

技术科学博士 刘晨晖 著

多变量过程控制系统解耦理论

General Decoupling Theory
of
Multivariable Process Control Systems

by
Tech-Dr. Liu Chen Hui

水利电力出版社

多变量过程控制系统解耦理论

技术科学博士 刘晨晖 著

水利电力出版社

多变量过程控制系统解耦理论

技术科学博士 刘晨晖 著

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 24印张 542千字

1984年11月第一版 1984年11月北京第一次印刷

印数 0001—2380 册 定价4.40元

书号 15143·5628

内 容 简 介

本书是研究过程控制理论的一本高级读物，1983年被选中为极负盛名的国际《自动控制信息论科学讲座原稿丛书》第53卷，并于同年5月在西柏林正式出版发行，曾获得国际过程控制学界的权威们的称赞与高度评价。现在的中文版是在原英文版的基础上经过补充修改而写成的。

本书深入而系统地讨论了多变量过程控制系统的耦合分析与解耦设计，旨在建立一个较完整的解耦理论体系。主要内容有：1.多变量耦合系统描述；2.单变量过程控制系统完全抗干扰设计；3.多变量耦合系统分析的困难性；4.解耦设计的若干一般原则；5.解耦设计的若干具体方法；6.解耦设计的若干实现问题；7.电力系统负荷-频率控制；8.Bristol-Shinskey方法；9.精馏塔控制。

本书内容广泛，涉及了解耦理论的各个方面，材料丰富，论证严密，紧密联系工业生产过程实践。本书理论适用于解决电力工程、化工过程、热力过程、冶炼过程以及飞行器等各类多变量过程控制系统的解耦问题。

本书可供从事自动控制专业的科研人员、工程技术人员以及大专院校师生阅读。

中文版前言

本书最初以研究报告形式于1982年11月发表于瑞典皇家工学院，随即被国际自动控制协会第一副主席、联邦德国汉诺威大学 M.Thoma 教授选中为国际《自动控制与信息论科学讲座原稿丛书》第53卷，并于1983年5月由联邦德国斯普林格出版公司在西柏林正式出版发行。1983年9月，本书又被瑞典皇家工学院接受为博士论文。

目前的中文版基本上是原英文版的译本。作者在以英文写作时，由于时间过于仓促，书中出现一些疏忽之处，也有打印上的错误。中文版除对已发现的错误作更正外，还增添了一些新内容，主要是加写第七章电力系统负荷-频率控制，以讨论解耦理论在电力系统中的应用。

在中文版出版时，作者愿再一次感谢 J.Bubenko 教授。他对本书英文版的写作曾给予大力支持，并郑重地向瑞典皇家工学院推荐本书为博士论文。

作者深切感谢 M.Thoma 教授。他曾极其迅速地将本书列入他所主编的、极负声望的、高水平的国际丛书，从而使得本书能在国际自动控制学界广为交流。

作者也要感谢国际过程控制学界几位极负盛名的权威学者 Bristol 博士，Schwarz 教授和 Waller 教授，他们在阅读本书英文版后，都向作者表示了热情的祝贺并给予了很大的鼓励。

作者尤其应当感谢水利电力部、武汉水利电力学院、水利电力出版社有关负责同志，他们对于迅速出版本书中文版给予了极大的关心与支持。本书中文版能如此迅速地安排出版，有力地表明近代科学的发展在我国已受到了极大的重视。

过程控制是一个与工业生产紧密相关的科技领域。本书的一个显著特点是，书中所阐述的理论都能很方便地应用于电力、化工、热工等典型的过程控制领域。但是，就内容来说，本书是一本理论性专著。就深度来说，是以过程控制博士研究生的阅读水平而写的。本书被列入国际丛书就是因为它是一份高级教材，并且是从新的角度探讨了一个经典领域。作者希望本书中文版的出版，能有助于更多的国内读者了解近代过程控制理论的最新发展。当然，书中还难免存在某些错误，诚恳地请专家和读者批评指正。

刘 晨 晖

1984年2月于武汉

水利电力学院电力系

英文版前言

自六十年代以来，过程控制工程无论在理论上或实践中都取得了显著进步。许多复杂而成功的控制方案现在已经在工业生产过程中被采用，毫无疑问，这是某些巧妙的设计思想的令人信服的体现。

