CHINA MANUFACTURING MATURITY MODEL

智能制造能力成熟度模型

白皮书

(1.0 版)

中国电子技术标准化研究院

2016年9月20日发布

前 言

当前智能制造正在引领制造方式变革和制造业产业升级，并成为全球新一轮制造业竞争的制高点。为了有序推进我国智能制造的快速发展，2015年工业和信息化部装备工业司启动智能制造标准化专项，将标准化作为推动智能制造发展的重要内容之一，其目的是通过标准化来凝聚行业共识，引领企业向标准靠拢，避免方向走偏，降低融合发展的风险。《智能制造评价指标体系及成熟度模型标准化与试验验证系统》是智能制造标准化专项的研究课题之一，经过近一年的努力，现已完成《智能制造能力成熟度模型》标准草案。

为了确保对标准的准确理解与有效应用，我们研究提出了《智能制造能力成熟度模型白皮书（1.0）》。本白皮书旨在为企业实施智能制造提供指导，帮助企业认清自身所处的发展阶段，能够根据能力成熟度模型进行自我评估与诊断，达到有针对性的提升和改进智能制造能力的目的。

智能制造能力成熟度模型是在对国内外相关成熟度模型研究的基础上，结合我国智能制造的特点和企业的实践经验总结出的一套方法论，它给出了组织实施智能制造要达到的阶梯目标和演进路径，提出了实现智能制造的核心要素、特征和要求，为内外部相关利益方提供了一个理解当前智能制造状态、建立智能制造战略目标和实施规划的框架。该模型参考借鉴了《国家智能制造标准体系建设指南（2015年版）》中智能制造系统架构提出的生命周期、系统层级和智能功能3个维度，对智能制造的核心特征和要素进行提炼总结，归纳为“智能+制造”两个维度，最后展现为一维的形式，即设计、生产、物流、销售、服务、资源要素、互联互通、系统集成、信息融合、新兴业态10大类核心能力以及细化的27个域。模型中对相关域进行从低到高5个等级（规划级、规范级、集成级、优化级、引领级）的分级与要求。根据使用者的不同需求，可分为整体成熟度模型和单项能力模型。

智能制造能力成熟度模型及其标准化工作还需不断的结合企业实践进行完善和改进，希望通过本白皮书的发布能够使更多的企业、专家了解我们的研究成果。我们也欢迎任何单位和个人对本白皮书的内容提出宝贵意见，并共同参与到标准的编制过程中。

联系单位：中国电子技术标准化研究院
通信地址：北京市东城区安定门东大街1号（100007）
联 系 人：杨梦培
联系电话：010-64102805/6
电子邮件：yangmp@cesi.cn

版权声明

本白皮书版权属于中国电子技术标准化研究院（工业和信息化部电子工业标准化研究院）。

使用说明：未经中国电子技术标准化研究院事先的书面授权，不得以任何方式复制、抄袭、影印、翻译本文档的任何部分。凡转载或引用本文的观点、数据，请注明“来源：中国电子技术标准化研究院”。

指导单位

工业和信息化部装备工业司

编写单位（排名不分先后）

中国电子技术标准化研究院
北京机械工业自动化研究所
江苏海宝软件股份有限公司
上海明匠智能系统有限公司
中国航空综合技术研究所
宁夏共享集团股份有限公司
北京和利时系统工程有限公司
石化盈科信息技术有限责任公司
浙江中控技术股份有限公司
四川长虹电器股份有限公司
中车株洲电力机车有限公司

编写组（排名不分先后）

赵　波　郭　楠　胡静宜　于秀明　王程安　杨梦培　陈　强
王海丹　张星星　毕京洲　吴灿辉　刘亚宾　虞日跃　索寒生
招　庚　郭建祥　刘　翊　俞文光　乃晓文　李小联　姜佳俊
贾　超　苏　伟　李　琳　韦　莎　韩　丽　张蓉君　余云涛

目 录

一、概述 ····· 001

二、智能制造能力成熟度模型 ····· 005

（一）智能制造能力成熟度模型的提出 ····· 005

（二）模型架构与能力成熟度矩阵 ····· 007

1、维度 ····· 008

2、类和域 ····· 008

3、等级 ····· 009

4、成熟度要求 ····· 010

（三）智能制造能力成熟度要求 ····· 011

1、设计 ····· 011

2、生产 ····· 013

3、物流 ····· 017

4、销售 ····· 018

5、服务 ····· 018

6、资源要素 ····· 020

7、互联互通 ····· 023

8、系统集成 ····· 024

9、信息融合 ····· 025

10、新兴业态 ····· 026

三、模型的应用 ····· 028

（一）整体成熟度模型分级 ····· 028

（二）单项能力模型分级 ····· 029

（三）模型的应用 ····· 029

四、相关理论的对比分析 ····· 031

（一）软件能力成熟度模型 ····· 031

（二）智能制造系统架构 ····· 032

（三）工业4.0就绪度 ····· 032

（四）制造成熟度模型 ····· 033

（五）罗兰贝格模型 ····· 034

五、总结与展望 ····· 035

附录 基于智能制造能力成熟度模型的评价方法 ····· 036

（一）模型与评价 ····· 036

（二）评价过程 ····· 036

1、选择模型 ····· 037

2、选择评价域 ····· 037

3、基于问题的评价 ····· 038

4、给出分值与等级 ····· 039

（三）评价示例 ····· 040

参考文献

致 谢

一、概 述

（一）智能制造是当前制造业转型升级的必经之路

制造业是国民经济的支柱，是一国经济增长的源动力。没有一个强大而具有创新性的制造业体系，任何一个经济体都不可能实现繁荣发展。然而，自国际金融危机爆发以来，世界各国制造业均面临着市场需求萎缩、产值下降等困境，客户个性化需求增加、交货期要求越来越短、低能耗高资源利用率等挑战倒逼制造业要转型升级。与此同时，云计算、大数据、物联网等新兴技术逐渐兴起，给各国制造业企业带来了新的转型思路。因此，主要经济体纷纷提出了利用信息技术提升传统制造业发展的国家级战略和规划，如美国的“先进制造业国家战略计划”、德国的“工业4.0”、日本的“科技工业联盟”、英国的“工业2050战略”、中国的“中国制造2025”等，制造业已成为各国在新一轮技术革命和产业变革中占据制高点的必争战场。

2012年2月，美国出台了“先进制造业国家战略计划”，提出建设“智能”制造技术平台以加快智能制造的技术创新，随后，大力推动以“工业互联网”和“新一代机器人”为特征的智能制造战略布局。2011年12月，德国通过政府、弗劳恩霍夫研究所和各州政府合作投资于数控机床、制造和工程自动化行业应用制造研究，并于2013年正式实施以智能制造为主体的“工业4.0”战略，巩固其制造业领先地位。日本提出通过加快发展协同式机器人、无人化工厂提升制造业的国际竞争力。英国提出科技改变生产，信息通讯技术、新材料等科技将在未来与产品和生产网络的融合，极大改变产品的设计、制造、提供甚至使用方式。2015年5月，我国出台了制造强国中长期发展战略规划《中国制造2025》，全面部署推进我国制造强国战略实施，坚持创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展，加快我国从制造大国向制造强国转变。图1-1为各国不同的制造业转型途径对比图。

图1-1各国不同的制造业转型途径

对比各国关于制造业转型发展的战略规划，我们不难发现，在这场占据制造业产业变革制高点的争夺中，各国都将发展智能制造作为其战略核心，不断推动制造业向数字化、网络化、智能化发展，向绿色化、服务化转型。在可以预见的未来，以智能制造为代表的新一轮产业革命，将是释放未来竞争力的关键，发展智能制造是制造业转型升级的必经之路。

（二）对智能制造的理解与认识

针对智能制造内涵，各国各机构都有不同的定义，表1-1对不同国家或机构对智能制造的理解做了对比。

表1-1 智能制造内涵对比表

来 源	定 义	侧重点
德国工业4.0	通过广泛应用互联网技术，实时感知、监控生产过程中产生的海量数据，实现生产系统的智能分析和决策，生产过程变得更加自动化、网络化、智能化，使智能生产、网络协同制造、大规模个性化制造成为生产新业态。	侧重信息物理融合系统（CPS）的应用以及生产新业态
美国《智能制造系统现行标准体系》	有以下核心特征：互操作性和增强生产力的全面数字化制造企业；通过设备互联和分布式智能来实现实时控制和小批量柔性生产；快速响应市场变化和供应链失调的协同供应链管理；集成和优化的决策支撑用来提升能源和资源使用效率；通过产品全生命周期的高级传感器和数据分析技术来达到高速的创新循环。	侧重柔性生产、协同供应链、能源和资源利用等智能制造目标
美国智能制造领导力联盟（SMLC）	集成了网络产生的数据和信息，包括了制造型和供应链型企业所涉及的实时分析、推理、设计、规划和管理等各方面，即制造智能，可通过广泛的、全面的、有目的地使用基于传感器产生的数据进行分析、建模、仿真和集成，为企业提供实时的决策支持。	侧重数据与信息的获取、建模、应用、分析等
中国《国家智能制造标准体系建设指南（2015年版）》	基于物联网、大数据、云计算等新一代信息技术，贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节，具有信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行等功能的先进制造过程、系统与模式的总称。	涵盖新技术、制造全过程、智能特征等各方面。

本文的研究主要遵循了我国给出的智能制造定义，并在此基础上进一步剖析了智能制造的特点：

智能+制造：智能技术应用到设计、生产、销售、物流和服务等制造全过程，实现了从各业务单元乃至企业整体的数字化、网络化以及智能化，达到了感知、执行及控制决策的闭环。

集成互联：各种设备、系统以及人等通过有效的集成、互联技术，实现了连接、交互与协同。

数据驱动：制造过程中的各类数据经过采集、加工及分析，形成可用的知识、模型，用于对各制造环节进行评价、监控、预测、控制以及决策优化。

模式创新：智能制造引导个性化定制、协同制造、远程运维等新型业态，推动企业转型。

（三）我国智能制造的发展现状

当前，以《中国制造2025》为总纲，工信部采取了多项措施推动智能制造工作的落实，包括制定发布《智能制造工程实施指南（2016-2020年）》、开展智能制造试点示范专项行动、开展智能制造标准化工作等。此外，各省市、企业也呈现出对智能制造的强烈需求，据调研统计，江苏、广东、浙江等省年需设备投资达10400亿元，浙江省有64.2%的被调研企业有机器换人的想法，福建省几乎所有参与调研的企业都希望开展智能制造。由此可见，从国家战略、地方政策强有力的支撑，到产业基层积极自发的原动力，我国智能制造的发展已形成了自上而下的外部合力，前景可期。

