

专论与评述

可持续发展的挑战与 过程系统工程的机遇

杨友麒

(中国化工信息中心, 北京 100029)

摘要: 可持续系统是一种全局性的系统工程, 按规模大小可分为 4 个层次: 全球性的系统, 地理边界为特征的系统, 局部的或分布的业务系统, 可持续发展技术。本文从这 4 个层次上探讨了可持续发展带来的挑战。今后任何工业过程, 包括化学工程, 不可能再作为一个孤立的对象来对待, 必须考虑工业过程、人类社会及生态环境的交互作用。过程系统工程处于独特位置, 最适合把各学科的成果汇集到一个系统工程框架中, 来应对这种挑战。

关键词: 过程工业; 过程系统工程; 可持续性; 生态系统; 绿色工程

中图分类号: TQ-9

文献标识码: C

文章编号: 0253-4320(2005)05-0001-07

Challenges from sustainable development and opportunities for process system engineering

YANG You-qi

(China National Chemical Information Center, Beijing 100029, China)

Abstract: The sustainable development system is a kind of whole system. According to system size, there are 4 levels, as follows: the global system, systems with geographical boundary, local or discrete business systems, and sustainable development technologies. This paper discusses those challenges from above 4 levels. In the sustainable development epoch any industrial process including chemical engineering process could not be treated as an isolated object, and the interaction among ecological environment, society and industrial systems should be considered. The process systems engineering as a discipline is in a very special position, which is mostly suitable to gather up the results from many disciplines into a system frame in order to meet the challenges from sustainable development.

Key words: process industries; process systems engineering; sustainability; ecological system; green engineering

可持续发展正在成为 21 世纪发展的主旋律, 当今世界已进入“生态产业”时代, 所谓“生态产业”是指仿照自然界生态过程的物质循环方式来规划工业生产系统的一种模式。在生态产业系统中各生产过程不是孤立的, 而是通过物质流、能量流和信息流关联成网络, 使一个生产过程生成的废料可以被另一个生产过程作为原料加以利用。生态工业追求的是系统内各个生产部门从原料、中间物、废物到产品的物质循环, 以使资源、能源和投资达到最优化利用。这种科学发展观必然对过程工业部门及其相关学科提出新的要求, 也对其发展前景提供新的机遇。

按规模大小可持续发展系统可分为 4 个层次: 全球性的系统; 地理边界为特征的系统; 局部的或分布的业务系统; 可持续发展技术^[1]。下面分别就这

4 类不同的可持续发展问题考察对过程系统工程的挑战。

1 全球性可持续发展问题

1.1 大气成分及全球温度变化^[2]

近 200 年来的监测表明: 大气层中的一些微量气体组成在迅速变化之中(表 1), 其中以人工合成的氟氯烃对大气组成的影响最大。从 20 世纪 70 年代中期以来, 每年大约有 100 万 t 各种氟氯烃被排放到大气层。它们在紫外线照射下分解, 形成氯离子, 对分解臭氧层有很强作用。一个氟氯烃分子增加的温室效应相当于 4 500~7 000 个 CO₂ 分子的作用。因此, 找寻其替代化合物, 减少乃至杜绝使用氟氯烃就成为迫切而重要的研究课题。

收稿日期: 2005-03-22

作者简介: 杨友麒(1935-), 男, 大学, 教授级高工, 中国化工学会信息技术应用专业委员会秘书长, 从事化学工程、过程系统工程、计算机应用等方面的研究, yang@pku.edu.cn。

表 1 工农业生产活动对大气组成的影响

微量气体名称	CO ₂	CH ₄	CFC-11	CFC-12	N ₂ O
大气层中体积分数 ^① /10 ⁻⁹					
1800 年前	280000	800	0	0	288
1990 年左右	355000	1320	0.280	0.484	310
稳定存在年限/a	50~200	10	65	130	150

注:①为单位体积的大气层中的体积分数。

关于人类工业活动对全球性气候变化的影响,已由“政府间气候变化论坛 IPCC”公布^[3]。在《第三次气候变化调查评估报告 2001》中指出:自 1950 年以来,北半球近地 8 km 大气层气温每 10 年上升 0.1℃,降雨量每 10 年增加 0.5%~1.0%。过去 10 年里,全球水文气象灾害数量增加了一倍。模拟结果表明:如果大气层中 CO₂ 浓度增加一倍,全球温度将上升 3~5℃。若化石燃料不加限制地消耗下去,2030 年大气中 CO₂ 体积分数可达到 550×10^{-6} ,到 2050 年气温会上升 1.5~4.5℃。那时,生态灾难将更加严重。

