

智能产品： 产品结构和过程的 重新思考

数字化、集成、跨学科与联合

摘要

物联网构成了德国联邦教育与研究部研究举措（工业 4.0，数字化 / 互联网服务）的基础。这些研究举措预测未来是一个互联产品、系统和服务主导的世界。这些产品和嵌入服务中的电子和软件在价值中的占比将继续增加。彼此通信的产品被称为“网络 - 物理系统”或者“网络电子系统”。

作者：

Martin Eigner 博士 / 教授，凯撒斯劳滕工业大学虚拟产品开发学院；

Urban August，西门子工业软件股份有限公司

Matthias Schmich，西门子工业软件股份有限公司

目录

1. 摘要	3
2. 工业4.0和数字化的现状	3
3. 产品结构过去如何变化?	6
4. 典型的层级物料清单	8
4.1 通用产品结构	8
4.2 产品变型、平台和模块策略	9
4.3 物料清单的各个层次	9
4.4 实例化	10
5. 产品与过程模型的数字化	11
6. 产品结构今后将如何变化?	12
6.1 跨学科、集成与联合	12
6.1.1 软件	13
6.1.2 电气/电子工程	13
6.1.3 与产品相关的服务	13
6.2 协同	14
6.3 产品线工程 (PLE)	14
6.4 在产品生命周期早期阶段的产品结构	15
6.5 在产品生命周期后期的集成	16
6.5.1 闭环制造, 集成机电一体化工程	16
6.5.2 SysLM、ERP和MES之间的相互作用	17
6.6 服务生命周期管理	17
6.7 可视化	18
7. 未来的过程及IT架构	18
8. 总结	21
9. 参考资料	22

1. 摘要

物联网构成了德国联邦教育与研究部研究举措（工业 4.0，数字化 / 互联网服务）的基础。这些研究举措预测未来是一个互联产品、系统和服务主导的世界。这些产品和嵌入服务中的电子和软件在价值中的占比将继续增加。彼此通信的产品被称为“网络 - 物理系统”或者“网络电子系统”。开发这些新系统将带来一系列后果，比如跨学科和集成产品开发，改进当前设计方法、过程、IT 解决方案和组织形式，产品开发、计划、和服务过程中对基于数字模型的连续过程链的需求等等。此外，还将对机械、电子和软件工程的计划及设计方法进行试验，评估产品和生产开发中新思维的适当性，然后才决定是否将其并入一个将方法、过程和 IT 解决方案结合在一起的集成式跨学科方法。在产品和过程领域，产品结构是这些变化的核心，最好将其视为一个全数字化产品生命周期的骨架，它们构成了一个涵盖产品、生产和过程的数字模型的基础，延伸至整个供应链中的所有学科和地点。数字化是一个转换过程，重新绘制竞争异常激烈的细分 IT 解决方案的典型边界，其主干将由一个典型的数字企业软件套件构成，用该软件套件帮助集成产品和生产开发、生产 / 装配和服务之间的数据及过程。

2. 工业 4.0 和数字化的现状

过去十年内工业品及消费品中的附加值比例呈持续增加趋势。软件和自动化技术正在越来越多地取代以前采用机械方式执行的现代产品功能。德国机械工程行业协会（VDMA）最近的一份研究报告表明，如果不增加 IT 和自动化技术的使用，很多创新都无法实现。现在 IT 和自动化技术占产品制造成本的三分之一左右。与上一次（2008 年）的调查结果相比，软件、IT 硬件和电子工程的比例增加了百分之十一。据被调查公司称，IT 和自动化技术的重要性（尤其是竞争力）将持续增加。汽车是这方面的一个典型例子，因为汽车的创新和附加功能越来越多地来自于电子和 IT 领域。彼此通信的产品被称为“网络 - 物理系统”或者“网络电子系统”，也就是常说的“物联网”（IoT）。该概念经常构成服务（务联网 - IoS）的基础，她讲改变价值链的整个横向和纵向集成。现在，价

值链仍然在公司内部职能和外部职能之间定义了明确的边界。不够，今后更短的产品生命周期、更小的批量和多变型生产将要求提高所有公司部门和供应链之间的协同速度和效率。

实现这一目标的唯一方法是确保横向和纵向集成数字化的一致性，这将产生新的业务领域，这种情况在 IT、物流、生产和服务行业^[35]将尤其明显。

在全球集成工程、生产和服务的过程中，产品和系统的原始功能将快速增加，复杂性也将随之增加。互联网协议 IPv6 将提供 430×1036（430 后面加 36 个 0）个可用互联网地址。到 2020 年大概会有 370 亿项“物”和服务连接互联网（数字生命，连接性）。即使是现在，技术产品也在越来越多地成为跨学科系统，这都是多工程学科之间协同的结果。机械工程、电气 / 电子工程、软件和服务之间的数字化、集成和跨学科性，以及产品生命周期各个阶段之间的重叠配合，将构成现代产品开发、计划和生产过程的基础。信息和通讯技术正在越来越多地集成到产品中，服务也在不断增加，这些正在产生革命性变化，这就是熟知的“智能工程”^[2]。“智能工程”指用于产品开发过程的新方法、过程和 IT 工具链。这同样适用于集成生产计划和制造过程，即智能生产或者数字化工厂。这些术语指开发、生产和营销全面集成的创新产品、生产系统和服务，比如基于新互联网技术的产品、生产系统和服务^[24]。不过，这不只是正在给产品生命周期带来巨大变化的工业 4.0 和数字化。图 1 阐释了在上下文中创造价值的大趋势。在个别趋势的复杂集成和相互依存方面有一个特别挑战。未来几年的挑战是明智地接触并实施这些趋势，确保被社会接受。

¹ 网络电子系统彼此之间能够通信的多重机电一体化系统、产品和 / 或部件，比如自动停车系统中的车辆、智能电话和停车库。

² 本文指使用“产品”这个术语，因为作者认为生产系统也同样构成产品。

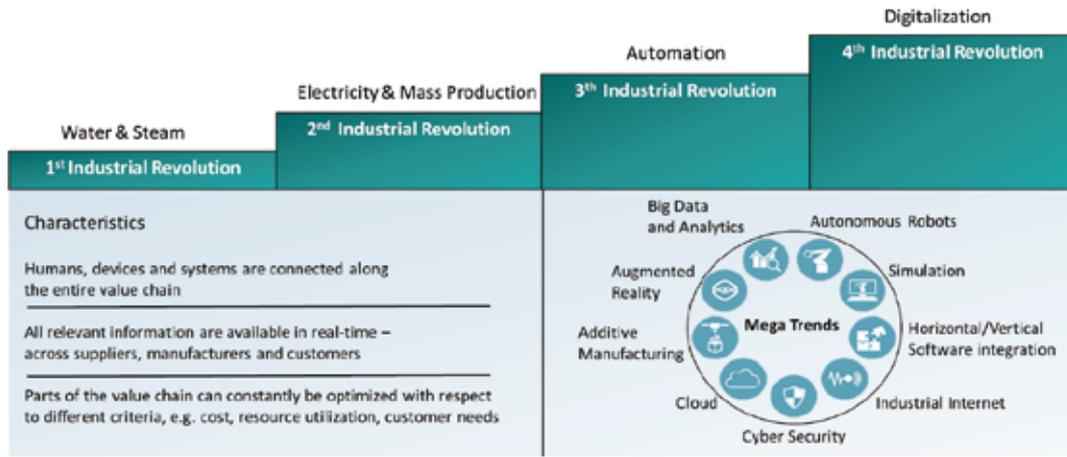


图 1：工业 4.0 – 数字化企业 来源：[34]

工业 4.0 是德国工业发起的举措，得到了德国政府的大力支持。该术语指第四次工业革命，应当被视为一个横跨十年的时间段。

尽管人们经常认为工业 4.0 的重心是改进生产，但是本研究将从一个更加普遍的角度来分析工业 4.0 – 这个视角与美国工业互联网联盟的角度类似。这意味着（见图 2）：

- 企业的整个横向价值链都将受到影响。
- 鉴于数字化产品开发过程与数字化生产过程之间的集成，与生产系统纵向集成变得更加重要。
- 工程过程得到持续支持，数字化产品模型（数字化母型和数字化双胞胎）被全面集成到所有业务单位中，并且可在这些业务单位中使用。

在一个公司内部以及不同公司之间，各个领域或部门之间的协同和集成是工业 4.0 的中心要素。数字协同的目的是增强各业务单位以及整个供应链和价值链的合作、协调和透明度。因此，协同和（横向）集成的功能领域涵盖价值创造网络中一个公司内部以及不同公司之间的跨单位合作。纵向集成涉及到集成公司层面的不同层次的各种 IT 系统（比如执行器和传感器，控制器，生产管理、制造和执行，业务计划等等）。

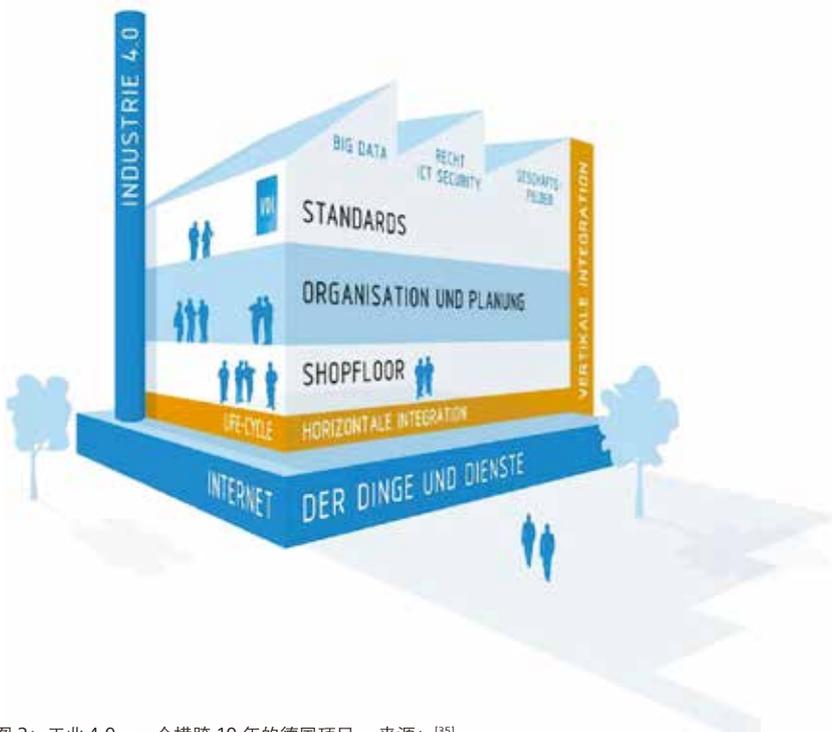


图 2：工业 4.0 – 一个横跨 10 年的德国项目 来源：[35]

³ <http://www.iiconsortium.org/>

实施这一愿景之前需要进一步开发方法、过程和 IT 工具来实现产品生命周期数字化的一致性。以基于模型的开发为基础，研究目前正在持续进入网络电子产品和系统的跨学科和集成开发，这些电子产品和系统本身含有产品以及生产 / 服务系统^[3, 4, 6, 17]。一方面，软件和电子将实现广泛的新功能，进一步增加产品的功能复杂性。另一方面，变差从硬件转移到软件之后将部分降低开发和生产中的复杂性。比如，用于预测性质量数据分析的面向服务并且可扩展的（云）平台概念可以帮助为产品和生产数据质量管理创建智能和应用特定反馈回路。这有助于提升制造商的系统 and 过程质量。一个集中生产控制系统将成为一个去中心化的自组织过程^[10,16]。这将产生自主智能机器和通信产品以及基于这些机器和产品的服务。它们允许全服务概念（图 3），尽管由于高风险和不确定性导致目前还无法全面实施。这是由于在用户或最终客户操作过程中缺乏信息，缺乏对整个系统数据（比如零件磨损）的透明评估。通过建立并使用具备现场数据智能评估的封闭控制环，可以计算这些不确定性的数量，更好地测量系统的故障风险。此外，还有在投资货物中提供个性化服务产品的新可能性。此外客户 / 机器特定全服务概念在今后也将成为可能，以确保高可得性，改进运营计划，更加精确地确定备件潜力，并且自动启动服务过程^[17]。