C. Smith教授曾经指出，目前有五类控制系统可以认为是高级过程控制系统。它们是：

- (1) 串级调节系统；
- (2) 由前馈与反馈组成的复合调节系统；
- (3) Smith预估器；
- (4) 自适应控制系统；
- (5) 多变量解耦控制系统。

绝大部分高级过程控制系统，尽管它们的具体结构可能不同，但都与以上这几类系统有关。过程控制工程当然还在继续向前发展，可是，从现阶段看来，上述论断是符合实际情况的。

这几类系统中，多变量过程控制系统的解耦控制具有特别的意义。控制工程的实践表明，在多变量过程控制系统分析与设计中，一个极为重要又值得研究的问题，是分析系统中各变量之间的耦合情况，并决定是否需要进行解耦设计。假如需要进行解耦设计，人们则要回答怎样进行这种设计？最近，Waller教授在一份报告中指出：“在美国化工过程控制工程中，一个具有极大研究活力的课题就是耦合分析，即研究一个多输入与多输出的系统中的输入变量与输出变量之间的耦合。企业界的研究员和顾问们以及大学中的人们都在以极大的兴趣研究这个问题”^[81]。

应当指出，耦合分析或解耦设计的研究都不是新思想。这方面的最早研究工作是由Boksenbom和Hood于1949年完成的。然而，只是在过去的十多年中，这种设计思想在过程控制工程中才得到相当的重视与应用。我们现在可以说，若干年前，解耦设计还只不过是一种巧妙的构思，而今天它已经成为过程控制工程中一个相当完整而又系统的理论分支了。

在近代控制理论家的眼中看来，耦合分析与解耦设计并不是多变量控制系统分析的最

重要问题。我们当然不反对这种看法,但绝大部分过程控制理论家与工程师们则认为,耦合分析与解耦设计却是目前多变量过程控制系统中最重要与最值得研究的问题。

显然,本书作者的观点属于后者,所以本书属于过程控制理论中的一份高级教材,而不是近代控制理论的读物。也就是说,本书所有内容均与过程控制工程的实际需要紧密相关。

本书是为过程控制工程博士研究生们写的,因此假定读者都已具有良好的调节理论知识。作者旨在引导他们进入这个非常重要和十分有意思的领域。某些对过程控制理论缺乏系统而广泛了解的年轻研究人员,常有一种错误的想法,即以为过程控制理论是经典的,并且非常简单,所以他们只对近代控制理论感到兴趣。现在,作者所提供的这本书可以表明,解耦控制虽然只是过程控制工程中一个个别领域,但已经包含着如此丰富的内容,而且还在继续发展。所以,不能说过程控制理论非常简单。

本书试图对多变量过程控制系统发展中的解耦设计理论作一系统化的论述,但某些先驱者,如 Mesarović, Schwarz 等,在他们的专著中所表达的那些卓越思想,依然保留在本书中。

作者应当对瑞典皇家工学院能源研究实验室主任 J. Bubenko 教授表示最诚挚的谢意。从 1981 年到 1983 年 9 月,作者荣幸地作为客座研究员和他一起工作。他给我提供了极为良好的工作条件并给予我很多帮助和鼓励,如没有他的关心、支持和协助,作者是不可能完成此书的。我们在不同的领域中进行了良好的合作,尤其是在近代电力系统工程中,他的极富启发性的思想和广泛的知识给我留下深刻的印象。在他卓越的领导下,作者已经发表了好几份关于近代电力系统工程科学的研究报告。他对本书的大力支持表明他在科学上确是一位有远见卓识的学者。我以为,所有我在这里的研究成果都是我们之间的友谊的体现。

作者也应当真诚感谢 K. V. Waller 教授(芬兰), T. J. McAvoy 教授(美国)和 P. Scholander 副教授(瑞典)等几位过程控制学界的著名学者,感谢他们慷慨地向作者提供了他们极为有价值的研究论文。

