

# 间歇过程计算机 集成控制系统

宋建成 编著

化学工业出版社

TP273.5

S82

452627

# 间歇过程计算机集成控制系统

宋建成 编著



00452627



2

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

间歇过程计算机集成控制系统/宋建成编著. —北京:  
化学工业出版社, 1999.7  
ISBN 7-5025-2581-5

I. 间… II. 宋… III. 化工过程, 间歇式-计算机控  
制系统 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 19477 号

---

间歇过程计算机集成控制系统

宋建成 编著

责任编辑: 刘 哲

责任校对: 李 静

封面设计: 于 英

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

\*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 13 1/2 字数 313 千字

1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月北京第 1 次印刷

印 数: 1 3000

ISBN 7-5025-2581-5/TP·237

定 价: 28.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

## 序

“科技兴国”，用高科技来改变我国的技术落后面貌是我们正在奋斗的事业。信息技术与自动化属于高科技内容，所以大力实施生产过程自动化，不断提高过程控制的水平是工业战线上的迫切任务。

随着控制理论的发展和控制技术、设备的不断完善，工业自动化所面临的是如何应用计算机集成控制，最终实现工业生产过程的优化生产操作、控制与管理任务。它已成为提高生产技术水平，使产品优质高产、具有市场竞争能力需走的必由之路。

在工业生产过程中，除了大型连续生产过程，它表征生产规模和“先进性”外，如今以高技术装备的间歇过程以其能最大限度地满足市场商品变化的需求，而成为一种受人青睐且极其灵活方便的生产方式。所以此书问世正好可满足当前经济建设急速发展的迫切需要。此书的特色如下。

① 深入剖析了间歇生产过程的特点和实现计算机控制的要求，对间歇生产过程进行分类和其特征提取，充分反映了理论与实际的紧密联系，为实现它的计算机集成控制指出了方向和做法。

② 此书综述了国际上这一领域里的有关技术术语、技术发展历程，并介绍了当今几类重要控制硬件的功能及其适用场所。

③ 在软件的编制方面详细介绍了顺序、流程、状态转移、丕托网等多种常用的重要图示编程方法，有助于读者迅速掌握、提高编程能力。

④ 将生产计划和调度纳入其内，如从分层结构，求解方法，优化算法，到结合多用途工厂建模和优化调度，这也是一个综合大型企业优化操作控制与管理必须面临的技术问题。

综上所述，这是一本提高广大从事过程控制技术工作者素质，为实现间歇过程计算机集成控制提供知识和技能的好读物。

王骥程

1999年2月于浙江大学

## 前言

当今世界科学技术突飞猛进,使社会生产力获得巨大发展,人民生活水平不断提高。为了最大限度地满足日益高涨的产品多样化(多品种、多规格)、现代化、高质量的市场要求,最近一二十年中,工业生产的产业结构出现了明显的变化,大批量、少品种生产方式向小批量、多品种生产方式转变,这个变化在发达国家中尤为显著。

为了进一步发挥间歇生产过程(亦称批量生产过程)的柔性操作特长,提高产品的质量及其市场竞争能力,很多间歇生产厂家增加了间歇控制的投入,采用自动化技术改造企业,使得古老的间歇生产方式又焕发了青春,昔日落后的间歇控制现今成为离散控制技术、连续控制技术、微电子技术、通讯技术和人工智能等高新技术交融互补、综合应用的试验场。

间歇生产设备和间歇生产过程的非稳态属性,其产品品种和工艺条件频繁变化等柔性操作特点,迫使控制工程师在间歇控制中试用涌现出的每一项新技术;从计算机直接控制(DDC)、集散控制系统(DCS),到探索把产品的销售、经营决策、生产计划/调度、操作优化、过程控制等活动都包括在内的计算机集成制造系统(CIMS)。采用的控制技术愈先进,在间歇应用中愈能成功。

间歇控制,更确切地说是间歇过程计算机控制,已经积累了大量成功的与失败的经验,逐步形成了公认的规范和标准的术语,很多控制策略、设计方法、描述工具经受了实践的检验,间歇生产的配方管理、优化调度已经成为计算机辅助生产的一个热点,统计过程控制/统计质量控制(SPC/SQC)、适时生产(JIT)、制造资源规划(MRP-II)和企业资源规划(ERP)在不少间歇生产厂中应用成功。

每年在学术期刊、会议论文集中都有大量关于间歇过程控制理论、数学模型等文章和现场应用的技术报告发表,然而已出版的这方面专著却寥若晨星。本书试图比较全面地介绍间歇过程计算机控制系统的理论和应用,反映当今的技术水平,同时鉴于工业上出现了向基于标准的控制系统发展的趋势,以及美国仪表学会(ISA)下属的SP88-间歇控制系统标准委员会、欧洲的化工测量和控制标准化协会(NAMUR)的工作向全世界扩展,书中强调了标准对设计和开发间歇控制系统的重要性。

