

基于产品家族建立的产品全流程数量闭环模型

赖勇清¹, 江靖¹, 赖晓波¹, 陈可嘉^{2*}

(1.福州数量道信息科技有限公司, 福建 福州 350002; 2.福州大学经济与管理学院, 福建 福州 350108)

摘要: 针对数字孪生理论在工业管理领域应用存在的闭环问题, 本文提出了产品家族理论。产品家族表达产品的组成结构与流动状态, 是数字孪生理论在工业管理领域的重要完善。基于产品家族理论, 我们建立了产品全流程数量闭环模型, 实现了产品在企业全流程各节点的数量闭环, 为工业企业数字化管理提供了理论支撑。模型采用产品 BOM 表达产品结构, 设置产品全流程节点, 将产品数量分布于各节点, 节点数量与 BOM 数量数学闭环。节点间、节点内区间设置实际和虚拟进出存, 母子件虚存数量与母件实存数量闭环。该模型可支持开发全流程工业管理软件, 与产品数量形成闭环, 从而消除数字孤岛。模型弥补了数字孪生理论应用的闭环缺陷, 对于推动工业数字化转型具有一定的启发作用。

关键词: 数字孪生; 产品家族; 产品全流程; 数量闭环模型

中图分类号: F273 **文献标志码:** A

1 引言

随着数字技术不断发展, 特别是云计算的出现, 市场多品种少批量的需求趋势, 工业企业对工业数字化转型的需求, 政府和社会资本也对工业数字化转型给予大力的支持与推动。工业数字化转型与信息化管理、数字化管理阶段要求不同, 不是单流程节点或链接几个节点、单资源的局部数字管理, 而是全流程、全资源、实时、真实的数字管理, 即全流程没有“孤岛”存在, 把现有企业存在的大量存量数字资产转变为有效数字资产, 实

现企业数字资产对市场业务的直接和高效支持。

因此, 工业数字化转型必须要有不产生“孤岛”的工业管理软件支撑, “孤岛”存在的原因是企业资源数字没有闭环, 企业资源数字闭环了, “孤岛”就不存在了。然而, 现有工业管理软件在企业应用中形成了数字“孤岛”, 严重阻碍了工业数字化转型进程。

长期对企业资源数字规律进行分析研究, 在杂乱无序的企业资源数字中发现: 产品数量数字是有规律的, 在企业全流程的各个节点之间和节点内各个区间之间的

* 通信作者: 陈可嘉

产品数量是可以闭环的，并且企业其他资源数字都可以与企业全流程各个节点的产品数量进行闭环连接，实现企业资源数字闭环。基于上述研究，本文提出产品全流程数字管理理论，简称“牛索”，并在此基础上设计产品全流程数量闭环模型。

2 数字孪生在工业管理领域应用的问题

2.1 数据孤岛

数字孪生作为企业数字管理的基本原理，因其表达的产品实物和计算机产品代码之间没有闭环，导致了“孤岛”的产生^[1]。为实现产品的数量闭环，消除“孤岛”，需在数字孪生的基础上建立产品的闭环理论。现有工业管理软件在企业应用形成了一座座数字“孤岛”，“孤岛”的存在严重阻碍了工业数字化转型的进程。为了解决“孤岛”问题，现有方法主要是依靠“需求驱动+IT连接”模式对软件产品进行连接，产生了各种各样的一体化管理软件或平台，例如中台，APaaS，DPaaS等，如图1所示。但用这种“需求驱动+IT连接”模式仅能使“孤岛”渐渐变少，无法一次性消除“孤岛”问题^[2]。工业企业流程内各个节点的业务相对各自独立，要求的专业素质也不同，比如国际贸易生产企业中销售（外语）、技术（工程技术）、生产（资源组织）的人力专业要求完全不同，企业各个流程节点提出的数字需求很难达到一次性完整。即使软件供应商的企业顾问，其业务能力也很难覆盖企业全流程业务，加上恶劣的市场竞争环境，企业要求从产品品种变化到各种资源配置必须动态应对。因此，随着企业需求的不断产生，用“需求驱动+IT连接”模式解决数字“孤岛”问题会随着企业不断的需求提出进行不间断的二次开发，最终变为企业定制开发。因此，政府几年来一直出台各种政策支持和舆情导向，互联网大厂和社会资本也进行了大量投资，但实际效果不佳，出现了“工业数字化转型是政府的强烈要求，但工业企业没有迫切的需求”的怪异现象。

