

过程系统工程理论与实践丛书



间歇过程设计与优化

王保国 许锡恩 著

中国石化出版社

过程系统工程理论与实践丛书

间歇过程设计与优化

王保国 许锡恩 著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是《过程系统工程理论与实践丛书》之一。该丛书是普及型高科技系列读物, 主要介绍过程系统工程这门新型学科, 其应用领域包括化工、石油化工、冶金、轻工、建材及物流型工业。

本书以间歇化工过程为例, 介绍了间歇过程的特点及发展前景, 主要论述间歇厂的设计及其优化, 多产品、多目的厂的最优生产时间安排等问题, 并介绍了间歇过程的典型软件。

本丛书各分册都具有普及性、实用性和可操作性的特点。适用于过程工业的技术人员、管理人员以及大、中专学校的师生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

间歇过程设计与优化/王保国, 许锡恩著. - 北京: 中国石化出版社, 1998

(过程系统工程理论与实践丛书) ISBN 7-80043-737-X

I. 间… II. ①王… ②许… III. ①湍流间歇-过程系统-系统设计 ②湍流间歇-过程系统-系统最优化 IV. N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 14138 号



中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 64241850

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 32 开本 5.5 印张 117 千字印 1—2000

1998 年 8 月第 1 版 1998 年 8 月第 1 次印刷

定价: 11.00 元

主 编 成思危

编委会 (按姓氏笔划为序)

申同贺	许锡恩	成思危
陈丙珍	周瑞康	俞金寿
顾 炎	麻德贤	韩方煜
谭昌元	魏寿彭	

序

过程系统工程是在系统工程、化学工程、过程控制、计算数学、信息技术、计算机技术等学科的边缘上产生的一门综合性学科，它以处理物料-能量-信息流的过程系统为研究对象，其核心功能是过程系统的组织、计划、协调、控制和管理。它广泛地用于化学、冶金、建材、食品等过程工业中，目的是在总体上达到技术上及经济上的最优化。

过程系统工程大约是在 60 年代开始形成一门独立学科的，此后得到了迅速的发展。在各种期刊杂志上及三年一度的过程系统工程国际会议上发表了大量的文章，其中一些关键技术，如过程模拟、过程分析、过程综合、过程预测、过程评价、过程可靠性分析等日益成熟，应用领域也不断扩展，已经成为过程工业发展中不可缺少的一门高新技术。

二十多年来，我国学者及工程技术人员在努力学习国外先进技术的基础上，在实践中积累了不少经验，在技术上也有一些进展。但由于彼此之间缺乏联系及交流，在过程系统工程方面尚未能形成一支强大的人才队伍，有不少好的成果得不到应有的推广。有鉴于此，我国著名的系统工程专家钱学森教授在 1988 年 12 月 23 日给我的来信中，倡议成立一个全国性的学术团体。他在信中指出：“我想在中国系统工程学会似尚缺少一个专门搞生产流程的委员会，而生产流程的系统工程对化学工业特别重要。您如同意，您可作为发起人向学会的秘书长或副秘书长建议成立这个委员会。”

在钱老的大力推动下，中国系统工程学会过程系统工程专业委员会于 1991 年宣告成立。在成立大会上，不少代表

建议要大力普及过程系统工程的基础知识。因此在第一次理事会上便决定要编辑出版一套《过程系统工程理论与实践丛书》，并为此组成了编辑委员会，确定了丛书的选题及作者。在中国石化出版社的大力支持下，这套丛书得以顺利地出版。在此我仅代表中国系统工程学会过程系统工程专业委员会向各位编委、各位作者、以及中国石化出版社的有关人员表示深切的感谢。

这套丛书共分 10 册，基本上覆盖了过程系统工程的主要领域。出版这套丛书的目的是宣传并普及过程系统工程的基本知识，以引起读者进一步学习的兴趣。其读者对象是过程工业领域内大专以上文化程度的中青年工程技术人员。我们希望这套丛书能达到以下三点基本要求：

