



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

基于 NX 软件五轴机床机械设计及虚拟调试
**Mechanical Design and Virtual Debugging of Five-Axis
Machine Tool Based on NX Software**

姓 名 郭泽

学 院 机械工程学院

专 业 机械电子工程

指导教师 左维

职 称 副教授

完成时间 2020 年 6 月

天津中德应用技术大学

本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：
年 月 日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：
年 月 日

摘 要

数控机床被誉为制造业的母机，其在制造业占有非常重要的地位。随着“中国制造 2025”的提出，数控机床的地位显得更为重要，所以数控机床的生产、调试、维护以及如何提高加工效率就显得极为重要，但由于数控机床其结构和功能的复杂性，导致了制造效率低、制造成本高、能源消耗大、后期维护困难及维护成本高等问题。为解决这一难题，德国 SIEMENS 公司推出“数字双胞胎—虚拟调试”技术。

林裕程、韩愈在《基于数字化双胞胎的数控机床虚拟调试技术》一文中介绍了基于 SIMIT 实现了 SINUMERIK 840D sl 虚拟调试。吉顺平在《SIMIT 及其在 PLC 教学中的应用》中介绍了以运动小车为例，讨论了 SIMIT 硬件工具在 PLC 教学中的应用。经过对他们论文的研究，本文论述了在数字双胞胎—虚拟调试技术下，设计并建模了一台双摆头式五轴机床（其配备有斗笠式刀库）模型，设计实现 SINUMERIK 840D sl 数控系统硬件，以 OPC Server 软件为“桥梁”，控制 NX 软件中 MCD 功能的 3D 虚拟机床模型。通过调试，以真实 SINUMERIK 840D sl 数控系统去控制 NX 中的 3D 虚拟机床模型，实现机床模型进给轴、主轴和自动换刀等功能的正常动作，并进行 NAS 试件的试切。通过对比 SINUMERIK 840D sl 自带的 ShopMill 功能模拟 NAS 试件的试切轨迹与虚拟机床模型刀具轨迹一致，验证调试成功。从而证明了虚拟调试可以在机床设计与开发阶段可以实现：

- （1）提前预知设计失误，降低企业制造成本；
- （2）缩短调试时间；
- （3）调试人员更加轻松、安全；
- （4）降低后期维护成本。

虚拟调试在生产阶段可以实现：

- （1）产品实际投入生产之前就进行早期估算，降低制造风险；
- （2）投入生产延迟少，废品和返工少，产品质量更稳定，交货时间更短。

关键词：数字双胞胎；虚拟调试；MCD；SINUMERIK 840D sl；OPC

ABSTRACT

CNC machine tools are known as the mother machine of the manufacturing industry, which occupies a very important position in the manufacturing industry. With the proposal of "Made in China 2025", the status of CNC machine tools is more important, so the production, debugging, maintenance of CNC machine tools and how to improve the processing efficiency are extremely important. However, due to the complexity of the structure and function of CNC machine tools, This has led to problems such as low manufacturing efficiency, high manufacturing costs, large energy consumption, difficulty in later maintenance and high maintenance costs. To solve this problem, the German company SIEMENS launched the "digital twins-virtual debugging" technology.

Lin Yucheng and Han Yu introduced the virtual debugging of SINUMERIK 840D sl based on SIMIT in the article "Virtual Debugging Technology of CNC Machine Tools Based on Digital Twins". Ji Shunping introduced the use of sports cars as an example in "SIMIT and its application in PLC teaching" and discussed the application of SIMIT hardware tools in PLC teaching. After researching their thesis, this article discusses the design and modeling of a double-swinging five-axis machine tool (which is equipped with a bucket-shaped tool magazine) under the digital twin-virtual debugging technology, and design and implementation of SINUMERIK 840D sl CNC The system hardware uses the OPC Server software as a "bridge" to control the 3D virtual machine model of the MCD function in the NX software. Through debugging, the real SINUMERIK 840D sl CNC system is used to control the 3D virtual machine model in NX to realize the normal movement of the machine model feed axis, spindle and automatic tool change and other functions, and perform the trial cutting of NAS test pieces. By comparing SINUMERIK 840D sl's own ShopMill function, the simulation test path of the NAS test piece is consistent with the tool path of the virtual machine model, and the successful commissioning is verified. This proves that virtual commissioning can be achieved in the machine tool design and development stage:

(1) Anticipate design errors in advance and reduce manufacturing costs for enterprises;

(2) Shorten debugging time;

(3) Commissioners are more relaxed and safe;

(4) Reduce post-maintenance costs.

During the production phase:

(1) Early estimates can be made before the product is actually put into production to reduce manufacturing risks;

(2) Less delay in production, less scrap and rework, more stable product quality, and shorter delivery time.

Key words: Digital Twins; Virtual Commission; MCD; SINUMERIK 840Dsl; OPC

目 录

| | |
|----------------------------------|----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 课题研究背景及意义 | 1 |
| 1.2 国内外研究现状 | 2 |
| 1.4 主要研究内容 | 3 |
| 第二章 虚拟调试应用情况分析 | 4 |
| 2.1 虚拟调试介绍 | 4 |
| 2.2 虚拟调试应用 | 4 |
| 2.3 数控机床虚拟调试原理 | 4 |
| 2.4 NX 的 MCD 功能 | 5 |
| 第三章 虚拟调试方案设定 | 7 |
| 3.1 数控系统选型 | 7 |
| 3.2 NX 与数控系统之间数据交换方式 | 8 |
| 3.3 虚拟调试最终结构 | 10 |
| 第四章 虚拟调试 | 11 |
| 4.1 机床建模 | 11 |
| 4.2 SINUMERIK 840D sl 系统调试 | 12 |
| 4.3 OPC 配置 | 17 |
| 4.4 MCD 调试 | 18 |
| 第五章 成果验证 | 21 |
| 5.1 换刀验证 | 21 |
| 5.2 轴基本动作验证 | 23 |
| 5.3 模拟 NAS 试件切削 | 23 |
| 5.4 结论 | 24 |
| 6.1 总结 | 25 |
| 6.2 展望 | 25 |
| 参考文献 | 27 |
| 致 谢 | 29 |
| 附录 | 30 |
| 附录一 中文译文及外文资料 | 30 |
| 附录二 PLC 程序 | 38 |
| 附录三 换刀宏程序 | 48 |

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

2013 年的汉诺威工业博览会上德国正式推出“工业 4.0”战略，标志着制造业模式向智能化方向发展。紧随其后，2015 年在全国两会上李克强总理提出“中国制造 2025”计划。由此可见，制造业对一个国家重要性之大。制造业是实体经济的主体，是国民经济的支柱，是人民福祉的物质基础，也是今后我国经济“创新驱动，转型升级”的主战场^[1]。18 世纪中叶开启工业文明以来，世界强国的兴衰史和中华民族的奋斗史一再证明，没有强大的制造业，就没有国家和民族的强盛^[2]。要想使我国综合国力得到提高、国家安全得到保障、国家富强，首先制造业水平领先于别人^[3]。

数控机床被誉为制造业之母，其在制造业占有非常重要的地位。相对于发达国家的数控制造业而言，我国的数控制造业的发展还处于初级阶段，还存在很多的问题需要改善和调整^[4]。数控机床的生产、调试、维护以及如何提高加工效率就显得极为重要。当前数控机床在生产制造仍存在众多问题，如：制造效率低、制造成本高、能源消耗大、后期维护困难及维护成本高等。

基于数字化双胞胎概念的虚拟调试技术的出现使得这一问题迎刃而解。其主要应用在数控机床的设计与开发阶段。在此项技术下，机床研发制造某些环节将会由以往的“串行”制造转变为“并行”制造。在机床机械制造阶段，调试人员可以使用此技术提前进行真实数控系统对机床模型虚拟调试，使制造和调试同步进行，缩短了机电联调时间、工件编程加工调试时间，降低了成本。在机床设计与开发阶段使用虚拟调试技术相比以往具有以下优势：

1. 提前预知设计失误，降低企业制造成本^[5]；
2. 缩短调试时间 30%—50%^[6]；
3. 调试人员更加轻松、安全；
4. 降低后期维护成本。

在生产阶段，使用虚拟调试有以下优势：

1. 可以在产品实际投入生产之前就进行早期估算，降低制造风险^[7]；
2. 投入生产延迟少，废品和返工少，产品质量更稳定，交货时间更短^[8]。

实际上，在最终的产品制造出来之前，有很多个数字化模型代表着产品迭代的各个阶段。这些模型或者其中的一部分，仍然有可能被以后的型号或者产品线所采用，这也是数字化模型的一个附加好处^[9]。

数字化双胞胎—虚拟调试技术，通过虚实结合，使得制造商能够以更快的速度和更低成本制造出市场所需的产品^[10]。此项技术是推动数控高端装备技术研发、设计、应用及服务的重要平台的实施工具。根据全球知名信息分析公司 Gartner 的调研，预计到 2021 年，全球 50% 的大型工业公司将使用数字化双

胞胎技术，而根据我国国家统计局统计，我国 2000 万规模以上数控设备企业就有 5652 家，产业升级推动技术变革，未来数控数字化双胞胎技术人才需求很大。而且随着智能制造生产单元的推广，虚拟调试技术将更加普及。

本次研究的目的是针对于传统的机床调试、生产存在的效率低、成本高等问题，提出解决方案及验证，以达到缩短机床生产调试周期、减小调试人员工作量、为企业减少生产维护成本。

1.2 国内外研究现状

数字双胞胎最早由 Grieves 教授于 2003 年在美国密歇根大学的产品全生命周期管理课程上提出，其主要内涵为包括物理实体、虚拟实体、虚实之间的连接数据和信息的三维模型。由于当时技术和认知水平的局限，这一概念并没有得到重视，此后十年间都没有相关成果发表。

数字双胞胎模型在产品开发和生产中的整体使用将主导未来的产品时代，因为它们可以竞争性地创建高性能产品，西门子、PTC 公司、达索公司等国际相关平台对数字孪生已经进行了不同程度的验证与应用，虽然方法不尽相同，但都是将物理研究对象和数字模型进行信息融合，其核心是建立数字模型^[11]。在德勤公司 2017 年的一份案例研究中，一家工业制造企业决定采用数字双胞胎方法，来解决其在现场遇到的问题，从而解决维护费用和客户延迟交付。制造企业收集了设备以及正在生产的产品数据，来研究装配过程及其与产品质量的关系。因此，该项目能够识别低效率并优化装配流程，将返工率降低了 15% 至 20%^[12]。

数字化双胞胎引入国内仅仅只有几年的时间，目前国内仅有纯软件仿真，对于硬件软件结合的这种形式，国内还未见到。在国内目前处于探索阶段，有诸多问题解决。如：高仿真度、数据收集、实时检测等。未来，数字双胞胎也可结合物联网的数据采集、大数据处理和人工智能建模分析，实现对过去发生问题的诊断、当前状态的评估以及未来趋势的预测，并给予分析结果，模拟各种可能性，提供更全面的决策支持^[11]。

1.3 技术路线

技术路线如图 1-1 所示。

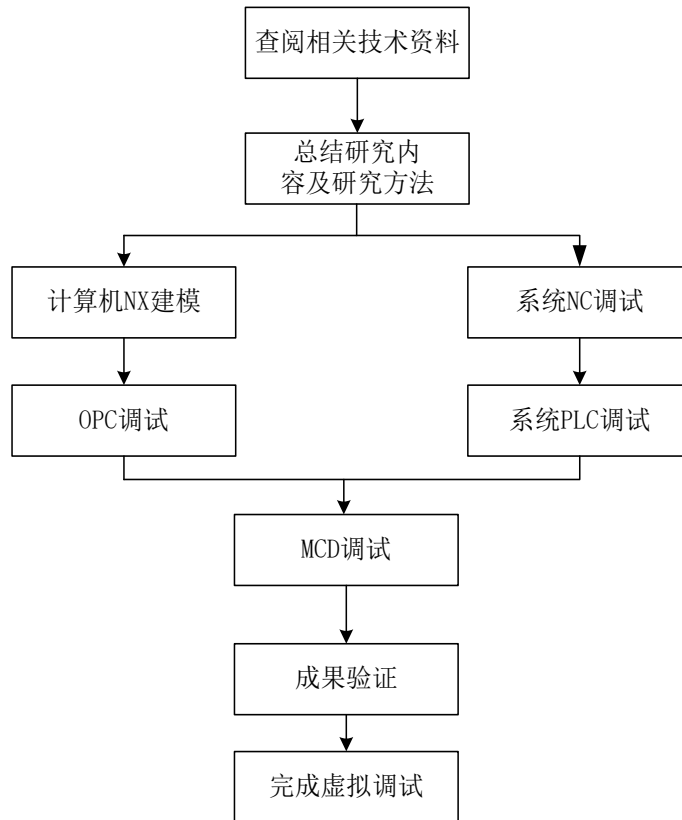


图 1-1 技术路线

1.4 主要研究内容

本项目是使用 SINUMERIK 840D sl 数控系统，通过 OPC（用于过程控制的软件标准接口）为中间“桥梁”，结合 NX 软件中的 MCD（机电一体化概念设计）功能控制 NX 中的 3D 虚拟五轴机床模型，实现进给轴、主轴和自动换刀等功能的正常动作，最终模拟 NAS 零件的试切，验证调试成功。

主要工作内容以及章节安排如下：

第一章综述其虚拟调试的背景、意义、国内外研究成果。

第二章虚拟调试概述、虚拟调试应用、虚拟调试原理。

第三章确立研究方案。包括数控系统选型、数控系统与 NX 软件数据交换方式、确立虚拟调试整体架构。

第四章实施方案。机床建模；NC 参数设置和 PLC 调试；用于数控系统与 NX 软件数据交换 OPC 调试；MCD 运动副设置、传感器、碰撞体、仿真序列设置。

第五章方案验证。换刀验证、轴运动验证、NAS 零件试切验证调试成功。

第六章总结与展望。总结完成情况，设想后期发展。

第二章 虚拟调试应用情况分析

2.1 虚拟调试介绍

虚拟调试就是通过虚拟技术创建出物理制造环境的数字复制品，以用于测试和验证产品设计的合理性。对于数控机床来说，虚拟调试以数字模型的方式代替了传统真实数控机床机械部分，数控系统控制对象不再是真实的物理机械，而是使用 3D 软件建立的机床模型。虚拟调试结构和传统调试区别如图 2-1 所示。

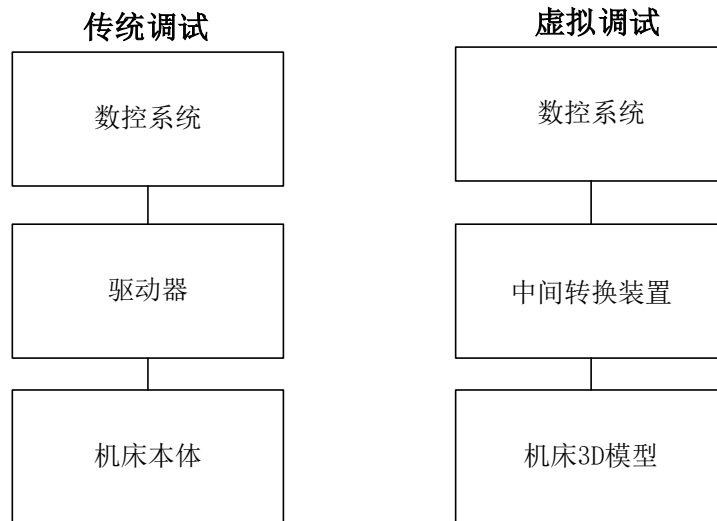


图2-1 虚拟调试结构和传统调试区别

2.2 虚拟调试应用

虚拟调试基于数字化的数控设备模型及设备设计信息，从数控系统端出发，结合了数字化的机械设计、电气及自动化控制。常用于航空航天、船舶、机床、机械制造、自动化单元等的样机研发、设备改造、远程维护领域。应用于覆盖从产品设计—生产规划—生产工程—生产执行—直到服务的全价值链。