而在“牛索”企业资源管理系统中，企业数字管理平台可通过协调和整合各个管理模块，为整个组织提供无缝的数据和流程连接。如图2所示，通过将企业资源数据与产品全流程管理相结合，企业数字管理平台串联了产品资源管理如全流程数量管理、全流程交期管理等和其他资源管理如财务管理、设备管理等，为整个组织提供无缝的数据和流程连接，从而实现资源数据的闭环

连接，消除信息孤岛问题，并最终确保所有资源和流程的透明度、准确性和效率最大化。

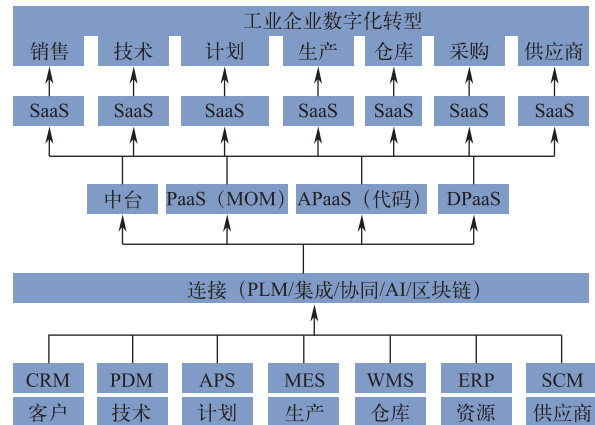


图1 现有软件连接状态

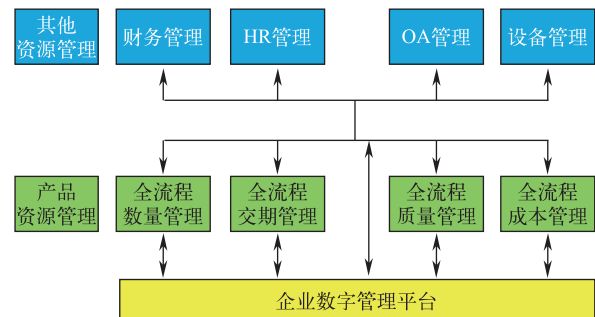


图2 “牛索”企业资源管理系统连接状态

2.2 工业管理领域应用数字孪生原理的缺陷

在信息化与数字化管理的背景下，当前的工业管理软件已能满足企业的信息管理需求。数字孪生技术通过将实体产品转化为计算机中的数字副本来实现映射，尽管这些数字副本并未能彻底捕捉到实体的精确结构。伴随云计算的发展与工业的数字化转型，数字孪生已成为推动工业管理软件发展的关键技术，但基于数字孪生原理开发的工业管理软件产品在企业产品全流程各个节点内的各个区间数字没有闭环，导致了数字孪生是产生“孤岛”的根本原因^[3]。

2.3 企业资源数字主次关系定位不清

在传统的工业管理理论中，企业资源如产品、人力、财务和物资，根据人、财、物、供应、生产和销售的顺序来定位其主从关系。其中，产品资源是企业运营的基石，而人力、财务和物资资源则是为了满足产品流通的需求而被调配。在数字时代，主从关系定位不符合企业资源数字的规律，这导致了工业管理软件开发的混乱。为了

