



国际电气工程先进技术译丛

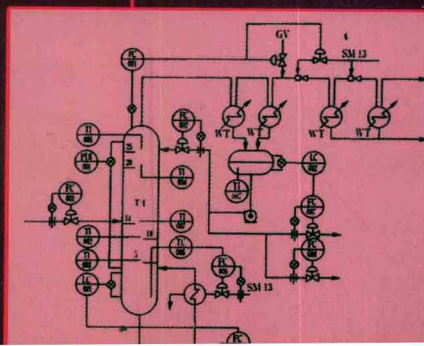
化学工业 中的过程控制

化学産業における制御

(日) 伊藤 利昭 编著
马立新 李孜 译



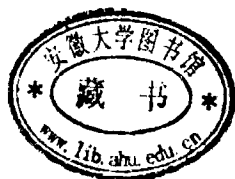
 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

化学工业中的过程控制

(日) 伊藤 利昭 编著
马立新 李 孜 译



机械工业出版社

本书主要介绍了以控制理论为先导的控制技术在化学工业中的应用。书中详细介绍了化学工业中仪表系统的设计流程和设计技巧；模型预测控制技术以及最佳控制在化工设备中的应用实例；批处理过程中调度控制的实现方法。本书面向实用化，以如何解决问题为视点，整理了典型的研究实例。对从事控制理论研究的技术人员，可通过本书以工业界亟待解决的课题为基础找到新的研究方向，结合其积累的经验将会取得更多更大的成就。

本书适用于工业自动化控制理论的工程技术人员，以及大专院校相关专业师生参考。

Copyright © 2002 by Toshiaki Itoh & Corona Publishing Co., Ltd. All rights reserved. Chinese translation rights arranged with Corona Publishing Co., Ltd. Tokyo, Japan through TOHAN CORPORATION. Tokyo, Japan.

本书的中文简体字版由机械工业出版社出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

本书版权登记号：图字 01-2009-5473 号

书名原文：化学産業における制御

英文书名：Process Control Practice in Chemical Industries

图书在版编目 (CIP) 数据

化学工业中的过程控制/ (日) 伊藤 利昭编著；马立新，李孜译.
—北京：机械工业出版社，2011.5

(国际电气工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-34118-5

I. ①化… II. ①伊… ②马… ③李… III. ①化工过程—过程控制
IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 063324 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：张沪光 责任编辑：张沪光

版式设计：张世琴 责任校对：申春香

封面设计：马精明 责任印制：乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2011 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·10.75 印张·206 千字

0001-3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-34118-5

定价：49.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

读者购书热线：(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

译 者 序

化学工业不仅是能源消耗大、废弃物多的产业，也是技术创新快、现代化程度高、发展潜力大的产业。化工生产过程是一个动态的连续过程，产出量、物料特性，甚至物料的加工路线都会受到原材料成分、人工操作技能、加工温度和压力、设备效率等因素的波动影响，并且具有不可预知性。也就是说物料配方和工艺参数的控制程度将影响产出率，相同的配方或原材料可产出不同产量的产品，原材料消耗比例可变，产品的生产过程中也会产生一定的回收物和废料，生产计划很难做到事前准确及时地规划具体品种的产量和回收物及废料的比。为此，化工生产过程中需要有很大弹性来处理实时跟踪、控制纠偏、动态调整等问题。

化工产业的质量管理也具有特殊性，不仅是对原材料、产成品的质量检验，更重要的是对生产过程中的质量控制。化学工艺或环境会影响到产品质量，需严格控制每个工艺步骤。重视过程质量数据的实时采集和化验分析是防止生产中产生出较多的等外品，甚至废品的重要的控制手段。

近年来，过程控制技术的进步是非常显著的。过去利用模拟信号进行运算的空气式或电子式 PID 调节器，现在全部被数字化。这也促进了化工行业的急速发展。众所周知，日本是自动化强国，在化学工业进行过程控制起步早、技术成熟，取得过令人瞩目的成就。本书中列举了大量实例，详细地讲述了模型预测控制技术、最佳控制技术以及质量控制方法以及过程仪表的设计流程。