全书共分九章。第一章和第二章介绍间歇过程分类,分析间歇过程的特征和实现计算机控制的要求;第三章综述间歇控制系统相关的技术术语和模型,以及标准对间歇自动化的影响;第四章介绍五类常用的间歇控制系统硬件的功能和适用范围,并讨论了控制系统的评估方法和选型的原则;第五章讨论间歇过程安全联锁系统的设计方法,并着重讨论可编程控制器在安全联锁和紧急停车系统中应用的可靠性,以及保障安全使用的策略和措施;第六章介绍模块化间歇控制软件的设计方法,包括流程图、状态转移图、丕托网(Petri net)、顺序功能图等图示方法、常用的图示和文本编程语言,以及结构化编程方法;第七章讨论计算机集成的间歇生产,包括操作优化、配方管理、统计过程控制/统计质量控制和生产计划/调度等课题。其中生产计划/调度在第八章中单独讨论;第八章比较详细地介绍生产调度分层结构体系、求解方法、优化算法,以及采用极大极小代数和丕托网进行多用途工厂的建模和优化调度;第九章介绍在间歇控制项目管理中已经广泛应用的生存周期法;附录A、B给出了第八章中引入的新工具——极大极小代数和丕托网的基本定义及其公式推导。

跟踪科学技术的进步，间歇生产厂将继续改进生产，提高成本 / 效益，间歇控制系统也将继续向标准化、综合化、智能化、集约化、信息化发展，因此本书仅仅是间歇控制发展进程中这一特定时刻拍下的一张快照，希望书中介绍的技术和方法与生动的实践出入不大。

在此，我要感谢浙江大学王骥程教授，华东理工大学蒋慰孙教授和浙江工业大学庄毓萃副教授对手稿的仔细校阅和提出许多有价值的建议。

作者

1998 年 1 月于杭州

## 内 容 提 要

间歇生产过程因其柔性操作的特长,越来越受到重视,本书综述了这一领域的技术术语和技术发展历程,介绍了常用间歇控制系统硬件的功能和适用范围,并讨论了控制系统的评估方法和选型原则。在软件方面详细介绍了常用的顺序、流程、状态转移、逻辑网等重要的图示编程方法。本书深入剖析了间歇生产过程的特征和实现计算机控制的要求,将生产计划和调度纳入其内,指出了计算机集成控制的方向和做法。

本书为从事过程控制专业的技术人员提供了实现间歇过程计算机集成控制的知识和技能。

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第一章 绪 论 .....                     | 1  |
| 1.1 间歇生产过程 .....                  | 1  |
| 1.2 间歇控制的要求和特点 .....              | 2  |
| 1.3 间歇生产过程计算机控制 .....             | 7  |
| 第二章 间歇生产过程的分类与特征 .....            | 9  |
| 2.1 间歇生产过程的分类 .....               | 9  |
| 2.2 无管间歇生产过程 .....                | 11 |
| 2.3 间歇生产过程特征 .....                | 13 |
| 第三章 间歇控制系统的模型和术语 .....            | 18 |
| 3.1 间歇生产设备术语 .....                | 18 |
| 3.2 间歇生产活动术语 .....                | 19 |
| 3.3 间歇生产管理术语 .....                | 21 |
| 3.4 间歇生产模型 .....                  | 22 |
| 3.5 间歇控制模型 .....                  | 24 |
| 3.6 标准对间歇自动化的影响 .....             | 27 |
| 第四章 间歇控制系统硬件 .....                | 30 |
| 4.1 早期的间歇控制工具 .....               | 30 |
| 4.2 基于微处理器的间歇控制系统 .....           | 33 |
| 4.2.1 集散控制系统 (DCS) .....          | 34 |
| 4.2.2 可编程控制器 (PLC) .....          | 36 |
| 4.2.3 基于微处理器的单回路数字调节器 (SLC) ..... | 38 |
| 4.2.4 个人计算机 (PC) .....            | 39 |
| 4.2.5 单元控制器 .....                 | 41 |
| 4.2.6 中小型间歇应用 .....               | 42 |
| 4.2.7 间歇控制系统的发展趋势 .....           | 44 |
| 4.3 间歇控制系统的结构方式 .....             | 46 |
| 4.4 间歇控制系统的评估和选型 .....            | 49 |
| 第五章 安全联锁 .....                    | 53 |
| 5.1 安全联锁系统的要求和功能 .....            | 54 |
| 5.2 术语及其定义 .....                  | 55 |
| 5.3 安全联锁系统的设计方法 .....             | 56 |
| 5.3.1 辨识/分析生产过程潜在的危险 .....        | 56 |
| 5.3.2 估算需要的安全等级 .....             | 58 |
| 5.3.3 设计安全联锁系统 .....              | 60 |
| 5.4 可编程控制器的安全使用 .....             | 63 |
| 5.4.1 可编程控制器的故障分析 .....           | 63 |