虚拟调试还可应用于课程教学，围绕计算 CAD 及数控系统技术，能够将教学课程中的机械设计、二维制图、三维设计与装配、数控调试、数控编程、机电一体化及毕业设计课程相结合，适合于机械设计、机械制造、机电一体化、数控加工等领域。

2.3 数控机床虚拟调试原理

数控机床工作原理是，使用数控系统通过各种总线连接到 PLC 外围 I/O、驱动器、伺服电机等，从而控制机床。数控机床工作原理如图 2-2 所示。

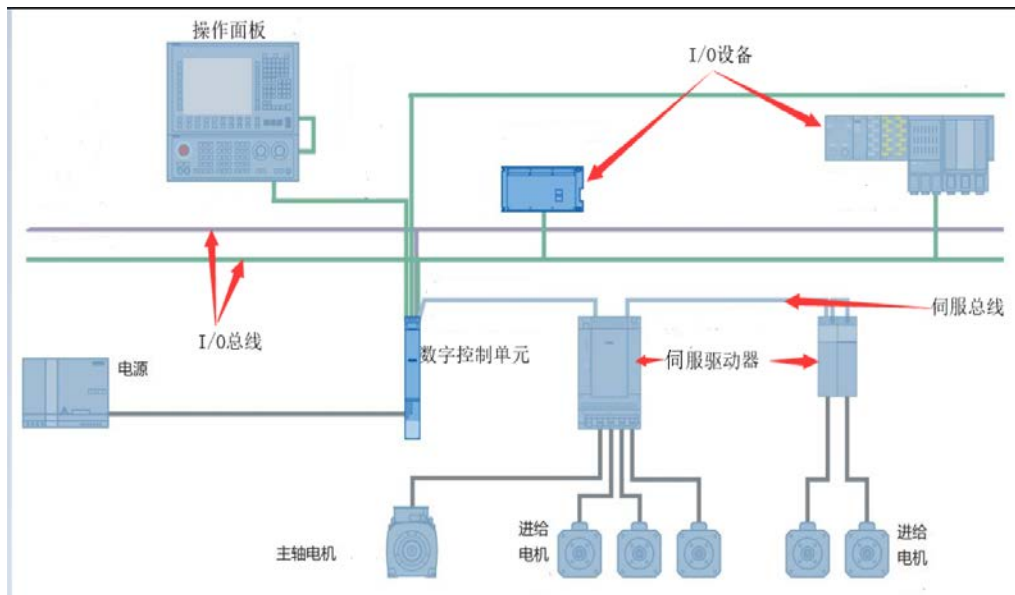


图 2-2 数控机床工作原理

对于数控机床虚拟调试，数控系统通过通讯总线（如 SINUMERIK 840D s1 PROFIBUS、PROFINET 总线）连接到中间转换单元，中间转换单元能够仿真这些外围 I/O 口的总线通讯。数控系统的控制信号经过中间转换单元传送到计算机上机床模型，从而实现机床的仿真动作；同时从机床反馈过来的状态信号也可通过中间转换单元送到数控系统上。在这个过程中，中间转换单元充当了数控系统和计算机上机床模型数据交换“桥梁”。虚拟调试结构如图 2-3 所示。



图 2-3 一种虚拟调试结构

2.4 NX 的 MCD 功能

MCD 适用于机电一体化产品的概念设计。借助该软件，可对机电一体化产品中的自动化相关行为如：机械部件、传感器、驱动器和运动的概念进行 3D 建模和仿真。

使用 MCD 使建模和仿真变得简单，对于设备的每个部件，可通过直接引用

需求和使用交互式仿真来验证正确操作，迅速指定运动副、刚体、运动、碰撞行为及运动学和动力学的其他方面。通过添加诸如传感器和驱动器等其他细节，可为具体电气工程和软件开发准备好模型。NX MCD 模块如图 2-4 所示。

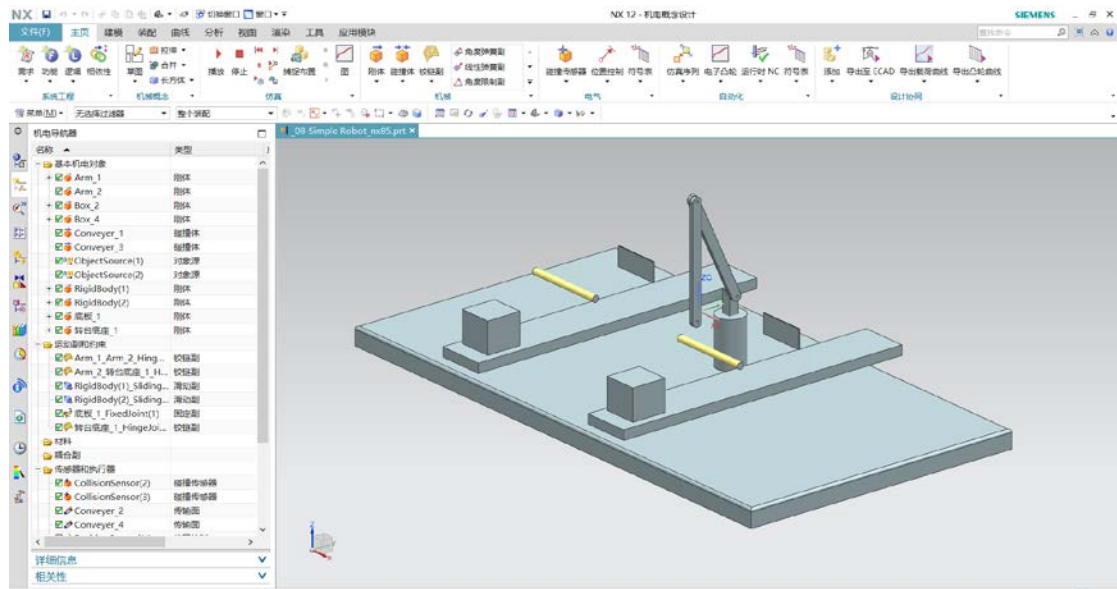


图 2-4 NX MCD 模块

第三章 虚拟调试方案设定

3.1 数控系统选型

学校实验室现有 FANUC 0i-C、FANUC 0i -D、FANUC 0i -F、SINUMERIK 828D 和 SINUMERIK 840D sl 数控系统。

本次的毕业设计题目是《基于 NX 软件五轴机床机械设计及虚拟调试》，要求使用真实五轴数控系统控制 NX 五轴机床模型。基于毕业设计题目和控制要求，能实现五轴五联动插补控制的数控系统仅有 SINUMERIK 840D sl 可以实现。所以，本次毕业设计确定选用的数控系统为 SINUMERIK 840D sl。

SINUMERIK 840D sl 是 SIEMENS 公司推出的一款定位于高端应用的数控系统，如图 3-2 所示。其具有模块化以及开放、灵活的特点。其集成 CNC、HMI、SIMATIC S7-300 PLC 一体，通过高速、稳定的 PROFIBUS、PROFINET 通讯标准将外围的驱动、I/O、操作面板等设备连接到 NCU，其可最多控制 10 个方式组，10 个通道，96 个轴等。



图 3-2 SINUMERIK 840D sl 数控系统

SINUMERIK 840D sl NCU 按照性能不同可分为三类:NCU710.3、NCU720.3、NCU730.3。表 3-2 所示。

表3-2 840D sl 各版本区别

| | NCU710.3 | NCU710.3 | NCU710.3 |
|-----------|----------------|----------------|----------------|
| 最大通道数量 | 2 | 10 | 10 |
| 最大控制轴数量 | 8 | 31 | 31 |
| 高速 I/O 端子 | 12DI、8DI/DO | 12DI、8DI/DO | 12DI、8DI/DO |
| PLC | PLC 317-3DP/PN | PLC 317-3DP/PN | PLC 317-3DP/PN |

本次选用的数控系统如图 3-3 所示。主要硬件型号如表 3-3 所示。



图 3-3 SINUMERIK 840D sl 实训设备

表3-3 840D sl 主要硬件型号

| 名称 | 规格型号 | 订货序列号 |
|--------|----------------------------|--------------------|
| NCU 模块 | NCU 710.3B PN/317 | 6FC5371-0AA30-0AB0 |
| 操作面板 | OP 010 (640*480) | 6FC5203-0AF00-0AA3 |
| 控制面板 | MCP 483C PN | 6FC5303-0AF22-0AA1 |
| TCU 板 | TCU 30.3(thin client unit) | 6FC5312-0DA00-1AA1 |

3.2 NX 与数控系统之间数据交换方式

在虚拟调试中，数控系统是无法直接控制 NX 中的 3D 数控机床模型。NX 与数控系统之间必须得有转换装置，用于把 NX 和数控系统连接起来。由此选择了两种方案，它们分别是 SIMIT 和 OPC。

3.2.1 SIMIT 仿真平台

SIMIT 是 SIEMENS 推出的一款用于仿真的平台，SIMIT 最初是为解决汽车产线调试。SIMIT 提供了实时仿真环境，可以对自动化程序进行全面检查，并且即使在设备不可用的情况下，也可以直接从工程办公室以舒适的方式对系统，机器和过程进行虚拟调试。图 3-4 为 SIMIT 仿真平台。



图 3-4 SIEMENS SIMIT 仿真平台

SIMIT 仿真平台可以方便的读取/写入 SINUMERIK 840D sl PLC I/O、数据块等变量，但不能直接读取 SINUMERIK 840D sl 轴坐标信息。这时就需要借助 SINUMERIK 840D sl 独有的 ADAS(轴数据输出) 功能。ADAS 可以将机床几何轴、主轴位置信息写入到指定的 PLC 数据块供 SIMIT 读取。SIMIT 读取到 SINUMERIK 840D sl PLC、轴位置信息后可与 NX 通过 SHM（共享内存）的方式完成数据交换。由此通过 SIMIT 就可以完成 SINUMERIK 840D sl 与 NX 数据交换。具体结构如图 3-5 所示。

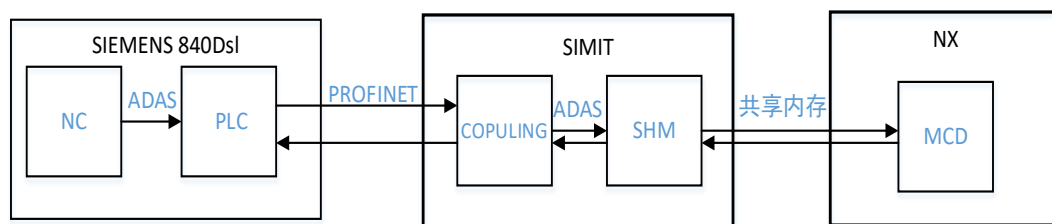


图3-5 SIMIT 作为“桥梁”调试架构

3.2.2 OPC 协议

OPC (OLE for Process Control) 应用于过程控制的 OLE (对象连接与嵌入)。在工业控制中，要监控或访问某一设备，软件开发者则需要针对这种设备开发专用驱动程序，这种方式给开发者带来了诸多不便。OPC 的出现解决了这个问题，OPC 为硬件厂商和应用软件开发者提供了一套标准的接口^[13]。OPC 由 OPC 客户端和 OPC 服务器两部分构成，只要符合 OPC 服务规范，OPC 客户端就可以实现与硬件设备进行数据交换。

KepserverEx 软件是全球应用广泛的 OPC 服务器，支持工业市场上大多设备的驱动程序和组件，集 OPC 客户端和 OPC 服务器一体，使用 KepserverEx 软件只要稍作简单设置就可以完成数控系统与 NX 数据交换。

SINUMERIK 840D sl 系统支持 OPC 功能。使用 OPC 客户端可读取

SINUMERIK 840D sl 的轴位置、轴速度、I/O 状态、报警等信息^[14]，通过 OPC 服务器可实现 SINUMERIK 840D sl 与 NX MCD 完成数据交换，从而实现虚拟调试。

3.2.3 确定 NX 与数控系统之间数据交换方式

SIMIT 与 OPC 相比各有优势，最大区别是 SIMIT 属于硬件层面，而 OPC 是软件层面。SIMIT 与 OPC 比较具体如表 3-4 所示。

表 3-4 SIMIT 与 OPC 比较

| | 价格 | 难易程度 | 完成时间 | 优缺点 |
|--------------|----|------|------|---------|
| OPC | 较低 | 简单 | 短 | 通讯有延迟 |
| SIMIT | 很高 | 较难 | 较长 | 通讯几乎无延迟 |

由表 3-4 可知 OPC 与 SIMIT 相比虽然其在通讯速度上有延迟，但是在价格还是难易程度上都要优于 SIMIT，且其在通讯延时的问题上在可以接受的范围内，所以 NX 与数控系统之间数据交换方式本次选用 OPC 方式。

3.3 虚拟调试最终结构

虚拟调试最终结构是使用 KepserverEx 软件作为中间“桥梁”，作为 SINUMERIK 840D sl 和 NX 数据交换的中间环节。图 3-6 所示为虚拟调试最终结构。

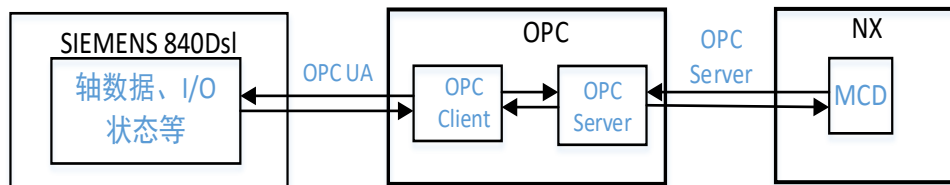


图 3-6 虚拟调试最终结构

第四章 虚拟调试

确定完虚拟调试整体架构后，本章将讨论虚拟调试具体实施方案。虚拟调试与传统调试在数控系统的调试上大致相同。由于机床虚拟调试的机械结构部分由 3D 机床模型代替，所以首先是要建立 3D 机床模型。完成机床机械结构建模后就可以进行数控系统参数、PLC 调试。

