

# Research on Universal Reference Model of the Smart Factory in Electronic Manufacturing Area of Rail Transportation Industry

Lei Han<sup>1</sup>, Hui Li<sup>1</sup>, Li Ma<sup>2</sup>, Honghui Zhan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Wuxi Research Institute, HUST, Wuxi Jiangsu

Email: mali@hust-wuxi.com

Received: Oct. 9<sup>th</sup>, 2019; accepted: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2019; published: Oct. 29<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

At present, advanced manufacturing companies in China and abroad are actively carrying out demonstration construction of smart factories. However, neither a standardized standard system for smart factories, nor a recognized smart factory architecture reference model could be used to guide the construction progress. Based on the "National Intelligent Manufacturing Standard System Construction Guide (2018 Edition)", this paper closely combines the common characteristics of electronic manufacturing factories in the rail transportation industry and the common needs of intelligent factories, and defines the industry's intelligent factories to establish a smart factory architecture reference model with industry-wide universality that guides the planning, construction, and evaluation of smart factories.

## Keywords

Smart Factory, Information Flow, Universal Reference Model, Information System

---

# 轨道交通行业电子制造智能工厂体系的通用参考模型研究

韩磊<sup>1</sup>, 李辉<sup>1</sup>, 马力<sup>2</sup>, 湛红晖<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛

<sup>2</sup>华中科技大学无锡研究院, 江苏 无锡

Email: mali@hust-wuxi.com

收稿日期: 2019年10月9日; 录用日期: 2019年10月22日; 发布日期: 2019年10月29日

## 摘要

当前,国内外先进制造企业正在积极开展智能工厂的示范建设。然而在建设过程中欠缺关于智能工厂的规范化标准体系,以及公认的智能工厂体系架构参考模型的指导。本文依据《国家智能制造标准体系建设指南(2018年版)》,结合轨道交通行业电子制造工厂的共性特征以及对智能化工厂的共性需求,对该领域智能化工厂进行了规范定义,建立具有行业普适性的智能工厂体系架构参考模型,用于指导智能化工厂的规划、建设和评价。

## 关键词

智能工厂, 信息流, 通用参考模型, 信息系统

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

轨道交通行业业务范围广泛,其下属电子制造领域是新一代信息技术领域重要的子行业之一,广泛应用于国民经济各个方面。电子制造相比传统离散制造工业,其制造工艺过程相对复杂,原材料及零部件品种多,来源及物料特性多样[1]。目前,国内的电子制造企业虽已经历几十年的高速发展,但和国际领先企业相比,国内企业普遍存在产品创新能力不足、生产效率不高、产品质量欠缺等问题,迫切需要引入智能制造技术,实现创新产品设计、优化生产过程、提升产品服务为核心目标。

尽管国内外先进制造企业正在积极开展智能工厂的示范建设,但针对智能制造的理解五花八门,提法也各不相同。有企业 2.0、智能制造、智慧制造、智能工厂 1.0、绿色工厂、工业 4.0、CPS 系统、可持续制造等,都是从某一个方面对下一代制造范式进行定义和讨论。德国电工电子与信息技术标准化委员会(DKE)提出了 Reference Architecture Model for Industry 4.0 (RAMI4.0)模型,美国国家标准与技术研究院 NIST 提出了 Smart Manufacturing System (SMS)体系架构,我国国家标准化委员会发布了《国家智能制造标准体系建设指南(2018 年版)》,提出了智能制造系统架构[2] [3] [4]。上述体系架构模型的目标对象是智能制造系统,其范围大,普适性广,偏于宏观,无法具体到特定行业的智能化工厂层面,目前还缺乏指导性的体系架构模型标准,没能对智能化工厂的内涵特征、体系架构、功能框架、信息流模型等进行清晰描述,缺乏公认的智能工厂体系架构参考模型,缺乏对智能工厂边界范围的明确界定,缺乏对智能工厂构成和数据流的清晰描述。上述现状在一定程度上阻碍了智能工厂的规划、建设、评价与复制推广。

