

韦士平 著

生产装置调优与节能

中国石化出版社

SHENGCHAN ZHUANGZHI TIAOYOU YU JIENENG

100-19

W 48

生产装置调优与节能

韦士平 著

中国石化出版社

(京)新登字048号

内 容 提 要

本书介绍了作者10年来在现有工业生产装置上调优所做的工作以及所取得的经验,从数学基础、调优方向、调优准备、统计调优、模拟调优、化工流程系统模拟、综合法调优和最优化等方面加以论述,最后附有调优工作常用的源程序。

本书适于从事工业生产的工程技术人员阅读,也可供高校师生及科研、设计人员参考。

生产装置调优与节能

韦士平 著

中国石化出版社出版

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码:100029)

海丰印刷厂排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 19印张 453千字 印1—5000

1992年7月北京第1版 1992年7月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-242-4/TQ·128 定价:9.85元

序

应用电子技术改造和武装传统产业，推进技术进步，提高经济效益，增强竞争能力，是企业发展的必由之路。当前世界石油化工企业已把采用以电子计算机为中心的现代化管理及过程控制技术，普遍做为节约增效竞争取胜的重要手段。我国石化工业也正在运用电子技术改造现有的企业，其势方兴未艾。

运用电子计算机对生产装置调优，是一种建立在对生产规律认识基础之上，通过调整工艺操作参数，使生产过程处于最佳运行状态，获取经济效益的行之有效的办法。它投入少，产出多，见效快，80年代以来，已被国内外各行业广泛采用。目前风行的调优技术有统计调优、操作模拟分析、装置模拟与优化、模式识别等方法。这些方法都在实用中取得了平均降低原材料消耗1~3%、降低能耗3~8%、保证产品质量、提高产品产率等较好的效益。

《生产装置调优与节能》一书，融石油化工基础知识、生产经验、计算机应用技术于一体，它运用现代各种调优技术，针对现有石油化工生产装置的实际，全面分析了生产调优的必要性和潜力，系统论述了调优技术的基本知识和方法原理，通过各种实例详细阐明了不同调优技术的实施方法和运用技巧，并给出全部计算机源程序及有关软件包的解释和使用说明，可使读者比较容易地掌握调优技术，解决工作中的实际问题。本书的特点是理论联系实际，非常重视与生产工艺人员有关的生产设备及管理方面的基础工作。作者自80年代以来在石油化工企业完成了十几套大型生产装置的调优工作，都取得了明显的效果，且不断深入发展。故这是一本对从事工业生产的技术人员有实用价值的书籍，因此愿为之作序，并衷心地推荐给广大读者。

秦瑞岐 1990.8

前 言

60年代美国BOX教授根据进化论的观点提出了EVOP法调优;日本目崎令司提出了M-EVOP法;黄华南提出了OSA法。70年代以来,我国在统计调优、模拟调优以及模式识别调优等方面做了大量工作,取得了明显的经济效益。目前,很多炼油、石油化工和化工装置的规模趋向于大型化,如果能通过优化方法,实现不增加设备,不用投资,依靠内涵而获得明显经济效益的设想,则将促进国民经济的发展。因此,现有工业生产装置调优是一件很有意义的工作。

采用调优方法可以部分解决诸如改进工艺技术、提高设备利用率、降低能源和物料单耗、防止污染、提高经济效益等问题。优化对于技术较先进的工业生产装置也同样有着重要意义。

作者自70年代参加石油化工生产建设工作以来,在开车及正常生产的长期实践中深深地体会到,现有工业生产装置大多数不在优化的操作条件下运行,经过调优能取得明显的经济效益。作者于80年代初开始了调优工作,先后完成了环氧乙烷、甲苯歧化、芳烃抽提、二甲苯蒸馏塔、己烷蒸馏塔系统等十几套装置的优化,取得了明显的经济效益。采用的调优方法有统计调优法、模拟调优法以及多元统计分析法,并提出了新的综合调优方法。

工业生产装置优化所用的基础知识——模型化、数理统计、化工系统工程、计算机算法和最优化计算方法等早为人们所熟知,但取得实际的调优成果并不容易,这表明调优工作还有不少难点。作者在长期的调优实践过程中也遇到不少问题,在解决这些问题时积累了一些经验。为了帮助调优人员掌握调优的方法,作者将调优工作加以总结,写成这本书。

本书介绍了调优步骤、变量选取、数据采集、建立数学模型、建立约束条件、最优化以及进行工业优化试验的方法等内容,还附有调优的计算机源程序及实例。

虽然作者所进行的调优工作是在石油化工装置上实现的,但完全可以推广用于其它工业生产装置,例如,化工、炼油、轻工、建材、采矿、冶金、电力、电子工业、油田以及医药工业等。

