量的前提下，选择合适的控制模式可以节约成本并提高资源利用效率。

通过用户开发界面测量系统按钮，即 CUSTOM 按键进入用户自己二次开发的人机交互界面，从初始界面左上角标题中可以看到提示信息为测量系统监控于切换，整个页面用来显示测量系统原理图，如图 3-11 所示。最下面水平行分别显示进入监控当前参数状态、切换半闭环和全闭环画面的三个按钮。通过点击不同按钮进入不同画面。

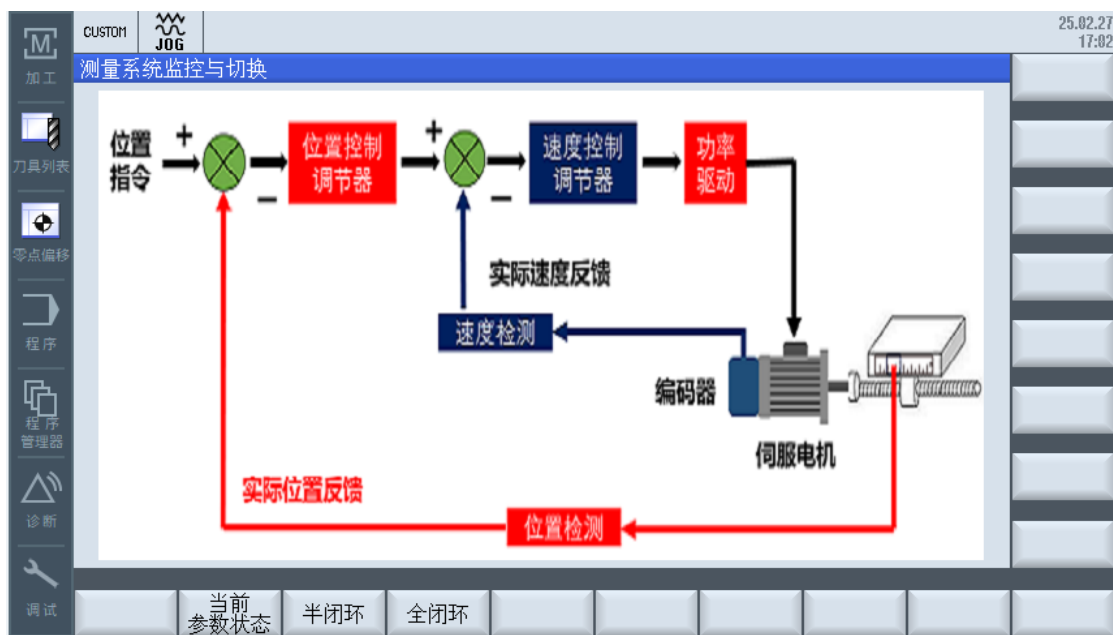


图 3-11 用户自定义初始界面

(1) 全/半闭环切换数据

西门子数控系统全/半闭环功能切换主要由系统的轴机床数据和 PLC 接口信号共同辅助完成。

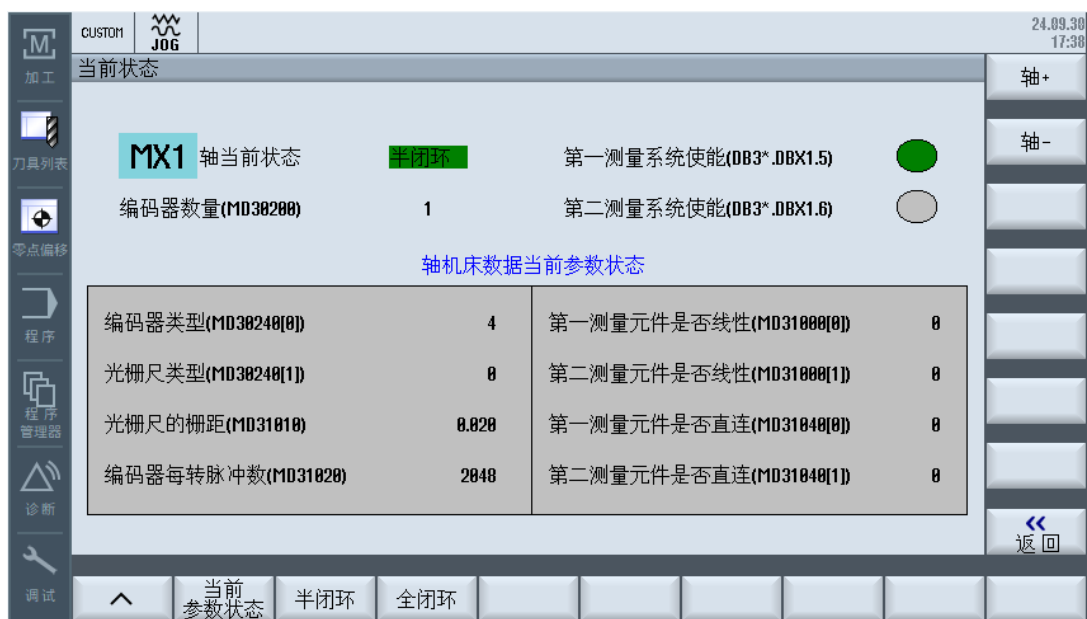


图 3-12 当前参数状态

当前参数状态界面如图 3-12 所示，由左上角标题和页面中相关信息可以监控数控机床当前轴的状态。已列出半闭环和全闭环需要更改轴机床数据的参数信息，其中轴机床数据后面的标识符[0]表示当前第一测量系统运行时所执行数据信息，标识符[1]表示第二测量系统运行时所执行的数据信息。没有标识符的属于

公共信息数据。

编码器的数量为 1 时表示当前轴使用电机编码器作为位置反馈;编码器数量为 2 时表示当前轴使用光栅尺作为位置反馈。轴机床数据 MD30240 标识符[0-1] 分别设置编码器和光栅尺类型,是增量式编码器还是绝对式编码器运动方式。

编码器的每转脉冲数是指编码器在旋转一圈时输出的脉冲数,直接影响编码器的分辨率和精度。2048 每转脉冲数是一个常见的标准值,便于与各种控制系统和驱动器兼容。

光栅尺的栅距是指光栅尺上相邻两条刻线之间的距离,它是光栅尺的一个重要参数,直接影响测量的精度和分辨率。应根据真实光栅尺数据进行更改以提供精确的位置信息,确保加工过程的稳定性和精度。

在数控系统中,当轴机床数据状态为第一测量元件是否线性(MD31000)为 0 时,表示检测实际位置信息使用的是旋转编码器;当轴机床数据状态为第二测量元件是否线性(MD31000)为 1 时,表示检测实际位置信息使用的是线性编码器(光栅尺)。当轴机床数据状态为第一测量元件是否直连(MD31040)为 0 时,表示检测实际位置的编码器安装在电机上,此时在编码器计算中需要考虑负载齿轮箱的分子分母的比值;当轴机床数据状态为第二测量元件是否直连(MD31040)为 1 时,表示检测实际位置的编码器直接安装在机床上(无中间齿轮单元)。

(2) 全闭环控制

全/半闭环状态的切换除了需要更改轴相关的机床数据外,还应将各轴的 PLC 逻辑控制程序与之关联,以确保通过界面控制时,轴机床数据的更改能够同步调整第一测量系统和第二测量系统的信号切换。

如果同时使用两种反馈机制,控制系统会收到来自不同位置的反馈信号,这会导致无法确定哪个信号更为准确,从而引发控制冲突和误差。由于两种控制逻辑的目标和调整方式不同,混合使用会导致系统无法正常工作,甚至可能引发振荡和不稳定的问题。

全闭环控制系统在数控机床中是实现高精度控制的一种方式。通过实时监测和调节执行机构的实际位置与指令位置之间的偏差,确保系统的精度和稳定性,其原理如图 3-13 所示。其依赖高精度光栅尺提供实时反馈,并通过控制器进行精确调整。

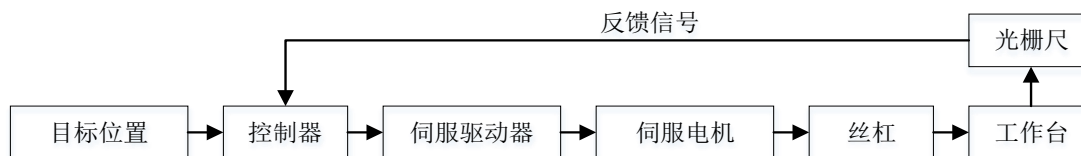


图 3-13 全闭环原理图

全闭环控制系统通过实时反馈和调整，能有效消除机械误差及其他偏差，达到高精度加工的目的。该系统可抑制外部扰动和系统内部变化的影响，确保加工过程的稳定性。通过反馈机制，精确控制加工过程中的每个细节，从而提高加工质量。

（3）半闭环控制

半闭环控制系统是数控机床中常见的一种控制方式。它利用安装在伺服电机上的编码器来监测和反馈机床运动部件的位置，但不对实际工作台或刀具的位置进行监测，其原理如图 3-14 所示。

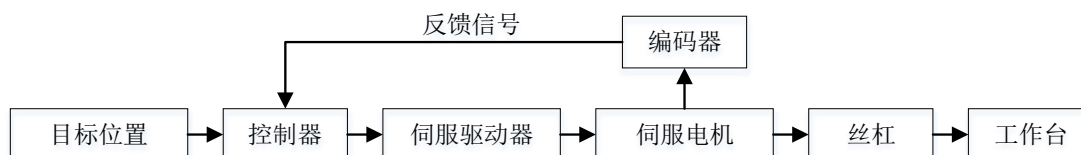


图 3-14 半闭环原理图

半闭环系统不需要高精度的工作台位置传感器，因此成本较低。系统结构相对简单，安装和维护也更加方便。由伺服电机上的编码器间接反馈工作台的位置，响应速度较快。然而，由于未能直接反馈工作台或刀具的实际位置，控制精度受机械传动误差的影响较大。半闭环系统难以满足对极高定位精度要求的加工场景。此外，机械传动系统的磨损会影响加工精度，因此需要定期维护。

（4）全/半闭环切换界面设计

在全/半闭环切换界面设计中，需要实现功能：全/半闭环的切换及相关数据的显示。通过将 HMI 变量与机床数据、PLC 变量进行关联，采用不同轴的切换方式实现控制模式的变更。如图 3-15 所示为半闭环已切换成全闭环界面，但由于是在虚拟环境中开发界面，无法对第二测量系统进行调试，故数控系统报警提示 26106 报警号机床各轴编码器 2 没找到。在全闭环界面中通过“轴+”、“轴-”切换轴的当前状态再分别点击接受数据方能实现全/半闭环数控系统参数的一键更改，不过对于数控系统测量系统切换后，必须关机重启方能使所有数据生效。

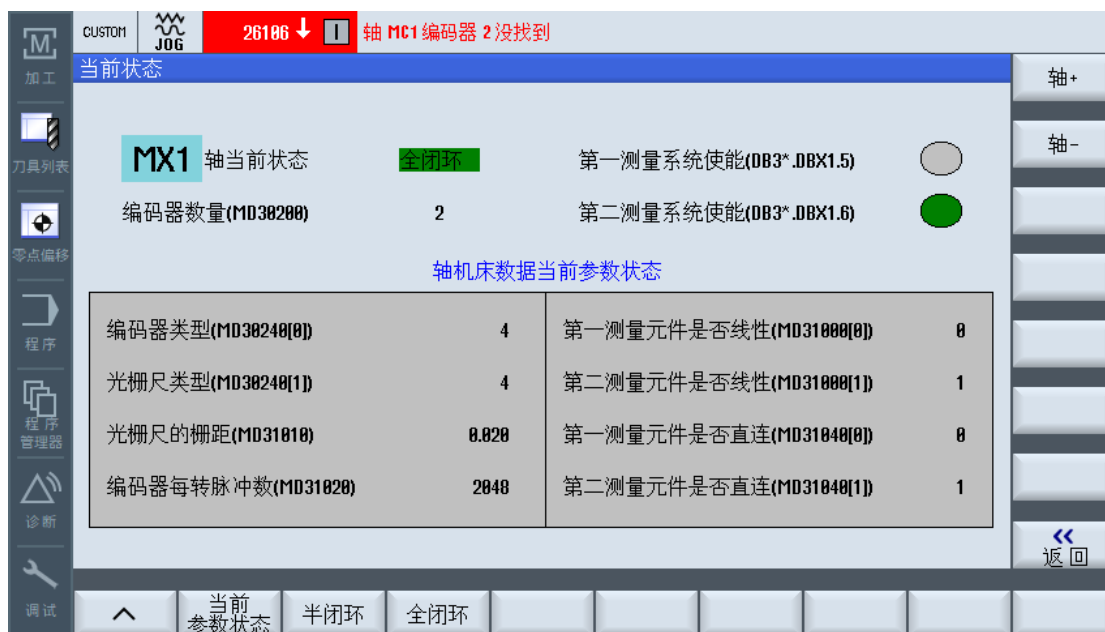


图 3-15 全/半闭环的切换

3.4.2 扩展屏按键开发

西门子提供的 MCP (Machine Control Panel) 控制面板种类多样, 比如常见的有 MCP398 系列、MCP483 系列和 MCP310 系列, 这些控制面板广泛应用于各种机床设备和工业自动化领域。针对于 ONE 数控系统西门子提供了最新的 MCP1500 系列、MCP1900 系列、MCP2200 和 MCP2400 系列控制面板, 此系列在主轴倍率和进给倍率旋钮上进行改进, 把无限增量旋转的倍率开关与程序启动按键结合在一起的 SINUMERIK Powerride, 除此之外还可以通过编程灵活改变倍率开关对应的指示颜色与震动方式, 可进一步提升操作员的操作体验。