在这样的背景下,本文依据《国家智能制造标准体系建设指南(2018 年版)》[2],紧密结合轨道交通行业的共性特征以及对智能化工厂的共性需求,对该行业智能化工厂进行了规范定义,建立具有行业普适性的智能工厂体系架构参考模型,用于指导智能化工厂的规划、建设和评价。

## 2. 智能工厂内涵

轨道交通行业电子制造智能化工厂的体系架构如图 1 所示,它是智能制造体系的子集,从工厂结构、产品生命周期和智能功能三个维度进行描述[2]。

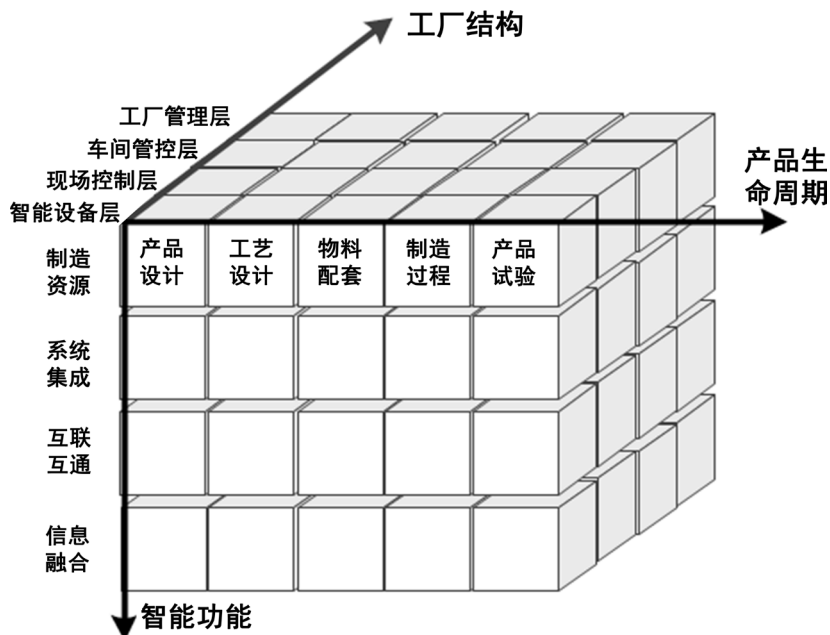


Figure 1. The architecture of electric manufacturing smart factory in railway industry [2]  
图 1. 轨道交通行业电子制造智能工厂体系架构[2]

## 2.1. 智能工厂组成

从工厂结构角度，轨道交通行业电子制造智能工厂包括：

数字化精密加工车间；  
板级电路智能微组车间；  
整机/单元智能组车间；  
智能仓储与物流等。

从数字化、自动化、智能化设备角度，轨道交通行业电子制造智能工厂包括：

生产装备，如 CNC、工业机器人、智能制造单元、智能生产线等；  
物流装备，如立体仓库、智能物料柜、AGV 等；  
检测与试验装备；  
感知与监测装置。

从仓储物流角度，轨道交通行业电子制造智能工厂涵盖：

企业级智能物流中心；  
车间级智能仓库；  
产线级智能缓冲库。

从生命周期角度，轨道交通行业电子制造智能工厂涵盖：

产品设计，如结构设计、电路设计、仿真优化等；  
工艺规划与详细设计，如工艺流程、MBD、机加工工艺设计、装配工艺设计等；  
物料管理，如物料计划、物料盘点、物料存储与配送；  
制造过程，如计划排程、在制品跟踪、在线检测与调试、质量管理等；  
产品试验，如工序检验和出厂检验，一般特性检验、力学性能检验、热学性能检验、电气性能检验等。

## 2.2. 智能工厂功能特征

从智能功能角度，轨道交通行业电子制造智能工厂具有下列特征[5] [6] [7]:

### 1) 泛在感知，三网集成

利用 RFID、激光扫描器、仪器仪表等先进感知设备，按约定的协议，构建面向工厂的制造物联网，并与服务网络和信息网络集成融合，实现信息流畅。

### 2) 知识驱动，智能决策

从制造大数据中挖掘知识，以知识驱动生产管控和仿真优化，实现决策智能化，服务于质量提升、计划调度、维护保障等生产活动。

### 3) 自动执行，精益生产

利用智能加工装备、自动生产线、机器人、智能仓储装备等制造执行终端，实现高精度、高效率、高安全保障、低消耗、低管理费用的精益生产和环境友好型生产。

### 4) 智能服务，友好交互

面向不同用户开发便携友好的交互平台，针对不同应用服务需求，对分散资源进行智能匹配，实现优质、高效的企业服务。

### 5) 自主评估，应急预警

对智能工厂健康状态、工业网络安全防护、生产安全进行自主评估，实现评估、预警、应急系统一体化集成，避免生产故障、操作失误及网络瘫痪带来的经济损失。

## 3. 智能工厂体系架构参考模型

文献[8]提出了基于资源域、服务域和组织域的智能工厂参考模型，该模型与近年关于智能工厂关键技术的研究内容相映射。本文在此基础上，丰富和细化了相关模型，详细内容如下。

### 3.1. 智能工厂组成域参考模型

如图 2 所示，按照工厂中不同智能功能的实现维度，轨道交通行业电子制造智能工厂体系架构的组成包含资源域、信息域和服务域等三部分。

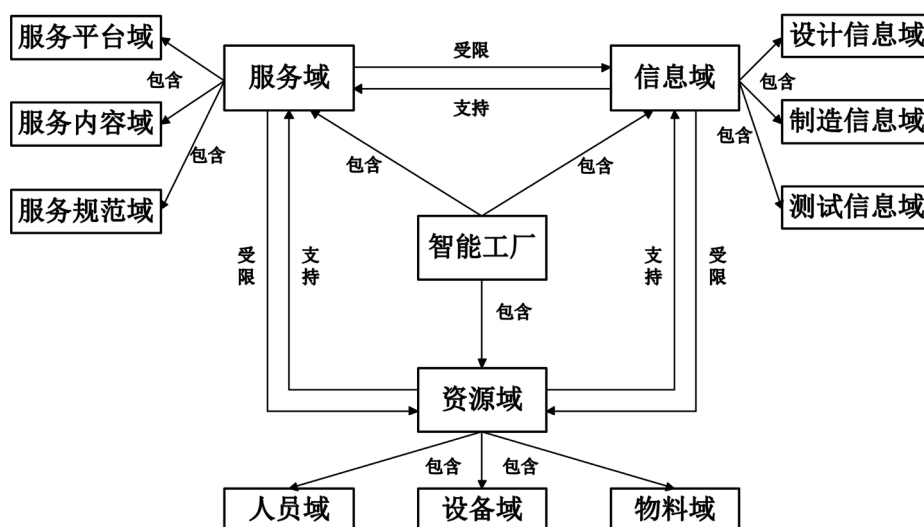


Figure 2. The reference model of intelligent factory component domain

图 2. 智能工厂组成域参考模型

具体而言，资源域指人、设备、物料等实体制造资源；信息域指围绕产品生命周期，在设计、制造、测试、运维等各阶段产生的数据、模型、经验、知识等；服务域包含服务平台、服务内容和规范，如支持企业运行管理、设计开发管理、制造运行管理等的软件平台、服务内容和规范。各组成域之间以及内部均存在复杂的耦合关系，生产流程中各个环节均可以视作由各组成域中的部分映射关系组成。