本书作者具有多年的自动控制的研究经验，相信能给控制理论的研究人员以及自动控制专业的师生提供帮助。同时工业界的技术人员，有望通过本书结合自己积累的经验取得更好的工作业绩。

本书的译者多年来从事自动控制技术的研究、应用、管理以及翻译工作，对自动控制技术在该领域的应用和发展有着深刻的认识。本书的翻译工作得到了许多本领域专家的大力支持与协助，在此表示真诚的感谢。由于译者的水平有限，如有错误与不妥之处，敬请广大读者批评指正。

译者
2011 年 2 月

原 书 序

有过试图尽可能快地、并以更低价位生产出更好产品的人，大概都有一种欲罢不能的感受。在生产第一线，几乎是日益增长永无止境地追求着这个目标，而控制工程领域为了实现此目标作出了贡献。作为实现上述目标的直接方法，Automation（自动装置）是第二次世界大战以后在欧洲诞生的术语，控制技术则是占据了其核心的关键技术（Key Technology）。说到 Automation，让人联想到自动化，但是现代控制技术并不仅仅是自动化，还会结合系统化、最佳化和智能化，为了以更快、更低成本地做出更好的产品，在各个产业领域中不断地突破极限。

控制技术并不只是在制造产品过程中，在产品的使用中也被灵活地应用。为了提高汽车、照相机、空调器等消费品的功能，内置了先进的控制技术，使其附加价值得以提高。适用于制造技术的控制产品技术方面的应用范围也在快速扩大。而且在制造业范畴之外，控制技术也在日新月异地发展。

例如，飞机、火车、船舶等交通工具的控制是现代技术的一个重点，在环境产业中控制技术也发挥了关键技术的作用，而且通过家庭自动化，控制在提高个人生活方面也作出了巨大贡献。

最近，控制技术的显著发展在很多情况下负有推进各工业领域具体技术进步的责任。控制技术的基础是传感器和传动装置，如果没有与之相关的信号处理技术的进步，以及包含通信或图形接口的软件、硬件这两项计算机技术的进步，是根本得不到发展的。另一方面，控制技术也是与各工业生产共通而且普遍的技术，就是所谓的跨学科技术，是具有跨越了各行业具体技术的通用性技术。

这种情景类似于材料。材料在自然科学（力学物理或化学等）中有着普遍性，对控制而言，控制理论就充当了这个角色。控制理论和其他工程理论相比较，不仅具有非常古老的历史，最近也取得了令人瞩目的发展。控制作为普遍性学科，其控制理论与产业现场的控制技术之间的关系并不是直接的，但是却有很强的关联性。控制技术在近年来的发展中，控制理论发挥着至关重要的作用。

本系列专著中[⊙]，工业界控制技术的最新发展，以控制理论的贡献为主线来

⊙ 日文原书为系列专著。

介绍各领域中的成熟技术。基于控制理论的控制系统设计追求合理性，就是在基本成型的产品生产现场可以达成怎样的控制效果，作为这个系列专著的中心课题。到目前为止，已经出版过大量控制理论方面教科书、手册和专业书，有限领域或对象的控制技术方面的手册类书籍也不在少数。但是到目前为止至少在日本还没有出版过像本系列专著这样覆盖各个产业领域，从理论观点讲述与技术相关的控制方面书籍。我们相信这个系列专著会给在制造或开发现场兢兢业业工作的控制技术人员、希望了解控制理论应用现状的研究人员，以及学习控制相关知识的大学生们提供一套十分有用的参考书。

书中，变形后的瓦特离心调速器的封套设计图样是由北神由子提供的（译本封面未采用此图）。并借此机会对向本系列专著提供了相应成果的各位表示衷心感谢。

策划、编辑委员长 木村 英纪

前 言

在过去的 30 年里，过程控制技术的进步是非常显著的。以前利用模拟信号进行运算的空气式或电子式 PID 调节器，现在已全部数字化，与电子计算机结合就可以通过复杂的运算完成 30 年前从未想过的各种控制。