1. 系统性：框架完整，逻辑清楚，每部书相对独立，深度相近，彼此之间有联系而不重复。

2. 科普性：深入浅出，定性叙述与定量分析相结合，尽量避免复杂的数学推导。

3. 实用性：理论与实践相结合，有一定数量的实例及应用软件介绍。

由于这套丛书是我们在过程系统工程领域内编写高级科普读物的第一次尝试，是否真正达到了上述要求，还有待读者的检验。我们热诚地希望读者能将对本书的宝贵意见通过中国石化出版社告诉我们，以便再版时加以改进。

中国系统工程学会过程系统工程专业委员会主任委员

成思危

1994 年 4 月 6 日

目 录

第一章 间歇化工过程导论	1
第一节 间歇过程与连续过程.....	3
一、间歇化工过程的特点.....	3
二、间歇过程与连续过程的比较.....	6
第二节 间歇过程生产厂.....	8
一、间歇厂中的设备分类.....	8
二、间歇厂的分类	10
第三节 间歇过程的操作方式	15
一、间歇过程中的基本操作	15
二、间歇过程的操作方式	16
参考文献	20
第二章 多产品间歇厂的设备设计与优化	22
第一节 有关概念和术语	23
一、尺寸因子	23
二、负荷因子	23
三、循环时间和生产期限	25
第二节 多产品间歇厂设备尺寸的基本算法	26
一、设备尺寸的计算	28
二、设备选择原则	30
三、安全因子和标准尺寸	30
四、浓度和空时产量的计算	31
五、瓶颈问题的处理	32

六、过程设计中应注意的问题	34
第三节 多产品间歇厂设备尺寸的最优设计	41
一、设计模型	41
二、设计实例	45
第四节 计算机辅助过程设计	52
一、MINLP 模型	53
二、收敛算法	54
三、启发法	55
参考文献	57
第三章 间歇厂生产的最优时间表问题	58
第一节 时间表问题	58
一、时间表问题的主要假设和目标函数	63
二、时间表问题的分类	67
第二节 简单多产品和多目的间歇厂的最优时间表 的计算规则	69
一、 $n/2/F/F_{\max}$ 问题的 Johnson 规则	69
二、 $n/2/G/F_{\max}$ 问题的 Johnson 规则	72
三、特殊的 $n/3/F/F_{\max}$ 问题	74
四、整数规划法	76
五、动态规划法	80
第三节 具有多种中间贮存方式的多产品间歇厂的 最优时间表	86
一、物料中间贮存方式	86
二、时间表安排	89
三、小规模问题	103
四、大规模问题	113
参考文献	122

第四章 间歇化工过程危险性分析	124
第一节 化学反应危险性	125
一、正常和异常	125
二、化学反应机理	127
三、选择安全措施	129
第二节 操作的危险性	131
一、可燃物料	132
二、辨识火源	133
三、选择安全措施	133
参考文献	134
第五章 间歇控制标准 SP88	135
第一节 有关专业术语	137
第二节 基本模型	139
一、控制功能模型	139
二、过程模型	142
三、物理模型	143
四、程序控制模型	143
参考文献	147
第六章 间歇过程的发展与计算机应用	149
第一节 间歇过程设计	150
第二节 间歇过程时间表安排	151
第三节 间歇单元操作过程的模拟	153
一、间歇反应过程的模拟	153
二、间歇反应精馏过程的模拟	154
第四节 间歇过程控制与自动化	155
第五节 典型的计算机软件	157
参考文献	160

第一章 间歇化工过程导论

间歇化工过程是一个古老的加工过程。本世纪以来,间歇化工过程经历了一个曲折的发展历程。在本世纪 30 年代以前,绝大多数化工过程采用间歇操作。那时,生产过程主要依靠操作工的技艺和判断,不仅自动化水平低,劳动强度大,而且产品质量不稳定。因此,化学工程师们就把注意力集中于将间歇生产改为连续生产方面。化工过程一直朝着连续加工发展,大规模过程更是如此。到了本世纪 50 年代,人们普遍认为古老的间歇过程将逐渐被现代连续过程所代替。但是,如今人们却惊奇地发现,世界上大多数化学品仍然是采用间歇过程生产的^[1~4]。在日益激烈的精细化工产品竞争中,生产厂家提出了“今天销售,明天生产,后天发货”的口号。为了尽快满足市场的需要他们正在想尽一切办法充分利用现有的人力、物力和财力,以求在残酷的商品竞争中立于不败之地。