轨道交通行业电子制造智能工厂体系架构组成域之间的映射关系说明如下：

1) 包含关系

指父域与子域之间的单向关系，如资源域“包含”人员域、设备域和物料域等；

2) 支持关系

指组成域之间的单向(或双向)关系，如资源域“支持”服务域，服务域与信息域双向支持；

3) 受限关系

指组成域之间的单向限制关系，如服务域“受限”资源域和信息域，信息域“受限”资源域。

### 3.2. 智能工厂资源域参考模型

图 3 给出了资源域及其映射关系参考模型。资源域由人员域、设备域、物料域等实体资源域组成。

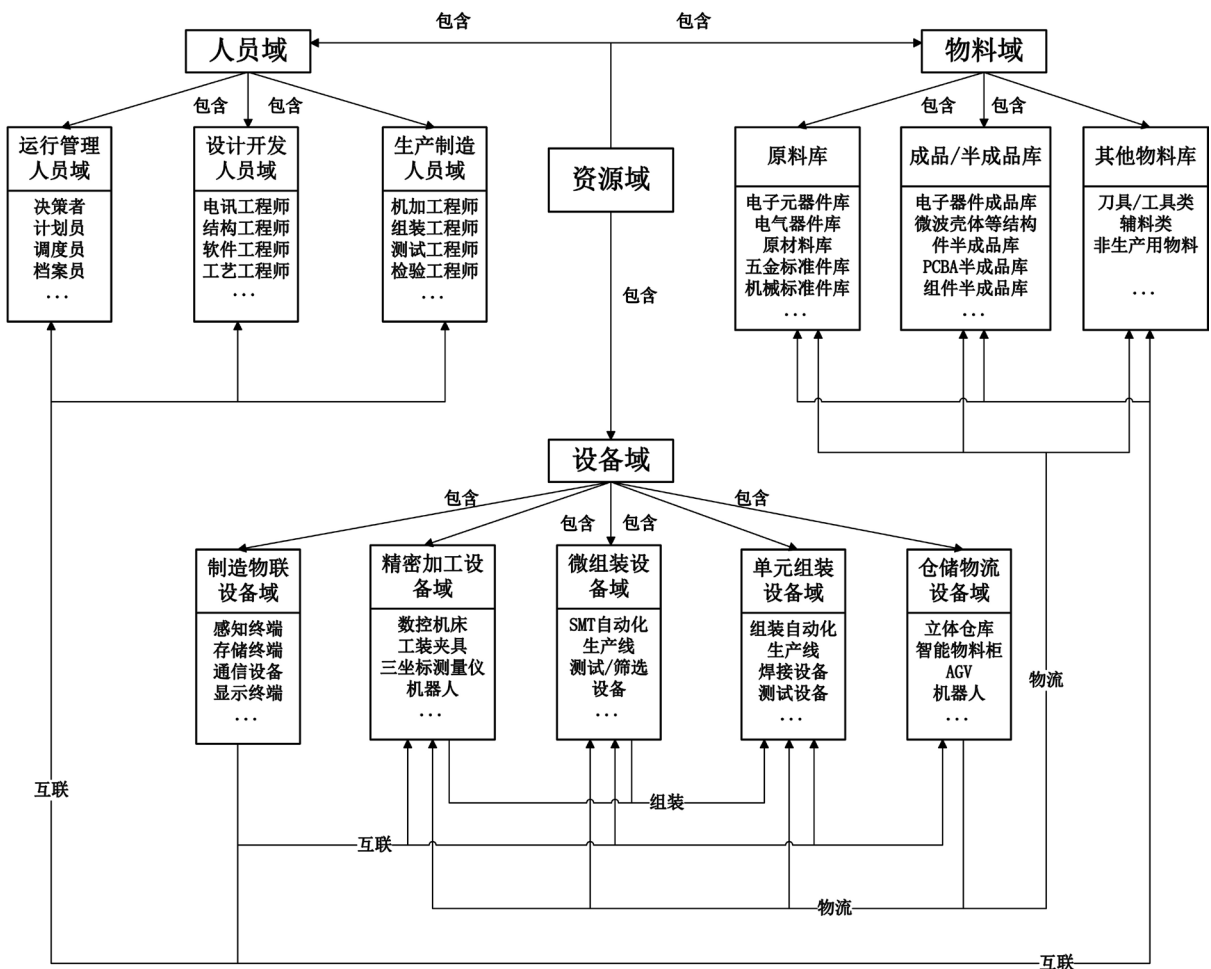


Figure 3. The reference model of intelligent factory resource domain  
图 3. 智能工厂资源域参考模型