然而，当前智能制造的发展仍处于初始阶段。企业对智能制造的理解不统一，对自身智能制造的定位、现状和发展路径不明确，缺少系统的方法论来指导实施，缺少行业内实施智能制造的经验和做法案例等问题亟待解决。一方面，政府和各类企业具有推广和发展智能制造的强烈愿望；另一方面，企业对自身到底处于智能制造的什么水平并不清楚，不能明确该如何去分步实施智能制造。这种供需不对等的矛盾极大地影响了智能制造的有效落地。

工业4.0就绪度可以视作是解决此矛盾一个有效的参考方案。工业4.0就绪度是由德国机械设备制造业联合会（VDMA）提出，旨在解决德国制造业面临的两大问题：一是当前德国的机械制造工业处于工业4.0的哪一阶段；二是要想在企业中成功实施工业4.0必须具备的条件以及企业当前哪些情况需要进行相应的改变。VDMA于2015年4月至8月间对德国雇员在20人以上的234家机械和装备工程企业的工业4.0就绪度现状进行调研，调研结果（图1-2示）显示德国机械和装备工程领域仅有5.6%的企业处于3级以上，约80%的企业还处于门外汉或初学者的水平。

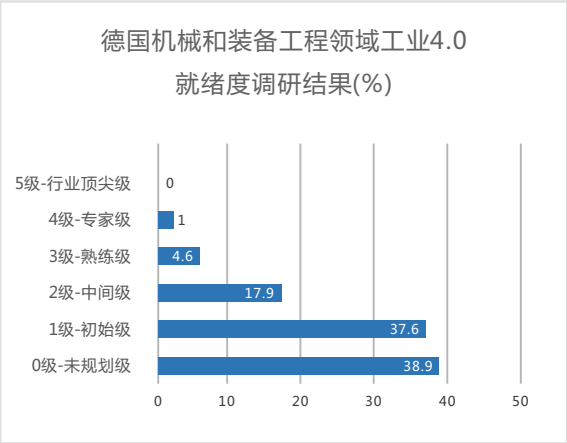


图1-2 德国机械和装备工程领域工业4.0就绪度调研结果图

德国制造业一直领先世界，工业4.0的评价方法是否适合中国的产业环境？其路径方法能否指导中国的制造企业？中国企业该如何建立适合自己的智能制造发展之路？通过对中国企业实施智能制造的调研研究，提出中国智能制造能力成熟度模型、明确智能制造发展路径将是我国制造企业发展智能制造的有效手段。

（四）本文的研究目标

本文旨在归纳总结智能制造内涵及核心要素的基础上，研究智能制造发展路径的基础上，利用成熟度的理论提出智能制造能力成熟度模型，规划智能制造能力等级和发展路线图。通过回答以下问题，帮助企业识别差距、确立目标、实施改进。

- **中国制造企业目前处于智能制造的什么水平?**
- **企业该如何确立投资范围，做出适宜的规划?**
- **企业成功实施智能制造的关键点是什么？如何分步实施?**

二、智能制造能力成熟度模型

（一）智能制造能力成熟度模型的提出

成熟度是一套管理方法论，它能够精炼地描述一个事物的发展过程，通常将其描述为几个有限的成熟级别，每个级别有明确的定义、相应的标准以及实现其的必要条件。从最低级到最高级，各级别之间具有顺序性，每个级别都是前一个级别的进一步完善，同时也是向下一个级别演进的基础，体现了事物从一个层次到下一个层次层层递进不断发展的过程。比较著名的成熟度理论有：软件能力成熟度模型（SW-CMM）、制造成熟度模型（MRL）和智能电网能力成熟度模型（SGMM）等，表2-1描述了相关成熟度理论的定义。

表2-1 相关成熟度理论定义

成熟度类别	定　义
软件能力成熟度模型（SW-CMM）	对于软件组织在定义、实施、度量、控制和改善其软件过程的各个发展阶段的描述。这个模型用于评价软件组织的现有过程能力，查找出软件质量及过程改进方面的最关键的问题，从而为选择过程改进策略提供指南。
制造成熟度模型（MRL）	用于确定生产过程中制造技术是否成熟，以及技术转化过程中是否存在风险，从而管理并控制产品生产，使其在质量和数量上实现最佳化，能够为企业提高制造水平提供指导依据。
智能电网能力成熟度模型（SGMM）	是一个管理工具，提供了帮助组织了解当前智能电网部署和电力基础设施性能的框架，并为建立有关智能电网实施的战略与工作计划提供参考。

不同领域的成熟度遵循的方法论是一致的，智能制造能力成熟度模型充分借鉴了以往的经验，是成熟度理论在智能制造领域的应用。智能制造能力成熟度模型给出了组织实施智能制造要达到的阶梯目标和演进路径，提出了实现智能制造的核心能力及要素、特征和要求，为内外部相关利益方提供了一个理解当前智能制造状态、建立智能制造战略目标和实施规划的框架，帮助企业识别当前不足，引导其科学地弥补战略目标与现状之间的差距。

本文提出的智能制造能力成熟度模型，是对智能制造内涵和核心要素的深入剖析，遵循了《国家智能制造标准体系建设指南（2015版）》中对智能制造系统架构的定义，从生命周期、系统层级、智能功能3个维度统筹考虑，归纳为“智能+制造”2个维度来解释智能制造的核心组成，进一步分解形成设计、生产、物流、销售、服务、资源要素、互联互通、系统集成、信息融合、新兴业态10大类核心能力要素，并对每一类核心要素分解为域以及五级的成熟度要求。如图2-1示。

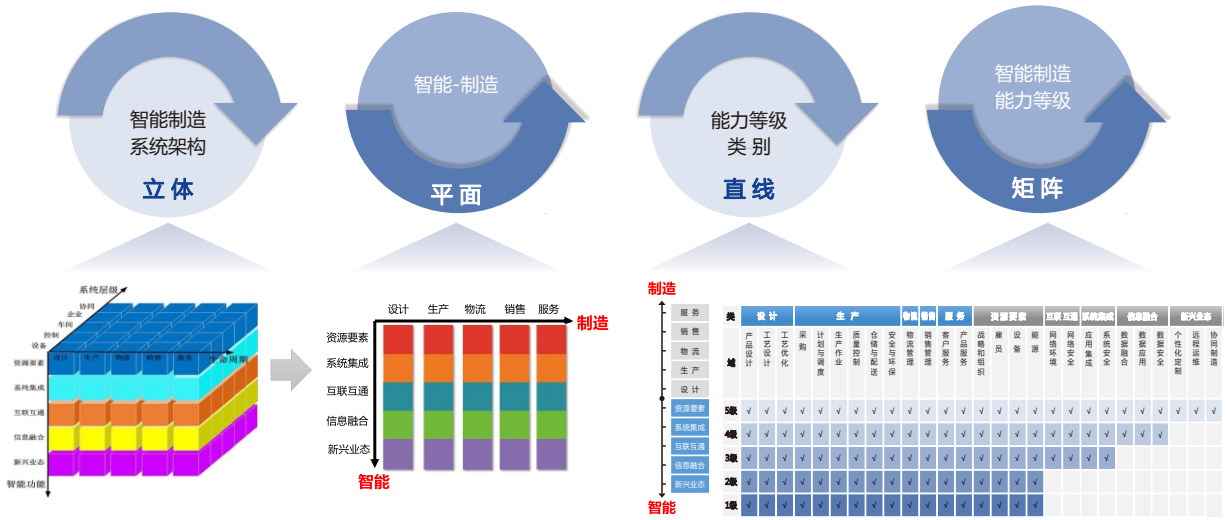


图2-1 智能制造能力成熟度要素图

（二）模型架构与能力成熟度矩阵

模型由维度、类、域、等级和成熟度要求等内容组成。维度、类和域是“智能+制造”两个维度的展开，是对智能制造核心能力要素的分解。等级是类和域在不同阶段水平的表现，成熟度要求是对类和域在不同等级下的特征描述。

智能制造能力成熟度矩阵是模型架构的具体实例，涵盖了智能制造能力成熟度模型所涉及的核心内容，是模型组成部件的展现。本文在充分研究中国智能制造系统架构、工业4.0参考架构模型（RAMI 4.0）、美国工业互联网参考架构，深入挖掘智能制造内涵的基础上，根据“智能+制造”两个核心维度，分解为设计、生产、物流、销售、服务、资源要素、互联互通、系统集成、信息融合、新兴业态10大类能力以及细化的27个要素域，对每个域进行分级，每一级别对应相应的要求，构成智能制造能力成熟度矩阵，模型架构与能力成熟度矩阵的关系如图2-2所示。

图2-2 模型架构与能力成熟度矩阵关系图

1、维度

“智能+制造”两个维度是我们论述智能制造能力成熟度模型的起点，代表了我们对智能制造本质的理解，也可以理解为OT（运营技术）+IT（信息技术）在制造业的应用。

制造维体现了面向产品的全生命周期或全过程的智能化提升，包括了设计、生产、物流、销售和服务5类，涵盖了从接收客户需求到提供产品及服务的整个过程。与传统的制造过程相比，智能制造的过程更加侧重于各业务环节的智能化应用和智能水平的提升。

智能维是智能技术、智能化基础建设、智能化结果的综合体现，是对信息物理融合的诠释，完成了感知、通信、执行、决策的全过程，包括了资源要素、互联互通、系统集成、信息融合和新兴业态5大类，引导企业利用数字化、网络化、智能化技术向模式创新发展。

2、类和域

类和域代表了智能制造关注的核心要素，是对“智能+制造”两个维度的深度诠释。其中，域是对类的进一步分解。

10大类核心要素相互作用才能达到智能制造的状态，其关系如图2-3示。

将各种制造资源要素（人、机器、能源等）与制造过程（设计、生产、物流、销售和服务）等物理世界的实体及活动数字化并接入到互联互通的网络环境下，对各种数字化应用进行系统集成，对信息融合中的数据进行挖掘利用并反馈优化制造过程和资源要素，推动组织最终达到个性化定制、远程运维与协同制造的新兴业态。