消除信息孤岛并推进工业的数字化转型，首先需要重新确定主从关系，解决产品全流程数字闭环的问题，然后根据产品全流程各个节点产品流动需求闭环连接企业人、财、物的数字实现企业资源数字闭环。

3 技术原理

3.1 产品家族理论

为了解决上述数字孪生的闭环问题，我们提出了产品家族理论。产品家族是指产品 A 映射到计算机中是产品 A BOM,产品 A BOM 由 A 阶 BOM 和 A1 阶 BOM 组成,产品家族表达的产品数据结构见表 1，产品 A 在区间的进、产、出、存流动对应计算机是产品 A BOM 在区间的进、产、出、存流动，因此，产品家族完整真实表达了产品 A 组成结构和流动状态。产品家族区别数字孪生特征是物理世界实物 A 流动对于计算机是 A BOM 流动。从静态看，数字孪生存在实物 A 与计算机 A BOM 的关系,但从动态看，实物 A 仅与计算机 A 关联，与 A BOM 没有关系。而在牛索管理软件中，产品不仅在物理层面上作为一个整体（A）被识别和管理，而且在计算机系统中，通过其详细的 BOM 结构（A BOM）来实现全流程、全生命周期的管理，确保数字信息的完整性和准确性，从而避免数字孤岛现象。

表 1 产品家族表达的产品数据结构

物理世界		计算机信息		
	阶 BOM	产品 A BOM		阶比
产品 A	A 阶 BOM	母件	A	1
		母子件	A1	1
		子件	Z01	2
	B 阶 BOM	母件	A1	1
		母子件	Z02	1
		子件	Z03	2

牛索与 PLM 在管理理念上的对比见表 2，牛索的管理理念基于“数字家族”原理，关注产品及其所有相关部件和变体作为一个整体的全生命周期管理。牛索与 PLM 在管理理念上的主要区别在于 PLM 依托数字孪生原理建立的系统^[4]，通常在特定阶段内实现高度专业化的管理，并依赖于跨 PLM 系统的集成如 ERP、MES 和 APS 等来维持全生命周期的视角，导致其在实践中造成信息孤岛和管理的不连贯性。相比之下，牛索的“数字家族”

原理通过原生集成的方式消除信息孤岛，试图打破部门间的壁垒，实现信息流的统一和效率最大化，实现数据、流程和知识在整个组织内的无缝共享，从而实现一次性完成全生命周期管理，强调整合性和动态管理。

表 2 牛索与 PLM 在管理理念上的对比

	牛索	PLM
理念	产品全生命周期管理	产品全生命周期管理
原理	数字家族	数字孪生
特点	不存在孤岛	存在孤岛
效果	一次性完成数字化转型	需要与 ERP、MES、APS 连接再进行数字化转型

3.2 产品 BOM 与产品全流程

产品是企业的自制品，是工序半成品、成品的总称；同时产品是一种结构，包含了其他自制品和采购物料。产品的 BOM 在计算机系统中以数据表的形式展现，它包含一级或多级 BOM。每一级 BOM 都详细指定了组件、半成品或成品及其数量关系。最顶层的 BOM 指的是产品本身的代码；其中，组件分为自制部件和采购部件，自制部件包括完整产品和半成品，而采购部件指的是外部购买的物料。每一级的比例定义了组件和半成品或成品之间的数量关系。在同一级 BOM 中，一个产品代码仅代表一个唯一元素，用作成品时代表该产品为最终产出，用作半成品时则代表该元素需要进一步加工。产品 BOM 结构见表 3，每个半成品都对应有其自己的 BOM^[5]。