我国 CO₂ 排放量为 20 亿 t/a,居世界第 2 位。预测我国到 2025 年将超过美国,居世界第 1 位。此外,我国 SO₂ 排放量约 2 000 万 t/a,已为世界第 1 位。目前,在“京都协议书”中尚未规定中国、印度、巴西等发展中大国的温室气体减排义务,这种状况很可能发生改变,到时我国势必面临承担“减排义务”,我们必须做好准备。应当指出:有的跨国石化公司早就做出承诺,如美国杜邦(Du Pont)公司从 1990 年就承诺^[4]:1991—2000 年其产品能量消耗下降 15%,从 1993 年起该公司每年减少新鲜用水 7 500 万 m³。

从 20 世纪 90 年代起,美国麻省理工学院(MIT)就着手开发“人类造成的排放对全球气候影响模型”。1996 年开发出“排放预测及政策分析模型”(Emission Predictions and Policy Analysis Model, EP-PA)^[5]及陆地生态模型。EPPA 把世界分为 12 个经济区,以 5 年为时间步长来推算经济发展如何影响人类排放(CO₂、CH₄、N₂O、CFC、NO_x、CD、SO_x)的增长。1998 年,又开发出“二维陆地和海洋交互化学—气候作用模型 2D-LO”。这个模型涉及 18 种化合物,54 种气相及液相反应,空间分辨率 200 km。1999 年,Prinn 等人将以上 3 个模型加上已有的自然排放模型集成到一起,形成了“集成的全球系统模型”(Integrated Global System Model, IGSM)。用此模型可以评估全球气候政策(如控制温室气体排放)的效果及灵敏度分析^[5]。

当前,有一些跨国或国家组织一直在关注这方面的挑战,组织专题研究,开发工具软件包,提供发展报告。例如:可持续发展世界商会(World Business Council for Sustainable Development, WBCSD)致力于全球性可持续发展进程的倡导及跟踪,提出专题报告,并发现与此有关的商机(www.wbcsd.ch);全球环境管理首倡组织(Global Environment Management Initiative, GEMI)致力于为公司达到环境-安全-健康优化、经纪上成功、社会公众影响好提供业务策略,已开发了《通过环境优化提高供应链价值》等工具(www.gemi.org);政府间气候变化论坛(Intergovernment Program for Climate Change, IPCC)组织及发表年度气候变化评估报告(www.ipcc.ch);美国科学基金(NSF)环境研究与教育顾问委员会(AC-ERE)提出“复杂环境系统——21 世纪地球、生活和社会的综合”报告^[6]。

1.2 能源问题^[7]

据美国能源数据协会(EIA) 2001 公布,世界总能源消耗量为 13.4×10^{12} W/a,预计今后 50 年稳定人口数量将增长 50%,而随着人均收入的提高,相应人均能源消耗会不断增加,估计今后 20 年世界总能耗会增加 50%。多数专家认为:20~50 年内,主要还是靠化石燃料(石油、天然气及煤炭)。而要靠化石燃料来满足人类对能源需求而又不明显伤及环境,存在一系列的挑战。

1.2.1 减少燃烧燃料对大气的污染

减少燃烧燃料对大气的污染有四大措施:①提高发动机的效率;②选择碳氢原子比低的燃料;③用加氢方法将较高碳氢原子比的煤液化或气化成低碳氢原子比的燃料。这就是过去南非、现在中国下大力气采取的办法;④CO₂ 的回用减扣,将油田采出的 CO₂ 回注入油田地下,实施 3 次采油。

1.2.2 能源输送

世界上 65% 的石油储量在中东,而 65% 以上用量在北美、欧洲、中国及日本。所以储运问题是大课题,其中气体燃料输送又比液体更困难。因此有气体变液体(GTL)方法(燃气氧化成柴油、甲醇、乙醇等)和气体变固体(GTS)方法(天然气转化为固体水合物或其他固体)。

1.2.3 提高老油田采油回收率

由于新油田储量的速度在逐年下降,所以,提高老油田回收率越来越重要。通常一个油田生命周期为 30~50 年,有 3 个开采阶段:初步阶段,靠耗减地下压力采油;第 2 阶段,靠注水或注气来采油;第 3

