“流”、流程网络与耗散结构 ——关于流程制造型制造流程物理系统的认识

殷瑞钰*

钢铁研究总院, 北京 100081

* E-mail: htshgfq@gmail.com

收稿日期: 2017-10-27; 接受日期: 2018-01-08; 网络版发表日期: 2018-01-26

中国工程科技中长期发展战略研究基金(编号: 2018ZCQ03)资助项目

摘要 对于实施流程制造业工厂的智能化而言, 深入认识其物理系统的本构特征和动态运行的物理本质与机理并使之优化, 是一个重要方面. 流程型制造流程是一种复杂的工程系统, 是由若干相关的但又异质、异构的自复制制造(工艺)单元组成的, 且自复制制造(工艺)单元之间是在一定的运行规则约束下联网运行的. 流程制造业制造流程动态运行过程的物理本质可以表述为: 物质流在能量流的驱动和作用下, 按照设定的“程序”, 沿着特定的“流程网络”作动态-有序的运行, 本质上是一类在耗散结构中动态运行的耗散过程, 并要求实现多目标优化. 作为制造流程动态运行框架的耗散结构的工程化模型是由三类不同形式的结构化机制经过综合集成而构建出来的, 即具有不同过程之间多尺度嵌套性的层次结构和上下游工序/装置间衔接-匹配的链接结构以及整体协同的网络结构. 流程型制造流程物理系统优化的核心思想是要设计、构建一个优化了的耗散结构实体, 要特别重视理清流程型制造流程的顶层概念架构(耗散结构和耗散过程), 确立制造流程运行的本质观念以及物质流网络、能量流网络、信息流网络(“三网”)融合的概念, 这对推动流程制造业的智能化具有科学导向性的意义.

关键词 “流”, 流程网络, 耗散结构, 物理系统, 智能化

1 引言

流程制造业工厂智能化的目标是要构建一个数字物理融合系统, 以一揽子地解决包括生产制造、经营服务、战略管理、环境友好、循环生态等命题在内的各类流程制造型工厂的全局性、战略性、综合集成性命题. 对于实施流程制造业工厂的智能化而言, 深入认识其物理系统的本构特征和动态运行的物理本质与机

理并使之优化, 是一个重要方面.

2 关于流程型制造与离散型制造比较

一般而言, 制造业主要可以划分为流程型制造业和离散型制造业两大类.

以机械制造为代表的离散型制造过程中, 各类机械的零件、部件及其运动都可以用三维模型来描述.

引用格式: 殷瑞钰. “流”、流程网络与耗散结构——关于流程制造型制造流程物理系统的认识. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 136–142
Yin R Y. “Flow”, flow network and dissipative structure——Understanding of the physical system of manufacturing process of process manufacturing type (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 136–142, doi: [10.1360/N092017-00368](https://doi.org/10.1360/N092017-00368)

离散制造过程, 尤其是加工、组装、运行过程一般只发生几何形状和时/空变化, 而很少发生物理、化学和生物性质变化; 描述多个部件的运动关系, 计算量也往往只是部件数量的线性或指数关系. 所以, 只要计算机的能力足够强, 算法得当, 离散型制造的加工过程、运动过程的物理机制和模型就较易数字化、网络化, 这是离散型制造较易智能化的重要原因. 在方法论上, 离散型制造往往是以还原论为主导的.

流程型制造(例如化工、冶金、建材等工业)的制造流程(过程)是以在制造流程的时-空边界内发生物质-能量的流动/流变的过程为特征的, 既有时/空、几何形状变化, 又有涉及物理-化学变化的状态、成分、性质变化, 其中工艺参数众多而又互相关联、互相作用、互相制约, 属于开放复杂系统, 不少事物难以有确定的数字解, 难于数字化. 因此, 必须深入理解制造流程的本构性特征及其动态运行的物理本质和机理, 必须认识到异质-异构工序/装置(节点)之间的非线性相互作用和动态耦合的关键参数, 必须充分理解制造流程动态-有序、协同-连续运行过程中的耗散过程和耗散结构. 因此, 构建流程型制造的智能制造系统, 必须注意既要数字信息一侧推进, 又要物理系统优化一侧推进, 才能理清思路, 事半功倍. 在方法上看, 是整体论主导下的整体论与还原论的结合.