4.1 机床建模

五轴机床根据回转轴结构不同大致可分为五类：双摆头式、俯垂型摆头式、双转台形式、俯垂型工作台式、一摆一转形式。它们如图 4-1 所示。

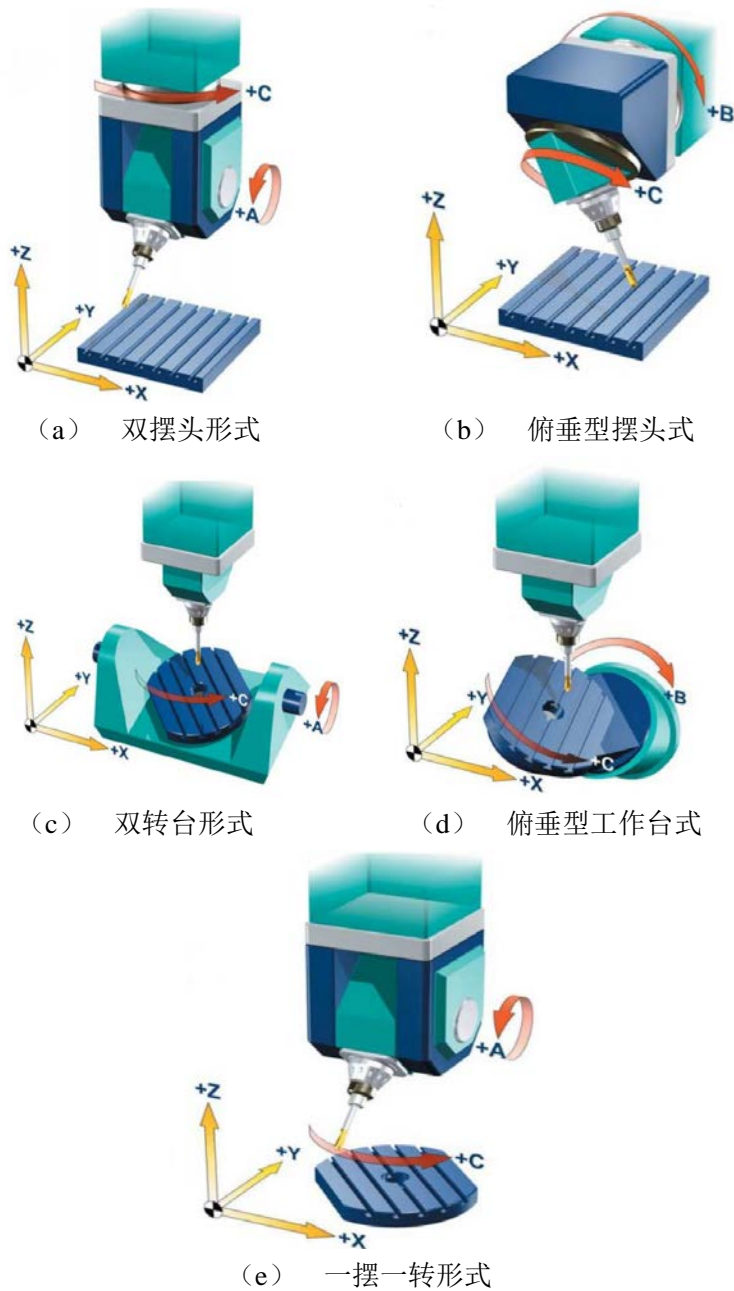


图 4-1 五轴机床类型

五种结构类型机床在零件加工上各有优势，双摆头式结构较其他结构更适合加工中、大类型零件，且较其他结构更为灵活，所以本次选用使用双摆头式结构机床。使用 NX 软件建立双摆头式五轴机床模型，五个插补轴分别为 X、Y、Z、A、C。刀库类型为斗笠式刀库，最大装刀数量为 6。刀库采用三相异步电机加槽轮机构控制，并由计数传感器确定刀库当前位置。五轴机床模型如图 4-2 所示。

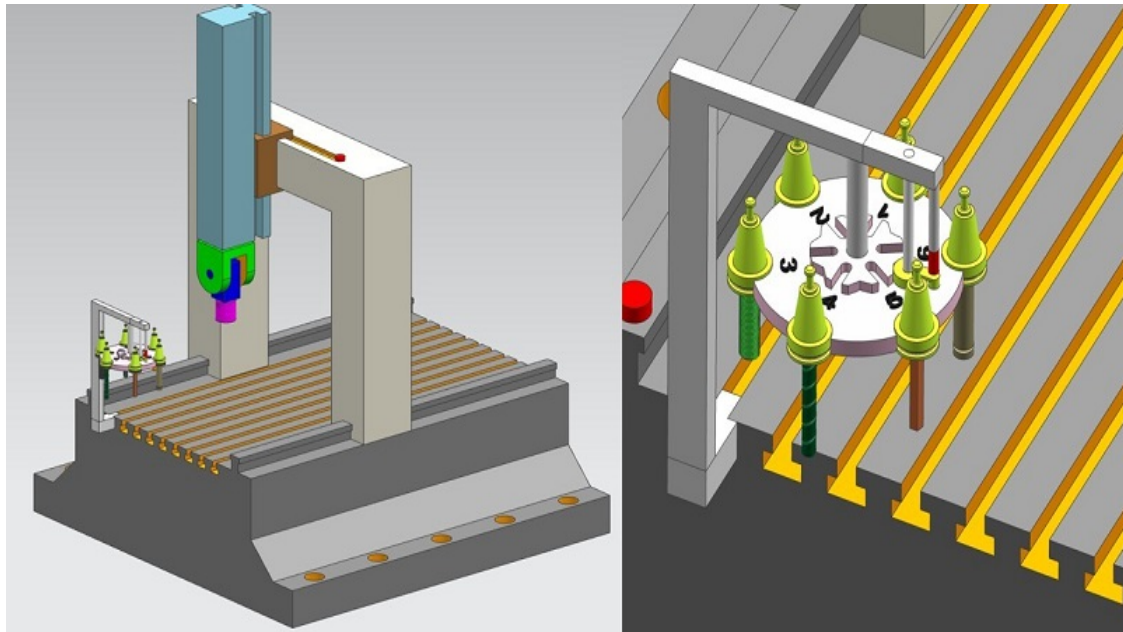


图 4-2 五轴机床模型

4.2 SINUMERIK 840D sl 系统调试

4.2.1 参数配置

数控系统能够正确运行，对应的各种参数必须正确设定。参数正确设置是保证数控机床正常运转的一个重要条件。SINUMERIK 840D sl 参数主要有三部分：通用机床数据、通道机床数据、轴机床数据。

在配置参数前需对 NCK 模块进行 NC 数据总清，总清目的是删除用户数据；系统数据初始化；装载标准机床数据，以达到整个系统规定的出厂时初始状态。SINUMERIK 840D sl 包含了大量参数，配置参数时不必全部设置。针对于本次毕业设计，仅配置部分参数就可实现预期目标。有关参数设置如表 4-1 所示。

表 4-1 需设置的相关参数

| 参数号 | 含义 | 设定值 | 参数号 | 含义 | 设定值 |
|----------|--------------------------------|------|----------|------------------------------|---------|
| 10000[0] | \$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB | MX1 | 20080[1] | \$MC_AXCONF_CHANAX_ NAME_TAB | Y |
| 10000[1] | \$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB | MY1 | 20080[2] | \$MC_AXCONF_CHANAX_ NAME_TAB | Z |
| 10000[2] | \$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB | MZ1 | 20080[3] | \$MC_AXCONF_CHANAX_ NAME_TAB | A |
| 10000[3] | \$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB | MA1 | 20080[4] | \$MC_AXCONF_CHANAX_ NAME_TAB | C |
| 10000[4] | \$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB | MC1 | 20080[5] | \$MC_AXCONF_CHANAX_ NAME_TAB | SP |
| 10000[5] | \$MN_AXCONF_ MACHAX_NAME_TAB | MSP1 | 20110 | \$MC_RESET_MODE_ MASK | 4041 |
| 10715[0] | \$MN_M_NO_FCT_ CYCLE | 6 | 20310 | \$MC_TOOL_MANAG EMENT_MASK | 2 |
| 10716[0] | \$MN_M_NO_FCT_ CYCLE_ NAME | L6 | 22560 | \$MC_TOOL_CHANGE_ M_CODE | 206 |
| 17530 | \$MN_TOOL_DATA_ CHANGE_COUNTER | 1FH | 20700 | \$MC_REFP_NC_START_ LOCK | 0 |
| 18080 | \$MN_MM_TOOL_ MANAGEMENT_MASK | 2FH | 52200 | \$MCS_TECHNOLOGY | 2 |
| 20070[0] | \$MC_AXCONF_ MACHAX_USED | 1 | 30300 | \$MA_IS_ROT_AX | 0/1 |
| 20070[1] | \$MC_AXCONF_ MACHAX_USED | 2 | 30310 | \$MA_ROT_IS_MODULO | 0/1 |
| 20070[2] | \$MC_AXCONF_ MACHAX_USED | 3 | 30320 | \$MA_DISPLAY_IS_ MODULO | 0/1 |
| 20070[3] | \$MC_AXCONF_ MACHAX_USED | 4 | 30330 | \$MA_MODULO_RANGE | 90/360 |
| 20070[4] | \$MC_AXCONF_ MACHAX_USED | 5 | 30340 | \$MA_MODULO_RANGE_ START | -90/360 |
| 20070[5] | \$MC_AXCONF_ MACHAX_USED | 6 | 35000 | \$MA_SPIND_ASSIGN_TO_ MACHAX | 1 |
| 20080[0] | \$MC_AXCONF_ CHANAX_NAME_TAB | X | | | |

4.2.2 PLC 调试

在数控机床中，PLC 作用主要是顺序控制、外围电器电路控制、报警处理等。如：机床润滑、冷却、照明、自动换刀、报警文本等。SINUMERIK 840D s1 内置 SIMATIC S7-300PLC，SIEMENS 厂家已将大部分机床常用功能封装成 FC/FB 程序块，调试者只需根据实际情况调用相应程序块或作以简单修改即可完成 PLC 调试。

与参数配置类似，PLC 调试之前需要对 PLC 做数据总清以达到系统规定的初始状态。

1. PLC 硬件组态

SIMATIC S7-300 系列以上 PLC 调试时首先必须进行硬件组态，硬件组态

反应了 PLC 各硬件模块之间连接关系、通讯地址、I/O 分配等重要信息。SINUMERIK 840D sl PLC 硬件组态较为简单，仅需组态一块 PP72x48PN I/O 板，其通过 PROFINET 通讯方式连接到 NCU。图 4-3 为硬件组态。

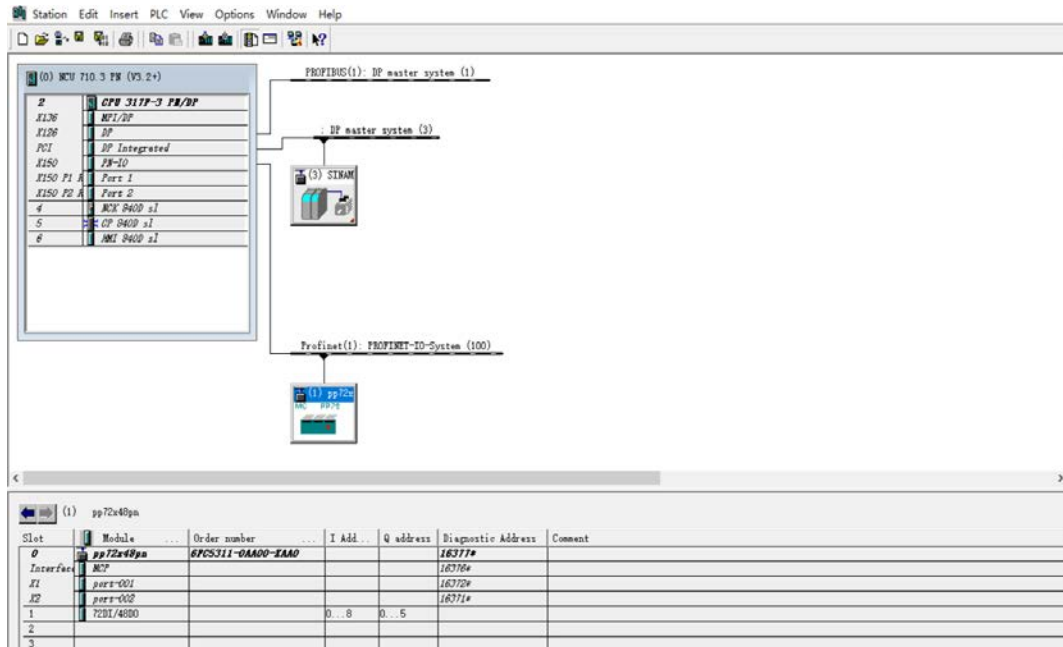


图 4-3 PLC 硬件组态

2. 基本功能调试

基本功能也是数控机床运行的一个重要条件，在数控机床中属于最基础、最重要的功能。如：急停、倍率、报警、操作方式选择、轴控制等。

SINUMERIK 840D sl PLC 程序调试前需导入 SINUMERIK 840D sl ToolBox PLC 标准库，标准库提供了大部分常用功能 FC/FB 程序块。部分 PLC 程序块、信号如表 4-2 所示。

表 4-2 程序块、信号地址

| 信号地址、程序块 | 方向 | 说明 | 备注 |
|--------------|-------------|----------------|----------|
| FB1 | PLC | 基本程序、启动部分 | |
| FB3 | PLC | PLC 与 NCK 数据交换 | |
| FC19 | PLC | MCP483 | |
| FC52 | PLC | WCS/MCS 切换 | 非标准库、自编写 |
| FC10 | PLC | 报警 | |
| DB3x.DBX2.1 | PLC---->NCK | 轴 x 控制使能 | |
| DB3x.DBX21.7 | PLC---->NCK | 轴 x 脉冲使能 | |
| DB3x.DBX1.5 | PLC---->NCK | 轴 x 测量环使能 | |
| DB10.DBX56.1 | PLC---->NCK | 急停 | |
| DB10.DBX56.2 | PLC---->NCK | 应答急停 | |
| DB19.DBX0.7 | PLC---->NCK | WCS/MCS 切换 | |

PLC 程序见附录二。PLC 程序说明如下：

- (1) OB1: PLC 主程序。
- (2) FC2: 基本程序, 循环部分。
- (3) FC19: 铣床版机床控制面板 MCP 483 程序。
- (4) FC21: NCK、PLC 数据交换。
- (5) FC40:手轮、MCP 倍率选择。
- (6) FC43:急停控制。
- (7) FC44:报警处理。
- (8) FC45:OFF1、OFF2、OFF3 上电使能。
- (9) FC46:轴控制使能。
- (10) FC140: 换刀处理。
- (11) FB1:MCP 配置。

3. 自动换刀

自动换刀是保证数控机床加工效率一个重要功能。由于自动换刀的实现需要复杂的逻辑判断, 仅仅靠 PLC 是很难完成的。通常做法是通过 PLC 和宏程序共同协作来完成这一复杂任务。PLC 主要任务是处理外围传感器信号、控制刀盘旋转、主轴松刀紧刀等, 宏程序主要轴位置控制。

(1) 换刀流程设计

自动换刀的实现需要复杂的逻辑判断, 所以首先根据实际换刀情况编写换刀流程图, 然后根据换刀流程图编写换刀宏程序、PLC 程序。换刀思路如下:

- 1) 要换的刀和主轴刀号一致, 不进行换刀。
- 2) 主轴无刀时。刀库旋转至和要换刀号一致, 主轴抓刀, 主轴远离刀库换刀结束。
- 3) 主轴有刀时, 且要换刀号不为零。刀库旋转至和主轴刀号一致, 主轴还刀。刀库旋转至和要换刀号一致, 主轴抓刀, 主轴远离刀库换刀结束。
- 4) 主轴有刀时, 且要换刀号为零。刀库旋转至和主轴刀号一致, 主轴还刀, 换刀结束。

