

中文摘要

制造业一直是国民经济的重要支柱之一，而智能制造则是制造业发展的重要趋势。数字孪生的出现，加快了制造业从中低端向中高端的转变。工业机器人在智能制造中扮演着不可或缺的角色，构建工业机器人的数字孪生系统有助于实现对机器人的监控、调试和优化，降低可能发生的风险和试错成本，从而推动制造业数字化、智能化转型。

本文具体研究内容如下：

（1）研究了数字孪生相关理论与技术，依据数字孪生五维模型，构建了工业机器人数字孪生系统的三层架构：设备层、中间层、应用层。

（2）在设备层构建机器人的数字孪生虚拟模型，以 ABB 的 IRB-120 机器人为研究对象，分析数字孪生模型构建的基本要求和内容，通过 UG NX 软件实现机器人的三维建模，并在 MCD 模块中按照几何布局进行装配、添加物理属性、运动学行为及限制等，从而实现虚拟模型对物理实体的忠实映射。

（3）中间层进行数据采集与传输，首先通过分析所需采集数据，建立六轴工业机器人的信息模型，采集实体机器人运行时的关节轴角度并设计人机交互界面，对实体机器人的数据进行可视化监控，最后通过 TCP/IP 协议将采集到的数据传输给 MCD 中的虚拟模型，实现虚实同步运动，并对实体机器人运行状态的监控。

（4）在应用层的服务系统中对可视化状态监测功能和轨迹规划功能进行测试，验证了六轴工业机器人数字孪生系统的可行性与有效性。

关键词：工业机器人；数字孪生；PC SDK；状态监测；TCP/IP

ABSTRACT

Manufacturing has long been recognized as a critical driver of national economies, and the advent of smart manufacturing has emerged as a pivotal trend in its development. The integration of digital twin technology has expedited the transition of manufacturing from the low-end to mid-high-end spectrum. In this context, industrial robots have assumed an indispensable role in intelligent manufacturing. Establishing a digital twin system for industrial robots facilitates real-time monitoring, debugging, and optimization, thereby minimizing potential risks and trial-and-error costs, and ultimately propelling the digital and intelligent transformation of the manufacturing industry.

This research focuses on the following objectives:

(1) Exploration of digital twin theories and technologies and development of a three-layer architecture for the digital twin system targeting industrial robots. The architecture is based on the five-dimensional model of the digital twin and comprises the device layer, intermediate layer, and application layer.

(2) Construction of a digital twin virtual model of the industrial robot at the device layer. The study employs ABB's IRB-120 robot as the research subject and analyzes the fundamental requirements and components necessary for digital twin model construction. The virtual model is realized through UG NX software, encompassing 3D modeling of the robot, followed by assembly, inclusion of physical attributes, kinematic behaviors, and geometric constraints within the MCD module, thus establishing a virtual representation of the physical entity.

(3) The intermediate layer is responsible for data acquisition and transmission. Firstly, it establishes an information model for the six-axis industrial robot by analyzing the required data for acquisition. The physical robot's joint axis angles during operation are acquired, and a human-computer interaction interface is designed to visually monitor the physical robot's data. Finally, the acquired data is transmitted to the virtual model in the MCD using the TCP/IP protocol to enable synchronized motion between the virtual and physical models, facilitating monitoring of the physical robot's operational status.

(4) Validation of the visual state monitoring and trajectory planning functions within the application layer's service system. These tests serve to verify the feasibility and effectiveness of the digital twin system for six-axis industrial robots.