瑞典皇家工学院能源研究实验室
斯德哥尔摩 1982 年 11 月

刘 展 晖
中国武汉水利电力学院

目 录

中文版前言

英文版前言

第一章 多变量耦合系统描述	1
1-1 引论	1
1-2 多变量过程控制系统的描述	4
1-3 用状态变量表示多变量控制系统	7
1-4 P规范控制对象与V规范控制对象	13
1-5 P规范与V规范解耦环节	18
1-6 P规范形式与V规范形式的互相转化	20
1-7 多变量控制对象与规范型控制对象	25
1-8 操作变量耦合系统	27
1-9 全耦合系统与部分耦合系统	30
1-10 流体混合过程控制——P规范控制对象举例	32
1-11 容器液位与流量控制——V规范控制对象举例	34
1-12 釜式反应器的控制——操作变量耦合对象举例	35
1-13 液体分离器的控制特性——非P亦非V的控制对象	40
1-14 简短的结论	41
第二章 单变量过程控制系统完全抗干扰设计	43
2-1 引论	43
2-2 对给定值干扰的抗干扰设计	46
2-3 对送料干扰的完全抗干扰设计	47
2-4 对送料干扰的完全抗干扰设计与串级调节	51
2-5 如何利用反馈来简化系统设计	53
2-6 对负载干扰的抗干扰设计	56
2-7 干扰分析与抗干扰设计	59
2-8 利用状态变量反馈实现完全抗干扰设计	61
2-9 Smith预估器完全抗干扰设计	66

2-10	抗干扰设计原则的独立性	69
2-11	只控制一个变量的双变量系统的抗干扰设计	70
2-12	对不易判定输入通道的干扰的抗干扰设计	72
2-13	简短的结论	74
第三章	多变量耦合系统分析的困难性	76
3-1	引论	76
3-2	控制对象耦合系统不进行解耦设计分析的困难性	78
3-3	操作变量耦合系统不进行解耦时分析的困难性	83
3-4	从锅炉控制看操作变量耦合系统的耦合影响与分析	85
3-5	奇异耦合系统	88
3-6	对称耦合系统	90
3-7	最常见的一阶耦合系统	92
3-8	三变量耦合系统	94
3-9	耦合V规范系统的分析	96
3-10	有关多变量耦合控制系统的几个基本结论	98
3-11	简短的结论	103
第四章	解耦设计的若干一般原则	105
4-1	引论	105
4-2	开路系统解耦设计	106
4-3	闭路控制系统解耦设计与Mesarović命题	108
4-4	解耦设计的不确定性	112
4-5	应用对角矩阵法进行解耦设计的一般结构及其计算式	114
4-6	关于Mesarović命题第一方面的实际含义	121
4-7	一阶耦合系统解耦	122
4-8	前馈解耦设计	126
4-9	前馈解耦特性	129
4-10	前馈解耦方式的弱抗干扰性	131
4-11	Mesarović命题第二方面的实际含义	134
4-12	关于P规范控制对象实现全解耦的一般结论	138
4-13	关于Mesarović命题第二方面的实际含义(续)	140
4-14	关于V规范控制对象实现全解耦	144
4-15	关于实现全解耦的一般结论	149
4-16	双变量P规范系统前馈解耦方式的一般结果	152
4-17	双变量V规范系统前馈解耦方式的一般结果	160
4-18	简短的结论	167
第五章	解耦设计的若干具体方法	168
5-1	引论	168
5-2	单位矩阵法	169
5-3	按给定要求设计	171
5-4	Boksenbom-Hood-钱学森方法	176

