

过程控制系统 及工程

第三版

孙洪程 翁维勤 魏杰 编著

GUOCHENG
KONGZHI
XITONG
JI
GONGCHENG



化学工业出版社

过程控制系统 及工程

第二版

王耀球 王耀武 潘 杰 编著

北京航空航天大学出版社

（北京）

（100191）

（电话：010-64494163）

（E-mail:bjb@buaapress.com.cn）

（http://www.buaapress.com.cn）

（http://www.bjvip.com.cn）

（http://www.bjvip.com.cn）

（http://www.bjvip.com.cn）

（http://www.bjvip.com.cn）

（http://www.bjvip.com.cn）

（http://www.bjvip.com.cn）

过程控制系统及工程

第三版

孙洪程 翁维勤 魏杰 编著



化学工业出版社
· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

过程控制系统及工程/孙洪程, 翁维勤, 魏杰编著.
3 版, —北京: 化学工业出版社, 2010.6
ISBN 978-7-122-08219-0

I. 过… II. ①孙… ②翁… ③魏… III. 过程控制-自动控制系统 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 066467 号

责任编辑: 刘 哲
责任校对: 郑 捷

文字编辑: 鲍晓娟
装帧设计: 杨 北

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 1/4 字数 442 千字 2010 年 7 月北京第 3 版第 1 次印刷

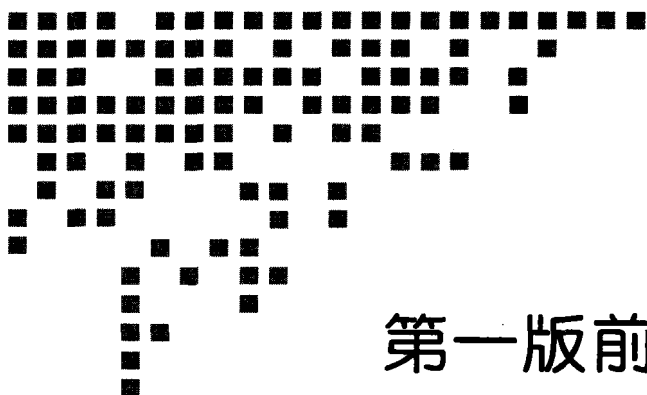
购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 32.00 元

版权所有 违者必究



第一版前言

生产过程控制技术近年来发展异常迅速,随着生产过程的连续化、大型化和不断强化,随着对过程内在规律的进一步了解,以及仪表、计算机技术的不断发展,它获得了更大的进展。因此,有关过程控制技术的论著、教材纷纷问世,人们从各种不同的应用角度,力图更为系统地对这门学科进行论述和探讨。可以说在自动控制领域中,过程控制已独树一帜。在这种情况下,要想在一本书中,尤其是在一本学时数有限的教材中,把过程控制技术的有关内容全面地包括进去,已是很难实现的事情了。针对这一现实,本书编写的宗旨是,把目前在工业生产过程中应用比较成熟的控制系统和控制方案作为重点内容,进行较为系统的阐述,从基本理论分析,到生产现场的实施,深入浅出,一一探讨。而以往包含在过程控制中的有些内容,诸如系统辨识、过程动态学、最优控制、自适应控制、新型控制系统(预测、推断控制等)、计算机控制与集散系统等,因它们已各自自成体系,因此再把它们详细编写到本书中,不仅篇幅膨胀,难以容纳,而且在各高等院校已就上述内容分别开设了相应的课程,并已有各自的教学用书,已无必要再捏合在这一本书中。我们认为,这样处理将更能使本书线索清晰,条理分明,便于学习和掌握。

本书可作为工业自动化、检测技术及仪器仪表等专业本科生、函授、夜大等教材。本书并有如下的特点。首先,各章节选材合理,需要研讨的问题都有完整的交待,能帮助读者建立一个系统的概念,全面正确地掌握各知识点。同时,适当运用控制理论加以论证,进行必要的定量或定性分析。对工程性的内容则侧重从物理概念上予以解释。考虑到本书涉及的是一门工程实践性很强的学科,许多知识只有通过亲自动手实践,才能真正掌握,所以本书尽量把实验内容结合到各有关章节中去。由于我校自动化教研室开发研制的微型液位实验装置被不少院校所采用,因此在本书中结合微型液位实验装置,对实验的目的、方法等内容作了适当的介绍,还是有价值的。此外,在每个章节的后面都附有习题、思考题,以加深和巩固学习效果。

全书共分两篇,第一篇过程控制系统,对在工业过程中常用的或较为成熟的控制系统作比较详细的讨论,对近年来出现的一些新型控制系统也进行了一定的介绍,使读者熟悉并能灵活应用各类控制系统。第二篇过程控制工程,结合石油、化工、热电、轻工等工业过程中具有代表性的典型单元操作过程,从被控过程的特性、基本控制方案到新型控制方式作简明扼要的叙述,为读者确定生产过程的控制方案打下扎实的基础。全书共十四章,其中第一、二、六、七、九、十章为周庆海编写,第三、四、五、八、十一、十二、十三、十四章为翁维勤编写,各章节所附思考题及习题由周庆海编辑。由于编者水平所限,在内容选删、组织及编写上,难免有不妥之处,请读者予以指正。