本书共分九章。第一章绪论,概述了全书的主要内容,提出了现有工业生产装置不优化的原因。第二章数理统计,为调优技术人员提供了数理统计的初步知识以及计算机源程序。第三章调优方向,介绍调优的潜力在哪里及在哪些方面可以开展调优工作。第四章介绍调优的准备工作。有些人调优不能成功,就是因为准备工作不够。例如,数据不准确、误差太大、物化分析不准、仪表不准、缺少关键数据、物料不平衡等等。第五、六、七、八章分别以统计调优、模拟调优、化工流程系统调优以及综合法调优为题,详细论述各种调优方法的原理、步骤以及计算机源程序的使用方法,并附有作者进行调优的实例。这四章是本书的主体部分。第九章最优化,介绍了最优化方法以及实例。书中给出参考文献90篇,其中32篇是作者在国内外发表过的。最后,附录中还提供了6个常用的源程序清单。此6个程序及其它调优工作用到的源程序全部录入软盘内,由中国石化出版社一并发行,使用中如有问题请与作者联系,作者对于书中的调优技术及软件可提供技术咨询及服务(通讯地址为辽宁省辽阳市辽阳石油化纤公司信息中心韦士平,邮政编码:111003)。

中国石油化工总公司原副总经理张万欣对本书的编写给以亲切的关怀和指导；生产部秦瑞岐副总工程师对本书提出了许多宝贵意见，并积极支持与推荐本书的出版，在此致以衷心的感谢。辽阳石油化纤公司总经理杨文通、副总经理李延煜以及总工程师阚学成对调优工作大力支持，使化工装置调优技术能在辽阳石油化纤公司开花结果，取得明显的经济效益，作者表示深切的谢意。

辽化信息中心、生产处、技术处、生产技术处、设计院、化工一厂、化工二厂、化工三厂、化工四厂、纤维二厂、研究院、设计院、辽阳石油化工专科学校以及科学技术协会的领导及同志们对调优工作大力支持和帮助，使调优工作能顺利开展，取得成果。庞东升、叶长田、赵世杰、熊树学、刘家仁、杨萍、赵智一、曲平、丛澜波、王宏、王薇、赵世民、徐兴国、张殿华、张士波、肖颖辉、郭宝林以及张海清等同志，10年来先后与作者合作完成了大量的调优工作，本书能够写成，与他们的努力是分不开的。大连理工大学、大连大学和辽阳石油化工专科学校的几十名同学和老师也为调优做了不少贡献，特别是大连大学的陈亚文同学编制了多功能回归调优程序包，李洪安同学完成了二甲苯蒸馏塔调优。周凤英、韦丽、韦华、金香、孙振东、李卫等同志在本书的抄写、制图以及文字加工等方面做了不少工作，作者均表示诚挚的谢意。

本书承化学工业部经济信息中心杨友祺教授和王擎天高级工程师在百忙之中挤出时间审阅，对本书的写作给予许多有益的指导和帮助，特在此表示诚挚的感谢。

限于作者水平，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 优化可提高经济效益	1
第二节 优化实例	1
第三节 优化的深度	2
第四节 优化的广度	2
第五节 现有工业生产装置优化的潜力	3
第六节 现有工业生产装置不优化的原因	3
第七节 优化的效果	5
第八节 调优方法	7
第九节 优化的阶段	10
第十节 小结	11
第二章 数理统计	12
第一节 一元回归分析	12
第二节 多元逐步回归分析	20
第三节 实用多功能逐步回归调优程序(EOST)	47
第三章 调优的方向	55
第一节 反应工程优化	55
第二节 分离工程优化	61
第三节 系统优化	62
第四节 生产计划优化	63
第四章 调优的准备	64
第一节 生产工艺的模型化	64
第二节 调优装置的选定	64
第三节 调优部位的选定	65
第四节 数据的采集	65
第五节 流量仪表的校正	67
第六节 物化分析	71
第七节 物料平衡	73
第八节 用电子计算机计算数据	75
第五章 统计调优	81
第一节 经验模型	81
第二节 用多元逐步回归分析法推导数学模型	82
第三节 数据筛选	84
第四节 推导经验数学模型的实例	86
第五节 统计调优的实例	88
第六章 模拟调优	110
第一节 机理模型的建立	110
第二节 空气法乙烯氧化制环氧乙烷工艺的模拟和优化	111
第三节 氧气法乙烯氧化制环氧乙烷工艺的模拟和优化	118
第七章 化工流程系统调优	123
第一节 Microchess化工流程系统模拟软件	124
第二节 己烷蒸馏塔系统调优	135
第三节 裂解气深冷分离系统调优	140
第四节 工程化学模拟系统ECSS	146
第八章 综合法调优	150
第一节 概述	150
第二节 液化气蒸馏塔系统调优	151
第九章 最优化	162
第一节 化工工艺数学模型的特点	162
第二节 拉格朗日乘法最优化	164
第三节 实用优化方法	174
第四节 优化控制	187
参考文献	188
附录一 F分布数值	191
附录二 源程序清单	192

第一章 绪 论

第一节 优化可提高经济效益

建设一个大型炼油、石油化工、化工联合企业要耗费几亿到几十亿元的巨额投资，投产以后，希望能发挥最大的经济效益，为国家积累更多的资金。提高现有工业生产装置经济效益主要有四条途径：

- (1) 加强经营管理；
- (2) 采用先进技术改造生产工艺；
- (3) 采用先进设备取代旧设备；
- (4) 充分发挥现有工艺和设备的潜力，使装置在最优条件下运行。

其中生产工艺和设备的改造要花费较多的投资，并且常常要到1~2年以后才能见到实效。但是，生产装置的操作优化不用改动设备，不用投资，投入使用以后，立即见效，这是提高现有工业生产装置经济效益的多、快、好、省的办法。有人把优化称之为“不用投资的技术改造”，这种说法是很有道理的。

