

冶金领域用机器人 第4部分：数字孪生

Robots for metallurgy - Part 4: Digital twins

(报批稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2023 - XX - XX 发布

2023 - XX - XX 实施

中国电器工业协会（CEEIA）是在平等、自愿基础上，由全国电工装备制造、科研、院校、工程成套、销售、用户及相关企事业单位组成的全国性社会组织。按照专业分为发电设备、输变电设备、配电设备、用电设备、基础元件和材料五个领域。现有 42 个分支机构，6000 余家会员单位，分布在全国各地，涵盖电器工业所有领域。中国电器工业协会始终以振兴和发展我国电器工业，代表和维护全行业共同利益和会员合法权益为宗旨，在政府和会员之间发挥“纽带”和“桥梁”的作用。

制定中国电器工业协会团体标准，是推动行业可持续发展，满足企业需要，推进企业技术进步，也是协会重要工作之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国电器工业协会团体标准的建议并参与有关工作。

中国电器工业协会团体标准按照《中国电器工业协会团体标准制定工作管理办法》进行制定、发布和管理。标准中有关的知识产权问题，按照《中国电器工业协会团体标准知识产权管理办法》进行管理。

在标准实施过程中，如发现需要修改或完善之处，请联系中国电器工业协会标准化工作委员会秘书处。

本标准由中国电器工业协会制定发布，其版权归中国电器工业协会所有，任何组织和个人未经中国电器工业协会同意，不得印刷、销售。考虑到本标准中某些条款可能涉及的专利，中国电器工业协会不负责任何类别专利权的鉴别。

中国电器工业协会地址：北京市丰台区南四环西路 12 区 30 号楼

邮政编码：100070 电话：010-68171344 传真：68244802

网址：www.ceeia.com

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号与缩略语	1
5 系统架构	2
6 技术要求	3
7 系统建设	6
附录 A （资料性） 氢氧切割机器人数字孪生系统示例	7
参考文献	8

前 言

本文件参照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》及T/CEEIA 270—2017《CEEIA标准编写指南》给出的规定编写。

本文件是T/CEEIA 975《冶金领域用机器人》的第3部分。T/CEEIA 975包含以下部分：

- 第1部分：分类和编码；
- 第2部分：通用技术规范；
- 第3部分：通信；
- 第4部分：数字孪生；
- 第5部分：健康评估导则。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会标准化工作委员会提出。

本文件由中电协电气场所用机器人安全与检测标准化专业委员会归口。

本文件起草单位：宝山钢铁股份有限公司、上海机器人产业技术研究院有限公司、哈尔滨工业大学、上海国评智检机器人有限公司、宝钢工程技术集团有限公司、上海图灵智造机器人股份有限公司、南京埃斯顿自动化股份有限公司。

本文件主要起草人：杨赛丹、邢琳、吴瑞珉、赵杰、魏振红、肖杨、黄天茂、刘茂生、丁烨、刘玉斌、叶长宏、陈雾、田丰齐、桑志民、宋希韬、申晨、童喆镨。

本文件于2025年首次制定。

引 言

传统冶金领域工作具有高温、高粉尘、高噪音等恶劣环境和液态熔融金属等高风险的特点，生产过程较为复杂，人工操作存在较大的安全风险，加之人口老龄化和劳动力短缺等问题，使得冶金领域迫切需要采取智能化、自动化的技术手段来提高生产效率、保障生产安全。冶金领域用机器人作为高科技手段可以实现恶劣环境下代替人工作业。