人员域包括：运行管理人员、设计开发人员、生产制造人员等；

物料域按照大类可以分为：原料库、成品/半成品库、其他物料库等；

设备域包括：精密加工设备域、微组装设备域、整机/单元组装设备域，以及制造物联设备域和仓储物流设备域。

在逻辑上除了定义了上述相关实体资源对象之外，对象之间存在着不同的映射关系。除“包含”映射关系之外，上节定义的“支持”和“受限”关系在资源域之间有更明确的映射含义：

#### 1) 互联关系

制造物联设备域“支持”人员域、其他设备域、物料域之间的互联互通，反之，人-机-料-法-环的互联互通“受限”于制造物联设备域；

#### 2) 物流关系

仓储物流设备域“支持”物料域、其他生产设备域之间的物料存储与配送，反之，物料存储与配送“受限”于仓储物流设备域；

#### 3) 组装关系

精密加工设备域、微组装设备域“支持”模块组装设备域的组装生产，反之，组装生产“受限”于精密加工设备域、微组装设备域，如产能、效率的匹配。

### 3.3. 智能工厂信息域参考模型

如图4所示，按照产品生命周期，信息域分为设计信息域、制造信息域、测试信息域等组成。

该维度体现信息物理系统的概念，制造资源作为物理实体，通过系统集成、互联互通和信息融合，映射成虚拟对象，决策层针对虚拟对象的控制指令，来操纵物理实体的实际工作。

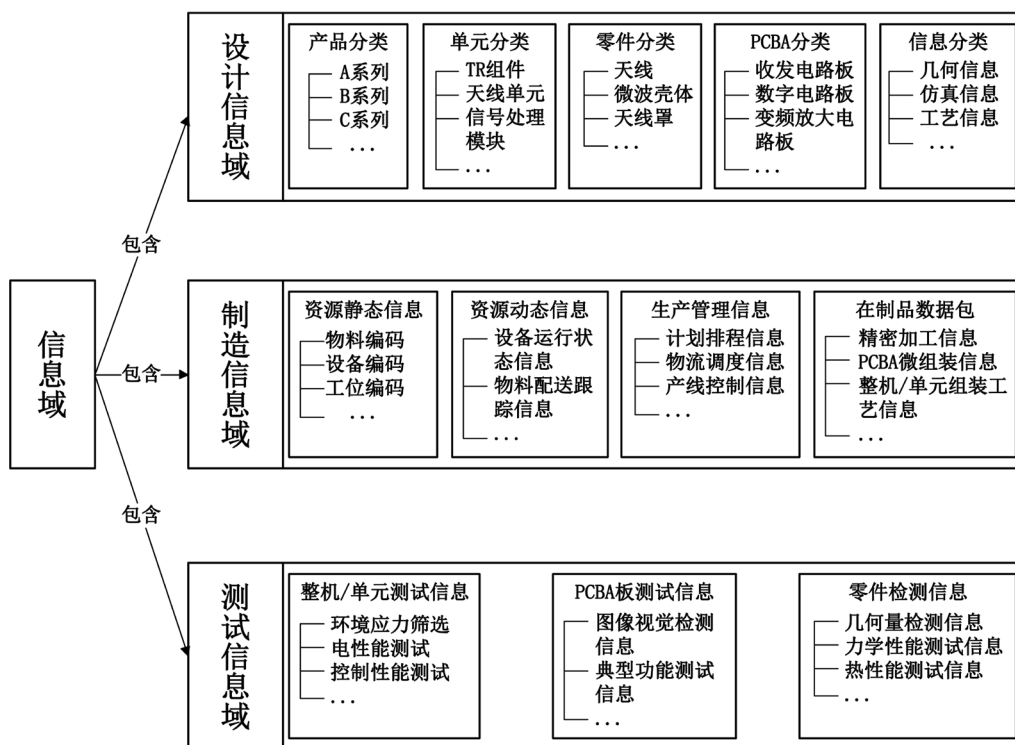


Figure 4. The reference model of intelligent factory information domain

图4. 智能工厂信息域参考模型



1) 设计信息

电子器件可以分为产品整机、单元、零件及 PCB 板三个层级，设计信息域包括几何信息、仿真信息、工艺信息等。

2) 制造信息

制造信息域包括资源信息、生产管理信息和在制品数据包，其中资源信息包括制造资源编码及其属性静态信息，以及与时间、空间、顺序关联的动态信息，如设备运行状态信息；生产管理信息指计划排程信息、物流调度信息、产线控制信息等；在制品数据包，指按照工艺过程，记录其从原料开始到成品/半成品所有制造过程的关联信息。

3) 测试信息

测试信息包括整机/单元测试信息、PCBA 测试信息、机械零件测试信息等。

3.4. 智能工厂服务域参考模型

智能工厂各种生产活动定义为智能工厂服务域，通过信息网络与服务网络的融合最大程度地降低工厂各资源之间的耦合程度，优化企业资源配置、提升生产效率和产品质量。本项目将服务域分解为服务平台域、服务内容域和服务规范域，如图 5 所示。