第二节 优 化 实 例

一、保温层厚度的优化

工厂工艺管线保温层越厚，热量（或冷量）的损失越少，能节省更多的能量，可是管线的建造费用增加。这时应根据总费用最低的条件优选出最优保温层厚度。

二、催化剂工作周期的优化

催化剂工作周期越长，催化剂费用在产品成本中所占的比重越小，但催化剂工作后期，性能常常恶化，使产量降低，物料及能源单耗增加，产品质量下降，这也有一个优化问题。

三、配方优化

原料配方既牵涉质量问题，又与成本有关。要优选出既保证产品质量，而成本又最低的配方。

四、蒸馏塔的优化

回流比是决定产品质量、回收率以及能耗的关键操作参数。增加回流比，提高了塔顶及塔底产品的纯度，同时也提高产品回收率，但能耗增加。因此，蒸馏塔的优化主要就是选择出总经济效益最好的回流比。

五、换热的优化

多个换热器合理安排可节约能源，达到换热网络的优化。

六、化学反应的优化

选择合适的反应操作条件，可以提高产量，提高选择性，降低原料消耗，有明显的经济效益。

第三节 优化的深度^[40]

一、战略规划

建立长远目标及计划，要广泛涉及企业的经济、政治及社会环境，掌握可利用的资源、市场、经济、技术、竞争对手及其它信息。其数学模型的特点是简单而适应性强，与企业各种数据库的存取访问方便，通常可指导 1~5 年。

二、战术规划

战术规划是战略规划的具体实现，包括投资分析及决策、年操作费用预算、设备扩建或停产、价格确定、生产线调整、市场开发、竞争反应等等，通常可指导 3~12 个月。

三、系统操作规划

在战术规划指导下建立全系统的季节性操作计划，包括季度工厂能力变化、原料价格变化、产品质量规格、价格及成本、对产品销售合同及原料供应合同评价等。这种优化计算通常能指导 1~3 个月。

四、工厂操作优化

对单独一个生产装置建立近期操作目标，计算适宜的生产条件以使产品在符合规格的前提下成本最低。这种优化往往是离线指导，适用 1~3 个月。

五、时序化

根据单独一个装置的短期生产条件，安排出可执行的操作时序，包括开车、停车、各单元操作的条件、库存水平等。这对于间歇操作的生产（批处理）尤为重要。例如，一套装置用以生产多种产品，先生产什么，后生产什么，用哪些设备，按什么条件操作等等。

六、单元操作优化

这已属于高级过程控制范畴。对一个或几个单元建立最优化操作目标，根据下层信息及上层给定的约束条件，计算最优化操作条件，3~10 个输出。这可以是离线指导，也可以是在线开环或闭环控制。

七、监督控制

按一个单独单元过程，根据下层信息及上层给定的优化条件，计算出最优化操作时各常规控制仪表的给定值。

八、常规控制

其任务是保持每个控制回路自动调整，使目标变量维持在给定值上平稳操作。

第四节 优化的广度

实际中有许多可以应用调优技术的地方。例如：

(1) 化学工业：硫酸、硝酸、氯碱、纯碱、尿素、合成氨、磷肥、无机盐、橡胶、医药（例如抗菌素生产及合成药物生产等）、油脂、洗涤剂、染料、颜料、涂料、城市煤气以及精细化工等。由于化工产品太多，无法一一列举。

(2) 轻工业：塑料加工、造纸、制糖、酿酒、食品以及木材化学工业等。

(3) 建材工业：水泥、石灰、玻璃、陶瓷以及新型建材产品等的生产。

(4) 采矿冶金工业：矿石浮选、炼焦及炼焦化学品回收、炼铁、炼钢、有色金属冶炼以

及化工冶金等。

(5) 电力工业：锅炉。

(6) 电子工业：半导体材料生产。

(7) 石油工业：采油、油品分离及初步加工、油品储运。

(8) 炼油及石油化工：炼油以及三大合成工业（塑料、橡胶、化纤）、新三大合成工业（合成纸、合成木材、合成革）、石油化工原料工业（乙烯生产、芳烃生产等）等。

总之，凡是进行物质和能量传递和转化的生产过程均可优化。当然，其它生产过程也同样有优化问题。

第五节 现有工业生产装置优化的潜力

现有工业生产装置有没有优化的潜力呢？作者十多年来的优化实践圆满地回答了这个问题。80年代以来，作者先后优化了十几套现有化工生产装置^[6, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 29, 32]。

例如，已经在工业生产装置上长期运行，并取得明显经济效益的有：

- (1) 空气法乙烯氧化制环氧乙烷装置^[1, 2, 4, 8, 9, 10]——降低乙烯单耗。
- (2) 甲苯歧化装置^[2, 23]——提高二甲苯产量。
- (3) 芳烃抽提装置^[2, 3, 11, 16]——降低反抽提剂丁烷的单耗。
- (4) 二甲苯蒸馏塔^[2, 14, 15, 26]——降低回流比、节能。
- (5) 己烷蒸馏塔系统^[13, 31]——降低回流比、节能、增加己烷产品回收率。
- (6) 液化气蒸馏塔系统^[27]——降低回流比、节能。