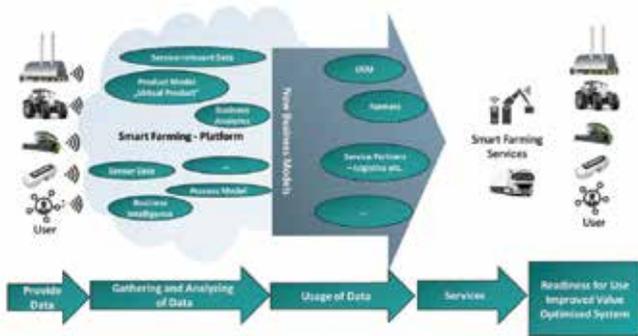


图 3: 智能农业中的全服务概念 来源: VPE

带传感器和执行器的技术与嵌入智能结合，对于配置工业 4.0 以及物联网和服务而言不可或缺。这是产品认知环境并与环境相互作用的唯一方法。此外，移动宽带或 RFID（射频识别）等无线通信技术也很重要。因此，用于确保产品部件和机器之间智能互动的服务和能力语义描述就变得很重要。

“智能生产”或者“即插即产”将使机器能够自动识别自己的环境并与其他机器连接 / 互动，从而允许信息交换，比如订单信息、产能信息和最优生产参数等。这里的一个中心要素就是将建立特定（云）主干概念，以便在整个生命周期可以在管理层面管理一个产品系统（大数据）的信息复杂度。图 4 是一个典型范例，阐释了消费品和投资品如何在积极合并传感器 / 执行器和智能数据处理（业务分析）的基础上，构成面向服务的业务模型的基础。

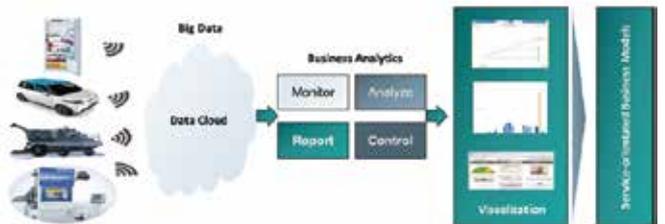


图 4: 面向服务的业务模型的基本结构

智能产品和系统已经改变了业务模型，并且将引导世界进入产品创新的新纪元，有着巨大的社会、经济和环境意义。智能产品和系统以现代通信部件（比如网络驱动低成本传感器和执行器）不断增加的智能化和通过互联网扩大连接性为基础。在这一层次的关键技术是带有嵌入智能、高级硬件、通信技术和嵌入系统的传感器及执行器技术。这些构成了网络驱动系统和服务平台的基础，连同对数据的聚合、融合和智能评估，提高了开环和闭环控制及图形可视化水平。这一层次的基础是软件技术（业务分析、云计算、大数据、安全、上下文敏感系统等等）以及系统理论及数学建模、分析和仿真过程。更高的一个层次开发了新的面向服务业务模型和运营改进（务联网），并且将涉及到的合作伙伴和部件 / 系统联网（业务智能）。前述两个层次的基础是新的通用跨学科工程方法、过程和 IT 工具。这些层次在模型中自下而上移动，面向应用的特性越来越显著，将服务目标锁定在相关应用领域，比如智能产品、智能农业、智能能源、智能工厂和智能建筑。

这种全面集成的系统和服务开发要求我们重新思考目前工程中使用的开发方法、过程和 IT 工具^[11,12]。所有学科（机械与电子设计、电子、软件及服务开发）的设计和计划方法都必须与后续制造和装配过程计划一起通过测试。在将这些要素并入一个由方法和过程组成的共用集成跨学科方法之前，必须测试这些要素是否适合于数字化。最后，还必须在一个现代 IT 基础设施上对这些设计和计划方法建模。

这些变化代表一种激进的重新思考，即“数字化转型”。要确保公司在未来保持竞争力，就必须完成这一转型^[5, 6, 13, 14]。影响因素有不断变化的市场情况和消费模型以及对智能产品和系统的新需求^[15]，包括：

- 产品、生产和过程模型的数字化
- 模块化产品开发和模块化产品，这是重用的前提
- 基于跨部门模块的变型和衍生品
- 基于系统工程方法的机电一体化和网络电子应用的系统集成
- 客户特定系统解决方案
- 强调售后服务的业务模型的重要性与日俱增
- 通过创新实现的产品及生产过程改变
- 能够快速适应改变后业务模型和过程要求的敏捷灵活 IT 解决方案

一个集成 PLM（产品生命周期管理）系统是在全生命周期中始终一致的数字化生产和过程模型的中心管理要素。该系统远远超出了当前以开发和设计（用于 CAD 和设计的典型物料清单集成）为重心的范围，是数字化企业软件套件的一个组件。PLM 的功能范围得到扩大，这是全产品生命周期和整个供应链跨学科性不断增加以及全覆盖的结果。PLM 的中央“神经系统”是一个在全产品生命周期中保持一致的跨学科集成数字化产品结构。

3. 产品结构过去如何变化？

本节描述了用于判断产品结构、PLM 和 ERP（企业资源规划）的功能之间的当前边界以及使用一个数字化企业软件套件的收益的方法论前提条件。现在，ERP 和 PLM 解决方案中的产品结构描述方法与引入结构化物料清单以来使用的方法相同。我们用 20 世纪 70/80 年代的一张装配图作为典型范例，以便更好地了解在过去十年中产品结构和技术文件发生的变化（见图 5）。这一时代的一个典型特征是将所有相关的技术和组织信息纳入图纸中，因此德国人常说：“图纸是工程师的语言”。这些图纸绘制的基本都是零件和装配的扁平结构，通过对物料清单（BOM）中的各行进行平行编号和图解，以目视方法将零件分配给装配和产品。这一方法的优点是分配零件是基本上不用解释，比如零件是面向功能还是面向装配。

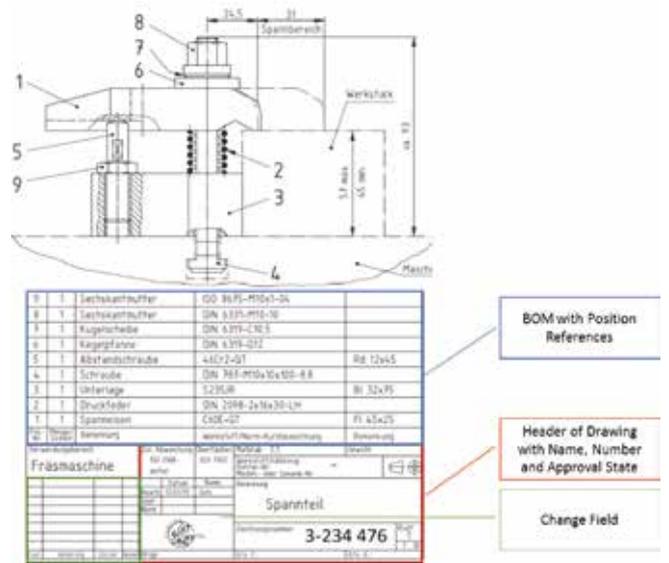


图 5：70/80 年代装配图举例 来源：^[30]

尽管 80 年代的产品描述主要基于文件 / 图纸，基于物料清单的层级结构在过去几年中也获得了关联性。出现这一情况的原因可能是 CAD 在机械和电气工程中的使用增加，以及在 ERP 系统的处置过程中的支持作用。这一方法首先得到 3D CAD 系统的支持，3D CAD 系统自动生成一个用于定位装配中各个零件的拓扑结构。因此，新技术取代了图纸基于编号的图形分配。尽管如此，在过渡期内物料清单仍然被嵌入 CAD 图纸，并且用编号在图纸上指示分配，部分原因是为了确保明晰度，尤其在二维应用中。

现在，层级结构仍然构成产品结构的核心。不过，由于机电一体化和网络电子的重要性与日俱增，这些必须辅之以线性、分支（软件）和类网络结构方法（MBSE/ 电气 / 电子）（见图 6）。

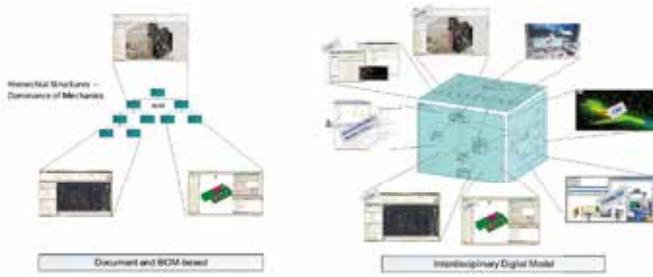


图 6：从基于文件和 BOM 的描述到基于模型的数字化描述 [27]

尽管在产品结构层次仍然通过层级结构来描述硬件（机械和电气 / 电子工程），软件开发已经应用了平行的主干、分支和融合技术。在软件开发中，通过连接按版次和版本（基线）识别的物理文件来实现配置。尽管电子开发基于 CAD 层次的类网络结构，现在这些也在 PLM 层次被保存为层级结构。此外，在工程变更周期中的各个学科也各不相同。机械、电子和软件工程的典型变更频率一般为 1:10:100。在生产计划中的服务模型和过程计划的描述还会显示一个类网络结构。随着结构化方法的扩大，我们看到了涵盖整个产品生命周期的产品结构中发生了一个更加重要的变化。在很多工业 PLM 实施中，产品结构基本上是从实施和设计角度来定义，然后才传输到 ERP 系统的装配视图。只有少数公司才实施了一个共用的面向装配的 BOM 视图。这些通常是机械和设备工程中个别产品或小系列产品的制造商或者以装配线 BOM 视图为主的大系列产品的制造商。

图 7 显示了整个产品生命周期中产品结构的典型特征。在汽车、航空航天和高科技行业，研究工作的目的是定义集成策略，通过功能、逻辑和行为结构将需求结构与工程 BOM 连接起来（上游集成）。有了数字化工厂和制造执行系统（MES）方法，可以将集成延伸到生产和工厂规划（下游集成）。这一潜力尤其归功于日益一致的数字化建模、成熟的集成标准以及现代化 IT 工具。发生损坏时可追溯性或者实质性和实质合规性的法律要求越来越严格（ISO9001, ISO 26262, EN50128, DO178B），意味着必须要有基于这些法律要求的集成模型和过程。

图 7 所示为产品生命周期中一个持续产品结构的愿景。现在还没有公司对其产品结构进行如此广泛的集成。在实践中，第一个过程中断发生在隔离的需求结构、CAD 结构和工程物料清单（E-BOM）之间。通过功能和 / 或逻辑产品架构以及在电子和软件主导的情况下的附加行为结构，可以实现连接。不过，到目前为止这一连接只用于工业研究，尤其在高科技、航空航天和汽车行业。第二个过程中断发生在工程和制造 / 生产物料清单（M/P-BOM）之间。尽管这些结构非常相似，基本上使用通用主数据，但是彼此的结构不同，并且这两个产品结构之间存在 PDM/PLM 和 ERP 系统边界。此外，这还会因数字化建模（数字化工厂，MES）在生产计划和制造中的进一步渗透而改变。面向服务的业务模型还催生了另一个应用 - 服务生命周期管理（SLM）。这个碎片化的 IT 环境导致典型工程过程（批准、变更和配置管理）的各有自己的周期，运营集成解决方案也不尽如人意。