在图 3-16 所展示的 MCP1500 系列控制面板, 其布局从左至右排布依次为紧急停止按钮, 方式组按键排, 灵活切换机床运行模式; 轴控制按键排, 精准操控各轴运动; 以及主轴进给倍率控制旋钮, 实现加工速度和进给的即时调节。此外, 控制面板底部还设有钥匙开关和六个预留的扩展按键区域。

鉴于现代数控机床日益复杂的加工需求与多样化的辅助功能, 仅依靠 MCP1500 控制面板的标配功能已难以满足高效、精准的生产要求。因此, 进行二次开发扩展屏及按键, 将其定制化为特定的加工辅助功能, 成为了提升机床综合性能、优化操作流程、增强加工灵活性的重要途径。



图 3-16 西门子 1500MCP 系列控制面板

西门子 ONE 系统通过集成 Easy XML 界面开发框架，为机床扩展屏功能提供工业级人机交互解决方案^[57]。Easy XML 采用与 Easy Screen 界面开发相近的 DOM 树渲染机制，支持实现等同的界面元素响应速度与动态刷新效果（如实时坐标显示、报警状态监控等核心功能模块），但通过 XML 验证机制强化了界面结构的规范性。开发者可通过 XML 模板引擎快速生成基础界面框架，配合 SINUMERIK Edge 架构实现界面布局与业务逻辑解耦、支持通过 XSLT 转换实现多分辨率适配。

XML 元素基于标准标签结构实现定义，每组元素均严格遵循起始标签与闭合标签的语法规则。相较于 Easy Screen 技术，XML 开发模式在代码复杂度方面有所提升，但其变量控制机制更为灵活，支持条件判断、循环结构以及多层级逻辑嵌套，能够实现更复杂的界面交互功能。该技术面向具备界面开发经验的用户群体，其学习曲线趋近于前端编程范式，需掌握基础标签语法及事件驱动原理，但系统内嵌预置的应用框架及标准化语法规则，可大幅降低开发者的适配难度。

从实现机制来看，XML 界面开发主要依托结构化的配置文件（如 `slsidescreenmcpageconfig.xml`），基于预定义的文件命名规则解析入口界面。开发者可通过调用底层 API 接口和算法模块，深度定制工艺应用功能，例如：支持用户自定义循环逻辑实现生成加工程序的动态界面开发；具备响应式布局能力，可依据不同显示分辨率自动调整窗口尺寸；集成多语言数据库接口，通过标签属性动态调用对应语种的文本资源。此外，系统提供标准化的扩展接口，允许开发者融合自定义控件与系统原生组件，构建符合工业场景需求的人机交互体系。

根据西门子数控系统二次开发技术文档，slsidescreen.ini 作为边屏扩展功能的核心配置文件，承担着界面布局初始化与功能模块调度的关键作用。该文件通过预定义标签实现以下技术特性：

(1) 支持在边屏界面集成多类型工业数据组件，包括：实时坐标监控模块（widget 简约坐标值）、零点位置动态显示系统、复合型报警信息面板和 NC/PLC 变量交互式展示层等。开发者可通过修改 slsidescreen.ini 文件实现页面堆栈管理，例如虚拟键盘组件只需声明 name 与 implementation 参数即可完成挂载。

(2) 辅助资源协同架构：PNG 格式图片支持高保真设备状态渲染，HLP 帮助文件提供上下文敏感型操作指引，TS 语言文件实现多语言数据库动态映射，与 XML 界面元素形成双向绑定关系。

(3) 系统采用三级目录隔离策略，标准配置文件存放于 /siemens/sinumerik/hmi/cfg，制造商开发人员需将定制文件部署至 /oem 或 /user 同级目录以保持系统升级兼容性。XML 主功能文件需遵循 /template/sidescreen 框架规范进行组件化开发。相关配置文件路径见表 3-4。

表 3-4 二次开发配置文件路径

项目文件	功能	文件路径
ini 配置文件	描述边屏嵌入 Operate 界面的位置，嵌入的方式以及相关的功能定义	[主路径]/oem/sinumerik/hmi/cfg
图片文件	制造商想要在界面中显示的图片	[主路径]/oem/sinumerik/hmi/icoxxx
帮助文件	可在特定的窗口中通过内容或关键词目录调用所搜索的主题	[主路径]/oem/sinumerik/hmi/hlp
语言文件	针对不同国家用户使用不同的语言，以方便用户识别	[主路径]/oem/sinumerik/hmi/lng
XML 边屏配置文件	采用 XML 语言编写扩展按键相关功能	[主路径]/oem/sinumerik/hmi/proj

slsidescreen 模块采用动态折叠式交互设计，通过响应式布局引擎实现以下技术创新：

(1) 空间优化体系：支持双向展开/折叠触控模式(如图 3-17a)，在保持 200ms 级响应速度的同时，可垂直/水平滑动查看多维度数据。基于 Widgets 微件组件库构建的紧凑型边屏界面、实时加工坐标系的矩阵式可视化呈现、多通道报警信息的树状分层显示。

(2) 虚拟化人机接口：(如图 3-17b) 所示，系统通过 HMI 组件复用技术实

现硬件替代方案，将传统 MCP 机械按键转化为可编程虚拟面板，支持通过标签定义触控热区与压力反馈，集成手势识别引擎（双指缩放/滑动翻页）。

（3）功能扩展架构：针对 MCP1500 控制面板的物理限制（图 3-17c），开发框架提供开放式辅助功能接口，可绑定 PLC 信号的动态功能按钮组，基于 XML 事件驱动的功能页签管理系统。

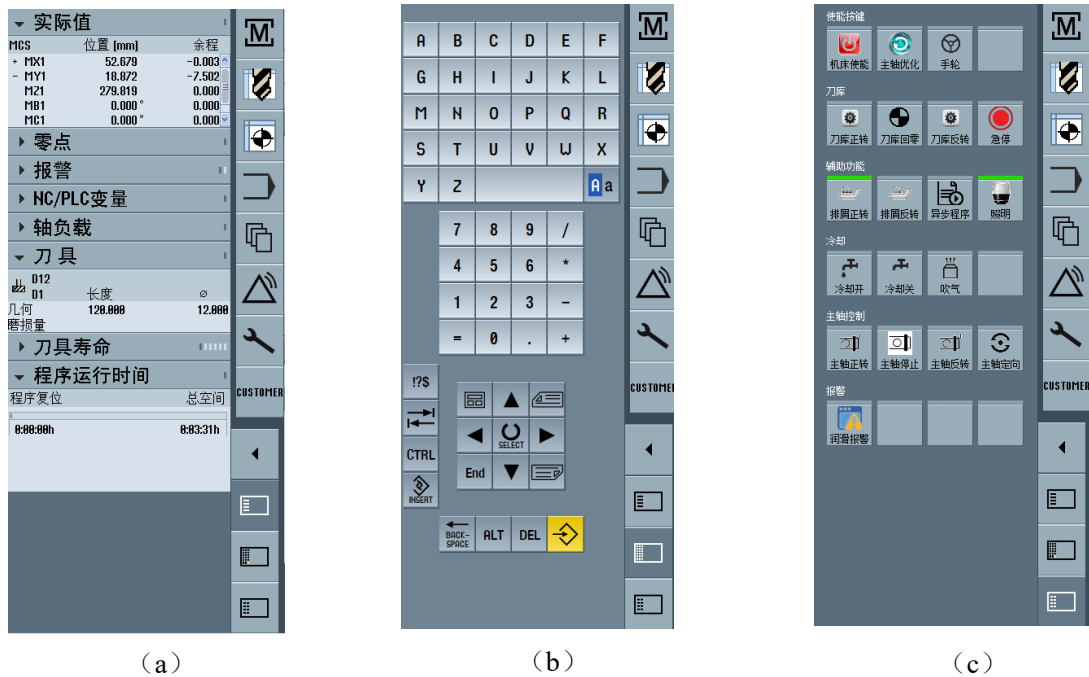


图 3-17 扩展屏开发

3.5 五轴数控加工仿真验证

为了确保设计的机床在物理数控系统中能够顺利应用并满足加工需求,验证机床的性能和加工精度，选择叶轮零件作为加工对象。叶轮通常具有复杂的三维曲面结构，如弯曲的叶片、轴向和径向的变化、以及曲面之间的过渡等。因此，叶轮加工是五轴机床的典型应用场景。

采用西门子 ONE 数控系统，搭载 B 轴摆动范围 -100° 至 $+100^{\circ}$ 、C 轴 360° 连续旋转的双转台结构，配合 X/Y/Z 轴 600/400/400 mm 行程，可满足叶轮叶片曲率渐变、流道狭窄空间（最小叶片间距 $<80\text{mm}$ ）、叶根过渡圆角（ $R0.5\text{-}2\text{mm}$ ）等加工难点。叶轮的几何特征包括：非均匀 B 样条（NURBS）曲面构建的扭曲叶片，轴向与径向呈非线性变化的轮毂曲面，叶片前缘的变半径过渡曲面。叶轮零件如图 3-18 所示。

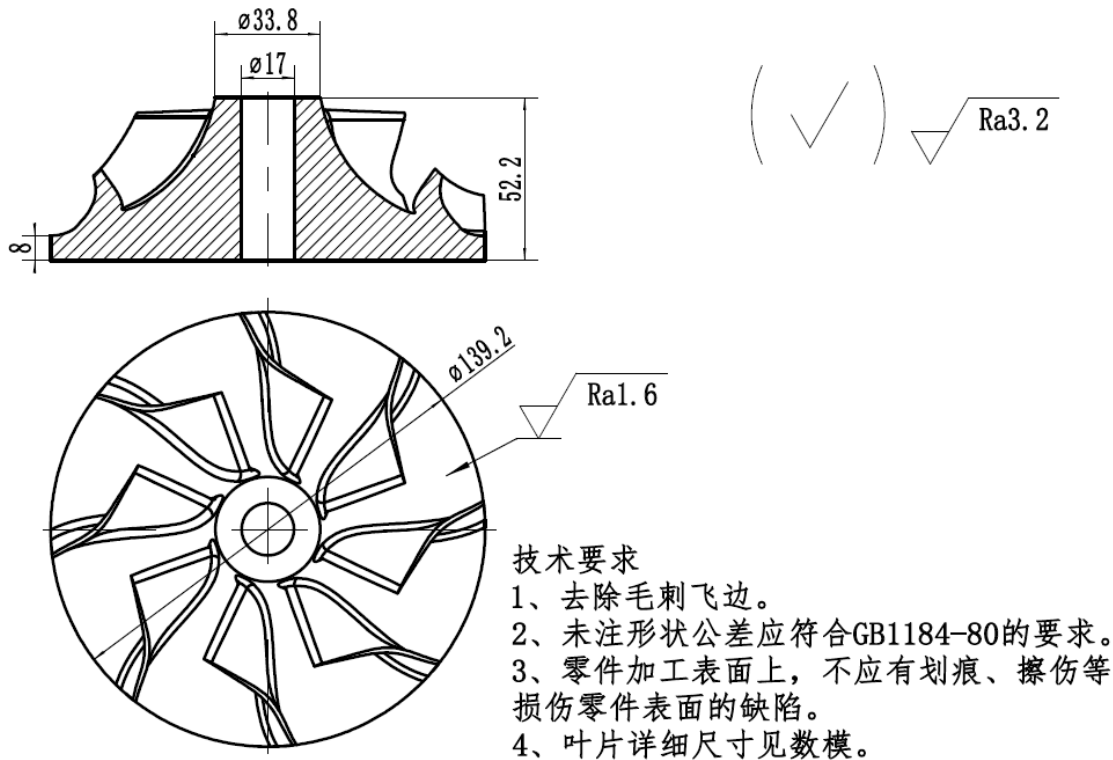


图 3-18 叶轮零件图

通过加工叶轮，可以全面评估机床的各项性能，包括五轴联动的稳定性、加工路径的精确性、工件夹持系统的有效性以及自动换刀系统的运行情况。此外，加工过程将帮助验证数控系统的响应速度、控制精度以及实时误差补偿功能，确保机床在不同的加工条件下能够精确地执行任务。