根据换刀思路编写换刀流程图, 换刀流程图如图 4-4 所示。

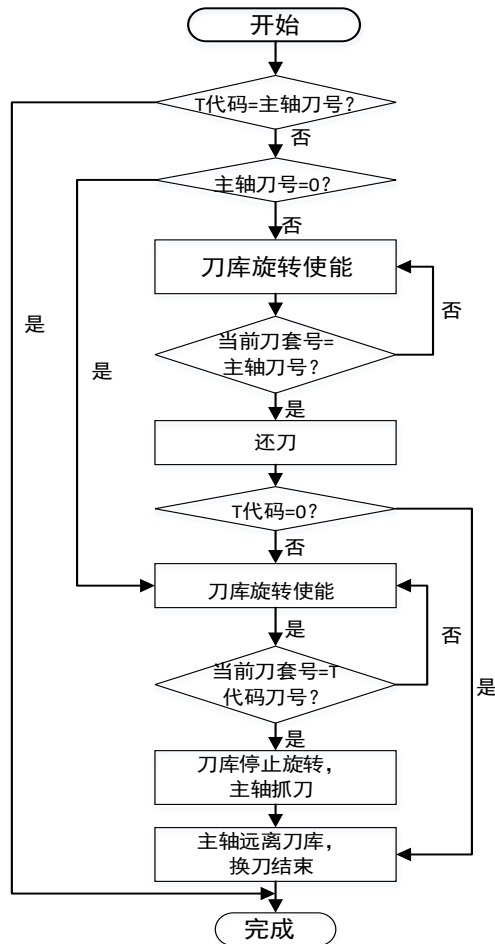


图 4-4 换刀流程图

(2) 换刀宏程序

确定好换刀流程图后就可根据换刀宏程序。SINUMERIK 系列数控系统习惯以 L6 命名的子程序作为换刀宏程序。换刀宏程序见附录三。

(3) PLC 调试

PLC 在自动换刀中的作用主要有控制刀盘旋转、刀盘位置检测（计数）、松刀/紧刀，向 NCK 发送刀盘当前位置、主轴当前刀号、预换刀号等信息。

虚拟调试和真实 PLC 调试略有不同，这是由于 PLC 工作原理导致的。PLC 工作方式大致分三个阶段，即输入采样阶段、用户程序执行阶段和输出刷新阶段。在输入采样阶段，PLC 以扫描方式依次读入所有输入状态和数据，并将它们存入 I/O 映象区中的相应单元内。在用户程序执行阶段，PLC 总是按由上而下的顺序依次扫描用户程序。当用户程序扫描结束后，PLC 就进入输出刷新阶段^[13]。

在输入采样阶段，PLC 读取外部开关量、模拟量信号储存到 I 映象区，因此 PLC 中 I 映象区的信号状态为只读，虚拟调试中没有真实的物理按钮或传感器，只能通过软件以写入的方式改变 I 映象区的信号状态，而 I 映象区的信号状态为只读，这就造成矛盾。解决这个问题的最好方式是寻找一种即可读取又可以写入

的信号代替 I 映像区的信号。SIMATIC S7-300 PLC 中 M 映像区信号为可读、可写。选取 M 映像区信号可存储虚拟调试中传感器、开关量等信号状态。与换刀有关信号、程序块如表 4-3 所示。

表 4-3 换刀有关信号、程序块

| 信号地址、程序块 | 方向 | 说明 | 备注 |
|--------------|---------------|----------------|----------|
| FC21 | PLC <---->NCK | PLC 与 NCK 数据交换 | |
| FC140 | PLC | 自动换刀 | 非标准库、自编写 |
| DB140.DBW0 | PLC | 刀盘刀号 | |
| DB140.DBW2 | PLC | 主轴刀号 | |
| DB140.DBW4 | PLC | T 代码刀号 | |
| DB21.DBX61.0 | NCK---->PLC | T 功能 1 | |
| DB21.DBW118 | NCK---->PLC | T 代码刀号 | |
| DB21.DB205.7 | NCK---->PLC | M95(刀库正转使能) | |
| DB21.DB206.0 | NCK---->PLC | M96(刀库反转使能) | |
| DB21.DB206.1 | NCK---->PLC | M97(刀库停止使能) | |
| DB21.DB206.2 | NCK---->PLC | M98(松刀使能) | |
| M103.0 | PLC | 刀盘计数传感器 | |

4.3 OPC 配置

OPC 客户端读取 SINUMERIK 840D sl 系统的轴坐标信息、主轴转速、PLC I/O 状态等信息经由 OPC 服务器发送到 NX MCD, 从而完成 SINUMERIK 840D sl 对 NX 3D 机床模型控制。OPC 读取 SINUMERIK 840D sl 轴数据、PLC 信息如表 4-4 所示。

表 4-4 OPC 读取 SINUMERIK 840D sl 相关数据

| 标记名称 | 地址 | 数据类型 | 权限 |
|-------------|--|---------|-----|
| X | ns=2;s=/Channel/MachineAxis/actToolBasePos[u1,1] | 双精度 | 只读 |
| Y | ns=2;s=/Channel/MachineAxis/actToolBasePos[u1,2] | 双精度 | 只读 |
| Z | ns=2;s=/Channel/MachineAxis/actToolBasePos[u1,3] | 双精度 | 只读 |
| A | ns=2;s=/Channel/MachineAxis/actToolBasePos[u1,4] | 双精度 | 只读 |
| C | ns=2;s=/Channel/MachineAxis/actToolBasePos[u1,5] | 双精度 | 只读 |
| SP | ns=2;s=/Channel/Spindle/actSpeed[u1,1] | 双精度 | 只读 |
| ToolRelease | ns=2;s=/Plc/Q0.1 | Boolean | 读/写 |
| MagCW | ns=2;s=/Plc/Q0.2 | Boolean | 读/写 |
| MagCCW | ns=2;s=/Plc/Q0.3 | Boolean | 读/写 |
| MagCount | ns=2;s=/Plc/M103.0 | Boolean | 读/写 |

表 4-4 数据经由 OPC 服务器发送至 NX MCD。图 4-5 为 OPC 服务器配置完成界面。

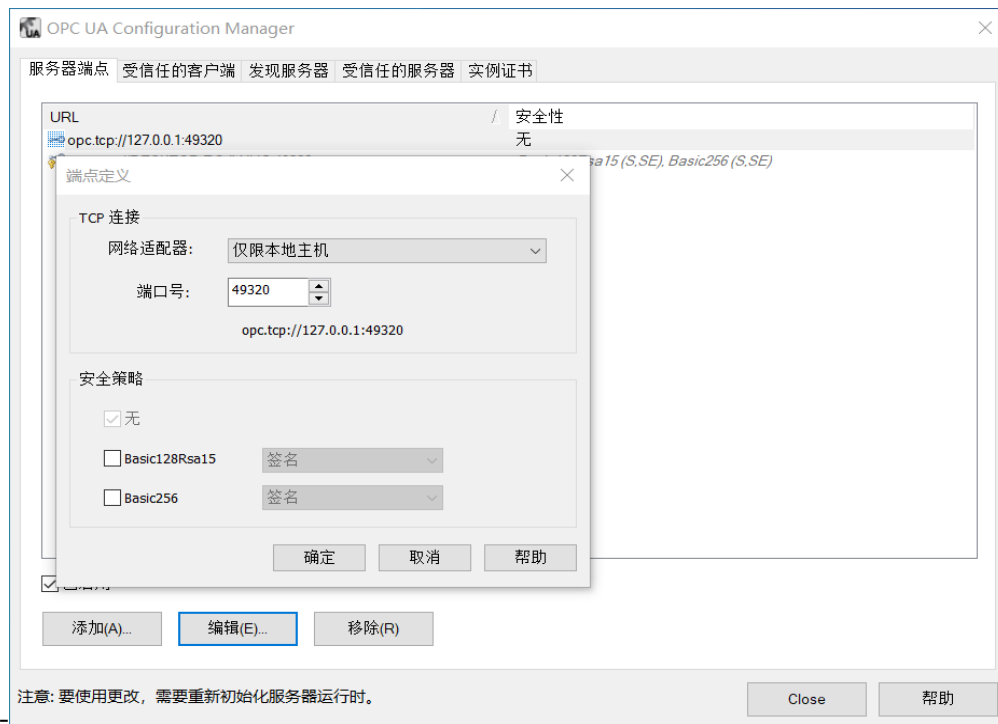


图 4-5 OPC 服务器配置

OPC 服务器配置最主要三点：OPC 服务器 IP 地址、端口号、安全策略。OPC 服务器 IP 地址和端口号是 NX 的 MCD 访问 OPC 服务器数据重要的条件。由于 NX 的 MCD 不支持加密服务器，所以 OPC 服务器安全策略为无，否则 NX 的 MCD 无法访问 OPC 服务器。

4.4 MCD 调试

MCD 调试主要工作有刚体设置、运动副设置、传感器与碰撞体设置、位置控制、仿真序列设置、信号连接设置等。

1. 刚体

在 MCD 中，具有运动性质的部件都必须设置为刚体，部件一旦被设置为刚体那么其就有了质量，会受到重力作用。X、Y、Z、A、C 轴，主轴、刀盘、刀具都应视为刚体。

2. 运动副

运动副约束刚体运动，MCD 中支持多种运动副，本次调试用到了铰链副、滑动副。对于回转轴要设置刚体为铰链副，如主轴、A、C 轴、刀盘。对于直线轴则要设置其为滑动副，如 X、Y、Z 轴。

3. 传感器、碰撞体

传感器与碰撞体总是成对出现，两物体被设置为碰撞体后，他们之间会有力的相互作用。同样，当传感器碰撞到碰撞体后就会触发，从而实现了对真实传感器的模拟。

4. 位置控制

位置控制用于接收 OPC 服务器读取 SINUMERIK 840D sl 系统的轴数据，从而实现 NX 的 MCD 轴位置控制。

5. 仿真序列

真实机床中换刀中，刀具可以通过机械结构安装在刀盘中，通过主轴松夹刀装置将主轴加紧。但是在 MCD 中很难通过机械结构实现，解决办法是通过设置仿真序列选择刀具基体，通过不同条件选择刀具基体是刀盘还是主轴。如图 4-6 所示，演示了 1 号刀具以刀盘为基体条件。

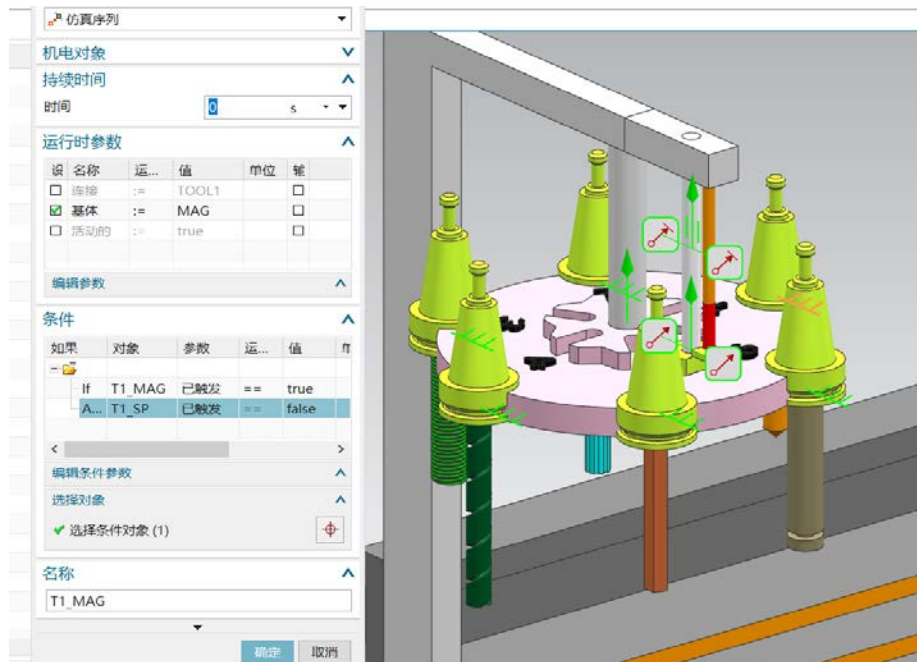


图 4-6 刀具仿真序列

6. 信号适配器

信号适配器决定了 MCD 传感器信号、速度信号、位置信号等信息和外部 (OPC 服务器) 信号之间对应关系。如图 4-7 所示，为信号适配器部分列表。

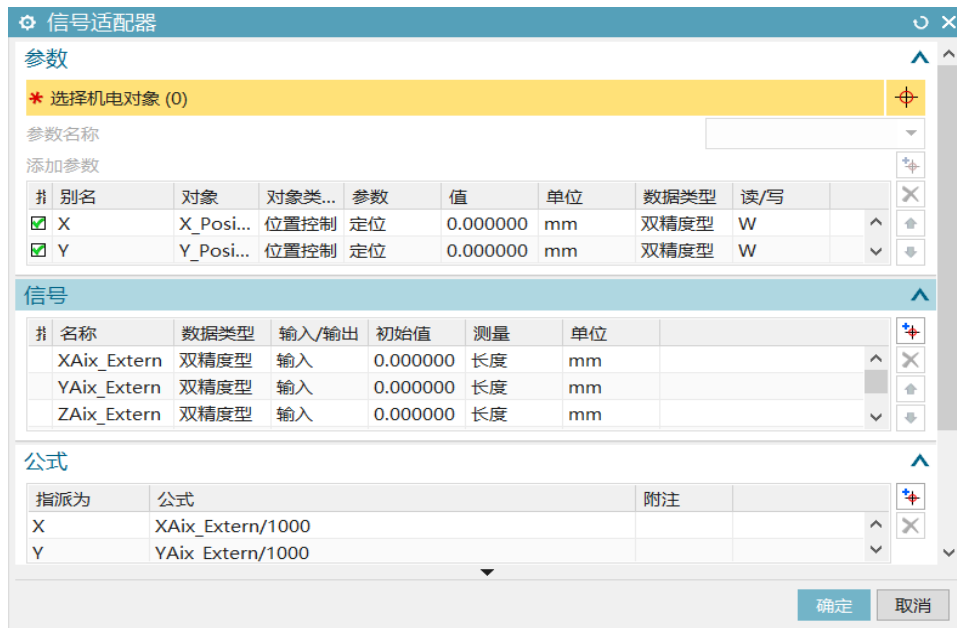


图 4-7 信号适配器

7. 信号连接

信号连接作用将 MCD 信号于 OPC 服务器信号进行映射，真正的将内外信号连接起来，实现 MCD 内部信号与 OPC 服务器信号“握手”。如图 4-8 所示。

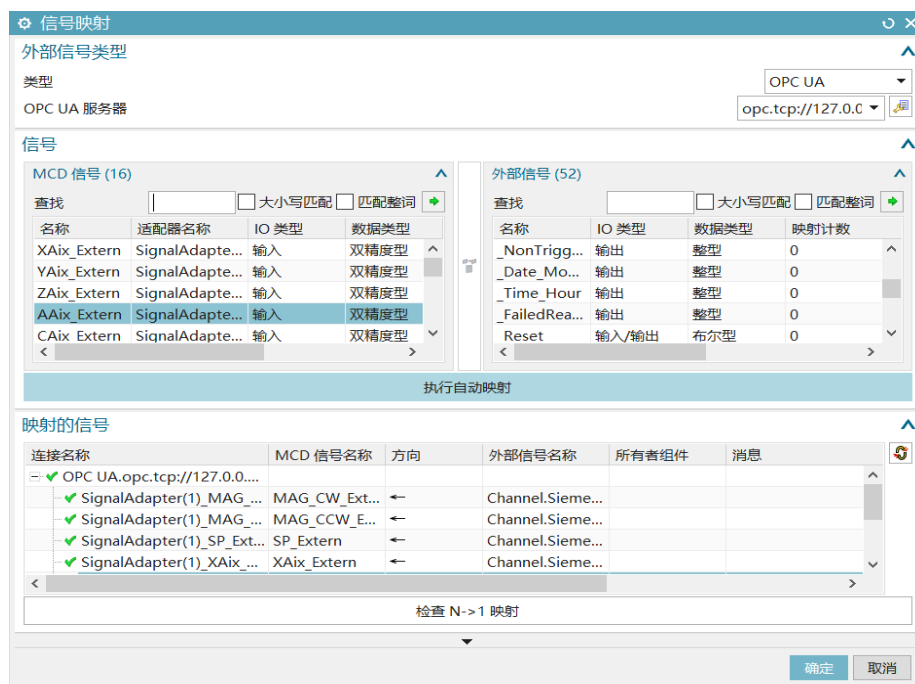


图 4-8 信号连接

经过以上虚拟调试方案实施，完成了数控系统参数设置、PLC 调试、OPC 调试、MCD 调试。为后续硬件与软件联合调试验证打下了基础。

第五章 成果验证

经过调试后，需对调试成果加以验证，以证明调试是否正确。验证内容主要包括换刀功能，轴运动的正常工作。

5.1 换刀验证

自动换刀应达到指标：

1. 对操作者误选刀号做出判断，对于错误刀号不执行并作出相应提醒。
2. 对于乱库位置发生错乱，应提供对应指令实现刀库归零。
3. 操作者发出换刀指令，应能快速准确的完成换刀动作。