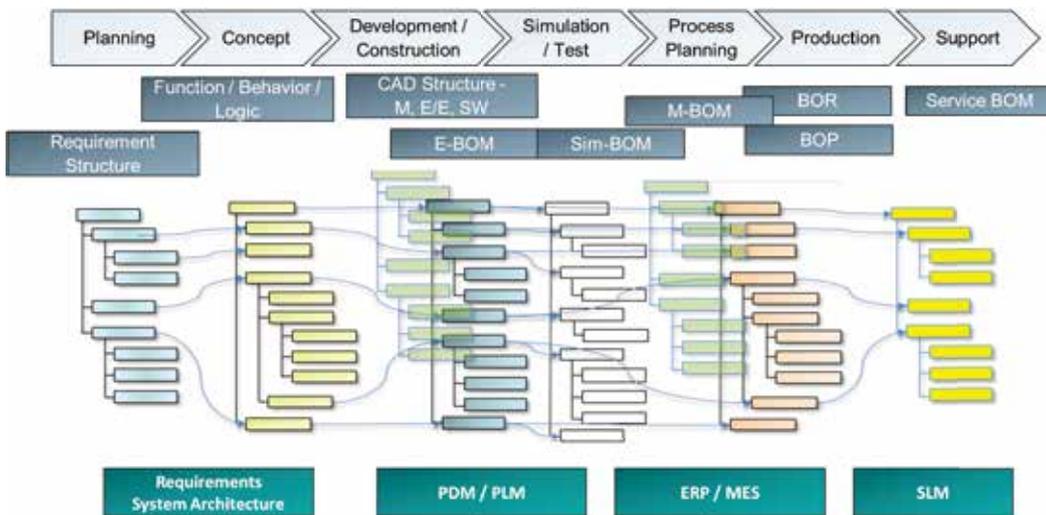


图 7：全产品生命周期的产品结构特性

4. 典型的层级物料清单

由于层级产品结构在当前占据主导地位，我们现在将以典型层级开发和工程物料清单（工程 BOM 或 E-BOM）为例简要解释基本程序。在 PLM 和 ERP 解决方案中，物料清单系统被称为一个基本数据管理系统。基本数据可以被分为：

- 主数据：主数据提供与任何其它数据毫无关系的有用信息，比如项数据（= 产品、装配、零件、半成品、产前阶段）。典型的主数据包括零件编号、版次 / 版本、描述、状态等。
- 结构数据：包括用于创建各类主数据之间关系的数据，比如 BOM 结构。

从信息角度而言，BOM 是层级结构（自上而下）的特殊表示，与使用清单（自下而上）一起形成复杂的类网络产品关系。在过去，由于缺乏图解工具，产品结构以清单形式显示，通过清单里面的标识来识别结构层次。

随着图形用户界面和浏览器的使用，产品结构的图形表示现在很流行，正在逐步取代清单形式的表示。gozinto 图（装配在里面的零件）是产品结构图形表示的原始形式（图 8）。

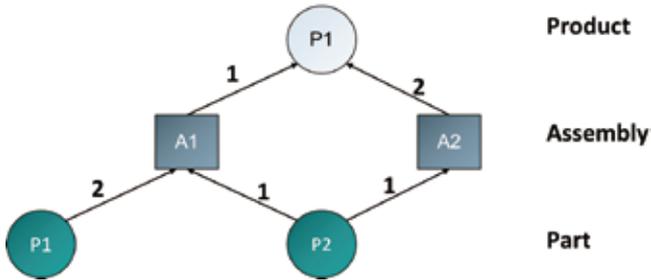


图 8: Gozinto 图

BOM 可以与产品的数量组成（量化物料清单）关联。量化物料清单是一个非结构化的表示形式，简单地列出子构件的数量，汇总相同构件，并且显示精确的数量信息。此外，BOM 还可以以结构视图（多级 BOM）反映一个产品的完整组成。IT 应用的基本 BOM 是两阶单级 BOM，它含有产品结构的一个节点以及层级较低的结构层次的组成部分。这个基本构造可用于衍生所有其它形式的 BOM，并且不会出现冗余。

4.1 通用产品结构

Schichtel 具有重要意义，尤其对于复杂 BOM 而言，因为它将产品结构分为^[31]：

- 产品细分（也叫“通用产品结构”）
- 物理部件和装配（实际（实例化的）BOM 和零件主数据，含零件编号）

一个产品（P）的结构最初被分为逻辑 / 通用组（G1-G6）。这种所谓的“产品细分”表示一个产品的骨架。实际安装的个别零件（E1-E6）或装配（Z1, Z2）添加到各组（逻辑节点）下面，将产品细分延伸到产品结构（图 9）。

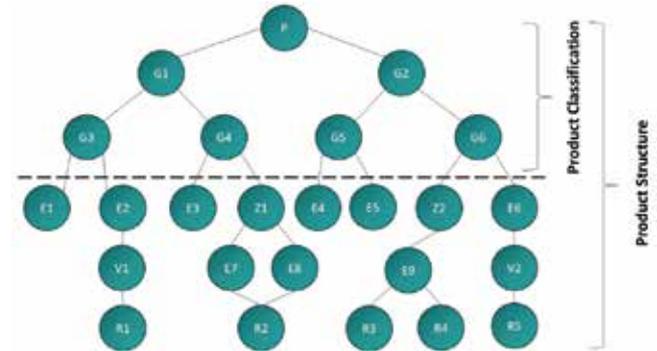


图 9: 将产品结构分为逻辑 / 通用和物理部件 来源：^[31]

这一划分大幅简化了产品结构，用于具有定量复杂性（有大量部件）的地方（比如机械、设备工程和航空航天工程），以及具有定性复杂性（大量变型）的地方（比如汽车行业）。

4.2 变型、平台和模块策略 (产品线工程)

现代产品正变得越来越复杂，有很多变型。用合适的产品开发和生产方法来应对这一趋势是控制总体成本的唯一方法。这就要求采用适当的产品结构和配置以及在这一基础上的制造、装配和采购过程。从产品角度而言，用装配和系列对一个可变和模块化产品结构进行系统工程，采取措施重用部件，在这里做出重要贡献。欧洲工业长期以来一直使用变型装配。在前述条件下，变型装配对一个公司的成本结构的重要性已经增加。由于潜在的产品形状数量非常多，因此管理这些变型对于处置、生产 / 装配和服务而言极为重要。图 10 所示为产品的所有变型和衍生品。



图 10: 高变型产品举例 来源: [32]

通过可以产生一系列衍生产品形状的变型，可以导入平台，定义可重用部件（横向矩阵系统），从而降低复杂性，同时提供市场要求的个性化（图 11）。以这种方式使产品系列和产品计划实现系统化也叫“产品线工程”（PLE）。

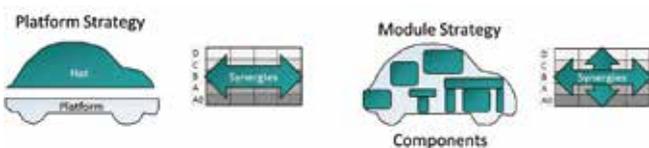


图 11: 平台及模块策略 来源: [38]

不同并且有时彼此冲突的目标是产品架构优化的驱动力。比如，尽管从生产角度需要易于装配的模块，但是工程部门把重点放在功能隔绝性上。尽管采购部门要求完整、低成本的模块，但是销售部门要求最大变差和可合并性。

由于这个原因，在需要各个学科之间配合时，只能开发一个可行的产品架构。可以在产品开发之前或者与产品开发并行在工具中构造模块化产品结构（图 12）。

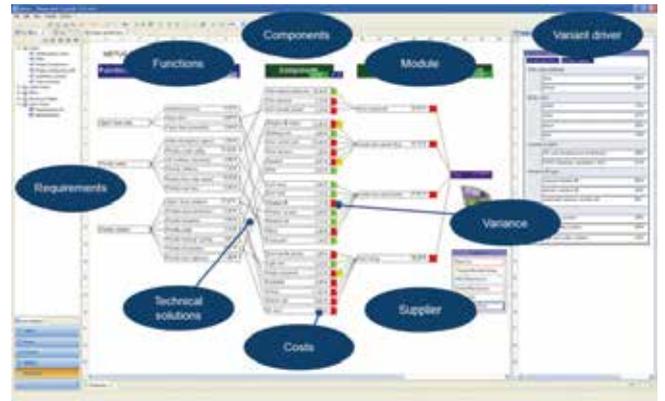


图 12: 用 Metus (IDConsult) 优化产品结构 来源: [39]

4.3 不同的 BOM 视图

在产品生命周期的下列阶段，从不同角度解释产品结构，以便衍生出不断变化的信息。工程 BOM 和一系列其它 BOM 之间差异，此后汇总在 BOM 下面。这些 BOM 包括：

- 制造 BOM
- 装配 BOM
- 处置 BOM
- 排程 BOM
- 计算 BOM
- 库存 BOM
- 采购 BOM
- 服务 BOM

在查看一个一致产品结构的使用情况时，你会发现工程和制造 BOM 之间的差异最有趣。文献列出了下列差异：

- 订单特定：工程 BOM 一般为订单中性，而制造 BOM 具有订单特定性 [DIN 6789]。在按单工程 (EtO) 和按单装配中，订单中心和订单特定之间的分离有时不再存在或者合并在生产中。
- 结构差异：经常从功能角度来看待工程 BOM 中的产品细分，比如机械、电气和气动部件。制造 BOM 取决于生产和装配作业。
- 信息的数量：在产品的结构和标识相同时，通过要描述的数据量来区分两个 BOM 类型。

- 变更状态：工程 BOM 一般不与活跃制造 BOM 的变更状态对应，尤其在人工输入和管理数据时。不过，这种 BOM 形式现在越来越多地以简化后的变更状态管理形式呈现。

可以根据产品生命周期阶段和学科定义不同的产品视图（见图 13）。

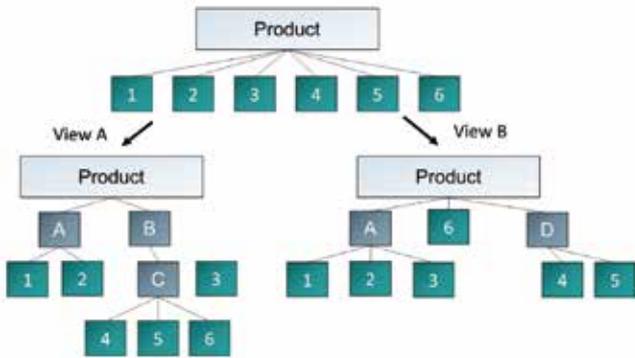


图 13：产品结构的树状图 来源：[33]

不同的视图对产品结构的需求也不同，因此形成的各个应用特定 BOM 类型的结构和内容也各不相同。通过定义构件，将不同零件总结为视图 A 和视图 B 中的装配，我们得到两个不同的结构 – 在本案例中指相同的零件，但是生成不同的结构节点。从 IT 角度而言，E-BOM 和 M-BOM 现在通常用不同结构而不是视图来表示。

4.4 实例化

如果在复杂系统中安装了同一类型的多重部件，就用实例来区分相同的部件。由于多种原因，数字化模型的实例化具有重大意义。在复杂的产品和系统（比如机器、船舶和飞机）中，必须能够追溯和分别识别安装在多个位置的相同部件。比如，在船舶上，一个特定类型的部件（比如泵 4711 D（零件编号和变更索引号）可以安装在不同的位置，有不同的参数（比如维护信息和供应商）。通过一个序号来检索各种实例，这个序号用零件编号和版次 / 版本来明确标识该实例。重要部件按件追溯，因此每个零件都有一个序号和一个零件编号，从而形成零件的完整文件。船舶中的泵以上下文特定的方法来标识，将相关实例（零件编号、版次 / 版本、序号）分配给船舶的序号（图 14）。

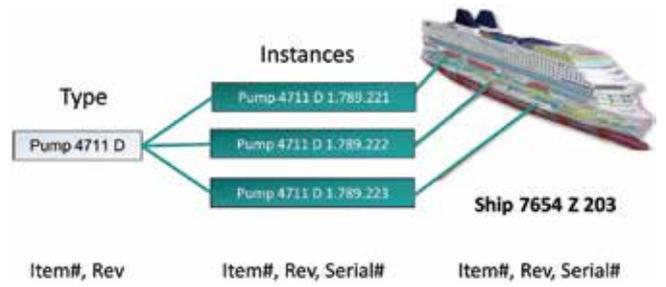


图 14：类型和实例之间的关系，通过序号区分

如果安装位置不重要，一般通过序号实例化就足够了。大系列产品的序号通常只在最高层次分配。在电子领域，经常通过位置标记来进行实例化，因为相关部件的位置与装配过程相关。在示意图 / 布置图和 BOM 里面，往往通过附加位置标记来识别相同的位置（比如：一个容量相同的冷凝器有一个零件编号，一个版次号 / 版本号，一个名称和安装位置 C1, C2, C3 等等）。现在，工业 4.0 首先从面向服务的业务模型中产生了新的需求，要求通过上下文援引安装位置和产品来实现实例化。传感器提供的值只能在上下文中解释（图 15）。

