

[美]R·C·韦里克 著 赵安墉 译 王 璠 校

(非自控专业用)

自动控制基础

上海科学技术出版社

TP276
1

自动控制基础

(非自控专业用)

[美] R.C. 韦里克 著

赵安墉 译 王臻 校



上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书主要讲述的是单输入单输出线性定常反馈控制系统的理论。该理论是本世纪五十年代建立起来的,称之为经典控制理论,至今已广泛用于科学技术的各个领域。

本书显著特点是精简扼要,深入浅出,自始至终以伺服机构作为典型的控制系统,较全面地介绍了机电自控器件的工作原理,较少地采用数学推导,着重用作图法进行系统设计,举例实际,并讲述自控系统的各种试验方法。每章均有例题和习题。

本书适合于从事工科非自控专业尤其是机械工程各专业的师生和技术人员自学、教学或参考。

2077/06

Fundamentals of Automatic Control

Weyrick, Robert C.

McGraw-Hill, Inc. (1975)

封面设计 鲁继德

自动 控制 基础

(非自控专业用)

〔美〕R. C. 韦里克 著

赵安端 译 王璠 校

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 松江科技印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 13 字数 307,000

1983 年 4 月第 1 版 1983 年 4 月第 1 次印刷

印数 1-15,800

统一书号: 15119·2237 定价: (科四) 1.25 元

译 序

根据最近工科高等学校各专业拟出的全国统一教学计划规定, 为了适应我国四个现代化的需要, 今后工科非自控专业大多要开设《自动控制理论基础》作为必修的技术基础课. 所以, 我们翻译了这本教材.

这本书的内容和程度都适合工科非自控专业, 尤其是机械工程类专业作为教材或参考书. 对于将要从事自控工作的工程技术人员来说, 这也是一本便于自学入门并有实用价值的参考书.

本书各章的内容, 它所涉及的基础和预备知识, 以及针对不同学员对象应当如何取舍内容等问题, 在原序中都交待得很清楚, 这里不再赘述.

本书在翻译过程中曾得到我系宁开平教授的帮助, 在此表示感谢.

本书译出后, 已于1978至1979年在本校机械系作为教材试用. 同学们在学习过程中曾对本书的修订提出了一些宝贵意见.

另外, 已有一些兄弟院校拟选用本书作为有关专业的教材. 其中浙江化工学院的老师主动热情地协助我们进行了校对, 为此也在此表示感谢.

因译者水平有限, 译文中缺点错误可能不少, 望读者多加批评指正.

赵 安 墉

于成都科技大学机械系

(1981)

原 序

自动控制是现代技术中必不可少的一部分。机床、化学过程、空间飞行器——实际上一切工业部门都要依靠自动控制系统来满足高性能的需要。

现今的控制系统曾受到第二次世界大战军事需要的巨大刺激,并且继承了1940至1950年间发展起来的线性控制理论的相当成熟的主体。以这种理论为基础的自动控制方法已在实践中得到证实并已获得广泛应用。虽然最新的研究工作都集中在复杂非线性系统的控制,但经典的线性方法仍然是自动控制的基础。本教材的目的就是要介绍这种分析和设计方法的基本原理。

工程技术人员们不仅从试验、校准、以及维护的立场出发正在愈来愈多地和控制系统打交道,而且还要在更多的标准化设计方面去和控制系统打交道。由于这个原因,许多工程技术课程表中都包括了自动控制概论。因为这些课程表中的数学内容一般都包括了微积分学概论,所以自动控制学科就可以在直观推理和一定的数学基础相结合的水平上传授给有关的技术人员。

关于自动控制方面的书籍已经出版了好几百种。因此,可能产生这样的问题:“为什么还要出版有关这个学科的书籍呢?”粗略地调查一下就可以看出绝大多数现有的教材都是为一定的工程水平编写的。它们多半着重于控制系统的理论方面,并以从头到尾地运用微积分学和微分方程的知识为前提。只有极少数的书籍直接针对了技术人员的需要,可是这些书籍又都倾向于定性描述而尽可能少用数学。这本书的目的则是企图在初级读物与高级读物之间搭上桥。

虽然这本书中的理论和方法是打算作为一般控制用的,但是自始至终都把伺服机构作为典型的控制系统。这不仅是因为工业中广泛使用了伺服机构,而且是特别适合于在实验室作实验,在学习自动控制时这是很值得推荐的。

关于预备知识,要用到一些物理学的基础知识,包括力学、电学和磁学。一定的电子学基础对于学习放大器方面的课题是有帮助的,但是对整个课程来说,这并不是必不可少的。这本书并不要求很广博的数学基础,而是需要巩固的代数、三角、以及复数方面的知识。从数学的观点来看,微积分学的初步知识对于学习控制理论是有帮助的,但这也不需要很深的程度,熟悉微分法与积分法的概念也就足够了。书中也用了微分方程,然而,是为了解课程内容的需要来对它们进行介绍和解释。