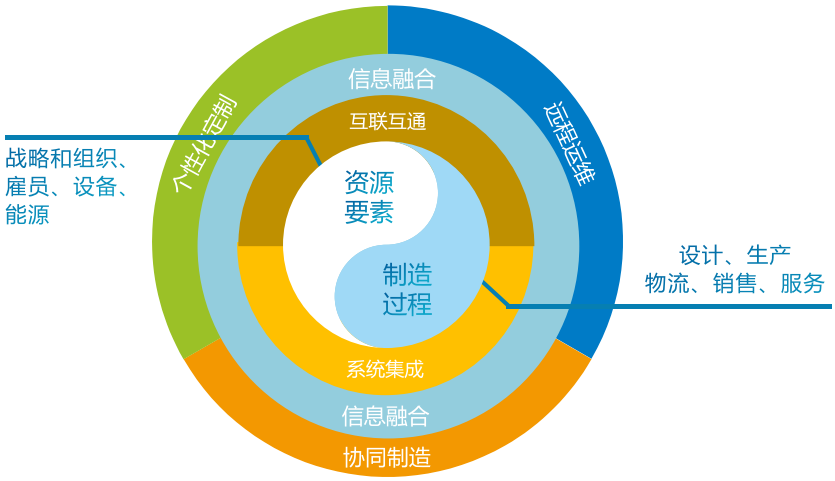


图2-3 核心要素间关系图

3、等级

等级定义了智能制造的阶段水平，描述了一个组织逐步向智能制造最终愿景迈进的路径，代表了当前实施智能制造的程度，同时也是智能制造评估活动的结果。

智能制造能力成熟度模型共分为以下5个等级，如图2-4示：

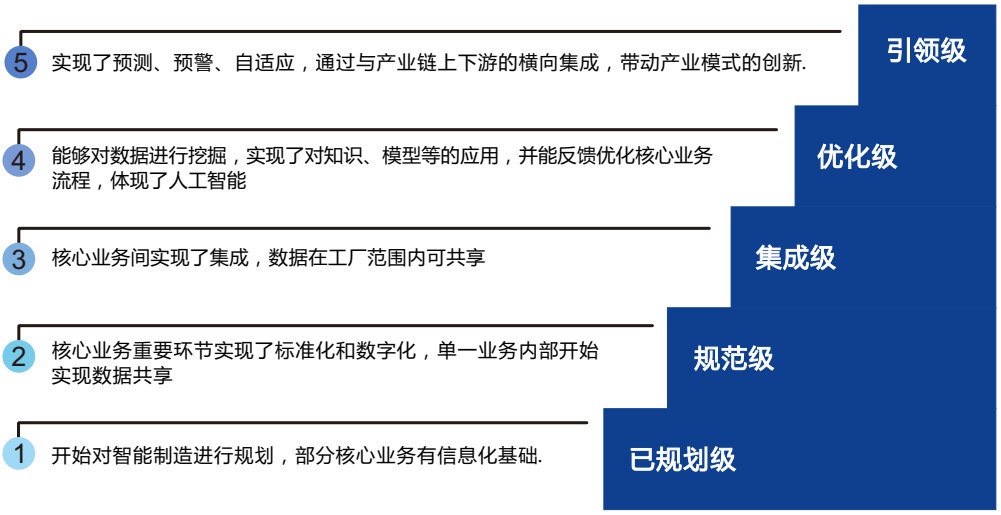


图2-4 智能制造能力成熟度等级

1级：规划级

在这个级别下，企业有了实施智能制造的想法，开始进行规划和投资。部分核心的制造环节已实现业务流程信息化，具备部分满足未来通信和集成需求的基础设施，企业已开始基于IT进行制造活动，但只是具备实施智能制造的基础条件，还未真正进入到智能制造的范畴。

2级：规范级

在这个级别下，企业已形成了智能制造的规划，对支撑核心业务的设备和系统进行投资，通过技术改造，使得主要设备具备数据采集和通信的能力，实现了覆盖核心业务重要环节的自动化、数字化升级。通过制定标准化的接口和数据格式，部分支撑生产作业的信息系统能够实现内部集成，数据和信息在业务内部实现共享，企业开始迈进智能制造的门槛。

3级：集成级

在这个级别下，企业对智能制造的投资重点开始从对基础设施、生产装备和信息系统等的单项投入，向集成实施转变，重要的制造业务、生产设备、生产单元完成数字化、网络化改造，能够实现设计、生产、销售、物流、服务等核心业务间的信息系统集成，开始聚焦工厂范围内数据的共享，企业已完成了智能化提升的准备工作。

4级：优化级

在这个级别下，企业内生产系统、管理系统以及其他支撑系统已完成全面集成，实现了工厂级的数字建模，并开始对人员、装备、产品、环境所采集到的数据以及生产过程中所形成的数据进行分析，通过知识库、专家库等优化生产工艺和业务流程，能够实现信息世界与物理世界互动。从3级到4级体现了量变到质变的过程，企业智能制造的能力快速提升。

5级：引领级

引领级是智能制造能力建设的最高程度，在这个级别下，数据的分析使用已贯穿企业的方方面面，各类生产资源都得以最优化的利用，设备之间实现自治的反馈和优化，企业已成为上下游产业链中的重要角色，个性化定制、网络协同、远程运维已成为企业开展业务的主要模式，企业成为本行业智能制造的标杆。

企业在实施智能制造时，应按照逐级递进的原则，从低级向高级循序演进，要注重投资回报率。企业应该根据自身的业务发展现状、市场定位、客户需求和资金投入情况，来选择合适的等级确定智能制造的发展方向。需要注意的是，并非只有最高级才是适合每个企业的最佳选择。

4、成熟度要求

成熟度要求描述了为实现域的特征而应满足的各种条件，是判定企业是否实现该级别的依据。每个域下分不同级别的成熟度要求（如图2-2示），其中对制造维及资源要素的要求是从1级到5级，对互联互通和系统集成的要求是从3级到5级，对信息融合的要求从4级到5级，对新兴业态的要求只有第5级。

（三）智能制造能力成熟度要求

1、设计

设计是通过产品及工艺的规划、设计、推理验证以及仿真优化等过程，形成设计需求的实现方案。设计能力成熟度的提升是从基于经验设计与推理验证，到基于知识库的参数化/模块化、模型化设计与仿真优化，再到设计、工艺、制造、检验、运维等产品全生命周期的协同，体现对个性化需求的快速满足。构成设计类能力的域如图2-5所示。

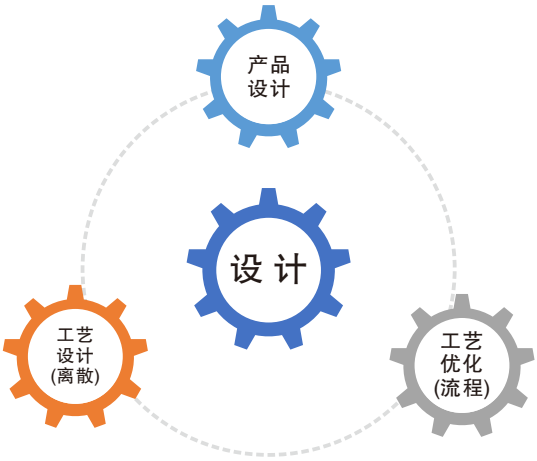


图2-5 设计的关键评价域

1.1、产品设计

产品设计的目的是解决企业如何基于客户需求，利用计算机辅助工具，根据经验、知识等快速开展外观、结构、性能等的设计、优化，以及与工艺设计的有效对接。其关注点在于基于知识库的参数化/模块化设计、产品生命周期不同业务域的协同化、基于三维模型的设计信息集成、设计工艺制造一体化仿真。等级及其特征如下：

1 级	基于设计经验开展计算机辅助二维设计，并制定产品设计相关标准规范；
2 级	实现计算机辅助三维设计及产品设计内部的协同；
3 级	构建集成产品设计信息的三维模型，进行关键环节的设计仿真优化，实现产品设计与工艺设计的并行协同；
4 级	基于知识库来实现设计工艺制造全维度仿真与优化，并实现基于模型的设计、制造、检验、运维等业务的协同；
5 级	实现基于大数据、知识库的产品设计云服务，实现产品个性化设计、协同化设计。

1.2、工艺设计（离散）

工艺设计是采用工艺知识积累、挖掘、推理的方法，利用先进技术工具，把设计设想转化为工艺流程来指导生产的过程。其关注点在于工艺知识库的建立与应用、工艺流程的优化创新以及与产品设计、制造等业务域的协同等。本节的工艺设计适用于离散行业，其等级及特征如下。

1 级	实现计算机辅助工艺规划和工艺设计；
2 级	实现工艺设计关键环节的仿真以及工艺设计的内部协同；
3 级	实现计算机辅助三维工艺设计及仿真优化，实现工艺设计与产品设计间的信息交互、并行协同；
4 级	实现基于工艺知识库的工艺设计与仿真，并实现工艺设计与制造间的协同；
5 级	基于知识库辅助工艺创新推理及在线自主优化，实现多领域、多区域、跨平台的全面协同，提供即时工艺设计服务。

1.3、工艺优化（流程）

工艺优化同样是采用工艺知识积累、挖掘、推理的方法，利用优化平台等技术实现对工艺路线、参数等与产量、能耗、物料、设备等的最优匹配，以达到产量高、功耗低和效益高的生产目标。本节的工艺优化适用于流程行业，其等级及特征如下。

1 级	具备符合国家/行业/企业标准的工艺流程模型及参数；
2 级	工艺模型应用于现场，能够满足场地、安全、环境、质量要求；
3 级	能够利用离线优化平台，建立单元级工艺优化模型；
4 级	基于工艺优化模型与知识库实现全流程工艺优化；
5 级	建立完整的工艺三维数字化仿真模型，完成生产全过程的数字化模拟，能够基于知识库实现工艺的实时在线优化。

2、生产

生产是通过IT与OT的融合，对人、机、料、法、环五大生产要素进行管控，以实现从前端采购、生产计划管理到后端仓储物流等生产全过程的智能调度及调整优化，达到柔性生产。生产能力成熟度的提升是从以生产任务为核心的信息化管理开始，到各项要素和过程的集中管控，最终达到从采购、生产计划与排产、生产作业、仓储物流、完工反馈等全过程的闭环与自适应。

构成生产类能力的域如图2-6示。

图2-6 生产的关键评价域

2.1、采购

采购是指通过对库存、生产计划、销售量等的自动感知、预测以及合理控制，使企业达到经济合理的库存量，满足柔性生产的需求。其关注点在于采购与生产、仓储的车间级集成，与供应商、分销商的企业级集成以及利用数据挖掘技术进行采购预测等。等级及其特征如下。

1 级	具备一定的信息化基础来辅助采购业务；
2 级	能够实现企业级的采购信息化管理，包括供应商管理、比价采购、合同管理等，实现采购内部的数据共享；
3 级	实现采购管理系统与生产、仓储管理系统的集成，实现计划、流水、库存、单据的同步；
4 级	实现采购与供应、销售等过程联合，与重要的供应商实现部分数据共享，能够预测补货；
5 级	实现库存量可实时感知，通过对销售预测和库存量进行分析和决策，形成实时采购计划；与供应链合作企业实现数据共享。