|            |                    |            |
|------------|--------------------|------------|
| 5.4.2      | 保障可编程控制器安全使用的策略和措施 | 64         |
| 5.4.3      | 冗余和容错系统            | 68         |
| <b>第六章</b> | <b>间歇生产过程控制软件</b>  | <b>73</b>  |
| 6.1        | 模块化间歇控制软件简介        | 73         |
| 6.2        | 过程分析               | 74         |
| 6.3        | 顺序图示方法             | 77         |
| 6.3.1      | 流程图                | 77         |
| 6.3.2      | 状态图                | 79         |
| 6.3.3      | 时间顺序图              | 79         |
| 6.3.4      | 状态转移图              | 81         |
| 6.3.5      | 丕托网 (Petri net)    | 81         |
| 6.3.6      | 顺序功能图 (SFC)        | 83         |
| 6.3.7      | 顺序图示方法的选择准则        | 92         |
| 6.4        | 控制软件编程             | 92         |
| 6.4.1      | 编程语言               | 92         |
| 6.4.2      | 结构化编程              | 100        |
| 6.4.3      | 操作状态和工作模式          | 105        |
| <b>第七章</b> | <b>计算机集成的间歇生产</b>  | <b>108</b> |
| 7.1        | 计算机集成的间歇生产系统       | 108        |
| 7.2        | 优化操作               | 109        |
| 7.2.1      | 间歇反应器的优化操作策略       | 109        |
| 7.2.2      | 间歇蒸馏塔的优化操作策略       | 110        |
| 7.2.3      | 优化操作的应用            | 110        |
| 7.3        | 配方管理               | 113        |
| 7.3.1      | 配方形式和内容            | 113        |
| 7.3.2      | 配方的结构              | 115        |
| 7.3.3      | 配方管理功能             | 117        |
| 7.3.4      | 配方管理软件             | 118        |
| 7.4        | 统计过程控制             | 121        |
| 7.4.1      | 基本理论               | 122        |
| 7.4.2      | 主要工具               | 124        |
| 7.4.3      | SPC 在间歇生产过程中的应用    | 131        |
| <b>第八章</b> | <b>生产计划和生产调度</b>   | <b>140</b> |
| 8.1        | 调度分层结构和调度活动        | 140        |
| 8.2        | 生产计划/调度问题求解的方法     | 141        |
| 8.3        | 生产调度——一个复杂的问题      | 142        |
| 8.4        | 多产品工厂的结束时间计算式      | 145        |
| 8.5        | 优化算法               | 153        |
| 8.5.1      | 约翰逊 (Johnson) 算法   | 153        |
| 8.5.2      | 混合整数线性规划 (MILP) 算法 | 154        |
| 8.5.3      | 分支和定界 (BAB) 算法     | 156        |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 8.5.4 快速逼近和广泛搜索 (RAES) 算法 ..... | 158 |
| 8.5.5 模拟退火 (SA) 算法 .....        | 159 |
| 8.6 多用途间歇工厂的生产调度 .....          | 165 |
| 8.6.1 极大极小代数和有向图 .....          | 165 |
| 8.6.2 多用途工厂数学模型和优化调度 .....      | 167 |
| 8.6.3 应用丕托网模拟和分析多用途工厂 .....     | 170 |
| 8.7 交互调度系统和反应式调度软件 .....        | 173 |
| 8.7.1 交互调度系统 .....              | 173 |
| 8.7.2 反应式调度软件 .....             | 176 |
| 8.8 生产计划 .....                  | 176 |
| 第九章 项目管理 .....                  | 179 |
| 9.1 项目生存周期 .....                | 179 |
| 9.1.1 生存周期模型 .....              | 180 |
| 9.1.2 规范 .....                  | 181 |
| 9.2 用户需求规范 .....                | 181 |
| 9.2.1 目的和准备 .....               | 182 |
| 9.2.2 主要内容 .....                | 185 |
| 9.3 招标采购过程 .....                | 186 |
| 9.3.1 筛选供应厂商 .....              | 186 |
| 9.3.2 招标 .....                  | 187 |
| 9.3.3 投标和投标评估 .....             | 187 |
| 9.4 功能规范 .....                  | 188 |
| 9.4.1 目的和准备 .....               | 188 |
| 9.4.2 功能规范的内容 .....             | 188 |
| 9.5 软件设计和编码 .....               | 189 |
| 9.6 系统集成与测试 .....               | 190 |
| 9.6.1 测试方法和测试环境 .....           | 190 |
| 9.6.2 系统验收测试 .....              | 193 |
| 9.7 试车投运和移交 .....               | 193 |
| 9.7.1 试车进程和范围 .....             | 194 |
| 9.7.2 现场验收测试 .....              | 194 |
| 9.8 质量控制与质量保证 .....             | 195 |
| 9.8.1 版本、修改控制和配置控制 .....        | 195 |
| 9.8.2 验证 .....                  | 196 |
| 附录 A 极大极小代数 .....               | 197 |
| 附录 B 丕托网 .....                  | 201 |
| 参考文献 .....                      | 205 |

# 第一章 绪 论

## 1.1 间歇生产过程

间歇生产过程，又称批量生产过程，是工业生产中广泛采用的一种生产方式，占有很大的比重，而且与我们的日常生活密切相关。譬如一日三餐，不管是煮米饭、熬稀饭，还是蒸馒头、下面条，它们都属于按照给定的配方、生产一定量产品的间歇生产过程。在产品的配方中规定了：