验证一：模拟对换刀刀号错误检测，MDA 方式下输入 M6T7，由于刀盘最大装刀数为 6，执行 M6T7 会出现刀号错误报警。如图 5-1 所示为换刀刀号错误报警。

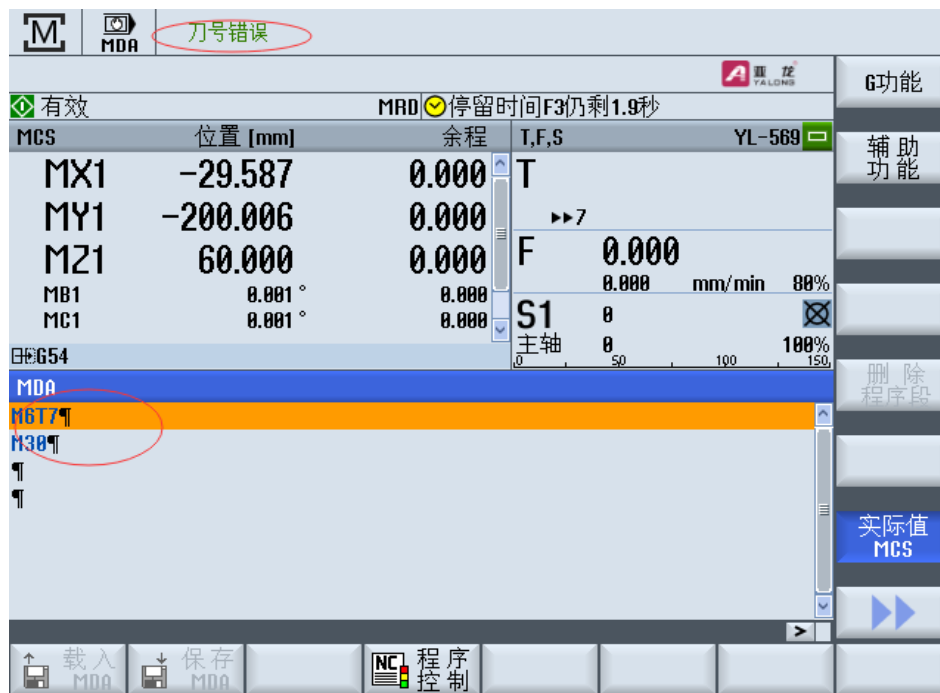


图 5-1 换刀刀号错误报警

验证二：模拟刀库位置错乱，刀库归零。JOG 模式下，选择 MCP 面板刀库回零按钮可实现刀库一键回零。如图 5-2 所示，刀库一键回零。

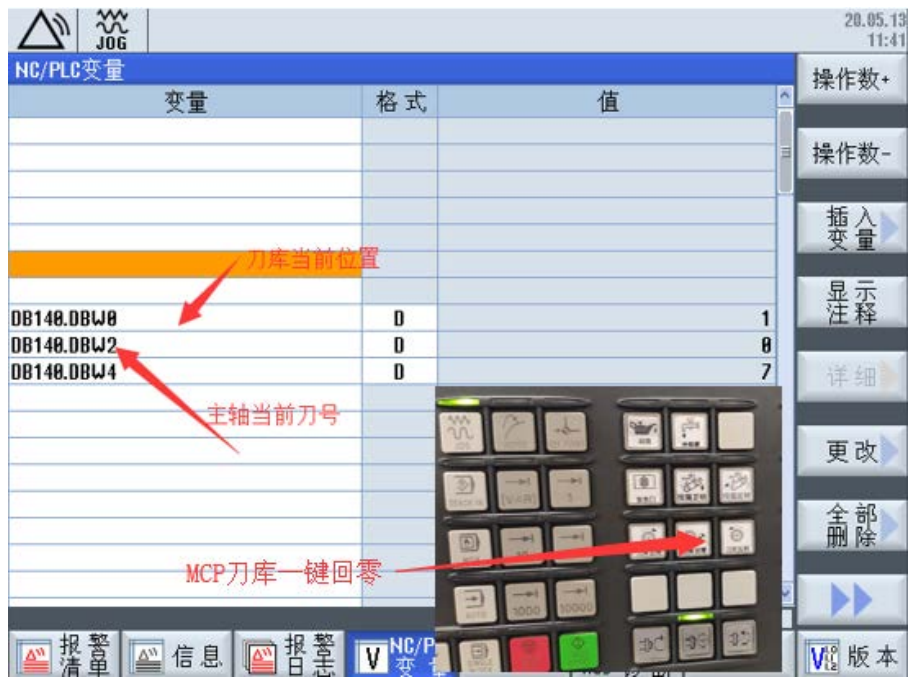


图 5-2 刀库回零

验证三：MAD 模式下输入 M6Tx,可实现正确换刀。换刀验证如表 5-1 所示。

表 5-1 机床换刀程序调试表

| 序号 | 刀库换刀位 | 主轴刀号 | T 指令 | 观察现象 | 结果 |
|----|-------|------|------|-------------|----|
| 1 | 1 | 0 | 1 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 3 | 2 | 2 | 3 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 4 | 3 | 3 | 4 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 5 | 4 | 4 | 5 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 6 | 5 | 5 | 6 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 7 | 6 | 6 | 5 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 8 | 5 | 5 | 4 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 9 | 4 | 4 | 3 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 10 | 3 | 3 | 2 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 11 | 2 | 2 | 1 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 12 | 1 | 1 | 6 | 最短路径换刀 | 正常 |
| 13 | 6 | 6 | 4 | 最短路径换刀 | 正常 |
| 14 | 4 | 4 | 5 | 最短路径换刀 | 正常 |
| 15 | 5 | 5 | 2 | 最短路径换刀 | 正常 |
| 16 | 5 | 2 | 5 | 刀库正转 | 正常 |
| 17 | 2 | 5 | 2 | 刀库正转 | 正常 |
| 18 | 2 | 2 | 0 | 换刀动作顺畅, 无碰撞 | 正常 |
| 19 | 2 | 0 | 7 | 报警刀号错误 | 报警 |
| 20 | 2 | 0 | 8 | 报警刀号错误 | 报警 |
| 21 | 2 | 0 | 11 | 报警刀号错误 | 报警 |

经过以上三点验证, 能够实现正确换刀, 符合实际生产需求, 自动换刀功能

调试成功。

5.2 轴基本动作验证

轴验证主要分为主轴和插补轴验证。在数控系统发出插补轴位置指令和主轴速度指令后, NX MCD 中 3D 机床模型是否有相应的位移且位移是否与数控系统指令保持一致。如图 5-3 所示验证了插补轴和主轴动作是否正确。

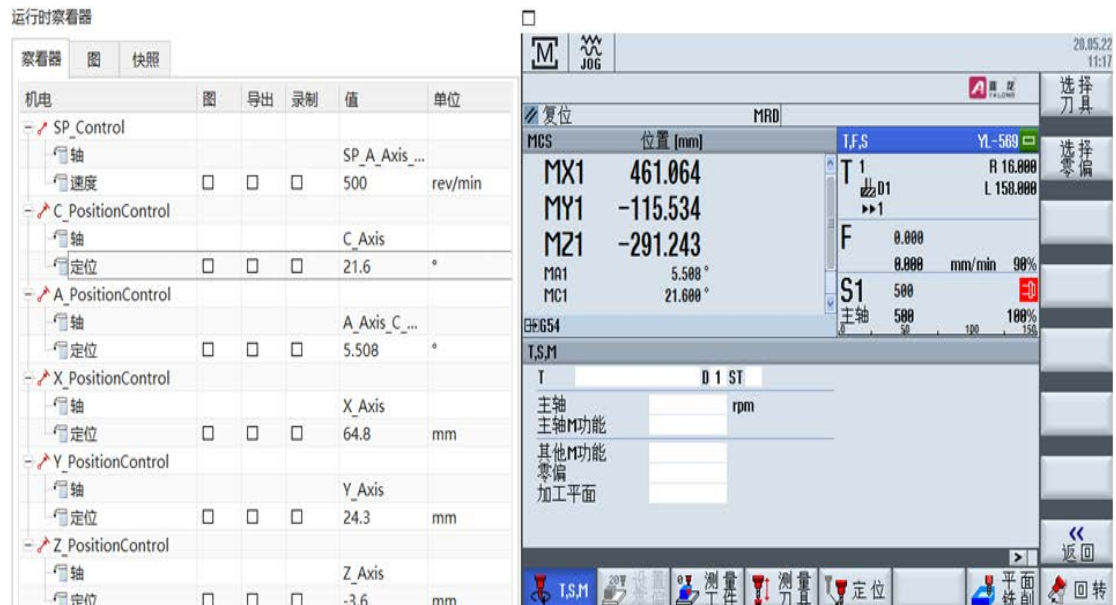
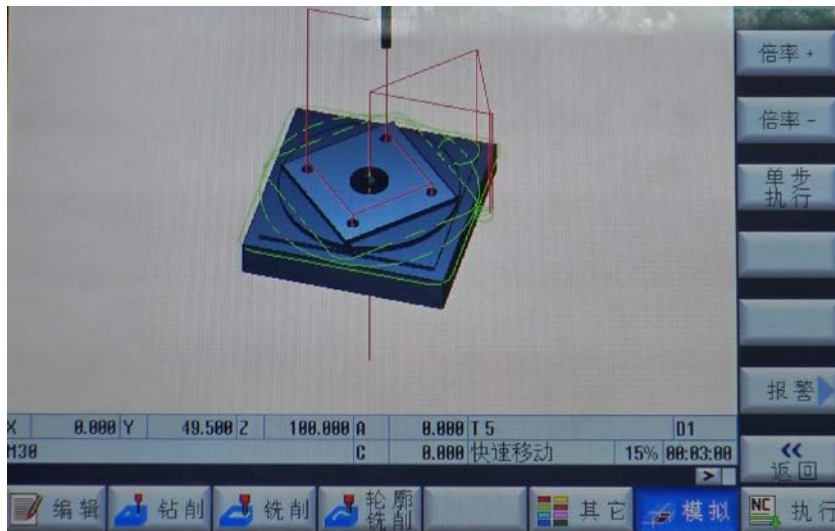


图 5-3 主轴、插补轴验证

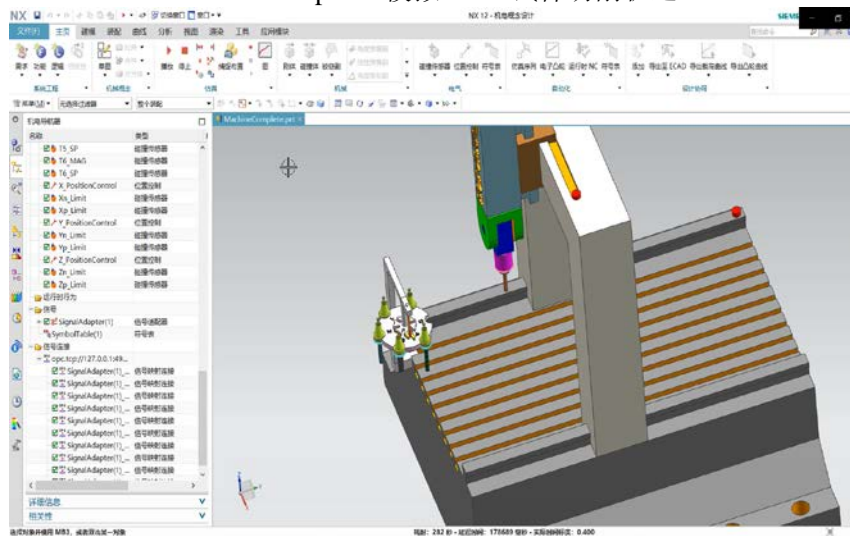
由图 5-3 可以看到插补轴 X、Y、Z、A、C 位置在 MCD 中和数控系统中保持一致, 主轴速度在 MCD 中和数控系统中保持一致, 由此验证了轴基本动作调试成功。

5.3 模拟 NAS 试件切削

检验数控机床的一项重要指标是切削验证。国内外常用 NAS 试件(国家标准中规定的标准切削试件)切削作为数控机床动态精度验收的方法, 在虚拟调试中无法实现与真实条件一样的切削, 但可以用过 SINUMERIK 840D sl 自带的 ShopMill 功能模拟 NAS 试件切削, ShopMill 可直观模拟、显示真实加工刀具轨迹, 且可以将模拟切削成果以 3D 图形画面显示出来。通过对比 ShopMill 功能模拟 NAS 试件的试切轨迹与虚拟机床模型刀具轨迹是一致的。如图 5-4 为 ShopMill 模拟 NAS 试件切削轨迹和虚拟机床模型刀具轨迹。



(a) ShopMill 模拟 NAS 试件切削轨迹



(b) 虚拟机床模型刀具轨迹

图 5-4 切削轨迹对比

5.4 结论

本章首先 NX 软件设计并建模了五轴机床模型，结合 NX 软件的 MCD 功能对五轴机床模型进行刚体设置、运动副设置、传感器与碰撞体等设置，然后对 SINUMERIK 840D sl 进行参数设置、PLC 调试，在此基础上利用 OPC 协议作为 MCD 和 SINUMERIK 840D sl 数据交换“桥梁”，实现了 SINUMERIK 840D sl 系统硬件对 NX 软件中五轴机床模型控制，实现了自动换刀、轴运动等重要功能运动仿真。最终以 NAS 试件切削验证了调试的正确性，成功完成了数控主要功能的调试，验证了虚拟调试可行性。

