

中国制造的智能转型

面向未来的工业4.0，一定要以系统的观点来组织生产和管理，解决复杂系统的协同问题。

文 | 林雪萍 柳建尧

工业 4.0（或者说中国制造 2025）的核心问题，是复杂系统（System of System）的组织、生产与管理问题。这就需要回归制造工程本身，重新审视既有的设计、工艺、制造等诸多要素。如果过分强调 IT 技术、物联网、大数据这样的工具，容易使得工业实体空心化。

中国需要进行自己的工业顶层框架设计，也就是确定中国工业生态系统的组成部分以及相互之间的关系。只有设计好中国的工业顶层框架 CMAF（China Manufacturing Architecture Framework），确立系统组成、规范、标准与接口，从顶层建立“连接、适配、驱动”的机制，才能解决复杂系统的相互兼容问题，真正实现“创新驱动”。

产品是人类知识与经验的集大成者，也是企业面临的最核心问题。只有推动工业领域模型、数据挖掘、专家经验、语义计算等面向制造业自身结构问题的发展，将人类的经验和知识有效地与产品结合，才能“强化基础”，真正实现“智能转型”。

中国制造2025的国家级工业战略

要实现中国制造 2025 战略，需要解决三个层面的问题：第一个是顶层国家级战略，需要确立好顶层架构；第二个是中间行业级的标准，需要确立好连接体系；第三个是底层的企业级战略，要使得企业一开始就可以实践和跟随。在面向下一代的工业升级

版，无论是德国以西门子公司为主体的工业 4.0，还是美国 GE 为公司代表提出的工业互联网，都是国家战略和制造业的巨头在其中起到了巨大的引导作用；大批中小型企业则围绕框架和方案，确立自己的生态角色和位置。

顶层框架，在于定义工业生态系统，确立系统整体和组成部分之间的关系。自 1950 年以来，美国国防部（DoD）基于应对复杂的外交军事需求、多兵种作战和控制成本的需要，做了大量的顶层体系框架设计工作。这些顶层框架的设计，大大提高美军庞大的作战指挥体系、军备采购、项目管理的效率。与此同时所形成的具体的指导性规范，不仅仅对国防工业系统提供标准化支持，也深刻地影响了大量民用产品的创新和发展。

工业顶层框架设计，需要关注于工业系统组成部分及其之间的关系（工业生态系统），从而可以建立起适用于各种复杂系统的建模规范。越是复杂的系统往往需要多方合作。如果没有一套模型系统的设计、开发和维护都很难进行。机电一体化的提出，就是机械制造领域最早提出跨学科问题的一个最响亮的流程模型，这是日本人 1969 年为解决机械元件和电气电子工程元件之间的功能扩展问题。很久以后，软件也在机电一体化中发挥巨大作用。“机电一体化”实际上是产品开发中跨学科系统的精髓表达，在该领域的研发和发展，使

得日本在上个世纪整个 90 年代，主导了机电液协同的精密制造。而系统工程则是为了解决更复杂的跨学科协同的问题，在美国非常流行。系统工程的假设就是 $1+1>2$ ，会产生复杂的协同性的问题。只有通过顶层框架设计，才能更好地建立基于模型的系统工程，使得工作流程管理全部基于模型化，跳开了基于纸张或者文档的描述，以产品定义阶段就具有的数字系统模型为基础，贯穿整个产品开发过程，连通系统，协同各个企业的研发与生产。这样，产品研发在各个环节中，方法、过程、工具和环境就可以得到有机的统一。

中国对德国的工业 4.0 的智能工厂和智能产品，都进行了大量甚至过度的解读，但很少有人关注德国工业顶层的设计。德国在 2014 年汉诺威上发表的《工业 4.0 白皮书》上，使用了 Reference Architecture 的概念，并提到了西门子给出的一个框架（见图一）。而在 2015 年 3 月份，CeBIT 全球最大电子电气展会上，德国 ZVEI（德国电子电气制造协会）正式地推出了德国工业 4.0 的一个顶层架构 RAMI4.0，许多规则已经细化，相应标准也在落实，可以看出“德国战车”以其惯有的精确，正在积极而细致地落实顶层框架的细节，从而为更多企业、科研院所、高校、标准化组织等一系列机构参与进来，打下统一的基础。