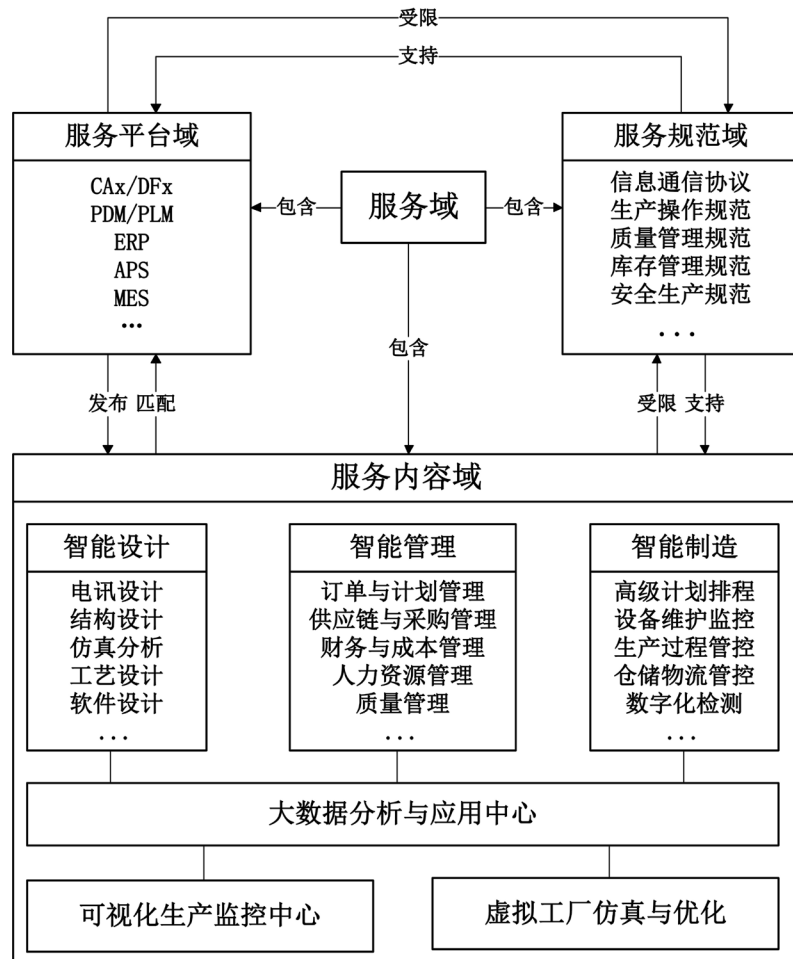


Figure 5. The reference model of intelligent factory service domain

图 5. 智能工厂服务域参考模型

其中，服务平台域指智能工厂信息系统，包括 PDM、ERP、MES、APS 等；服务活动域指按照智能工厂智能功能要求的生产活动，包括数字化设计、数字化工艺、生产监控、仿真优化、计划排程、物流调度等；服务规范域指围绕核心服务，均需遵循的服务流程和相关国际标准、行业标准和企业规范，包括：信息通信协议、生产操作规范、质量管理规范、库存管理规范、安全生产规范等。

服务域内部映射关系如下：

1) 支持关系

服务规范域“支持”服务平台域和服务内容域；

2) 受限关系

服务平台域和服务内容域“受限”服务规范域；

3) 匹配关系

指服务内容与服务平台之间的单向关系，即服务平台为生产活动“匹配”合适的服务内容；

4) 发布关系

指服务平台与服务内容之间的单向关系，即服务单向“发布”服务提供者的服务信息。

## 4. 结论

目前智能工厂还缺乏指导性的体系架构模型标准，缺乏公认的智能工厂体系架构参考模型，缺乏对智能工厂边界范围的明确界定，缺乏对智能工厂构成和数据流的清晰描述。因此，本文依据《国家智能制造标准体系建设指南(2018 年版)》，紧密结合轨道交通行业电子制造工厂的共性特征以及对智能化工厂的共性需求，对该领域智能化工厂进行了规范定义，建立具有行业普适性的智能工厂体系架构参考模型，用于指导智能化工厂的规划、建设和评价。

## 声 明

工厂结构：即智能化工厂系统的层级结构；

产品生命周期：即以产品为中心的一系列相互联系的价值创造活动组成的链式集合；

智能功能：即通过资源要素互联互通，进行信息融合，最终实现智能决策支持活动。

注 1：智能制造体系来自《国家智能制造标准体系建设指南(2018 年版)》。

注 2：和智能制造体系相比，该“工厂结构”维度不包含“协同”层级，因为该层级超越了工厂的范围。

注 3：和智能制造体系相比，该“产品生命周期”维度不包含“销售”和“服务”环节，即聚焦于工厂内部的产品价值流活动。