2.2、计划与调度

计划与调度是实现所有生产活动的核心。通过信息技术进行准确的数据处理，对于下达的生产任务进行一定程度上的优化调度，最大程度地减少生产过程中的非增值时间，提高生产设备利用率，从而提高生产效率。关注生产计划与调度的协同与优化、与各种资源要素的匹配等。

1 级	实现主生产计划的管理，可以从销售订单和市场预测等信息生成主生产计划及调度方案；
2 级	实现物料需求计划的运算，运算结果生成的生产计划以及采购计划仍是无限产能计划，需人工参与调整和调度；
3 级	基于安全库存、采购提前期、生产提前期等要素实现物料需求运算，自动生成生产计划、采购计划；
4 级	实现生产资源计划运算，全面进行产能负荷分析与详细能力计划的平衡，生产计划颗粒度到天；
5 级	基于生产调度算法，基于约束条件（工艺顺序、加工资源、工作时间等）建立的标准工时数据库等，实现高级排产与调度。

2.3、生产作业

生产作业是以最佳的方式将企业生产的物料、机器等生产要素以及生产过程等有效的结合起来，形成联动作业和连续生产，取得最大的生产成果和经济效益。关注精确的物料配套、生产过程的控制，与生产计划、仓储配送等其他业务的协同。

1 级	具备自动化和数字化的设备及生产线，具备现场控制系统；
2 级	能够采用信息化技术手段将各类工艺、作业指导书等电子文件下发到生产单元，实现对人员、机器、物料等多项资源的数据采集；
3 级	能够实现资源管理、工艺路线、生产作业、仓储配送等的业务集成，采集生产过程实时数据信息并存储，能够提供实时更新的制造过程的分析结果并将其可视化；
4 级	能够通过生产过程数据、产量、质量等数据来优化生产工艺；
5 级	能够通过监控整个生产作业过程，自动预警或修正生产中的异常，提高生产效率和质量。

2.4、仓储与配送

仓储与配送是指厂内物料存储和物流，利用标识与识别技术、自动化的传输线、信息化管理手段等，实现对原材料、半成品等的标识与分类、数据采集、运输以及库位管理，自动完成零部件的取送任务。关注识别技术的应用、自动化运输线的改造、智能的仓库管理系统以及与上下游的集成技术等。

1 级	能够实现基于信息管理系统对原材料、中间件、成品等的库存、盘点管理；
2 级	能够利用RFID/二维码/标签等技术实现对原材料、中间件、成品等的数字化标识，并能基于识别技术实现自动或半自动出入库管理；
3 级	能够实现仓储配送与生产计划、制造执行以及企业资源管理等业务的集成；
4 级	能够基于生产线实际生产情况拉动物料配送，能够基于客户和产品需求调整目标库存水平；
5 级	能够实现最优库存和即时供货。

2.5、质量控制

质量控制是生产过程中稳定提高产品质量的关键环节，是生产过程中为确保产品质量而进行的各种活动。通过信息技术手段实现工序状态的在线检测，借助于数理统计方法的过程控制系统，把产品的质量控制从“事后检验”演变为“事前控制”，做到预防为主，防检结合，已达到全面质量管理的目的。

1 级	建立质量检验规范，能通过满足要求的计量器具进行检验并形成检验数据；
2 级	建立质量控制系统，采用信息技术手段辅助质量检验，通过对检验数据的分析、统计实现质量控制图；
3 级	实现关键工序质量在线检测，通过检验规程与数字化检验设备\系统的集成，自动对检验结果判断和预警；
4 级	建立产品质量问题处置知识库，依据产品质量在线检测结果预测未来产品质量可能的异常，基于知识库自动给出生产过程的纠正措施；
5 级	通过在线监测的质量数据分析和基于数据模型的预判，自动修复和调校相关的生产参数，保证产品质量的持续稳定。

2.6、安全与环保

安全与环保是通过建立有效的管理平台，对安全、环保管理过程标准化，对数据进行收集、监控以及分析利用，最终能建立知识库对安全作业和环境治理等进行优化。关注数据监测、应急及环境治理知识库建立等。

1 级	已采用信息化手段进行风险、隐患、应急等安全管理以及环保数据监测统计等；
2 级	能够实现从清洁生产到末端治理的全过程信息化管理；
3 级	通过建立安全培训、典型隐患管理、应急管理等知识库辅助安全管理；对所有环境污染点进行实时在线监控，监控数据与生产、设备数据集成，对污染源超标及时预警；
4 级	支持现场多源的信息融合，建立应急指挥中心通过专家库开展应急处置；建立环保治理模型并实时优化，在线生成环保优化方案；
5 级	基于知识库，支持安全作业分析与决策，实现安全作业与风险管控一体化管理；利用大数据自动预测所有污染源的整体环境情况，根据实时的治理设施数据、生产、设备等数据，自动制定治理方案并执行。

3、物流

3.1、物流管理

物流管理是将产品运送到下游企业或用户中的过程，利用条形码、射频识别、传感器以及全球定位系统等先进的物联网技术，通过信息处理和网络通信技术平台实现运输过程的自动化运作、可视化监控和对车辆、路径的优化管理等，以提高运输效率、减少能源消耗。物流能力成熟度的提升是从订单、计划调度、信息跟踪的信息化管理开始，到通过多种策略进行管理，最终实现精益化管理和智能物流。其关注点在于订单管理，运输计划与调度管理、物流信息的跟踪与反馈，运输路径的优化等。等级及其特征如下。

1 级	通过信息化手段管理物流过程，对信息进行简单跟踪反馈；
2 级	通过信息系统实现订单管理、计划调度、信息跟踪和运力资源管理；
3 级	实现出库和运输过程的整合，实现多式联运，物流信息能够推送给客户；
4 级	应用知识模型实现订单精益化管理、路径优化和实时定位跟踪；
5 级	实现无人机运输、物联网跟踪等。

4、销售

4.1、销售管理

销售管理是以客户需求为核心，利用大数据、云计算等技术，对销售数据、行为进行分析和预测，带动生产计划、仓储、采购、供应商管理等业务的优化调整。销售能力成熟度的提升是从销售计划、销售订单、销售价格、分销计划、客户关系的信息化管理开始，到客户需求预测/客户实际需求拉动生产、采购和物流计划，最终实现通过更加准确的销售预测对企业客户管理、供应链管理与生产管理进行优化，以及个性化营销等。其关注点在于销售数据挖掘、销售预测及销售计划、销售业务与相关业务的集成以及销售的新模式。等级及其特征如下。

1 级	通过信息系统对销售业务进行简单管理；
2 级	通过信息系统实现销售全过程管理，强化客户关系管理；
3 级	销售和生产、仓储等业务进行集成，实现产品需求预测/实际需求拉动生产、采购和物流计划；
4 级	应用知识模型优化销售预测，制定更为准确的销售计划；通过电子商务平台整合所有销售方式，实现根据客户需求变化自动调整采购、生产、物流计划；
5 级	能够实现对电子商务平台的大数据分析和个性化营销等功能。

5、服务

服务是通过对客户满意度调查和使用情况跟踪，对产品的运维情况统计分析，反馈给相关部门，维护客户关系，提升产品过程，达到从纵向挖掘客户对产品功能和性能的要求，进而从横向拓展客户群。服务能力成熟度的提升是服务方式从线下、线上、云平台和移动客户端、客服机器人/现场、线上线下远程指导、远程工具、远程平台、AR/VR的转变，最终能够提供个性化客户服务和基于知识挖掘的创新性产品服务。构成服务的域如图2-7所示。

图2-7 服务的关键评价域

5.1、客户服务

客户服务是借助云平台、移动客户端、知识模型和智能客服机器人等技术，多维度的对客户知识进行挖掘，向客户提供智能服务和个性化服务。关注点在于客户知识的统计和分析、客服渠道的多样性和智能客服机器人的投用情况等。

1 级	设立客户服务部门，通过信息化手段管理客户服务信息，并把客户服务信息反馈给相关部门，维护客户关系；
2 级	具有规范的服务体系和客户服务制度，通过信息系统进行客户服务管理，并把客户服务信息反馈给相关部门，维护客户关系；
3 级	建立客户服务知识库，可通过云平台提供客户服务，并与客户关系管理系统集成，提升服务质量和客户关系；
4 级	实现面向客户的精细化知识管理，提供移动客服方式；
5 级	通过智能客服机器人，提供智能服务、个性化服务等。

5.2、产品服务

产品服务是借助云服务、数据挖掘和智能分析等技术，捕捉、分析用户信息，更加主动、精准、高效的给用户提供服务，向按需和主动服务的方向发展。关注点在于产品的智能化、远程服务平台的建立、数据挖掘和分析等。

1 级	设立产品服务部门，通过信息化手段管理产品运维信息，并把客户服务信息反馈给相关部门，指导产品过程提升；
2 级	具有规范的产品服务制度，通过信息系统进行产品服务管理，并把产品服务信息反馈给相关部门，指导产品过程提升；
3 级	产品具有存储、网络通信等功能，建立产品故障知识库，可通过网络和远程工具提供产品服务，并把产品故障分析结果反馈给相关部门，持续改进老产品的设计生产，并为新产品设计生产提供基础；
4 级	产品具有数据采集、通信和远程控制等功能，通过远程运维服务平台，提供在线检测、故障预警、预测性维护、运行优化、远程升级等服务，通过与其他系统的集成，把信息反馈给相关部门，持续改进老产品的设计生产，并为新产品设计生产提供基础；
5 级	通过物联网技术、增强现实/虚拟现实技术和云计算、大数据分析技术，实现智能运维和和创新性应用服务。

6、资源要素

资源要素是对组织的战略、组织结构、人员、设备及能源等要素的策划、管理及优化，为智能制造的实施提供基础。资源要素能力成熟度的提升体现了从管理愿景的策划，到运用信息化手段进行管理、到决策智能化的转变，体现了组织智能化管理水平的提升。构成资源要素类能力的域如图2-8所示。

图2-8 资源要素的关键评价域

6.1、战略和组织

战略和组织是企业决策层对实现智能制造目标而进行的方案策划、组织优化和管理制度的建立等。通过战略制定、方案策划和实施、资金投入和使用、组织优化和调整使企业的智能制造发展始终保持与企业发展战略相匹配。关注点在于智能制造战略部署、组织和资金配备等。等级及特征如下。