Keywords: Industrial robot; Digital twin; PC SDK; Condition monitoring; TCP/IP

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 课题研究的背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 数字孪生国内外研究现状	2
1.2.2 工业机器人状态监测国内外研究现状	3
1.3 本文主要研究内容	4
第二章 相关理论与整体方案设计	5
2.1 数字孪生技术理论	5
2.1.1 数字孪生五维结构模型	5
2.1.2 数字孪生基础支撑技术	6
2.2 NX MCD 虚拟建模	8
2.3 PC SDK 二次开发	9
2.4 TCP/IP 通信	10
2.5 系统整体方案设计	11
2.6 本章小结	14
第三章 数字孪生机器人模型构建	15
3.1 数字孪生模型分析	15
3.1.1 数字孪生模型构建的基本要求	15
3.1.2 数字孪生模型构建的基本内容	16
3.2 基于 NX MCD 的虚拟模型建模流程	16
3.3 基于 NX MCD 的虚拟模型建模	17
3.4 本章小结	22
第四章 数据采集与通信设计	23
4.1 六轴工业机器人数字孪生系统信息模型	23
4.1.1 六轴工业机器人信息模型定义及分类	23
4.1.2 六轴工业机器人信息模型的构建	23
4.2 PC SDK 数据采集	24
4.2.1 建立数据通信	24
4.2.2 PC SDK 类库构成及各功能模块实现	26
4.2.3 人机交互界面	27

4.3 TCP/IP 通信及数据传输	28
4.3.1 基于 Socket 的 TCP 通信	29
4.3.2 基于 MCD 的信号映射	31
4.3.3 数据驱动验证	32
4.4 本章小结	34
第五章 测试与验证	35
5.1 可视化功能测试	35
5.1.1 状态监测验证	35
5.1.2 运动控制验证	38
5.2 轨迹规划功能测试	39
5.2.1 建立 D-H 坐标系	39
5.2.2 运动学分析	40
5.2.3 轨迹规划验证	43
5.3 本章小结	49
第六章 总结与展望	51
6.1 总结	51
6.2 展望	51
参 考 文 献	53
致 谢	57

第一章 绪论

1.1 课题研究的背景及意义

近年来，人工智能、物联网、云计算等技术的快速发展，使得人类生活方式发生了巨大改变。随着工业化和智能化的深度融合，人们对生产效率、产品质量、安全性、精度等要求越来越高，传统的人工制造已经无法满足这些需求。随着德国“工业 4.0”的发布和“中国制造 2025”的持续推进，机器人在智能制造业中的应用也越来越多^[1]。

六轴工业机器人是一种高度自动化的生产设备，具有设计紧凑、自由度高、操作简单、动作精度高等优点，被广泛应用于汽车制造、电子产品制造、食品加工等行业中，为生产线带来了高效、高精度、高效率等优势^[2]。但其内部结构十分复杂，采用了传感器检测、控制系统、机器视觉等多种技术，因此，维修六轴工业机器人通常需要经验丰富的技术人员和高昂的成本^[3]。

六轴工业机器人在现代工业生产线中扮演着非常重要的角色，若在生产过程中发生故障，一方面，生产线无法正常运转，导致生产停止，使得企业亏损，另一方面，机器人出现突然指控或末端执行器失效等故障，可能会损伤其他设备^[4]。因此，采取智能化手段对工业机器人进行维修，可以提高维修效率和准确度，降低维修成本和误判率，同时还可以提高机器人的可靠性和稳定性，为企业的生产和运营带来更大的价值。

信息物理系统（Cyber-Physical System, CPS）通过信息技术和物理系统的协同作用，实现对物理世界的感知、控制和管理。信息物理系统的建立可以实现很多效果，例如提高系统的可靠性和稳定性、提高生产效率和质量、降低成本和能源消耗、实现智能化和自动化等^[5]。在 CPS 技术的基础上，数字孪生成为了一种新的技术要点，可以更好的实现工业生产的智能化^[6]。

数字孪生是指在虚拟空间中构建出一个高度还原物理系统的数字模型，并通过数据采集、驱动、分析等技术，实现对物理系统的实时监测和优化^[7]。虽然 CPS 与数字孪生都涉及到了数字化技术和物理系统的结合，但相比于 CPS，数字孪生更加侧重于对物理系统进行建模和仿真，将数字孪生模型通过可视化技术呈现出来，更为直观的了解物理系统的运行情况和状态；数字孪生可以对物理系统的全生命周期进行监控和优化，包括设计、制造和运维等各个环节，实现对整个生产过程的智能化管理；数字孪生还可以通过云计算等技术实现对大量实时数据的快速处理和分析，从而实现对物理系统的实时监测和优化^[8]。

因此，本文以 ABB 的 IRB-120 机器人为研究对象，构建了六轴工业机器人的数字

孪生系统，为机器人状态检测以及轨迹规划提供了一种新的思路，提高了机器人系统智能化水平，为日后高精度复杂数字孪生系统的构建提供理论与实践依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 数字孪生国内外研究现状