当前，已有针对工业机器人相关标准，然而，冶金领域机器人由于其应用场景较为特殊，功能更丰富，对其使用环境、安全要求严格，需结合行业实际情况详细划分。

本系列标准旨在紧密结合冶金领域实际情况及需求，明确对冶金领域用机器人的分类、编码等的要求，推动冶金领域用机器人高质量发展和规范管理。本系列标准拟由5部分构成：

- 第1部分：分类和编码（T/CEEIA 975.1—2025），目的在于结合冶金领域的实际情况，对冶金机器人及其系统的分类和编码做出明确规定；
- 第2部分：通用技术规范（T/CEEIA 975.2—2025），目的在于结合冶金领域的实际情况，对冶金领域用机器人及其系统技术要求、试验方法等做出明确规定；
- 第3部分：通信（T/CEEIA 975.3—2025），目的在于结合冶金领域的实际情况，对冶金领域用机器人及其系统的通信系统架构等做出明确规定；
- 第4部分：数字孪生（T/CEEIA 975.4—2025），目的在于结合冶金领域的实际情况，对冶金领域用机器人及其系统的数字孪生系统的系统架构、技术要求等做出明确规定；
- 第5部分：健康评估导则（T/CEEIA 975.5—2025），目的在于结合冶金领域的实际情况，对冶金领域用机器人及其系统的健康评估体系、评估流程等做出明确规定。

本文件的制定，旨在规范冶金领域用机器人及其系统的数字孪生系统架构、技术要求、系统建设等的要求。实现企业运营管控从传统到数字、从离散到集中、从多层级到一体化的转变，可以通过对数字模型的监控、分析和优化提高冶金生产的效率和质量，降低产品制造的成本和风险，大幅度提升冶金生产的应急能力和异常协调处理能力，从而提升企业的运营管控能力。

冶金领域用机器人 第4部分：数字孪生

1 范围

本文件规定了冶金领域用机器人（以下简称“冶金机器人”）及其系统数字孪生的系统架构、技术要求、系统建设。

本文件适用于冶金机器人及其系统的数字孪生。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 21052—2007 信息安全技术 信息系统物理安全技术要求

GB/T 22239—2019 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求

GB/T 35273 信息安全技术 个人信息安全规范

GB/T 41818—2022 信息技术 大数据 面向分析的数据存储与检索技术要求

GB/T 43441.1—2023 信息技术 数字孪生 第1部分：通用要求

GB/T 45626—2025 信息技术 装备数字孪生系统 通用要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

目标实体 target entity

现实世界中被选中进行数字化映射的实体。

[来源：GB/T 43441.1—2023, 3.2]

3.2

数字实体 digital entity

目标实体的数字化映射。

[来源：GB/T 43441.1—2023, 3.3]

3.3

数字孪生 digital twin

具有保证物理状态和虚拟状态之间以适当速率和精度同步的数据连接的特定目标实体的数字化表达。

[来源：GB/T 43441.1—2023, 3.4]

4 符号与缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

API：应用程序接口（Application Programming Interface）

JSON：JavaScript 对象表示法（JavaScript Object Notation）

MQTT：消息队列遥测传输（Message Queuing Telemetry Transport）

NB-IoT：窄带物联网（Narrow Band Internet of Things）

OPC：OPC基金会（非赢利工业协会）OPC Foundation(a non-profit industry association)

PAC：可编程自动化控制器(Programmable Automation Controller)

PLC：可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller）
 UA：统一架构（Unified Architecture）
 UE4：第四代虚幻引擎(The Fourth Generation Unreal Engine)
 XML：可扩展标记语言（eXtensible Markup Language）