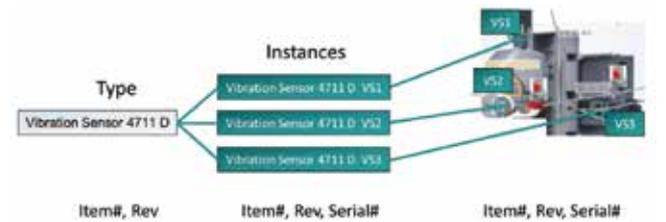


图 15：类型和实例之间的关系，通过位置标记区分

5. 产品和过程模型的数字化

复杂机电一体化产品和生产系统的开发已经涵盖了全产品生命周期和整个供应链中的机械、电子和软件工程之间的组合。现在，这在很多公司中仍然是一个没有解决的问题 – 甚至没有工业 4.0 – 全球活跃公司中的 84% 只把自己的 PLM 解决方案（及其产品结构）用于一个单一学科，并且作为一个具有档案特点的系统。这种情况在机械设计中普遍存在 [29]。53% 的公司相信他们的 PLM 系统不支持跨学科合作 [29]。有了工业 4.0 之后，网络电子产品和系统带来的附加复杂性已被增加到机电一体化引起的问题中，这将通信能力以及基于系统的特点合并到由各个利益相关方开发的部件中，不仅导致内部及外部外业务过程发生变更，而且还导致整个业务模型发生变更。在早期识别和实施这一转变过程 – 在性质上并非排他性技术问题 – 对很多企业而言是一大挑战。

数字化，即以“数字化模型”以及基于数字化模型的工程过程（批准、变更和配置）形式对产品的完整描述在产品生命周期设计阶段很早就开始来（见图 16）。产品线工程（PLE）和基于模型的系统工程（MBSE）是在这一阶段使用的更加频繁的跨学科工程范例。这些范例用模型（不是文件）来支持被开发产品系统的分析、规格、开发和保护（见第 6.3 节和第 6.4 节）。这一连续性贯穿一个产品系统的生命周期以及各个学科，将所有工程结果连在一起。它允许由功能、逻辑和行为组成的概念产品描述起到连接需求和详细设计的桥梁作用。此外，还需要将工程、生产和服务紧密联系在一起。当前的两个系统 - PLM 和 ERP – 必须合并成一个集成式数字化产品和过程模型，然后在一个统一、一致的数字化产品和生产模型基础上建立批准、变更和配置管理等过程。ERP 将起到执行系统的作用，而 PLM 系统将起到主要系统的作用。在 PLM/ERP 集成过程中，MES 在实时连接机器和装置以及保护基线方面发挥了重要作用。此外，中央产品和过程主干也涵盖服务领域。

在讨论该等重叠 PLM 解决方案时，越来越多地使用到“生命周期管理（PLM）”这一术语 [14, 24]。这是指与标准 PLM 实施之间的差别：

- SysLM 描述由相互连接的通信部件组成的产品和完整系统
- SysLM 基本基于一种跨学科集成方法
- SysLM 代表全产品生命周期的完整集成（见图 16）
- SysLM 支持基于模型的系统工程（MBSE）方法，在概念 PDP 阶段早期主要通过一种系统化、跨学科设计方法（见第 6.4 节）

因此，本文将用术语 SysLM（不用 PLM）来描述这一个综合解决方案。

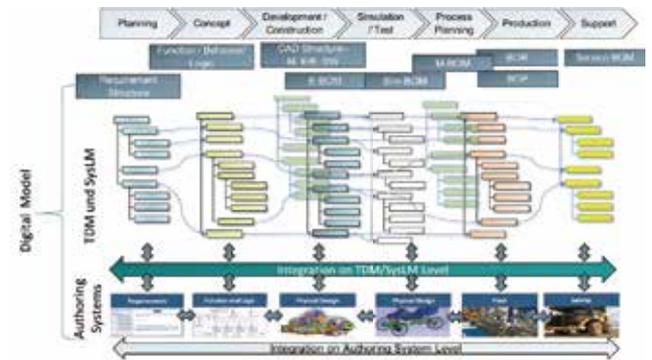


图 16: 基于模型的开发方法

图 16 还清楚地显示，完整的数字化模型被分为多个层次：

- 创建系统层（技术层）
- 团队数据管理（TDM）（与相应创建系统密切连接的本地管理层）
- 作为工程 / 生产 / 过程主干的系统生命周期管理 (SysLM)（全球管理与过程层）

各层次和各产品生命周期阶段之间有各种通信形式。数字建模中使用了两个术语：

- 订单中性数字母模
- 订单特定和隔离的数字双胞胎

图 17 澄清了这一关系。为了简化起见，它假设实际和虚拟实例未被一个服务过程跟踪。在第 6.6 节（服务生命周期工程）中，我们将以一个被跟踪的服务过程为例，更详细地讨论这一主题。

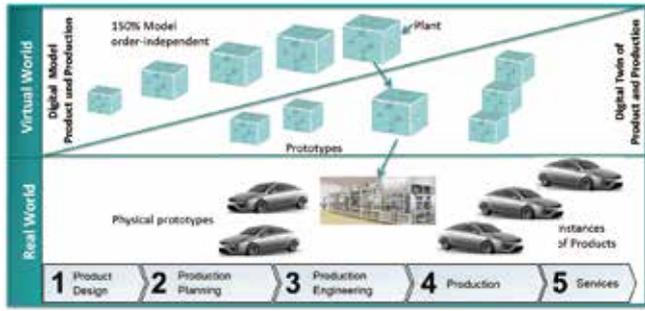


图 17: 数字母模与数字双胞胎之间的关系 [VPE]

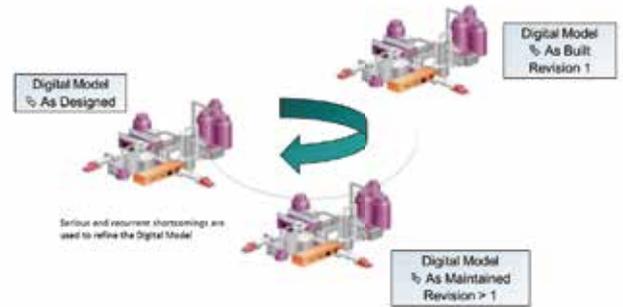


图 18: 数字母模与数字双胞胎之间的关系 [VPE]

在理论上，数字母模为订单中性，而数字双胞胎是已交付产品的虚拟图像。不过，在现实中有许多取决于生产类型的混合形式：

- MTS（按库存生产）
MTS 一般用于散装货物和消费品，指完全隔离订单中性开发和取决于预测的生产。
- CTO 或 ATO（按单配置或装配）
只有在生产部门收到个别客户需求后才确定特定变型。
- CTO 和 ATO（按单配置和按单装配）
在一个基于模块化或变型概念的终端产品有多重替代时适合使用 CTO 和 ATO。工程、设计、采购和生产领域一般采用订单中性工作方式。最终装配生产和配送具有客户特定性，因此也具有订单特定性。
- ETO（按单工程）
在收到来自开发和设计过程的客户订单之后会立即触发 ETO。开发有时是订单中性，有时是订单特定。在按单工程中，工程、采购、生产、最终装配和配送一般都具有订单特定性。这一生产原则最适合于客户特定产品。定制生产会将标准化降到很低的水平。

如图 17 所示，另一个重要的差异化特征是追溯实际和虚拟实例（数字双胞胎）。在航空航天等个别行业，通过一个服务过程实施的每项变更都必须记录在数字双胞胎中。其它行业 – 尤其是非常强调安全或服务的行业 – 目前正在讨论数字双胞胎永久匹配的技术可行性和经济优势。图 18 显示了传输到其它术语的“数字母模”和“数字双胞胎”这两个术语。

6. 产品结构今后将如何变化?

6.1 跨学科性、集成和联合

跨学科性与集成要求在全产品生命周期中（从需求分析、产品开发、生产计划和制造到运行、服务、备件供应及回收）为工程提供支持。从组织和技术角度而言，所有学科（机械、电气和电子工程、软件与服务）和所有业务单位也需要这样的支持（图 19）。



图 19: 跨学科、集成并且联合的产品生命周期 来源: [21]

一个跨学科产品结构要求对全产品生命周期和各个学科的不同创建系统进行有意义的集成，尤其在 PDP 的早期设计阶段（见第 6.4 节）以及用于机械、电气和电子工程及软件开发（CASE）的 CAD 和 CAE 应用。须特别注意机械工程、电子工程、软件及服务中开发过程的多样性。机械产品工程以第 4 节中描述的层级物料清单为基础。软件和电子开发、生产计划和服务描述采用不同的结构方法。现在主要在开发 / 设计、生产计划和制造阶段查看产品结构。现在出现了这样一个明显趋势，即将 SysLM 解决方案中的早期概念阶段与开发 / 设计之后的产品生命周期阶段集成在一起，包括生产计划、制造和服务支持。

术语“联合”指在各个内外组织单位和 IT 解决方案中管理产品结构的组成部分而不丧失总体连接性的组织和技术能力。

6.1.1 软件

图 20 所示为一个由可以独立修改的各个组件（A、B 等）组成的软件产品。在特定版本中选择个别组件会创建软件产品的一个新状态（建造）。

软件一般在支持各种替代版本的版本控制系统中开发。“主干”指持续的主要开发路径。所有变更都记录在主干里面。此外，还可以在开发的各个阶段进行去耦处理，然后作为一个单独的“分支”继续。这用于表示永久性的小变更，比如一款专门为一个不同国家开发的软件。尽管如此，一个分支还可以显示一个短期性质，以便开发和测试新的构件，然后将其部署到软件中。因此，还可以将一个分支重新与主要开发路径或主干结合起来。这样将两个版本中的变更结合起来就成为“合并”。

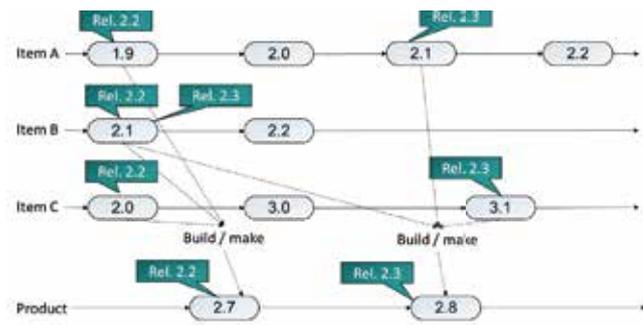


图 20: 不同软件构件的配置 来源: [36]

6.1.2 电气 / 电子工程

电气和电子工程具有多种应用状态（见图 21）。

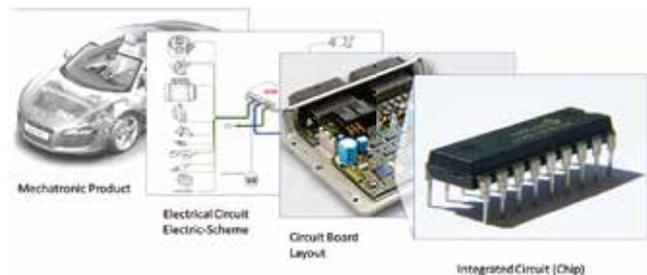


图 21: 各种类型的电气 / 电子工程应用

马达控制器及其连接的传感器和执行器以及能源供应装置位于电路的最高层次。控制器本身一般安装在一个电路板上。电路板是自由电路的一种更高级形式，以紧凑、牢固和刚性方式固定各个（离散）电气和电子部件。由于这一特定形式，电路板代表 E-CAD 工具分类的第二个层次。这也被称为 PCB（印刷电路板）设计。在下一个层次，我们会发现集成电路（芯片）。与在电路板中一样，集成电路的构件（晶体管、电容器和电阻器）彼此紧密连接。不过，这样（只）直接将数字构件连接固定到基板上，密度要高很多。外部连接采用针状物，以便接触电路板以及附加的离散构件。这三个层次代表了在电气和电子工程中分别通过电气设计、电路板设计和芯片设计创建电路板的三个选项。在这些层次的工程和生产过程各不相同，由用于电气电子开发的不同类别的过程模型、方法、描述性形式体系和 IT 工具提供支持。一个典型例子就是电气电子物料清单的实例化，实例化部件连同各自的安装位置被发送给机器。在芯片和嵌入系统的设计中，重点是正式的硬件设计语言（HDL），而不是像电气和离散电子工程中的 E-CAD 系统的图形输入。这些语言包括 SystemC、VHDL 和 Verilog，可用于描述和仿真集成电路上的操作及其设计。

