

流程型制造业与流程工程学

Process Manufacturing and Process Engineering

供稿|冯凯 / FENG Kai

内 容 导 读

在日常生活中，小到水杯、签字笔，大到飞机、轮船，任何工业产品都是自然资源和物质经过几百道工序加工而成的。在这个过程中，流程型制造业的加工占有相当大的比重。流程型制造业作为整个工业体系的核心部分，由于其加工过程存在大量物理变化和化学变化，决定了其与离散型制造业不同的运行规律和本质特征，进而决定了需要一套相应的理论和方法进行解构和分析，这就是流程工程学。流程工程学是将生产流程整体作为研究对象，以系统优化为目的，提供新思路、新方法的学科。

谈到流程型制造业，不关注工业发展和演变的人会有稍许陌生。其实，随着近几年国家对工业体系的梳理，已经正式废除了重工业、轻工业的划分模式，转而在流程型制造业和离散型制造业来进行分类。其中，流程型制造业就是流程工业，也称为过程工业。

国民经济产业结构

为了更清晰地认识这一类产业，需要从国民经济整体结构出发来逐级划分和解剖，见图1。众所周知，国家的经济结构一般会划分为第一产业、第二产业、第三产业三个层级，第一产业主要是农业，包括种植业、畜牧业、水产业、副业等，第二产业主要是工业，包括制造业和非制造业两大类，第

三产业主要是服务业，包括运输、餐饮、文化、教育、旅游、金融等。

制造业和非制造业虽然都属于工业大类，但功能特征却不同。

非制造业主要包括发电、水利、建筑等，以能源行业和建筑行业为典型代表；制造业则进一步细分为离散型制造业和流程型制造业，前者以汽车、家电、电子器件、机械装备等产业为代表，后者则以石化、钢铁、水泥、玻璃、食品等产业为代表。

不过，有一类产业比较特殊，就是勘探采集类行业，包括各类矿石和石油的开采等，其功能特性属于非制造业，但是绝大多数是流程型制造业的前端，为了方便起见，直接划分到流程型制造业中进行分析。

作者单位：北京科技大学冶金与生态工程学院，北京 100083

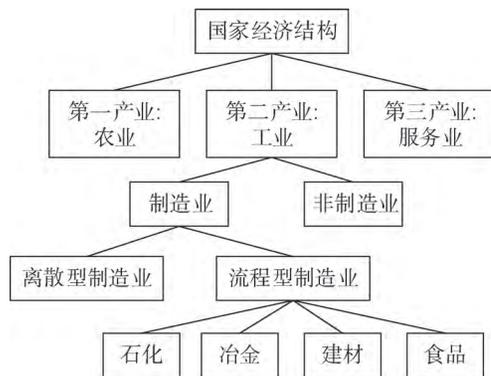


图1 国民经济结构

制造业和非制造业的划分比较好理解，一个是通过加工为手段可以批量生产某类产品，另一个则是则不具备这样的功能特性。

但离散型制造业和流程型制造业如何区分呢？

流程型制造业的特征

离散型制造业的加工过程以组合、装配为主，涉及少量的物理变化，基本不涉及化学变化，而流程型制造业的加工过程必然存在大量的物理变化和化学变化，同时为了推动和有效控制该变化，需要有一定的能量输入作为支撑^[1]。

由于离散型制造业加工过程可控、易控，所以产品质量主要取决于设计阶段，典型的就是大飞机的设计、高端汽车的设计、手机的设计、芯片的设计等等。设计环节是知识密度最高的环节，也是附加值最高的环节，这也是为什么中国已经成为了世界工厂，在离散制造业领域却少有话语权。

由于流程型制造业加工过程本身具有不可拆分性、气固液多相共存、多种化学反应耦合进行、高温高压的反应环境等特点，其复杂很高、控制难度很大，所以最终产品的质量主要取决于加工阶段，当然，加工过程工艺的选择和设备的设计也会产生明显的影响，但关键阶段还是加工过程的控制水平^[2]。