编者

1995年12月于北京化工大学



第二版前言

《过程控制系统及工程》第一版是 1996 年根据当时的“过程控制工程”课程大纲而编写的，几年来为自动化教学做出了很大贡献。

该书自出版后，作为自动化专业、测控技术与仪器专业的主干专业课《过程控制工程》的教材，已经使用了五届学生。本书由于切合课程的教学大纲，书中并有实验安排及习题，全书内容叙述便于自学，因此受到学生的普遍欢迎。

但是近年来，随着自动化技术及控制工具的发展，以及随着教学改革深入，教学要求出现了一些变化，书中有些内容需要调整，有些比较陈旧的内容需要更新；同时，由于有些内容已经单独设课，本书中不宜再出现这些相关内容，因此对本书进行修订。

本次修订，全书结构仍分为两篇，即基本控制系统和单元操作控制方案，基本上保留了第一版的章节结构，仍然定位于自动化专业、测控技术与仪器专业本专科生、函授、夜大等教学用教材，因此修订原则为：全书总体上以工业生产比较成熟的控制系统与方案为重点，从工程角度出发，借助于理论分析来加以描述各个知识点。

原书中有些章节内容，由于新教学计划中已经单独设课，为了避免重复，本次修订将其去掉。另外出于学时要求，为了避免内容膨胀，本次修订基本上没有增加新内容。根据几年来的教学经验，对个别章节变换了描述方式。

全书第 1、2、6、7、9 章及各章节附录与思考题由孙洪程修订，第 3、4、5、8、11、12、13 章由翁维勤修订。由于水平所限，难免有所疏漏，敬请斧正，不胜感激。

编者

2002 年 2 月 20 日于北京化工大学信息科学与技术学院



第三版前言

近年来随着科学技术的发展，过程自动化领域也发生了许多变化，特别是在控制理论、控制工具方面变化非常大。《过程控制系统及工程》第二版于 2002 年修订出版至今已过数年，其中有些内容需要修订更新，有些内容需要添加。

另一方面，随着教学改革的发展，过程控制工程这门课程也发生了一些变化，这主要体现在：过程控制与其他控制领域的融合越来越强，过程控制当中的新理论、新技术越来越多，为此很多学校设置了不少独立的选修课，作为基础的“过程控制工程”这门课程，只保留一些基本内容。此外，很多非传统过程控制专业也开设了“过程控制工程”课程。

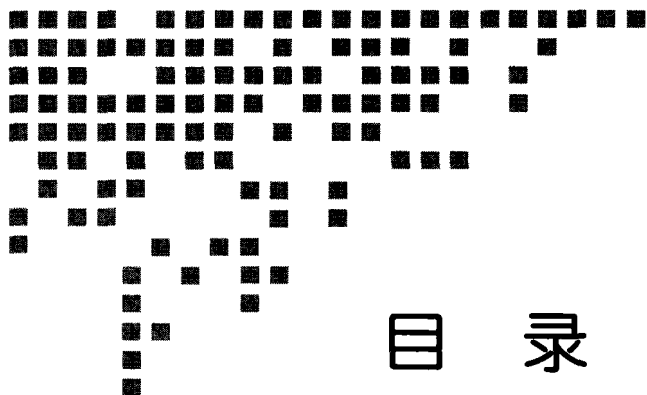
根据这些变化，编者对本书进行了修订。书中删除了老信号制（0.02~0.1kPa）的描述；把电气阀门定位器作为控制阀的附件，直接描述电气阀门定位器输入电流与阀杆位移或阀门开度的关系；增加了第 14 章间歇生产过程控制。