第六章 总结与展望

6.1 总结

论文以五轴数控机床虚拟调试为研究对象,研究了利用 NX 软件五轴数控机床建模、MCD 设置; SINUMERIK 840D sl 系统进行参数设置、PLC 调试。通过 OPC 配置,结合 NX 软件五轴数控机床模型、SINUMERIK 840D sl 系统硬件,研究了 OPC 作为“桥梁”的一种虚拟调试的方法。最终使用 SINUMERIK 840D sl 系统硬件对 NX 软件五轴数控机床模型进行了从换刀、轴运动、模拟切削等验证实验。

课题研究所完成的工作如下:

(1) 通过 NX 软件建立了五轴数控机床模型。并基于 NX 的 MCD 功能对五轴数控机床模型进行了运动副,传感器,位置控制等设置。

(2) 对 SINUMERIK 840D sl 进行了参数、PLC 调试。编写了 L6 换刀子程序。

(3) 对 KepserverEx OPC 软件进行了相应配置,使其作为 SINUMERIK 840D sl 系统硬件和 NX 五轴机床模型数据交换的“桥梁”。

(4) 经过对 SINUMERIK 840D sl 数控系统、NX 软件、KepserverEx OPC 软件的联合调试,实现了以 SINUMERIK 840D sl 数控系统对 NX 中的五轴机床模型的控制,成功实现了轴运动、换刀等功能的正常运作,并进行了模拟切削。验证了虚拟调试的可行性。

通过本次毕业设计,使我充分认识到数字双胞胎—虚拟调试技术在未来对于制造业的重要意义。随着技术的发展,在未来数字双胞胎—虚拟调试技术将会更加普及。

虽然虚拟调试具有诸多优势,但是任何事物不是完美的。虚拟调试在一定程度上确实可以实现对机床部分功能进行调试,减轻调试人员工作强度。但是无法通过虚拟调试完成机床所有调试工作,由于虚拟调试没有实际的机床机械结构,无法实现驱动器配置、优化。且机床精度是依赖数控系统的全闭环控制来保证,机床虚拟调试属于开环控制,目前只能验证机床动作是否正确,无法模拟真实情况下由于机床机械误差、摩擦阻力、环境等不可避免因素带来的误差。相信在未来技术的成熟这一难题可以得到解决。

6.2 展望

本次毕业验证了虚拟调试的可行性,由此引发了以下想法:

1、虚拟调试可实现 PLC、机器人调试。后期是否可以实现 PLC、机器人、数控机床联合调试,使其成为一个柔性的生产线。

2、机床虚拟调试由 SIEMENS 提出,本次调试使用的数控系统为 SIEMENS 840D sl,本次虚拟调试最重要一环是 OPC 协议,是否其他支持 OPC 协议的数

控系统也可实现虚拟调试，如 FANUC、华中、KND 等。

3、虚拟调试可实现对机床故障远程诊断，由于时间关系未能对这一功能进行验证，后期若时间足够可对远程诊断这一功能进行。

参考文献

- [1] 盘和林. 坚定不移地推进制造业高质量发展[J]. 智慧中国, 2019(11): 46-47.
- [2] 周济. 智能制造是“中国制造 2025”主攻方向[J]. 企业观察家, 2019(11): 54-55.
- [3] 刘星. 规范智能装备技术要求, 构建智能产品标准体系——专访《智能化产品术语和通用技术要求标准研究和试验验证》项目负责人宋彦彦[J]. 电气技术, 2017(05): 3-4.
- [4] 方红军. 中国高端装备制造业的现状与发展问题研究[J]. 现代经济信息, 2019(23):301-302.
- [5] Pranav M. Karve, Yulin Guo, Berkcan Kapusuzoglu, Sankaran Mahadevan, Mulugeta A. Haile. Digital twin approach for damage-tolerant mission planning under uncertainty[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 225.
- [6] 林裕程, 韩勇. 基于数字化双胞胎的数控机床虚拟调试技术[J]. 金属加工(冷加工), 2019(12): 66-71.
- [7] Raphael Wagner, Benjamin Schleich, Benjamin Haefner, Andreas Kuhnle, Sandro Wartack, Gisela Lanza. Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products[J]. Procedia CIRP, 2019, 84.
- [8] 张曙. 2030 的未来工厂[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(03): 1-8.
- [9] 工业 4.0 环境下的造纸行业数字孪生技术: 以西门子和安德里茨为例[J]. 中华纸业, 2019, 40(20): 70-72.
- [10] 江贤勇. 智能制造与先进数控技术(23):16.[J]. 湖北农机化, 2019(23): 16.
- [11] 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]. 山东大学, 2018.
- [12] 一文读懂“数字双胞胎”[J]. 智慧工厂, 2019(08): 21-22.
- [13] 冯启荣. 信号是 PLC 编程的关键[J]. 职业技术, 2015(05): 93-94.
- [14] Xu Hong, Wang Jianhua. Using standard components in automation industry: A study on OPC Specification[J]. Computer Standards & Interfaces, 2005, 28(4).
- [15] 张弛, 吴明亮, 许正军, 吴明永, 陆军强. 基于 OPC UA 的 828D 数控机床群远程监控系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(06): 186-189.
- [16] 谢春秋. 基于 OPC UA 的数控机床远程监控系统研究[D]. 兰州理工大学, 2017.
- [17] 李晓延. 数字化双胞胎的威力看西门子工业软件怎么定义未来制造业[J]. 今日电子, 2018, 08(08): 41-42.
- [18] 王丰圆. 基于数字化双胞胎的三维可视化车间系统研究[D]. 华中科技大学, 2019.
- [19] 周繁荣. 基于西门子机床制造业数字化的工件研发和生产[J]. 模具制造, 2018, 18(08): 75-78.
- [20] 西门子以“数字化双胞胎”应用推进机床工业的数字化[J]. 世界制造技术与装备市场, 2018, 03(03): 35.

- [21] Tsega Y. Melesse, Valentina Di Pasquale, Stefano Riemma. Digital Twin Models in Industrial Operations: A Systematic Literature Review[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 42: 42.
- [22] 杨林瑶,陈思远,王晓,张俊,王成红.数字孪生与平行系统:发展现状、对比及展望[J].*自动化学报*,2019,45(11):2001-2031.
- [23] 陈先锋. 西门子 SINUMERIK 数控系统维修调试工程师手册[M].北京: 化学工业出版社, 2016.

致 谢

转眼间，大学生活即将结束。回望我的大学生活，收获了不少东西。在这里我要感谢左维老师、李巍老师、孟祥懿老师、张培老师在生活、学习上对我的帮助。感谢老师们对我的信任，带我多次参加各类大赛，使我不断地成长。在取得不少成绩同时，使我的眼界得到开阔，使我知道了自己奋斗目标，使我不在迷茫。使我明白了遇到问题不应该害怕，应该迎难而上，通过各种方法解决问题。

感谢母校天津中德应用技术大学为我提供了良好的学习环境，使我能够从高职到本科继续深造，在学业上更上一层楼。

另外，我还要感谢我的家人。是你们在背后一直给我鼓励，给我支持是我能够全身心的投入学习中，顺利渡过大学时光。

同时我还要感谢在我学习期间给我极大关心和支持的各位老师以及我的同学和朋友。在项目中我们遇到了很多的难题，从最初构想，到最终的完成。这一路各种的坎坷，其中有许多事最初设想中所没有的，只有在实际的干活中，才一步一步的发现自己设计上的不足，在老师的帮助下，将整个设备一步一步的完善。在各位同学的共同努力下，最后终于成功，再一次谢谢大家。

最后我要感谢我的导师左老师在毕业设计上给我的指导。由于疫情影响左老师利用网络，从开题报告、论文翻译到论文完成，一边又一遍的给我指导。到学校后，左老师又在实验方面给予我许多帮助。周末左老师也没有休息，左老师牺牲了他的周末休息时间来到学校，在实验、论文给我许多帮助，左老师这种认真工作的态度令我感动，同时也是我以后工作学习的榜样。在本论文的顺利完成，离不开左维老师的关心帮助和悉心指导，感谢左老师在技术和论文修改上对我的帮助。

附录

附录一 中文译文及外文资料

数字双胞胎和工业 4.0 在高性能产品的设计和生產中的挑战和潜力

摘要:

数字双胞胎在产品工程过程的各个领域提供了巨大的机会。但是,当前使用数字双胞胎的方法仅关注于不同的学科。与此相反,预计数字双胞胎模型在产品开发和生产中的整体使用将主导未来的产品时代,因为它们可以竞争性地创建高性能产品。本文探讨了数字双胞胎和工业 4.0 在产品规格和生产的无缝集成方面的重要挑战和未来潜力。在这方面,将数字双胞胎与其他领域联系起来的方法为公差分配和生产集成开辟了新的可能性。由此,对于制造商而言,在技术和经济方面实现了最有效的产品规格。此外,工业 4.0 的连通性扩大了范围,并能够评估生产计划和控制中的替代方法。组织层面的方法,规格超出技术限制的产品功能和生产控制策略(例如订单分派)可确保高性能的运作。使用数字生产双胞胎模型和集成的数字产品双胞胎模型进行仿真,甚至可以在产品实际投入生产之前就进行早期估算。本文解决的未来挑战是为整个产品开发过程中数字双胞胎的整体使用定义一个一致的框架,这需要产品设计师和生产计划人员概念的整合。

1. 介绍

产品需求的增加和市场的快速变化要求以更短的周期开发高度精确的产品。在产品设计的早期阶段就必须已经考虑了后期产品的依赖关系和边界条件,以确保产品功能。这导致对产品工程过程的需求增加。复杂性不断提高的精确设计,必须推导许多变量。这导致关于质量要求的产品规格越来越复杂。此外,生产新的高精度产品还面临着产生高质量要求和高性价比地交互功能的挑战。通常,制造过程已经达到其技术极限。

信息技术的当前发展通过增强的计算能力,新的仿真和分析工具以及连接的数据,为在产品工程过程中提供支持提供了巨大的可能性。为了获得最佳解决方案,已经在各个领域对产品或生产的数字双胞胎模型进行了建模。产品提高的数据可用性和可追溯性还允许使用人工智能方法对数据驱动的模式进行建模。

2. 数字双胞胎的定义和应用

在将问题识别和解决方案转移到产品和过程开发的早期阶段的雄心壮志的驱动下,即所谓的“前端加载” [1],复杂而高度现实的虚拟模型在研究和行业中日益受到关注。这是因为这样的模型允许对产品和过程设计更改对技术产品的质量 and 功能的影响进行及时和经济有效的模拟。但是,只有在向它们提供来自物理世界的的数据时,才能充分利用这种高保真仿真模型的全部优势,从而形成物理资产的数字双胞胎。

2.1 数字双胞胎的定义

实际上，在文献中可以找到许多关于这种数字双胞胎的不同定义，这主要是由各种应用领域引起的。它们中的大多数共同点是，数字双胞胎系统由三个主要部分组成：物理产品，虚拟产品以及将物理产品和虚拟产品捆绑在一起且不可分割地连接在一起的数据。美国航空航天局可能在其综合技术路线图中（技术领域 11：建模，仿真，信息技术和处理路线图；2010 年）给出了第一个定义，在 [5] 中略作修改：“数字双胞胎是一个综合的使用现成的最佳物理模型，传感器更新，机动历史等对已建成的车辆或系统进行多物理场，多尺度，概率模拟，以反映其对应的飞行双胞胎的寿命”（见图 1）。与此类似，Grieves 等。将“数字双胞胎”定义为“一组虚拟信息结构，可完整描述从微原子级到宏观几何级的潜在或实际物理制成品”。

但是，数字孪生不仅限于产品，还可以是数字孪生表示的复杂生产系统。

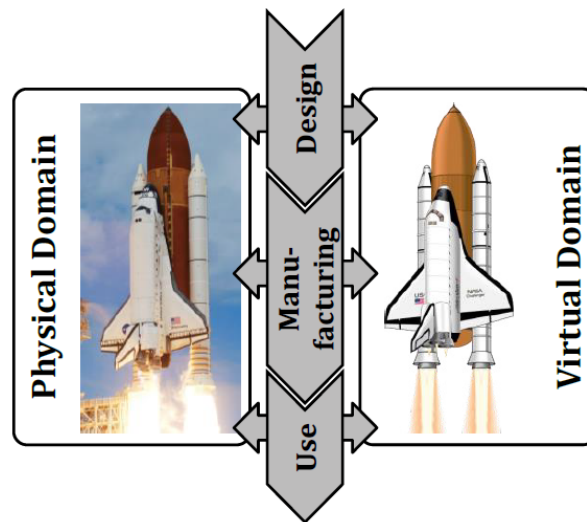


图 1: 比喻整个产品生命周期的数字双胞胎的形象

在“工业 4.0”框架内的发展，如计算能力的提高、实时信息系统、物联网、更便宜和更精确的传感器以及单个组件的可追溯性，开辟了新的可能性。例如，可以将单个产品的生产数据精确地分配到产品使用信息中。产品开发的新见解可以由此产生。

通过在线测量和操作数据的不断扩展，还可以创建越来越多的详细数字双胞胎用于生产。这样，可以对偏差和故障迅速做出反应，或者系统本身可以作为网络物理生产系统的对策。通过组织方法和订单计划，在经济上可以实现更高的耐用性以及更加苛刻的质量要求和产品规格。反过来，这为产品开发提供了设计更高效，更强大产品的新机会。也可能使实现功能的替代工作原理成为可能。

数字孪生的使用为提高生产力和效率提供了巨大的机会，这将在下一节中简要介绍。

2.2 数字双胞胎的应用实例

数字双胞胎的各种现有概念不仅因其范围的宽度而异,而且还因在产品生命周期中对数字双胞胎的集中使用而异。如果数字双胞胎已经用于产品的概念设计和详细设计阶段,或者只是在生产方面,就会有所不同。今天,来自许多上一代产品实现的数据被合并到产品的一个通用数字双胞胎兄弟中,以在新产品生成的早期阶段获得更多的产品知识。

在这方面,在产品阶段应用数字双胞胎技术可以提供一种量化的设计工具,通过使用前几代产品的数据来进行有效和最佳的设计决策。在此背景下,来自以前产品设计的数字双胞胎的数据可以被分析和用于优化新的设计。

数字双胞胎已经投入生产有一段时间了。对生产系统的模拟可以帮助确保正确的行为,并有助于预测结果、优化、纠正和评估。数字生产双胞胎结合这与一个正在进行的数据收集。

通过对加工步骤和整台机床的建模,确定和优化刀具性能和工艺参数的影响。例如,表面处理的最佳刀具几何形状和工艺参数可以通过使用刀具的数字双胞胎来实现先进的产品来确定。

在增材制造中,数字双胞胎用于评估 3D 打印金属部件。其目标是减少试验和错误测试的次数,以获得所需的产品属性,并缩短设计和生产之间的时间。

此外,复杂的生产系统(作为生产、质量控制和物流过程的相互联系)由多个随机和动态过程组成,这些过程大多具有非线性的相关性。分析方法不能覆盖所有的过程和依赖,因此使用仿真模型。生产系统的数字双胞胎可以与现有的优化程序相结合,例如,通过选择零件装配来实现前沿产品,通过调度来建立稳健的生产计划,或者在发生干扰时预测计数器测量的效果。在某些情况下,甚至人力资源系统也被考虑在数字双胞胎中。

此外,数字双胞胎也以人类互动为模型。先进的数字化人机协作双胞胎有助于获得洞察力,并有可能在实际生产环境中实施新的操作策略之前对其进行测试。

通过对生产系统进行虚拟实验和验证,可以在开发时间和成本方面获得显著的收益。在将复杂的产品系统实现到现实世界之前,还可以获得对它们的深入了解,并对操作策略进行测试。

但是,当前使用数字孪生的方法主要集中在不同的学科上。因此,一方面进行产品设计和产品规格说明,而不可能知道更有利的生产可能性。另一方面,高精度产品的生产未考虑先前获得的产品知识和各个功能的相互作用。与此相反,在产品开发和生产中全面使用数字双胞胎模型将为产品工程过程中使用领域连接的整体数字双胞胎开辟新的可能性。

Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products

Abstract

Digital twins offer great opportunities in various domains of the product engineering process. However, current approaches to the use of digital twins only focus on different separated disciplines. In contrast to that, it is expected that the holistic use of digital twin models in product development and production will dominate future product generations, because they allow to create high-performance products competitively. This paper explores important challenges and future potentials of digital twins and Industry 4.0 for the seamless integration of product specification and production. In this regard, approaches of linking digital twins to other domains open up new possibilities in tolerance allocation and production integration. Thereby, the most efficient product specifications in technical and economic terms are achieved for the manufacturer. In addition, the connectivity of Industry 4.0 broadens the scope and enables the evaluation of alternative approaches in production planning and control. Approaches at the organizational level, product functions with specifications beyond the technological limits and production control strategies (e.g. order dispatching) ensure high performance operations. Simulations with a digital production twin with integrated digital product twin allow early estimations even before the actual ramp-up of the product. The future challenge addressed in this paper is to define a consistent framework for the holistic use of digital twins in the entire product development process, which requires the integration of product designers and production planner concepts.