模拟运算时代的高级控制，比如锅炉的燃烧控制或给水控制，是以各种运算器和 PID 调节器组合而成的多回路控制系统为代表的。现在，多变量控制和最佳控制利用计算机完成类似监视器的高级控制方法已经实用化。

在这期间，控制对象从温度、压力、流量、液面等单一变量到反应器、蒸馏塔等单元过程，更进一步扩大到合成氨、乙烯等生产设备整体。与此同时，作为控制变量的不只是温度、压力、流量、液面等测量变量，还有表示消耗比、产出率、质量等表示过程、装置或者产品性能的工程变量，而且还涵盖了成本、效益等经济变量和交货日期等业务变量。

这些进步是以控制理论为先导的，控制技术又不断促进新的控制理论的发展，使控制技术与控制理论更好地结合在一起。

本书主要讲述在化学工业中的控制理论和控制技术的关联，作者长时间工作于三菱化学公司，工作期间的一些代表实例被选为本书的中心论题。

第 1 章，主要讲述化工行业中仪表系统的基本设计流程，并介绍为提高控制性能而采取的各种各样的方法。

第 2 章，主要讲述模型预测控制技术在合成氨制造设备中的应用实例，在不等式约束条件下的稳态最佳化技术，利用该技术与传统的 PID 控制相结合，大大地提高了控制效率。

第 3 章，列举了乙烯生产设备中采用的实时闭环最佳控制的实例。基于物理模型中的未知参数的推测和已知的过程模型，利用非线性规划法求出能获得最大效益的最佳运行。控制方面对应原料、产量和设备特性的变化，结合模型预测控制的技术，实现能够维持常规最佳运行点的控制系统。

第 4 章，主要讲述为了实现焦炭生产设备的最佳烧结温度分布，应用预测控制系统的实例。在预测目标值轨迹或连续扰动情况下，采用预测控制可以使控制性能大幅提高。

第 5 章，列举批量生产过程中实施调度控制的实例。利用规则库或结合最

佳算法，对应运行状况进行调度控制，力求提高批量生产的能力。

第6章，主要讲述聚合物生产过程中的质量控制。质量控制中，实时进行质量检测大多是比较困难的。而且聚合过程中，像分子量分布这样的分布量会影响质量，因此需要解决的技术课题比较多。本章以面向实用化时亟待解决的课题为视点，对国内外的研究实例做了系统整理。

控制理论的研究人员和立志于控制理论研究的读者们，如果能通过本书，以工业界的课题为基础，能够探索出新的研究方向的话，我们将感到十分庆幸。我们同时还期待工业界的技术人员，在本书的基础上，结合自己积累的生产经验，创造更多的工作业绩。希望立志从事控制技术工作的读者，能意识到除控制理论以外，还需要很多实际经验方面的知识。

本书的各章是由在各自的技术开发中付出艰辛劳动的诸位同仁共同执笔的。作者自私地接受了诸位的研究成果并编纂成册，在此谨向付出辛劳的各位表示真诚的感谢。向鼓励作者编写完成本书的木村英纪先生、江木纪彦先生表示真诚地感谢。并且向始终致力于本书出版的口口十出版社的各位真诚地致礼。