5 系统架构

5.1 冶金机器人系统数字孪生架构包括目标实体层、数据层、数字孪生模型层、应用与服务层，见图1，冶金机器人系统数字孪生示例见附录 A 图 A.1。

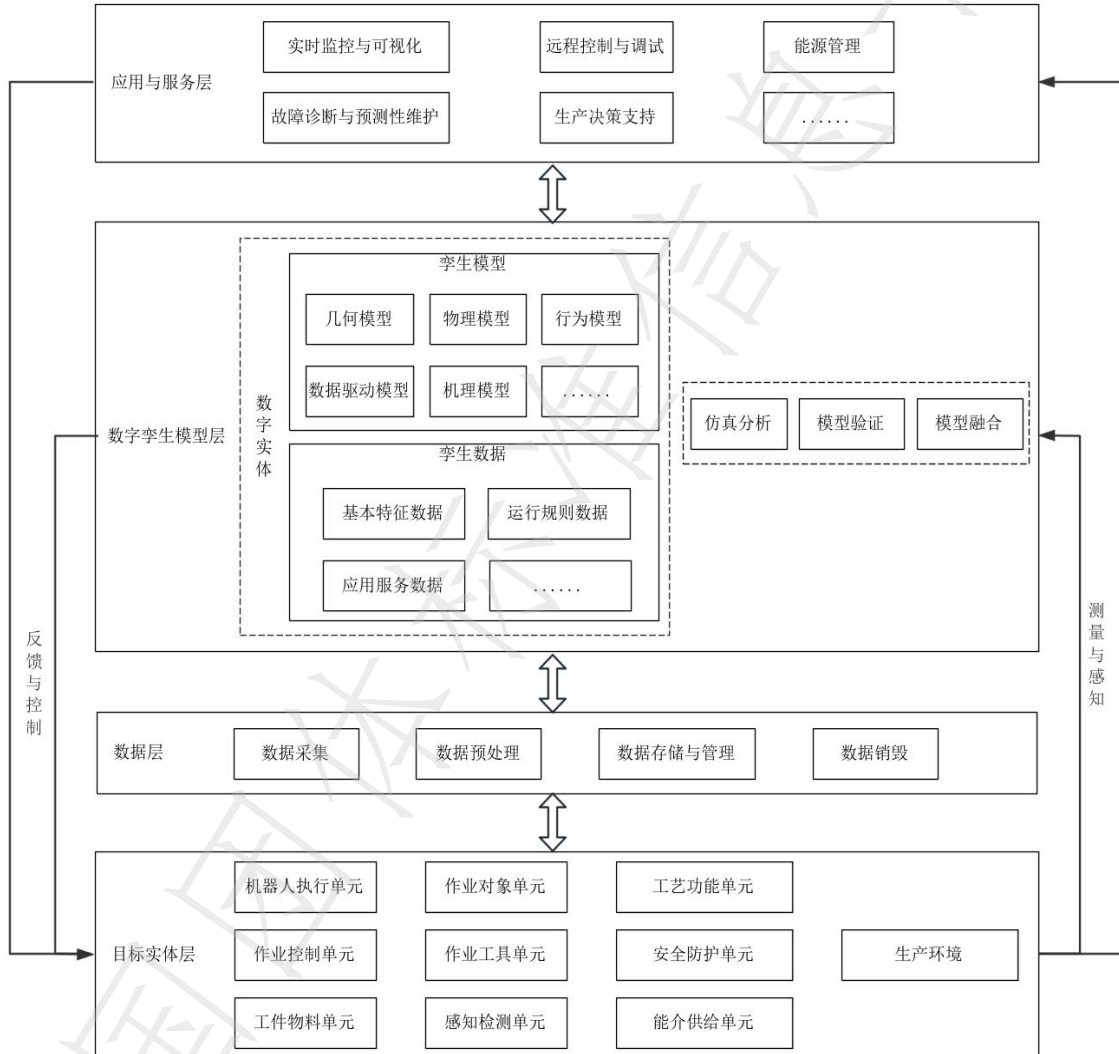


图1 冶金机器人系统数字孪生架构图

5.2 目标实体层包括 T/CEEIA 975.1—2025 中 4.5 规定的机器人作业系统单元中除软件单元外的其他 9 个单元及现场生产环境。

5.3 数据层包括：

- 数据采集：通过传感器数据读取、设备状态监测、生产数据收集等方式采集冶炼质量与工效数据、机器人本体数据、环境数据等；
- 数据预处理：结合实际任务目的与需求，对采集到的数据进行处理，包括数据清洗、数据增强、数据特征提取、数据分帧、数据对齐与同步校准、数据压缩、数据融合等；
- 数据存储与管理：对数据进行存储与管理；