1. Introduction

Increasing product requirements and rapidly changing markets require highly precise product developments in ever shorter cycles. Dependencies and boundary conditions of the later production have to be considered already in the early phases of the product design to ensure the product function. This leads to increasing requirements in the product engineering process. Precise designs with increasing complexity and many variables must be derived. This results in increasingly complex product specifications with regard to the quality requirements. Also the production of new, highly precise products faces the challenge of producing high quality requirements and interacting features cost-effectively. Often, manufacturing processes are already reaching their technological limits.

The current developments in information technologies open up great possibilities for support in the product engineering process through increased computing power, new simulation and analysis tools, as well as connected data. Digital twins of the product or production are already being modelled in the individual domains in order to derive optimal solutions. The increased data availability and traceability of products also allows the modeling of data-driven models using artificial intelligence methods.

2. Definition and Applications of the Digital Twin

Driven by the ambition for shifting problem identification and solving to early stages of product and process development, known as “front-loading”, sophisticated and highly realistic virtual models gain increasing attention in research and industry. This is because such models allow the time- and cost-efficient simulation of the effects of product and process design changes on the quality and function of technical products. However, the full benefit of such high-fidelity simulation models can only be exploited when feeding them with data from the physical world, leading to a digital twin of physical assets.

2.1 Definitions of the Digital Twin

In fact, a lot of different definitions for such a digital twin can be found in literature, mainly caused by various application areas. What most of them have in common is that a digital twin consists of three main parts: physical product, virtual product, and connected data that tie and indissolubly connect the physical and virtual product. Probably the first definition of it was given by NASA in their integrated technology roadmap (Technology Area 11: Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap; 2010), which has been slightly adapted in: “A Digital Twin is an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin” (see Figure 1). With some similarity to this, Grieves et al. define a Digital Twin as “a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level”.

However, a digital twin is not just limited to products, it also can be a complex production system that is represented in a digital twin.

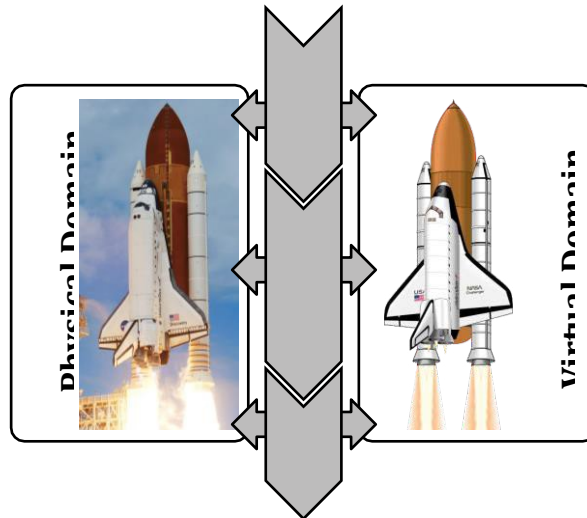


Figure 1: The vision of the Digital Twin throughout the product life-cycle in analogy to [6]

Developments within the framework of "Industry 4.0", such as increased computing power, real-time information systems, the Internet of Things, cheaper and more precise sensors and individual component traceability open up new possibilities. An exact allocation of production data of an individual product to information from product usage, for example, becomes possible. New insights for product development can be derived from this.

More and more detailed digital twins can also be created for production by means of the increasing spread of inline measurements and operating data. In this way, it is possible to react quickly to deviations and malfunctions, or the systems themselves initiate countermeasures as cyber physical production systems. Through organizational approaches and order planning, increased robustness and more demanding quality requirements and product specifications become economically possible. This in turn gives product development new opportunities to design more efficient, more powerful products. It is also possible that alternative working principles for the realization of functions will be made possible.

The use of digital twins opens huge opportunities to increase productivity and effectiveness, which are briefly highlighted in the following section.

2.2 Application Examples of Digital Twins

Various existing concepts of digital twins do not only vary by the width of their scope, but also by the focused use of the digital twin during the product life-cycle. There are differences if the digital twin is already used for the conceptual design and detailed design phase of the product or just in terms of production. Today, data

from many previous generation product realizations are merged into a common digital twin of the product to gain more product knowledge in the early stages of a new product generation.

In this regard, the application of digital twins in the product design stages allows for providing a quantitative design tool for efficient and optimal design decisions by using data from previous product generations. In this context, data from digital twins of previous product design can be analyzed and used for optimizing new designs.

Digital twins have also been making their way into production for some time now. Simulations of production systems can help to ensure a proper behavior and help to predict the outcome, optimize, correct and evaluate. The digital production twin combines this with an ongoing data collection.

By modelling manufacturing steps and entire machine tools, the effects of tool behavior and process parameters are determined and optimized. Optimum tool geometries and process parameters for surface conditioning, for example, can be determined by using digital twins of a cutting tool to achieve advanced products.

Moreover, complex productions systems (as interlinkage of manufacturing, quality control and logistics processes) consist of multiple stochastic and dynamic processes with mostly non- linear dependencies. Analytical methods are not capable to cover all processes and dependencies and hence simulation models are used. Digital twins of the production systems can be combined with existing optimization programs, for e.g. selective part assembly to achieve cutting edge products, scheduling to build robust production schedules or predict the effect of counter measurements in case of disturbances. In some cases, even human resources systems are considered in the digital twin .

Furthermore, human interaction is modelled in the digital twins as well. A developed digital twin of human robot collaboration helps to gain insights and makes it possible to test new operating policies before implementing them in the actual production setting.

Significant benefits in development time and costs can be achieved using virtual experiments and validation of production systems. Insights into complex productions systems can be gained and operating policies can be tested before implementing them in the real world, as well.

However, current approaches to the use of digital twins mainly focus on different separated disciplines. Consequently, product design and product

specification takes place without possibly knowing more favorable possibilities in production, on the one hand. On the other, the production of highly precise products does not take into account previously acquired product knowledge and interactions of individual features. In contrast to that, it is expected that the holistic use of digital twin models in product development and production will open up new possibilities in the product engineering process with the use of domain-linking, holistic digital twins.

附录二 PLC 程序

Obl : Title:

Comment:

▣ **Network 1** : Title:

CALL "GP_HP" FC2 — cyclic Baseprogram

//Insert User program from here

▣ **Network 2** : Title:

CALL "MCP_IFM" FC19 — MCP-Signals to Interface, Variant M
 BAGNo :=B#16#1
 ChanNo :=B#16#1
 SpindleIFNo:=B#16#6
 FeedHold :=M40.2
 SpindleHold:="ALMSG_DB"._6FdStop6006xx[8] DB2.DBX155.0 — Feed stop axis/spindle 6

▣ **Network 3** : Feed stop axis/spindle 1

A M 40.2
 = "ALMSG_DB".C1.FDD_5100xx[8] DB2.DBX1.0 — Feed disable A.no.51000-510015

▣ **Network 4** : Actual value in WCS 0=MCS

CALL FC 52

▣ **Network 5** : Title:

CALL FC 45
 CALL FC 40

CALL FC 46

CALL FC 43
 CALL FC 44

▣ **Network 6** : 三色灯控制

CALL FC 56
 Clock :=TRUE
 NC_Start_Lamp:=Q3.2
 PRG_END_Lamp :=Q3.3
 Alarm_Lamp :=Q3.1
 Mem_bit1 :=M30.0
 Mem_bit2 :=M30.1
 Mem_bit3 :=M30.2

▣ **Network 7** : Title:

CALL "AL_MSG" FC10 — Alarms & Messages
 ToUserIF:=TRUE
 Quit :=I103.7

▣ **Network 8** : Title:

CALL FC 140

OB100 : Title:

Comment:

▣ Network 1 : Title:

// CALL FC 100 //版本小于V4.7才需要初始化DB4

▣ Network 2 : Title:

```

CALL "RUN_UP", "gp_par"      FB1 / DB7      — Startup Baseprogram / Parameters for Baseprogram
MCPNum                      :=1
MCP1In                      :=P#I 100.0
MCP1Out                     :=P#Q 100.0
MCP1StatSend                :=P#Q 108.0
MCP1StatRec                 :=P#Q 112.0
MCP1BusAdr                  :=192
MCP1Timeout                 :=
MCP1Cycl                    :=
MCP2In                      :=
MCP2Out                     :=
MCP2StatSend                :=
MCP2StatRec                 :=
MCP2BusAdr                  :=
MCP2Timeout                 :=
MCP2Cycl                    :=
MCPMPI                      :=
MCP1Stop                    :=
MCP2Stop                    :=
MCP1NotSend                 :=
MCP2NotSend                 :=
MCPsDB210                   :=
MPCCopyDB77                 :=

```

```

MPCCopyDB77                 :=
MCPBusType                  :=B#16#55
BHG                          :=
BHGIIn                      :=
BHGOOut                     :=
BHGIStatSend                :=
BHGIStatRec                 :=
BHGIInLen                   :=
BHGOOutLen                  :=
BHGTimeout                  :=
BHGCycl                     :=
BHGRecGDNo                  :=
BHGRecGBZNo                 :=
BHGRecObjNo                 :=
BHGSendGDNo                 :=
BHGSendGBZNo                :=
BHGSendObjNo                :=
BHGMPI                       :=
BHGStop                     :=
BHGNotSend                  :=
NCCyclTimeout               :=
NCRunupTimeout              :=
ListMDecGrp                 :=
NCKomm                      :=TRUE
MMCToIF                      :=
HWheelMMC                   :=TRUE
ExtendAlMsg                  :=
MCP_IF_TCS                  :=
ExtendChanAxMsg              :=
MsgUser                      :=
UserIR                       :=
IRAuxfuT                     :=
IRAuxfuH                     :=
IRAuxfuE                     :=
UserVersion                  :=

```

IN: INT

```

OpKeyNum      :=
Op1KeyIn      :=
Op1KeyOut      :=
Op1KeyBusAdr  :=
Op2KeyIn      :=
Op2KeyOut      :=
Op2KeyBusAdr  :=
Op1KeyStop    :=
Op2KeyStop    :=
Op1KeyNotSend :=
Op2KeyNotSend :=
OpKeyBusType  :=
IdentMcpBusAdr :=
IdentMcpProfilNo :=
IdentMcpBusType :=
IdentMcpStrobe :=
MaxBAG        :=
MaxChan       :=
MaxAxis       :=
ActivChan     :=
ActivAxis     :=
UDInt         :=
UDHex         :=
UDReal        :=
IdentMcpType  :=
IdentMcpLengthIn :=
IdentMcpLengthOut:=

//Insert User program from here
    
```

```

FC40 : Title:
JOG AND INC
Network 1 : x轴手轮选择
A      I      110.5
AN     M      10.0
=      "Axis1".A_HW1          DB31.DBX4.0      — Activate handwheel 1

Network 2 : y轴手轮选择
A      I      110.4
AN     M      10.0
=      "Axis2".A_HW1          DB32.DBX4.0      — Activate handwheel 1

Network 3 : z轴手轮选择
A      I      110.3
AN     M      10.0
=      "Axis3".A_HW1          DB33.DBX4.0      — Activate handwheel 1

Network 4 : 手轮4轴
A      I      111.0
AN     M      10.0
=      DB34.DBX      4.0

Network 5 : 5轴手轮选择
A      I      110.7
AN     M      10.0
=      DB35.DBX      4.0
    
```

▣ **Network 6** : 1000INC被锁在手轮,选择面板手轮时 外围手轮无效

```

O   Q   100.7
O   Q   101.0

=   M   10.0
    
```

▣ **Network 7** : 面板倍率按钮控制, *1000 *10000无效

```

A   I   101.0
S   M   50.0
O   M   50.3
O   I   101.1
O   I   101.2
R   M   50.0

A   I   101.1
S   M   50.1
O   M   50.3
O   I   101.2
O   I   101.0
R   M   50.1

A   I   101.2
S   M   50.2
O   M   50.3
O   I   101.1
O   I   101.0
R   M   50.2
    
```

▣ **Network 8** : Title:

```

O   I   100.0
O   I   100.1
O   I   100.2
O   I   100.3
O   I   101.7
O   I   101.6
O   I   101.5
ON  M   100.2
=   M   50.3
    
```

▣ **Network 9** : X1

```

A   I   110.0
AN  M   100.2
O   M   50.0
=   "BAG".A_INC1           DB11.DEX2.0   -- INC1
    
```

▣ **Network 10** : X10

```

A   I   110.1
AN  M   100.2
O   M   50.1
=   "BAG".A_INC10        DB11.DEX2.1   -- INC10
    
```

▣ **Network 11** : X100

```

A   I   110.2
AN  M   100.2
O   M   50.2
=   "BAG".A_INC100      DB11.DEX2.2   -- INC100
    
```

▣ **Network 12** : 倍率有效M100.2=0

```

AN  I   110.5
AN  I   110.4
AN  I   110.7
=   M   100.2
    
```

▣ **Network 13** : Title:

```

O   "Axis1".E_HW1         DB31.DEX64.0   -- Handwheel 1 active
O   "Axis2".E_HW1         DB32.DEX64.0   -- Handwheel 1 active
O   "Axis3".E_HW1         DB33.DEX64.0   -- Handwheel 1 active
O   DB34.DEX 64.0
O   DB35.DEX 64.0
=   Q   107.2
    
```

FC43 : Title:

Comment:

Network 1: Title:

```
A(
O M 130.2
O M 130.1
)
AN M 70.2
= DB36.DBX 2.1
= DB36.DBX 21.7
```

Network 2: Title:

```
A I 106.2
FP M 21.0
= M 21.1
```

Network 3: SP1+

```
A(
A I 106.1
A DB36.DBX 61.4
O
A M 20.0
AN M 21.1
)
AN "NC".E_EMSTOP DB10.DBX106.1 — EMERGENCY STOP active
AN I 103.7
A(
O I 4.2
O DB20.DBX 40.1
)
A DB36.DBX 2.1
A DB36.DBX 21.7
= M 20.0
= DB36.DBX 4.6
```

FC44 : Title:

Comment:

Network 1: Alarm 700000-700063 (user area 0)

```
AN I 3.6
A I 3.6
= "ALMSG_DB".A7000xx[0] DB2.DBX180.0 — Alarm 700000-700063 (user area 0)
```

Network 2: Alarm 700000-700063 (user area 0)

```
AN I 3.7
A I 3.7
= "ALMSG_DB".A7000xx[1] DB2.DBX180.1 — Alarm 700000-700063 (user area 0)
```

Network 3: Alarm 700000-700063 (user area 0)

```
A I 4.4
= "ALMSG_DB".A7000xx[2] DB2.DBX180.2 — Alarm 700000-700063 (user area 0)
```

Network 4: Alarm 700000-700063 (user area 0)

```
A M 30.6
= "ALMSG_DB".A7000xx[5] DB2.DBX180.5 — Alarm 700000-700063 (user area 0)
```

Network 5: Alarm 700000-700063 (user area 0)

```
A(
O I 106.1
O I 106.3
O "Chan1".MDyn[3] DB21.DBX194.3
O "Chan1".MDyn[4] DB21.DBX194.4
)
AN I 4.2
AN DB20.DBX 40.0
= "ALMSG_DB".A7000xx[6] DB2.DBX180.6 — Alarm 700000-700063 (user area 0)
```

FC45 : Title:

Comment:

Network 1: 急停按钮

正常为1

```
A   I   0.0
-   M   30.3
-   DB12.DBX 1.4
```

Network 2: Title:

```
A   M   130.7
A   T   30
A   I   1.4
-   M   30.6
```

Network 3: Title:

正常为 0

```
AN  M   30.3
-   M   70.0
```

Network 4: Title:

先拉各主轴使能

```
A   M   70.0
L   S5T#100MS
SD  T   12
NOP 0
NOP 0
NOP 0
A   T   12
-   M   70.1
```

FC46 : Title:

Comment:

Network 1: 轴使能

```
SET
-   "Axis1".A_PosMeas1      DB31.DBX1.5    -- Position measuring system 1
-   "Axis1".A_ORactive      DB31.DBX1.7    -- Override active
-   "Axis2".A_PosMeas1      DB32.DBX1.5    -- Position measuring system 1
-   "Axis2".A_ORactive      DB32.DBX1.7    -- Override active
-   "Axis3".A_PosMeas1      DB33.DBX1.5    -- Position measuring system 1
-   "Axis3".A_ORactive      DB33.DBX1.7    -- Override active
-   DB34.DBX 1.5
-   DB34.DBX 1.7
-   DB35.DBX 1.5
-   DB35.DBX 1.7
-   DB36.DBX 1.5
-   DB36.DBX 1.7
```

Network 2: Controller enable控制使能, 脉冲使能生效

```
O   M   130.2
O   M   130.1
-   "Axis1".A_ContrEnable   DB31.DBX2.1    -- Controller enable
-   "Axis1".A_PulseEnable   DB31.DBX21.7   -- Pulse enable
-   "Axis2".A_ContrEnable   DB32.DBX2.1    -- Controller enable
-   "Axis2".A_PulseEnable   DB32.DBX21.7   -- Pulse enable
-   "Axis3".A_ContrEnable   DB33.DBX2.1    -- Controller enable
-   "Axis3".A_PulseEnable   DB33.DBX21.7   -- Pulse enable
-   DB34.DBX 2.1
-   DB34.DBX 21.7
-   DB35.DBX 2.1
-   DB35.DBX 21.7
```

Network 3 : Feed stop/spindle stop

```

A   Q   101.6
=   "Axis1".A_FDSpStop      DB31.DBX4.3   — Feed stop/spindle stop
=   "Axis2".A_FDSpStop      DB32.DBX4.3   — Feed stop/spindle stop
=   "Axis3".A_FDSpStop      DB33.DBX4.3   — Feed stop/spindle stop
=   DB34.DBX   4.3
=   DB35.DBX   4.3
    
```

Network 4 : 轴倍率

```

SET
=   "Chan1".A_RT_ORA        DB21.DBX6.6   — Rapid traverse override active
=   "Chan1".A_FD_ORA        DB21.DBX6.7   — Feedrate override active
L   "Chan1".A_FD_OR         DB21.DBB4      — Feedrate override
T   "Chan1".A_RT_OR         DB21.DBB5      — Rapid traverse override
    
```

Network 5 : 快移按钮灯

```

A   I   104.5
=   Q   106.0
    
```

FC47 : Title:

Comment:

Network 1 : Emergency stop

```

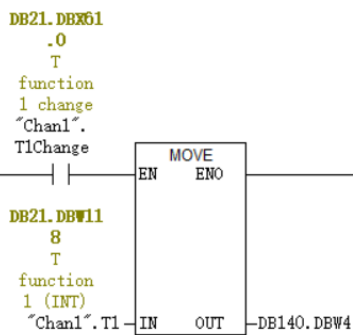
AN  I   0.0
=   "NC".A_EMERGENCY        DB10.DBX56.1   — Emergency stop

A   I   103.7
A   "NC".E_EMSTOP           DB10.DBX106.1  — EMERGENCY STOP active
AN  "NC".A_EMERGENCY        DB10.DBX56.1   — Emergency stop
=   "NC".A_EMERGENCY_Ackn   DB10.DBX56.2   — Acknowledge emergency stop
    
```

FC140 : Title:

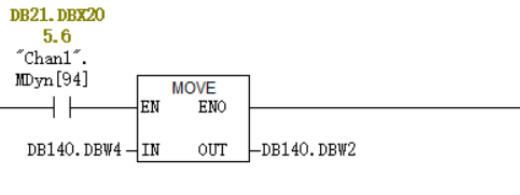
Comment:

Network 1 : 读取T代码刀号



WORD

Network 2: 换刀完成, 刷新主轴刀号

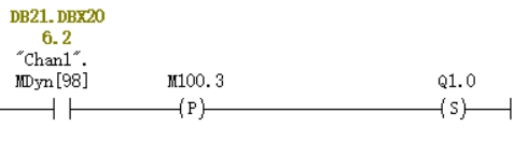


Network 3: 像NCK发送 主轴、刀盘、T代码刀号

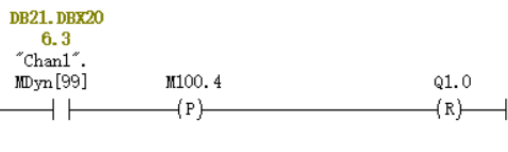
```

CALL "Transfer"          FC21          -- Quick Datachannel
Enable :=TRUE
Funct  :=B#16#4
S7Var  :=P#DB140.DBX 0.0 WORD 3
IVAR1  :=208
IVAR2  :=-1
Error  :=M100.4
ErrCode:=MW101
    
```

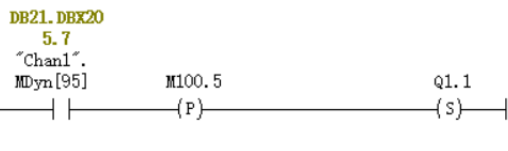
Network 4: 松刀



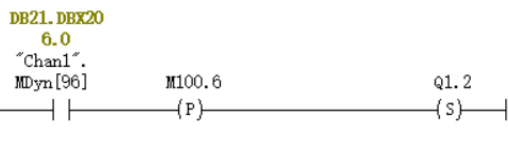
Network 5: 紧刀



Network 6: 刀盘正转



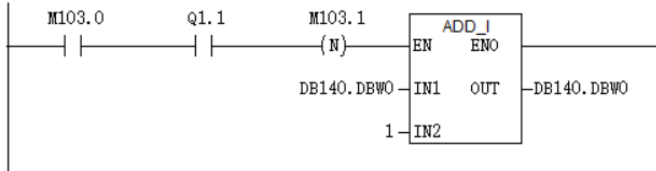
Network 7: 刀盘反转



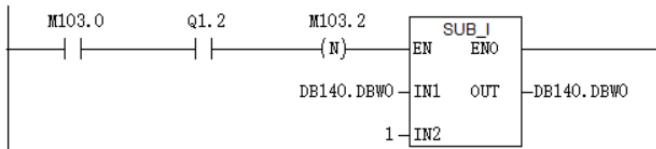
Network 8 : 刀盘停止旋转



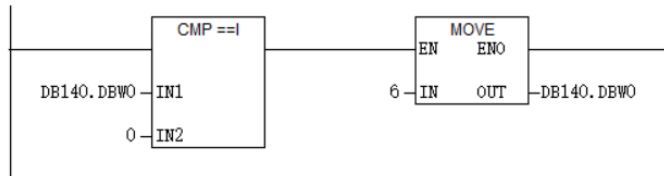
Network 9 : 刀盘正转计数



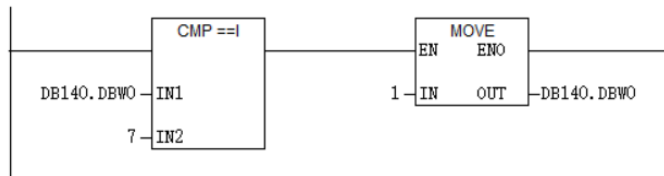
Network 10 : 刀盘反转计数



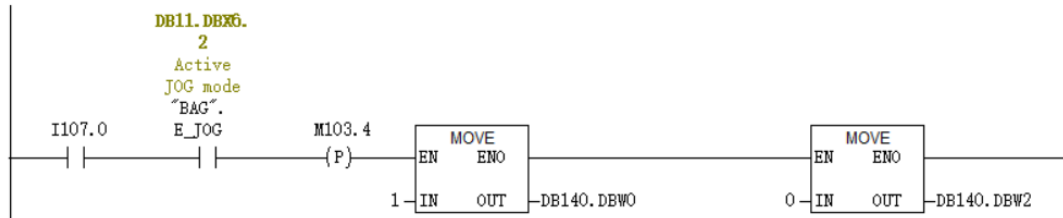
Network 11 : 将刀盘刀号约束在1-6



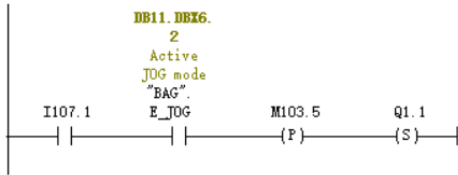
Network 12 : 将刀盘刀号约束在1-6



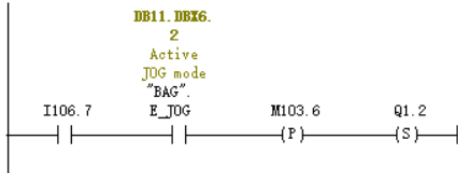
Network 13 : 手动刀库回零



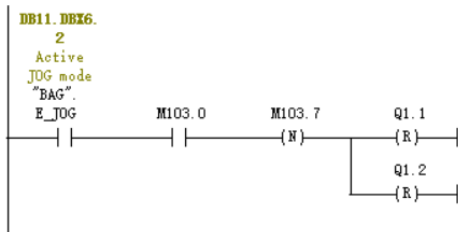
□ Network 14 : 手动刀库正转



□ Network 15 : 手动刀库反转



□ Network 16 : Title:



附录三 换刀宏程序

```

PROC L6 SAVE DISPLOF           ;不显示程序
DEFINE TCode_Tool as $A_DBW[212] ;从 PLC 中读取 T 代码刀号
DEFINE SP_Tool as $A_DBW[210]    ;从 PLC 中读取主轴当前刀号
DEFINE MAG_Tool as $A_DBW[208]  ;从 PLC 中读取刀盘当前刀号
DEF INT Tool_Quantity = 6       ;设置刀具数量
DEF INT Subtract;
DEF REAL X_ToolChange_POS = -29.6, Y_ToolChangeOk_POS = -200 ;设置 X 换刀、Y 换刀完成位置
DEF REAL Y_ToolChange_POS = -425.5 ,Z_ToolChange_POS = -50.6 ;设置 Y、Z 换刀位置
DEF REAL SP_Angle = 23.1, Z_ToolChangeRelease_POS = 60 ;设置主轴定向角度，Z 拔刀位置
IF(TCode_Tool > Tool_Quantity ) OR (TCode_Tool < 0)
    Msg("刀号错误");
    G04 F3;
    M17;
ENDIF;
IF (TCode_Tool == SP_Tool) ;如果当前主轴刀号等于 T 代码刀号结束换刀
    M17;
ENDIF;
G64 G90 G0 D0
G153 A0 C0
SPOS = SP_Angle ;主轴定向
;还旧刀
IF (SP_Tool == 0) ;如果主轴没刀主轴运行至拔刀点
    G153 Z = Z_ToolChangeRelease_POS;
ENDIF;
IF (SP_Tool <> 0) AND (SP_Tool <> MAG_Tool) ;主轴有刀
    Subtract = SP_Tool - MAG_Tool;
    IF(Subtract > 0) AND (Subtract < (Tool_Quantity/2))
        M95 ;刀盘正转
        GOTO WHILE1;
    ENDIF
    IF(Subtract < 0) AND (abs(Subtract) > Tool_Quantity/2)

```

```
        M95                                ;刀盘正转
    ELSE
        M96                                ;刀盘反转
    ENDIF;
WHILE1:
    WHILE (SP_Tool <> MAG_Tool)            ;等待刀盘与主轴刀号一致
    ENDWHILE;
    M97                                    ;刀盘停止旋转
    G153 Z = Z_ToolChange_POS;
ENDIF;
G153 X = X_ToolChange_POS;
G153 Y = Y_ToolChange_POS;
M98                                        ;松刀
G153 Z = Z_ToolChangeRelease_POS        ;拔刀
;换新刀
IF (TCode_TOOL == 0)                    ;T 代码刀号为 0，换刀完成
    GOTO END;
ENDIF;
IF (TCode_TOOL > 0)                    ;T 代码刀号不为 0
    Subtract = TCode_Tool - MAG_Tool;
    IF(Subtract > 0) AND (Subtract < (Tool_Quantity/2))
        M95                                ;刀盘正转
        GOTO WHILE2;
    ENDIF
    IF(Subtract < 0) AND (abs(Subtract) > Tool_Quantity/2)
        M95                                ;刀盘正转
    ELSE
        M96                                ;刀盘反转
    ENDIF;
WHILE2:
    WHILE (TCode_Tool <> MAG_Tool) ;等待刀盘刀号与 T 代码刀号一致
    ENDWHILE;
    M97                                    ;刀盘停止旋转
    G153 Z = Z_ToolChange_POS            ;扣刀
ENDIF;
```

```
END:
M99 ;紧刀
G153 Y = Y_ToolChangeOk_POS ;远离刀库
M206 M94 ;刷新主轴刀号、NCK 应答
M17;
```