阶段,即所谓3次采油。

找寻性质可以调节的新型油田材料(表面活性剂、聚合物及纳米材料),提高石油在多孔介质中的流动性十分重要。

1.2.4 找寻新的能源

(1)甲烷水合物。它是大量存在海洋水底的一种被压缩成固态的天然气(俗称可燃冰),分解时可释放出体积增大180倍的甲烷,但现在尚未开发出安全而经济的生产技术。

(2)氢能。氢能是二次能源,找寻经济可行的生产方法需要进行大量热力学研究;氢燃料电池首先会用于分布式及便携式系统,催化剂将起重要作用。

(3)可再生能源。这里主要指的是用生物质资源(Biomass)来弥补燃料油的不足,如二甲醚(DME)、乙醇、甲醇及生物柴油等。值得指出的是:到2000年美国 and 德国的化学工业原料中可再生原料的比重已达到10%,到2020年可望达到25%。

1.3 生态经济发展的评价体系^[8-9]

现在人们终于认识到:社会经济其实不是一个单一的经济系统,而是一个由经济系统的自然生态互相结合统一而成的“生态经济系统”,其实质是一个经济和自然的矛盾统一体。它的运行必然同时要受经济规律和自然生态规律两种客观规律的制约,因此要衡量社会发展水平就必须同时兼顾两方面效果。过去只注重经济效益,而将自然环境的贡献只当成是免费的、无偿的,这种考核办法显然已不合时宜了。

1.3.1 绿色财富

绿色财富是以资源本身的价值为基础的一个新概念,用来作为衡量社会财富的基本标志。近年来,世界银行曾组织专家按“绿色财富”重新研究了世界上哪些国家是最富有的问题。他们一共对192个国家的“富有”状况和经济发展潜力进行了分析研究。他们比较的“自然财富”是广义的,具体内容包括自然资源、环境保护、教育、社会流动性以及具有长远发展潜力的资源(如矿产资源、农田和自然保护区等)等,这些资源的价值过去都是被忽略或者被低估。研究的结果是:世界上最富有的国家不是通常人们认为最富裕的美国,而是拥有1800万中产者、并且大部分土地是乡村的澳大利亚(人均资产为835000美元)。其次是加拿大、卢森堡、瑞士、日本和瑞典,而美国排在了第12位(人均资产为421000美元)。最贫穷的国家是布隆迪、尼泊尔和埃塞俄比亚(人均资产为1400美元)。

1.3.2 绿色消费

如果人们仅仅从生产上治理污染,而忽略了另一大污染源——人类的消费,那是片面的。在这个问题上,公众意识是最重要的,各国政府现在抓生产经济活动的力度很大,但对引导消费、转变消费理念、转换消费模式方面却几乎没有考虑到。所以可持续发展要从消费者做起、从公众做起,实现绿色消费、循环消费。

1.3.3 绿色GDP

我国现在正在讨论“二次现代化的测度指标”,内容涉及两大方面:一是“信息化指数”,共有12项;二是“环境指数”,目前还没有定论。我国国家环保总局和国家统计局联合提出绿色GDP,就是在一年中完成的GDP中要用环境损失(如耕地减少、大气和水系污染等)倒扣,已决定选择6个省市开始试点^[10]。

2 地理边界为特征的系统

2.1 生态城市^[11]

生态城市是在城市生态系统承载能力的范围内,根据生态经济学原理,综合研究社会-经济-自然的复合生态系统,应用生态工程、环境工程、系统工程等现代科学技术,通过生态规划、生态工程、生态管理,建立起来的社会、经济、自然协调发展,物质、能量、信息高效利用,生态良性循环的城市体系。生态城市建设要促进3个转变:传统的资源型、外延型、粗放型的工业经济和农业经济向高效持续的知识型、集约型、内涵型的生态经济转变;传统的环境管理模式向可持续的绿化、净化、美化和循环模式转变,为社会进步和经济发展建立良好的生态基础;城乡居民的生产、生活方式及价值观念向环境和谐、资源高效、系统协调、社会融洽的生态文化转变。以上3个转变相辅相成,缺一不可。

生态城市建设大体包括3方面的内容:生态产业建设、生态环境建设和生态文化建设,以充分体现“以人为本”和“可持续发展”的基本思想。

2.2 循环经济^[12]