以下为各章参加编写的人员名单：

第1章 伊藤利昭（名古屋工业大学）、山本重彦（工学院大学）

第2章 石川昭夫（三菱化学 BCL）

第3章 江本源一（三菱化学）

第4章 布川 了（三菱化学）

第5章 河野浩司（三菱化学）

第6章 薮龟恭明（三菱化学）

伊藤 利昭
2002 年 10 月

目 录

译者序

原书序

前言

第 1 章 化学过程中控制系统的设计	1
1.1 概述	1
1.2 化学工业中仪表系统的作用与变迁	1
1.3 仪表系统中控制环节的设计流程	4
1.4 过程自由度和过程变量的分类	9
1.5 过程仪表中使用的各种控制系统	14
1.6 如何提高过程仪表中的控制性能	21
1.7 从实用的观点来看控制运算上的方法	26
1.8 控制系统性能的监测和改善活动	32
1.9 小结	35
参考文献	36
第 2 章 合成氨设备中的多变量模型预测控制	39
2.1 概述	39
2.2 合成氨设备的概况	39
2.3 最佳控制系统的功能和构成	43
2.3.1 最佳控制系统的功能	43
2.3.2 最佳控制系统的构成	43
2.4 附加稳定最佳化功能的模型预测控制	44
2.4.1 阶跃响应模型和预测计算	45
2.4.2 LP 优化器	48
2.4.3 模型预测控制	49
2.5 设计与实际应用的结果	51

2.5.1 转化系统的 DMC 控制器	51
2.5.2 合成系统的 DMC 控制器	54
2.5.3 氢精制系统的 DMC 控制器	55
2.6 实用方面的技巧与课题	55
2.7 小结	56
参考文献	56
第3章 乙烯设备中的最佳控制	58
3.1 概述	58
3.2 乙烯设备和最佳控制系统	58
3.2.1 乙烯设备的概况	58
3.2.2 最佳控制系统的导入情况	59
3.2.3 最佳控制系统的构成	59
3.3 利用 LP 和模型预测控制进行产量最大化的控制	60
3.4 全部设备的实时最佳控制	61
3.4.1 RTO 概况	62
3.4.2 基于方程式的建模	62
3.4.3 最佳化实例——分解炉	64
3.4.4 最佳化实例——分解气体压缩机	64
3.5 RTO 实用化的技巧	65
3.5.1 大规模数值计算的高效化	65
3.5.2 调节制约的优先顺序	67
3.6 小结	69
参考文献	69
第4章 焦炭设备中的最佳预测控制	71
4.1 概述	71
4.2 过程的概况和控制系统的必要条件	71
4.3 具有预测目标值与扰动功能的控制系统	72
4.4 预测控制系统的构造和控制动作	75
4.5 焦炭炉温度控制的应用	77
4.5.1 过程辨识	77
4.5.2 预测控制的模拟与参数调整	77
4.6 小结	82
参考文献	82

第5章 批处理过程中的调度控制	84
5.1 概述	84
5.2 批处理过程的特征	84
5.3 批处理过程中的调度技术	85
5.3.1 基于最佳化的方式	85
5.3.2 试探法	86
5.4 调度控制的实例	89
5.4.1 具有并联结构的批处理过程中的调度控制	89
5.4.2 具有网络结构的批处理过程中的调度控制	97
5.5 小结	107
参考文献	108
第6章 聚合物生产设备的质量控制	110
6.1 概述	110
6.2 聚合物生产设备的质量控制课题	111
6.3 质量估算和软传感器	113
6.3.1 基于理论模型的质量估算	113
6.3.2 基于数据库的质量估算	119
6.4 聚合物生产设备的质量控制实例	123
6.4.1 基于理论模型的质量估算实例	123
6.4.2 基于数据库模型的质量估算和控制实例	128
6.5 连续生产设备中的等级切换控制	131
6.6 批处理过程的质量控制	139
6.7 小结	147
参考文献	148
附录	150
附录A 第5章5.4.1节第4条的补充说明	150
附录B 卡尔曼滤波器	156

第 1 章 化学过程中控制系统的设计

1.1 概述

自从 1980 年出版 Alvin Toffler 的“THE THIRD WAVE”以来，被称作后工业化社会或信息化社会的第三次浪潮席卷而来。

Toffler 称从公元前 8000 年的远古时期就已经开始的农耕文化社会为第一次浪潮；19 世纪的工业革命以后的工业化社会为第二次浪潮。从控制技术的角度来看，第一次浪潮意味着人类可以通过农耕来得到衣、食、住所必需的物质形态；第二次浪潮则意味着能够控制蒸汽能量形态。Toffler 所说的第三次浪潮则是物质、能量与信息相结合，将会迎来更加繁荣富有的社会。