3 关于流程型制造流程的认识

制造流程是一类工程系统, 具有物理实在性. 制造流程是一系列相关的、异质的物理或化学过程的集合, 又是这些过程之间的跨尺度嵌套-耦合体系. 制造

流程的特征之一是具有物质流、能量流、信息流输入/输出的开放物理系统^[1,2]. 这个开放的、非平衡的实体系统得以持续运行的根本驱动力是负熵流的持续输入^[3].

在开放的物理系统中, 负熵流来自于物质流、能量流、信息流的持续输入.

研究制造流程的学问是流程工程学, 其理论基础将涉及物理学、化学、专业工程学、信息工程学、系统科学、生态学和工程哲学等相关学科.

4 流程型制造流程的本构特征

概要地说, 制造流程的本构特征是指流程工业制造系统的构成、内涵、信息和宏观性质的反映. 可以归纳如下.

1) 制造流程是一种开放复杂的工程系统, 流程由若干相关的但又异质、异构的自复制制造(工艺)单元组成(图1和2).

2) 自复制制造(工艺)单元分别以间歇运行、连续/准连续运行等不同方式运行, 并各自都有物理输入/输出, 且存在着相互互联网运行的现象.

3) 制造流程不是各个自复制制造单元简单/随机相加而成, 自复制制造(工艺)单元之间的联网是由链接单元以“界面”技术的形式出现^[4].

$$S=f(A_1+\sim_1+A_2+\sim_2+A_3+\sim_3+\dots+A_n),$$

$$S=f(A, \sim),$$

$$S\neq f(\sum A),$$

式中, S是制造流程; A是自复制制造单元(工序/装置);

图1 制造流程内不同层次的非线性相互作用

~是“界面”技术。

“界面”技术应体现动态-有序、协同-连续的运行特征，“界面”技术既有“硬件”，又有“软件”；以钢铁制造流程为例(图3)。

4) 制造流程联网运行应在一定的运行规则约束下进行，运行规则是运行软件的重要组成部分。

5) 集成联网、动态运行的制造流程(不同层次的、过程群的集成系统)应遵循耗散结构中流动的耗散过程优化的原则。

可见，流程型制造流程的本构性特征是以整体论为主导，通过各个自复制单元和它们之间“界面”技术的整体性优化、联网结构优化、动态运行过程优化，实现制造流程功能的多目标优化。

5 制造流程的内在物理特征——自组织性和他组织力

流程制造业的“根”是制造流程(生产流程)。

实体性制造流程是为了实现特定的功能目标而构建的，一般是由相互关联而又异质-异构的工序/装置(子系统，这个子系统本身也具有下一层级的整体属性)和相互之间的“界面”技术在设定的时-空边界内，通过特定的信息系统动态地集成构建起来的结构优化

整体系统。其中，物理系统是主体(本体)，数字(信息)是灵魂，但数字系统不能替代物理系统，在流程制造业的制造流程中，数字(信息)依附于物理系统。

制造流程的动态运行过程是开放性的、非平衡的，属于在一个耗散结构内运动的耗散过程，为了优化流程运行的耗散过程，流程系统的运行状态应是动态-有序、协同-连续/准连续的。主导形成流程结构的“序”以及流程运行的“序”是来源于制造流程内部结构及其相关信息，因而必须认识到制造流程本身具有自组织性^[4]。制造流程的自组织性来自于流程内相关工序/装置的功能序、空间序和时间序的合理配置和集成组合。制造流程自组织力的强弱取决于制造流程系统内工序功能集的解析-优化，工序之间相互作用关系集的协同-优化和流程内工序集合的重构-优化。