叶轮作为具有高精度要求的复杂零件，能有效考察机床在应对高难度加工任务时的可靠性与精度控制能力。在加工过程中，机床的各项参数，如切削路径、加工顺序、刀具选择及切削条件等，都将被严格验证和优化，以确保最终加工结果符合设计标准和质量要求。

3.5.1 加工编程工艺

针对叶轮这类具有多扇叶复杂曲面特征的零件，采用 NX CAM 自动编程技术可显著提升加工效率与工艺灵活性。叶轮扇叶的几何特性（如陡峭曲面、薄壁结构等）对加工工艺提出了严格要求，为实现高精度表面质量与加工稳定性，需建立科学合理的加工工序体系。以下是一个经过优化验证的加工工序安排：

①多叶片粗加工：由于叶轮的几何形状较为复杂，在粗加工阶段需要使用较

大的刀具，并采用较高的切削速度和进给量，以提高加工效率，这有助于快速形成叶轮的大致形状。

②轮毂面半精加工：使用较小直径刀具进行精细轮廓加工，采用变步长控制策略，平衡加工效率与表面质量，确保叶片之间的形状符合设计要求。这有助于提高叶轮的气动性能。

③叶片半精加工：针对叶片的形状和轮廓，进行半精加工，逐渐逼近最终形状。这有助于确保叶片的几何形状和表面光洁度。

④前缘半精加工：对叶片的前缘进行半精加工，特别关注边缘的质量和几何形状，确保叶片的强度。

⑤叶片圆角半精加工：处理叶片的圆角部分，确保叶轮整体的强度和稳定性。这也有助于提高叶轮的耐磨性。

⑥整体叶轮精加工：在半精加工的基础上，进行最终的精加工，确保叶轮的最终形状、表面质量和尺寸精度符合设计要求。为了保证叶轮表面的光洁度和加工精度，必要时还需进行表面处理，如抛光或精细修整。这有助于去除表面微小瑕疵，提升叶轮的性能和外观质量。具体切削参数见表 3-5 所示。

表 3-5 叶轮的加工工艺方案

序号	加工工序	加工策略	转速 (r/min)	背吃刀量(mm)	刀具
10	多叶片	粗加工	2000	0.5	D10 球头刀
20	轮毂面	半精加工	2500	0.3	D8 球头刀
30	叶片	半精加工	2500	0.2	D8 球头刀
40	前缘	半精加工	2500	0.15	D8 球头刀
50	叶片圆角	半精加工	2500	0.1	D6 球头刀
60	整体叶轮	精加工	3500	0.05	D6 球头刀

根据所制定的加工工艺，自动编程软件中的首要任务是明确叶轮的毛坯尺寸，并精确设定数控机床可识别的加工工件坐标系。在 NX 中，需要建立清晰且准确的加工基准，以确保后续加工步骤顺利进行。根据工艺卡提供的信息，选择并应用合适的加工指令，编制加工程序。这一过程要求对不同加工工序的参数、刀具路径等进行详细定义，从而确保程序具有高精度和高效性。

3.5.2 仿真实验验证

通过 CMVM 进行虚拟加工，机床制造商和用户可以在无需实际使用机床的情况下，进行与实际机床几乎 100%相同的试切仿真验证。能够实现与实际机床

几乎一致的精度、速度、加速度、循环时间等仿真验证，从而合理安排生产调度。

通过后处理文件，将基于工艺表编制的加工工序转换为符合 ONE 数控系统规范的 G 代码程序。在加工叶轮等对表面粗糙度要求较高的曲面零件时，务必启用 CYCLE832 高速高精加工指令。数控系统通过读取 NC 程序段，能够结合“精优曲面”功能，实现最高加工进给率和最短路径的进给曲线，从而提升加工效率和表面质量。

根据叶轮加工工艺方案的实施流程，基于西门子 CMVM 平台，构建完整的刀具管理系统——将工艺程序中的刀具参数与 CMVM 创建的刀具库进行名称关联及属性匹配，确保虚拟仿真环境与实际加工场景的刀具参数完全一致。

叶轮仿真结果如图 3-19 所示。系统基于 SINUMERIK ONE 数字原生数控内核，实时模拟刀具轨迹、材料去除过程以及机床动力学特性，验证切削参数合理性并检测潜在干涉风险。

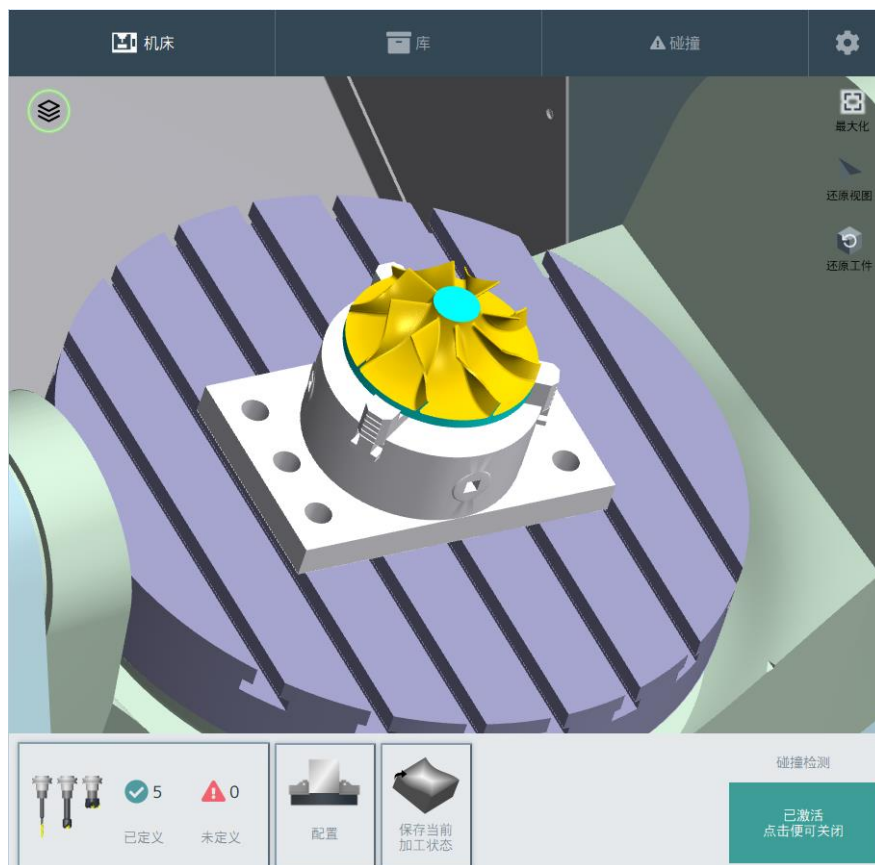


图 3-19 虚拟仿真加工验证

为验证 CMVM 加工的叶轮零件几何精度，需对其复杂曲面进行高精度测量。然而，传统数控机床在线测量系统受限于探头物理接触特性，探头接触式测量易

受曲率变化影响，需频繁调整测针补偿参数，难以对叶轮自由曲面实现无干涉扫描，且需针对不同测量特征单独编制测量程序，导致测量效率低下。

为完成叶轮零件的测量工作，采用建模数据与加工后模型数据的对比分析方法。将 NX 构建的原始叶轮模型和加工完成的叶轮分别导出为 STL 格式文件，在 MATLAB 环境下，读取 STL 文件中的三角面片数据，提取三维坐标及法向信息，并构建点云数据集。采用迭代最近点（ICP）算法^[58,59]对两个点云数据集进行比对，通过迭代优化空间匹配关系，实现刚体变换（旋转和平移）的高精度对齐，如图 3-20 所示。

最终，通过计算配准后的加工点云与原始点云之间的欧氏距离来量化加工误差。结果表明，最大加工误差出现在叶轮前缘处，数值为 0.0431mm。叶轮零件的加工质量主要取决于叶片的成型精度，其中流道表面质量直接影响流体动力学性能。前缘圆角区域的加工误差对叶轮整体性能影响较小，该尺寸公差范围符合设计规范要求，因此满足功能应用需求。

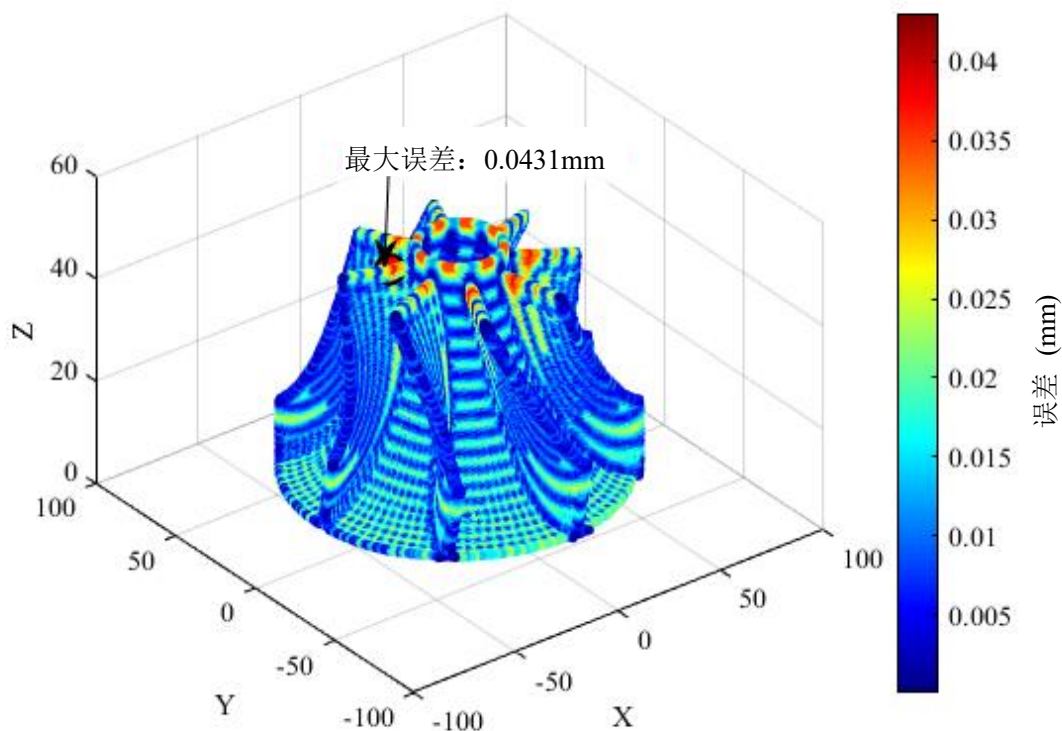


图 3-20 加工点云结果对比

基于五轴加工工艺验证需求，已完成典型零件叶轮的加工仿真验证。其中常

规五轴联动加工包含两类典型工件：如图 3-21(a)快换夹具底座与 3-21(b)轴承座支架采用 3+2 轴加工模式，通过 BC 轴定位锁紧后执行 XYZ 三轴联动插补；复杂曲面零件则包含 3+2 轴粗精复合加工与全五轴联动加工两种工艺路线：如图 3-21(c)S 型结构件采用三轴高速铣削粗加工结合五轴精修工艺，而图 3-21(d)涡轮单叶片实施全五轴联动加工策略，通过刀轴矢量连续变化实现型面精度控制。