物质和能量通过信息手段进行控制就是将信号变送器、调节器和调节阀等操作端通过空气压力信号或电气信号结合在一起。从 1930 ~ 1940 年开始进行生产设备的控制发展至今。从这点来讲，在过程仪表领域里，Toffler 预言的第三次浪潮已经提前到来了。

Toffler 预言的新浪潮即将到来的背景是，他对社会变革的独到分析，加上对以微电子为中心的技术革新的敏感性。

在过程仪表领域，1975 年开发了内置微电子计算机的控制系统，之后该领域发生了巨大的变革。随后的 25 年中发生了很大变化，如仪表系统从模拟方式发展成数字方式；控制方法也从单回路发展到多回路，多变量的控制。不只温度、压力、流量等工程变量，成本和效益等经济变量也被涵盖为控制变量；温度、压力等单变量的控制发展成为反应器、蒸馏塔等单元过程的控制以及合成氨、乙烯等生产设备整体的控制。现在，信息技术的进步促使企业超出其自身的框架，迎来企业活动整体控制和生产链管理等控制领域的新时代^[1]。

以 PID 控制为代表的单回路控制方面，从 JEMIMA 或 SICE 的调查报告^[2,3]可以看出，占了总体控制的 90%。保持流量、压力等工程变量固定的基本控制系统充当了重要的角色。

在本章，主要介绍过程仪表中控制系统的基本设计方法。

1.2 化学工业中仪表系统的作用与变迁

图 1-1 所示的是化学工业中仪表系统的变迁。

图 1-1a 示出的是测量流量的压力计和手动阀安装在控制现场的仪表盘上的照片。最早的仪表系统的作用就是实现一边观察、记录测量值，一边操作阀门。然而，长时间的手动操作，需要相当强的集中精力的能力，对人来讲，是要求很严格的工作，而且操作准确度也较差，并且需要很多的操作人员。

为了解决上述缺点，置于将现场检测端信号发送的变送器、自动完成信号记录和调节的记录调节器以及可以自动操作的调节阀登场了。图 1-1b 示出的是配备了大型空气式记录调节阀的测量仪表盘的例子。这样的仪表系统在相当程度上实现了设备运行的自动化。