还有些计算机调优已经完成，有经济效益，但由于种种原因，还没有在工业生产装置上运行，或正在进行工业试验，它们是：

- (7) 氧气法乙烯氧化制环氧乙烷装置^[5]；
- (8) 催化裂化装置^[24]；
- (9) 青霉素生产装置；
- (10) 庆大霉素生产装置；
- (11) 对二甲苯结晶分离装置；
- (12) 丙纶地毯生产计划优化。

从以上这十几套生产装置优化的成果来看，优化的潜力是很大的。

第六节 现有工业生产装置不优化的原因

一、没有进行全面的优化设计

70年代以前，用计算机进行设计优化的还不多，而设计公司经常购买其它公司的专利。在设计之前，他们并不了解其全部技术内容，常常无法优化。有时一个车间同时拥有几个公司的专利。例如，某对二甲苯车间有二甲苯异构化装置、对二甲苯结晶分离装置、甲苯歧化装置、芳烃蒸馏装置和丙烯及乙烯制冷装置，这些装置分别由几个国家的不同公司提供专利技术，在短短几个月的设计时间里不可能进行整个车间的优化设计。另外，有些设计人员采用的安全系数过大，开工运转以后才发现操作条件不合理。

二、物性数据不够准确

以前有些设计所采用的某些物性数据不够准确。例如,有人认为^[51],以前设计的乙烯精馏塔由于采用的 K 值不够准确,再沸器温度偏高,浪费能量。

三、开工后原料变化

一个工业生产装置开工以后,所用的原料种类和品位有时会发生变化。例如,煤田的煤越往深采,碳化度常常越高;一个油田的不同采油区所产原油的性质也常常不同,不同油田所产的原油,其性质相差更远。进口原油也是如此。

如某石化公司的主要原料是石脑油,现在使用的石脑油的组成和馏程与原设计不同,并且还大量使用其它油田的石脑油,有时还使用二次加工油品(例如,加氢裂化石脑油)。这就改变了全联合企业的物料平衡,偏离了原设计条件。

由于种种原因,蒸汽裂解所用原料常常改变,不同原料裂解所得到的裂解气组成不同。有的蒸汽裂解装置使用炼厂气作裂解原料,由于炼油厂生产条件的变动而使裂解气组成经常变动,这些都影响各分离塔的操作条件。若仍沿用原设计的操作条件,就浪费了能源,并且单耗也增加了。因此,应根据裂解气组成的变化而改变操作条件,以达到优化操作的目的。

四、开工后偏离了原设计的操作条件

有时,开工后由于管理不善,实际生产的操作条件会逐渐偏离原设计的操作条件。例如,某对苯二甲酸二甲酯装置氧化塔的实际操作温度偏高,空气流量偏少,使缩合反应加剧,高沸物增多,系统常常堵塞,生产不正常。回到原设计的操作条件以后,生产逐渐恢复正常。

正在运行的工业生产装置有时测量仪表或分析仪表有系统误差,这常常是很难完全避免的。从仪表读出的操作条件和物化分析结果来看完全符合设计要求,但实际上已经偏离了原设计的操作条件,这样就不在最优化的操作条件下运行了。

五、原料及产品的市场价格变动

70年代世界发生过两次石油危机,原油价格上涨10倍。近来原油价格时升时降。由于原油价格占石油化工产品生产成本的70%以上,所以原油价格大幅度变动就要影响最优化操作条件。企业每年都要根据当时的原料、能源及产品价格重新计算最优化操作条件。

六、不同生产负荷的最优化操作条件不同

设计者一般都给出满负荷时的生产操作条件,当然有些是优化的操作条件,或者接近优化操作条件。但由于种种原因,不少工业生产装置不能满负荷运行。例如,有时石油化工企业由于市场不景气,不少装置长期不能满负荷运行;或者炼油厂由于原油供应不足,也会出现长期不能满负荷运行。而个别生产装置还超负荷运行。设计者没有给出低负荷和超负荷运行的优化操作条件,而不同生产装置在不同生产负荷的经济效益不同。多数生产装置的生产负荷越高,产品成本越低,但也不全是这样。因此,很有必要求出不同生产负荷的优化操作条件,特别是低负荷下的优化操作条件。

七、生产装置系统综合优化

如果每一个生产装置都已经优化,但把许多生产装置合在一起,组成一个生产装置系统,这个系统还不一定能达到优化条件。例如,某石化公司有6套生产装置,合在一起还有一个系统综合优化问题:公司得到的原油总量是固定的,如何分配给各分公司,才能取得最大的经济效益?这又是一个系统优化问题。

八、新开发工艺的优化

在试验室或中间工厂开发出来的新工艺,一般能提出最优或接近最优的生产操作条件,

但是,扩大到工业生产规模以后,最优点常常发生偏离。因此,也有一个优化问题。

九、技术改造和技术措施后的优化

工业生产装置每年大修时常常进行技术改造和采取技术措施。例如,把蒸馏塔的浮阀塔改为高效填料塔,反应器换新型催化剂,增加设备,改变工艺流程等。这样变动以后,当然要重新优化。例如,蒸馏塔改高效填料以后,分离效果变好,回流比应该适当降低。