2.2.1 循环经济的概念

循环经济是仿照自然生态系统,从生产、流通和消费等全社会范围内通过物质循环、废物最小化、工艺替代和产品共生等方式,组成一个“资源-产品-再生资源”的物质反复循环流动的过程,达到资源、能源的高效利用,对环境影响最小的可持续发展的经济模式,本质上是一种生态经济。资源的高效利

用、废弃物资源化、减量化和无害化,是循环经济的重要原则和标志。

循环经济以环境无害化技术、资源回收利用技术、清洁生产技术和生态工业技术为主要载体,以环境友好的方式利用资源,保护环境,发展经济,逐步实现以最小的代价,更高的效率和效益,实现污染排放减量化、资源化和无害化。清洁生产和生态工业是其重要的支撑技术和组成部分。

循环经济实行 3R 原则,即减量化(reducing)、再利用(reusing)、再循环(recycling)。3R 原则是实现循环经济的重要行为原则。

2.2.2 过程系统工程的课题

循环经济及 3R 原则无疑给过程系统工程提供了广阔的发展空间,只有从过程系统工程角度入手才有望顺利解决这些问题。

当前的迫切任务是解决过程工业产生的大量废料的循环利用问题,其严重性如表 2 所示。当前我国可回收利用的再生资源价值高达 300 亿~500 亿元/a,其中有 500 万 t/a 废钢铁,20 万 t/a 有色金属,140 万 t/a 的废纸及大量的废塑料、废玻璃等过程工业产品。循环利用这些废弃物资,将其转化为“没有完全利用的资源”,一方面需要开发具体的转化工艺技术;另一方面则需要有科学的过程系统工程规划设计^[13]。

表 2 工业生产的废料

工业行业	产量/ $t \cdot a^{-1}$	废物/产品质量比
石油	$10^6 \sim 10^8$	~ 0.1
大宗化学品	$10^4 \sim 10^6$	≤ 1
精细化工	$10^2 \sim 10^4$	5 ~ 50
医药工业	$10^0 \sim 10^3$	25 ~ 100

根据联合国最新统计:地球虽然有 70% 面积被水覆盖,但只有 2.5% 为淡水,其中又只有 0.007% 为人类可以取用的水。因此,世界上有 40% 的人口缺水,而此问题还在发展。到 2025 年,将有 2/3 的人口缺水。我国水资源占世界第 6 位,但人均占有量只有 2 200 m^3 ,仅为世界平均水平的 1/4。北方地区人口占全国 47%,GDP 占 45%,但水资源只有 19%,北方人均水资源占有量仅为南方的 1/3,属于严重缺水地区。但是,一方面由于污染使水质恶化,地下水严重超采,使生态环境恶化;另一方面用水浪费严重,工业水重复使用率只有 40%~50%。日本的工业水重复使用率 1982 年已达到 74%,美国 1985 年达 75%^[14-15]。所以如何提高工业水回用率是我国,特别是北方地区应认真解决的大课题。研究水网络系

统工程无疑是中国过程系统工程界的重要课题。

3 局部或分布的业务

3.1 生态工业的挑战^[16-17]

生态工业的理论研究是 20 世纪 90 年代逐渐发展起来的,但最早的生态工业园区可以追溯到 20 世纪 70 年代初建立的丹麦卡伦堡工业园区。该园区以发电厂、炼油厂、生物制药厂和石膏板生产厂 4 个企业为核心,其他成员包括该地区的农场、大棚养殖场、养鱼场、居民区及该地区以外的水泥厂和硫酸厂。随之以后,美国从 1993 年开始,在美国可持续发展总统委员会和美国环境署支持下开展了 20 多个生态工业园区计划。加拿大自 1992 年开始在 Burnside 工业园开始进行生态工业园区改造的试验,随后其他一些分布在加拿大各地的工业园区也逐步开展了向生态工业区转型的计划。法国正在实行 PALME 计划。日本提出了与生态工业园区类似的零排放社会的概念。在日本通商产业省和环境厅的财政支持下,川崎零排放工业园和藤泽生态工业园区的建设正在进行。我国从 20 世纪末也开始建设生态工业园区,它们是:广东南海国家生态工业示范园区;湖南长沙工业园区;浙江衢州生态工业园区;新疆石河子工业园区;山东鲁北企业集团;贵阳生态工业园区。这些生态工业园区的设计建设从理论上提出了挑战,要求提供整套的系统综合、集成方法,分析与评价方法。

目前国内外在生态工业方面的基础研究,主要集中在以下几个方面:

(1) 研究可减轻工业对环境影响的具体技术措施,包括废物零排放系统、物质替代、非物质化和功能经济。

(2) 研究对整个工业生态过程进行分析、监测和评价的方法,包括物流分析、工业代谢分析、产品或过程的生命周期分析与评价、工业生态指标体系的建立等。

(3) 研究可促使生态工业实现的制度上的措施,包括如何在市场规则、财务制度、法律法规方面做出相应的调整,以使生态工业的思想贯穿整个生产和生活过程。

3.2 工业代谢——投入产出分析

工业代谢分析系统结构通过进行功能模拟和输入输出信息流分析来研究生态工业系统的代谢机理。与以往的系统分析方法的不同之处在于,它以环境为最终的考察目标,追踪资源从提炼到经过工

业生产和消费体系后变成废物的整个过程中物质和能量的流向,给出系统造成污染的总体评价,并力求找出造成污染的主要原因。通过这种分析,可以为公众或是企业的决策者提供一幅详细的物流图,并从中可以看出某一地区或企业所具有的可持续发展潜力。

但是物质代谢分析缺乏对物流网络结构深层次的挖掘和分析,因此在物质代谢分析的基础上引入了投入产出分析,来对物质循环的情况进行进一步的分析。它通过平衡方程,借助数学模型分析初始投入、中间投入、总投入、中间产品、最终产品、总产出之间的关系。Patten等生态学家对该方法进行了扩展,提出了几个可深入衡量生态系统结构和效率的指标,包括平均路径长度、循环指数等,并提出了效用分析方法,将之应用于对自然生态系统成员间相互关系的定性的定量分析。

3.3 柔性分析

柔性是指一个系统灵活适应不确定条件的能力。柔性分析就是研究柔性的大小,柔性是如何获得的,以及如何改进才能增大系统的柔性。对生态工业系统来说,这些不确定因素不仅会直接影响某些成员,而且会由于成员之间物质、能量、住处的交换影响到其他的成员。例如当一个生产企业的生产状况发生了变化,其产生的废物组成也会发生变化,如果在另一个企业作为原料加以使用时,就很有可能使该企业生产的产品不符合要求,于是原生态工业系统就有瓦解的危险。从这个角度来讲,生态工业系统中不确定条件的影响有一个放大的效应。而同时从另一个角度来讲,由于企业间彼此连接,使得企业调整自身的操作时必须同其他企业互相协调。清华大学提出了一种柔性分析方法,并应用在鲁北工业园区的设计中。

3.4 焓分析^[18-20]

生态学家(Odum)于20世纪80年代首创把热力学分析方法运用于自然生态系统及国民经济系统,提出焓(Energy)分析理论。如果把地球上所有的物质产品和服务均视为是太阳能转化和存储的某种形态,则直接或间接用于制造任何产品和服务所消耗的太阳能就可以用来度量其生态投入或生态输出。度量生态产品及服务、生态系统的健康水平和技术是系统生态学家们开发出来的。可以认为工业系统与生态系统一样遵从同样的自然法则,因而可以将系统生态学的一些方法推广到工业系统中去。如何来度量生态-工业系统的投入-产出性能呢?这就

要从 Ψ (B)和焓的概念谈起。

Ψ 是一个系统从某一个状态使其走向与环境平衡时能对外做功的量。由此可见, Ψ 只提供了系统当前状态和将来做功的能力的信息,并未提供有效能质量的信息。此外, Ψ 也没有提供宏观整体层次上的产品或服务的热力学特性或能量历史的信息。这些缺点只有靠引进“焓”的概念来克服^[20]。

焓是固化在任何产品和服务的太阳能或能量记忆,它定义为制造任何产品或服务直接或间接所需要消耗的总能量。太阳焓也就是制造任何产品或服务直接所耗的太阳能的数量,可能用太阳焓焦耳或Solar emjoules(sej)来度量。

$$M = \tau B \quad (1)$$

式中, M 为焓; B 为 Ψ , J ; τ 为变换性(Transformity), $\text{sej} \cdot J^{-1}$ 。变换性是一种能量质量的度量,它随着能量变得愈来愈浓缩和质量的提高而增加。

焓和变换性之值均有赖于达到一个状态所遵循的路径。生态产品及服务的变换性在一个较窄的范围内变化,因为这类过程已进化得效率很高了。相反,工业产品和服务的变换性则根据其选择的材料和生产效率变化较大。