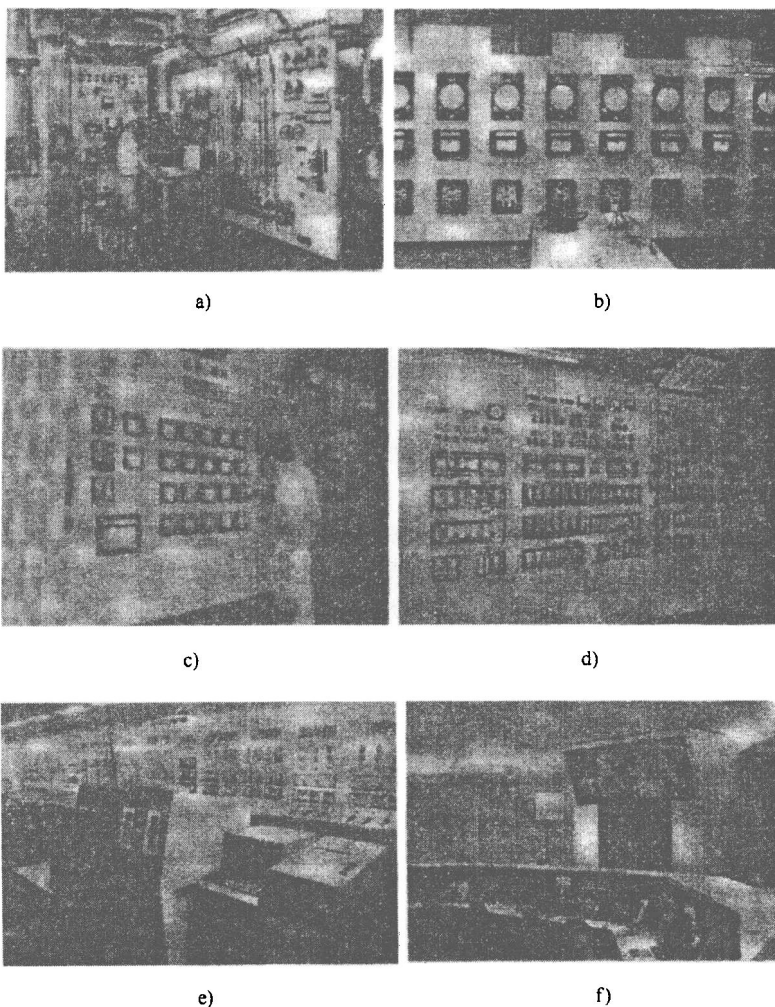


图 1-1 仪表系统的变迁

为了实现化工设备连续、高效、稳定地运行,将设备的仪表系统集中安装在一个地方,提高设备整体的管理水平成为了重要课题。中央仪表室和小型记录调节器可以解决该课题,图 1-1c 所示的就是这样一个例子。另外,为了提高设备整体的监测性和操作性,可以采用图 1-1d 所示的多级密集型测量仪表。

到目前为止,以上测量仪表中主要用的是大气压力信号作为信号传输的媒介,因为该方法对传输距离和接收仪器小型化的限制较大,随着生产设备的大型化,开始转向使用电气信号作为传输媒介的电子仪器,利用电子计算机完成数据记录等应用相继出现。

在使用计算机进行控制的最初阶段,因为电子计算机价格昂贵,而且有时需要应对计算机故障时的设备要继续运行的备用对策,所以只有很少的一部分生产使用计算机控制。随着 LSI 技术的进步和微处理器的出现,8~32 条电路里分别设置微处理器,以数字信号为基础的集散控制系统(DCS)被开发。机械式或者电子式实现的控制算法,相继被软件化、数字化。另外,还提出用 CRT 和键盘操作方式来取代传统的仪表盘。

上述集散控制系统指的是,在批处理过程中,将传统仪表系统难以实现的模拟控制与连续控制相结合形成混合型控制,并在配方管理中发挥作用。而且,有些情况虽然也是连续过程,但是利用模拟方式难以控制,具有复杂的动态特性的过程中混合控制也能发挥其控制效果。同时,其他实际应用上的成果也在不断增加^[4,5]。

作为人机对话接口的 CRT 和键盘,当初只利用 CRT 的特长,例如图像显示和菜单管理来进行运行管理。运行操作是利用如图 1-1e 所示的传统的仪表盘实现的。之后,利用 CRT 与键盘相结合实现了像操作员接收检测信号一样的,具有较宽监测范围的综合仪器室。该方式如图 1-1f 所示,并且越来越受到重视。

如图 1-2 所示,如今的仪表系统连同过程计算机,结合商业计算机或互联网,能够完成从原材料的调配到面向顾客的产品入库方方面面的控制。作为企业内或超出企业框架的综合控制系统的一部分占据着重要的位置^[1,6]。

过程仪表技术是由硬件发展引导的^[7],当初的职责只是实现自动化,如图 1-3 所示。如今则是通过精密的控制,可以节省原料、共用设备、维修费等;通过极限设计来节省建设费;通过提高产品质量来扩大市场和提高销售单价,从而增大销售额等。上述定量效益得到确保是理所当然的了,与此同时,还在提高管理效率和安全性、技术改良等定性效益的相关方面担任着重要的技术角色^[8]。