上述四类零件加工验证表明：机床机械结构满足多轴协同运动需求，电气系统运动控制时序匹配度达标，数控系统多通道插补功能运行稳定，整体验证数据符合国家标准对五轴机床综合性能的评定要求。

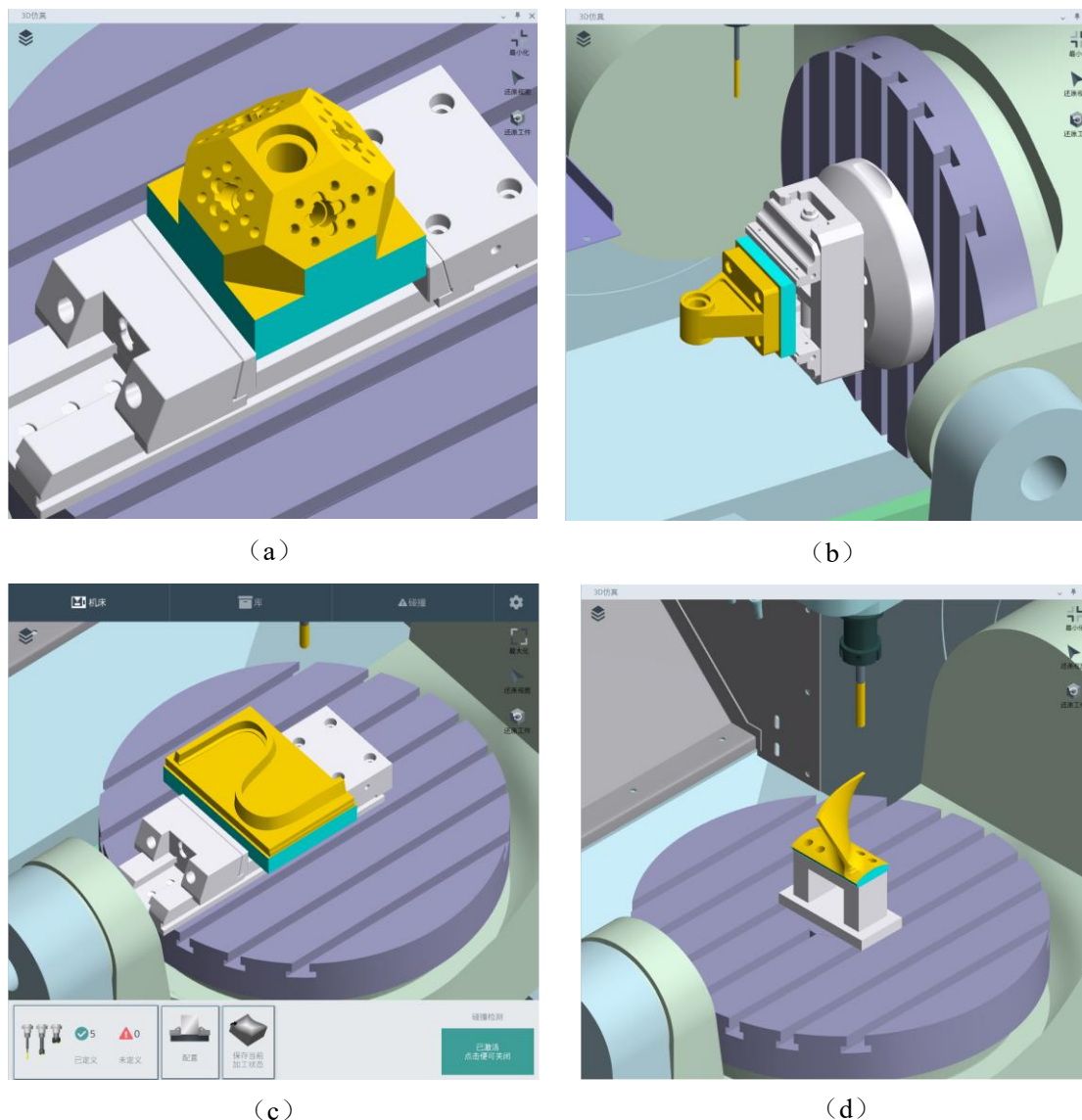


图 3-21 五轴机床加工案例

3.6 本章小结

(1) 针对所设计的五轴数控机床数字化模型，完成了其运动学模型的构建。

(2) 设计了五轴数控机床的逻辑控制程序：实现了 X、Y、Z 直线轴与 B、C 旋转轴的协同运动，采用 PLC 编程技术设计凸轮机械手刀库换刀程序，集成化的辅助功能 M 代码程序。

(3) 针对五轴数控机床的系统参数进行调试与优化，开发了全/半闭环控制模式的可视化人机交互界面；分析了五轴联动数控机床动态误差补偿的原理；开发了扩展屏功能，通过双屏协同机制，在主屏显示加工状态的同时，扩展屏实时展示加工路径、刀具信息及工艺参数等辅助信息。

(4) 基于开发完成的五轴数控系统，选取具有复杂曲面特征的叶轮作为测试对象，进行全面加工仿真验证。通过点云数据的对比分析，发现建模叶轮与仿真加工叶轮之间的误差为 0.0431mm。

第 4 章 五轴数控机床软件在环虚拟调试

基于第 2 章构建的五轴数控机床机械模型与第 3 章设计的数控系统相关功能，将开展系统集成与验证工作：通过机械虚拟模型与电气逻辑控制程序的信号耦合测试，验证运动控制指令与执行机构响应的匹配性，确保机械设计与电气设计的协同性；采用模块化集成方法，将机、电和自动化控制进行深度融合，通过虚拟调试技术验证整体设计的正确性与可靠性。

4.1 五轴数控机床机电调试

在当今先进制造技术领域，MCD 与 CMVM 相结合的虚拟调试技术，为机床研发提供一种革新性的解决方案。在 MCD 中，可以借助 CMVM 接口类型的配置，完成数控机床虚拟模型和数控系统之间逻辑控制相关信号的映射工作，如图 4-1 所示。能够对虚拟机械模型、部分电气逻辑控制程序以及数控系统的功能进行验证。

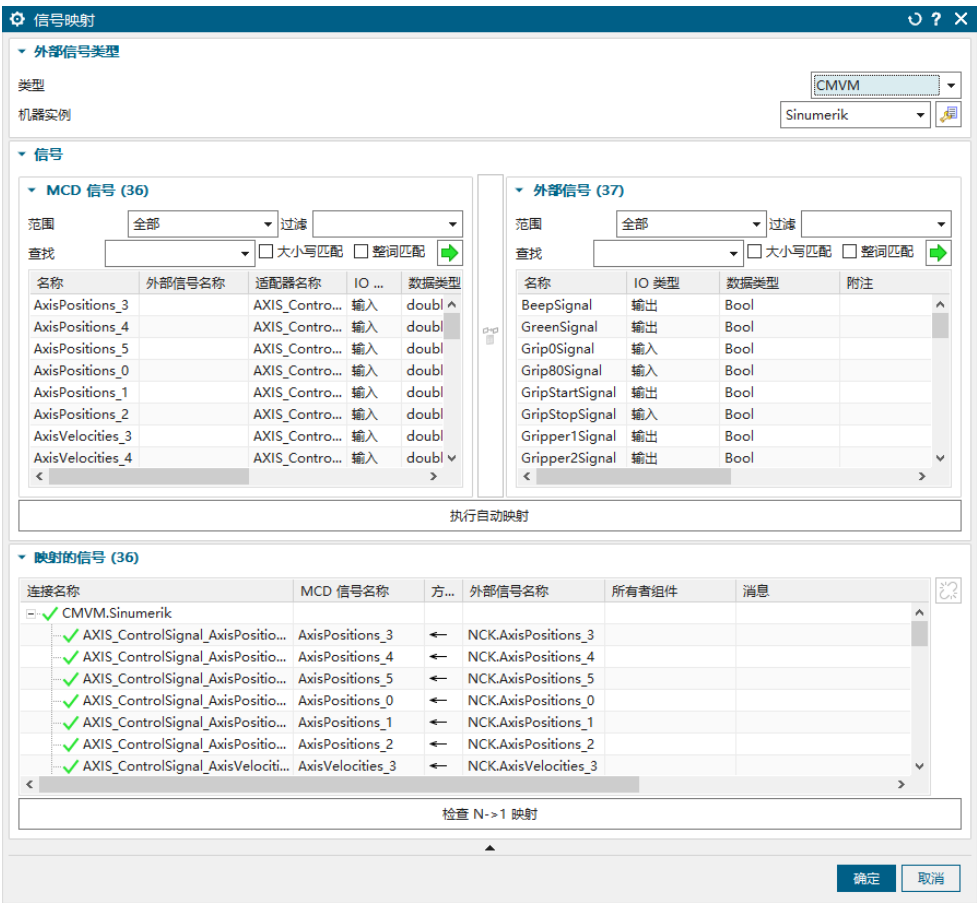


图 4-1 MCD+CMVM 信号映射

CMVM 与 MCD 结合使用，如图 4-2 所示。是一种用于验证 PLC 电气控制和机械结构运动的虚拟调试方式。利用 MCD 机电概念设计技术，为数控机床虚拟模型赋予与物理机床相同的物理属性，进而完成数控机床虚拟样机的搭建。由 CMVM 调试开发而成的五轴数控加工中心与 MCD 进行信号耦合，从而能够在虚拟环境下模拟实际设备的运行状况。通过这种虚拟调试方式，可以大幅度提高开发效率，减少物理试错过程中的时间和成本，同时确保机床的最终性能达到预期要求。

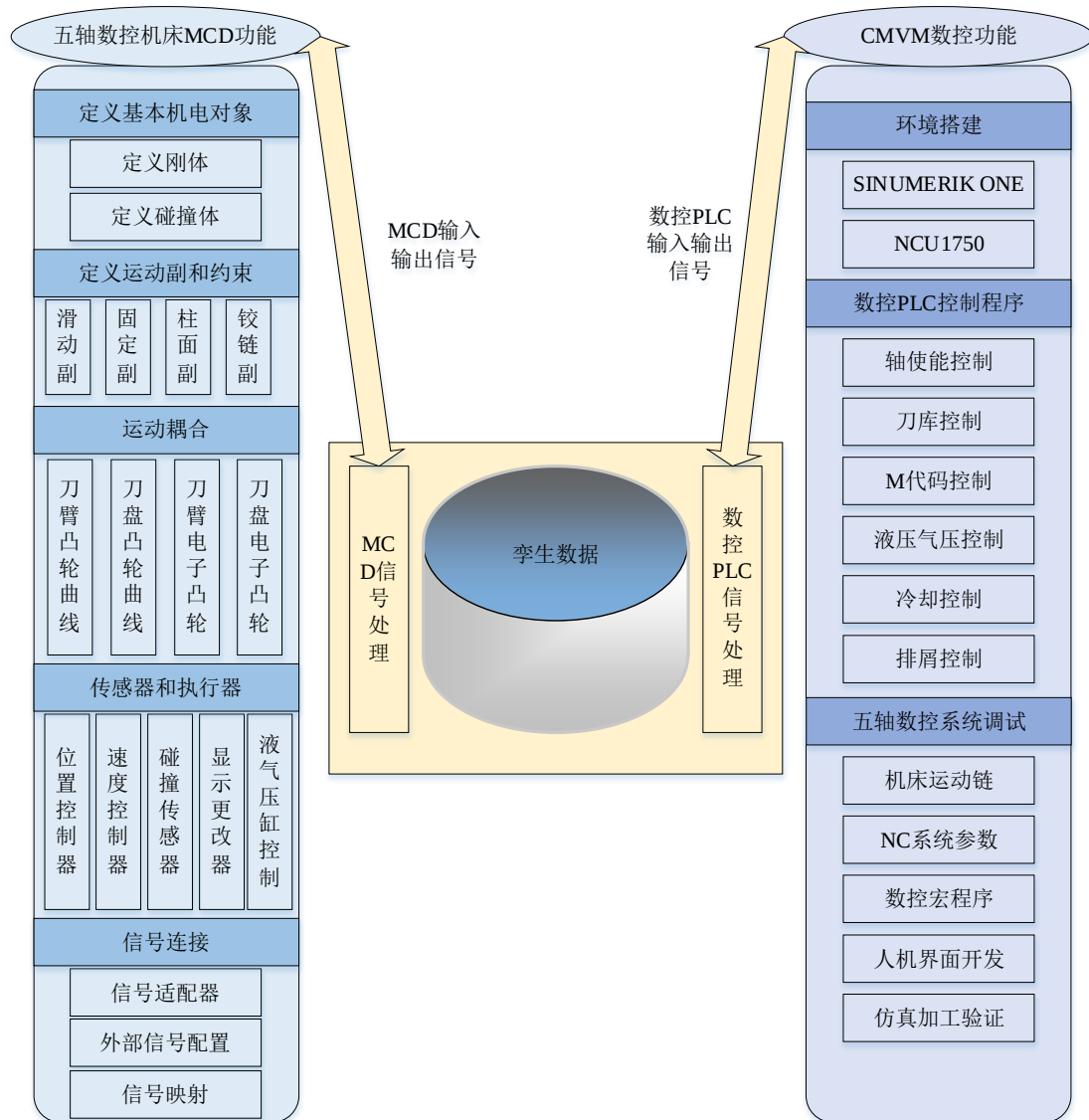


图 4-2 数控机床虚拟调试原理

随着设计的深入，MCD 能够对机床模型进行细化，精确描述各个零部件的几何形状、装配关系以及材料属性等。同时，与 CMVM 紧密配合，将数控系统和电气控制的设计融入其中。在数控系统方面，将数控程序的逻辑和指令集成到