- ① 生产的产品及其必需的原料组分；
- ② 所需的生产设备；
- ③ 要求进行的生产操作，如加料、加热。

为了生产出合格的（可食用的）产品，这些操作必须按照配方中规定的顺序、规定的温度和规定的时间内进行，包括自动控制（例如用电饭煲煮饭）和手动操作（例如把一定量的水和米倒入锅内）。

工业生产过程一般按其输出的产品是呈连续的产品流，还是离散的批量或者是离散的数量分为连续生产过程、间歇生产过程和离散生产过程。

在离散生产过程中，产品通常是分批（原料相同、加工工序相同的一组产品）制造的，一定数量的产品作为一个工件组，并在各个工作台之间传输，而且每个工件都有独立的个性。家用电器、汽车、服装、家具等消费品都是用离散生产过程制造的。

在过程工业中，广泛地采用间歇生产过程和连续生产过程，表 1.1 中给出了这两种生产方式所占的比例。

表 1.1 工业生产中采用间歇生产过程与连续生产过程的比例

| 工 业 部 门 | 生产方式   |        | 工 业 部 门 | 生产方式   |        |
|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
|         | 间歇生产过程 | 连续生产过程 |         | 间歇生产过程 | 连续生产过程 |
| 化工      | 45%    | 55%    | 冶金      | 35%    | 65%    |
| 食品和饮料   | 65%    | 35%    | 玻璃和水泥   | 35%    | 65%    |
| 医药      | 80%    | 20%    | 造纸      | 15%    | 85%    |

在连续生产过程中，原料经由不同的专用设备加工转变为产品。每个设备都是运行在稳定的工作状态下，完成一项规定的生产操作。一个连续生产过程输出的产品是连续的产品流。

那么什么是间歇生产过程呢？由于生产设备的物理结构，或者其他经济上和技术上的因素，致使生产过程由一个或多个按一定顺序执行的操作步（或操作阶段）组成，那么从性质上说，这个生产过程就认为是一个间歇生产过程。完成这个操作步顺序就生产出一定量的最终产品。如果需要生产更多的产品，则必须重复执行这个操作步顺序。

简言之，以顺序的操作步进行批量产品生产称为间歇生产过程。

有些人认为所有生产过程都是间歇生产过程，理由是每个生产过程都有开车、停车操作。连续生产过程仅仅是一个长周期的间歇生产过程。这种观点显然是忽略了间歇生产过程与连续生产过程不同的特性。表 1.2 列举了它们之间主要的差别。

表 1.2 间歇生产过程与连续生产过程的差别

| 特 征           | 间歇生产过程                  | 连续生产过程                    |
|---------------|-------------------------|---------------------------|
| 生产操作          | 按配方规定的顺序进行              | 连续且同时进行                   |
| 设备的设计与使用      | 设计成可以生产多种产品             | 按给定的一种产品设计                |
| 输出的产品         | 批量                      | 连续的产品流                    |
| 工艺条件          | 可变的, 并且在二个操作之间经常发生剧烈的变化 | 通常在恒定的压力、温度、流量条件下, 处于稳定状态 |
| 现场数字量 I/O 信号  |                         |                           |
| 与模拟量 I/O 信号之比 | 60 : 40                 | 5 : 95                    |
| 人工干预          | 是正常生产操作的组成部分            | 主要用于处理不正常的工况              |

连续生产过程一个主要的优点是经济规模效益。一个标准产品大批量生产, 一般都能获得比较丰厚的初始投资回报。连续生产过程与同等生产能力的间歇生产过程相比, 其优点为: 占地少, 原料的处理工作量小, 劳动力消耗低, 存储量少。连续生产过程最适宜用于大宗产品的生产。然而, 有些传统采用间歇生产过程的行业, 例如医药工业, 也出现了采用连续生产过程的趋势。

间歇生产过程最大的优点是柔性好, 这一点反映在广泛采用间歇生产过程的三个工业部门——化工、食品与饮料和医药生产中。这些工业部门的工厂面对激烈的市场竞争, 为了保持和扩大它们的市场占有份额, 必须提供多种产品和尽快地推出新产品。

间歇生产过程的设备要求能生产多种产品, 进行多种生产操作。设备具有操作柔性, 使工厂生产新产品不用添置新设备, 生产不同规格的产品不需要修改设备, 这样, 工厂只要增加少量投资就能适应市场需求的变化。这种操作柔性也蕴含在生产小量产品或试验品时, 不会出现因与设备的生产能力不合而带来的风险如:

- ① 产品的生产量小而且品种规格繁多, 例如染料和专用化学品生产;
- ② 产品生产受到环境污染或原料不合格等条件限制;
- ③ 产品的原料、中间产品和最终产品存储周期短;
- ④ 由于顾客购物习惯, 或者产品的规格不断变化, 产品的生命周期短。

采用间歇生产过程也具有明显的经济规模效益。当然与连续生产过程的经济规模效益不同, 这里是指间歇生产过程规模小的好处。间歇生产过程的其他优点如下。

- ① 按管理部门现行法规要求提供产品质量数据和生产历程文档。例如药品生产。
- ② 出于安全考虑。例如剧烈的放热反应和含有有毒组分。采用小批量间歇生产过程, 可使产品生产中潜在的危险降到最小。
- ③ 间歇生产过程提供最先进的可用技术。例如专用化学品、生化制品, 其生产工艺非常复杂, 采用间歇生产更合适。