产品 A0 BOM 由母件 A0 阶 BOM、母子件 A11 阶 BOM、母子件 A12 阶 BOM 和母子件 A21 阶 BOM 组成,A0 阶 BOM 的母件是产品 A0 代码,产品 A0 BOM 内各阶 BOM 的母件与母子件或子件的数量由阶比确定，产品 A0 BOM 内各阶 BOM 之间的从属关系是由既是母子件又是母件的 A11、A12 和 A21 来确定的,母件 A11 的数量等于 A0 阶 BOM 母子件 A11 的数量,母件 A12 的数量等于 A0 阶 BOM 母子件 A12 的数量,母件 A21 的数量等于 A11 阶 BOM 母子件 A21 的数量。

产品 A11 的 BOM 包括其自身的阶 BOM 和母子件 A21 的阶 BOM。其中，A11 的顶级母件由 A11 的产品代码表示，而各阶 BOM 内部的数量关系通过阶比来定义。产品 A11 BOM 的层级关系通过充当母子件和母件双重角色的 A21 确定，即 A21 的数量由其在 A11 阶 BOM 中作

为母子件的数量来决定。

产品 A12 BOM 由母件 A12 阶 BOM 组成，A12 阶 BOM 的母件是产品 A12 代码。

产品 A21 BOM 由母件 A21 阶 BOM 组成，A21 阶 BOM 的母件是产品 A21 代码。表中“Z”开头代码为采购物料子件代码。

表 3 产品 BOM 结构

产品 A0 BOM					产品 A11 BOM				产品 A12 BOM				产品 A21 BOM			
	产出 代码	投料 代码	阶 比	数量	产出 代码	投料 代码	阶 比	数量	产出 代码	投料代 码	阶 比	数量	产出 代码	投料 代码	阶 比	数量
A10 阶 BOM	母件	A0		1	100											
	母子件		A11	1	100											
	母子件		A12	2	200											
	子件		Z01	2	200											
A11 阶 BOM	母件	A11		1	100	A11		1	100							
	母子件		A21	2	200		A21	2	200							
	子件		Z02	2	200		Z02	2	200							
A21 阶 BOM	母件	A12		1	200				A12			1	200			
	子件									Z03		1	200			
	子件									Z04		2	400			
A21 阶 BOM	母件	A21		1	200	A21		1	200				A21		1	200
	子件		Z02	2	400		Z02	2	400					Z02	2	400
	子件		Z05	5	1000		Z05	5	1000					Z05	5	1000
	子件		Z06	1	200		Z06	1	200					Z06	1	200

产品全流程是为了支持产品 BOM 在生产和服务中的流动而设立的一系列步骤，每个 BOM 阶段都对应于全流程中的一个特定节点。以 A0 产品为例，其物料清单内的 A0 阶 BOM、A11 阶 BOM、A12 阶 BOM 和 A21 阶 BOM 分别对应于 A0 全流程的 A0 节点、A11 节点、A12 节点和 A21 节点，这些节点共同构成了 A0 产品的全流程。产品全流程不仅包括各道生产工序，还包括企业与产品相关的业务部门，比如，订单产品全流程：业务 - 技术 - 计划 - 采购 - 仓库 - 生产 - 业务^[6]。

产品全流程的数字化维度包括数量、交期、质量和成本，其中产品全流程数量数字是其他产品全流程数字的基础。产品 BOM 内各阶 BOM 的母件、母子件和子件数量分布在产品全流程内各个对应节点的数量称为产品全流程数量，每个节点的数量称为产品全流程节点

数量^[7]。

3.3 企业全流程数字管理平台

牛索产品从根本上解决了数字孤岛问题，在全流程数量闭环模型的基础上直接建立起全流程工业管理平台。如图 3 所示，与现有市场工业管理产品采用的基于 ERP、MOM 或供应链管理等系统的架构相比，牛索工业管理产品通过将产品数量在企业全流程各个节点的闭环管理实现，确保了数据和流程的无缝对接，从而一次性完成企业的数字化转型。在牛索工业管理产品平台中，数字家族和企业资源流程关系模型直接搭建产品全流程数量闭环模型，相关的资源数据直接传输到 PaaS 上。企业资源管理系统不仅与企业内部的各个业务单元相连接，而且还与工业智能数据管理平台紧密集成，形成原生集成和柔性集成。