全书第 1~5 章、思考题及练习题由孙洪程修订，第 6~9 章由魏杰修订，第 10~14 章由翁维勤修订。全书由孙洪程统稿。

书中难免有所疏漏，敬请读者同仁斧正，不胜感激。

编者

2010 年 4 月



目 录

第 1 篇 过程控制系统

第 1 章 单回路反馈控制系统	1	本章思考题及习题	33
1.1 单回路系统的结构组成	1	第 2 章 串级控制系统	36
1.2 被控变量的选择	3	2.1 概述	36
1.3 对象特性对控制质量的影响及操纵变量的选择	4	2.2 串级控制系统的实施	39
1.3.1 干扰通道特性对控制质量的影响	5	2.2.1 用电动Ⅲ型、仪表构成串级控制方案	39
1.3.2 控制通道特性对控制质量的影响	8	2.2.2 串级控制系统的实施	40
1.3.3 操纵变量的选择	11	2.3 串级控制系统的投运和整定	42
1.4 控制阀的选择	11	2.3.1 串级控制系统的投运	42
1.4.1 控制阀口径大小的选择	12	2.3.2 串级控制系统的工程整定方法	42
1.4.2 控制阀开、闭形式的选择	12	2.4 串级控制系统的优点	43
1.4.3 控制阀流量特性的选择	13	2.5 串级系统副回路的设计	48
1.4.4 控制阀结构形式的选择	17	本章思考题及习题	55
1.4.5 阀门定位器的选用	17	第 3 章 比值控制系统	57
1.5 测量、传送滞后对控制质量的影响及其克服办法	18	3.1 概述	57
1.5.1 测量滞后的影响	18	3.2 比值控制系统的类型	57
1.5.2 信号传送滞后的影响	19	3.2.1 开环比值控制系统	57
1.5.3 克服测量、传送滞后的办法	20	3.2.2 单闭环比值控制系统	57
1.6 控制器参数对系统控制质量的影响及控制规律的选择	21	3.2.3 双闭环比值控制系统	59
1.6.1 控制器参数对系统静态误差的影响	22	3.2.4 其他类型的比值控制	59
1.6.2 控制器参数对系统动态误差的影响	23	3.3 比值系数的计算	62
1.6.3 控制规律的选择	24	3.3.1 流量与测量信号呈线性关系时的计算	62
1.7 系统的关联及其消除方法	24	3.3.2 流量与测量信号呈非线性关系时的计算	63
1.7.1 系统关联及其影响	24	3.4 比值控制方案的实施	63
1.7.2 分析系统关联的方法	24	3.4.1 两类实施方案	64
1.7.3 削弱或消除系统间关联的方法	27	3.4.2 比值控制方案实施举例	64
1.8 单回路系统的投运和整定	27	3.4.3 比值控制系统中非线性环节的影响	67
1.8.1 控制系统的投运	28	3.4.4 比值控制系统中的信号匹配问题	68
1.8.2 控制系统的整定	29	3.5 比值控制系统的投运与整定	70
		3.6 比值控制系统的其他问题	70

3.6.1 流量测量中的压力、温度的校正	70	6.3 选择性控制系统的设计	107
3.6.2 主、副流量的动态比值问题	71	6.4 积分饱和及其防止措施	108
3.6.3 具有逻辑规律的比值控制	73	6.4.1 积分饱和的产生及其危害性	108
3.6.4 副流量供料不足时的自动配比	73	6.4.2 抗积分饱和措施	109
3.6.5 主动量与从动量的选择	74	本章思考题及习题	109
本章思考题及习题	74	第7章 分程及阀位控制系统	111
第4章 均匀控制系统	77	7.1 分程控制系统	111
4.1 均匀控制问题的提出及特点	77	7.1.1 概述	111
4.2 均匀控制方案	78	7.1.2 分程控制的应用场合	112
4.2.1 常用的几种结构形式	78	7.1.3 分程控制系统控制器参数的整定	115
4.2.2 控制规律的选择	80	7.1.4 分程阀总流量特性的改善	115
4.2.3 参数整定	80	7.2 阀位控制系统	120
4.3 均匀控制系统的理论分析	81	7.2.1 概述	120
4.4 其他需要说明的问题	83	7.2.2 阀位控制系统的应用	121
4.4.1 气体压力与流量的均匀控制	83	7.2.3 阀位控制系统的设计及整定	122
4.4.2 实现均匀控制的其他方法	83	本章思考题及习题	123
本章思考题及习题	83	第8章 非线性控制系统	126
第5章 前馈控制系统	84	8.1 线性过程的非线性控制	126
5.1 前馈控制系统的特点	84	8.1.1 液位的非线性控制	126
5.2 前馈控制系统的几种主要结构形式	85	8.1.2 线性过程的其他非线性控制	128
5.2.1 单纯的前馈控制系统	85	8.2 非线性过程的非线性控制	129
5.2.2 前馈-反馈控制系统	87	8.2.1 pH控制过程的非线性控制	129
5.2.3 前馈-串级控制系统	88	8.2.2 反应器的非线性控制	131
5.3 前馈控制规律的实施	89	本章思考题及习题	132
5.4 前馈控制系统的应用	90	第9章 新型控制系统	133
5.5 前馈控制系统的参数整定	92	9.1 纯滞后补偿控制系统	133
5.5.1 K_f 的整定	92	9.1.1 纯滞后补偿原理	133
5.5.2 T_1 、 T_2 的整定	93	9.1.2 纯滞后补偿控制的效果	133
5.6 多变量前馈控制	94	9.1.3 史密斯补偿的实现	134
5.6.1 由工艺机理建立多变量前馈控制模型	95	9.2 按计算指标及推断控制系统	136
5.6.2 以线性叠加为基础建立多变量前馈控制方程	96	9.2.1 按计算指标的控制	136
5.6.3 多输入-多输出的多变量前馈控制系统	97	9.2.2 推断控制系统	140
本章思考题及习题	99	9.3 解耦控制系统	143
第6章 选择性控制系统	101	9.3.1 关联系统解耦条件	144
6.1 概述	101	9.3.2 解耦控制方案	144
6.2 选择性控制系统的类型及应用	102	9.3.3 解耦控制应用实例	147
6.2.1 开关型选择性控制系统	102	9.4 预测控制系统	149
6.2.2 连续型选择性控制系统	104	9.4.1 模型算法控制(MAC)	149
6.2.3 混合型选择性控制系统	106	9.4.2 动态矩阵控制	151
		本章思考题及习题	153