间歇生产过程的重要性在于这类生产过程在工业生产中占有很大的比重 (参见表 1.1)。虽然向大型化发展是当代工业生产的一种趋势, 然而也存在另一种趋势, 那就是向精细化发展, 以适应多品种、多规格和高质量的市场要求。但是间歇生产过程自动化水平远远低于大型连续生产过程, 生产管理也比较落后, 所以实施自动化的经济和社会效益是十分显著的。

## 1.2 间歇控制的要求和特点

任何一种生产过程, 不管是连续的还是间歇的, 最终目标是以最经济的方法把原料变成

产品。在工业生产中，生产过程必须满足下列要求。

(1) 安全 安全生产是生产过程中最重要的要求。实现安全生产必须将温度、压力、浓度等工艺参数控制在允许的范围内。

(2) 生产指标 一个生产过程必须达到设计的生产水平。生产的产品必须符合规定的质量标准。

(3) 环境保护法律及相关的条例 人们越来越关心工业生产造成的环境污染，这一点反映在国家对工业废物的排放通过立法来管理。

(4) 操作约束条件 所有的设备都有规定的操作约束条件。例如泵必须保持负压运行，这样蒸馏塔才不会出现液泛。

(5) 经济指标 一个生产过程的设计和运行都必须考虑市场的情况。例如产品的需求情况，原料的供应情况。还有原料、能源、劳动力等资源消耗应该尽量降低。只有这样，才能使生产过程运作在最佳水平上，保持最低的操作费用和最高的利润。

上述各项要求说明必须对生产过程进行连续的监测和控制，并且通过合理地设计和巧妙地安排控制设备（包括仪表、阀门、调节器）和人工干预（包括管理人员和操作工人），构成一个有效的控制系统。

连续生产过程的控制，一般采用一个保持一组给定的稳态操作条件和生产过程物料平衡的控制系统来满足上述各项要求。连续控制系统通过反馈控制和前馈控制（图 1.1），将关键的被控变量维持在给定值上。这些给定值是根据连续生产过程的经济要求、操作要求、安全和环境保护等要求决定的，在正常情况下是不改变的。但是一旦发生变化，连续控制系统必须有能力强地、快速地使生产过程回复到新的稳态条件下运行。

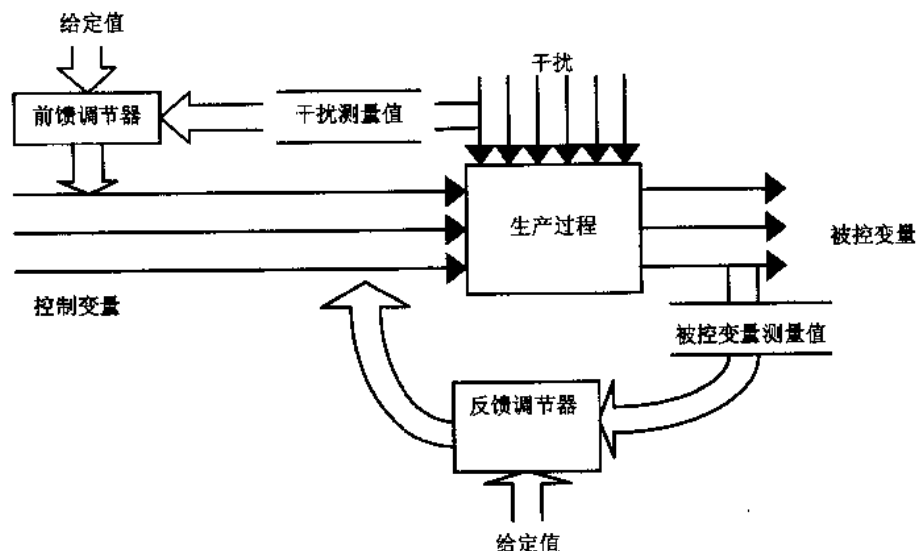


图 1.1 连续控制系统中反馈控制和前馈控制

任何一个生产过程都会受到不能直接控制的“干扰”作用。这类干扰常常改变生产的物料或者热量的负荷，所以又称为“负荷变化”。控制系统通过调节控制变量使干扰对被控变量的影响降为最小。调节或补偿负荷变化是连续控制系统的一项主要任务。

间歇生产过程的控制简称为间歇控制。图 1.2 是一个单产品间歇工厂生产流程的示意图及其产品配方。四种原料组分在反应器内反应合成一种产品。产品的生产程序如下：开始一