（1）数字孪生国外研究现状

2002 年，Michael Grieve 教授最早在密歇根大学的“产品生命周期管理”课程中提出了“虚拟数字表达等同于物理产品”的概念，并给出了“一个或一组特定设备的数字模型可反应出真实设备的状态，并可以在真实或模拟条件下进行测试”的定义。这一概念随后被完善为“镜像空间模型”和“信息空间模型”，其中所包含的物理世界中的物理实体、虚拟空间中的虚拟模型、物理世界与虚拟世界之间的数据接口即为数字孪生的三个组成部分^[9]。2011 年，美国航天局（NASA）开始探索数字孪生的概念，并开发了一种数字孪生模型来模拟飞机的各种状态和运行情况，以更好地了解 and 预测飞机在执行任务时可能出现的问题^[10]。

2014 年，美国航天局（NASA）与空军研究实验室（AFRL）共同启动了数字孪生计划（Digital Twin Program），旨在将数字孪生技术应用于卫星、飞机和导弹等航空航天领域中，以提高设备的可靠性、降低维护成本和提高性能^[11]。美国通用电气公司（GE）专门开发了数字孪生工业云平台 Predix，并将其应用在飞机发动机的设计研发过程中，以提高生产效率和降低生产成本^[12]。

在 2015 年，ANSYS 团队利用数字孪生技术构建了泵的系统级降阶模型，基于模型的动态交互等特点可提供实时检测与修复模拟等服务，有助于更好地理解 and 优化产品性能，并辅助故障检测与个性化维修指导^[13]。

西门子公司在 2017 年开发了基于数字孪生技术的工业互联网平台 MindSphere。通过连接各种设备，实现数据的收集、处理和分析，并为企业提供实时决策支持。同时可以帮助企业监控设备状态、预测故障、优化生产过程等，提高生产效率和质量^[14]。微软推出的 Azure Digital Twins 是一个基于云计算和物联网技术的数字孪生平台。可以通过对工厂、城市等物理环境数字化建模，实现对物理世界的实时监测和数据分析^[15]。

（2）数字孪生国内研究现状

中国对数字孪生的研究大多集中在高校里，最早的是北京航空航天大学的陶飞教授，首先对数字孪生的理论进行了深入的探索，并将其运用到了实践之中：在 2017 年首次提出了数字孪生车间（DTW）的概念^[16]，随后又对 DTW 信息物理融合的相关理

论和技术进行了研究，为工厂实践 DTW 提供了参考；2019 年对已有的数字孪生的三维模型基础上增加了孪生数据和服务，提出了数字孪生五维模型的概念^[17]；随后建立了数字孪生的标准体系规范了国内理论研究与应用提供了参考^[18]。

随着我国工业智能化的快速发展，对数字孪生的研究已经不单单只限于理论，国内已经掀起了数字孪生在不同领域应用的浪潮。王庆涛等人将数字孪生技术应用到车辆自动驾驶测试领域，提出了一种新型、安全、高效的虚实结合的实车在环测试方法^[19]。丁华等人将数字孪生技术应用至煤矿领域，并结合深度学习对整个采煤过程进行高精度模拟，在直观地显示出采煤状态的同时，能够较好地对比采煤机各主要零件的剩余使用寿命进行预测，从而对采煤机的健康状况做出综合分析^[20]。李聪波等人针对数控铣削刀具磨损开发了数字孪生系统，通过神经网络对刀具加工过程的多源数据进行特征化提取，对刀具磨损的过程进行实时仿真^[21]。

南京航空航天大学的宋家焯教授通过采用点云拟合的方法对生产车间进行了三维建模，并且建立了数字孪生车间的 OPC UA 信息模型，对其中所需采集的非结构化数据开发了可兼容多种数据传输协议的数据采集与监测控制（SCADA）系统，通过多源异构数据集成和虚实映射数据匹配技术来虚拟车间与物理车间的数据同步，实现了对生产车间的可视化实时监控^[22]。