5-5	理想解耦设计	181
5-6	非对消解耦设计	183
5-7	具有死时延滞的耦合系统解耦设计与三角矩阵半解耦	189
5-8	多变量Smith预估器及其解耦设计	193
5-9	关于解耦与完全抗干扰的同时设计	196
5-10	一个在设计中容易弄错的问题	198
5-11	简短的结论	200
第六章	解耦设计的若干实现问题	201
6-1	引论	201
6-2	P规范控制对象转化为V规范时的物理可实现条件	202
6-3	P规范解耦环节结构在前馈解耦方式中的实现条件	205
6-4	P规范控制对象V规范解耦环节结构的物理可实现条件	209
6-5	V规范控制对象P规范解耦环节结构的物理可实现条件	210
6-6	V规范控制对象V规范解耦环节结构的物理可实现条件	212
6-7	最容易实现的解耦系统	214
6-8	系统解耦后的形式	217
6-9	实现静态解耦的条件	222
6-10	多变量前馈调节系统的一般实现条件	222
6-11	多变量前馈-反馈复合调节系统的一般实现原则	228
6-12	简短的结论	231
第七章	电力系统负荷-频率控制	232
7-1	引论	232
7-2	负荷-频率控制系统中各基本环节的控制特性	234
7-3	单一电厂的负荷-频率控制	238
7-4	单一电网的负荷-频率积分控制	244
7-5	联网系统的负荷-频率耦合特性及理论解耦控制	247
7-6	联网系统的实用解耦控制	253
7-7	刚性联网与柔性联网	260
7-8	刚性联网系统的控制特性	263
7-9	刚性联网系统的频率-传递功率解耦控制	265
7-10	刚性联网系统解耦后负荷变化的影响	270
7-11	刚性联网系统各地区调节功率对各地区负荷变化的解耦控制	272
7-12	简短的结论	276
第八章	Bristol-Shinskey方法	278
8-1	引论	278
8-2	应用直接法确定耦合系统的耦合程度	279
8-3	相对增益矩阵	282
8-4	第二放大系数的确定	283
8-5	相对增益矩阵特性	289
8-6	由系统输出反应直接测量相对增益	297

8-7 相对增益的应用与变量配对的意义	299
8-8 耦合指标	303
8-9 动态相对增益	305
8-10 时间范畴内的相对增益	308
8-11 Bristol方法应用于一般解耦设计	310
8-12 三角矩阵半解耦设计	314
8-13 简短的结论	317
第九章 精馏塔控制	319
9-1 引论	319
9-2 对精馏塔控制的基本假设	321
9-3 精馏塔控制可能具有的变量配对	322
9-4 决定合理控制方案的基本原则	323
9-5 灵敏度计算	324
9-6 只控制一端产品质量时控制方案的选择与Shinskey第一、第二准则	327
9-7 对方案11普遍合理性的讨论	332
9-8 两端产品质量均需控制时合理控制方案的选择	335
9-9 Shinskey方案是不是最好的方案	339
9-10 某些常见控制方案的相对增益	341
9-11 具有侧线产品的精馏塔	345
9-12 非二元精馏塔	348
9-13 精馏塔解耦控制系统设计	350
9-14 为什么两端产品成分都要控制	358
9-15 恒沸塔的控制	359
9-16 简短的结论	363
结束语	364
参考文献	367

第一章

多变量耦合系统描述

1-1 引论

工程界和理论界现在都一致认为，多变量控制系统是属于高级而又复杂的过程控制系统。说它高级，是因为它能有效地对一些含有多个互相关联的变量的生产过程实现统一的控制，而这种功能常常是不能借助于一些人为地简化了的单变量过程控制系统来完成的；说它复杂，主要是因为它比单变量过程控制系统需要一些更复杂的设备，从而使系统的结构变得复杂了。另一方面，从控制理论的观点看来，高级和复杂意味着这种控制系统能满足一些更高的控制要求或者控制指标，从而在理论分析的深度与广度上，都超过了常规的单变量过程控制理论。

二十年前，过程控制理论主要是处理单变量和单回路控制系统，即使有时也遇到多回路情况，但仍然属于单变量系统。对于这样的控制系统，无论在分析理论与综合理论上，以及具体实践上，都积累了相当丰富的经验。

一条最重要的经验是，建立在拉普拉斯变换基础上的、以传递函数为主要分析对象的频率法，被普遍认为是过程控制理论中极为有效的分析与综合方法。在过程控制理论中，频率法获得了最广泛的应用。

但是，随着工业的发展，生产规模越来越复杂，而且在一个过程中，需要控制的变量以及操作变量常不止一对，而且这些变量之间常以这种或那种形式互相关联着，例如，对于一个电力系统而言，其频率、功率与电压是三个需要控制而又是彼此相关的量；对于一个精馏塔而言，其顶部产品成分和流量、底部产品成分和流量、回流、送料速度以及成分、上下塔板温度等，都是一些彼此有关联的量，而过程控制系统在任何时候总是对一个参数进行控制的，从而在上述情况下，对某一个参数的控制不可避免地要考虑另一些有关联的参数或者操作变量的影响。由于影响是互相关联的，因此这些单个参数的控制系统之间就必定有通道互相交错。这样一来，所处理的问题就不再是单变量的问题了。