Parakrama^[5,6]曾对英国的间歇化工生产进行过调查,涉及 74 家公司的 96 个生产过程。调查结果表明,有一半的公司完全依赖于间歇过程,仅有 6% 的间歇过程在不久的将来可能被连续加工取代。尽管从技术上讲有 91% 的间歇过程可以用连续过程来替代,但大部分依然采用间歇操作,其主要原因是产品的批量小、品种多。在间歇工厂生产的产品中,将近 80% 具有稳定或增长的市场。英国 ICI 公司用间歇过程生产的化学品出售所得利润,在 1977 年仅占该公司

年利润总额的 18%，到 1983 年占 30%，到 1987 年已占到 48%。

在过去的十几年中，化学过程工业（CPI）发生了巨大的变化。其主要趋势表现为从商品化学品生产转向专用的功能化学品生产；从大规模过程转向小规模的可具有弹性的过程；从连续加工转向间歇加工；从过去靠价格竞争转向现在靠质量竞争；从过去靠投资来推动发展转向靠信息来推动发展等等。这是因为间歇过程具有灵活多变的特性，即它可以用同一套多用途、多功能的设备生产多种类型的产品。这种转变的内在动力反映在化学过程工业方面，则是精细化工、生物化工等高度技术密集和知识密集的新兴产业的蓬勃发展。

精细化学品的生产有以下特点：小批量、多品种、高价值、系列化、合成步骤复杂、技术密集，有时还存在一定的季节性，并要求不断更新产品等等。由于这些特点，某些产品，至少从时间和资源上看，开发连续过程是不合理的。有的产品尽管可用连续法生产，但事实上在间歇厂中分批制造可能更经济。间歇生产不仅能适应上述特点和要求，并且更容易将实验室数据工业化。

目前，间歇操作广泛应用于食品、聚合物、药品、分子筛、增塑剂、抗氧化剂、染料和涂料等产品的生产。然而，需要指出的是对间歇过程的研究，特别是计算机在间歇过程中的应用，却远远落后于间歇过程的需求。这主要表现在迄今为止，间歇过程在设计、模拟和控制等方面仍缺乏通用的计算机软件。由于历史的原因和间歇操作本身具有的非线性动态特性，对间歇过程的计算机软件辅助方面的开发实际上仍是落后于连续过程。令人鼓舞的是，由于精细化工的发展，

在六七十年代刺激连续过程计算机辅助方法发展的因素，到了80年代对间歇过程来说也重要起来了。它表现在：(1) 外部要求 即外部环境对间歇过程又重新感兴趣并要求改进其功能；(2) 明确的目标 即肯定了间歇厂的多目标性；(3) 适当的手段 当部分多目标优化问题不能用批处理计算的方式完成，新开发的交互计算装置可用来有效地处理这一类问题；(4) 方法的及时性 已产生了对相当大系统的求解和优化方法，如大规模整数规划方法已被其它的领域借鉴。

综上所述，对间歇化工过程的研究是化学工程师面临的新的挑战。化学工程师必须首先改变自己对待间歇过程的态度，必须认识到间歇过程的设计、操作、控制和管理与连续过程有本质的区别，必须将间歇过程作为一门独立的、有自身特点的、在化学加工工业中具有独特地位的学科来进行研究^[7~10]。可以相信，间歇过程的研究具有广阔的发展前景。随着高新技术及计算机在间歇过程这一研究领域中的应用，那些思维敏捷、视野开阔和勇于探索的研究者必将会把更加引人注目的成果展现在世人面前。