在工业 4.0 的大背景下，中国工业系统需要能够提出一系列的指导和

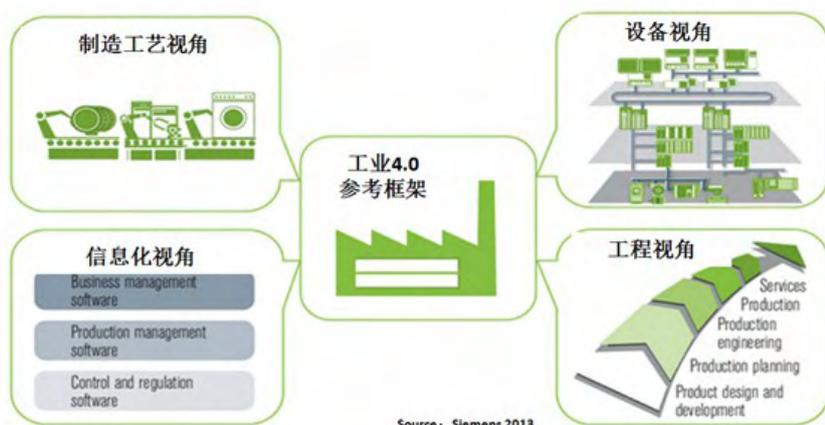


图1：德国工业4.0的早期顶层框架（2013年）

规则，用于可理解、可展现、可开发、可论证的系统架构。确保来自不同组织、不同系统、不同领域的规划体系可以比较和关联，从而为政府的决策者提供基础。最典型的方法是，从系统、技术、生产活动等不同角度，提供不同的视图，每一个视图表现架构信息的一部分，而且可以通过图形、表格、模型或文字进行描述。

中国是世界上唯一拥有联合国产业分类中全部工业门类（39个工业大类、191个中类、525个小类）的国家，形成了“门类齐全、独立完整”的工业体系。小到螺丝钉等基础零件，大至通讯、航天、高铁。如何利用这么复杂的工业门类和生产部门，形成一个可比较、可关联的工业生态系统，就需要有强有力的工业架构，来完成协同生产、任务传输等复杂的智能制造体系。

对于目前广泛出现中国的信息孤岛，需要构建顶层框架设计，使得横向和纵向的数据有了统一的规范和标准，各种数据的集成和流动才能变得容易，大数据、云计算等技术的应用才能更加流畅。目前，我们显然需要政府能够从国家层面上，推动工业系统内部的相互协同与结构关联。利用既有各种的知识体系，将各种产品、

标准、规范、编码，能够以一种兼容的方式，形成一个有机的整体。在此，本文作者提出“中国顶层框架”的一个要素示意简图，用来表达构成该系统的顶层框架的组成部分，也希望能由此推动行业人士对中国顶层框架的重视，积极开展此项工作。

在该整体框架图中，顶层框架设计处在国家级战略位置上，从顶层规范说明系统组成关系、运行规则、范畴定义等；而编码体系、成组技术等描述了行业级的解决方案，确立行业级的标准和接口体系；工业产品知识库，则是从企业级的角度，完成企业级的数据标准和知识的沉淀和重用；“互联网+”则提供了“信息化”与“工业化”融合的支撑性技术。而工业领域模型以及语义计算，则为数据可以无障碍地跨设备、跨系统、跨组织地流动提供重要保障。

中国制造2025的行业级和企业级战略

在推动国家级的顶层框架设计的同时，行业级、集团级的战略规划也要跟上，形成中国生态系统的子系统的协同规范和连接准则；而企业则可以根据自己的实际情况，积极推动基于系统工程的数字化基因改造，为未来的工业版图