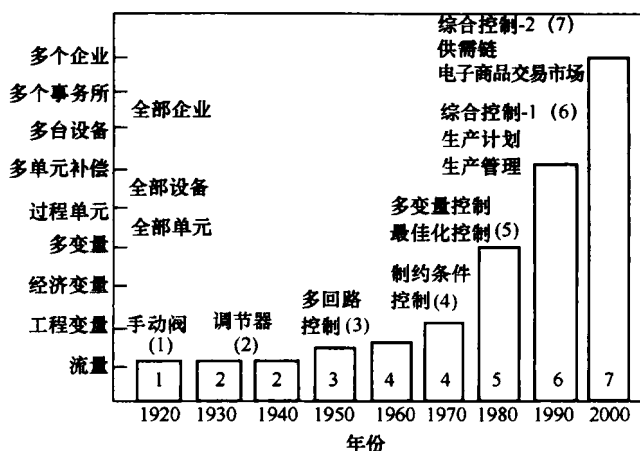


图 1-2 过程控制技术发展的步伐

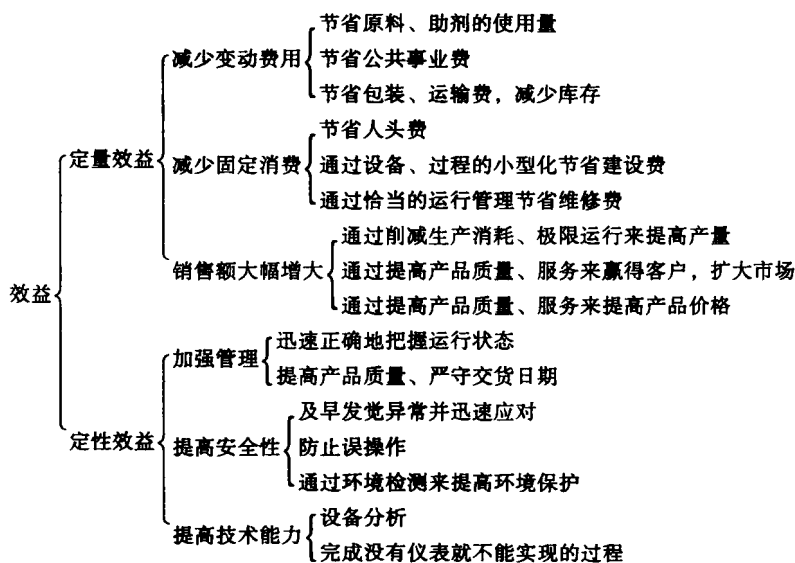


图 1-3 仪表系统产生的效益

1.3 仪表系统中控制环节的设计流程

图 1-3 所示的过程仪表的作用范围很广，其中基本作用是实现过程的稳定操作并确保其安全性。以此为基础还须保证产品的质量和产量，实现灵活运行、经济运行、极限运行^[9]，见表 1-1。

表 1-1 设备运行的发展

阶段	运行内容的演变	运行目的	运行内容	过程仪表的地位
1	稳定化运行	确保设备的“可靠性”	确认各设备机器是否满足要求地工作	尽力消除初始不良因素，使发动机稳定起动，同时为阶段 2 做准备
2	质量运行	确认设备的“质量”	确认是否具有能力生产规定质量的产品	以产品质量与运行条件的关联性、可控性为重点，同时为阶段 3 做准备
3	容量运行	确认设备的“容量”	确认设备是否具有与设计一致的容量	分析额定运行中设计与实际情况的差异，同时为阶段 4 做准备
4	最佳运行	追求设备的“经济性”	以阶段 2、3 的经验为基础力图实现效益最大的运行	从最佳控制的角度对仪器的准确度，是否需要分析仪、控制算法等进行全面改善
5	高稳定运行	探讨“生产极限”	在最佳运行下，持续进行极限运行	改良设备的瓶颈问题，为提高设备的可靠性尝试所有可能的方法

为了确保过程的稳定可操作性和安全性，需要注意以下两点：

- a) 为了能够完全把握过程状态，通过仪表系统对过程变量进行测量；
- b) 为了能够完全规定过程状态，通过仪表系统对过程变量进行控制。

并且必须能够应对正常运行、启动/停止、发生异常、发生紧急事态等各种场合。

仪表系统中的控制系统就是要考虑到上述课题的同时完成如下所述的设计步骤。

1. 认识环境与把握设计目的

如原料、水、电力等资源的筹措；掌握产品的销售市场；所在区域的可利用技术和人才等布局环境须有把握，并明确设计目的与约束条件。

2. 掌握过程与仪表系统的构想方案

掌握对象过程的原理、工序、物资收支、能量收支、物资使用、公共事业、装置特性等情况，区分正常运行模式、启动停止模式、紧急模式，对设备操作性进行确认。明确人与机器各自承担的任务，制定包含管理系统的仪表系统整体构想方案。