第一节 间歇过程与连续过程

一、间歇化工过程的特点

过程是一系列用于物质或能量转换、输送或贮存的物理、化学或生物活动。工业加工过程一般可分为三类：连续、离散和间歇过程。这是根据最终产品的输出形式来区分的^[11~12]。在连续过程中，原料连续不断地通过一组专用设备，每台设备处于稳态操作并且只执行一个特定的加工任

务，产品以连续流动的方式输出。在离散过程中，产品是在特定的加工车间生产的，并且以一批、一批的离散方式输出。比如，汽车、服装及家具等就是采用离散过程生产的。在间歇过程中，原料按规定的加工顺序和操作条件进行加工，产品以有限量的方式输出。表 1-1 列出了间歇与连续过程在有关工业部门的应用情况^[13]。表 1-1 中的第一列代表有关的工业部门，第二、三列分别代表间歇过程和连续过程在该工业部门应用的百分比。可以看出，间歇过程在医药、食品及化学工业中应用的非常广泛。

表 1-1 间歇与连续过程在有关工业部门的应用情况

工 业 部 门	操 作 方 式	
	间歇过程/%	连续过程/%
化 工	45	55
食 品	65	35
医 药	80	20
金 属	35	65
玻璃及陶瓷	35	65
造 纸	15	85

在间歇控制标准 SP88 中^[11]，间歇过程被定义为“将有限量的物料，按规定的加工顺序，在一个或多个设备中加工，以获得有限量的产品的加工过程。如果需要更多的产品，必须重复该过程。”因此可以看出，间歇过程既不是连续过程，也不是离散过程。但是，它具有连续过程和离散过程的特点。以间歇化工过程为例，间歇过程的主要特点可概括如下^[14~17]：

1. 技术密集性

一个产品从研究开发到转入商品市场，需要解决市场调

查、产品合成和技术服务等一系列问题。市场调查需要丰富的经验和准确可靠的情报。产品合成由于产量小，可采用间歇生产方式，从而减少放大中的工程问题，但由于工艺操作复杂，反应控制、精制提纯和分析检测等都需要特殊的设备和手段。技术服务是发展生产的重要环节，只有注重技术服务并且将市场信息反馈到生产中去，才能不断开拓市场和提高企业的信誉。因此，间歇过程渗透着多方面的知识，是典型的技术密集型过程。

2. 动态性

间歇过程具有很强的非线性特点，其操作参数随时间而不断改变。这就意味着操作人员或过程控制系统需要不断地改变间歇过程的操作，以保证得到合格的产品。因此，它对过程控制工程师提出了严峻的挑战。

3. 多样性

在间歇过程中生产的精细化学品品种繁多，商品性强，竞争激烈。间歇过程的多样性表现为：产品的批量可能小到几公斤，也可能大到几千吨；一个间歇厂每年生产的产品数量可从一个到几百个；原料和产品可能很昂贵，也可能很便宜；一些加工设备的操作可能很可靠，也可能不可靠；产品的生产对人力或其它资源的需求可能具有决定作用，也可能忽略不计；产品的交货日期可能很紧迫，也可能比较宽裕。对操作人员而言，熟悉一类产品的生产过程，并不一定能操作另一类产品的生产，因为两类生产过程的加工要求及操作条件可能相差很大。

4. 柔韧性

间歇过程的柔韧性表现为一套多功能的生产装置可用来生产多种化学品。不同的化学品具有不同的加工任务和操作

条件，而同一类加工任务由于产品不同，其操作条件可在很大的范围内变化。因此，选择的设备和控制系统必须具有操作柔韧性或弹性，以适应生产多种化学品的需要。

5. 不确定性

在间歇过程中，一些在特殊设备中进行的反应，由于反应机理比较复杂，对整个反应过程缺乏全面的了解。因此，间歇过程具有不确定性。某类设备的操作性能可能会随时间的增加而恶化。原料的质量及其它公用设施可能会在生产过程中发生不能预料的变化。另外，为了尽快满足市场的需要，新产品会不断加入，老产品会不断被淘汰。这些不确定性增加了对间歇过程操作和控制的难度。