机床模型中，定义数控系统与机床各运动部件之间的信号交互规则，确保数控指令能够准确控制机床的运动。对于电气控制方面，详细设计电气回路、电机参数以及传感器布局等，并建立其与机床机械结构的关联。通过这种深度集成，形成一个完整的、多学科融合的详细设计模型。

在全虚拟环境下，基于上述集成的设计模型，MCD+CMVM 能够对机床的整体运行进行仿真调试。通过模拟实际加工任务，数控系统发出指令，驱动机床各轴按照预定轨迹运动。电气逻辑控制程序实时响应，为电机提供动力，传感器反馈运动状态信息，形成一个完整的闭环控制回路。

4.2 基于 SIMIT 的数控机床信号耦合

4.2.1 信号接口耦合

在 SIMIT 中，提供了多种信号接口耦合方式，如图 4-3 所示。针对数控机床的虚拟调试，可以通过与 MCD（Mechatronics Concept Designer）虚拟模型连接的接口，以及与 CMVM 数控调试平台的 SINUMERIK ONE xMVM 接口，导入相关的耦合信号数据，从而验证数控机床的功能。为了与其他设备或整个产线进行虚拟调试，可以采用共享内存方式，将 MCD 信号和 CMVM 信号进行耦合，确保各系统间的数据高效、稳定地传递。

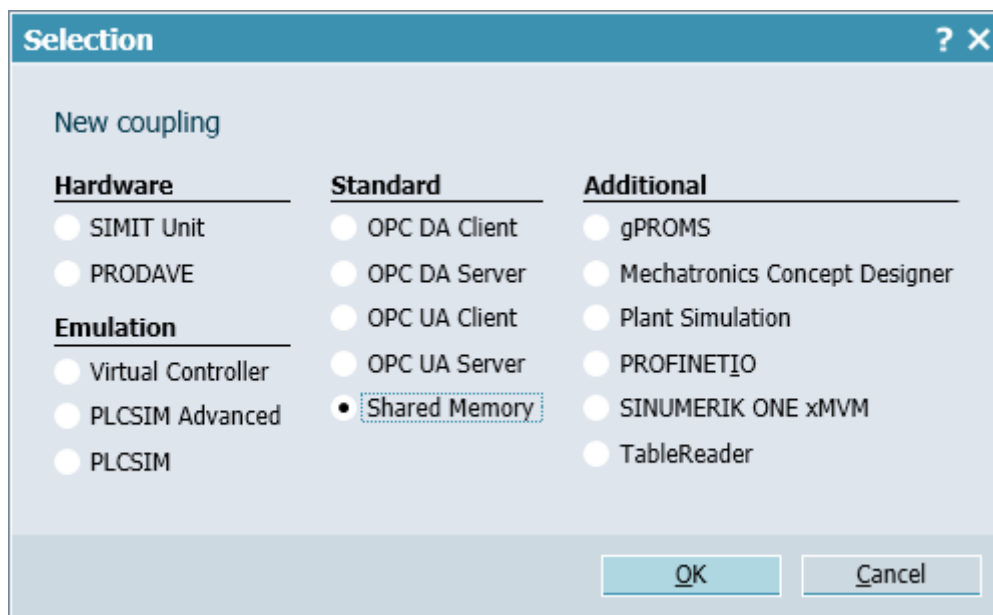


图 4-3 耦合接口

共享内存方式通过在主机中创建一块内存区域，允许程序直接读写这块内存

进行数据交换，从而避免了传统网络通信中的延迟，实现低延时和高吞吐量的数据交换。这种方式对于实时性要求高的数控机床仿真调试尤为重要，尤其是在系统需要快速响应控制信号和传感器数据时。与网络协议（如 OPC UA）相比，共享内存无需额外的网络资源，减少了系统开销，并能有效避免性能瓶颈。它简化了虚拟机控制与数控机床仿真逻辑的集成，降低了通信协议的复杂性，进一步提升了调试的效率和稳定性。

4.2.2 SIMIT 信号耦合设计

（1）SIMIT 控制面板设计

在 SIMIT 中，设计了专用于数控机床的控制面板，实现仿真模型与系统的紧密集成。该控制面板允许用户实时调整仿真环境中的参数，从而使虚拟机床和控制系统进行高效互动，确保在没有实际硬件的情况下仍能正常运行。

SIMIT 控制面板能够与数控系统的仿真部分进行全面交互，极大地便利了测试和优化过程。如图 4-4 所示，可以通过 Aggregates、Drives 和 Axis 等模块的激活行为，快速跳转到相应的设计界面。此外，通过三色灯的状态，用户可以实时监控数控机床的运行状态，并通过打开数控机床的总电源，确保机床的电源通电，从而模拟真实的操作环境。

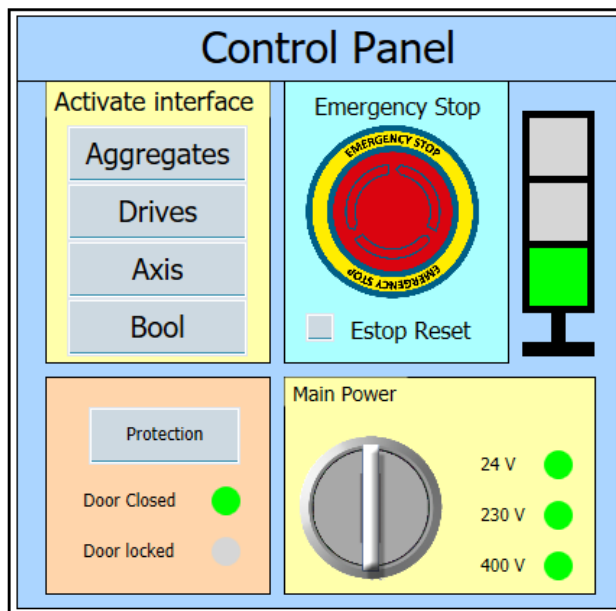


图 4-4 SIMIT 控制面板

（2）运动轴信号耦合

如图 4-5 所示，数控机床各轴的运动数据（如 X/Y/Z 轴的位置和速度）在数控系统中以浮点数的形式动态变化。为了实现这些数据的高效映射，在 SIMIT 中通过连接器将 CMVM 和 MCD 模型在共享数据中的信息进行一比一映射，确保虚拟环境中的运动数据与数控系统运行数据完全同步。这种精确的映射机制为虚拟调试提供了可靠的数据基础，进一步提升了仿真与控制的准确性。

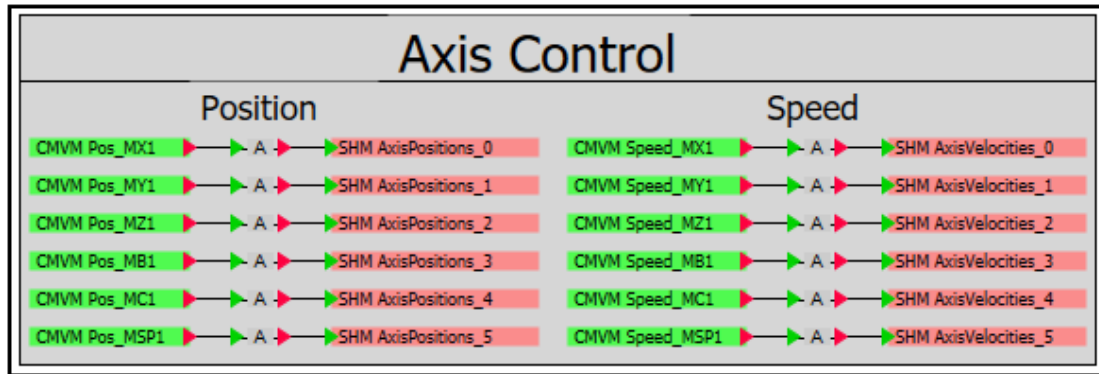


图 4-5 运动轴信号耦合

(3) 布尔信号耦合

在数控机床中，存在大量的传感器信号、启动关闭信号以及行程开关信号，如图 4-6 所示。与位置和速度数据的映射方式类似，为了实现这些 BOOL 量信号的映射，需要在 SIMIT 中以二进制布尔组件作为桥梁，将 CMVM 数控系统与 MCD 虚拟模型的信号进行精确匹配。确保机床虚拟环境中布尔信号与数控系统中信号的一致性，为虚拟调试提供了全面的信号支持，进一步增强了仿真的可靠性和准确性。

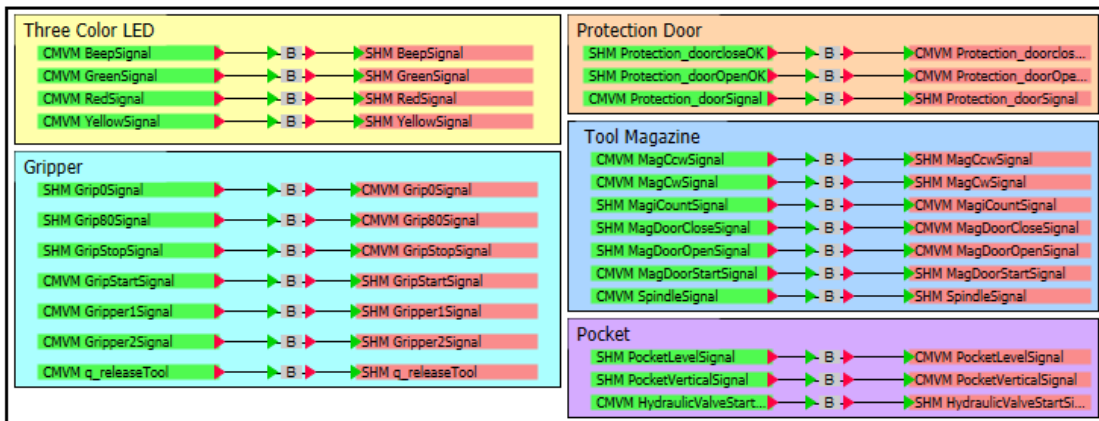


图 4-6 布尔信号耦合

(4) 辅助功能信号耦合

在 SIMIT 仿真平台中，数控机床的辅助功能（如液压和气压系统）可以通过

建立物理世界的运行逻辑来模拟其行为，并与数控系统实现联动，如图 4-7 所示。当液压和气压系统启动后，其输出信号通过转换组件将压力值输入到 PTn 延时组件中，并以指数形式在压力表中显示。