图3 企业全流程数字管理平台与现有方法对比

4 模型建立

4.1 企业资源流程关系模型

在确定了产品全流程后，在产品全流程的每个节点上按照产品流动需求配置人力、物力、财力资源。如图4所示，产品BOM内各阶BOM内和阶BOM与阶的母件、

母子件、子件之间的数量关系由公式确定，产品全流程节点数量与产品BOM对应阶数量是由数学等式闭环连接的，因此，产品全流程数量闭环连接，同时与产品全流程上各个节点数量连接的其他资源流程数字也与产品全流程数量闭环连接。

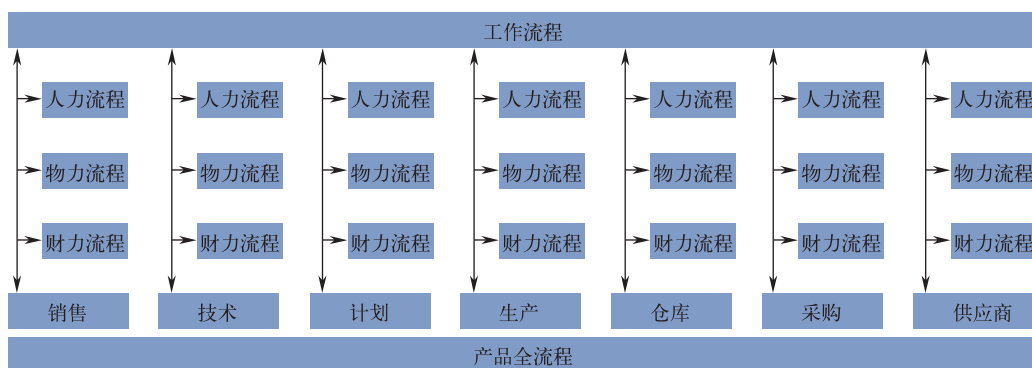


图4 企业资源流程的关系模型

4.2 产品全流程数量闭环模型

基于产品家族和企业资源流程的关系模型，建立产品全流程数量闭环模型。具体分为以下5步实施。

1) 基于产品BOM，建立产品全流程的节点并计算整个流程的数量。产品A0的BOM包含A0阶BOM，A11阶BOM，A12阶BOM及A21阶BOM，这些阶BOM分别对应于A0全流程中的A0节点、A11节点、A12节点和A21节点，同时确定了各节点的具体数量。

2) 产品全流程的每个节点对应设置实进、虚进、实产、虚产、实出、虚出、实存和虚存8个区间，产品BOM的第一阶母件产品代码的数量存在实区间，产品BOM其他

产品代码的数量存在虚区间，如：A0阶BOM的母件A0的数量存在实区间，其他各阶的母子件代码A11、A12、A21和各阶子件代码的数量存在虚区间；A11阶BOM的母件A11的数量存在实区间，其他各阶的母子件代码A21和各阶子件代码的数量存在虚区间；A12阶BOM的母件A12的数量存在实区间，其子件代码的数量存在虚区间；A21阶BOM的母件A21的数量存在实区间，其子件代码的数量存在虚区间。

3) 确定实进、虚进、实产、虚产、实出、虚出、实存和虚存8个区间之间的数量关系。

母件：实存 = 实产 - 实出

母子件 / 子件：实存 = 实进 - 实产 - 实出

母子件 / 子件：虚存 = 虚进 + 虚产 - 虚出

4) 产品在产品全流程各个节点内流动和存储按照产品家族的原理在产品全流程各个节点内区间进行进、产、出、存流动和存储。

产品 A0 的数量与产品 BOM 内的各阶 BOM 的母件、母子件、子件之间的数量关系是通过数学公式闭环连接的，产品 BOM 内各个阶 BOM 的数量与产品全流程各个节点数量是数学等式闭环连接的，产品全流程各个节点之间与节点内各区间之间的产品流动和存储是按照产品家族原理流动和存储的；因此，产品全流程数量模型内的产品全流程数量是闭环的。