6.1.3 与产品相关的服务

面向服务的业务模型是工业 4.0 或者务联网的典型业务模型（见图 3 和图 4），要求在产品开发早期集成与产品相关的服务和服务提供。这些服务一般基于部件的通信能力。这与预测性维护、备件供应或者废物处置优化等服务类型无关（如图 22 所示）。

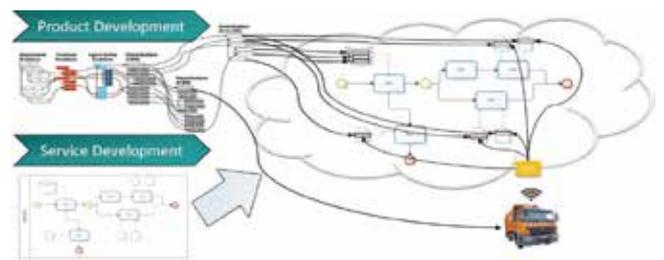


图 22: 废物处置中的产品与工程服务 [VPE]

即使在本例中，也是用网络建模语言来描述服务。业务过程建模语言 (BPML) 是一种基于 XML 的跨平台语言，用于描述业务过程模型。BPMN (业务过程建模符号) 是一种用于对过程进行图形表示的语言。另一种面向服务的服务是生成基于数字双胞胎的客户特定文件，即订单特定配置。

术语“联合”指放弃整体解决方案。鉴于产品和过程复杂性方面的定量和定性增加，这些解决方案已经不能满足需要了。未来将看到联合的语义网络将数字模型分配给各个层次 (创建系统、团队数据管理和 SysLM 主干)。未来的 SysLM 架构必须基于一致、可扩展的基本数据，提供可以能够灵活适应不断变化的过程和组织结构的自主功能部件。由于数据模型的性质不断变化，因此这一动态适应能力很有必要。此外，个别数据对象的利益相关方还随着组织中过程的变化而变动。

6.2 协同

跨学科产品开发还将不可避免地提高价值链 - 产品制造商和供应链 - 全球化程度。这将形成复杂、互连的过程和工作组织 (见图 23)。这意味着产品和生产数据将在整个供应链和典型工程过程中分配。跨单位通信以及跨文化和时区的全球配合正变得比以往任何时候都更加重要。此外，采取工程协同平台形式的基于互联网的客户和供应商协同必须是 SysLM 解决方案的一部分。此外，云解决方案可以支持这些平台。

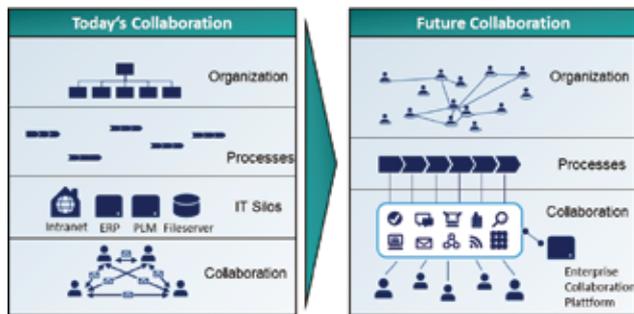


图 23: 未来的协同^[40]

访问逻辑确保正只有正确的人员才能在正确的时间和地点看到和处理正确的信息。支持与合资企业、开发合作伙伴以及系统、软件和服务等的供应商协同是未来 SysLM 解决方案的核心要求。今后必须显著提升内部和外部协同的密切程度。

为了满足综合系统的最高要求，必须确保合作伙伴开发的子系统的适合性，并且还必须同时确保 OEM 和合作伙伴知识产权的安全。SysLM 为公司提供了一系列用于内外合作的工具。此外，还提供简化后的指示机制，比如来自社会媒体的指示机制。

6.3 产品线工程 (PLE)

系统及软件产品线工程 (简称产品线工程 (PLE)) 指对一个项目组合以及组合中各种产品的工程。可以用不同方法解释变化 (见第 4 节):

- 根据选项，比如一个 German 的 10 27 中变型
- 开发平台设计，即在一个共用硬件或软件平台基础上建立各种应用
- 各种应用中重用的子系统或部件的模块化性 (横向矩阵系统, 通用性), 目的是提高产品、项目和组合的重用率

可变性的目的是实现高市场覆盖率 (外部变差), 同时通过低内部变差将运营支出保持在尽量低的水平。用于保持低内部变差的工具包括定义好的硬件和软件界面或者将变差转移到软件。比如, 汽车公司经常向客户提供 1.6 升、1.8 升和 2 升的发动机变型。在公司内部, 所有变型都基于同一款 2 升发动机, 采用相同的注射电子和相同的应用程序。变更的只是用于定义发动机功率的校准数据。

术语“PLE”来自于软件工程领域, 但是最近被用于整个跨学科产品、项目和组合 (ISO26550 系统及软件产品线工程的参考模型。变型和模块化系统尽管在硬件开发领域仍然相对较新, 但是自 20 世纪 60 年代以来已经成为成熟的产品开发及生产优化方法, 其目的是降低开发成本, 加快上市速度, 同时提高质量、生产力和产品可扩展性。发生这一剧烈思维转变的原因之一是 PLE 被用于一个完整的机电一体化或网络电子产品 (即所有学科平行); 另外一个原因是与基于模型的开发方法 (MBSE - 见第 6.4 节) 之间的连接和集成。

图 24 阐述了这一关系。

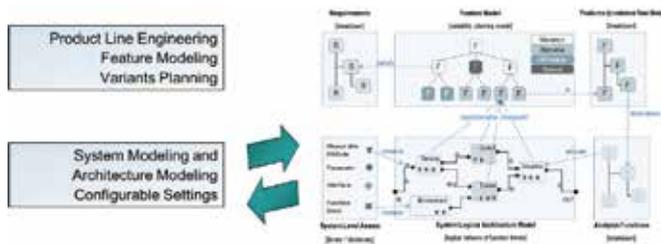


图 24: 产品线工程 (PLE) 与系统建模 (MBSE) 之间的相互作用

6.4 在产品生命周期早期阶段 (上游过程) 的产品结构

因工业 4.0 而成为可能的产品、越来越高的数字化程度以及相关工程过程要求更多地专注于 PDP 的早期阶段。与要求的跨学科性一起，基于模型的系统工程 (MBSE) 产生了新的产品开发方法，为开发复杂的机电一体化和网络电子产品提供了完美条件，从而产生了被管理并且受制于工程过程的新模型元素，包括需求、功能、行为、逻辑结构、测试及使用案例以及利益相关方。通过在早期使用这些建模语言，可以解决在早期开发过程中集成各个学科的问题，定义指定对象类别之间的关联关系，描述一个跨学科系统架构。对于虚拟开发而言，基于模型的一致开发过程至关重要，因此是优化机电一体化尤其是网络电子产品和系统时面临的一大挑战。基于模型的系统工程方法有助于简要描述一个跨学科产品。VDI 2206 指南定义了一种用于开发机电一体化系统的系统化方法。这里的重点在“V”的左侧，用基于模型的系统工程工具来扩展它。由德国联邦教育与研究部发起并由西门子配合实施的 mecPro² 研究项目将用于嵌入式系统的软件平台方法 (SPES) 与机械工程的设计方法 (VDI2221) 结合在一起 (图 25)，从而扩展了“V”模型^[25]。

马数字建模分为三个可识别的层次 (图 26):

- 建模与规定:
一个系统通过定性模型进行描述。这些包含需求、功能、行为或逻辑的系统结构。这些模型具有描述功能，不能被仿真。合适的创建工具包括用于描述语言的图形编辑器，比如基于 UML 的一个扩展功能的 SysML。
- 建模及初始仿真和验证:
这一层次是开发大部分属于定量的可仿真模型，比如合并了多学科的多物理场仿真模型。在这一层次的创建工具包括 LMS Imagine.LabAmesim 和 Matlab/Simulink 等仿真编辑器或者 VHDL、Verilog 或者电子领域的 SystemC。
- 学科特定的建模及详细仿真与验证:
这一层次为学科特定的几何或 CAE 模型，创建工具包括 CAD 系统或学科特定的计算和仿真软件。

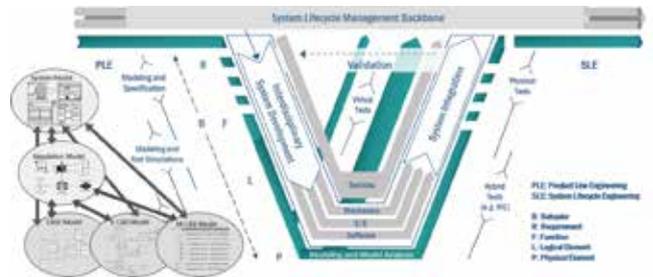


图 26: 用于基于模型的系统工程的扩展 V 模型 (含 SysLM 主干)^[24]

系统模型描述以驱动初始验证的初始简化仿真形式构成了图形表示的基础。在系统模型描述之后就是学科特定的开发，用于系统的物理构件，比如硬件构件或软件代码 (在图 26 中用 P 进行标识)。

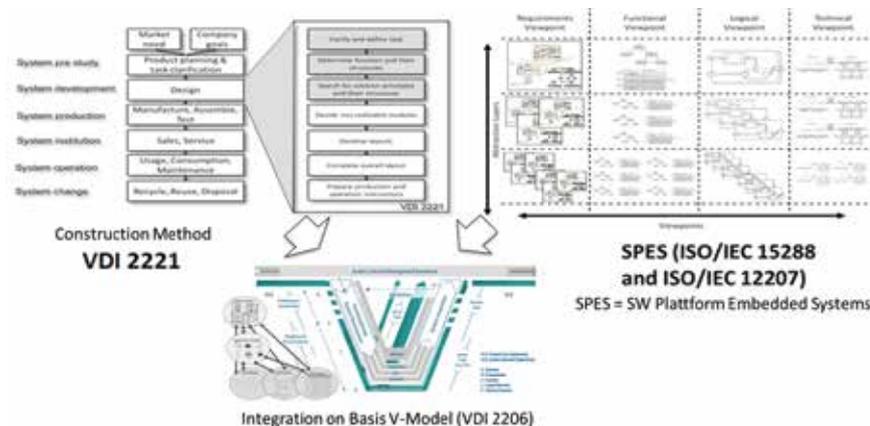


图 25: 将 SPES 与 VDI 2221 结合，创建一个扩展的 V 模型 来源: ^{[25][26]}

⁵mecPro²= 基于模型的网络电子产品及生产系统开发过程

在虚拟产品开发中的 CAx 过程通常从这里开始。最新的 SysLM 解决方案将这一层次作为定位起点。在 PDP 的这一早期阶段，产品结构的最重要的扩展是新的信息元素需求、功能、行为和逻辑系统构件。应该在这里实施简化的工程过程(批准、变更和配置管理)，支持可追溯性。图 27 所示为汽车行业系统架构层次的一个当前应用。

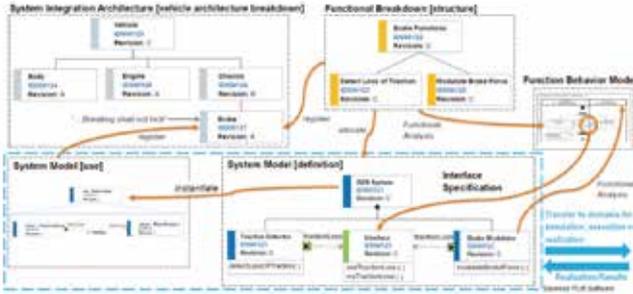


图 27：系统架构、功能分析和系统模型

此外，有些计算机辅助软件工程（CASE）软件提供商还定义了一个新的应用领域，作为现代 SysLM 哲学的竞争者或者扩展，部分原因是他们的需求管理系统和外购的 MBSE 工具。这个新的领域叫作“应用生命周期管理”或者“ALM”。在 mecPro² 项目中，一个通用 PLM 系统的指令被集成到了一个 SysML 系统的指令架构中，而一个 SysML 系统的指令被集成到了一个通用 PLM 系统的指令架构中，采用的方法与将 CAD 合并到 PLM 中的方法类似。将其与 PLM 的原始范围中的母设计数据和 BOM 连接起来，实现了需求、功能、逻辑块和工程物料清单（E-BOM）的一致集成，从而实现了系统生命周期管理最重要的目的之一。