十、操作不优化

有些工业生产装置虽然找出了优化操作条件,但操作者由于种种原因还没有使装置在优化操作条件下运行。例如,蒸馏塔的回流比是决定产品质量、收率和能耗的重要指标,应该按最优回流比操作,但有些操作者习惯于固定回流量操作。这样,当生产负荷降低时,回流比就大于优化值,浪费了不少能量。对铂重整装置,有些操作者习惯于固定循环氢流量。当进料量减少时,循环氢流量仍不变,这相当于增加了氢烃比,不利于生成芳烃,芳烃收率降低。同时,增加氢烃比促进加氢裂化反应,液收率降低,也多耗费了能源。

解决操作不优化这类问题首先应加强管理。例如,让操作员明确蒸馏塔应按固定的回流比操作,铂重整装置应按固定的氢烃比操作。其次,应该安装在线优化控制仪表,使生产装置一直控制在优化区域内运行。

第七节 优化的效果

一、提高产品产量

工业生产装置的产量取决于生产工艺流程、设备、生产操作条件以及原料和催化剂等。如果选择最优的生产工艺条件和原料则可提高产量。虽然有时原料无法选择,但有时也有一定的选择余地,例如,有时可选不同来源的原油或石油馏分,找出最优反应温度,提高空间速度和生成目的产品的选择性等等,这些都有可能提高产量。这时设备条件就成了约束条件。要考虑压缩机、泵、容器和管线的容量是否够用,个别的次要设备容量不够,可以改造或更换;如果大多数设备的容量不够或者关键设备容量不够,例如,裂解气压压缩机的容量不够,那就要限制产量的提高。

近代大型化工联合企业有几十套甚至上百套生产装置。为了生产多种产品,这些生产装置组成几条或几十条生产线。一条生产线内某个生产装置提高产量以后,若其前后的生产装置产量不提高,则整个生产线的最终产品的产量仍不能提高。例如,烷基苯的生产工艺是煤油经过预加氢,然后用分子筛脱出正构烷烃,正构烷烃脱氢得到烯烃,再加工成烷基苯。最初发现脱氢装置是生产线的关键部位,优化以后,提高生产能力10%。但分子筛脱正构烷烃又成了关键部位,如不优化,就阻碍了整个生产线生产能力的提高。所以,只有生产线内的各个生产装置的生产能力全部提高,才能提高最终产品的产量。

又如,甲苯歧化装置在芳烃生产线和聚酯生产线的中间部位。这套装置开工以来,二甲苯产量一直达不到设计值,影响了聚酯的生产。优化以后,二甲苯产量超过设计值27%,满足了前后生产装置的需求。但过多的二甲苯也不能发挥作用。

再以尼龙66的生产为例,从苯加氢开始,包括原料硝酸在内,共有8套生产装置,即硝酸装置、苯加氢制环己烷装置、环己烷氧化制环己醇、环己酮装置、环己醇、环己酮氧化制己二酸装置、己二酸氨化制己二腈装置、己二腈加氢制己二胺装置、聚合装置以及成盐装置等。其中,原料和中间产品只有苯和硝酸可买进或卖出,己二酸可以出售,其它中间产品都

要本厂自己平衡。若其中某一个生产装置提高了产量，由于中间产品不平衡，也不能提高整个生产线的生产能力。如果这条生产线内只有一个生产装置达不到设计产量，若用优化方法提高了该装置的产量，则可使此生产线的产量达到设计值。引进装置的很多设备容量受到限制，产量超设计值很困难。不仅是反应器、塔、罐、加热炉、换热器、压缩机和泵等主要设备，有时甚至管线和阀门都受限制。

但中小型化工生产装置则不同，这些工厂的生产线流程较短，一般只有几套生产装置，提高产量所受的限制要少得多。如果只经过一套装置就得到产品，则只要有原料，产品有销路，装置优化以后，就能提高产量，取得经济效益。如果装置的设备余量大，设备限制因素少，即使要改造设备，也比改造进口设备容易得多。因此，中小型化工生产装置经过调优，可提高产量，经济效益明显提高〔36, 37〕。

二、降低原料单耗

近年来原料价格提高，而石油化工厂的原料费用占生产成本的70%以上。因此，降低原料单耗能明显降低生产成本。一条化工生产线内若有一个生产装置的原料单耗过高，下游生产装置将得不到足够的原料，这就影响整个生产线的产量。因此，一个生产装置的原料单耗过高，不仅提高生产成本，而且还降低整个生产线的生产能力。

降低原料单耗，不像提高产量有设备负荷等约束条件，也没有上下游生产装置的约束。如果经过调优，一个生产装置的原料单耗下降了，那么降低上游装置的生产能力就能维持物料的平衡。降低原料单耗有两种经济效益，一个是本装置消耗的物料减少了，另一个是上游生产装置的生产能力也跟着降低了。如果生产线的最后一套生产装置的原料单耗降低，而生产能力又能提高，则整个生产线的产量将增加。一般来讲，由于下游装置的原料及产品价值高，降低生产线下游装置的原料单耗带来的经济效益更大。降低上游生产装置的原料单耗可输出中间产品，假如中间产品有销路的话。