最近,Bakshi提出了一个把工业生产系统与生态系统流同时进行热力学分析的框架方法^[18,21]。

要想定量地计算一个过程的焓平衡及各项分析指标,首先就要计算各个部位的 Ψ ,此外还要有足够的变换性的知识。关于前者,无生命的各种化合物的 Ψ 计算已在化学工程设计计算中解决了。而对于生物体的 Ψ 计算,Jorgensen推荐了以下方法^[22]:

$$B = \sum \beta_i c_i \quad (2)$$

式中, c_i 为生态系统中 i 组分含量, β_i 为 i 组分有机体含有的基因信息相对值; B 为复合生态系统的相对 Ψ 指标值,从这个 Ψ 值可以算出单位体积矿物 Ψ 的当量值。如果假设矿物(死去的有机体)的 Ψ 相当 18.7 kJ/g (矿物质的平均化学 Ψ),则上式得到的 B 乘上 18.7 就得到以 kJ/g 表示的 Ψ 的量值。

3.5 网络分析方法

20世纪过程系统工程的一项重要成果是《质量和热量交换网络分析》。现在国际上已开发了一些质量交换网络工具软件,用来识别废水回用和其他“质量交换体”跨过程边界交换的机会^[23]。例如:

(1)DIME工业材料交换软件包(Dynamic Industrial Materials Exchange)。由美国Bechtel(现Nexant)工程公司与能源部环境工程实验室联合开发,用来辅助工业副产品协调利用的机会识别及分析;

(2)DIET 设计工业生态系统工具(Designing Industrial Ecosystems Tool)。这是包括设备协调数据库(识别非产品输出的潜在匹配)、多目标优化模型(允许对匹配进行环境、经济和社会多目标优化计算)、现实性筛选等几个模块的生态工业园区设计工具雏形;

(3)利用地理信息系统(GIS)设计工业废料交换。因为工业废料交换利用的一大难题是废料运输。得克萨斯州州立大学(University of Texas, Austin)利用 GIS 研究了 20 个不同工业设施的水网络,结果发现,优化配置后总新鲜水用量可以下降 90%,水成本下降 20%。

3.6 可持续发展自我评价工具^[24-25]

全球环境管理首倡组织(GEMI)提出“可持续发展计划器 SD Planner”,用来给企业进行自我评估,看如何把可持续发展集成到自己的业务中去。它由员工福利、生活质量、商务理念、创增股东价值、经济发展、环境影响最小化、保护自然资源等 7 个元素组成。

4 可持续发展的工程技术

从过程系统工程角度来看,对一个新开发的或已有的化学产品或工艺过程,满足可持续发展至少应当解决以下 3 个问题:提出评估方法及指标体系;进行过程系统的经济-生态-社会影响联合模拟与分析的方法;解决常规系统水平的工程决策与其对宏观环境影响的关系问题,就要进行空间及时间尺度上的系统集成方法研究。鉴于经济-生态-社会多方面影响的复杂性,需要进行多学科技术之间的集成。

4.1 评估方法及指标体系^[23-24,26-27]

1991 年,环境毒理学与化学学会(SETAC)定义了生命周期评估法(Life Cycle Assessment, LCA):“通过量化使用能量及原材料和向环境排放废物来识别一个产品、过程或活动引起的环境负担,从而评估它们对环境的影响,并识别和评估环境效应改善的机会。”1996 年,国际标准组织颁布 ISO 14040 标准,正式规定 LCA 成为标准评估方法。

美国化学学会(AIChE)和英国化学工程师学会(IChemE)均提出许多评估指标,德国 BASF 公司也有自己的突出生态效率的指标体系。这些指标可分为两大类:内容指标和性能指标。美国环保署(EPA)的国家风险管理研究所(NRMRL)提出衡量可持续性的指标体系可分为 3 组:一维指标为经济的,生态的和社会的指标;二维复合指标为经济-生态,经

济-社会,社会-生态指标;三维指标为经济-生态-社会三维指标。

Sikdar 提出“多层次可持续性指标体系”。Azapagic 和 Perdan 试图提出一个“工业可持续发展通用指标体系框架”^[27-28],清华大学也提出一套三维指标体系,并用来对有机硅产品结构进行了优化^[16]。

4.2 过程的经济-生态-社会性能联合模拟分析^[29]