1.2.2 工业机器人状态监测国内外研究现状

随着智能化工厂规模的不断扩大和应用领域的不断扩大，要让工业机器人在制造业中发挥更大的作用，提升企业的生产效率，需要收集机器人的工作状态数据，并对其进行更好地分析，从而完成机器人的工作状态检测任务^[23]。自 60 年代以来，监控技术已被广泛应用于航空航天、军工等多个领域。为了实现对工业机器人的状态监测，必须先采集工业机器人在运动过程中的运动信息，并对这些信息进行分析、处理。当机器人在工作期间出现危险时，可以及时发出预警提示，使机器人停止运行^[24]。

（1）工业机器人状态监测国外研究现状

瑞士 ABB 公司研制出了一种机器人远程维修平台，可以通过互联网将机器人故障信息传输给技术维修人员，技术人员可以通过远程控制来对机器人进行诊断和修复，从而节约了维修时间^[25]。Raghavan 等人提出了一种基于高斯混合模型的无监督故障检测框架，利用电流信号有效检测了工业机器人在运行时的故障^[26]。Banduka 等人设计了一种基于 Android 设备和 Wi-Fi 通信的工业机器人远程控制系统，通过观察 3D 模型运动和轨迹路径，提供直观的状态监控，同时也能够实现对机器人的远距离控制^[27]。

（2）工业机器人状态监测国内研究现状

在国内，吴泽枫等人通过以太网将采集到的机器人运动状态数据上传至云服务器来进行数据交互，完成了对机器人运动状态的远程监测、历史查询和故障预警等^[28]。陈玉娇等人将数字孪生技术与机器人码垛作业流程相结合，搭建了工业机器人码垛数字孪生系统。实现了对工业机器人码垛虚拟可视化仿真与策略优化信息反馈^[29]。胡飞等人使用 OPC UA 通信实现了对上下料机器人的状态监测，针对性设计了机器人的 OPC UA 信息模型，有效解决了底层数据源格式语义与数据通信不一致的问题^[30]。

1.3 本文主要研究内容

本文将实验室 ABBIRB-120 机器人作为研究对象，根据已有的数字孪生五维模型，从三个层面（设备层、中间层、应用层）对六轴工业机器人数字孪生系统进行开发。首先，在设备层方面，通过 NX MCD 完成对虚拟模型的构建。其次，在中间层方面，通过 PC SDK 对工业机器人进行数据采集，并使用 TCP/IP 协议将数据传输到虚拟模型以驱动虚拟模型。最后，通过对机器人状态监测功能和轨迹规划功能的测试，验证本文系统的可行性与有效性。本论文的主要工作包括以下几个方面：

第一章主要论述了在国内外智能制造的发展趋势下，将数字孪生技术应用在六轴工业机器人上的重要性，并对数字孪生和工业机器人状态监测在国内外的研究进行了总结，最后对本文主要研究内容进行了说明。

第二章主要对数字孪生技术理论及相关支撑技术、NX MCD 建模技术、PC SDK 数据采集、TCP/IP 通信技术进行了简单介绍，在数字孪生五维模型的基础上，本文从应用层、中间层和应用层三个层面搭建了六轴工业机器人数字孪生系统。

第三章主要介绍了对虚拟模型的构建。首先对虚拟模型进行分析，确定模型构建的基本要求和内容。之后根据建模流程，利用 UG NX 建模软件，实现对机器人关节模型的建立和连接。最后利用 MCD 中的模型装配及信号配置，完成了数字孪生体的构建。

第四章主要解决了中间层的数据采集及通信问题。本章采用 PC SDK 二次开发的方法，实现了对实体机器人的数据采集，并利用 TCP/IP 协议，建立了 VS 和 MCD 之间的数据通讯，并将收集到的关节角度传送给 MCD，从而实现了虚拟模型的控制。

第五章主要解决了服务层的应用问题。开发了六轴工业机器人数字孪生系统，通过数据监控功能模块对实体机器人运行时的运行状态及数据进行监控，以及利用直线和圆弧规划对轨迹规划功能模块进行了测试，验证了系统的可行性与有效性。

第六章对全文研究工作进行了总结，说明了目前工作的不足之处，分析了还可以提高的方面，并对未来的工作进行了展望。

第二章 相关理论与整体方案设计

本章节从数字孪生的角度，阐述整个系统设计与实现过程中所用到相关技术，从而给出六轴工业机器人数字孪生系统的整体方案设计。

2.1 数字孪生技术理论

2.1.1 数字孪生五维结构模型

密歇根大学 Michael Grieves 教授于 2011 年提出数字孪生由物理世界中的实体产品、虚拟世界中的虚拟模型以及二者之间交互数据的接口三个部分组成^[31]。