然而，有自组织性的系统未必有完全合理的自组织结构，在其运行时也未必有很强的自组织力，从而影响到耗散过程的优劣；为了优化流程系统的耗散过程(例如生产过程的效率、生产过程的稳定性等)，往往需要外界的帮助、支持、调控(例如进行技术改造、加强管理调控手段、全局性的信息化调控支持等)，这种来自制造流程物理系统外的帮助、支持、调控手段是他组织力。因此，流程型制造流程的设计过程和运行过程，体现了制造流程的自组织性、自组织力

图2 制造流程的概念与要素示意图

图3 钢铁制造流程中的“界面”技术

和他组织力. 当今而言, 流程工业的制造流程这一物理系统的本质性结构优化和融入强有力的信息化手段(包括人工智能等)是流程工业绿色化、智能化发展的关键和共性特征.

6 制造流程的物理系统及其动态运行过程的物理本质

流程制造业(化工、冶金、建材等)制造流程动态运行过程的物理本质可以表述为: 物质流(对钢厂而言主要是铁素流)在能量流(长期以来主要是碳素流)的驱动和作用下, 按照设定的“程序”(例如生产作业指令等), 沿着特定的“流程网络”(例如总平面图等)作动态-有序的运行, 并实现多目标优化(不只是生产产品)^[5,6], 其工程化模型的结构性机理如下.

1) 流程型制造流程的运行机理是在一个开放系统中物质、能量和信息在特定的时-空边界内流动/流变的过程, 确切地说是在特定耗散结构内流动/流变的耗散过程. 流程系统结构中的每一节点(工序/装置)都是有物理输入/输出的, 从而体现出流动/流变, 节点与节点之间是可以不同方式的“界面”技术连成物质流/能量流/信息流网络——“三网”, 并通过发生不同的非线性相互作用实现动态耦合.

2) 流程型制造流程是一个复杂的工程实体系统,

其动态运行的物理机制表明, 它是在一个人工构建的耗散结构内运行的耗散过程. 作为制造流程动态运行框架的耗散结构是由三类不同形式的结构化机制经过综合集成而构建出来的: (1) 具有不同过程之间多尺度嵌套性的层次结构(纵向集成性), 即从原子/分子层次-工序/装置层次-制造流程层次之间不同类型过程的多尺度嵌套性动态运行集成结构(图4). (2) 上下游工序/装置间衔接-匹配的链接结构(横向集成性)(图5). (3) 整体协同运行的网络结构(包括静态网络框架、动态运行路线)的集成优化(图6).

流程型制造流程动态运行的物质流、能量流、信息流在与之相应的“三网”中相互关联并协同运行, 实现在特定环境条件下的耗散过程优化——过程耗散“最小化”. “三流”、“三网”协同优化是实现多目标综合优化的有效路径.

3) 制造流程物理系统宏观运行的要素: 流、流程网络、运行程序.

“流”体现为物质流、能量流、信息流三种“流”, 也就是三类“矢量”. 具体体现为异质/异构的相关工序/装置(节点)的物理输入/输出, 不同节点之间是相互关联/非线性耦合的, 为了形成“流”, 必须通过“三网”, 也就是必然需要“界面”技术/关联耦合.

对制造流程而言, 物质流网络是“本”, 与之关联的还有能量流网络、信息流网络; 工程设计固定了制造

图4 流程型制造流程内不同过程之间多尺度嵌套性的层次结构

图 5 流程型制造流程中上下游工序/装置间衔接-匹配的链接结构

图 6 流程型制造流程动态协同运行的网络结构

流程的静态网络框架(其中包括了“界面”技术),生产运行过程的计划指令决定了动态运行路线;流程网络是“流”(矢量)运行的时-空边界和体现自组织性的关联纽带。

运行程序是制造流程内在自组织性与外部他组织力结合和体现;“三流”的运行程序都具有层次性、结构关联性和综合集成性。

4) 制造流程(物理系统)结构优化要通过:工序/装置(节点)的功能、容量和数量优化;工序/装置(节点)间“界面”技术优化;全流程网络简捷化,协同推进,并实现物质流/能量流/信息流三个网络协同优化.这将引起工程设计理论和方法的革新。