第2篇 过程控制工程

第10章 流体输送设备的控制	156	10.1 泵的常规控制	157
----------------	-----	-------------	-----

10.1.1 离心泵的控制方案	157	12.3.3 用压力补偿的温度参数作为间接 指标	202
10.1.2 容积式泵的控制方案	159	12.4 精馏塔的整体控制方案	205
10.2 压缩机的常规控制方案	160	12.4.1 传统的物料平衡控制	205
10.3 离心式压缩机的防喘振控制	161	12.4.2 质量指标反馈控制	205
10.3.1 喘振现象及原因	161	12.4.3 按两端质量指标控制	207
10.3.2 防喘振控制系统	162	12.4.4 串级、均匀、比值、前馈等控制 系统在精馏塔中的应用	208
10.3.3 压缩机串、并联运行及防喘振 控制	167	12.4.5 精馏塔塔压的控制	209
10.4 压缩机紧急停车系统	168	12.5 精馏塔的新型控制方案	210
10.5 长输管线的控制	172	12.5.1 内回流、热焓控制	211
本章思考题及习题	174	12.5.2 解耦控制	211
第 11 章 传热设备的控制	175	12.5.3 推断控制	211
11.1 概述	175	12.5.4 精馏塔的节能控制	211
11.1.1 传热设备的类型	175	12.5.5 精馏塔的最优控制	214
11.1.2 传热设备的控制要求	176	本章思考题及习题	216
11.2 传热设备的特性	176	第 13 章 化学反应器的控制	218
11.2.1 传热设备的静态特性	176	13.1 概述	218
11.2.2 传热设备的动态特性	178	13.1.1 化学反应器的类型	218
11.3 一般传热设备的控制	180	13.1.2 化学反应器的控制要求	219
11.3.1 换热器的控制	180	13.2 反应器的特性	220
11.3.2 蒸汽加热器的控制	181	13.3 反应器的热稳定性分析	221
11.3.3 冷凝冷却器的控制	182	13.3.1 反应器静态工作点的热 稳定性	222
11.4 锅炉设备的控制	183	13.3.2 开环不稳定、闭环稳定的 条件	222
11.4.1 概述	183	13.4 反应器的基本控制方案	224
11.4.2 锅炉汽包水位的控制	184	13.4.1 反应器的温度控制	224
11.4.3 蒸汽过热系统的控制	189	13.4.2 反应器的进料流量控制	227
11.4.4 锅炉燃烧过程的控制	189	13.4.3 反应器的压力控制	227
11.5 加热炉的控制	193	13.5 反应器的新型控制方案	228
11.5.1 采用压力平衡式控制阀(浮动阀) 的控制	193	13.5.1 聚合釜的温度-压力串级控制 系统	228
11.5.2 特殊温度-流量串级控制系统	194	13.5.2 具有压力补偿的反应釜温度 控制	228
11.6 蒸发器的控制	194	13.5.3 变换炉的最优控制	229
11.6.1 蒸发器产品浓度的控制	194	13.5.4 连续搅拌槽反应器的自适应 控制	230
11.6.2 蒸发器其他相关参数的控制	195	13.5.5 乙烯裂解炉的先进控制	231
本章思考题及习题	196	本章思考题及习题	234
第 12 章 精馏塔的控制	198	第 14 章 间歇生产过程控制	236
12.1 概述	198	14.1 间歇生产过程的特点	237
12.1.1 精馏原理	198	14.1.1 不连续性	237
12.1.2 精馏塔的主要干扰因素	198	14.1.2 非稳态	237
12.1.3 精馏塔的控制要求	198	14.1.3 不确定性	237
12.2 精馏塔的特性	199	14.1.4 共享资源处理	237
12.2.1 精馏塔的静态特性	199	14.1.5 配方(Recipe)及其管理	238
12.2.2 精馏塔的动态特性	200		
12.3 精馏塔被控变量的选择	201		
12.3.1 采用产品成分作为直接质量 指标	201		
12.3.2 采用温度作为间接质量指标	202		

14.2 间歇生产过程的控制	239	14.3 间歇生产过程的操作和调度优化	243
14.2.1 间歇生产过程的控制要求	239	14.3.1 间歇生产过程的优化操作	243
14.2.2 间歇过程的控制功能	239	14.3.2 间歇生产过程的调度优化	244
14.2.3 间歇过程的控制模型	242	本章思考题及习题	247
14.2.4 间歇过程的控制表述方式	242	参考文献	248
14.2.5 间歇过程的安全联锁系统	243		
14.2.6 间歇过程控制系统的选型	243		

第 1 篇 过程控制系统

第 1 章 单回路反馈控制系统

单回路反馈控制系统简称单回路控制系统。在所有反馈控制系统中，单回路反馈控制系统是最基本、结构最简单的一种，因此又称为简单控制系统。

单回路控制系统虽然结构简单，却能解决生产过程中的大量控制问题。它是生产过程控制中应用最为广泛的一种控制系统，生产过程中 70% 以上的控制系统是单回路控制系统。

1.1 单回路系统的结构组成

单回路反馈控制系统由四个基本环节组成，即被控对象(简称对象)或被控过程(简称过程)、测量变送装置、控制器和控制阀。有时为了分析问题方便起见，把控制阀、被控对象和测量变送装置合在一起，称为广义对象。这样系统就归结为控制器和广义对象两部分。