中占据自己的战略高点。

行业级战略 大规模的协调生产与管理过程中，一定要解决系统之间的连接，成组技术是一条必经之路。尽管成组技术在中国起步很早，但其发展一直不温不火，颇为尴尬。实际上，根据零件之间的设计、工艺和生产方式的相似性，运用成组技术，进行流程简化，能够有效促进产品的零部件级管理向产品模块化进化，从而大大简化系统的组成，为推进中国工业的生态系统建设，有着积极的意义。成组技术是建立在以相似性原理基础上，合理组织生产技术准备和生产过程的一种重要方法。俄罗斯最早提出成组技术概念，随后在德国得到广泛应用。早在1961年，西德在对26个工厂的45000零部件进行归类分析后，提出将所有零部件分为三类，其中第二类是相似件，占70%左右，最适合成组技术。德国亚琛Aachen工业大学教授Opitz提出了业界最为有名的Opitz奥匹兹编码体系，目前仍然广泛地应用在德国工业领域尤其是机床行业，而德国机床也是全球高效精密加工的代名词。而Opitz本人也成为德国制造业的伟大的思想者和德国工业的骄傲。成组技术和编码体系的出现，最大程度地简化了系统的复杂性，使得模块化、压缩零部件数量、精简企业物料表、大幅度节省库存零件成本等成为可能。

波音公司在1995~2004年期间，在成组技术与编码体系的基础上，进行了最为先进的飞机构型管理，历时10年实施了史上最为野心勃勃的制造信息化管理系统DCAC/MRM（定义与控制飞机的构型/制造资源管理）。尽管困难重重，实施预期从原来的5年变成最终的10年，但该体系一举确立了波音公司成为世界上最先进的制造体系，并顺利完成梦幻飞机B787的制造。空客公司、洛克希

德马丁公司都随后跟进和实施，并取得了巨大的进展。

我国在 1984 年机械工业部组织编制的“机械工业成组技术分类编码系统”(JLBM—1)，是批准施行的成组技术的指导性技术文件。可惜的是，由于手工编码的复杂性(编码人员需要理解几百个零件特征信息)，未能及时与计算机软件相结合，缺乏归口单位的后续维护等原因，该编码系统已经在 2001 年被废除。

成组技术与编码体系已经被广泛证明，不仅仅是有效提高制造工艺效率的方法，也是合理组织中小批量生产的最为系统的方法。这对于工业 4.0，有着巨大的作用，仿佛神经系统一样，连接着整个产品体系。

企业战略 作为工业 4.0 的主要鼓吹者，德国机械设备制造业联合会 VDMA 发现，德国机械制造商最为核心的需求，就是寻找制造协同的合作伙伴关系，使得工程合作伙伴快速实现机械设计和原型、提供相同接口无需转换的基础设备，并在全球范围内执行可靠的服务。实际上，德国企业已经行动起来，积极推动系统之间的合作。如在机械模块化领域，以变频器、运动控制系统而闻名的德国伦茨公司，在通过对大量机械分析之后，提出了使用电气传动设备的机械任务可以归纳为 12 种，如定位驱动、电子凸轮等。通过这种模块化的总结，大大降低了复杂系统的复杂性(Simplify Complexity)，使得可重复使用、可互换性使用的机械零件的质量大幅度提升。