1 级	组织有发展智能制造的愿景，并做出了包括资金投入的承诺；
2 级	组织已经形成发展智能制造的战略规划，并建立明确的资金管理制度；
3 级	组织已经按照发展规划实施智能制造，已有资金投入，智能制造发展战略正在推动组织发生变革，组织结构得到优化；
4 级	智能制造已成为组织的核心竞争力，组织的战略调整是基于智能制造的发展；
5 级	组织的智能制造发展战略为组织创造了更高的经济效益，创新管理战略为组织带来了新的业务机会，产生了新的商业模式。

6.2、雇员

雇员是实现智能制造的关键因素。通过对雇员的培养、技能获取方式的实现、技能水平的提升，使雇员具备与组织智能制造水平相匹配的能力。关注点在于雇员技能获取和提升、雇员持续教育等。等级及其特征如下。

1 级	能够确定构建智能制造环境所需要的人员能力；
2 级	能够提供雇员获取相应能力的途径；
3 级	能够基于智能发展需要，对雇员进行持续的教育或培训；
4 级	能够通过信息化系统分析现有雇员的能力水平，使雇员技能水平与智能制造发展水平保持同步提升；
5 级	能够激励雇员，使其在更多领域上获取智能制造所需要的技能，持续提升自身能力。

6.3、设备

设备数字化是智能制造的基础，设备管理是通过对设备的数字化改造以及全生命周期的管理，使物理实体能够融入到信息世界，并能够达到对设备远程在线管理、预警等。关注点在于设备数字化、全生命周期管理等。等级及其特征如下。

1 级	能够采用信息化手段实现部分设备的日常管理，开始考虑设备的数字化改造；
2 级	持续进行设备数字化改造，能够采用信息化手段实现设备的状态管理；
3 级	能够采用设备管理系统实现设备的生命周期管理，能够远程实时监控关键设备；
4 级	设备数字化改造基本完成，能够实现专家远程对设备进行在线诊断，已建立关键设备运行模型；
5 级	能够基于知识库、大数据分析对设备开展预知维修。

6.4、能源

能源管理是通过对能源计划、能源运行调度、能源统计以及碳资产管理等能源管理因素，利用信息化手段规范组织的能源管理，优化能源和资源的使用，旨在降低组织能源消耗、提高能源利用效率。关注对能源介质数据的采集及监测、能耗量化管理等。

1 级	开始能源管理的信息化，实现部分能源数据的采集与监控；
2 级	能够通过信息化管理系统对主要能源数据进行采集、统计；
3 级	能够对能源生产、存储、转换、输送、消耗等各环节进行监控，能够将能源计划与生产计划等进行融合；
4 级	能够实现能源动态监控和精细化管理，分析能源生产、输送、消耗的薄弱环节；
5 级	能够基于能源数据信息的采集和存储，对耗能和产能调度提供优化策略和优化方案，优化能源运行方式。

7、互联互通

互联互通是现场总线、工业以太网、无线网络等在工厂中的部署和应用，使工厂具备将人、机、物等有机联通的环境。互联互通成熟度的提升是从设备间，到车间、到工厂以及企业上下游系统间的互联互通，体现了对系统集成、协同制造等的支撑。构成互联互通类能力的域如图2-9所示。

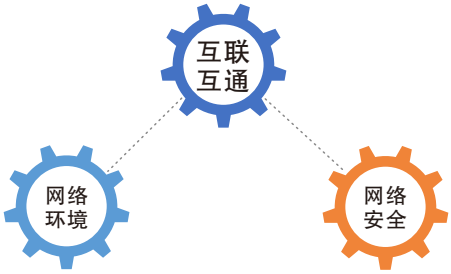


图2-9 互联互通的关键评价域

7.1、网络环境

网络环境的目的是解决如何利用现场总线、工业以太网、无线网络、物联网等技术实现设备、系统间的互联与通信。关注企业基础网络基础通信环境。

3 级	能够实现制造环节设备间的互联互通与信息采集与发送；
4 级	能够实现生产管理与企业管理系统间的互联互通；
5 级	能够实现企业上下游系统间的互联互通，实现生产与经营的无缝集成。

7.2、网络安全

网络安全的目的是解决企业如何利用专业网络安全技术，针对接入网络的用户、设备等进行可用性、完整性、保密性检测与管理。关注用户身份的鉴别管理，网络传输设备冗余能力和重要子网的自恢复能力。

3 级	具备网络关键设备冗余能力，开展子网管理，具有入侵检测、用户鉴别、访问控制、完整性检测等安全功能。
4 级	确保数据传输和重要子网的安全性，并具备自恢复能力，具备网络协议信息过滤和数据流量管控功能，能够对网络边界的完整性进行检查。
5 级	确保云数据中心访问的安全性，提供专用通信协议或安全通信协议服务，抵御通信协议的攻击破坏。

8、系统集成

系统集成的目的是实现企业内各种业务、信息等的互联与互操作，最终达到信息物理完全融合的状态。系统集成成熟度的提升是从企业内部单项应用、系统间互联互操作，到企业内全部系统、企业间上下游集成的转变，体现了对资源充分共享。构成系统集成类能力的域如图2-10所示。

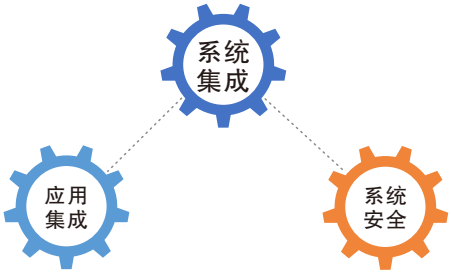


图2-10 系统集成的关键评价域

8.1、应用集成

应用集成是通过统一平台、实时数据库、云服务等技术，将不同的业务应用系统有效集成，达到信息流、数据流无缝传递的效果。关注集成技术的应用及效果。

3 级	能够围绕核心生产流程，部分实现生产、资源调度、供应链、研发设计等不同系统间的互操作；
4 级	能够全面实现生产、资源调度、供应链、研发设计等不同系统间的互操作；
5 级	能够基于云平台实现企业间业务的集成。

8.2、系统安全

系统安全的目的是解决企业如何利用系统安全工程和系统安全管理方法等，对工业控制系统的信息安全进行监控、管理与评估。关注安全风险的评估、系统安全的监控、工业控制系统的主动防御等。

3 级	应制定针对工业控制系统的安全管理要求、事件管理和相应制度等，并定期开展主要系统的安全风险评估；
4 级	能够对非本地进程进行监控，能够在系统投产前开展安全检测，能够根据应急计划定期开展培训、测试与演练；
5 级	能够实现对工业控制系统安全的主动防御与漏洞扫描安全防护。

9、信息融合

信息融合的核心在于对数据的开发利用，通过数据标准化、数据模型的应用等，实现对设计、生产、服务等流程的优化，提升预测预警、自主决策的能力。信息融合成熟度的提升是从数据分析、数据建模到决策优化的过程。构成信息融合类能力的域如图2-11所示。

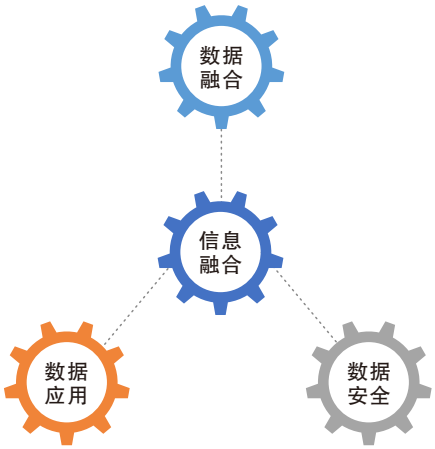


图2-11系统集成的关键评价域

9.1、数据融合

数据融合的目的是解决数据集成的问题，实现异构系统、不同数据库间数据的交换，体现了企业内部到企业外部数据交换的过程。关注企业数据标准化、统一平台的搭建、数据库的网络化集成与应用等。等级及其特征如下。

4 级	企业搭建数据统一模型，实现数据库间、与研发系统间的数据集成与传递；
5 级	企业实现数据库的网络化集成与应用（云数据库），可根据数据的自适应传递构建多功能数据模型，实现数据的实时浮动传递。

9.2、数据应用

数据应用是通过对数据进行挖掘分析，形成数据模型来优化指导业务的调整，最终能达到在线优化、最少减少人工干预的状态。关注数据模型的应用、对业务的优化等。

4 级	能够对研发设计、生产制造、产品服务等各种业务数据分析、建模，输出企业相关策略；
5 级	能够利用模型实现业务流程在线优化。

9.3、数据安全

数据安全的目的是解决企业如何利用数据密码算法、数据备份等，保障大数据、云计算数据存储、数据传输的安全。关注融合和备份技术的应用、存储数据的保密性、专用通信通道的应用等。等级及其特征如下。

4 级	能够确保存储信息的保密性，实现数据和系统的可用性；
5 级	建立异地灾备中心、专用通信通道确保数据安全、完整性与保密性，能够对系统管理数据、鉴别信息和重要业务提供完整性校验和恢复功能。

10、新兴业态

新兴业态是企业在互联网的推动下，采用信息化手段以及智能化管理措施，重新思考和构建制造业的生产模式和组织方式，进而形成的新型商业模式。新兴业态能力成熟度主要体现在智能制造高级阶段，实现了快速、低成本满足用户个性化需求，对设备远程控制，信息资源交互共享的目的，实现企业间、部门间各环节的协同优化。构成新兴业态类能力的域如图2-12所示。

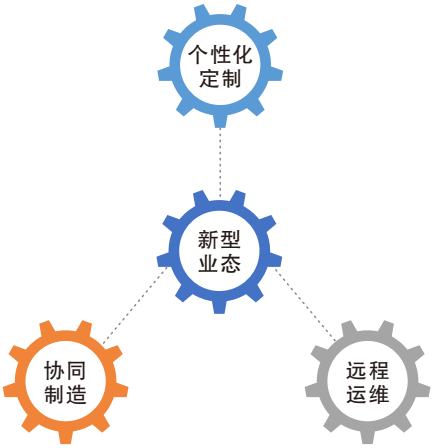


图2-12新兴业态的关键评价域

10.1、个性化定制

个性化定制是在当前个性化需求日益旺盛的环境下，将用户提前引入到产品的生产过程中，通过差异化的定制参数、柔性化的生产，使个性化需求得到快速实现。等级及其特征如下。

5 级	能够通过个性化定制平台实现与用户的个性化需求对接；能够应用工业云和大数据技术对用户的个性化需求特征进行挖掘和分析，并反馈到设计环节，进行产品优化；个性化定制平台能够实现与企业研发设计、计划排产、柔性制造、营销管理、供应链管理和售后服务等信息系统实现协同与集成。