6.5 在产品生命周期后期（下游过程）的基础

6.5.1 闭环制造与集成机电一体化工程

最大的挑战之一是在产品工程、生产计划和实际制造之间使用的系统和过程中的媒介发生中断。一种方法要求以接近于大规模生产的价格为每个客户开发和生产未来的复杂智能产品。

CAx 系统用于开发产品模型，并用这些模型的数据来创建开发和制造 BOM。通过使用数字制造系统，可以用这些数据来开发用于制造的机械、机构和系统，仿真生产和物流，从而形成一个数字过程描述 - 过程清单（BOP）。这些数据可

以连接起来，并且用 SysLM 来更新连接。关于产品结构以及公司机器设备和系统的数据只能用于描述主要程序。要控制机器设备则需要更多的数据。

要做到这一点，就需要将一个订单从订单计划开始的当前需求与技术数据连接起来。此外，还必须用系统特定数据来扩展供应零件，包括系统布局。该任务属于制造执行系统（MES），并且总是要求重复输入和附加处理步骤。

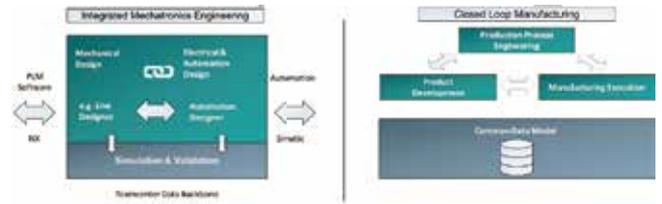


图 28：软件集成与生产之间的相互作用

闭环制造以一个允许数据双向流动的通用数据模型为基础。来自 SysLM 系统的可用数据可以直接用于控制当前生产线，而工程部门可以同步使用生产数据。

工业数字化转型带来的另一个挑战来自于其它媒体和过程中断。智能设施的工程和生产所要求的所有专业学科往往都使用不同的系统和数据模型。机械工程的 3D 模型一般不与电路图兼容。软件开发的行为模型不知道机械和电子工程的细节。

若存在一个仿真模型，则该模型的数据在不经附加处理的情况下不能被其它模型使用。集成机电一体化工程实现了数据与过程的集成，可以创建由一个部件和装配（比如发动机、驱动、阀门、泵等零部件）组成的库。这个库含有所有相关学科的详细信息。由于数据在 SysLM 系统里面集中管理，这些构件可以作为完整零件导入，用于开发机器。

此外，自动化技术也与这一语言兼容，从而可以直接用工程数据来生成 PLC 软件，执行虚拟试车，从而使界面成为多余的东西。此外，公司内部以及与供应商之间的过程和序列也会发生变化。

6.5.2 SysLM、ERP 和 MES 之间的相互作用

现在，系统生命周期管理 (SysLM)、制造执行系统 (MES) 和企业资源计划 (ERP) 往往在企业中起到补充作用。在这里，物料主数据、物料清单和文件构成了实施这些系统的各种业务过程的基础。

现在，很多 ERP 和 SysLM 系统一般只是单向集成，即 SysLM 系统根据产品成熟度将生产数据传输给 ERP 系统。ERP 系统通过生产订单或请求触发一个 MES。

SysLM 系统确保智能连接产品开发阶段的所有技术产品信息，在这方面比 ERP 系统要好得多。在对产品开发和生产工程等职能领域进行跨职能集成方面的过程支持远比 ERP 系统成功。

在今后，还将结合工作和装配计划执行仿真。SysLM 系统里面提供了这些数字信息。在 SysLM 里面而不是在 ERP 系统里面管理工作计划的另一个论据是需要经常将 BOM 重新从工程结构改为一个生产或装配结构。若这是在一个系统里面执行，可以用“视图”来避免冗余，从而简化了上述所有工程变更过程，因为必须在 SysLM 系统里面执行变更。

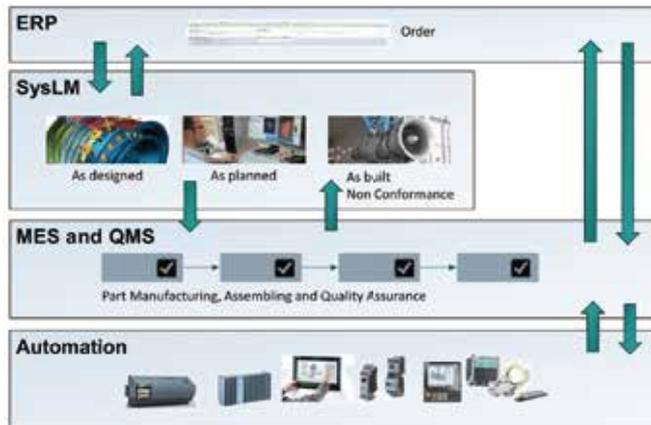


图 29: ERP、SysLM 和 MES 系统之间的相互作用

MES 在 ERP 订单的基础上被并入详细生产计划和控制的业务过程中。产品数据由 SysLM 提供。

因此，MES 显然是重要业务过程的组成部分，必须集成到这些重要业务过程中。未来将会看到在各个职能层次 (SysLM、MES 和 ERP) 与生产、维护、质量和库存管理之间的集成。

ERP 提供商经常把只使用一个单一系统的整体方法视为一个专用数字化企业软件套件的一种替代方法，其反映的核心是 20 世纪 80 年代的 CIM 的指导原则。在当时，业界为了将所

有数据和过程集成到一个全公司数据模型中进行了各种尝试努力。CIM 失败了，原因是该方法缺乏满足各种子系统的不同需求的复杂性和灵活性。现在，一个数字化企业软件套件用一个现代架构来连接信息，支持动态过程 (比如工程中的动态过程)。

6.6 服务生命周期工程

最新的基于互联网的以沟通产品为中心的服务方法往往是生产和运行阶段大数据分析的结果 (见图 4)。第 6.1.3 节将服务的设计作为第四条原则，与机械、电气 / 电子和软件工程一起进行了介绍。这些新的面向服务的业务模型的设计和和实施被称为“服务生命周期工程”，这意味着数字模型被扩展到了服务领域，从而扩展了标准的 SysLM 解决方案。

图 30 以一个装有网络传感器和执行器的农用产品为例，展示了相关的反馈回路。从优化 PDP 的角度，我们会发现哪些部件和系统会导致定性或者功能问题。提供直接连接 SysLM 系统中的技术主数据，设计人员可以在任何时候评估一个不见得错误率。在运行阶段，可以优化维护和备件供应过程，确保高产品 / 系统可用性 (预测性维护)。此外，通过分析由此生成的信息，可以帮助客户优化客户的过程。这两个业务模型都基于所谓的条件监测，即对工况的永久监测。

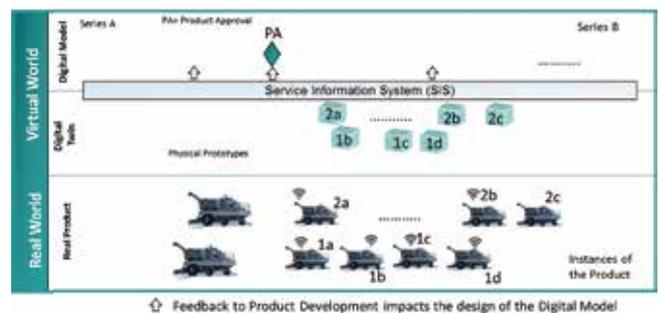


图 30: 基于网络的产品可以将与服务相关的信息发送给开发和服务部门 [VPE]

本例所示为一个遭受严重或者日益频繁损坏的产品 (1b)，导致持续开发数字母模 - 从版次 R1a 到版次 R2a。在这一基础上开发的更换零件安装在产品中，导致数字双胞胎和实际产品中的版次 1c。根据损坏的影响，必须立即或者在下一次检修中翻新与相同设备一起交付的本系列剩余产品。

⁷ 在一个数字产品中，数字“1”代表一个序号，字母代表一个版本

⁸ 在一个数字模型中，数字“1”代表一个版次号，字母代表一个版本

这种反馈回路要求第 4.4 节中描述的类型和实例概念。此外，制造商还必须决定跟踪和记录现实和虚拟世界中的实例，从而实现了对任何部件进行面向服务的分析（图 31）。

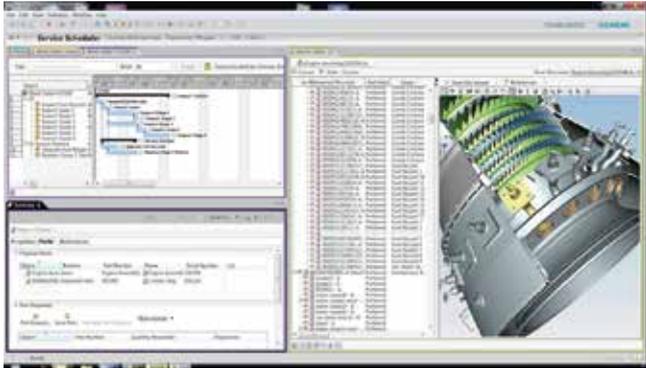


图 31：面向服务、不断更新的部件报告举例

通过这个数据表，就可以显示通过 SysLM 连接的所有信息，比如 3D 图形、BOM 和维护计划等等，从而提供产品及其相关部件的最新静态和动态信息概述，有助于做出正确的开发和服务决策。

6.7 可视化

由于本章讨论的与产品结构相关的要求，比如跨学科性、集成、实例化和全产品生命周期联合，数字产品模型的复杂度达到了工程师日常难以处理的水平，从而导致了接受度问题。批准、变更、配置管理等典型工程过程要求清楚了解哪些对象受这个过程的影响。这里使用了下面两个术语：

- 已配置项 (CI)：
可能会受到一项变更影响的产品结构构件及其相关文件。通常有 50 到 200 个已配置项。
- 受影响项 (AI)：
这些是实际受一项变更影响并且必须变更的构件。

图形是这些复杂结构可视化的一种绝佳方法（图 32）。当然，这要求通过链接分配各种创建和管理系统（TDM、SysLM 和 ERP）（见图 16）。必须用典型的“轻量”格式（TIFF、PDF、JT 等等）在可视化中跟描述用节点链接的文件。

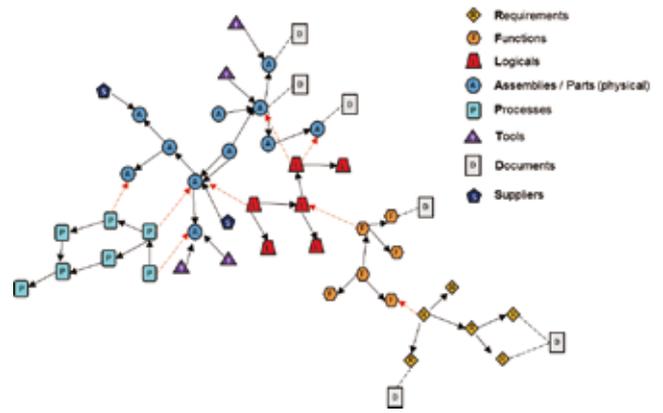


图 32：基于图形的解决方案，用于一个全产品生命周期连接的产品模型，以变更请求中一个受影响项为例 来源：^[37]

7. 未来的过程及 IT 架构

一个支持开发适合于工业 4.0 的产品结构的集成、跨学科、联合 PDP 以产品生命周期各个阶段的各种创建系统为基础。此外，该过程还必须合并各个学科、位置和供应商 – 这些必须通过一个含有一个或两个层级（具体取决于复杂度）的合适架构合并到一个通用产品和过程主干中。这些概念分为德国汽车工业协会（VDA）的一个工作组确定的下列四个层次：