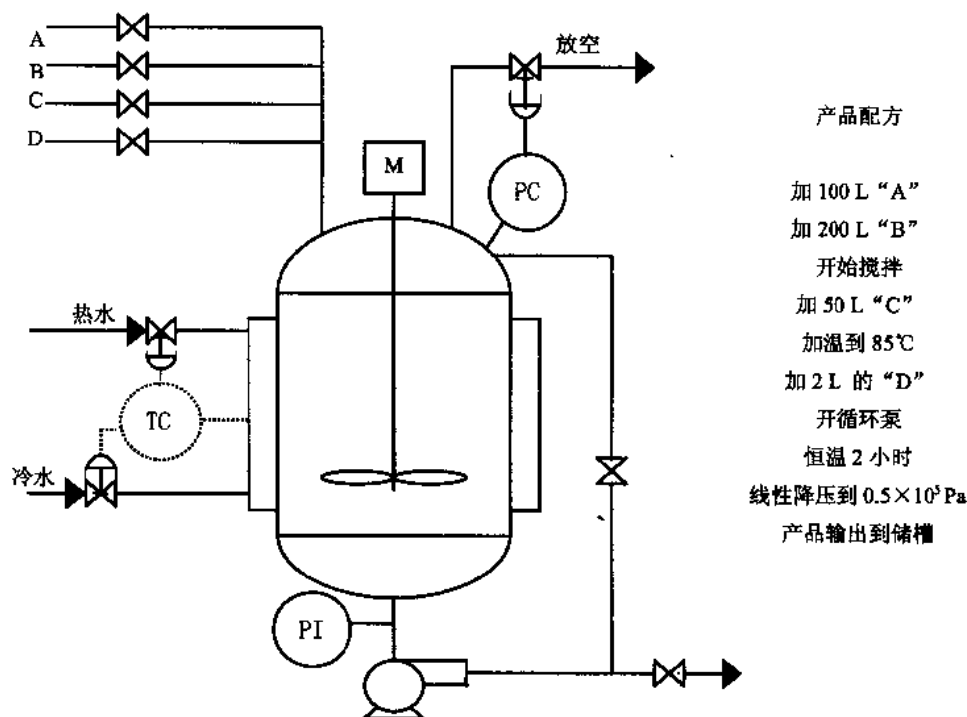


图 1.2 单产品间歇生产过程及其产品配方示例

批产品生产时，先按产品配方规定的顺序和数量，将 A、B、C 三种原料组分加入反应器，然后向反应器夹套通热水升温，待温度升到 85℃ 加入第四组分 D，开循环泵，诱导反应。一旦反应开始，反应器夹套改通冷却水，带走反应释放的热量，并在配方规定的反应时间内，保持反应温度恒定，使反应达到终点。线性降压到  $0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，将产品排入储槽，反应器放空、冷却，必要时进行清洗。下面以此例来说明间歇生产过程的基本特征和间歇控制的主要功能。

### 1. 顺序控制功能

间歇生产过程有一个确定的操作顺序，例如加料、反应、排料。这些操作及其执行的顺序由产品的配方规定，随生产的产品而变。所以要求间歇控制系统具有的一项基本控制功能是驱动生产过程一步一步地顺序执行不同的生产操作。前一步操作结束向后续操作进展由转移条件决定。工业上称这种控制模式为顺序控制。步转移条件仅仅取决于时间（例如停留时间，反应时间等），称为时间驱动顺序控制。步转移条件由被控对象的状态或发生的事件决定，称为事件驱动顺序控制。实际应用的顺序控制常常是这二种形式的组合。上述例子中，转移条件“反应器满了”为真，加料操作向反应操作转移，而反应操作向排料操作转移则是由配方规定的反应时间触发。

### 2. 离散控制功能

间歇生产过程中大量使用二位式控制器件，例如通/断型二位阀控制各种物料传输。每个进口阀和出口阀上都装有位置开关，在开始传输物料时，用来检查阀门的位置。间歇生产过程的现场输入/输出 (I/O) 信号 60%~85% 是开关量或数字量，模拟量仅占 15%~40%。常用的二位控制设备还有电机和泵。

### 3. 调节控制功能

在间歇生产中也要用连续调节回路来控制温度、压力等工艺参数，但是它们的工作方式

与控制连续生产过程不同。上例中反应器温度是由一个连续调节回路控制，在加料操作阶段，温度调节回路不工作，在反应器操作的加热阶段，温度调节回路控制流入反应器夹套的热水流量，防止出现温度超调。一旦反应开始，这个温度调节回路控制冷却水流量，保持反应温度恒定。在加热阶段向冷却阶段转移时，温度调节回路的参数可能要重新整定。所以在间歇生产过程中常常要求调节回路具有易于“重组”和“重整”的功能。

#### 4. 人-机接口

在间歇生产过程中，操作工人的干预是正常操作顺序的一部分，在生产中起十分重要的作用。一个关键的操作常常是由操作工人操纵控制系统启动的，而不是控制系统自动触发。在上例的反应阶段结束后，操作工人采样，然后根据样品测试数据来决定是继续反应，还是开始排料操作。在间歇生产中，操作工人不仅需要知道过程现在的状态，还必须了解下一步将做什么。设计一个与用户友好的人-机接口，向操作工人提供间歇生产真实的动态信息是决定间歇控制系统成败的一个关键。

工业上许多间歇生产过程常常比上述例子更复杂。间歇生产过程的相对复杂性可以用一个双坐标体系来表示。产品坐标表示工厂生产的产品品种及其不同的规格，范围从单一产品连续的批量生产到一个生产周期内进行多产品多批量生产。另一个坐标表示工厂的结构和利用方式，可以分为：