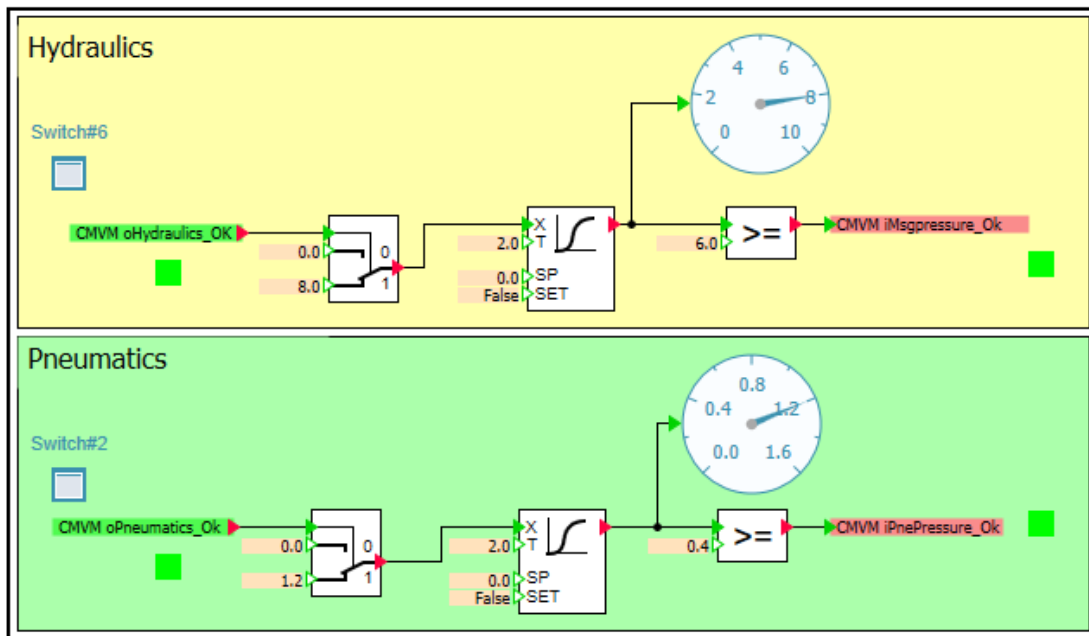


图 4-7 液气压模拟



图 4-8 数控系统报警

若压力值低于或等于预设标准值，SIMIT 会通过输入/输出接口与数控系统交互，触发报警；（数控系统报警提示如图 4-8 所示）反之，当压力值高于预设标准值时，报警解除，数控系统恢复正常工作状态。这种仿真机制不仅能够模拟系统的正常运行，还能在辅助功能发生故障（如液压压力不足）时，及时通过报

警机制与数控系统进行联动，确保系统的安全性和可靠性。

中心润滑单元的压力状态可以通过压力传感器实时监控。在 SIMIT 中，润滑系统的压力信号由 Ramp 组件进行预设，当润滑压力低于预设标准值时，SIMIT 会通过输入/输出接口与数控系统交互，触发压力报警，提示操作人员及时处理；当压力恢复到正常范围（高于预设值）时，报警解除，系统继续正常运行。

真空及通风功能的模拟可以通过延时组件实现。通风功能的状态（如风机启动或停止）也可以通过延时组件进行模拟，确保通风系统能够根据实际需求及时响应，避免因通风不足导致的设备过热或故障。SIMIT 仿真如图 4-9 所示。

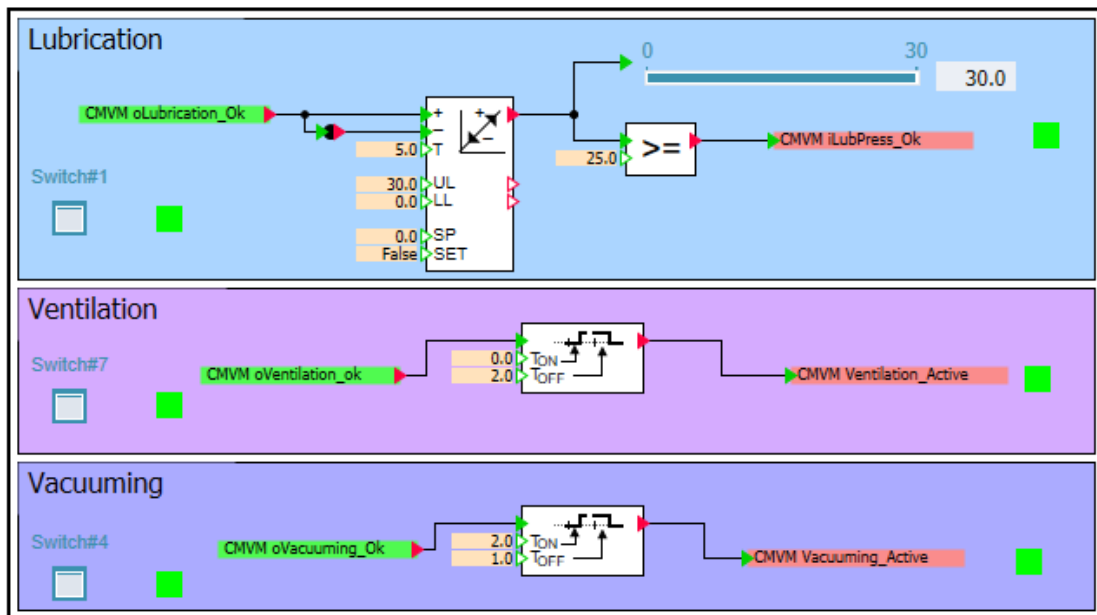


图 4-9 润滑及吹气

4.3 软件在环虚拟调试

3D 设计软件虽然在模拟系统的机械布局方面表现出色，但其功能局限于机械结构的仿真，无法对系统的接线、连接以及 PLC 逻辑控制（包括安全部分）进行全面测试。相比之下，西门子的 SIMIT 库提供了更为全面的解决方案，它不仅能够模拟操作员面板的功能，还可以对从控制元件到 PLC 的布线和连接进行完整的测试和验证，确保系统在实际运行前的可靠性和安全性。

SIMIT 作为一种全面的虚拟测试工具，能够在不依赖物理硬件的情况下，通过精确模拟整个系统的行为来验证控制逻辑和安全功能^[60,61]。可以在开发过程的早期阶段识别并纠正错误，从而显著减少因错误和延误带来的高昂成本。通过其

丰富的控制元素库，SIMIT 为自动化项目的测试和验证提供了强大的工具集，确保接线、PLC 逻辑的准确性、可靠性和安全功能的完备性。结合 MCD 和 CMVM，SIMIT 能够实现高效的虚拟调试，其原理图如图 4-10 所示。

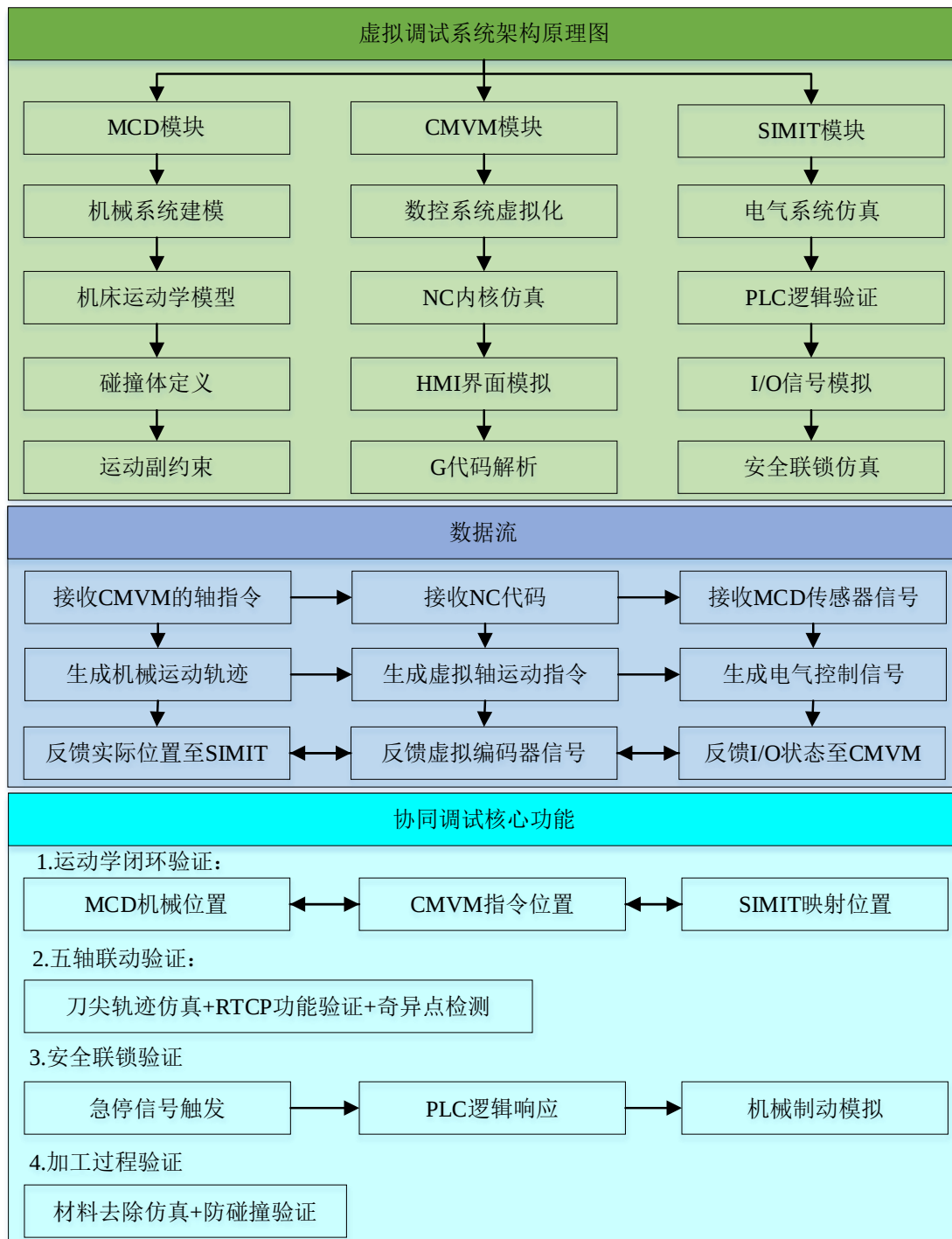


图 4-10 虚拟调试系统架构原理图

MCD+CMVM+SIMIT 技术打破了机械、电气和自动化领域之间的传统壁垒，实现了高效的多学科协同。在机械工程师完成机床机械结构设计后，电气工程师

可以直接在同一虚拟平台上进行电气的设计和集成,通过共享的模型数据,准确了解机械部件的运动需求和空间布局,合理规划电气线路和设备安装位置。自动化工程师则可以基于机械和电气设计,编写数控程序和自动化控制逻辑,确保机床在不同加工任务下能够自动、高效地运行。

在虚拟调试过程中,CMVM 首先解析 NC 代码(如 G0 X100 Y150 Z530 B50 C240),生成虚拟轴运动指令,并将这些指令发送至 SIMIT 平台。在 SIMIT 中,CMVM 与 MCD 的轴运动指令信号进行数据映射,随后通过 SIMIT 将运动数据传输至 MCD,驱动 3D 机床模型运动,并实时计算刀具与工件的相对位置。同时,MCD 运行中的位置和传感器信号也会通过 SIMIT 进行信号映射,并反馈给 CMVM 虚拟数控系统,形成闭环控制。当 MCD 检测到机械干涉事件(如主轴与夹具碰撞)时,会触发 SIMIT 的急停信号。SIMIT 随后将模拟的限位开关信号发送至 CMVM 的 PLC 模块,CMVM 根据反馈信号实时调整进给倍率,确保系统的安全性和稳定性。

在协同过程中,各方人员可以实时交流和反馈。例如,当机械工程师对机床结构进行调整时,相关信息会及时更新到共享模型中,电气工程师和自动化工程师能够立即了解这些变化,并相应地调整自己的设计,避免因沟通不畅或信息更新不及时导致的设计冲突。这种紧密的协同工作模式加速机床研发周期,提高产品质量,使整个研发团队能够更加高效地完成机床从设计到调试的全过程。

在制造真实机床之前,自动化编程工作可以提前开展。由于虚拟环境能够精确模拟机床的运动和加工过程,编程人员可以在虚拟模型上进行数控程序的编写、测试和优化。通过输入实际的加工图纸和工艺要求,利用平台提供的编程工具生成数控代码,并在虚拟机床中运行该代码,观察加工过程的模拟效果。如果发现程序存在错误或不合理之处,如刀具路径碰撞、加工精度不达标等问题,编程人员可以及时调整代码,直至达到满意的加工效果。