随着数字孪生技术被广泛应用在各行各业中，数字孪生的概念和应用准则也得以不断完善。数字孪生模型也由最初的三维结构发展为更具全面性的五维结构模型^[32]，由物理实体（PE）、虚拟实体（VE）、孪生数据（DD）、服务系统（Ss）和连接（CN）组成，如图 2.1 所示。

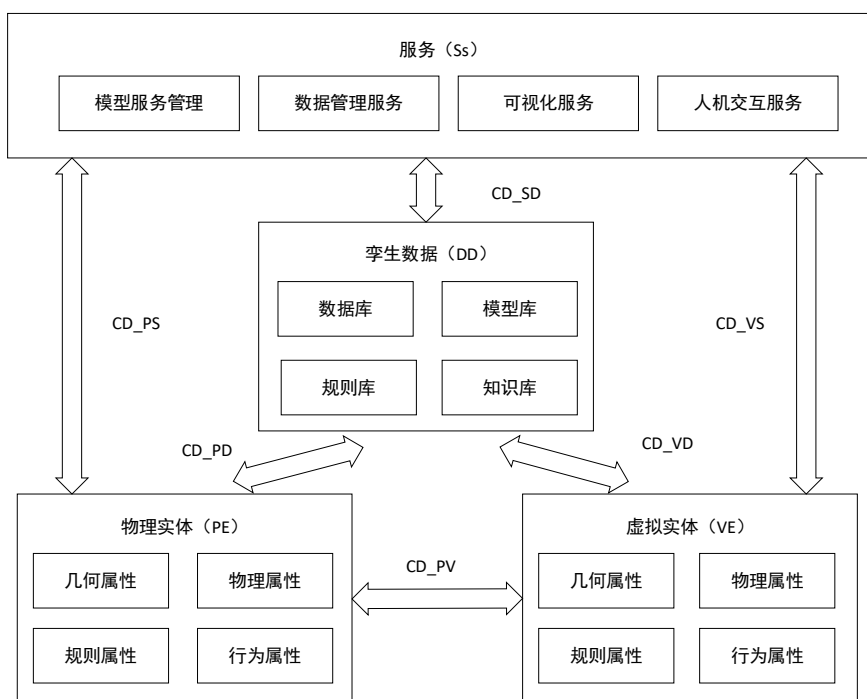


图 2.1 数字孪生五维结构模型

Fig.2.1 Digital twin five-dimensional model

“物理实体”是物理世界中具有静、动态信息的真实设备。“虚拟实体”包含了物理实体的几何、物理、规则、行为属性，是物理实体在虚拟空间中的真实映射。“连接”是物理实体与虚拟实体之间传输信息的管道，利用信息传输技术，将物理实体的数据传输至虚拟实体，同时也将虚拟实体运行时所产生的数据实时反馈给物理实体。“数据”包括与物理实体有关的信息和抽象概念的数字表示，该过程涉及合并来自各个领域的数据，并根据物理实体和数字原型的特征变化不断完善它。“服务系统”包含与整个系

统相关的关键信息，并提供物理和虚拟实体状态变化的实时更新。这使得能够及时优化以确保精确和可靠的服务质量。

在彻底阐明数字孪生的五维结构模型中每个组成元素的不同含义之后，根据数字孪生五维模型的结构组成，明确实现数字孪生必要的基本原则：

物理实体(PE)：客观存在的实体。它是由多个子系统组成，各系统间协同运转。通过部署在物理实体上的传感器实时驱动虚拟实体的运行，从而监测该物理实体的实时状态。

虚拟实体(VE)：物理实体的数字孪生体。它将物理实体所具有的几何、物理、规则、行为属性整合在一起。是物理实体最真实的映射，在虚拟空间中反映出物理实体的基本属性、运动规律等。