产品全流程数量流转详细图示如图 5 所示，更详细

代码类别	母件	子件/ 阶比	需求 数	实进	虚进	实产	虚产	实出	虚出	实存	虚存	实进	虚进	实产	虚产	实出	虚出	实存	虚存	实进	虚进	实产	虚产	实出	虚出	实存	虚存	实进	虚进	实产	虚产	实出	虚出	实存	虚存	总存
母件	A1	1	100																																	
母子件		A11 1	100																																	
母子件		A12 2	200																																	
母件	A11	1	100																																	
母子件		A111 2	200																																	
子件		B11 2	200																																	
母件	A12	1	200																																	
母子件		A121 1	200																																	
子件		B12 2	400																																	
母件	A111	1	200																																	
子件		B11 2	400	400																																
子件		B12 1	200	200																																
母件	A121	1	200																																	
子件		B12 1	200	200																																
子件		B13 2	400	400																																

图 5 产品全流程数量流转详细图示

5 结束语

本文提出的基于产品家族理论的产品全流程数量闭环模型，为工业管理软件开发开辟了新思路。模型理论可以开发出覆盖产品全生命周期的数字管理平台，在此平台上进一步开发多种工业管理软件，这对于各种工业企业来说是一种广泛的应用，有助于推进工业的数字化转型。为工业智能制造、工业物联网和工业互联网的构建提供了基础的平台支持。基于此理论的指导，在未来可能建立一个针对客户需求的新数字生态体系。产品家族理论是数字孪生理论在工业管理领域的重要发展与完善。基于产品家族理论建立的产品全流程数量闭环模型，实现了产品数量的闭环，消除了数字孤岛，为工业企业的数字化转型提供了理论支撑。

参考文献

[1] 王雷，韩磊杰. 企业数字化转型中的逻辑性数据孤岛

地解释了牛索产品全流程数量流转的原理。其中产品被分解成不同的组件和子组件，每个组件都有一个对应的 BOM，这个 BOM 详细列出了生产该组件所需的物料和数量。箭头显示了物料从一个阶段到另一个阶段的流向，指示了半成品和成品在不同阶段间的移动。由表格可知牛索工业管理产品运用了数字孪生的原理，保证了生产的各个环节都在数量上保持闭环，即任何时候都能准确地知道每个组件在生产过程中的位置和状态。这样可以提高效率，减少浪费，并且在需要时快速响应变化。与传统的工业管理软件相比，牛索的模型可以更好地支持动态变化和复杂产品的管理需求，从而使整个生产过程更加透明和可控。

- 破解机制研究[J]. 改革与开放, 2022(10): 57-64.
- [2] 李巍巍. 数据中台技术在业务系统中的应用研究[J]. 现代信息科技, 2019, 3(21): 108-110.
- [3] 孟刚, 李昭昶, 郭慧, 等. 大数据与数字孪生驱动的智慧校园集成设计研究[J]. 包装工程, 2023, 44(18): 458-466.
- [4] 郎为民, 田尚保, 李宇鸽, 等. 数字孪生的前世今生[J]. 电信快报, 2022(7): 1-3, 9.
- [5] 刘根娣, 阎森, 贵丽, 等. 基于“塔形”BOM 架构的个性化价值链统一数据模型构建[J]. 智能制造, 2023(5): 119-127.
- [6] 孙翠云, 王凯, 张伟, 等. 基于产品设计生产全流程成本管控实践[J]. 航天工业管理, 2023(10): 57-61.
- [7] 赖勇清. 一种区间的物料信息的数据模型及建立方法: CN109165889B[P]. 2022-01-14.

收稿日期: 2024-05-14