降低原料单耗的关键是寻找最优操作条件，抑制副反应，提高生成目的产品的选择性。其次，还要注意物料的流失，把流失的物料设法回收。这既降低了原料单耗，又减少了环境污染。实践经验表明，用调优方法降低原料单耗特别有效。

三、节约能源

能源是我国国民经济发展的一个关键因素，采用调优方法可以节约能源。化工生产装置节能的潜力很大。如蒸馏装置要耗费大量能源，而选择合适的回流比和进料板位置，以提高分离效率，就可以节约能源。

化工生产装置有许多台换热器，例如原油常减压蒸馏装置就有几十台换热器，如果安排得好，换热器的传热温差小，有效能损失少，利用流出物的热量可把原油加热到更高的温度。这既降低了加热炉的能耗，又节约了冷却水。以前设计的换热器系统由于当时的能源便宜，安装的换热器少。经过调优，合理地安排与增加换热器，可大量节约能源。

加热炉也是一个耗能的主要设备，如果把过剩空气量控制在最优值，则可节约能源。

四、改善产品质量

产品质量的高低取决于原材料、生产工艺以及操作条件。调优也常常可以提高产品质量。例如，顺丁橡胶聚合反应的调优可提高产品的优级品率。

五、提出需要改造的关键部位

通过优化计算有时会发现某个或某几个约束条件限制了经济效益的进一步提高。例如，为了提高甲苯歧化工艺的产量需要提高空间速度，而提高空间速度会引起压力降增加，这时

只要在反应器出口并联一台换热器便可降低阻力提高产量。

六、减少环境污染

众所周知，一个化工厂实际的原料单耗都比理论单耗高，这是由于多种原因造成的，其中主要原因有两个：

第一，发生副反应、生成副产物和没有经济价值的废物；

第二，反应原料、中间物流以及最终产品以低浓度进入环境，造成环境污染。

如果采用调优方法减少物料进入环境的数量，则一方面降低了原料单耗，另一方面又减少了环境污染。优化三废处理装置，也能减少环境污染。

七、提高经济效益

总结以上几点，调优的效果最后归结为提高经济效益。由于近代工业生产装置的规模比较大，调优的经济效益都很可观。有些产品的产量虽然不大，例如精细化工产品和医药产品，但产品价格较高，调优也有相当的经济效益。

我国台湾省黄华南对年产30万吨乙烯装置冷分离系统的几个蒸馏塔调优，经济效益显著。脱甲烷塔的经济效益为50万美元/年^[52]；脱乙烷塔为100万美元/年^[53]；乙烯精馏塔调优，节能6%，增产10%^[51]。

作者调优的空气法乙烯氧化制环氧乙烷装置，年经济效益100万元；芳烃抽提装置降低丁烷单耗，节约丁烷折合60万元/年；二甲苯蒸馏塔降低回流比，节能折合15万元/年；己烷蒸馏塔系统调优，降低回流比节能，增加己烷回收率，折合30万元/年。

丹东制药厂张海清等^[33]对合成药物咳必清生产工艺中的酯化反应调优，改变了配方，节约了原材料，年经济效益高达30万元。合成药物的产量虽然不高，但价格昂贵，调优的经济效益特别显著。

第八节 调 优 方 法

现有工业生产装置调优方法很多，要把各种方法都讲清楚是很困难的。因为有些作者只发表调优结果，而对调优方法讲述很少。有些调优方法虽然名称不同，但实际上大同小异，差别不大。从总体上来看，调优方法可以分为两大类：第一类是根据由生产装置或试验室所得到的数据，利用统计的方法建立数学模型或不建立数学模型而进行调优的方法。这一类方法有EVOP法、M-EVOP法、OSA法、统计调优法以及模式识别法等；第二类是根据机理建立数学模型的模拟调优法，这种方法有时也常常要借助于实际的生产数据。

一、EVOP法

一个工厂不仅生产物质产品，还生产信息。美国G.E.P.BOX教授^[54]提出了现有工业生产装置优化的EVOP法。所谓EVOP是Evolutionary Optimization或Evolutionary Operation的简称，即进化调优或进化操作。也就是说，根据实际操作得到的信息以改进操作，逐步达到优化。60年代，EVOP法在国外很为盛行。一个工业生产装置经过EVOP法调优以后，常常能得到几万到几十万美元/年的经济效益，如表1-1所示^[55]。近年来由于计算机的普遍应用，此法用得不多，但对于中小型工业生产装置仍比较实用。

由于现有工业生产装置常常未在最优操作点运行，通过几年的实际运行，逐步调整到接近最优点，经济效益可逐步提高。例如，一个新的生产工艺经过试验室和中间工厂研制成功，一般来说，这个试验结果是优化过了或者接近优化的。因为在试验装置上可进行范围广

表 1-1 EVOP法实施实例

公 司	实 施 过 程 或 装 置	结 果
道化学公司	循环流体流动	每月节省4000美元
孟山都公司	一间断过程	每年节省250000美元
美国氰化物公司	丙·烯·腈	HCN产率提高4%
帝国化学工业公司	染料工艺	产率平均提高10%
田纳西伊斯特曼公司	一个有机化工品	年节省成本25000美元
田纳西伊斯特曼公司	15个工艺	年节省15000~50000美元