二、间歇过程与连续过程的比较

为了进一步弄清间歇过程的特点，可以将间歇过程与连续过程做一详细比较，其主要区别列于表 1-2^[15~19]。表 1-2 中的第一列代表间歇与连续过程相比较的基础，第二、三列分别代表间歇和连续过程的特点。

表 1-2 间歇过程与连续过程的比较

	间 歇 过 程	连 续 过 程
操作条件	动态、随时间变化	稳 态
加工过程	按配方顺序进行	连续并流进行
操作人员	经常改变操作条件	主要修正非正常条件
加工设备	必须适合多产品生产	仅能生产特定产品
产品输出	小批量、高附加值	连续物流、大批量
排 序	必 须	基本无影响
市 场	不稳定	稳 定

动态特性是间歇过程的本质，其操作条件及产品质量都会随时间而变化。而连续过程的本质是稳态操作（开、停车除外），其操作条件及产品质量都不会随时间而变化。在间歇过程中，原料必须按配方规定的加工任务和顺序在合适的设备中进行加工。在连续过程中，原料连续加入，各加工任务同时进行。通过详细的系统分析，可找到连续过程的瓶颈问题，而间歇过程的瓶颈问题随产品及操作策略而改变。

与连续过程中的设备相比，间歇过程中的设备尺寸的设计并不是很精确的，这是因为它们必须能够用来生产多个产品。连续过程中的安全系统主要是降低系统的停车时间，以避免因停车而造成的经济损失。这样的系统对于间歇过程没有什么作用。间歇过程通常是从小批量高附加值的化学品而设计的，比如精细化学品和医用化学品。它的一个生产周期只能生产一批产品。连续过程通常是需求很大的特定产品而设计的，在生产过程中，原料连续加入，产品连续排出。

在间歇过程中，由于要在有限的时间内，用有限的设备、原料及公用工程生产多个产品，就必须对整个生产过程进行有效的排序或进行生产时间表安排。否则，一些设备就可能被闲置，有限的生产时间就会被浪费。对连续过程而言，设备、原料及公用工程都是为某个特定产品而设置的，所以排序对它的生产过程基本没有影响。由于间歇过程的柔性或弹性，它适合于市场供求不稳定的产品的生产。连续过程则适合于市场供求稳定的产品的生产。对于市场需求量很大的产品，其初始阶段一般也是用间歇过程生产的。

第二节 间歇过程生产厂

一、间歇厂中的设备分类

一般非连续化工过程习惯上称之为间歇化工过程，如图 1-1 所示。它包括三类设备：单纯的间歇设备（TBU），半连续设备（SCU）和中间存贮设备（IS）。

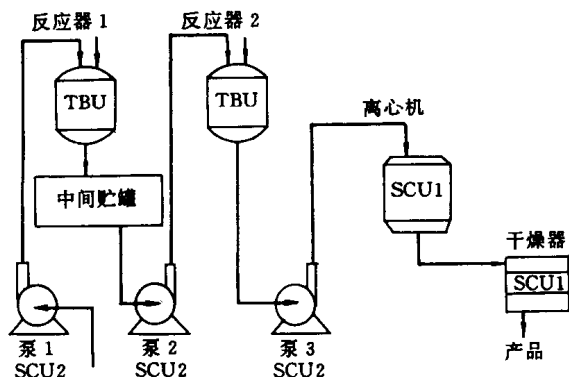


图 1-1 典型的间歇化工过程

单纯的间歇设备通常是周期性地进行加料、处理、出料、洗涤及等待等操作步骤。图 1-1 中的反应器 1 和 2 都是单纯的间歇设备。半连续设备实际上是间断操作的连续设备，它可分为两类^[1]。一类是在间歇过程中起主要作用的设备，比如图 1-1 中的离心机和干燥器。另一类是在间歇过程中起辅助作用的设备，比如图 1-1 中的泵。区分这两类半连续设备的目的是便于间歇过程的设计。

中间存贮设备一般是用来存贮中间产品的，它在间歇过程的设计和生时间表安排中起着非常重要的作用。只有相