- 创建系统（RM、SysML、MCAD、ECAD、CASE、CAP、CAM、数字工厂、Office 以及计算和仿真系统）
- 团队数据管理（TDM）：这是一个用于管理与创建系统相关并且直接分配给创建系统的信息的管理层次。该层次一般管理创建系统的原生格式。若创建系统的结构简单，可以断开这个层次 – 这被称为直接继承。现在出现了这样一个趋势，即基于现有数据库的创建系统，将创建系统和 TDM 之间的层次合并在一起。
- 工程主干：产品生命周期的核心层次，包含跨学科产品结构以及所有相关文件，主要为中性格式。这形成了面向工程的批准、变更和配置管理系统的基础。这一层次通过 PLM 和 SysLM 系统实施。
- ERP 主干：在大多数情况下由多重本地实例以及在全球配送中往往经过不同调整后的 ERP 系统组成。现在，逻辑以及生产相关的变更和配置管理系统都在这个系统中。

图 33 阐释了从碎片化方法向面向未来的 IT 架构过渡的过程。这一过程考虑了最近几年出现的 IT 解决方案组合。标准的 CASE 工具供应商已经用需求管理 (RM) 和 MBSE 工具扩展了自己的解决方案，这就是所谓的应用生命周期管理 (ALM)。ALM 可以在 TDM 或者主干层次实施。不过，公司以前往往按照“同类中最好”的方法选择这三个功能。服务生命周期管理 (SLM) 直接放在产品生命周期的后期。

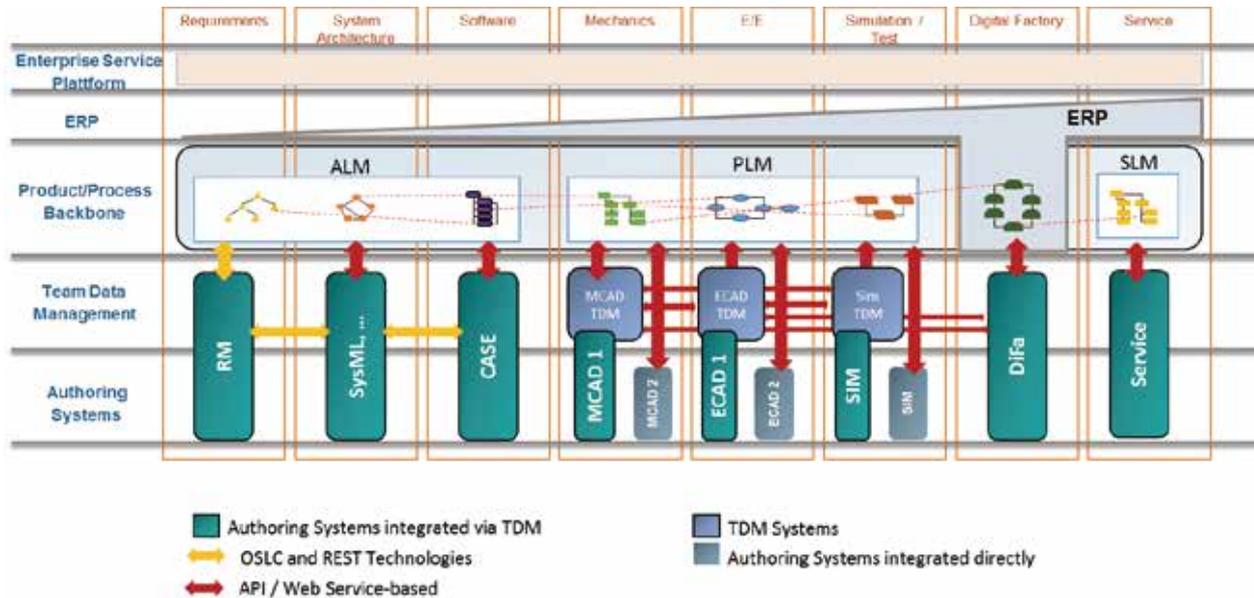


图 33: 架构、ALM、SLM 和 PLM 创建了一个碎片化主干和 ERP

TDM 层次是要集成的各种创建系统的中间层次，管理与创建系统相关的信息，比如原生 RM、SysML、CAD 和 CAE 文件。这意味着只有工程过程绝对必需的产品数据才在工程主干里面管理。在这一层次的可视化使用 TIFF、JT 和 PDF 等中性格式(见图 32)。企业服务平台管理来自运行的反馈数据，管理或援引数字双胞胎的配置。

这一碎片化架构（图 34 中的 a）主干层次的主要问题在于协调 ALM/ SysLM 定义的设计链和 ERP 定义的供应链之间的信息和过程。此外，ERP 系统没有公司调整产品、生产和过程模型所必需的灵活配置选项。这意味着联合过程配置往往以最小公分母为基础。

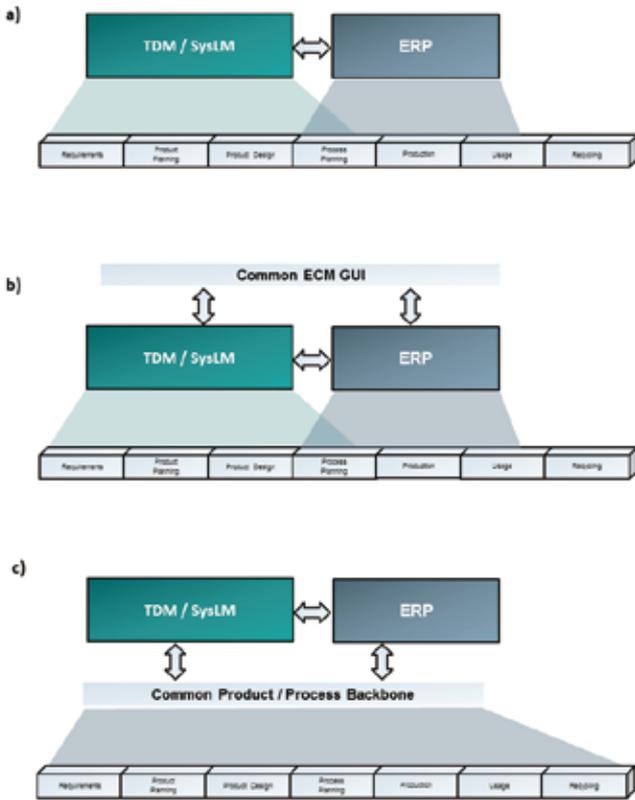


图 34：用于集成设计和供应链的基本替代方案

一个替代解决方案是一个更加具有革命性的解决方案。在这个解决方案中，重叠过程被移到一个层次更高的系统，比如基于企业服务器，带基于模型的嵌入式知识库（图 34 和图 35 中的 b）。这个知识库里面有一个链接，连接从理论上可能受变更或批准影响的所有构件（已配置项）。在这个应用中，可能受到影响的构件会相继向用户显示，并且被交互选择，从而产生一个只显示受该变更影响的构件（受影响项）的情景。基于图形的可视化解决方案（见图 32）和允许外部对象和属性的知识库技术完全可以显示。

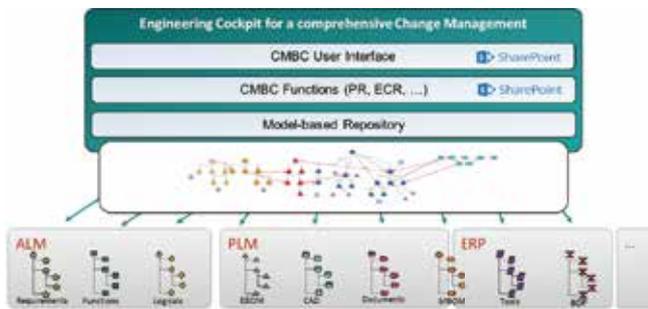


图 35：用于可视化和工程变更实施的相关工程驾驶舱（CMBC = 变更管理主干及控制）.[37]

图一个更加具有革命性的解决方案会将所有应用领域 - ALM、生产计划及生产资源和服务 - 集成到 SysLM 主干里面。这要求有效集成数字工厂系统和 MES。在这一情景中 ERP 将起到执行系统的作用，然后可以在一个通用层次实施所有工程过程。图 36 所示为产品生命周期中所有应用领域的通用 SysLM 主干。创建系统被直接集成或者通过一个 TDM 解决方案集成。主干必须只含有真正相关的数据。SysLM 主干包括 ALM 和 SLM 的管理功能。供应链功能通过一个有效的 MES 实施，与数字工厂和 ERP 系统结合。后者代表该上下文一个纯粹的执行系统。

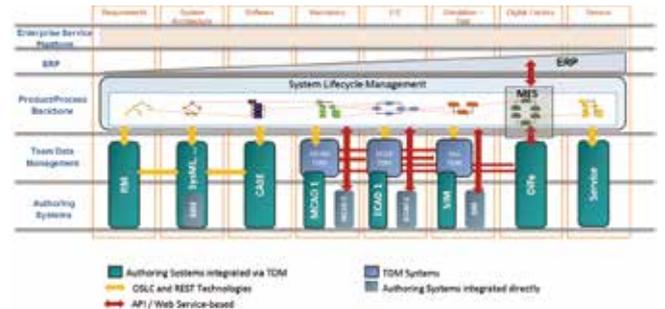


图 36：用于系统生命周期管理的一致主干解决方案

一个一致工程主干的整体架构带来一个问题。网络技术在这里提供了新的视角。自首次推出以来的十多年内，表述性状态传输（REST）一直是最重要的网络应用之一。REST 将变得越来越重要，成为快速发展的标准 OSLC（生命周期协同开放服务）的基础。现在几乎每种开发语言都含有用于开发 REST 网络服务的框架。在今后，图 36 中所示主干解决方案会代表永久数据和通过 OSLC/REST 链接的数据之间的一个妥协。

8. 总结

广泛的智能连接的通信产品系统只是无数创新的开始。这一变革受各种可能性的组合、数字化的基本力量以及产品和系统的通信能力驱动。未来的重心是产品系统，以及产品系统全生命周期中的知识。要在全生命周期（从生命周期早期阶段开始一直到回收）中对其进行全面管理，需要用一個集成系统模型进行跨学科描述。此外，还要求在生命周期所有阶段收集数据。在这里工业 4.0 的各个方面有助于满足必要的技术条件。系统生命周期管理(SysLM)是一个工程主干的关键，实现了对一个产品及系统结构的跨学科、集成和联合描述及管理，将其作为数字模型的一部分。在学术和实业环境中，在这个领域的发展速度非常快。在未来几年中，我们会看到哪些发展趋势将建立牢固低位，被用户广泛接受。这是一个独一无二的机会。现在是发现新思维、消除障碍的好时机。让我们现在开始行动吧！