目前已有的研究主要是针对经济-生态的系统分析,涉及社会影响的模拟分析方法尚未看到。现有的工作大体是可以分为 3 个方向:基于流程模拟的方法,如 NRMRL 开发的 WAR(Waste Reduction)方法^[30];基于夹点分析的方法,该方法本来用于改进换热网络,现在移植到“质量交换网络”中来,进行节水减排的网络分析^[31-33];基于热力学分析的方法(生态 ■ 分析方法)^[34-36]。

4.3 多层次多学科集成建模技术^[21,37-39]

传统的经济分析把自然生态排除在市场之外,实际上认为工业废料可以无限地被生态环境吸收,而不必付出任何代价。而新的生态经济学则把生态资本、社会资本与传统经济资本作为更大的工业生态系统的一部分,统一起来进行评价。这就要求进行多层次、多学科集成建模,而过程系统工程作为一门学科最适合承担这种挑战。

鉴于可持续发展性能是一种整体系统属性,要使可持续发展贯彻到工程决策中去,就必然要求把常规“过程”的研究边界扩展到更大的范围。首先,因为当前的市场竞争已由一个公司与一个公司的竞争扩展到供应链对供应链的竞争,所以进行工程决策时首先要照顾到对整个供应链性能的影响;其次,按照上述 4 个空间规模层次,研究微观过程决策对宏观系统在经济-生态-社会体系的影响。这种情形如图 1 所示。

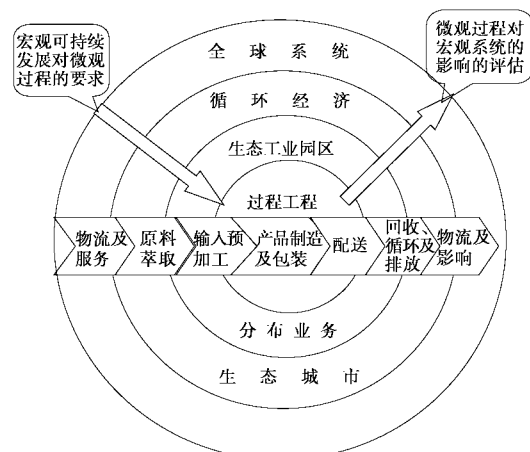


图 1 多层次可持续发展系统的集成

可持续发展过程系统集成除考虑过程系统本身内部不同物理尺度的集成外,还要充分考虑过程系统与生态系统之间的集成,及与社会的集成。目前,生态集成尚没有出现确切的定义,可以简单地理解为生态集成就是将生态因子纳入过程系统的综合、设计、运行和控制中。在低水平层次上,要计算生态系统的环境容量和生态承载能力;在高水平层次上,还要考虑美学、生态和谐等综合性抽象性的目标。但对于这一集成尚存在诸多困难,如对生态系统关系程度、认识程度和理解程度的欠缺等。但毫无疑问这一集成将成为过程系统工程的热点。生态工程领域原理的认知和工具的开发将有助于生态集成的进展。

5 结语

可持续发展的要求正在改变人们观察、思考问题的方法,从全球、地区、一个方面业务乃至具体过程工程决策多层次全面提出挑战。要解决各个层面上的可持续发展问题,需要各个学科的协同努力,而过程系统工程却处于一个独特的位置上,最适合把各个学科分别的努力成果汇集到一个系统工程框架中来应对这种挑战。

鉴于今后任何工业过程或工程决策不可能再当成一个孤立的对象来考察研究,必须考虑工业过程、人类社会及生态环境的交互作用,因此针对这种大型复杂系统必须开发创新的研究方法及手段。这不仅要求创新思维能力,更要求培养一代新型的工程师,他们具有由小及大、由近及远的思维及能力。