本书的第一章概述了自动控制中负反馈的基本概念以及控制系统的方块图表示法。第二章的内容是物理系统的数学模型表示法。第三章是叙述自动控制中用到的一些装置,如传感器、动力传动装置和放大器等。

第四章利用最低限度的数学推导论述了简单控制系统的暂态性能。在第五章中是以用得最广泛的时域分析拉氏变换法来继续进行第四章的讨论。这里并没有严密地全面阐述这种方法,而是作为一种运算工具来介绍,着重在它对控制系统的应用。

在第六章和第七章中广泛地论述了分析和设计的频率响应法。这种方法大部分是作图性质的,因此容易被工程技术学员理解和应用。

第八章从直接动手的观点讨论了控制系统的试验。

非线性以及一些别的提高性质的课题在最后一章中作了简要的概述。虽然非线性问题的彻底解决超过了本书的范围,但是技术人员应当意识到非线性的存在,以及把非线性问题作线性分析的界限。

这本书适合于自动控制一个学期的课程。根据不同的学员水平和课程范围,不必使用其全部章节。如果不用解析法,可以大大删减第二章和第五章而不会失去连贯性。第三章可作适当选取,可以去掉那些在伺服机构中不常用到的有关装置的各节。

虽然这本书是专供工程技术学员用的,它对从事实际工作而又希望获得自动控制入门的工程师和技术人员也是有用的。

基础教材的价值不在于它的内容本身,而在于适合一定范围读者的表述方式。对于这本书的素材,作者曾得到许多致力于自动控制的朋友们的普遍帮助。其中我要特别突出一下在古德伊尔 (Goodyear) 航空和航天公司的同事们,在那儿我曾和他们合作进行过许多控制设计工作,从导弹制导到工业过程控制。

Robert C. Weyrick

于美国阿克隆综合大学社会与技术学院

(1975)

目 录

第一章 概论1

- 1-1 总述1
- 1-2 自动控制的历史1
- 1-3 开环控制与闭环控制2
- 1-4 连续控制与不连续控制4
- 1-5 方块图4
- 1-6 方块图的简化法6
- 1-7 闭环传递函数7
- 1-8 精度与稳定性9
- 1-9 自动控制的应用10
- 1-10 伺服机构10
- 1-11 过程控制10
- 1-12 动力生产12
- 1-13 数字控制12
- 1-14 运输12

第二章 数学模型15

- 2-1 概述15
- 2-2 直线性15
- 2-3 微分方程16
- 2-4 机械系统17
- 2-5 电气网络21
- 2-6 热力系统23
- 2-7 液压系统24
- 2-8 通用的系统特性参数26
- 2-9 微分方程的解法27
- 2-10 联立方程组28

第三章 控制系统的部件31

3-1 概述31

A. 传 感 器

- 3-2 电位器31
- 3-3 自整角机35
- 3-4 解算器40
- 3-5 应用自整角机、解算器的伺服机构40
- 3-6 位移计42
- 3-7 转速计43
- 3-8 加速度计45
- 3-9 应变仪45
- 3-10 温度传感器46

3-11 小结48

B. 动力传动装置

- 3-12 直流马达49
- 3-13 交流马达52
- 3-14 齿轮系54
- 3-15 控制阀58

C. 放大器及其它

- 3-16 概述60
- 3-17 运算放大器60
- 3-18 功率放大器64
- 3-19 晶体管放大器64
- 3-20 可控硅整流器66
- 3-21 磁放大器67
- 3-22 旋转功率放大器68
- 3-23 调制器与解调器68

第四章 物理系统的暂态响应75

- 4-1 概述75
- 4-2 输入函数75
- 4-3 一阶系统77
- 4-4 串联的电阻-电感网络78
- 4-5 伺服马达80
- 4-6 速度调节系统(速度伺服机构)82
- 4-7 二阶系统83
- 4-8 串联电阻-电感-电容网络85
- 4-9 位置伺服机构85
- 4-10 暂态响应的特性参数87
- 4-11 用微分反馈加阻尼89

第五章 用拉氏变换进行暂态分析93

- 5-1 概述93
- 5-2 拉氏变换的性质94
- 5-3 拉氏变换的定理95
- 5-4 应用拉氏变换求解微分方程96
- 5-5 拉氏域内的传递函数98
- 5-6 伺服马达的传递函数100
- 5-7 位置伺服机构的暂态分析102
- 5-8 稳态误差104
- 5-9 系统的稳定性107