下面结合一个具体的例子，说明如何将这四个基本环节有机地结合在一起，构成一个单回路系统。

如图 1-1 所示的水槽，假定流入量和流出量分别为 F_1 和 F_2 ，控制要求是维持水槽液位 L 不变。为了控制液位，就要选择相应的变送器、控制器和控制阀，并按图 1-2 所示原理图构成单回路反馈控制系统。

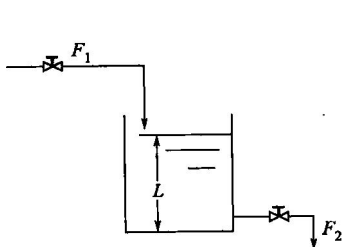


图 1-1 水槽

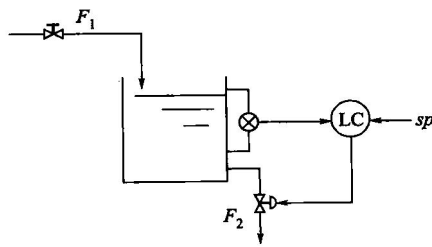


图 1-2 水槽液位控制系统

图 1-2 中 $\otimes$ 表示变送器，LC 表示液位控制器， sp 代表控制器的给定值。

这里需要做一点说明：在本系统中绘出了变送器这一环节，而在实际自控设计规范中这一环节是被省去不画的，这在今后自控设计中必须引起注意。在本书以后的系统图中也将略去这一环节。

下面简要分析该系统的工作情况。为便于分析问题起见，假定控制阀为气闭式，控制器为反作用，定义偏差为测量值与给定值之差。当测量值大于给定值时，偏差为正，反之则为



负(根据系统的观点,系统之外的因素作用在系统之上称之为系统的输入。对于控制器来说,测量信号是它的外部输入,而给定是由其内部电路产生的信号,因此它的偏差定义是测量信号与给定之差。而对于控制系统来说,给定是由其外部输入,所以控制原理中所定义的偏差是给定与测量信号之差)。

首先假定在干扰发生之前系统处于平衡状态,即流入量等于流出量,液位等于给定值。一旦此时有干扰发生,平衡状态将被破坏,液位开始变化,于是控制系统开始动作。

第一种情况 在平衡状态下,流入量突然变大(例如入口阀突然开大了)。此刻就使得 $F_1 > F_2$, 于是液位 L 将上升。随着 L 的上升,控制器将感受到正偏差(因为给定值没有变),而控制器是反作用的,于是它的输出将减小。前已假定控制阀是气闭式的,随着控制器输出的减小,控制阀将开大,流出量 F_2 将逐渐增大,液位 L 将慢慢下降并逐渐趋于给定值。当再度达到 $F_2 = F_1$ 时,系统将达到一个新的平衡状态。这时控制阀将处于一个新的开度上。

如果在平衡状态下,流入量突然减小(例如入口阀突然关小了),那么,将出现 $F_1 < F_2$, 液位 L 将下降,控制器输出将增大,控制阀将关小,这样,液位又会逐渐回复到给定值而达到新的平衡。

第二种情况 在平衡状态下, F_2 突然增大了,这就使 $F_2 > F_1$, L 将下降。这时,控制器输出将增大,控制阀将关小,于是 F_2 将随之逐渐减小, L 又会慢慢上升而回到给定值。如果在平衡状态下, F_2 突然减小了,此时 L 将上升,控制器输出将减小,控制阀将开大,重新使 F_2 增大而使 L 逐渐回复到给定值为止。

由上分析可知,不论液位在何种干扰作用下出现上升或下降的情况,系统都可通过变送器、控制器和控制阀等自动化技术工具,最终把液位拉回到给定值上。

从上例可见,一个单回路反馈控制系统是由一个测量变送装置、一个控制器、一个控制阀和相应的被控对象所组成。这是单回路反馈控制系统的第一个特点。

对于图 1-2 所示的液位控制系统可以画出它的方块图,如图 1-3 所示。

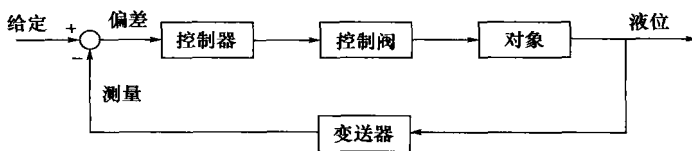


图 1-3 单回路控制系统方块

由单回路系统方块图可以看出,在该系统中存在着一从系统的输出端引向输入端的反馈路线,也就是说该系统中的控制器是根据被控变量的测量值与给定值的偏差来进行控制的。这是单回路反馈控制系统的又一特点。

单回路系统结构比较简单,所需自动化技术工具少,投资比较低,操作维护也比较方便,而且一般情况下都能满足控制质量的要求,因此,这种控制系统在生产过程控制中得到了广泛的应用。