9. 参考资料

- [1] Eigner, M.: Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung auf einer Plattform für System Lifecycle Management [在一个系统生命周期管理平台上进行基于模型的虚拟产品开发]. In: Sendler, U. (publ.) : Industrie 4.0 - Beherrschung der industriellen Komplexität mit PLM, Springer Verlag, Berlin , 海德堡, 2013 年, 第 91 页 -110 页 (德语) .
- [2] Anderl, R.; Eigner, M.; Sendler, U.; Stark, R. (publ.) : Smart Engineering - Interdisziplinäre Produkt- entstehung, acatech DISKUSSION [智能 - 跨 学 科 产 品 开 发], acatech DISKUSSION, 第 1 版, Springer Vieweg Verlag, Berlin , 海德堡, 2012 年 (德语) .
- [3] Annunziata, M.; Evans, P.: «工业 4.0 - 拓展思维和机器的边界» - 通用电气, 美国康涅狄格州费尔菲尔德, 2012 年。
- [4] Annunziata, M.; Evans, P.: Industrie 4.0 - Eine europäische Perspektive: Neue Horizonte für Minds and Machines [工业 4.0 - 欧洲视角 : 思想和机器的新视野], 通用电气, 美国康涅狄格州费尔菲尔德, 2013 年 (德语) .
- [5] Eigner, M.: Industrie 4.0 - nur Produktionsautomatisierung oder doch mehr? [工业 4.0 - 只是用于自动化生成, 还是有更多用途?], in: Konstruktion- Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur- Werkstoffe, 第 2015 卷, 第 6 期, 第 3 页 (德语) . - ISSN: 0720-5953.
- [6] Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. (publ.) : Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung [基于模型的虚拟产品开发], 第 1 版, Springer Verlag, Berlin, 海德堡, 2014 年 (德语) .
- [7] Tschöpe, S.; Aronska, K.; Nyhuis, P.: Was ist eigentlich Industrie 4.0? - Eine quantitative Datenbankanalyse liefert einen Einblick [什么是 4.0? - 让定量数据库分析告诉你], in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 第 110 卷, 第 3 期, Carl Hanser Verlag, 慕尼黑, 2015 年, 第 145 页 -149 页 (德语) . - ISSN: 0947-0085.
- [8] Weyer, S.; Fischer, S.: Gemeinschaftsprojekt Industrie 4.0 - Fortschritt im Netzwerk [联合项目工业 4.0 - 在网络中的进度], in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 第 110 卷, 第 1-2 期, Carl Hanser Verlag, 慕尼黑, 2015 年, 第 50 页 -53 页 (德语) . - ISSN: 0947-0085.
- [9] Bauer, W.; Herkommer, O.; Schlund, S.: Die Digitalisierung der Wertschöpfung kommt in deutschen Unternehmen an - Industrie 4.0 wird unsere Arbeit verändern [价值创造的数字化已进入德国公司 - 工业 4.0 将如何改变我们的工作方法], in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 第 110 卷, 第 1-2 期, Carl Hanser Verlag, 慕尼黑 2015, 第 68 页 -73 页 (德语) . - ISSN: 0947-0085.
- [10] Eigner, M.; Apostolov, H.; Dickopf, T.; Schäfer, P.; Faist, K.-G.: System Lifecycle Management - am Beispiel einer nachhaltigen Produktentwicklung nach Methoden des Model-Based Systems Engineering [以采用基于模式的系统工程方法的可持续产品开发为例的系统生命周期管理], in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 第 109 卷, 第 11 期, Carl Hanser Verlag, 慕尼黑, 2014 年, 第 853 页 -860 页 (德语) . - ISSN: 0947-0085.
- [11] Ehrler, K.; Meerkamm, H.: Integration versus Spezialisierung - Von der Notwendigkeit einer ganzheitlichen Konstruktionsforschung und Lehre an Universitäten und Hochschulen [集成与专业化 - 大学对设计研究的整体研究及教学的需要], in: Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur- Werkstoffe, 第 2015 卷, 第 9 期 (德语) . - ISSN: 0720-5953.
- [12] Eigner, M.; Schuh, G.; Baessler, E.; Stolz, M.; Steinhilper, R.; Janusz-Renault, G.; Hieber, M.: Management des Produktlebenslaufs [Managing the product lifecycle]. in: Bullinger, H.; Spath, D.; Warnecke H.; Westkämper E.: Handbuch Unternehmensorganisation - Strategien, Planung, Umsetzung. 第 3 版 . Springer, Berlin / 海德堡, 2009 年, 第 223 页 -315 页 (德语) . - ISBN 978-3-540-72136-9.
- [13] Stark, R.; Kim, M.; Damerau, T.; Neumeyer, S.; Vorsatz, T.: Notwendige Voraussetzungen für die Realisierung von Industrie 4.0 - Ein Beitrag aus der Sicht der Industriellen Informationstechnik [实施工业 4.0 的先决条件 - 从工业信息技术角度撰写的一篇文章], in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 第 110 卷, 第 3 期, Carl Hanser Verlag, 慕尼黑, 2015 年, 第 134 页 -141 页 (德语) . - ISSN: 0947-0085.
- [14] Sendler, U. (publ.) : 工业 4.0 - Beherrschung der industriellen Komplexität mit PLM [Industry 4.0 - Mastering industrial complexity with PLM]. Springer Verlag, Berlin , 海德堡, 2013, pp. 1-20 (德语) .
- [15] Porter, M; Heppelmann, J.: Wiesmarte Produkte den Wettbewerb verändern [智能产品如何改变竞争], in: Harvard-Business-Manager - das Wissen der Besten, 第 36 卷, 第 12 期 (2014 年), 第 34 页 -60 页 (德语) . - ISSN: 0945-6570.
- [16] Aurich, J.; Meissner, H.: Entwicklung cybertronischer Produktionssysteme - Vorgehen für einen integrierten Entwicklungsprozess cybertronischer Produkte und Produktionssysteme [开发网络电子生产系统 - 网络电子产品和生产系统的集成开发过程方法]. ZWF 109 (2014) 1-2, 第 70 页 -73 页 (德语) .
- [17] Aurich, J.; Gülsüm, M.: Produkt-Service-Systeme für Werkzeugmaschinenhersteller [为机床制造商定制的产品服务系统], in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 第 110 卷, 第 4 期, Carl Hanser Verlag, 慕尼黑, 2015 年, 第 177 页 -181 页 (德语) . - ISSN: 0947-0085.

- [18] Fischer, J.: Licht ins Dunkle - PLM verstehen heißt Lebenszykluseffekte (er)kennen [黑暗中的亮光 - 为什么说理解 PLM 就意味着认可生命周期的影响], in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 第 110 卷, 第 1-2 期, Carl HanserVerlag, 慕尼黑, 2015 年, 第 36 页 -39 页 (德语). - ISSN: 0947-0085.
- [19] Terzi, S.; Bouras, A.; Dutta, D.; Garetti, M.; Kiritsis, D.: 《产品生命周期管理 - 从历史到新角色》。Int. J. PLM, 4 (2010) 4, 第 360 页 -389 页。
- [20] Eigner, M.; von Hauff, M.; Schäfer, P.: 《可持续的产品生命周期管理》, in: Hesselbach J., Herrmann C. (publ.): 《制造可持续性的全球本土化解决方案》, Springer, 柏林, 海德堡, 2011 年, 第 501 页 -506 页
- [21] Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management- Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management [产品生命周期管理 - 产品开发与产品生命周期管理指南], 第 2 版, Springer Verlag, 柏林, 海德堡, 2009 年 (德语).
- [22] Eigner, M.; Geissen, M.: System Lifecycle Management- am Beispiel einer nachhaltigen Produktentwicklung [以可持续产品开发为例的系统生命周期管理], in: 智能工程 - ProSTEP iViP Symposium 2015 年, 德国斯图加特, 2015 年 5 月 5 日至 6 日, Kessler Druck, Böblingen, 2015 年, 第 48 页 - ISBN: 978-3-981-2226-5-4.
- [23] Paredis, C.: 《为什么要采用基于模型的系统工程 ? - 收益 . 4. PLM 的 未来》 Tagung, Mannheim 2012. [24] Eigner, M.; Faisst, K.-G.; Apostolov, H.; Schäfer, P.: Kurzer Begriff und Nutzen des System Lifecycle Management - im Kontext von Industrie 4.0 mit Industrie 4.0 und Internet der Dinge und Dienste [系统生命周期管理概要及收益 - 在工业 4.0 的上下文中, 工业 4.0 级物联网和服务], in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 第 110 卷, 第 7-8 期, Carl HanserVerlag, 慕尼黑 2015 年, 第 475 页 -478 页 (德语). - ISSN: 0947- 0085.
- [24] Eigner, M.; Faisst, K.-G.; Apostolov, H.; Schäfer, P.: Kurzer Begriff und Nutzen des System Lifecycle Management - im Kontext von Industrie 4.0 mit Industrie 4.0 und Internet der Dinge und Dienste [系统生命周期管理概要及收益 - 在工业 4.0 的上下文中, 工业 4.0 级物联网和服务], in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 第 110 卷, 第 7-8 期, Carl HanserVerlag, 慕尼黑 2015 年, 第 475 页 -478 页 (德语). - ISSN: 0947- 0085.
- [25] mecPro² 产品文件, www.mecpro.de
- [26] Gilz, T.; Eigner, M.: Ansatz zur integrierten Verwendung von PLM Modellen in PLM zur Beschreibung der funktionalen Produktarchitektur [在 PLM 中集成使用 PLM 模型用于描述功能产品结构的方法], in (Maurer, M.; Schulze, S.-O. eds.): Tag des Systems Engineering. Carl HanserVerlag GmbH & Co. KG, 慕尼黑, 2013 年; 第 293 页 -302 页 (德语).
- [27] Pfenning, M.; Muggeo, C.: Die Rolle von MBSE und PLM im Industrie 4.0 [MBSE 和 PLM 在工业 4.0 中的作用], in: Schulze, S.; Muggeo, C. (publ.): Tag des Systems Engineering, HanserVerlag, 慕尼黑, 2015 年, 第 279 页 -287 页 (德语). - ISBN: 978-3-446-44729-5
- [28] Maurer, J.: Safety und Security: Sicherheit bei vernetzten Industrieanlagen [安全: 联网工业设施的安全], Computer Woche, 1.10.2015 (德语)
- [29] Tenor, J.: 《物联网对工程业务的影响, 研究报告, 感知分析》, 2016 年
- [30] Europa Lehrmittel: Technisches Zeichnen, Technische Kommunikation, Grund- und Fachbildung Metall [技术图纸, 技术沟通, 金属的基本及高级教育], 第 9 版, 2006 年 (德语)
- [31] Schichtel, M.: Produktdatenmodellierung in der Praxis [实践中的产品数据建模], HanserVerlag, 慕尼黑, 2002 (德语)
- [32] Zagel, M.: Übergreifendes Konzept zur Strukturierung variantenreicher Produkte und Vorgehensweise zur iterativen Produktstruktur-Optimierung [为迭代产品结构优化构建高变差产品和程序的整体概念], Promotion Lehrstuhl VPE, TU Kaiserslautern, 2006 年 (德语)
- [33] Schuh, G.: Produktkomplexität managen. Strategien-Methoden - Tools [管理产品的复杂性 - 战略 - 方法 - 工具]. Carl HanserFachbuch- Verlag, 2014 (德语)
- [34] Rüssmann, M.; Lorenz, M., Gerbert P. et al.: 《工业 4.0: 制造业生产力和成长的未来》, 波士顿咨询集团, 2015 年
- [35] 图形由 [VDI-Wissensforum] 制作, 由 Gehrke 等人翻译, 2015 年
- [36] Crnkovic, I.; Askund, U.; Dahlqvist, A. P.: 《实施并集成产品数据管理和软件配置管理》, 波士顿: Artech House, 2003 年
- [37] Ernst, J.: Phasen- und Systemübergreifendes Werkzeug zum Management technischer Änderungen [用于管理技术变更的跨阶段和跨系统巩固], Promotion Lehrstuhl VPE, TU Kaiserslautern, 2016 年 (德语)
- [38] Innovation & Results - Plattform und Modulstrategie [创新及成果 - 平台和模块战略] - 2011 年 - <http://www.irman.de/glossar/modularitaet/>
- [39] ID Consult GmbH - Metus 软件 - <https://id-consult.com/metus/metus-software>
- [40] Swisscom - <http://ict.swisscom.ch/wp-content/uploads/2013/03/MCC.png>

关于 Siemens PLM Software

西门子数字化工厂集团旗下机构 Siemens PLM Software 是全球领先的产品生命周期管理 (PLM) 和生产运营管理 (MOM) 软件、系统与服务提供商, 拥有超过 1,500 万套已发售软件, 全球客户数量达 140,000 家。公司总部位于美国德克萨斯州普莱诺市。Siemens PLM Software 与企业客户充分合作, 为其提供领先的行业软件解决方案, 帮助其通过革命性创新获得可持续性竞争优势。欲详细了解 Siemens PLM Software 的产品和服务, 敬请访问:
www.siemens.com/plm。

Siemens Industry Software GmbH Franz-Geuer-Str. 10
50823 Cologne
+49 221 20802-0

奥地利
Siemens Industry Software GmbH Wolfgang-Pauli-Strasse 2
4020 Linz
+43 732 377550

瑞士
Siemens Industry Software AG Freilagerstrasse 40
CH-8047 Zurich
+41 44 755 72 720

© 2016 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 版权所有。Siemens 和 Siemens 标识是西门子股份公司 (Siemens AG) 的注册商标。D-Cubed、Femap、Fibersim、Geolus、GO PLM、I-deas、JT、NX、Parasolid、Solid Edge、Synchrofit、Teamcenter 和 Tecnomatix 是 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 或其分公司在美国和其他国家的品牌或注册商标。本文中提到的所有其它标识、品牌、注册商标或服务品牌均属于其各自的持有人。

61801-A15 01/17 EN