因此，自六十年代以来，多变量过程控制理论受到了广泛的注意，并且很多研究结果

已被成功地应用于实践。目前,这个理论已成为过程控制理论中的一个重要领域,而且,就其内容的深度而言,人们也普遍地认为,它是过程控制理论中最难的理论领域之一。它实际上属于近代过程控制理论。

多变量过程控制的内容很多,例如按一定要求设计的综合理论、按一定指标设计的最优化理论、借助于不同模型的分析理论等等。但是,在多变量过程控制理论与实践中,有一个突出的问题是研究如何实现解耦控制。也就是讨论应当采取何种措施,能够把一个有耦合影响的多变量过程,化成为一些无耦合的单变量过程来处理,或者经过理论分析与判断,可以有根据地允许一定程度的耦合影响存在。假如能做到这一点,则解除耦合以后的系统,或者有根据地允许一定耦合存在的系统,就可以用我们所熟知的单变量系统理论来处理了。处理这样的理论问题,就称为多变量过程控制系统的解耦理论。应当指出,这只是本书所指的这个理论的含义。更广义一点说,这个理论包含的内容会更多,比如说,为了把耦合影响限制在一定程度上的设计理论,也应当属于解耦理论。但是本书所指的解耦理论还只限于前一种含义,因为这个含义最能适用于过程控制工程的实践。

解耦问题当然不是多变量控制的唯一问题,在某些控制理论家的眼中看来,它也不是多变量控制问题中的主要问题。而且,实现了解耦的多变量控制系统,一般也不是满足一定要求的最优控制系统。这都是事实。然而,我们要指出的是,从过程控制工程的实践来看,而不是从多变量控制的一般理论来看,在目前阶段实现解耦控制是多变量控制理论用于过程控制的主要问题。

解耦思想最初的也是最狭义的提法是不相干控制原则。它是由 Boksenbom、Hood 和钱学森首先提出来的。他们最先将矩阵分析法应用于多变量控制系统分析,并提出了不相干控制的巧妙构思。他们讨论的问题是一个关于飞行器控制的问题,即如何通过分别控制燃料与推进器叶片角度来控制飞行器发动机的速度与功率,并使两个控制系统互不相干。

此后,Kavanagh等人将这个理论用于过程控制系统。自此以后,这种矩阵设计法就得到了广泛的应用。其基本思想是,进行适当的设计,使得联系多变量控制系统输入变量与输出变量之间的系统传递函数矩阵成为一个对角矩阵,所以人们一般称之为对角矩阵法。

由于在这个方法中,控制系统、控制对象以及系统中每一个环节的动态特性,都是用传递函数来表示的,所以这个方法在本质上仍然是频率法。在这个方法的发展过程中,有很多人作出了许多可贵的贡献。然而,其中特别应当提到的是Mesarović的贡献。

Mesarović提出了两个著名的命题:

(1) 只根据对一个多变量控制对象两端输入量与输出量的测量,不可能确定它是一种什么类型的多变量控制对象。

他首先将输入变量数目与输出变量数目相等的控制对象,根据耦合方式的不同,分为P规范与V规范这两种标准型,然后他进一步又指出另一个重要原则:

(2) 假如在多变量控制系统中,采用了V规范结构,并采用反馈解耦,则能得到较好的解耦控制效果。

Mesarović这两个命题揭示了多变量控制系统解耦设计理论中的一些本质的问题。但

可惜的是,他是从抽象的理论和抽象的系统来谈的,并且对第二个命题未加详细的论证。

然而,我们需要讨论的是过程控制系统,或者说,多变量过程控制系统。所以,我们需要详细探讨的是, Mesarović 的上述命题在多变量过程控制系统中是如何具体体现的呢?它能导致一些什么具体结果呢?这是很值得研究的。

虽然近年来,在有关杂志与其他出版物上发表了很多讨论解耦问题的文章,但是都没有能把这个问题系统地总结成一个较完整的理论体系。的确,要系统地阐述这一理论,就需要阐明一系列的问题。例如:

- (1) 有一些什么方法可以用来进行解耦设计?它们的理论基础是什么?
- (2) 每一种方法的优缺点如何?
- (3) 都解决了一些什么问题?导致了一些什么结论?
- (4) 它们的使用条件如何?
- (5) 它们发展到什么程度?
- (6) 它们对过程控制系统实际使用的价值如何?