- d) 数据销毁：数据生命周期的最终环节，通过物理或逻辑手段彻底清除存储介质中的多源异构数据。

5.4 数字孪生模型层是在获取数据的基础上，依托三维建模软件、仿真软件、人工智能算法等手段，结合实体模型，建立数字孪生模型，直接与目标实体层进行虚实交互，如根据目标实体实时状态开展同步仿真、仿真结果传递至目标实体，为目标实体的各项活动提供验证、优化和指导。数字孪生模型层包括以下内容。

a) 孪生模型：

- 1) 几何模型：包括机器人、设备、工件等目标实体的三维模型、冶金产线布局的数字化复现（如冶炼炉、轧机、传送带的空间关系）等；
- 2) 物理模型：包括材料特性建模（金属熔融、冷却形变、应力分布等物理规律）、机器人运动学、动力学模型、冶金工艺过程模型等；
- 3) 行为模型：包括机器人协作逻辑（多机协作、人机协作）、设备状态演化模型（磨损、疲劳、故障预测）等；
- 4) 控制模型：描述数字实体对机器人及相关设备的控制机制，包括控制系统与控制过程；
- 5) 数据驱动模型：包括工艺模型、异常检测模型等；
- 6) 机理模型：描述目标装备的能量转换和输出、控制、测量、主要功能的执行等工作原理，机理模型通常以物理和化学等学科原理效应构建。

b) 孪生数据：参照 GB/T 45626—2025 中 5.4.2 的描述；

c) 仿真分析：利用建立的各类孪生模型（几何、物理、行为、控制、机理模型等），在数字空间中对冶金机器人系统的运行状态、工艺流程、设备性能等进行模拟、推演和计算；

d) 模型验证：基于现有条件，通过模型运行效果、检测数据、经验性知识对模型准确性进行验证，并满足任务精度要求；

e) 模型融合：根据实际需求将不同类型的模型进行整合，实现多维度数据融合。

5.5 应用与服务层通过各类控制、查询、决策软件/平台进行集成和交互，实现以下应用：

- a) 实时监控与可视化：提供生产过程的实时监控和可视化展示，直观了解生产状态和设备运行情况；
- b) 故障诊断与预测性维护：对机器人及相关设备进行故障诊断和预测，分析损坏机理，提供维护建议和维修指导；
- c) 工艺参数优化：通过在数字实体中模拟计算工艺参数指标，对实际冶金工艺参数进行优化，提高生产效率和产品质量；
- d) 远程控制与调试：支持远程操作和调试，操作人员能在远离生产现场的地方进行设备控制和参数调整；
- e) 能耗管理：对冶金作业过程中的设备能源消耗进行监测和管理，提供节能优化建议；
- f) 生产决策支持：基于数据分析和模型预测，为制定生产计划和调度方案提供支持。

6 技术要求

6.1 性能要求

6.1.1 同步性

6.1.1.1 内容信息同步

数字实体与目标实体之间应动态地进行双向内容信息（如机器人本体、设备、工件状态信息、作业数据等）同步，同步的频率和精度应满足实际应用需求。

6.1.1.2 基准时钟同步

数字孪生系统内不同模块间及数字实体与目标实体间的接口，应采用相同基准时钟。

6.1.1.3 网络容错同步

在通信延迟或中断时，系统应具备数据缓存、补偿或降级同步能力。

6.1.2 实时性

- 6.1.2.1 根据数据类型和作业要求设置数据采集频率与精度，数据采集频率宜不低于 10 Hz，端到端延迟宜不超过 100 ms，极端工况下需单独评估，应符合相关技术文件要求。
- 6.1.2.2 应在规定时间内对所采集数据进行预处理、传输处理、存储等。
- 6.1.2.3 应根据实际作业要求设置模型更新频率、数字孪生系统刷新。
- 6.1.2.4 交互过程中系统响应时间、刷新频率应满足实际需求。
- 6.1.2.5 保障用户对数字实体的快速访问与高效检索能力，支持多用户并发访问时响应时间不超过 2 s。

6.1.3 可靠性

- 6.1.3.1 数字孪生系统部署完成后，应具备稳定运行及信息交互能力，数字孪生系统软件的平均无故障时间不低于 700 h。
- 6.1.3.2 应符合 GB/T 45626—2025 中 6.6.2 的要求。