单回路系统根据其被控变量的类型不同,可以分为温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、液位控制系统等。虽然这些控制系统名称不同,但是它们都具有相同的方块图,这就便于对它们的共性进行研究。

为了设计好一个单回路控制系统,并使该系统在运行时达到规定的质量指标要求,就要很好地了解具体的生产工艺,掌握生产过程的规律性,以便确定合理的控制方案。这包括:正确地选择被控变量和操纵变量;正确地选择控制阀的开闭形式及其流量特性;正确地选择控制器的类型及其正反作用,以及正确地选择测量变送装置等。为此,必须对系统中的被控对象、控制器、控制阀和测量变送装置特性对控制质量的影响情况,分别进行深入的分析和研究。



1.2 被控变量的选择

被控变量的选择是控制系统设计的核心问题,其选择得正确与否,会直接关系到生产的稳定操作、产品产量和质量的提高以及生产安全与劳动条件的改善等。如果被控变量选择不当,不论采用何种自动化装置,组成什么样的控制系统,都不能达到预期的控制效果。

对于以温度、压力、流量、液位为操作指标的生产过程,就可直接选择温度、压力、流量、液位作为被控变量。

质量指标是产品质量的直接反映,因此,选择质量指标作为被控变量应是首先要进行考虑的。

采用质量指标作为被控变量,必然要涉及产品成分或物性参数(如密度、黏度等)的测量问题,这就需要用到成分分析仪表和物性参数测量仪表。但有关成分和物性参数的测量问题,目前国内外尚未得到很好的解决。当直接选择质量指标作为被控变量比较困难或不可能时,可以选择一种间接的指标作为被控变量。但是必须注意,所选用的间接指标必须与直接指标有单值的对应关系,并且还需具有一定的变化灵敏度,即随着产品质量的变化,间接指标必须有足够大的变化。

以苯、甲苯二元系统的精馏为例。在气、液两相并存时,塔顶易挥发组分的浓度 X_D 、温度 T_D 和压力 p 三者之间有如下函数关系:

$$X_D = f(T_D, p) \quad (1-1)$$

这里 X_D 是直接反映塔顶产品纯度的,是直接的质量指标。如果成分分析仪表可以解决,那么,就可以选择塔顶易挥发组分的浓度 X_D 作为被控变量,组成成分控制系统。如果成分分析仪表不好解决,或因成分测量滞后太大,控制效果差,达不到质量要求,则可以考虑选择一间接指标参数(塔顶温度 T_D 或塔压 p) 作为被控变量,组成相应的控制系统。

在考虑选择 T_D 或 p 其中之一作为被控变量时是有条件的。由式(1-1)可看出,它是一个二元函数关系,即 X_D 与 T_D 及 p 都有关。只有当 T_D 或 p 一定时,式(1-1)才可简化成一元函数关系。

即当 p 一定时:

$$X_D = f_1(T_D) \quad (1-2)$$

当 T_D 一定时:

$$X_D = f_2(p) \quad (1-3)$$

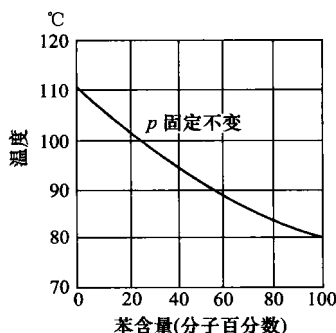
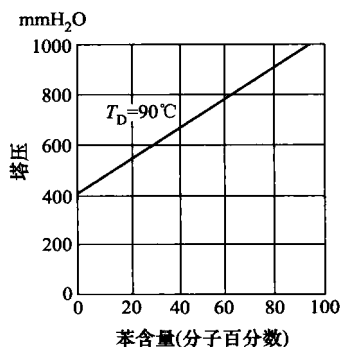
对于本例,当 p 一定时,苯、甲苯的 X_D - T_D 关系如图 1-4 所示;当 T_D 一定时,苯、甲苯的 X_D - p 关系如图 1-5 所示。

从图 1-4 可看出,当塔顶压力恒定时,浓度 X_D 与温度 T_D 之间是单值对应关系。塔顶温度越高,对应塔顶易挥发组分的浓度(即苯的百分含量)越低;反之,温度越低,则对应的塔顶易挥发组分的浓度越高。由图 1-5 可以看出,当塔顶温度 T_D 恒定时,塔顶组分 X_D 与塔压 p 也存在单值对应关系。压力越高,塔顶易挥发组分的浓度越大;反之,压力越低,塔顶易挥发组分的浓度则越低。这就是说,在温度 T_D 与压力 p 两者之间,只要固定其中一个,另一个就可以代替组成 X_D 作为间接指标。因此,塔顶温度 T_D 或塔顶压力 p 都可以选择作为被控变量。

一般都选温度 T_D 作为被控变量。因为在精馏操作中,往往希望塔压保持一定,因为只有塔压保持在规定的压力之下,才能保证分离纯度以及塔的效率和经济性。如果塔压波动,塔内原来的气、液平衡关系就会遭到破坏,随之相对挥发度就会发生变化,塔将处于不良的工况。同时,随着塔压的变化,塔的进料和出料相应地也会受到影响,原先的物料平衡也会