泛的操作条件、原料类型以及催化剂类型的试验，找出最优操作点，如图1-1 (a)。但扩大到生产装置，由于假定模型不一定与实际完全一致，并且其它种种条件也会改变，产率等高线改变了，最优操作点的位置也会变化，如图1-1 (b)。这时如果仍选用原试验室的操作条件，则可明显看出，装置不在最优优点运行，经济效益降低。过去把这种降低称为放大效应，

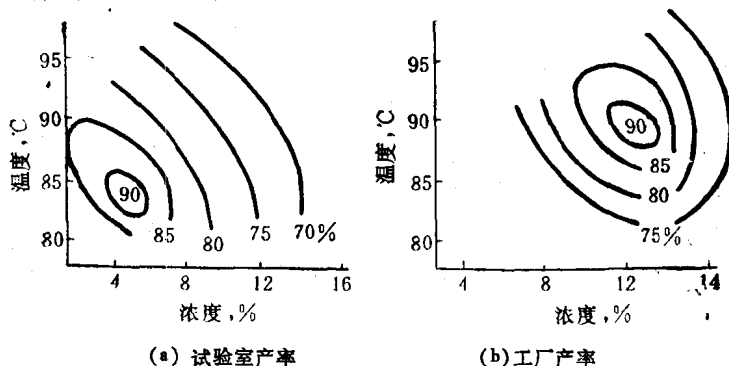


图 1-1 由试验室放大到工厂规模时产率的变化

而加上一个所谓放大系数。实际上，生产装置长期不在最优操作条件下运行的局面难以改变。这是因为实际生产中不允许在工业生产装置上任意变更操作条件，以免生产出不合格的产品，或者破坏正常运行，发生事故，损坏设备。

EVOP法是在原操作条件附近较小地改变操作条件。首先应肯定这种操作条件的变化不会引起产品不合格或发生事故，如果万一产品不合格也有办法解决（例如，与合格产品掺混后出厂）。由于操作条件变化幅度小，引起因

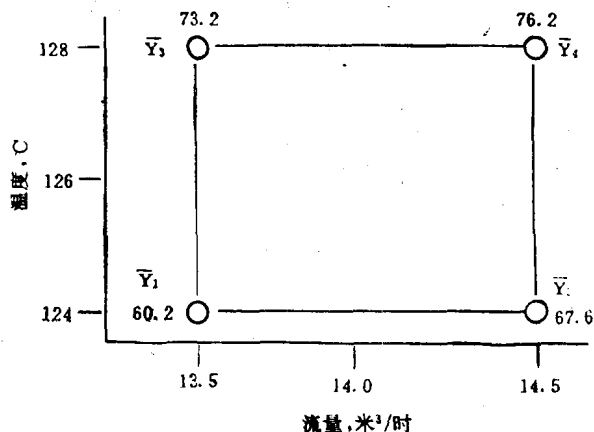


图 1-2 EVOP法调优的变体模式

变量（例如产率、经济效益等）的变化也不大。这样就要反复进行多次试验，取其平均值。如果经济效益增加的幅度大于二倍剩余标准偏差，则认为确实有好的效果，否则效果不明显，在误差范围之内。图1-2是EVOP的变体模式。原操作条件的反应温度为126℃，流量为14.0米³/时。现把反应温度变动±2℃，流量变动±0.5米³/时，构成4个新的操作条件。把这4个新操作条件循环运行多次，取其平均值，得到图1-2所示的4个平均经济效益。其中 $\bar{Y}_4$ 最大，再以 $\bar{Y}_4$ 为中心点，组成四个新的操作条

件, 这样反复进行, 直到找到最大的经济效益为止。如果有许多个自变量, 则逐个扰动以找到较好的操作条件。还可把三个自变量组成八个操作条件的立体变体模式反复运行, 找出较好的操作条件。

上述方法每次要进行4~8个操作条件的试验。为了减少试验工作量, 又提出了改进的方法^[56]。这种方法把3个操作条件安排在一个等边三角形的3个顶上。这样第一次只要进行3次试验, 得到3个产率或经济效益的数据。然后在最低点的对称点再进行一次试验, 得到新的产率或经济效益的数据, 再以最低点的对称点进行试验。这样反复一直达到较好的操作点。这种方法第一次要进行3次试验, 以后每次只需要进行1次试验, 可以更快地达到较好的操作点, 如图1-3, 这就是单纯形法。

EVOP法的最大特点是不用推导数学模型, 也不使用计算机。实施这种方法不需要专门的技术, 车间的技术人员自己就能进行, 并且不花钱, 不用改动设备。但这种优化方法也有缺点和局限性。对于一般的工业生产装置, 完全达到最优点是比较困难的, 只能找出较好的操作条件。而对于复杂的工业生产装置, 最优优点根本达不到, 也就是说, 最优优点是可望而不可及的。这是因为, 复杂的工业生产装置常常有十几个甚至几十个自变量, 若每次只取2~3个自变量进行考查, 要多久才能考查完? 另外, 也不可能保证其它未被考查的自变量长期保持稳定。因此, 这种方法只适于生产工艺比较简单、自变量比较少的中小型工业生产装置。