5) 制造流程物理系统的功能定位:就钢铁工业而言,要从“钢铁产品制造”一个功能拓展到“钢铁产品制造、能源高效转换、废弃物消纳处理与再资源化”三个功能,体现时代性命题,即市场竞争力和可持续发展力。

7 流程制造业的制造流程构建、运行过程中的哲学思维

流程制造业的制造流程是由原子/分子层级的过程、工序/装置层级的过程、流程/工厂层级上的过程互相嵌套组合,通过非线性相互作用-动态耦合、网络化、结构化等集成协同机制构建而成的.体现着整体

论思维和还原论思维的结合,然而是以整体集成思维为导向的。

流程制造业的制造流程的本性是整体流动和转化.可谓一切皆“流”、一切皆“动”、一切皆“变”.这种“流”、“动”、“变”都是整体性的。

一切事物都是在不同状态、不同形式、不同时-空尺度上的流动/流变事物.此处,“流”是“名词”的涵义;一切事物都是“动”的,在不同结构内、不同网络中、不同状态下以“矢量”的形式“动”。“动”是“动词”。

一切事物都是在随“流”而“动”的过程中发生变化,“变”可以是随机的,也可以是受控的.随机的“变”一般是混沌状态,受控的“变”源于外界输入的“他组织力”与制造流程本身的“自组织性”的结合。

可以看出,“流”乃整体论观念的本根,“流”者必“动”,“动”者开放,开放过程生“变”。

为了实现动态有序、协同连续地运行,要高度重视“流”-“流程网络”-“运行程序”之间的逻辑关系.其中渗透着“关系实在论”的思维,即认为对事物整体运动而言,具有实在性的不是个体对象、局部过程,而是对象(工序、装置、过程、时-空等)之间的关系网络.由此,应认识到流程制造业制造流程运行的要素实际上是“流”、“流程网络”和“运行程序”。

构成“关系实在论”的基础是工序功能集的解析优化、工序之间关系集的协同优化和制造流程中工序集合的重构优化.同时,其中也体现出了制造流程的集

成、进化机制。

制造流程集成、进化的吸引子是形成合理的耗散结构, 追求耗散过程优化和耗散“最小化”。耗散“最小化”突出地体现在能量耗散最小化, 相应也将关联到物质、时间、空间、信息等因素。

对于流程型制造流程的智能化而言, 制造流程是“根”, 物理系统是“本”, 数字信息则是“魂”的体现。“魂”要附“本”连“根”。

要合理认识规律、机制、数字与建模的关系。

模型应该源于规律, 而规律取决于事物运动过程中一系列物理、化学、生物等转化机制; 规律也可以在一定条件下用数学(数字)来归纳、表达; 但在缺乏深入了解物理机制的前提下, 事物的规律未必能仅从数字的追溯、统计、分析、归纳中求得。规律的实质是一系列机制在动态演化过程中形成的。在实践中, 数据反映的是表象性相关或表象性因果关系, 大数据具有感知、分析、评价功能, 但由于在实践背景中存在“噪音”干扰等原因, 不一定能直接推导出足够有效的、可靠的模型。

在制造流程系统中, 运动机理包括了不同制造单元装置的各种运行机理, 也包括了各类制造单元装置之间非线性相互作用-动态耦合的机理(如“界面”技术), 特别是还包括了制造流程作为整体的动态-有序、协同-连续运行的协同集成机理。

植根于动态运行机理的物理模型和源自于大数据统计归纳的数学模型在映射事物的真实性效果上有时是会有所不同的。对工程实体系统的运行和调控而言, 首选还应是查明该物理系统尽可能确切的物理、化学、生物等机制, 只有在物理、化学、生物等机制难以确定时, 再采用数据统计、分析、归纳基础上的数