10.2、远程运维

远程运维是指智能设备、智能产品具备数据采集、通信和远程控制等功能，能够通过网络与平台进行远程监控、故障预警、运行优化等，是制造企业服务模式的创新。等级及其特征如下。

5 级	能够实现远程数据采集、在线监控等，并通过数据挖掘和建模实现预警及优化等。

10.3、协同制造

协同制造是通过建立网络化制造资源协同云平台，实现企业间研发系统、生产管理系统、运营管理系统的协同与集成，实现资源共享、协作创新的目标。等级及其特征如下。

5 级	能够实现企业间、部门间创新资源、设计能力、生产能力等的共享以及上下游企业在设计、供应、制造和服务等环节的并行组织和协同优化。

三、模型的应用

根据使用者的不同，智能制造能力成熟度模型分为两种表现形式–整体成熟度模型和单项能力模型，整体成熟度模型提供了使组织能够通过改进某一些关键域集合来递进式的提升智能制造整体水平的一种路径，单项能力模型提供了使组织能够针对其选定的某一类关键域进行逐步连续式改进的一种路径。

（一）整体成熟度模型分级

整体成熟度模型用于衡量企业智能制造的综合能力，主要面向大型企业等，兼顾了制造和智能两方面。在模型中，将企业智能制造能力成熟度划分为5个等级，数字越大成熟度等级越高。高成熟度等级代表比较强的智能制造能力，反之亦然。按照本模型提升企业智能制造水平是由低到高逐步递进的，不能放弃比较低的等级直接越级提升到比较高的等级，每个等级向下兼容下一个等级。随着等级的提升，要实现的类的数量是增加的，如图3–1示。

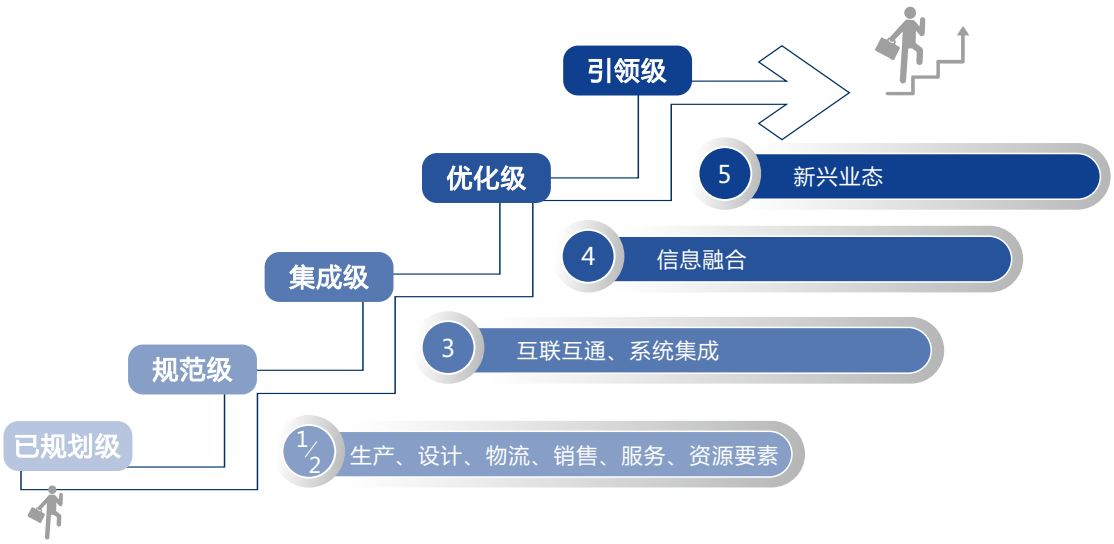


图3–1 整体能力成熟度等级

（二）单项能力模型分级

单项能力模型主要面向中小企业或者只在制造的某些环节有智能化提升需求的企业，用于衡量企业在制造的某一关键业务环节的智能化能力，侧重制造维的实施。模型中，将每一制造环节的智能制造能力分为5级，数字越大能力等级越高，选择一个类进行改进后，必须严格按照等级递进提升，如图3-2示。

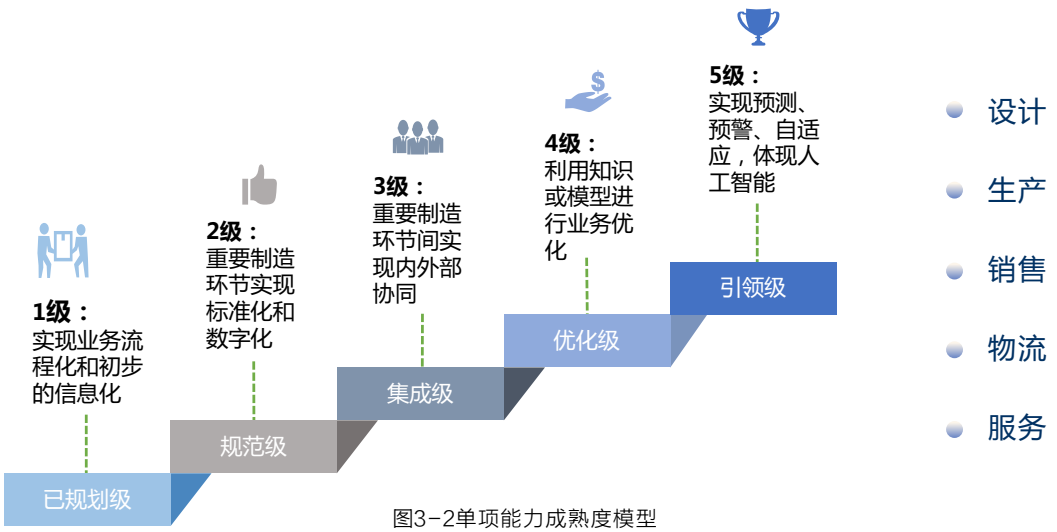


图3-2单项能力成熟度模型

（三）模型的应用

智能制造能力成熟度模型可用于诊断评估、统计分析以及改进提升，可供产业主管部门、制造企业、解决方案提供商、第三方机构等四类主体使用，适用于所有制造企业，不受行业限制。详见图3-3所示。

图3-3展示了应用主体、模式与相关产品的对应关系，以下对智能制造能力成熟度模型的功能进一步说明：

图3-3 应用主体、模式、相关产品的对应关系

诊断评估包括如下2项内容
与模型要求对标，判断智能制造当前水平；
与设定的目标比较，了解并分析差距，发现问题，可与自身、同行业、同区域的情况进行比较。

统计分析包括如下2项内容
形成量化数据，摸清区域或行业智能制造整体现状；
形成关键指数，了解重要指标的实现情况。

改进提升包括如下4项内容
明确未来发展方向，设计智能制造战略目标以及行动规划；
掌握实施方法，提升自身能力；
对症下药，选择适宜的解决方案和服务；
不同主体根据自身目的，可采用不同的应用模式。

四、相关理论的对比分析

本文的研究借鉴了国内外先进的智能制造以及成熟度方面的理论，以下重点介绍软件能力成熟度模型、智能制造系统架构以及工业4.0就绪度三个最主要的参考，分析了与我们提出的智能制造成熟度模型的区别和联系。

（一）软件能力成熟度模型

软件能力成熟度模型是为开发软件产品而提出的过程改进成熟度模型，归纳了业界关于产品开发管理活动的普遍认可的实践经验,覆盖产品从概念提出到交付的整个生存周期。其目的是帮助软件企业对软件工程过程进行管理和改进，增强开发与改进能力，从而能按时地、不超预算地开发出高质量的软件。过程管理是SW-CMM的核心，它认为只有过程质量得到控制，产品最终质量才能保障。SW-CMM从过程管理、项目管理、工程管理和支持管理四方面提出了软件开发过程中需要关注并持续改进的18个过程域，包括组织过程定义、组织过程改进、需求管理、技术方案、配置管理、项目计划等。根据组织软件开发能力成熟度的情况，分为5级，为初始级、受管理级、已定义级、定量管理级和持续优化级，如图4-1所示。

本文提出的智能制造能力成熟度模型，充分借鉴了软件能力成熟度模型以过程为核心的管理思想，提出了以“产品是过程的结果”为原则，通过深度剖析智能制造涉及的制造过程和智能提升过程，将智能制造拆分为可管理的最小单元，有利于指导企业分阶段的逐步提升自身的智能制造能力。此外，能力改进是本研究的另一核心思想，智能制造评价是结果更是手段，“以评促建”，通过评价来引导和推动企业关注自身的能力建设，而本项目提出的等级水平能够给出企业智能制造能力提升的方法和路径，帮助企业解决当前智能制造路上遇到的难题。

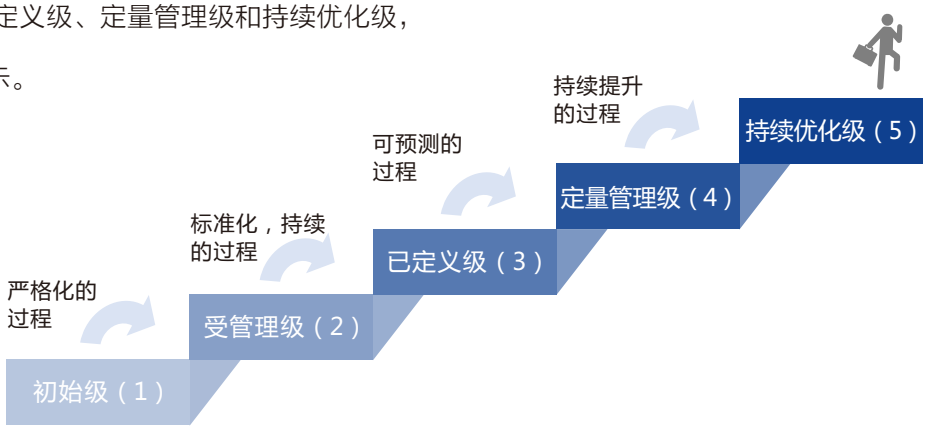


图4-1 SW-CMM五级模型

（二）智能制造系统架构

2015年12月，工信部、国标委根据《中国制造2025》的战略部署，联合发布了《国家智能制造标准体系建设指南（2015年版）》，提出从生命周期、系统层级、智能功能3个维度建立智能制造系统架构。系统架构是对智能制造的核心特征和要素的总结，其中，生命周期是由设计、生产、物流、销售、服务等一系列相互联系的价值创造活动组成的链式集合；系统层包括设备层、控制层、车间层、企业层和协同层共五层，体现了装备的智能化和互联网协议(IP)化，以及网络的扁平化趋势；智能功能包括资源要素、互联互通、系统集成、信息融合和新兴业态五层。