- ① 一条生产流程线或者多条生产流程线；
- ② 每条生产流程线用于单一产品生产或者是作为多用途的生产设备；
- ③ 具有“重组”生产流程线能力——“柔性连接”工厂。

将这两个坐标结合起来可以用来描述比较复杂的间歇生产过程（如表 1.3 所示）。

表 1.3 间歇生产过程相对复杂性

| 项 目              |                | 产 品 坐 标 |             |             |
|------------------|----------------|---------|-------------|-------------|
|                  |                | 单 产 品   | 固 定 的 多 产 品 | 周 期 的 多 产 品 |
| 过<br>程<br>坐<br>标 | 专用的单生产流程线      | 1       | —           | —           |
|                  | 多用途的单生产流程线     | —       | —           | 3           |
|                  | 专用的多生产流程线      | 2       | 2           | 3           |
|                  | 多用途的多生产流程线     | —       | —           | 4           |
|                  | 可重组、多用途、多生产流程线 | —       | —           | 5           |

图 1.3 表示如何将图 1.2 所示的单产品间歇工厂扩建成为多用途、多生产流程线的工厂，并且用来补充说明复杂间歇生产过程的一些附加特征及其对控制系统的特殊要求。

##### 1. 配方处理功能

间歇生产流程线中，同一设备可以用来生产不同的产品或者不同规格的产品。改变加入反应器的原料组分及其数量，改变反应温度、反应时间等操作条件，图 1.3 中所示的各个反应器可以用来生产不同品牌或者不同规格的产品。产品的配方包含了在同一设备中生产不同产品所需的全部信息。如何建立配方和管理配方是间歇控制的一项特殊的要求。配方中包含什么信息，配方对各种操作有多大的控制作用，决定了间歇生产过程的柔性。

##### 2. 共用设备管理

上例中二个反应器共用一个计量罐、一个产品储槽和一个冷/热水系统。当反应器并行操作时，控制系统必须协调它们的操作，解决它们对共用设备及其资源需求上产生的任何冲突和矛盾，包括出现超过共用资源最大容量等情况。

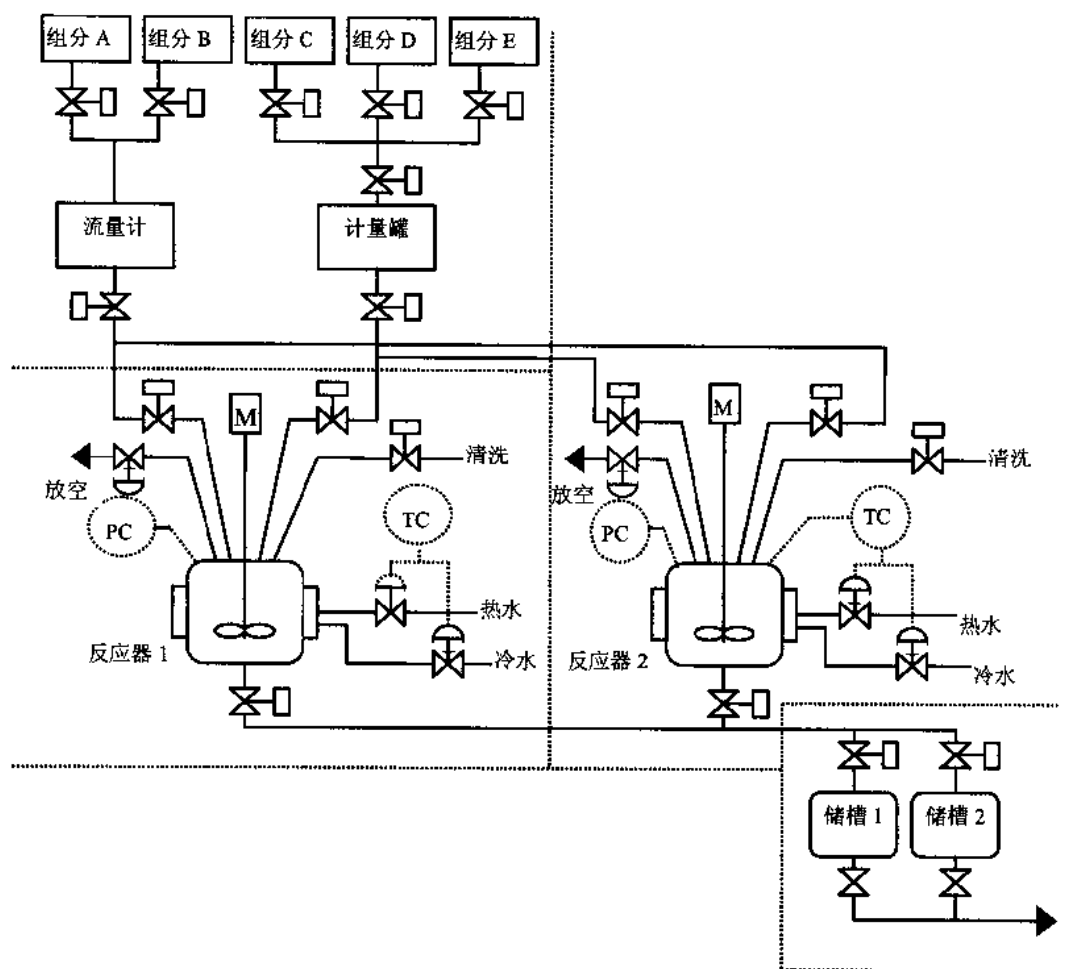


图 1.3 多产品、多生产流程线间歇生产过程示例

### 3. 生产的调度和跟踪

任何瞬间，间歇工厂同时进行不同批号、不同产品生产。各批产品处在不同的操作阶段。为了保证各批产品正常生产，要求控制系统具有生产调度功能，跟踪各批产品生产，使产品的配方、生产的路径、记录的数据与各批产品正确地对应。