遭到破坏。另外，只有当塔压固定时，精馏塔各层塔板上的压力才近乎恒定，这样，各层塔板上的温度与组分之间才有单值对应关系。由此可见，固定塔压，选择温度作为被控变量是可行的，也是合理的。

图 1-4 苯、甲苯 X_D - T_D 关系 (p 一定)图 1-5 苯、甲苯 X_D - p 关系 (T_D 一定)

注：1 mmH₂O ≈ 9.8 Pa

通过上述分析，可以总结出如下几条选择被控变量的原则：

- ① 如有可能，应当尽量选择质量指标作为被控变量；
- ② 当不能选择质量指标作为被控变量时，应当选择一个与产品质量指标有单值对应关系的间接指标作为被控变量；
- ③ 所选的间接指标应当具有足够大的灵敏度，以便反映产品质量的变化；
- ④ 选择被控变量时需考虑到工艺的合理性和国内外仪表生产的现状。

1.3 对象特性对控制质量的影响及操纵变量的选择

被控变量确定之后，还需要选择一个合适的操纵变量，以便被控变量在外界干扰作用下发生变化时，能够通过对操纵变量的调整，使得被控变量迅速地返回到原先的给定值上，以保持产品质量的不变。

操纵变量一般选系统中可以调整的物料量或能量参数。而石油、化工生产过程中遇到最多的操纵变量则是物料流或能量流，即流量参数。

在一个系统中，可作为操纵变量的参数往往不止一个。操纵变量的选择，对控制系统的控制质量有很大的影响，因此操纵变量的选择问题是设计控制系统的一个重要考虑因素。

为了正确地选择操纵变量，首先要研究被控对象的特性。

被控变量是被控对象的一个输出，影响被控变量的外部因素则是被控对象的输入。显然影响被控变量的输入不止一个，因此，被控对象实际上是一个多输入单输出的对象。如图 1-6 所示。

在影响被控变量的诸多输入中选择其中某一个可控性良好的输入量作为操纵变量，而其他未被选中的所有输入量则称为系统的干扰。如果用 U 来表示操纵变量，而用 F 来表示系统干扰，那么对象的输入、输出之间的关系就可以用图 1-7 明确地表示出来。

如果将图中的关系用数学形式表达出来，则为：

$$Y(s) = G_{PC}(s)U(s) + G_{PD1}(s)F_1(s) + G_{PD2}(s)F_2(s) \quad (1-4)$$

式中， $G_{PC}(s)$ 为控制通道传递函数， $G_{PD1}(s)$ 、 $G_{PD2}(s)$ 为干扰通道传递函数。应当指出，当干扰通道与控制通道一致时，它们的传递函数也是相同的。

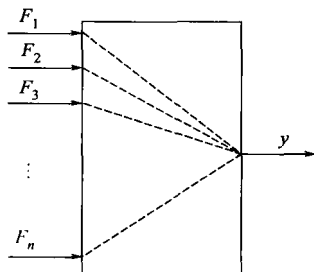


图 1-6 多输入单输出对象示意图

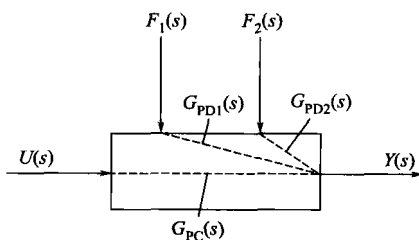


图 1-7 对象输入输出关系图

所谓“通道”，就是某个参数影响另外一个参数的通路。这里所说的控制通道，就是控制作用 $U(s)$ 对被控变量 $Y(s)$ 的影响通路；同理，干扰通道就是干扰作用 $F(s)$ 对被控变量 $Y(s)$ 的影响通路。一般来说，控制系统分析中更加注重信号之间的联系，因此，通常所说的“通道”是指信号之间的信号联系。干扰通道就是干扰作用与被控变量之间的信号联系，控制通道则是控制作用与被控变量之间的信号联系。

从式(1-4)可以看出，干扰作用与控制作用同时影响被控变量，不过在控制系统中通过控制器正、反作用的选择，可以使控制作用对被控变量的影响正好与干扰作用对被控变量的影响方向相反，这样，当干扰作用使被控变量偏离给定值发生变化时，控制作用就可以抑制干扰的影响，把已经变化的被控变量拉回到给定值来(当然这种控制作用是由控制器通过控制阀的开闭变化来达到的)。因此，在一个控制系统中，干扰作用与控制作用是相互对立而存在的，有干扰就有控制，没有干扰也就无需控制。

控制作用能否有效地克服干扰对被控变量的影响，关键在于选择一个可控性良好的操纵变量。通过研究对象的特性，研究系统中存在的各种输入量以及它们对被控变量的影响情况，可以总结出选择操纵变量的一些原则。