当然，这种协同并不会从天而降，企业不必也不会坐等这样的机制自然而然产生。为了追求效率、灵活性，企业需要开始行动起来，一方面系统学习系统工程、构型管理、并行工程、

Reference Architectural Model Industrie4.0

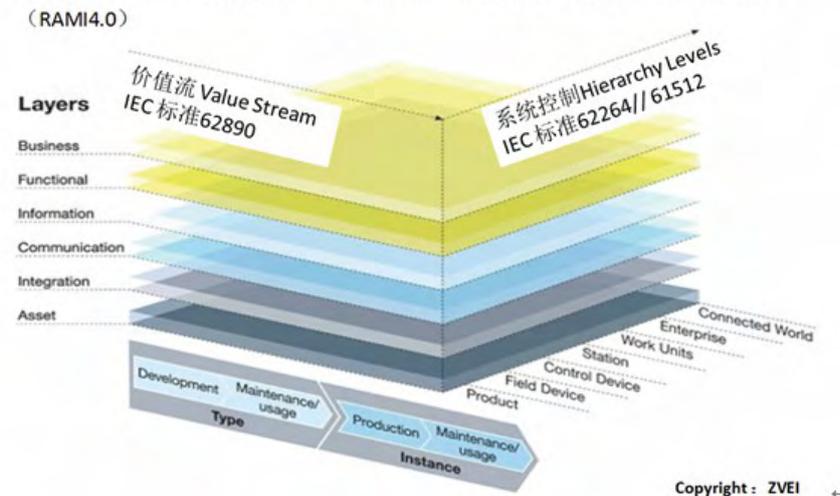


图2：德国工业4.0的顶层框架RAMI（2015，ZVEI）

面向设计的制造等先进制造的思想；另一方面加快产品知识库建设，从产品系统综合视图、产品知识库、专家经验显性化入手，建立属于企业自己的产品数字化基因，推动知识从基于文件(document-based)到基于模型(model-based)的范式转变。

对于企业而言，只有以大量的产品知识库和专家经验库为支撑，完成数字化的基因改造，才能应对下一代的工业升级。而对于存在大量建模、供应商庞大、产品复杂的大型制造业而言，形势更加迫切。F-35 第五代战斗机真正令人称奇的不仅仅是它作为联合战机可以满足多军种的需要，更重要的是它背后的生产管理方式，和它对飞机模块化设计的贡献。美国对于飞机的制造(无论是军机还是民机)，已经普遍采用模块化的管理思想。面向生产的有效标注管理，已经从零部件级，而是提升到模块级，这就大大简化了零部件的管理，提高了系统的可维护性。但是如何进行模块化设计，哪一类可以进行模块化组合，需要专家经验和知识管理的

手段，对产品知识和零部件族系和图谱进行全面分析。这种对工业本身的观察，所产生的知识经验，和相关产品知识库，对企业的可持续发展，具有重要意义。

在工业 4.0 下的制造企业，内部一定要求所有产品都是单一数据来源(Single Source Product Data)，从设计、工艺到制造的各个阶段的 BOM(物料清单表)都需要统一；同时，产品自身需要具备自定义属性和经验继承的能力，产品跟设备之间才能进行深度通讯和控制，智能产品才能成为可能。从设计数据开始，到工艺数据、制造数据、采购和售后备件数据，都需要进行紧密的关联，而且需要在企业内部实施面向供应商的协同采购的电商平台。这种电商平台并不是普通的网上采购，而是制造商(或者主承包商)与供应商共享部分生产数据，将供应商紧密地嵌入在企业内部的生产流程中。这一切都离不开对产品数据的深刻认识和产品知识库的构建。

通过对产品进行工业视角的分

析,构建独立于设备、软件、项目之上的产品知识库(包括3D模型、知识文档、仿真模型、数字化文档等),实现数据、IT技术、硬件之间的解耦,从而能够推进产品知识和数据中心的控制,促进数据在系统之间的自由流动,经验可以在组织内部传递,而合作伙伴之间更好流畅地完成协同任务。

工业4.0的工业资源再配置

工业4.0真正改变的是工业资源的再配置方式,在全球范围内发包商的制造命令,将进入全球制造云资源体系中;在该体系中,具有供应能力和制造能力的承包单位,按照整个系统所要求的标准和规范,自动进入资源匹配模式。从而使得参与配置的资源单位,可以以最小成本、最大精度的要求,实现智能生产。