6.1.4 可维护性

数字孪生系统的可维护性应符合 GB/T 43441.1—2023 中 6.5 的要求。

6.1.5 集成性

- 6.1.5.1 应提供开放接口，支持 OPC UA、MQTT 等协议，并提供 API 文档与兼容性测试工具。
- 6.1.5.2 应能够与其他系统进行实时数据交换，支持多种数据格式，如 JSON、XML 等。

6.1.6 可扩展性

应具备模型扩展、替换、添加等能力，相关模型应具备可移植性和可重用性，适用于不同的作业场景。

6.2 功能要求

6.2.1 数字实体构建

- 6.2.1.1 根据场景需要支持不同类型的建模方法，如可见光建模、结构光建模、激光点云建模、维度建模、实体联系建模、手工建模、倾斜摄影建模等，可视化建模应支持导入主流三维格式模型建模方式，应支持对目标对象编码和管理。
- 6.2.1.2 宜支持 SOLIDWORKS、NX 等主流建模软件工具以及多种模型表达方法。

6.2.2 测量与感知

支持多种数据采集技术、多种通信方式（如有线以太网、无线 3G/4G/5G/Wlan/蓝牙/NB-IoT 等），实现对目标实体全面、多维度、多类型数据进行静态或动态、单次或批量数据的采集和感知。

6.2.3 实时仿真

- 6.2.3.1 应具备以多样的数字模型映射目标实体的能力。
- 6.2.3.2 应支持按实际应用场景要求的同步速率和精度要求对目标实体实施实时仿真分析，实时获取目标实体状态数据并传送给数字实体，数字实体通过数据实时更新与模型校正，同步彼此的动态变化并实时做出响应。
- 6.2.3.3 应实现数字实体与目标实体双向交互，通过人机交互对数字实体下发执行命令，数字实体将相关数据同步至目标实体，实现动态变化并实时做出响应。

6.2.4 可视化交互

- 6.2.4.1 应支持在计算机、虚拟现实/增强现实/混合现实设备一种或多种终端设备进行数据可视化的动态展示和交互操作。
- 6.2.4.2 应具备可视化场景搭建和可视化交互设计能力，支持人机操作界面进行操作。
- 6.2.4.3 宜支持对三维模型进行可视化展示，支持多模态孪生数据的可视化访问。
- 6.2.4.4 应支持不同视角的切换和可视化交互。

6.2.5 反馈与控制

- 6.2.5.1 应支持至少两种连接方式。
- 6.2.5.2 应具备从数字实体连接到目标实体的传输接口方式，支持可扩展的自定义接口方式。
- 6.2.5.3 应提供可视化反馈功能。

6.2.6 状态监控

- 6.2.6.1 应对设备的运行状态、作业信息、报警信息等进行监控。
- 6.2.6.2 根据监控结果，应具备操作指令下发、参数调整、作业任务切换等远程控制能力。
- 6.2.6.3 对人员安全进行监控，实现对人员活动轨迹的实时监控、定位查找、活动轨迹追溯、快速调度等，实现全地图导览等。

6.2.7 故障诊断

- 6.2.7.1 数字实体应具备模拟各类故障，生成故障仿真数据的能力。
- 6.2.7.2 应监测目标实体状态数据，并与数字实体仿真数据进行比较，当超出合理范围，应发出故障报警，并进行故障分析。

6.2.8 数字资产管理

- 6.2.8.1 应支持对多元异构数据分区域存储和分类管理功能。
- 6.2.8.2 应建立数据资产存取、标记与管理机制。
- 6.2.8.3 应对多源、异构数据的格式和编码进行规范化表达。
- 6.2.8.4 应支持对模型进行定义、删除、更新和配置。
- 6.2.8.5 应支持面向不同数字孪生应用及服务对各种模型以及数据进行检索、元数据探查、查看、下载、引用等功能，可通过不同条件快速查询获取数字资产，支持多模态孪生数据复合索引快速构建。
- 6.2.8.6 应支持数字资产版本管理。
- 6.2.8.7 宜建立各类数字资产评估规则。
- 6.2.8.8 宜支持面向用户的数字资产共享，对外提供资产在线查看、资产申请、审批、服务接口发布以及可控调用等能力。
- 6.2.8.9 应建立数据资产安全权限管理机制。