参考文献

- [1] Sikdar S K. [J]. *AICHE Jour*, 2003, 49(8): 1928 - 1932.
- [2] 金涌. 自然生态系统演化与人类社会经济发展[A]. 金涌, 李有润. 生态工业: 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 103 - 118.
- [3] IPCC, 3rd Assessment repor: climate change2001 [EB/OL]. <http://www.ipcc.ch>, 2004.
- [4] Pereira C J. [J]. *Chem Eng Science*, 1999, 54: 1959 - 1973.
- [5] Prinn R H, Jacob Y, Sokolov A, et al. [J]. *Climate Change*, 1999, 41: 469 - 546.
- [6] Pfister S. The AC-ERE complex environmental systems: synthesis for earth, life and society in the 21st century[J/OL]. <http://www.nsf.gov/geo/ereweb/advisory.cfm>.
- [7] Mohanty K K. [J]. *AICHE Jour*, 2003, 49(10): 2454 - 2460.
- [8] 孙国强. 以循环经济的模式建设生态城市[A]. 金涌, 李有润. 生态工业: 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 8 - 23.
- [9] 潘岳, 侯杰. 中国经济如何迎接绿色 GDP[N]. 中国化工报, 2004 - 04 - 26(B1).
- [10] 欧阳斌. [J]. *计算机世界*, 2004, (9): A23.
- [11] 张象枢. 从经济学视角看工业生态化[A]. 金涌, 李有润. 生态工业: 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 52 - 61.
- [12] 薛东峰, 李有润, 等. 构筑生态城市的工业循环体系[A]. 金涌, 李有润. 生态工业: 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 155 - 168.
- [13] 王静康, 陈建新. [J]. *化工进展*, 2004, 23(1): 1 - 8.
- [14] D'Aquino R. [J]. *Chem Eng Progr*, 1999, 95(3): 10.
- [15] 王金霞, 黄季昆, 向青. [J]. *新华文摘*, 2000, (9): 152 - 165.
- [16] 胡山鹰, 李有润, 沈静珠. 生态工业园区构建的分析和集成方法[A]. 金涌, 李有润. 生态工业: 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003, 297 - 312.
- [17] 邓南圣, 吴峰. 工业生态学——理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [18] Bakshi B R. [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2000, 24: 1767 - 1773.
- [19] Odum H T. 能量, 环境与经济: 系统分析导引[M]. 蓝盛芳译. 北京: 东方出版社, 1992.
- [20] 李有润, 沈静珠, 等. 生态工业系统工程[A]. 金涌, 李有润. 生态工业: 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 144 - 154.
- [21] Bashi B R, Fiksel J. [J]. *AICHE Jour*, 2003, 49(6): 1350 - 1358.
- [22] Jorgensen S E. A systems approach to the enviromental analysis of pollution mimimization [M]. London: Lewis Publshers, Boca Raton, 2001.
- [23] Allen D T, Butner R S. [J]. *Chem Eng Progr*, 2002, 98(11): 40 - 45.
- [24] GEMI. Exploring pathways to a sustainable enterprise: SD planner[J/OL]. <http://www.gemi.org>, 2004.
- [25] Azapagic A. [J]. *Chem Eng Jour*, 1999, 73(1): 1 - 21.
- [26] Rittenhouse D G. [J]. *Chem Eng Progr*, 2003, 99(3): 32 - 38.
- [27] Eissen M, Metzger J O, Schmidt E, et al. [J]. *Angew Chem Int*, 2002, 41: 414 - 436.
- [28] Hertiwich E G, Hammitt J K, Pease W S. [J]. *Jour of Industrial Ecology*, 2000, 4(1): 13 - 28.
- [29] 杨友麒, 石磊. [J]. *化工进展*, 2004, 23(1): 17 - 23.
- [30] Young D M, Cabezas H. [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1999, 23(10): 1477 - 1491.
- [31] El-Halwagi M M, Manousiouthakis V. [J]. *AICHE Jour*, 1989, 35(8): 1233 - 1244.
- [32] Wang Y P, Smith R. [J]. *Chem Eng Sci*, 1994, 49(7): 981 - 1006.
- [33] Spear M. [J]. *Process Engineering*, 2000, (11): 24 - 25.
- [34] Rivero R O. The exergoeologic improvement potential of industrial processes[A]. *Proceedings of TAIES'97* [C]. Beijing, 1997. 299 - 304.
- [35] Wang Y, Feng X. [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2000, 24(2 - 7): 1243 - 1246.
- [36] Zhu P, Feng X, Liu Y Z. Exergy-based environmental impact analysis in the industrial processes[A]. Chen B, Westerburg A W. *Proceedings of PSE'2003* [C]. Elsevier Science Amsterdam-Boston, 2003. 1141 - 1146.
- [37] Curzons A D, Constable D J C, Mortimer D N. [J]. *Green Chemistry*, 2001, 5(1): 1 - 6.
- [38] Dunn R F, Bush G E. [J]. *Jour of Clean Production*, 2001, (9): 1 - 23.
- [39] 杨友麒, 戚思危. 现代过程系统工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. ■