3. 过程变量的分类与选择测量变量、控制变量和操作变量

过程变量中，根据测量什么变量（选择测量变量的）、控制什么变量（选择控制变量），操作什么变量（选择操作变量）等进行分类。过程变量的分类是以过程自由度的概念为基础，斟酌测量或操作的难易度以及测量的可靠性而决定的。

4. 控制系统的结构设计

设计控制系统结构时, 需要考虑控制变量和操作变量进行怎样的组合; 在反馈控制系统中搭配怎样前馈控制等问题。控制系统通过电路组合形式, 可以实现串级控制、比值控制、选择控制等各种控制系统。控制系统结构设计的结果整理如图 1-4 所示的 P&ID (Piping and Instrumentation Diagram)。

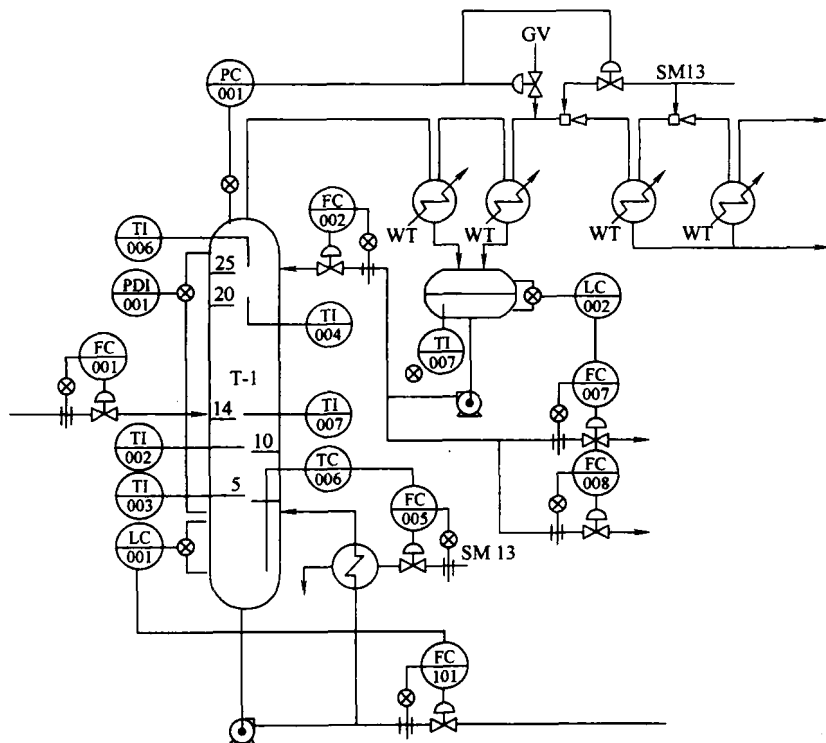


图 1-4 P&ID 的实例

5. 仪表仪器以及仪表设备的设计

需要进行设计的仪表仪器包括从过程测量中将信号取出的检测端; 将检出信号变换为传送信号并可发送的变送器; 操作流量的调节阀; 接收传送信号并进行记录、指示、监视等操作, 并将控制运算的结果输送到调节阀等操作端的控制装置。检测端、变送器、调节阀和控制算法一样是决定反馈控制系统特性的结构要素之一, 在控制系统设计上是非常重要的。

6. 控制算法的设计

综合考虑过程、装置、仪器仪表的特性, 进行控制算法的设计以得到所期望的控制动作。控制系统的分类方式有: 根据目标值的赋值方法分为固定控制系统和伺服控制系统; 根据扰动或目标值的变化分为反馈控制系统和前馈控制