6.2.9 数据分析

- 6.2.9.1 宜支持按实际应用要求的同步速率和精度要求对目标实体进行数据分析。
- 6.2.9.2 数字孪生系统应具备在线数据分析、离线数据分析、云端数据分析功能，支持对多维数据融合分析。
- 6.2.9.3 宜支持对目标实体进行空间分析计算。
- 6.2.9.4 宜支持数据分析模型的可视化展示。

6.2.10 预测与决策优化

- 6.2.10.1 应支持基于目标实体实时状态参数，采用不同的分析方法与预测模型评估目标实体的健康状况以及预测未来变化趋势，实现对故障点和故障原因加载、报警、显示。
- 6.2.10.2 应支持开展目标实体制造、经营、生态及人员管理等阶段的不确定性预测，提供设备剩余寿命预测。
- 6.2.10.3 支持基于预测的结果，结合终端现场优化生产维护策略。

6.3 安全要求

6.3.1 环境安全

- 6.3.1.1 部署环境宜满足对信号防干扰、防屏蔽、防阻挡，实现信号全覆盖等要求。
- 6.3.1.2 目标实体的环境物理安全级别应至少符合 GB/T 21052—2007 中第 6 章要求，具体要求应结合实际应用确定。

6.3.2 数据安全

- 6.3.2.1 系统应满足 GB/T 35273 中规定的个人信息的收集、存储、使用要求。
- 6.3.2.2 系统应具备数据备份和恢复功能，并采取适当的措施保证数据传输过程中信息的真实性与完整性。
- 6.3.2.3 目标实体和数字实体之间以及数字实体和应用与服务之间交互的数据应采用加密方式进行传输，支持多种通信协议。

6.3.3 网络安全

冶金领域用机器人数字孪生系统网络安全应至少满足GB/T 22239—2019第8章的要求。

6.3.4 功能安全

- 6.3.4.1 应保证系统的正常运行、数据输出增加独立的监测，发现错误能够有效切断输出。
- 6.3.4.2 系统硬件设计应能够实现电路与安全机制电路之间的电气独立，冗余设计之间的物理独立。对于独立承担关键安全功能的复杂集成器件，应选择经过第三方安全认证的型号，并考虑元器件的随机失效率是否满足要求。
- 6.3.4.3 系统软件代码编写应采用防御性编程，对入参类型、边界值进行检查。故障时采用向前恢复或向后恢复技术。对软件任务进行时间保护和顺序监测。

6.3.5 身份鉴别

系统与接入目标实体、人员应进行双向身份认证并具备完善的身份鉴别失败处理机制，接入系统的硬件、软件、用户应具有唯一标识。

6.3.6 访问控制

- 6.3.6.1 系统应配置管理人员对接入的目标实体与人员进行控制、鉴别和记录。
- 6.3.6.2 目标实体应根据复杂度、逻辑属性、存在时间、更新情况和特征属性设置不同的访问控制规则。
- 6.3.6.3 数字实体应根据数字模型、孪生数据的特点和不同管理权限设置不同的访问控制规则。