等等。

有鉴于此,很多著名的过程控制理论家,如Niederlinski、Bristol等,都一再建议对多变量过程控制系统的解耦理论,要进行分类研究。不但研究方法要分类,而且每一研究方法对于其本身所研究的内容也要分类。他们的基本思想也就是认为这个理论牵涉面很广,内容也很丰富,有必要作一些细致的工作,这样才能将多变量过程控制理论发展成为一个不断完善的体系。

目前,有很多方法可以用来解决多变量控制系统的解耦问题。但总的来说,下列几种是普遍认为成功的方法:

(1) 由Boksenbom、Hood、钱学森、Kavanagh、Mesarović 和Schwarz等人建立和发展起来的对角矩阵法^{[11]、[21]、[3]、[5]、[14]、[15]};

(2) 首先由Bristol提出^[42],然后主要由Shinskey、Nisenfeld、McAvoy等人发展起来的相对增益分析法^{[7]、[8]、[51]、[70]};

(3) 由Rosenbrock提出的反Nyquist曲线法^[16]以及由MacFarlane和Belletrutti提出的特征曲线分析法^[29];

(4) 由Falb、Wolovich、Gilbert等人发展起来的状态变量法^{[20]、[22]}。

当然,还有一些其他的方法(例如,由Mayne、Chuang和Daly等人提出的序列回差法^[18]),但都不如以上几种方法用得广泛。

人们自然就会提出这样一个问题:哪一个方法最好?

这个问题很难回答。因为应用这些方法的人各自有不同的要求,研究的对象与目的也可能不同。例如,现代控制理论家都十分欣赏状态变量法,目前有大量的文章都是讨论这个方法的。对于变量数目相当多的高阶大系统,很宜于应用这种方法进行理论上的分析,其研究的对象常常是抽象化了的;然而过程控制理论家及工程师们却格外喜欢对角矩阵法与相对增益分析法,因为这两种方法能十分方便地应用于多变量过程控制系统的解耦设计,而且由此引出来的结论都能很容易地在实际中得到应用,从而这两种方法是过程控制实践

中目前应用最广的方法。状态变量法目前在过程控制实践中应用不多,而反Nyquist曲线法及特征曲线法虽然能应用于实践,但这些方法本身引用的理论概念很多,计算也较复杂,因此应用起来不甚方便,这就限制了它们的广泛流行。

本书主要是为了满足过程控制工程的实际需要,所以我们在本书中主要讨论对角矩阵法与相对增益法。我们对这两种方法将进行深入细致地讨论。而且将讨论它们在实际过程控制工程中的应用。我们将看到,这两种方法所涉及的内容远不像有些人所想象的那样简单。

事实上,本书的目的就是要通过对这两种方法的讨论,建立一个能适用于多变量过程控制系统耦合分析与解耦设计的较完整的理论体系。

目前,大系统理论正在发展,我们可以说,过程控制问题实际上也是处理大系统问题,不过它所研究的对象总是实际的。

因此,过程控制理论家们都面临着这样一个问题:为什么过程控制理论不力争打破相对停滞的局面,去按照大系统实际而更有效地发展呢?

多变量过程控制系统解耦理论的发展以及探索建立这样一个理论体系,就是对上述问题的一个回答。它表明了过程控制理论家们正在这样做。

让我们首先从多变量控制对象的描述来开始我们的讨论。这个问题看起来似乎很简单,但是很多的理论问题与概念却恰恰是从这里引出来的。

1-2 多变量过程控制系统的描述

为了研究多变量过程控制系统,我们首先必须知道怎样表示它们。

应当指出,知道怎样表示一个多变量过程控制系统并不意味着知道它的具体结构。实际上,当我们知道一个多变量过程控制系统的具体结构时,并不一定能够由它得到一个数学模型来进行分析。反过来,当我们知道一个多变量过程控制系统的表示形式或数学模型时,一般来说,也不定能知道它的具体结构形式。