这将对工业领域的生态体系发生深刻的影响。

企业组织模式去中心化 目前只有少数大型甚至垄断性的国际企业,才具备驾驭庞大的系统工程的能力,如国际最为有名国际系统工程INCOSE,几乎就是航空制造精英俱乐部。传统组织间的隔离以及专业领导的局限性,大大限制了跨学科、复杂系统的整合能力。而在工业4.0时代,几乎任何组织,无论大小,都将具备这种能力。因为处于中心地位的产品,以及部件结构,以及行业的Know-how,都不在集中在中心型的组织之下,而是将以自由流动的资源配置方式,分散在各个因地制宜的企业单位之中。双向流动的数据,意味着所有企业可以靠共有数据来进行协同式地合作。而这种组织模式的变化,将为“创新驱动”和“绿色发展”产生巨大推动力。

装配与生产的资源自动配置

在工业4.0的目标下,工位将不再仅仅是制造者独立拥有的工厂车间的概念,而是一个虚拟工位,或者直接对应一个关联车间。去中心化的协同将是最为流行的做法。正如F-35第五代战机的总承包商洛克希德马丁公司,已经成为世界上最大的协同制造的案例,整个合作伙伴分布在7个国家、跨越9个时区,每天有7万条数据在15000个工位上流动。

这种去中心化的组织生产模式,正是工业4.0最为推崇的资源配置模式。通过顶层框架的系统接口,通过产品知识库的能力匹配,使得各个生产单位的工艺属性、能力模块、地理位置等各种生产要素和知识能力,都进入资源配置中心,可以形成最小生产单位的微制造功能。

在这样的资源布局下,全国乃至全球合理配置生产资源就成为可能。通过社会化配置资源,使得生产进度、交付进度都完全可视化,从而大幅度降低整个社会的能耗,有效实现“绿色发展”。

工业大物流的出现 由于所有的生产资源,得以协同,生产进度完全可视化,产业数据将自然而然地形成,这对于库存的管理、零部件的运输、备件的管理,都产生了大数据时代的数据流。供应商、设备能力、工艺能力、加工地点、交工时间等众多要素,都是自动匹配实现,从而实现了物流系统的最佳流动配置:将恰当的订单需求、仓储需求、物流需求、运输需求,与交付要求,紧密而自然地连结在一起。

而基于物联网的物流服务,将形成双向反馈机制,因此大大提高工业物流效率,大幅度降低库存,降低运输成本,从而形成了真正的工业物流体系,这将产生产值几十倍于淘宝模

式所产生的零售物流模式,空前释放工业物流的潜能。

以云制造的工业信用为基础的工业金融体系 在所有资源数字化的过程中,订单排期、生产周期、产值、交付信用等,将在全社会的范畴内,留下各种数据痕迹,从而使得信息评价和资产数字化评估完全成为可能。这种以实际生产为根基的大数据,将使得制造业金融服务模式发生根本性的改变。所有的投资需求评估、企业信用都可以自动的完成和实现,金融业在这些工业领域所进行的风险投资、结盟投资、众筹、风险控制等决策上面,都可以得到各种深刻的数据分析作为支撑,从而使得工业金融服务迎来空前的发展。

面向未来的工业4.0,一定要以系统的观点来组织生产和管理,解决复杂系统的协同问题。如今制造业的研发、设计与生产,尚不可能实现对不同学科的完全统一,很多企业也无法投入精力进行工业系统框架的设计。这个时候自上而下的顶层框架的设计,从国家和行业层面推动工业生态系统的建设,将显得迫切而且必要。解决好顶层框架问题,企业才有更好的规范指导;解决产品级的知识的表达和数据的连通,才能使得企业的竞争力真正得到提升

只有完成中国工业生态系统的顶层框架设计和确定系统之间的关系,才能完成面向未来制造资源的再配置,使得工业效率发挥到最大,降低各种能源消耗和资源浪费,并实现智能生产,从而根本上推动中国制造业的“绿色发展”和“智能转型”。

林雪萍 北京索为高科系统技术有限公司副总经理

柳建尧 中国科技出版传媒集团董事长兼总裁