据模型。然而, 大数据建模中有可能混入“噪音”干扰, 应设法合理地排除, 以免影响所建立模型映射的真实性。

8 流程制造业智能化的认识思路

为了达成信息化和工业化融合, 对于研究流程型制造流程物理系统的冶金、化工、建材等方面的专业人士, 要在理解制造流程系统的本构特征的基础上, 深入思考物理系统的耗散结构和耗散过程及其优化的命题。对于研究制造流程数字化、网络化、智能化等方面的专业人士, 要高度重视与制造流程物理系统工程特征相关的建模、编程、人工智能等他组织力命题的研究。在此基础上, 相向而行, 有效融合, 实现物质流/能量流/信息流(即“三流”)以及物质流网络/能量流网络/信息流网络(即“三网”)之间的相互协同、融合。

流程型制造流程物理系统的优化犹如构筑一个合理的物质流、能量流渠道及其网络, 其核心思想是要设计、构建一个优化了的耗散结构实体。数字化、网络化、信息化犹如灌溉之水, 利用一切相关的数字化、网络化、人工智能等手段, 使之注入优化了的耗散结构实体之中, 以水到渠成之势(而不是大水漫灌), 形成具有自感知、自决策、自执行、自适应的动态-有序、协同-连续运行的、有效服务的智能化制造流程。为了促进流程制造业工厂智能化的发展进程, 要特别重视理清流程型制造流程的顶层概念架构(耗散结构和耗散过程), 确立制造流程的本质观念以及物质流网络、能量流网络、信息流网络(“三网”)融合的概念, 这对推动流程制造业的智能化具有科学导向性的意义。

补充材料

本文的补充材料见网络版techcn.scichina.com。补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责。

参考文献

- 1 殷瑞钰. 冶金流程集成理论与方法. 北京: 冶金工业出版社, 2013. 29–33
- 2 Yin R Y. Theory and Methods of Metallurgical Process Integration. San Diego: Academic Press, Elsevier Inc.; Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016. 27–30
- 3 Nicolis G, Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1977. 24–25
- 4 殷瑞钰. 关于智能化钢厂的讨论——从物理系统一侧出发讨论钢厂智能化. 钢铁, 2017, 52: 1–12

5 殷瑞钰. 冶金流程工程学. 第2版. 北京: 冶金工业出版社, 2009. 98–102

6 Yin R Y. Metallurgical Process Engineering. Beijing: Metallurgical Industry Press; Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. 70–73

“Flow”, flow network and dissipative structure ——Understanding of the physical system of manufacturing process of process manufacturing type

YIN RuiYu

Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China

Better understanding of the constitutive characteristics of the physical system, as well as the physical nature and mechanism of the dynamic operation is of importance for the intelligentization of process manufacturing industries. The manufacturing process of the process manufacturing type is a complicated engineering system, consisting of several self-replicable manufacturing process units, which are related but heterogeneous and isomerized. These self-replicable manufacturing units jointly operate under the constraint of certain rules within a network. The physical nature of the dynamic operation of the manufacturing process of the process manufacturing type can be expressed as follows: Under the motivation and action of energy flow, the mass flow dynamic-orderly runs with a specific “flow network” according to a specific “program”. Essentially, it is a dissipation process that runs dynamically in a dissipative structure, with a requirement of multi-objective optimization. As the framework of dynamic operation of the manufacturing process, the engineering model of the dissipative structure is constructed by the integration of three types of structured mechanisms, i.e. the hierarchical structure with multiscale nestedness among various processes, the linking structure with consistency between upstream and downstream processes/devices, and the network structure with integral synergy. The core concept for the optimization of the manufacturing process of the process manufacturing type is to design and establish an optimized entity of a dissipative structure, with particular emphasis on the clear understanding of the top conceptual framework (dissipative structure and dissipation process) of the manufacturing process of the process manufacturing type, as well as the establishment of the combination concept of essential concepts of manufacturing process operation and “three-network” (mass flow network, energy flow network and information flow network). This is of scientific guiding significance for the intelligentization of process manufacturing industries.

flow, flow network, dissipative structure, physical system, intelligentization

doi: [10.1360/N092017-00368](https://doi.org/10.1360/N092017-00368)