正是由于两者有不同的特征，决定了二者在面临向智能化转型升级时的路径和难点也会不同。

相对而言，离散型制造业的加工过程实现数字化、无人化容易很多，但在设计阶段即使已经实现了数字化，但依然仅仅是设计师的工具，各个产业能够提出智能化设计思路的都寥寥无几。而流程

型制造业对设计阶段的要求较低，一般来说目标清晰、工艺路径选择有限、物理边界明确，促使设计阶段实现数字化，乃至智能化设计具有一定的可行性；但针对加工过程，如果选择跟离散型制造业一样路径，恐怕要掉入无底深渊。

流程工程学

为了更好地指导工业体系稳步向智能制造转型升级，弄清制造过程的运行规律和本质特征，有一套系统的工程方法论作为支撑是十分必要的。

目前，研究制造业的方法主要是工业工程专业的理论，但遗憾的是，受限于该专业的起源和发展，目前该学科相关理论和方法都是以离散型制造业为对象的，基本不涉及流程型制造业的核心——复杂的物理化学变化和连续不可拆分的特征，所以，难以作为解析和认识流程型制造业的理论和方法。

为了解决该问题，诞生了一门针对流程型制造业，解析其运行规律和本质特征的新兴学科——流程工程学，值得引起各个流程型制造业的重视。

严格来说，流程工程学是脱胎于殷瑞钰院士的《冶金流程工程学》^[3]的一系列理论和方法。对于该著作，冶金领域的读者应该有所耳闻，对于其他行业的读者，可能会显得陌生。

流程工程学，作为一门新兴学科，其理论、方法、应用场景等，还在不断的完善和丰富的过程中。要想尽可能全面、深入地了解该学科，可以尝试从以下三个方面入手。

关心的核心问题

按照工程哲学“三元论”的观点，任何领域的任何问题，都可以从科学、技术和工程三个层次进行分解。针对一个具体的问题，一般来说，科学层面主要解决“对不对”的问题，技术层面主要解决“行不行”的问题，工程层面主要解决“优不优”的问题^[4]。

例如，基于热力学的吉布斯自由能的计算，以判断化学反应是否能够发生，这是科学层面的探讨；基于明确的科学原理，通过一定的装置设计，形成特定功能的设备，这是技术层面的工作；通过不同技术的组合，以成本最小、效益最大、效率最

高等为目标，解决一个具体的问题，这是工程层面的追求。

要解决一个具体的实际问题，基本都离不开这三个层次的工作，只有基础原理正确、技术可行、工程优化，才能更好的解决问题。流程工程学主要在工程层面发挥作用。追求对现有解决方案的不断优化，是流程工程学关注的核心问题。

研究对象和视角

流程工程学的研究对象，不再是孤立的技术、设备或工序，而是连续的、整体化的制造流程^[5]。

以钢铁冶金为例，由于现有科学体系划分，烧结、焦化、炼铁、炼钢、轧钢等都是分开学习和研究的，往往容易被分别对待。但是，实际生产过程却是紧密联系在一起，前后工序之间具有显著的影响，流程工程学的视角是要跨越工序的限制，将生产流程作为一个整体对待，从而获得更好的解决方案。

举个具体的小例子，高拉速的连铸生产有诸多优势，是企业追逐的重要指标之一。保障高拉速的重要前提之一，是中间包钢水温度的稳定。于是，在中间包进行电磁加热成为很多企业的首要选择。

除了在连铸工序本身开展工作，还有没有其他方式，可以进一步改善中间包钢水温度稳定性呢？

如果将中间包钢水温度波动的原因，沿生产过程向前追溯，影响钢水温度波动的原因包括：钢包热状态的稳定性、运输时间的稳定性和精炼操作控制精度。进一步向前追溯，影响钢包热状态的原因有钢包周转效率和钢包烘烤水平；影响运输时间的原因有生产计划准确性和天车调度；影响精炼控制精度的原因有本工序操作水平及上一工序的钢水质量；以此类推，还可以继续向前追溯。