通过这种方式,大大减少了实物调试验证的次数。在传统的机床研发过程中,实物调试往往需要耗费大量的时间和资源,而且一旦在实物调试中发现设计错误或缺陷,修改成本高昂且周期较长。而虚拟调试技术能够提前预知这些问题,在虚拟环境中进行修正,将潜在的风险消除在设计阶段,确保实际制造出的机床能够一次调试成功,提高生产效率和产品质量,降低企业的研发和生产成本。

4.4 ONE 系统实验验证

在完成五轴数控机床的软件在环虚拟调试后,关键环节是将虚拟项目迁移至真实的 SINUMERIK ONE 数控系统中进行实物验证,以检验所设计系统的实际生产适用性。与 840d sl 系统的硬件在环虚拟调试相比,两者在实现方式上存在显著差异:840d sl 系统需要构建包含硬件系统、MCD 和 SIMIT 的完整环境,并额外配置 SIMIT UNIT 硬件单元才能开展硬件虚拟调试验证;ONE 系统的调试则更为直接,无需额外硬件单元,可直接在现有硬件系统上完成虚拟调试验证。这种差异体现了 ONE 系统在调试流程上的简化和高效性,为数控机床的实际部署提供了更便捷的验证途径。

在将虚拟五轴项目迁移到 ONE 系统之前,首先应对 NCU 进行总清,NCU 总清能够将数控系统恢复到出厂默认状态,清除所有可能存在的临时数据、错误配置或残留信息;如果系统未进行总清,可能会存在之前调试或测试中残留的参数或配置,这些残留信息可能与当前调试需求冲突,导致调试过程出现异常或失败。



图 4-11 备份数据装载

如图 4-11 所示。在完成 NCU 总清后,可以将纯虚拟调试过程中生成的 DEF 备份文件导入到 ONE 系统中进行装载。由于 CMVM (虚拟调试环境) 存在一定的局限性,无法直接将驱动和 PLC 相关的配置从纯虚拟环境下的备份文件完整

迁移。为此，必须在实际硬件系统上直接进行驱动和 PLC 的调试工作，以确保系统参数与实际硬件完全匹配。

在调试过程中，首先将博途程序下载到硬件 PLC 中，同时按照界面开发规范，将人机交互界面的相关文件放置到指定路径下，即可验证人机交互界面的功能及相关参数的准确性。如图 4-12 所示，实物 ONE 系统能够显示全闭环与半闭环切换的当前状态。由于实物 ONE 系统尚未配置驱动器和电机，系统无法检测到硬件参数，因此编码器类型及测量元件线性相关的参数值显示为 0。这一现象表明，系统功能的完整验证需在硬件配置齐全后进一步进行，确保所有参数能够准确反映实际运行状态。

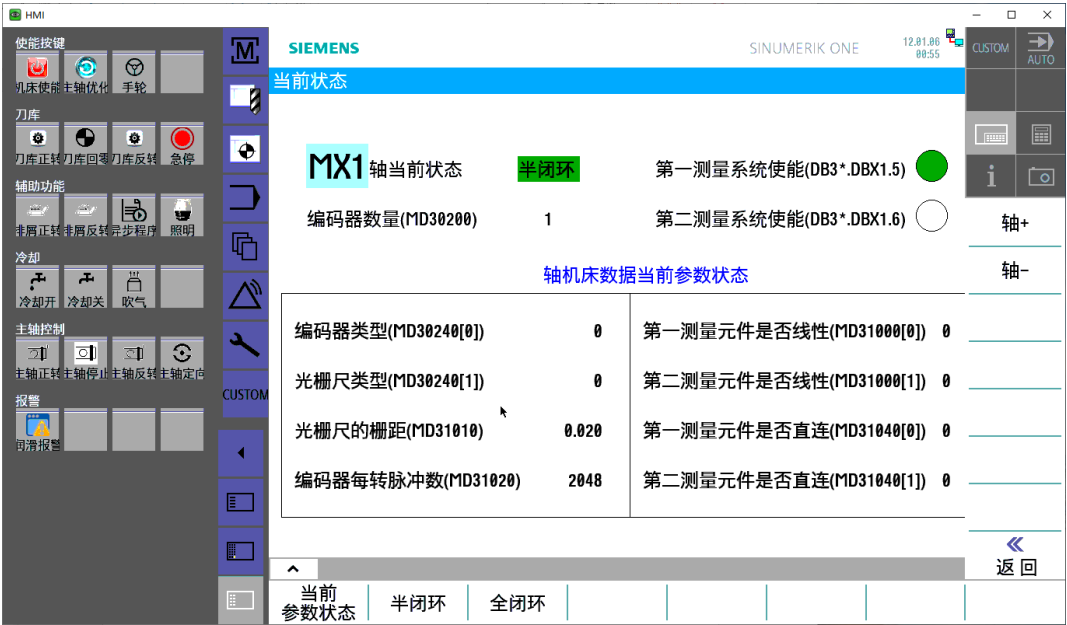


图 4-12 硬件人机交互界面

在虚拟数控环境 CMVM 中，叶轮零件的加工验证已顺利完成，结果加工需求。为了进一步验证基于软件在环虚拟调试技术设计的五轴数控机床项目的准确性，必须在实物 ONE 系统对叶轮加工程序再次运行，并在机床空间中观察实际加工结果。如图 4-13 所示，叶轮程序运行完成后，其整体形状与设计要求完全吻合，这不仅证明了叶轮加工程序的准确性，同时也验证了通过虚拟调试技术设计的五轴数控机床在实际应用中的可行性。

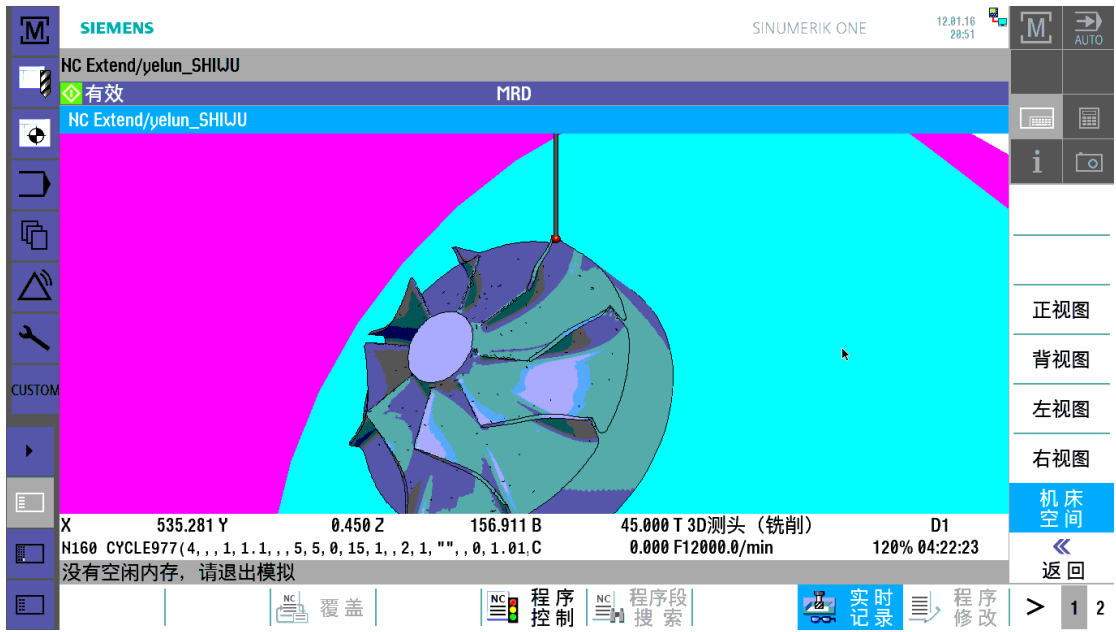


图 4-13 叶轮加工验证

4.5 本章小结

- (1) 实现了电气信号与机械运动的精确映射，确保了电机、传感器等电气元件与机械系统的协同工作。
- (2) 通过 SIMIT 平台模拟了液压、气压及润滑系统的故障场景，验证了报警机制与数控系统的联动响应，确保系统在异常工况下的稳定性。
- (3) 通过 MCD、CMVM 与 SIMIT 构建的协同平台，完成了对机械、电气以及自动化控制等各环节的验证工作。
- (4) 完成调试项目的移植工作后，在 ONE 实物系统中针对叶轮零件展开仿真加工验证工作。

第 5 章 总结与展望

5.1 全文总结

以国家智能制造战略为背景，聚焦五轴数控机床的快速设计与开发，结合虚拟调试技术，构建了一套高效、精准的机床设计与验证方法。通过 MCD、CMVM 与 SIMIT 技术的深度融合，实现了五轴数控机床机械、电气和自动化控制的虚拟调试，验证了设计的正确性与可靠性，为高端数控装备的自主化研发提供了创新的技术路径。

(1) 设计了五轴数控机床虚拟样机模型。利用 NX 完成五轴数控机床机械结构和凸轮机械手刀库机械结构设计，并基于 MCD 机电一体化技术构建虚拟运行环境，分析了虚拟调试时凸轮机械手刀库面临的刀具转移问题，利用握爪仿真序列和 PLC 信号相结合方式，完成了刀具从刀库到主轴的换刀。

(2) 完成了五轴数控机床系统调试。针对五轴数控机床构建机床运动学模型；基于博途设计了逻辑控制、凸轮机械手刀库换刀及 M 代码辅助功能等 PLC 控制程序；基于 CMVM 平台对五轴联动数控系统进行参数调试，分析了五轴联动误差补偿的原理，完成了可视化人机交互界面的开发；以复杂曲面叶轮进行加工仿真验证，点云数据对比显示建模模型与仿真加工叶轮模型最大误差为 0.0431mm。

(3) 完成了五轴数控机床软件在环虚拟调试。通过将 MCD 和 CMVM 中的机电运动信号精确映射，有效验证了机电功能的实现情况；通过将 MCD、CMVM 与 SIMIT 协同平台完成多环节验证，借助 SIMIT 平台模拟故障场景，验证报警机制与数控系统联动响应，在异常工况下确保系统稳定性，进一步证实了机、电和自动化功能的有效集成与实现；运用 SINUMERIK ONE 实物系统，对叶轮零件进行仿真加工验证，结果显示叶轮仿真加工的结果与设计预期结果相符。

5.2 工作展望

通过虚拟调试技术，成功设计完成了一台五轴数控机床。虽然在 ONE 数控系统的仿真环境中进行了虚拟加工，但由于缺乏物理样机的实际调试，未能充分考虑机床在真实加工过程中可能受到的各种影响因素。因此，在实际机床上进行

加工时，可能会出现一定的偏差。未来的研究工作可以从以下几个方面进一步展开：

（1）由于单台设备的应用场景相对有限，未来可以将该技术推广至机器人、自动化生产线等其他工业领域，探索其在不同应用场景中的潜在价值和适用性。

（2）受研究时间限制，主要聚焦于五轴数控机床的系统调试，而尚未深入研究数控系统的优化。未来，可以结合大数据分析技术，构建自适应控制策略，使机床能够根据不同的加工任务和工况实时动态调整运行参数，从而提升加工效率与加工质量。

参考文献

- [1] 李丽, 张根保. “高档数控机床的高端制造模式”(二):国产数控机床的竞争格局研究[J]. 计算机集成制造系统,2023,29(04):1346-1356.
- [2] 张根保, 罗天洪. “高档数控机床的高端制造模式”(五): 数控机床向高端转型的必要性[J]. 计算机集成制造系统,2023,29(8):2862-2870.
- [3] 谭智, 陈洪军, 陈经纬. 数控机床产业链发展现状及建设路径研究[J]. 世界制造技术与装备市场,2023(04):11-14.
- [4] 梁帅, 高继平. 产业技术结构与“卡脖子”技术特征——以高端数控机床为例[J]. 科技导报,2021,39(24):75-83.
- [5] 王茂斌, 叶涛, 孔东民. 绿色制造与企业环境信息披露——基于中国绿色工厂创建的政策实验[J]. 经济研究,2024,59(02):116-134.
- [6] 李颖, 贺俊. 数字经济赋能制造业产业创新研究[J]. 经济体制改革,2022(02):101-106.
- [7] 蔡安江, 王沛彭, 王晨曦, 等. 多主轴头数控机床虚拟仿真加工平台的构建方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2024,54(06):1528-1536.
- [8] Sun X H, Zhang F L, Niu X T. et al. A digital twin commissioning method for machine tools based on scenario simulation[J]. Journal of Manufacturing Systems,2024,77:697-707.
- [9] Wei Y L, Hu T L, Zhou T T, et al. Consistency retention method for CNC machine tool digital twin model[J]. Journal of Manufacturing Systems,2021,58:313-322.
- [10] 王俊杰, 戴春祥, 秦荣康, 等. 基于 NX MCD 的协同设计方法与应用技术研究[J]. 制造业自动化,2018,40(7):31-33.
- [11] 王金江, 牛晓彤, 黄祖广, 等. 数字孪生驱动的数控机床虚拟调试技术研究[J]. 制造技术与机床,2022(10):127-132.
- [12] Ugarte M, Etxeberria L, Gorka U, et al. Implementation of Digital Twin-based Virtual Commissioning in Machine Tool Manufacturing[J]. Procedia Computer Science,2022,200:527-536.
- [13] Vishnu V.S, Varghese K.G, Gurumoorthy B. A Data-driven Digital Twin of CNC Machining Processes for Predicting Surface Roughness[J]. Procedia

CIRP,2021,104:1065-1070.