连接(CN)：物理对象和虚拟对象之间交互的桥梁。它将实体与虚拟体以标准化协议采集的数据进行连接，在保证模型真实性的前提下实现数据的实时性，从而实现虚实同步运动。

孪生数据(DD)：数字孪生的核心。没有数据就没有数字孪生这个概念。它包括物理实体和虚拟实体静态和动态的全部数据，是由采集的各种数据融合而成，并随着新数据的产生不断更迭。

服务(Ss)：系统各类信息的集合。用于展示物理实体的运行状态和数据，为用户提供智能、实时的人机交互服务。

2.1.2 数字孪生基础支撑技术

与传统的虚拟仿真不同，数字孪生技术的发展需要综合运用虚拟建模、数据采集和数据分析等多种技术，以有效感知、诊断和预测物理实体的状态，并对其相应的数字模型进行优化。仿真技术作为数字孪生系统的基础技术，通过数据的集成和交换，仿真技术为数字孪生系统提供了强大的支持^[33]。在仿真技术的基础上，数字孪生需依赖于新技术的集成，以确保其准确性、实时功能和闭环性能。

(1) 多领域多尺度融合建模技术

“多域建模”是一种涉及跨越多个领域的物理系统融合建模的方法，从概念设计阶段开始应用，并在深层次的机理层面进行综合的设计理解和建模。现代建模技术通常涉及特定领域内模型的开发和改进，随后通过集成和数据融合方法将来自不同领域的独立模型合并为一个综合的系统级模型^[34]。

(2) 数据采集与传输技术

数据采集与传输技术在数字孪生系统中扮演着连接现实世界和数字世界的桥梁，

为数字孪生系统提供了实时、可靠、安全的数据支持，为数字孪生应用的实现和发展提供了基础。在数字孪生系统中，数据采集与传输技术需要具备高效、稳定、安全的特点。高效的数据采集与传输技术能够保证数据的实时性和准确性，确保数字孪生系统能够及时获取最新的数据信息。稳定的数据采集与传输技术能够保障数据传输的可靠性和稳定性，防止数据丢失或传输中断，从而保障数字孪生系统的正常运行。安全的数据采集与传输技术则能够保障数据的机密性和完整性，保证数据不被随意修改，保护数字孪生系统的安全^[35]。

（3）数据驱动与物理模型融合的状态评估技术

状态评估技术在数字孪生中起着关键作用，它通过数据驱动与物理模型融合的方式，对系统的状态进行评估。数据驱动的状态评估利用实时采集的传感器数据、设备数据或其他外部数据，通过算法和模型进行处理和分析，提取关键的状态信息，例如位置、速度、温度等。物理模型融合的状态评估则通过将实际物理模型与数字孪生模型结合，将模型预测与实际观测进行比对和校准，从而得出更加准确的状态评估结果。通过数据驱动与物理模型融合的状态评估，数字孪生系统能够实时监测和评估系统状态，为实时应用和决策提供重要的参考依据，提高了系统的可靠性、安全性和性能^[36]。

（4）全生命周期数据管理

全生命周期数据管理在数字孪生中起到支撑作用，能够确保数字孪生模型所使用的的数据质量、准确性和可靠性，支持数字孪生模型的有效运行和持续优化。全生命周期数据管理包括数据采集、存储、处理和分析等环节，能够确保数据的质量、完整性和一致性，从而保障数字孪生模型的质量和可靠性。全生命周期数据管理能够提供实时的数据支持，从而使模型能够在不同阶段进行更新和验证，确保数字孪生模型能够真实地反映实际世界的状态和行为。全生命周期数据管理能够提供实时的数据支持，为数字孪生模型提供准确的输入，从而支持基于数据的决策制定，包括预测、优化、故障诊断等。全生命周期数据管理能够支持数据在不同系统之间的传输和共享，从而实现数字孪生模型与实际系统之间的数据互通和集成，支持数字孪生系统的协同工作和整合^[37]。

（5）高性能计算

在数字孪生系统中，高性能计算技术发挥着重要的作用，用于处理大规模、复杂的模型和数据，以支持高效的模拟、仿真和优化。数字孪生系统中的计算任务通常是大规模、高密度的，需要并行计算和分布式计算来处理大量计算任务。这包括将任务划分成多个子任务，并通过并行计算和分布式计算技术在多个处理单元或计算节点上

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/097044166024006135>