如果从这些方面分别进行控制，会进一步改善中间包钢水温度的稳定性。同时，还会得到减少钢包使用个数、降低转炉出钢温度、减少精炼二次调温比例等诸多降本增效的效益，这就是流程工程学的视角。

如果将流程工程学与现有学科方向进行对比，做一个类比，现有的炼铁学、炼钢学等，如同生理学、心理学，注重探索每个人个体内在的原理和规

律，流程工程学则更像社会学、经济学，注重探索人与人之间的关系。

正是这种研究对象和视角的转变，决定了分析方法、思路都发生了变化。新的方法、思路就是流程工程学需要研究的内容。

基本参数

在了解了流程工程学的研究对象和视角，以及所关心的核心问题之后，应该用哪些基本参数表征和分析流程型制造业的加工过程，就是一个非常重要的问题。

由于流程工程学是以生产流程整体为研究对象，所以，其基本参数需要满足以下条件：

- (1) 能够贯通整个生产过程的各个工序和装置；
- (2) 在整个生产过程中可以“量化”，且呈现“连续、可微”的特征；
- (3) 可以以同一形式、同一单位贯穿生产过程始末。

第一条要求是为了基本参数能够覆盖整个生产过程的各个环节，保证研究对象不会缺失；第二条要求是能反应物理对象本质特征参数作为基本参数，随着生产过程而渐变，同时，要保证参数可观察、可度量；第三条要求是基本参数的同一性，不能随着生产过程而置换或转换。

纵观不同的流程型制造业，满足以上要求的参数集合，存在不同的选择。但依据科学的基本原理——奥朗姆剃刀原理，整理出来既满足上述要求又满足研究需要的最简化参数集合，包含的基本参数只有三个——物质量、时间、温度，其中，物质量是指被加工物料的本体信息，如重量、浓度等^[6]。

◆ 物质量

物质量，作为被加工物料的本体信息，成为基本参数，是自然而然的事情。不同流程型制造业的加工对象不一样，所以，具体生产过程选择的物质量参数也不同，但选择依然要遵循以上要求。

◆ 时间

时间，以整体生产过程为研究对象的学科都必然要重点研究的参数，不管是工业工程，还是管理工程，都是如此。主要原因是实际生产过程是一个动态的、时变的过程，几乎所有参数都会随着时间

或多或少的发生变化。

这一点也是流程工程学与已有工艺学科的本质不同。

流程型制造业中，已有工艺学科一般是以热力学和动力学为基础。热力学研究的是平衡态，没有时间参数；动力学研究的是反应效率，虽然有时间参数，但其目的是研究反应所需的时间，以便指导反应器和操作工艺的设计，最终目的还是要趋近于平衡态。由此，导致面向实际生产过程，也极少考虑由不同动力学条件而决定的不同的反应终点。

流程工程学是以时间轴贯穿整个生产过程，研究相关参数沿时间轴的变化规律，进而对生产过程进行优化。因此，时间是流程工程学的核心参数，通过时间维审视生产过程，是流程工程学的重要研究方法。

◆ 温度

温度，也是研究流程型制造业生产过程必不可少的参数。

前文阐述过“流程型制造业的加工过程必然

存在大量的物理变化和化学变化”，而不管是物理变化，还是化学变化，其变化过程都逃不过反应热力学和反应动力学。反应热力学的核心是吉布斯自由能，如果计算一个具体的反应过程，决定反应过程的，除了物质量参数，就是“温度”参数。反应动力学的核心是反应速率的计算，与反应热力学一样，决定反应过程的，除了物质量参数，也是“温度”参数。

由此可见，要想对流程型制造业生产过程进行描述，将工序单元加工过程与整个流程生产过程紧密结合，“温度”是惟一的、且必不可少的基础参数，掌握了温度控制，就掌握了流程型制造业控制过程的“七寸”。

正是由于“温度”参数的加入，也决定了流程工程学，与已有的工业工程、管理工程等研究离散型制造业的学科不同。如果将流程型制造业和离散型制造业的生产过程基本参数及相互作用关系进行比较，如图2所示，这既决定了两种制造业体系的物理运行本质存在差异，也决定了其工业过程控制的方法和目标存在明显不同。