本文提出的智能制造能力成熟度模型，参考借鉴上述系统架构，最终形成“智能+制造”2个维度，以及设计、生产、物流、销售、服务、资源要素、互联互通、系统集成、信息融合、新兴业态10大类和细化的27个域，来进一步诠释智能制造的内涵，如图4-2示。

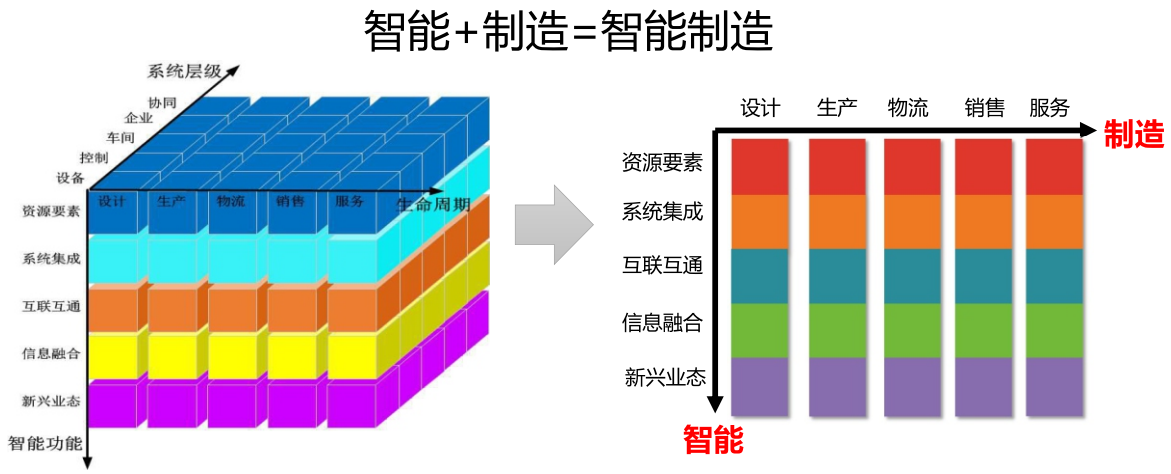


图4-2 系统架构与“智能+制造”维的关系

（三）工业4.0就绪度

工业4.0就绪度是由德国机械设备制造业联合会（Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau，VDMA）于2015年10月提出，主要为了解决两大问题：一是当前德国的机械制造工业处于工业4.0的哪一阶段，二是要想在企业中成功实施工业4.0必须具备的条件以及企业当前哪些情况需要进行相应的改变。VDMA根据调查问卷分析并提炼出具有6个级别、6个维度以及18个域的就绪度模型。6个级别分别是未规划级、初始级、中间级、熟练级、专家级、顶级示范级，

6个维度是：

战略和组织	施工业4.0的战略和组织文化
智能工厂	分布式、高度自动化生产
高效运营	智能生产流程体系
智能产品	用ICT技术装备物理产品
数据驱动服务	数据服务作为内嵌的商业模式
员 工	合格的知识工作者是成功实施工业4.0的关键

本文提出的智能制造能力成熟度模型与工业4.0就绪度在思路与方法上是一致的，在维度与域的划分方法上，都是先通过分析其核心要素、归类的方式归纳总结，然后通过分级的方式来划分等级。而工业4.0的维度和域更多体现了智能技术的特点，智能制造能力成熟度模型是综合了“智能+制造”两方面要素，体现技术与业务的融合。在技术应用方面，我们充分参考了工业4.0就绪度的战略、数据应用、云的应用、IT安全、设备基础设施、信息共享等内容，吸收并发展其成为智能制造成熟度模型中的资源要素、信息融合、新兴业态、生产类的一部分指标。

（四）制造成熟度模型

上世纪80年代美国航空航天局（NASA）提出了度量技术风险的工具——技术成熟度（TRL），主要是为了更好地开展技术和风险管理。目前技术成熟度已经广泛应用于美国及欧洲国家的装备采办项目管理过程中。TRL能够准确地度量技术和设计的成熟状况，发现潜在的问题，从而降低采办风险，有效地减少装备采办“拖、降、涨”的现象。但在关键决策点处以及在采办的主要流程中，还缺乏一个能科学度量制造风险的工具。因此，美国国防部推出了制造成熟度（MRL），以提升采办过程中科学技术转化的效率，使新技术能更快地应用到武器系统中，形成完整的成熟度评估体系，对产品生产的经济有效性进行定量化评价。2001年，美国三军联合制造技术委员会在技术成熟度的基础上构建了制造成熟度评价模型。

制造成熟度是美军用于控制制造风险的项目管理工具。它基于技术成熟度，同时是技术成熟度的扩展。它加强了对装备生产的经济有效性的评估。《制造成熟度等级手册》是美国国防部2011年7月提供的2.01最佳实践版本，其中对MRL各级的定义如下：

制造成熟度的10个等级包括：MRL1：确定制造的基本含义；MRL2：识别制造的概念；MRL3：制造概念得到验证；MRL4：具备在实验室环境下的制造技术能力；MRL5：具备在相关生产环境下制造零部件原型的能力；MRL6：具备在相关生产环境下生产原型系统或子系统的能力；MRL7：具备在典型生产环境下生产系统、子系统或部件的能力；MRL8：试生产线能力得到验证；准备开始小批量生产；MRL9：小批量生产得到验证；开始大批量生产的能力到位；MRL10：大批量生产得到验证和转向精益生产。

（五）罗兰贝格模型

罗兰贝格工业4.0就绪度指数（Roland Berger Industry 4.0 Readiness Index， RB Industry 4.0）是由欧盟委员会委托罗兰贝格咨询公司对工业4.0就绪度进行研究。其目的在于衡量欧盟成员国各国在工业4.0中所处位置，提高成员国各国工业水平和竞争力，以及制造业在GDP中的比重。罗兰贝格将工业4.0就绪度划分成两大类即：工业优秀度（包括：制造过程成熟度、自动化水平、劳动力就绪度、创新力度）和价值网络（包括：高附加值、行业开放性、创新网络、联网成熟度），每个类别以连续5分制衡量。这两个类别的结合，决定了一个国家在RB 4.0就绪度的位置。此外，以RB工业4.0就绪度为纵轴，制造业占GDP比重为横轴，罗兰贝格将欧盟成员国从低到高划分为四个等级：观望者、传统者、潜力者、领跑者，更加全面的衡量了各成员国在工业发展中所处的位置。

本文提出的智能制造能力成熟度模型，充分借鉴了RB工业4.0就绪度指数对于制造业行业现状分析和归纳的方法。而RB工业4.0就绪度指数更多是体现欧盟中各成员国的工业水平，同时，考虑了制造业在各国GDP中的比重。在国家层面，从RB工业4.0就绪度指数和制造业占GDP比重两个维度，以1（最低级）到5分制（最高级）连续的将各国工业水平划分为4个等级；本文提出的智能制造成熟度模型则重点针对国内制造业行业，在企业层面，从智能和制造两个维度、十大类及细化域，定位制造业企业发展阶段，并以1（最低级）到5（最高级）分制离散的将企业划分为5个不同阶段等级。

五、总结与展望

智能制造产业正处于高速发展阶段，对制造业乃至国民经济的作用举足轻重。本文提出的智能制造的核心内涵，从智能+制造两个维度去分析智能制造的核心要素、特征与要求，提出的能力成熟度等级为企业提供了一个评价其智能制造综合水平的框架，能够引导企业确立战略目标、采用适宜的方法与路径来实现智能制造，对整个产业的健康发展有积极作用。

智能制造能力成熟度模型的研究与推广是一个动态优化的过程，有赖于全社会的力量。接下来应重点围绕以下四点开展工作。

一是充分调研不同行业对成熟度模型的要求差异，优化通用的关键域和模型，能够适用于不同行业的需求。

二是围绕成熟度模型，建立与之匹配的、具体可量化的关键指标体系，能够体现能力改进的效果。

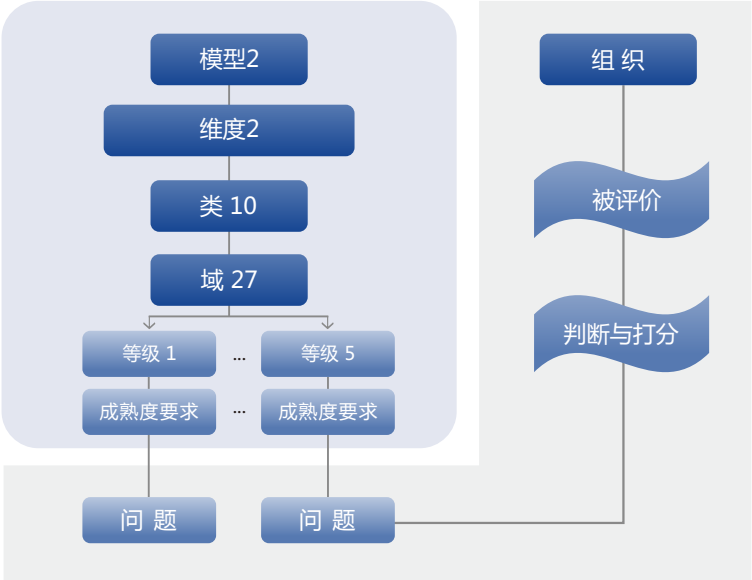
三是在较广的范围内开展成熟度模型的试验验证工作，通过企业试用成熟度模型来验证其科学性、合理性。

四是致力于智能制造能力成熟度评价的应用推广，广泛地在制造业企业中开展评价活动，积累基础数据，总结分析我国智能制造的发展现状，发现问题和改进点，来推动我国智能制造产业的整体发展。

附录 基于智能制造能力成熟度模型的评价方法

（一）模型与评价

智能制造能力成熟度评价是依据智能制造能力成熟度模型要求，与企业实际情况进行对比，得出智能制造水平等级，有利于企业发现差距，结合组织的智能制造战略目标，寻求改进方案，提升智能制造水平。图4-1为智能制造能力成熟度模型与评价的关系示意图：



图附录1-1智能制造能力成熟度模型与评价的关系示意图

（二）评价过程

企业首先结合自身的发展战略及目标，选择适宜的模型（整体或单项），根据行业特点选择评价域（流程或离散），通过“问题”调查的形式来判断是否满足成熟度要求，并依据满足程度进行打分计算，给出结果。评价过程如图附录1-2所示。

图附录1-2 评价过程

“问题”来源于成熟度要求，与其保持对应一致，是执行评价的主要依据。判断问题是否得到满足要基于证据，包括人员访谈记录、文件、系统部署或运行的记录等，必要时可借助工具或智能制造评价平台自动收集。