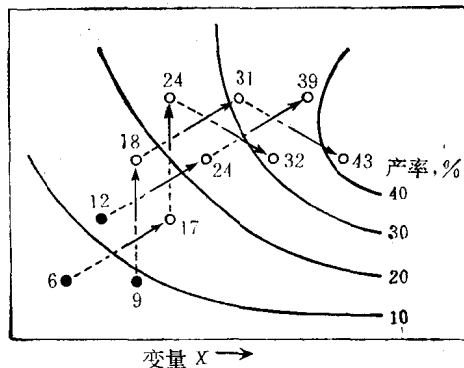


图 1-3 单纯形法调优图

二、M-EVOP法

日本目崎令司^[55]对EVOP法做了重要的改进, 提出了M-EVOP法。此法由收集到的原始数据利用回归方法求出相关式, 并进行相关式的感度分析, 作成等高线, 找出优化操作条件, 最后在生产装置上进行试验。他用这种方法对20多套生产装置调优, 经济效益明显。

三、OSA法

所谓OSA^[51, 52, 53] (Operation Simulation Analysis) ——操作模拟分析法——即首先取出一年的生产数据记录, 然后以原设计条件为依据进行分析, 探讨反应机理, 对能源和物料进行分析, 建立数学模型, 求出最优操作条件。这种方法不扰动生产, 不增加设备, 花费很少, 而经济效益明显。

四、统计调优法

南京化学工业公司研究院吴锡军等^[36, 37]在我国首先采用统计调优法对烷基苯等十几套工业生产装置调优, 作者也用统计调优法完成了几个调优项目, 经济效益明显。

五、模式识别法

中国科学院上海冶金研究所陈念贻^[38]把模式识别法创造性地用于化工生产装置的调优, 完成了顺丁橡胶等十几套工业生产装置的优化。用模式识别法调优时, 首先由生产装置收集数据, 这些数据构成一个高维空间的数据体系。然后采用非线性映射方法把高维空间的数据体系投影到二维平面上, 而保持点与点之间的距离变化最小。这样, 可从平面上直接观察数据分布的规律, 从而找到优化操作条件。顺丁橡胶装置用模式识别法优化后, 优级品率提高到94~95%, 降低了能耗, 提高了单程转化率, 增加了处理能力, 年经济效益为100万元。

六、模拟调优法

模拟调优法是在建立机理模型的基础上进行优化。可由调优技术人员自己建立模型，也可采用现成的已编好的商品软件，或者二者结合起来使用。由于模拟技术的进步，这种方法越来越受到人们的重视。作者利用模拟调优法完成了几个优化项目。

七、综合法调优^[27]

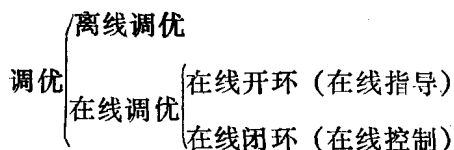
作者多年来从事调优工作，先后使用了模拟调优法、统计调优法、还用过多元统计分析方法。作者认为，对于一个调优对象应同时使用几种方法调优，才能取得更好的效果。这种方法称之为“综合法调优”。各种调优方法将于第五、六、七、八章内详细阐述。

第九节 优化的阶段

一个工业生产装置的优化包括设计优化和现有运行装置的操作优化。设计优化包括选择最合理的生产工艺和流程、采用最合适的设备、定出最优的生产操作条件等。设计优化比现有生产装置优化有更多的自由度，可从众多的生产工艺和流程之中选择最优方案，挑选设备类型和尺寸，选择生产操作条件。设计优化的工作量很大，节约潜力也很大。遗憾的是，设计者只能对大的问题进行可行性研究。而由于设计时间紧迫，并且也常常无能力进行优化，而只是按照专利所有者提供的条件设计。至于更大范围的优化，例如，整个联合企业的优化，那就更无法考虑了。

现有工业生产装置调优的自由度要小得多，设备及工艺流程基本上不变，而只能对生产操作条件在一定范围之内变动，但经济效益仍然很可观。本书只论述现有工业生产装置的调优。

现有工业生产装置调优一般分三个阶段，也可以称之为三个类型：



有些工业生产装置的调优需要经过三个阶段，即首先进行“离线调优”，然后“在线指导”，最后为“在线控制”。而另外一些装置则经过离线调优就达到了目的，没有必要再搞“在线控制”。有的装置直接进行“在线优化控制”。因此，这三种调优可以称为调优的三个阶段，也可称之为调优的三种类型。

一、离线调优

根据经验模型或机理模型找出优化操作条件，然后让操作者按优化条件运行，这就是离线调优。由于离线调优方法容易实施，几乎不用花钱，近年来，国内在这方面做了不少工作，有几十套工业生产装置初步实现了离线优化操作，实际的年经济效益已达千万元以上。

二、在线指导

“在线指导”也称为“开环控制”。由于人工控制和常规仪表控制的精度常常达不到预期的最优操作条件。而有些工业生产装置的最优操作条件常常随着各种操作条件在改变，这时就需要“在线调优”或称之为“闭环控制”。由于在线调优是一个复杂的问题，特别是安全和产品质量问题更为重要，一旦在线调优设施发生故障，常常会使产品质量不合格，甚至发生事故，使生产装置停车，也可能损坏催化剂和机械设备，因此，在离线调优成功的基础