1.3.1 干扰通道特性对控制质量的影响

(1) 放大倍数 K_I 的影响

假定所研究的系统方块图如图 1-8 所示。

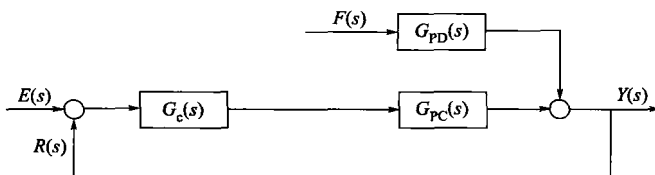


图 1-8 单回路控制系统方块图

由图 1-8 可直接求出在干扰作用下的闭环传递函数为：

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{G_{PD}(s)}{1 + G_c(s)G_{PC}(s)} \quad (1-5)$$

由上式可得：

$$Y(s) = \frac{G_{PD}(s)}{1 + G_c(s)G_{PC}(s)} F(s) \quad (1-6)$$

令 $G_{PD}(s) = \frac{K_f}{1 + T_f s}$ ； $G_{PC}(s) = \frac{K_0}{(1 + T_{01}s)(1 + T_{02}s)}$ ； $G_c(s) = K_c$ 。并假定 $f(t)$ 为单位

阶跃干扰, 则 $F(s)=1/s$, 将各环节传递函数代入式(1-6), 并运用终值定理可得:

$$y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \times \frac{\frac{K_f}{1+T_f s}}{1+K_c \frac{K_0}{(1+T_{01}s)(1+T_{02}s)}} = \frac{K_f}{1+K_c K_0} \quad (1-7)$$

式中, $K_c K_0$ 为控制器放大倍数与被控对象放大倍数的乘积, 称之为该系统的开环放大倍数。对于定值系统, $y(\infty)$ 即系统的余差。由式(1-7)可以看出, 干扰通道放大倍数越大, 系统的余差也越大, 即控制质量越差。

(2) 时间常数 T_f 的影响

为了研究问题方便起见, 令图 1-8 中的各环节放大倍数均为 1, 这样系统在干扰作用下的闭环传递函数应为:

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{1+T_f s}}{1+G_c(s)G_{PC}(s)} = \frac{1}{T_f} \times \frac{1}{\left(s + \frac{1}{T_f}\right)[1+G_c(s)G_{PC}(s)]} \quad (1-8)$$

系统的特征方程为:

$$\left(s + \frac{1}{T_f}\right)[1+G_c(s)G_{PC}(s)] = 0 \quad (1-9)$$

由式(1-9)可知, 当干扰通道为一阶惯性环节时, 与干扰通道为放大环节相比, 系统的特征方程发生了变化, 表现在根平面的负实轴上增加了一个附加极点 $1/T_f$ 。这个附加极点的存在, 除了会影响过渡过程时间外, 还会影响到过渡过程的幅值, 使其缩小了 T_f 倍。这样过渡过程的最大动态偏差也将随之减小, 这对提高系统的品质是有利的。而且, 随着 T_f 的增大, 控制过程的品质亦会提高。

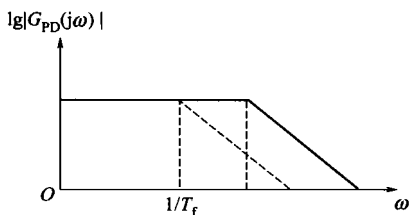


图 1-9 一阶惯性环节对数幅频特性

上述结论也可从一阶惯性环节的对数频率特性中得到解释。

一阶惯性环节的对数幅频特性如图 1-9 所示。 $\frac{1}{T_f}$ 是转折频率。由图可以看出, 一阶惯性环节相当于一个低通滤波器, 转折频率以前的低频信号可以通过, 而转折频率以后的高频信号则受到抑制而很快衰减。且随着 T_f 的增大, 转折频率越向左移动, 亦即允许通过的低频信号的频率越低, 该环节所起的滤波作用越强。由于干扰

作用在影响被控变量时, 受到自身通道的滤波作用, 对被控变量的影响程度大为缩小, 系统的质量因此而提高, 而且随着时间常数 T_f 的增大, 所起的滤波作用越强, 系统的质量越高。这与上述根平面分析的结果是一致的。

如果干扰通道阶次增加, 例如干扰通道传递函数为两阶的, 那么, 就有两个时间常数 T_{f1} 及 T_{f2} 。按照根平面的分析, 系统将增加两个附加极点 $-1/T_{f1}$ 及 $-1/T_{f2}$, 这样过渡过程的幅值将缩小 $T_{f1} T_{f2}$ 倍。因此, 控制质量将进一步获得提高。

干扰从不同位置进入系统, 如图 1-10 所示, 如果干扰的幅值和形式都是相同的, 显然, 它们对被控变量的影响程度依次为 F_1 最大, F_2 次之, F_3 为最小。

图 1-10 的等效方块图如图 1-11 所示。由图 1-11 可以看出, F_3 对 y 的影响依次要经过 $G_{03}(s)$ 、 $G_{02}(s)$ 、 $G_{01}(s)$ 三个环节, 如果每一环节都是一阶惯性的, 则对干扰信号 F_3 进行了三次滤波, 它对被控变量的影响会削弱得较多, 对被控变量的实际影响就会较小。而 F_1 只经过一个环节 $G_{01}(s)$ 就影响到 y , 它的影响被削弱得较少, 因此它对被控变量的