注 4：和智能制造体系相比，该“智能功能”维度不包含“新兴业态”环节，因为它超出了工厂范围。

## 基金项目

工业和信息化部《高速动车组关键零部件智能制造新模式应用》项目。

## 参考文献

- [1] Hankel, M. and Rexroth, B. (2015) The Reference Architectural Model Industries 4.0 (RAMI 4.0). ZVEI. <https://www.innovation4.cn/library/r3740>
- [2] 工业和信息化部，国家标准化管理委员会. 国家智能制造标准体系建设指南[EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057585/n3057589/c6013753/content.html>, 2018.10.12.
- [3] 李翌辉, 朱海平, 刘康俊. 中低压开关柜行业智能工厂体系架构标准研究[J]. 计算机集成制造系统, 2017(6):



1216-1233.

- [4] 张曙. 工业 4.0 和智能制造[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(8): 1-5.  
<https://wenku.baidu.com/view/0a46aef831126edb6e1a101d.html>
- [5] 吴青. 流程工业智慧炼化建设的研究与实践[J]. 无机盐工业, 2017, 49(12): 1-8.
- [6] 李清, 唐骞璘, 陈耀棠, 等. 智能制造体系架构、参考模型与标准化框架研究[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(3): 539-549.
- [7] 孙袁, 刘刚, 严伟, 等. 数字化工厂技术在电子制造领域的应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(6): 551-556.
- [8] 张益, 冯毅萍, 荣冈. 智慧工厂的参考模型与关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(1): 1-12.