这一点也不奇怪。

众所周知,即使对于一个最简单的单回路单变量控制系统,从控制理论的观点来说,当研究它的控制特性时,不应把研究工作局限于讨论这样一个系统的具体结构上,而应广泛地应用传递函数分析法来获得这个系统中所有有关环节的传递函数,然后决定它们之间的各种关系与联系。正是由于在一个控制系统中,各个环节之间存在着这种或那种动态或静态的联系,尤其是其中那些可以按人们的意志来安排的联系(包括途径与特性),所以从理论的观点上看,可以借助于适当地安排某些联系而得到理论上令人满意的控制系统,例如,引入某种补偿网络或补偿通道,然后再回到实际中去确定一种实际的结构形式,以实现所研究的理论安排形式。当然,假如能无困难地实现是最好不过的了,假如不能,那么,对理论研究所作的安排就要作某种修正,而一般说起来,在某种程度上作一定的理论牺牲常是必需的。

几十年来,单变量控制理论的发展雄辩地表明了,采用方框图来分析控制系统是一个极为有效的方法。

从控制理论观点看来, 在一个控制系统中, 各个不同的环节的联系、某种输入讯号或干扰的引入、或者输出变量的引出, 都可以在系统方框图中表示出来。虽然方框图不可能包括实际控制系统的所有特性, 然而却能表现出其主要特性。这是因为控制系统方框图具有两个十分重要的特点。第一个特点是, 对于线性常系数系统而言, 每一个方框的传递函数是确定的, 并且表示了某一个具体环节的动态特性 (当然, 也可以把某一具体环节的控制特性用若干个方框表现出来), 与此同时, 两个方框之间的单向联系表示了两个环节之间的结合方式。第二个特点是, 控制系统的方框图是可以计算的。正因为如此, 所以我们说一个控制系统, 不但可以用它的方框图来表示, 而且可以利用方框图对它进行理论分析。

正象单变量控制系统一样, 方框图也被广泛地应用于分析多变量过程控制系统。其实, 这也是很自然的。因为实际上任何一个多变量过程控制系统总是由若干个单变量控制系统组成的, 只是它们之间存在着某些相互影响的通道, 也就是存在着耦合, 因此一个多变量过程控制系统, 当然应当可以用方框图来表示。

然而, 对于单变量控制系统与多变量控制系统来说, 两者用方框图来表示还是有一定差别的。一个多变量过程控制系统, 可用两种形式的方框图来表示。第一种形式是, 其方框图系统是由这个系统所有环节的方框及其通道所组成的; 第二种形式是, 其方框图系统是由该系统中不同环节的传递函数矩阵所组成的。这两种形式的方框图具有相同的特性, 只是表示方式不同而已。对于后者, 肯定是用矩阵计算, 但对于前者, 当然也可以用矩阵计算。所以我们可以说, 在分析多变量过程控制系统时, 矩阵是最主要的数学分析工具。

对于前者, 就像单变量控制系统的方框图结构一样, 在这样的方框图中, 每一个环节和每一条通道都应当在图中得到表示。虽然这样做是很直观的, 然而当系统中变量数目与通道数目较多时, 这种方框图常常非常复杂与混乱, 并且在有些情况下要绘制这样一个方框图是很困难的, 这一点我们以后将会见到。

应用传递函数矩阵所构成的方框图可以避免上述问题。传递函数矩阵意味着把这样一个系统中某些具有类似作用的传递函数排列成矩阵。这样的矩阵可能是方阵也可能不是方阵。对于一个方阵, 主对角线上各元素, 表示了这个系统固有通道 (主通道) 的传递函数, 而非主对角线上的各元素, 则表示耦合环节的传递函数。因此, 一个对角矩阵表示了所研究的系统或对象无耦合, 或者更确切一些说, 在最终的意义上无耦合。

一般来说, 对于多变量过程控制系统, 传递函数矩阵可以划分为四大类:

- (1) 控制对象传递函数矩阵;
- (2) 调节器传递函数矩阵;
- (3) 解耦环节传递函数矩阵;
- (4) 反馈环节传递函数矩阵。

附带要指出的一点是, 在方框图中所表示出的传递函数矩阵形式可能与它们的计算形式有所不同。这是由于方框图中的传递函数矩阵总是受到图形表示的限制。

例如, 对于图1-2-1所示的系统, 其计算形式是

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

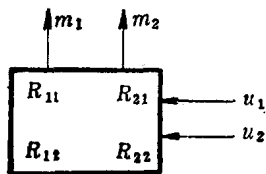


图 1-2-1

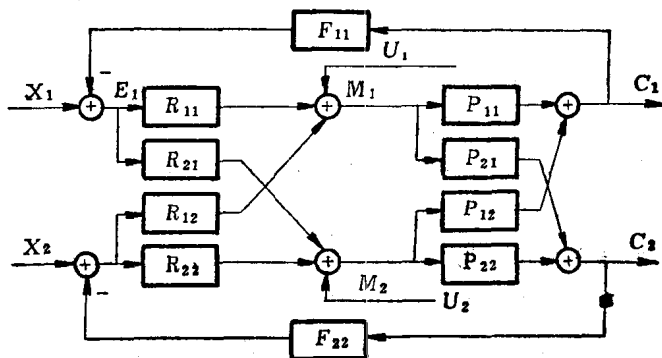


图 1-2-2

很显然, 尽管它们的元素排列方式略有不同, 然而它们所表示的实际关系与性质是相同的。关于这一点, 我们应当有很好的了解。

在上面的叙述中, 我们只是把传递函数集中, 并把它们排列成不同的矩阵形式, 但系统中的各个变量仍然是分别对待的。事实上, 系统中类似的变量可以排列成向量的形式。这样一来, 利用传递函数矩阵与变量向量, 我们就可以得到多变量过程控制系统的完全矩阵表示形式。

例如, 对于一个双变量控制系统, 我们可以用三种不同形式的方框图来加以表示。它们

们分别示于图1-2-2、图1-2-3和图1-2-4。

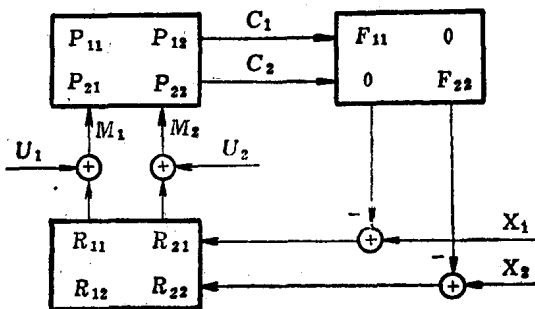


图 1-2-3

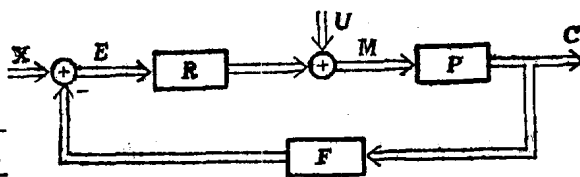


图 1-2-4

其中: X_1 与 X_2 是给定输入量; X 是输入向量; C_1 与 C_2 是输出量; C 是输出向量; U_1 与 U_2 是干扰; U 是干扰向量; P_{11} 与 P_{22} 是控制对象主通道传递函数; P_{12} 与 P_{21} 是控制对象耦合通道传递函数; P 是控制对象传递函数矩阵; R_{12} 与 R_{21} 是解耦环节传递函数, 它们是需要进行设计的; R_{11} 与 R_{22} 是主通道调节器传递函数, 它们与解耦设计有关; R 是调节器传递函数矩阵; F_{11} 与 F_{22} 是固有反馈通道传递函数; F 是反馈传递函数矩阵。

在本书中, 所有上述三种表示形式都会用到。

但是我们还必须注意到, 以图1-2-2为例, 虽然这里有很多环节, 然而由于可能采取不同的连接方式, 它可能不是双变量系统。例如, 图1-2-5所示的四种情形实际上都是单变量控制系统。

图1-2-5(a)是一个很明显的单变量控制系统。图1-2-5(c)也是如此, 这两者都是单独的单变量控制系统。至于图1-2-5(b)与图1-2-5(d), 这两者实际上也是单变量控制系