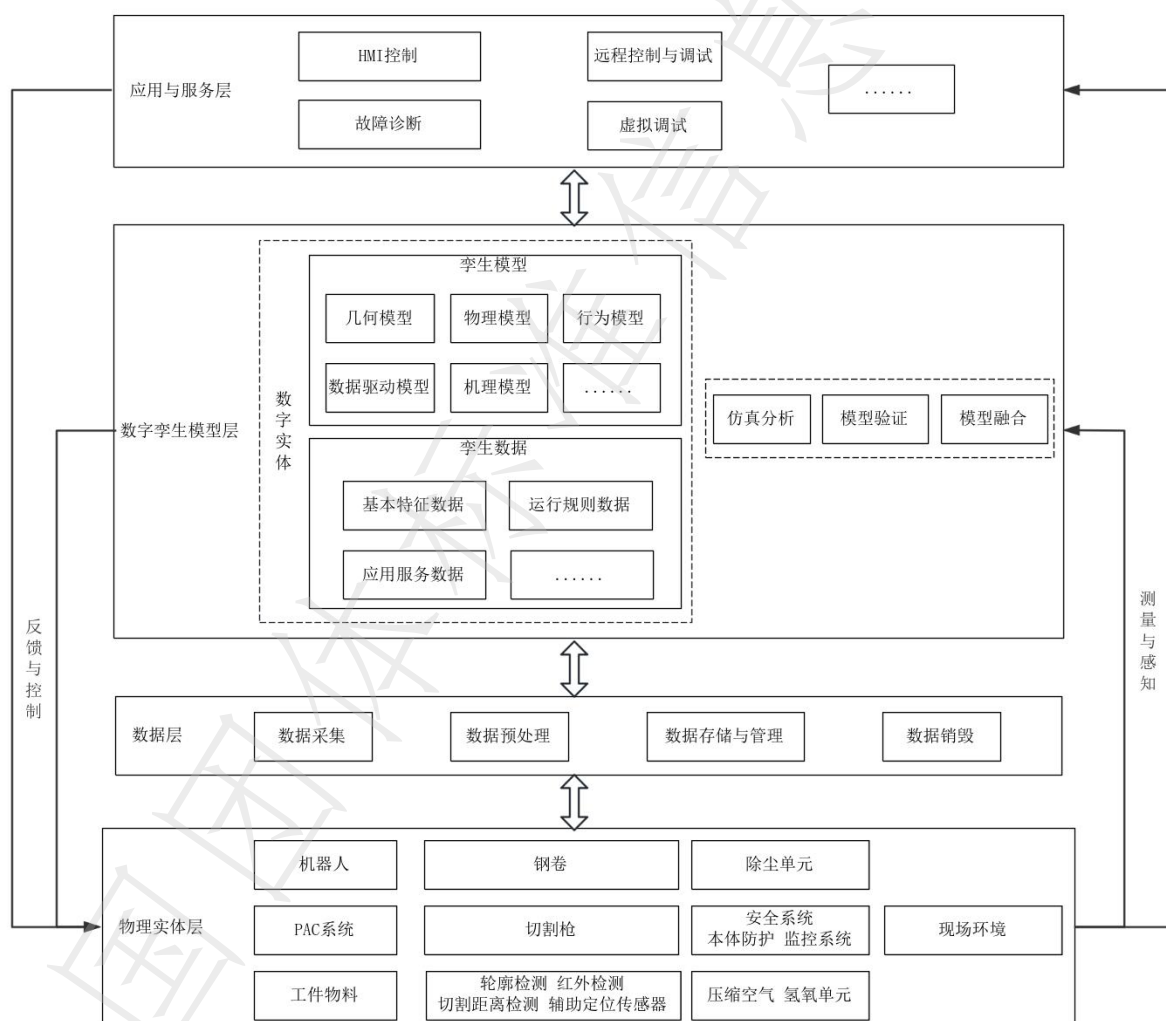
7 系统建设

冶金机器人系统的数字孪生系统建设应符合GB/T 45626—2025第7章的要求。

附录 A
(资料性)
氢氧切割机器人数字孪生系统示例

图A.1给出了以氢氧切割机器人数字孪生系统为例的系统架构，包括：

- a) 应用与服务层：实现故障诊断、虚拟调试等功能；
- b) 数字孪生模型层：使用孪生模型、孪生数据实现对物理实体的复现，并实现仿真分析等功能；
- c) 数据层：进行数据采集、数据预处理等工作；
- d) 物理实体层：该系统的物理实体，包含冶金机器人、相关生产设备等。



图A.1 氢氧切割机器人数字孪生系统示例图

参 考 文 献

- [1] GB/T 15969.2-2024 可编程序控制器 第2部分: 设备要求和测试
 - [2] GB/T 33863.1-2017 OPC统一架构 第1部分: 概述和概念
-

全国团体标准信息平台