1、选择模型

组织可以根据自身现状以及智能制造发展战略，选择单项能力模型或整体成熟度模型。单项能力成熟度模型主要面向中小企业，或在制造维某一类有智能化提升需求的企业；整体成熟度模型主要面向大型企业，或在智能与制造的各方面发展均衡的企业。

2、选择评价域

结合流程行业与离散行业的不同特点，对27个域进行裁剪，确定适合行业特色的评价域。流程行业主要评价域如表附录1-1所示：

表 附录1-1 流程行业主要评价域

类	设计	生产					物流	销售	资源要素				互联互通		系统集成		信息融合			新兴业态
域	工艺优化	采购	计划与调度	生产作业	质量控制	安全与环保	物流管理	销售管理	战略和组织	雇员	设备	能源	网络环境	网络安全	应用集成	系统安全	数据融合	数据应用	数据安全	协同制造

离散行业主要评价域如表附录1-2所示：

表 附录1-2 离散行业主要评价域

类	设计		生产					物流	销售	服务		资源要素			互联互通		系统集成		信息融合			新兴业态		
域	产品设计	工艺设计	采购	计划与调度	生产作业	质量控制	仓储与配送	物流管理	销售管理	客户服务	产品服务	战略和组织	雇员	设备	网络环境	网络安全	应用集成	系统安全	数据融合	数据应用	数据安全	个性化定制	远程运维	协同制造

3、基于问题的评价

针对每一项能力成熟度要求将设置不同的问题，对“问题”的满足程度来进行评判，作为智能制造评价的输入。对问题的评判需要专家在现场取证，将证据与问题比较，得到对问题的评分，也是对成熟度要求的评分。根据对问题的满足程度，设置0、0.5、0.8、1共四档打分原则。若问题的得分为0，视为该等级不通过。如对“产品设计”这个域的1级的评价如图附录1-3所示：

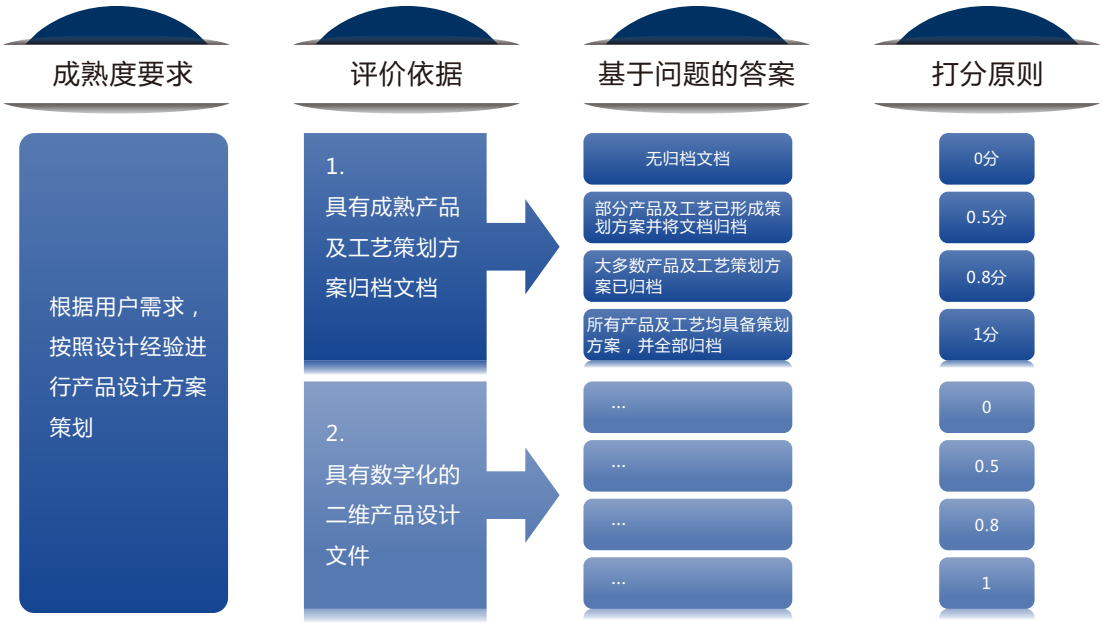


图 附录1-3 “产品设计”域一级评价示意图

4、给出分值与等级

对成熟度要求打分后，加权平均形成域的得分，进而计算类的得分，最终得到组织的总分值，并给予等级。过程如图1-4所示：

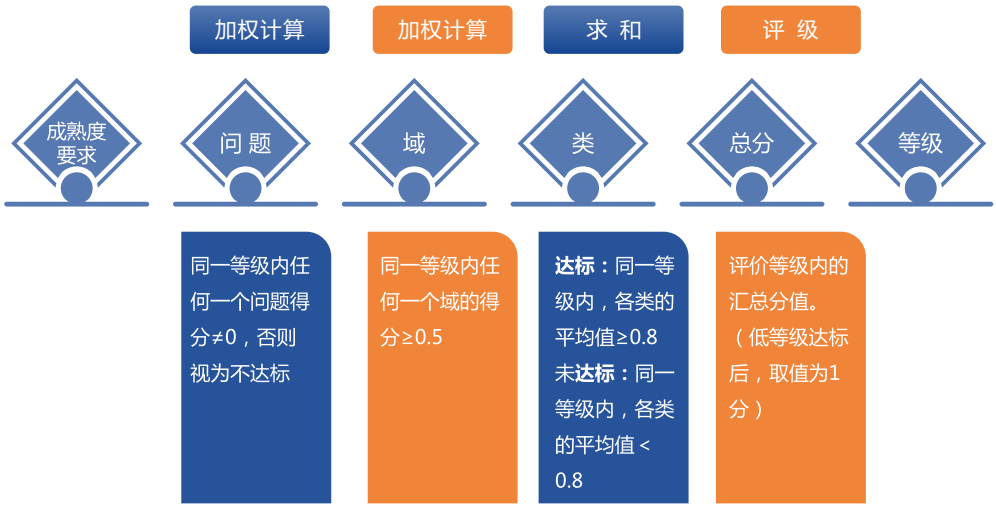


图 附录1-4 打分评级过程

对域权重的设定采用平均原则，当组织申请某等级的评价时，该等级内涉及的所有类的平均分值必须达到0.8分，才能视为满足该级别的要求，满足低等级的要求后才能申请更高等级的评价。（注：同一等级内任何一个问题得分≠0，任何一个域的得分≥0.5，否则视为不具备此等级的能力要求）。

最终结果与等级对应关系如表附录1-3所示：

等 级	对应评分区间
5级 引领级	4.8≤X≤5
4级 优化级	3.8≤X＜4.8
3级 集成级	2.8≤X＜3.8
2级 规范级	1.8≤X＜2.8
1级 已规范级	0.8≤X＜1.8

表附录1-3 分数与等级的对应关系

（三）评价示例

某电子产品加工企业，于2015年申请智能制造整体能力成熟度评价，适用离散模型；专家在进行现场评价时，对每个评价域进行客观评价，计算每个域的得分结果，最终确定各个类的得分，如表1-4示：

表1-4 某电子产品加工企业2015年智能制造能力成熟度评价得分表

1.69	得分	设计	生产	物流	销售	服务	资源要素	互联互通	系统集成	信息融合	新兴业态
5级	0.14	0.19	0.07	0	0.15	0.1	0.2	0.15	0.15	0.3	0.1
4级	0.36	0.25	0.4	0.35	0.35	0.25	0.4	0.35	0.45	0.42	/
3级	0.57	0.55	0.5	0.45	0.55	0.55	0.63	0.7	0.63	/	/
2级	0.69	0.7	0.6	0.8	0.7	0.65	0.7	/	/	/	/
1级	0.82	0.88	0.72	0.88	0.9	0.72	0.8	/	/	/	/

对1级的评价得分为0.82≥0.8，证明已满足一级要求，因此低等级取值为1；继续评价2级，2级得分为0.69，查《分数与等级对应关系》表，显示所处能力成熟度1级水平，已规划级。

该企业参照智能制造整体能力成熟度模型的要求，按照模型所提供的提升路径，设置目标，并积极寻求解决方案，持续提升自身智能制造水平，于2016年再次提出评价需求，专家现场评价结果如表1-5示：

表1-5 某电子产品加工企业2016年智能制造能力成熟度评价得分表

2.64	得分	设计	生产	物流	销售	服务	资源要素	互联互通	系统集成	信息融合	新兴业态
5级	0.14	0.19	0.07	0	0.15	0.1	0.2	0.15	0.15	0.3	0.1
4级	0.36	0.25	0.4	0.35	0.35	0.25	0.4	0.35	0.45	0.42	/
3级	0.64	0.6	0.6	0.5	0.65	0.6	0.72	0.75	0.7	/	/
2级	0.81	0.8	0.75	0.82	0.8	0.83	0.88	/	/	/	/
1级	0.92	0.9	0.8	0.9	1	0.9	1	/	/	/	/

对1、2级的评价得分都大于0.8，因此两个已达标的低等级取值为2，最终评价结果为2.64分，查《分数与等级对应关系》表，显示所处能力成熟度2级水平，规范级。

参考文献

[1]《2016年智能制造试点示范项目要素条件》，工业和信息化部，2016.

[2]《国家智能制造标准体系建设指南》，工业和信息化部、国家标准化管理委员会,2015.

[3] www.sei.cmu.edu/cmmi，卡内基梅隆大学软件工程研究所（SEI）,2016.

[4]《智能电网成熟度模型（Smart Grid Maturity Model）》，NWPPS E&O Conference, IBM，2009.

[5]《工业4.0时代——如何在第四次工业革命中成功》，罗兰贝格，2014.

[6] Yan Lu, KC Morris, Simon Frechette,《Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems》，美国国家标准化研究所（NIST）工程实验室，2016.

[7] Lindner,T&W,Manfred. INDUSTRIE 4.0 READINESS[R].Frankfurt: VDMA’s IMPULS-Stiftung, 2015.

[8] 战德臣,程臻,赵曦滨,聂兰顺,徐晓飞,《制造服务及其成熟度模型》, 计算机集成制造系统, 2012.

[9] The OSD Manufacturing Technology Program,the Joint Service/Industry MRL Working Group.Manufacturing Readiness Level (MRL)Deskbook. 2012

致 谢

本白皮书的起草受到社会各界专家的关注，特别感谢中国工程院董景辰、中国石油化工集团公司信息部李德芳主任对白皮书编写所做的指导与建议。

中国电子技术标准化研究院
China Electronics Standardization Instiute

yangmp@cesi.cn
010-64102805　010-64102806