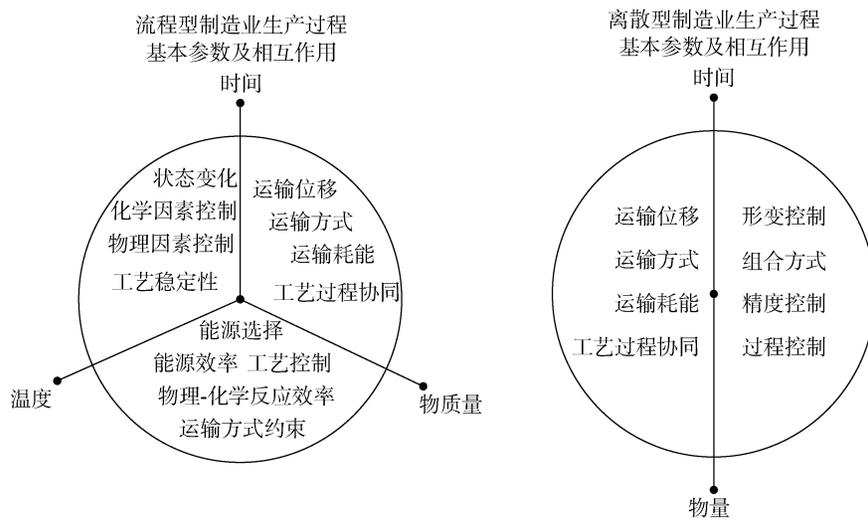


图2 流程型制造业和离散型制造业的基本参数对比

这里，需要注意：在流程工程学中，温度并没有纳入物质量的范畴。原因是：对于流程型制造业的整个生产过程，操控温度是加工手段，而不是加工目标。也就是说，整个生产过程的首端和尾端，所有物料的重量、成分、浓度、尺寸都可能会发生

变化，但温度确是从常温到常温。温度参数并不是流程型制造业所要加工的物质质量信息，所以不属于物质量范畴。

如果站在人类文明史和工业发展史的角度来看，文明和工业的发展本质是对更高温度的掌控和

使用。从远古至今，哪种文明能够广泛应用更高温度的工艺，则往往能够占领人类文明的最高点。农业社会的刀耕火种到铁器牛耕，冶金技术从块炼法、炒钢法到灌钢法的演进，工业社会的煤化工到石油化工，平炉炼钢到转炉炼钢，核裂变反应到最新的核聚变反应，都是如此。

结束语

通过分析国民经济产业结构，阐述了离散型制造业和流程型制造业在工业体系中的所处的位置。通过对两种类型制造业特征的分析，引出两种制造业在面对智能制造时，必然存在的本质差异。为了更好地解析流程型制造业的运行规律和本质特征，分享了一门新兴学科——流程工程学。并从关心的核心问题、研究对象和视角、基本参数的维度，初步介绍了流程工程学的基本内容。未来，该学科一定会为流程型制造业的智能化发展，提供重要的理

论指导。

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
- [2] 殷瑞钰. 新一代钢铁生产流程的总体思路——过程工程与动态运行//上海国际冶金工业展览会技术论坛. 上海, 2011
- [3] 殷瑞钰. 冶金流程工程学. 北京: 冶金工业出版社, 2009
- [4] 殷瑞钰, 汪应洛, 李伯聪. 工程哲学. 北京: 高等教育出版社, 2007
- [5] 殷瑞钰. 关于钢铁制造流程的研究. 金属学报, 2007(11): 3
- [6] 殷瑞钰. 钢铁制造过程的多维物流控制系统. 金属学报, 1997(01): 29

作者简介: 冯凯(1988—), 男, 博士, 现为北京科技大学冶金与生态学院讲师, 主要从事数学建模方法和人工智能算法在钢铁行业中的应用研究, 以及钢铁流程动态运行优化和智能化控制等。通信地址: 100083北京市海淀区学院路30号, E-mail: fengkai-show@163.com。