综上所述，间歇生产过程在控制策略、控制功能和自动化技术等方面具有的特殊要求如下。

① 在控制策略上涉及许多顺序操作，步与步之间的切换有的是时间触发，有的是状态或者事件触发。

② 正是由于操作的顺序性，被控对象的特性是变化的。同时为了适应间歇生产频繁改变产品品种和规格的“柔性”操作，控制系统也必须具有柔性，易于“重组”和重新整定参数。

③ 间歇生产过程的操作优化与连续生产过程不同，其优化值一般不是一种恒定的稳态值，而应该是随时间变化的优化轨线。

④ 间歇生产过程的配方管理、生产调度任务繁重、复杂。

从以上分析来看，采用常规仪表和调节器来完成间歇生产过程的控制任务，每一项都有困难，或者是不可能的，只有采用计算机或者以微处理器为基础的控制系統，才能完美地执行这些任务。另外间歇生产过程的生产规模一般比较小，自动化投资不可能太高，因此也只

有随着微电子技术的发展, 计算机价格大幅度下降的今天, 间歇生产过程自动化才有普及和推广的可能。

### 1.3 间歇生产过程计算机控制

应用计算机控制间歇系统生产过程, 最早可以追溯到 1967 年, 德国 Hüls 公司在它们的聚合反应装置上应用计算机控制。尽管第一套计算机控制系统与 80 年代基于微处理器的控制系统相比要贵得多, 但是他们得出的结论是应该尽早地应用计算机替代复杂的继电器逻辑控制系统。1976 年 AIChE 间歇过程计算机控制研讨会指出: “从生产观点上说, 间歇生产过程是一项困难的操作, ……其固有的顺序特性向计算机控制提出特殊的要求。”

早期的计算机控制系统一般是双机热备份的直接数字控制系统 (DDC), 后来引入下层为可编程控制器 (PLC) 的分层控制系统。随着微处理器的出现, 基于微处理器的分散型控制系统的应用日益增多。大多数仪表制造厂都推出自己开发的间歇过程控制系统 (例如 Honeywell 的间歇过程控制, 或 Fisher 公司的 Provox) 和专用的编程语言 (例如面向顺序的编程语言 SOPL, 或西门子公司的 STEP 语言)。初期的间歇控制系统, 制造厂都把间歇控制系统并入它们标准的分散型控制系统中。

间歇过程计算机控制, 软件是一个重要的组成部分, 已经上市的面向间歇过程专用的程序包, 有些是用户开发的, 例如 ALBERT (Automatic Logger and Batch Executive for Reactor Timing) 是 Union Carbide's 开发的; AUTRAN (Automatic Utility Translator) 是由 Merch 和 Control Data 联合开发的。另外一些软件包是由大学或研究所开发的, 例如苏黎世 ETH 大学开发的 BATCHMAN。

多产品、多用途的间歇工厂, 在一段时间内生产多种产品, 而且每个产品的生产顺序不同, 生产路径不同, 所以这些间歇工厂的生产调度没有计算机辅助是很难达到最优的。已有的各种生产调度系统从所用的方法来看, 可以分为基于数学模型的方法和人工智能的方法。根据工厂当前的生产能力, 通过优化调度, 合理地分配能源、物料和设备, 安排生产, 以获得最佳的经济效益。

间歇生产过程计算机控制使工厂获得明显的经济效益。效益主要来自以下六个方面。

- ① 增加了产量, 计算机控制缩短了每批产品的生产周期, 并提高了设备的利用率。
- ② 提高了产品的质量, 计算机控制使每批产品质量均匀一致。
- ③ 降低了生产成本, 提高了原料、能源和设备利用率, 减少了废品率。
- ④ 在确保间歇生产过程操作重复性的同时具有更好的操作柔性。
- ⑤ 使生产更安全。
- ⑥ 通过严格控制和改进操作, 减少了对环境的污染。

前三项可以直接折算为工厂的收入。在多数情况下, 间歇生产过程计算机控制项目的投资能在 4~24 个月内全部回收。

计算机控制有利也有弊, 它的缺点主要有以下三个方面:

- ① 应用软件开发和管理的费用高;
- ② 现场仪表及其安装费用高;
- ③ 需要先进的工程实施服务和高技术的支持。

根据间歇生产过程的自动化程度, 间歇控制系统大致可以分成顺序间歇控制、程序间歇控制和综合间歇控制三种类型, 如图 1.4 所示。