- [14] Witt M, Klimant P. Hardware-in-the-loop machine simulation for modular machine tools[J]. Procedia CIRP,2015,31:76-81.
- [15] Wang J J, Niu X T, Robert X G, et al. Digital twin-driven virtual commissioning of machine tool[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2023,81:1-19.
- [16] 孙立鹏, 裴佳桐, 程铭, 等. 基于西门子 SINUMERIK 840Dsl 的 MCD 虚拟调试方法研究[J]. 装备制造技术,2022(07):55-59.
- [17] 林裕程, 韩勇. 基于 NX MCD 的数控机床虚拟调试[J]. 制造技术与机床,2021(02):151-156.
- [18] Liu K, Song L, Han W. et al. Time-Varying Error Prediction and Compensation for Movement Axis of CNC Machine Tool Based on Digital Twin[J]. Transactions on Industrial Informatics,2022,18:109-118
- [19] 江雪梅, 袁子航, 姜平, 等. 一种基于数字孪生的重型数控机床碰撞检测方法[J]. 中国机械工程,2022,33(22):2647-2654+2663.
- [20] 成居宝, 杜娟, 刘丽琴, 等. 基于数控机床特性的碰撞检测算法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(08):101-105+110.
- [21] 庄晨怡. 面向制造企业全生命周期的数字孪生研究综述[J]. 软件工程与应用,2021,10(03):365-371.
- [22] 黄海松, 陈启鹏, 李宜汀, 等. 数字孪生技术在智能制造中的发展与应用研究综述[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2020,37(05):1-8.
- [23] 韦兰花, 黄亮. 数字孪生技术在智能制造中的应用[J]. 2024(4):366-368.
- [24] 赵瑶瑶. 数字孪生技术在工业制造中的应用研究综述[J]. 中国设备工程,2024(03):33-35.
- [25] Piras G, Muzi F, Tiburcio V.A. Digital Management Methodology for Building Production Optimization through Digital Twin and Artificial Intelligence Integration[J]. Buildings. 2024,14(7):1-23.
- [26] 陈志新, 陆凌云, 叶玲, 等. 指挥控制系统数字孪生研究[J]. 系统工程与电子技术,2024:1-14.
- [27] Adreani L, Bellini P, Fanfani M, et al. Smart City Digital Twin Framework for

- Real-Time Multi-Data Integration and Wide Public Distribution[J]. IEEE Access,2024,12:76277-76303.
- [28] 魏一雄, 郭磊, 陈亮希, 等. 基于实时数据驱动的数字孪生车间研究及实现[J]. 计算机集成制造系统,2021,27(02):352-363.
- [29] Abdullahi I, Longo S, Samie M. Towards a Distributed Digital Twin Framework for Predictive Maintenance in Industrial Internet of Things[J]. Sensors, 2024,24(8):1-30.
- [30] Amin M. A Hardware-in-the-Loop Realization of a Robust Discrete-Time Current Control of PMA-SynRM for Aerospace Vehicle Applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019,7(2):936-945.
- [31] 张泽坤, 孙渊, 王寻. 采球机设备虚拟调试设计与仿真研究[J]. 机床与液压,2024:1-9.
- [32] Dombovari Z, Toth R.R, Iglesias A, et al. Flip-validated milling process in hardware-in-the-loop environment[J]. CIRP Annals,2023,72(1):369-372.
- [33] 陶飞, 张辰源, 刘蔚然, 等. 数字工程及十个领域应用展望[J]. 机械工程学报,2023,59(13):193-215.
- [34] 刘劲松. 高档数控机床数字孪生关键技术研究与应用[D]. 沈阳: 中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所),2022.
- [35] Hu S G, Li C G, Li B K, et al. Digital Twins Enabling Intelligent Manufacturing: From Methodology to Application[J]. Intelligent and Sustainable Manufacturing,2024,1(1):1-29.
- [36] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统,2022,28(05):1267-1281.
- [37] Striffler N, Voigt T. Concepts and trends of virtual commissioning—A comprehensive review[J]. Journal of Manufacturing Systems,2023,71:664-680.
- [38] Florescu A. Digital Twin for Flexible Manufacturing Systems and Optimization Through Simulation: A Case Study[J]. Machines,2024,12(11):1-20.
- [39] Osama A.Q.Z, Yanxi Zhang, Algabroun H, et al. Robot material processing and hardware-in-the-loop-based real-time simulations[J]. Journal of

Physics,2024,2805(8):1-8.

- [40] Böttjer T, Tola D, Kakavandi F, et al. A review of unit level digital twin applications in the manufacturing industry[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,2023,45:162-189.
- [41] Chen M J, Yang R J. Design of virtual debugging and monitoring platform for industrial robots[J]. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics,2024(16):156-162.
- [42] 刘梦园, 李焕锋, 沙杰, 等. 基于数字孪生的电机基座码垛线虚拟调试技术研究[J]. 机床与液压,2024,52(19):46-52.
- [43] 张旭辉, 刘彦徽, 杨文娟, 等. 数字孪生驱动的巷道自动成形截割虚拟调试方法研究[J]. 工矿自动化,2024,50(07):1-12.
- [44] 周正飞, 张凤丽, 牛晓彤, 等. 面向铣削场景的电主轴数字孪生调试方法研究[J]. 制造技术与机床,2024(5):199-204.
- [45] 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,2021,28(4):426-432.
- [46] 马飞, 代锟, 孙巍伟. 基于数字孪生的物流拣选虚拟调试系统设计[J]. 机床与液压,2023,51(16):95-100.
- [47] Xu H Z, Wu D L, Zheng Y, et al. Augmented reality-based virtual-real fusion commissioning: a novel approach to production commissioning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2024,131(11):5527-5541.
- [48] Oliveira Hansen J.P, Silva E.R, Bilberg A. et al. Design and development of Automation Equipment based on Digital Twins and Virtual Commissioning[J]. Procedia CIRP,2021,104:1167-1172.
- [49] 李琳利, 李浩, 顾复, 等. 基于数字孪生的复杂机械产品多学科协同设计建模技术[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(06):1307-1319.
- [50] 曹旭妍. 微型五轴数控机床的设计与研究[J]. 煤矿机械,2017,38(11):10-12.
- [51] 王庆, 落海伟, 陈宁, 等. 数控 5 轴龙门机床的虚拟加工系统开发[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(3):26-31.

- [52] 徐晓东, 施桂和. FANUC 0i 系统加工中心刀库和凸轮式机械手的 PMC 控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(04):70-72.
- [53] 马彬, 方学舟, 罗敏, 等. 加工中心随机自动换刀方式的实现[J]. 装备维修技术, 2015(03):71-79.
- [54] 李攀科, 杨林, 邹涛, 等. 随动刀库的任意换刀点的控制[J]. 机械设计, 2020, 37(S2):58-60.
- [55] 邵毅. 基于西门子 840D sl 系统的静态 M 代码解译[J]. 金属加工(冷加工), 2022(12):85-86.
- [56] 杨鹏, 蒋德超, 任德勇, 等. 西门子 Operate 的 Custom 区机床操作诊断界面二次开发[J]. 金属加工(冷加工), 2019(07):70-75.
- [57] 刘雪颖, 李敬财, 岳东鹏, 等. 基于 EasyXML 的数控弧齿锥齿轮机床人机界面开发[J]. 金属加工(冷加工), 2022(07):77-81.
- [58] 张子毅, 孙焘, 王琦, 等. 基于坐标转换和 ICP 算法的水利点云配准方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(05):155-162.
- [59] 李岩, 张子毅, 王建柱. 基于特征点提取的 RANSAC-ICP 三维点云配准方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(05):144-154.
- [60] 孟庆森, 张宏伟, 王新环. 基于 SIMIT 和 MCD 的并联机器人数字孪生实验系统设计[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(6):135-142.
- [61] 赵英杰, 胡以君, 沈建, 等. 基于 SIMIT 与 NX MCD 的机器人工作站虚拟调试研究[J]. 机电工程技术, 2024, 53(10):47-51.

攻读硕士学位期间发表的学术论文及成果

学术论文：

[1]孙开亮, 钟相强, 史瑞方, 等. 基于数字孪生的三轴码垛机械手设计及实验验证[J]. 安徽工程大学学报 (已录用)

科研项目：

[1]横向项目：智能装备设计与数字孪生制造教学资源开发 (HX-2024-12-027), 第二

专利：

[1]谢云飞, 孙开亮, 史瑞方, 等. 一种优化 4 自由度并联机器人奇异性的方法[P]. 中国专利：CN116713975A.2023-09-08. (发明实审)

学科竞赛：

[1]第十七届“西门子杯”数控数字化双胞胎-虚拟调试赛项 省赛一等奖 (第一负责人);

[2]第十七届“西门子杯”数控数字化双胞胎-虚拟调试赛项 国赛特等奖 (第一负责人);

[3]第十八届“西门子杯”智能装备设计与数字孪生制造赛项 省赛一等奖 (第一负责人);

[4]2023-2024 全国三维数字化创新设计大赛安徽赛区一等奖 (第一负责人);

[5]第九届安徽省“互联网+”大学生创新创业大赛 产业命题赛道铜奖;

[6]第九届安徽省“互联网+”大学生创新创业大赛 高教主赛道银奖;

[7]第十届“挑战杯·华安证券”安徽省大学生课外学术科技作品竞赛 行星级。

致 谢

行文至此，我的硕士求学生涯已接近尾声。回首在安徽工程大学机械与汽车工程学院度过的两千多个日夜，这段旅程中承载的不仅是知识的积累与科研能力的提升，更有师长亲友的关怀与支持。在此，谨向所有给予我帮助的人表达最诚挚的感谢。

衷心感谢我的导师钟相强教授。您严谨的治学态度、渊博的学术造诣和对科研工作的热情深深影响了我。从课题方向的确立到实验方案的优化，从论文框架的梳理到学术规范的打磨，您始终以耐心细致的指导为我指明方向。师恩如山，学生将铭记于心。

感谢我的父母与家人。你们是我永远的精神支柱。离家求学的孤独、读研期间面对实验瓶颈的压力，都因你们的理解与鼓励而化作前进的动力。父亲默默承担家庭重担的身影，母亲每次视频时“别太累”的叮嘱，都成为支撑我完成学业的温暖港湾。未来的日子里，我会以更成熟的态度回报你们的付出。

感谢同门史瑞方、谢云飞与实验室团队。在三年科研生涯中，与你们共同研究课题、分享实验数据的时光弥足珍贵，团队成员们在每周组会上的思想碰撞，都让我受益匪浅。那些为赶进度通宵奋战的日夜，因你们的陪伴而充满意义。

硕士生涯虽已落幕，但求知之路永无止境。我将始终铭记这段经历赋予我的知识、品格与力量，在未来的工作中践行“尚德敏学、唯实惟新”的校训精神，以实际行动回报所有人的期待。

谨以此文，致敬过往，致敬未来。

尚德敏学 唯实惟新