5-10 特征方程	108	7-11 微分反馈补偿	161
5-11 劳斯判据	109	7-12 前馈控制	165
5-12 根轨迹分析	111	7-13 小结	166
第六章 频率响应分析	117	第八章 控制系统试验	170
6-1 概述	117	8-1 概述	170
6-2 交流电路分析	117	8-2 试验目的	170
6-3 正弦输入的微分方程的变换	119	8-3 试验方法	171
6-4 极坐标频率响应图	120	8-4 暂态响应试验	172
6-5 波德图	121	8-5 频率响应试验	173
6-6 通用的频率响应曲线	123	8-6 传递函数测量方法	175
6-7 常数因子的曲线图	123	8-7 速度响应试验	177
6-8 积分或微分因子的曲线图	124	8-8 控制系统的技术条件	178
6-9 一阶因子的曲线图	124	8-9 控制系统调整(齐格利尔-尼柯耳斯法)	179
6-10 二阶因子的曲线图	128	第九章 控制系统中的非线性	183
6-11 频率响应的技术条件	131	9-1 概述	183
6-12 稳定性判据	132	9-2 小信号线性化	183
6-13 闭环频率响应	134	9-3 不连续的非线性	184
6-14 尼柯耳斯图	136	9-4 非线性效应	185
第七章 控制系统设计	143	9-5 描述函数	185
7-1 概述	143	9-6 饱和与死区	186
7-2 一般原则	144	9-7 磁滞	187
7-3 比例控制	145	9-8 稳定性分析	188
7-4 比例加积分控制	146	附 录	192
7-5 滞后补偿	147	A. 拉氏变换对照表	192
7-6 比例加微分控制	151	B. 部分分式展开式	194
7-7 超前补偿	152	C. 本书符号表	196
7-8 滞后-超前补偿	156	D. 希腊字母符号表	197
7-9 三式控制机	159	习题答案	198
7-10 反馈补偿	160		

第一章 概 论

1-1 总 述

自动控制在我们现代的各行各业中正在起着越来越多的作用。从普通的家庭用具如象自动面包烘烤机和恒温控制炉之类到用于动力生产和空间探索的复杂控制系统，自动控制支配着我们的日常工作。

在某种意义上，自动控制的出现代表了第二次工业革命。19 世纪的工业革命产生了可供人们使用的较大的动力。由于引进了蒸汽动力在很大程度上代替了风力和水力。包括煤、天然气、石油及其副产物在内的燃料则成了生产和运输的主要能源。在工业发展中现已发挥了最大作用的一种能量是电能，看来接下去将用原子能转换为电能。

为了有效地利用动力，就必须学会控制和调节动力。20 世纪的工业革命就是以人们逐步地取得了这种能力为标志。利用动力及其控制手段就能够以不可比拟的高性能机器来完成大多数体力劳动和脑力劳动。

许多从事于工业活动的人只要使用了控制系统的就不得不和它打交道。而对于工程师和技术人员来说，由于其本身工作的性质，自动控制的知识对他们是很有用的。而且，还可以得到其它一些好处。自动控制系统是具有动态特性的物理系统。所以，学习控制理论就为一般地了解动态系统打下了基础。而这是很必要的，因为要有效地控制一个动态系统就必须懂得它。

控制系统常常要用到许多种部件，包括机械的、电气的、电子的、液压的、气动的以及它们的组合部件。因此，从事控制领域工作的人就必须熟悉一系列装置的原理和特性。

自动控制是一门边缘学科，它从许多不同的领域汲取知识。对它的研究有利于把一系列原来认为是各自独立的学科汇集起来，并把它们用来解决共同的问题。

自动控制的基本原理还有更为深远的意义。虽然我们将要涉及到的全部是自动控制的工程应用方面，它的概念却正在扩大到其它领域。经济、政治领域的各个系统也都愈来愈多地被认为与自动控制有关系。虽然人类行为的多样化分散了这些系统的分析，随着不断提高对这些系统动态的理解，控制它们的能力也将会相应地提高。

另外在人体本身的功能中就包含了若干复杂的控制系统。体温的控制，化学成分的控制，以及如象开动汽车等体力活动都是这种人体系统的例子。

1-2 自动控制的历史

也许有更早的应用例子，但是迄今被公认的没有人参与的第一个控制系统是 1788 年吉米·瓦特 (James Watt) 发明的飞球调节器。瓦特断定用人去开关一个蒸汽阀来维持汽轮机转速恒定并不是最好的办法。他发明的调节器示意图 1-1，乃是与汽轮机轴相连接的一个纯机械装置。当调节器轴的转速升高，飞球转得愈快，愈向外。于是汽控阀的联结器沿着轴向上移动，关小汽阀并减慢汽轮机。当转速下降时飞球作相反的运动而使汽轮机转速相应

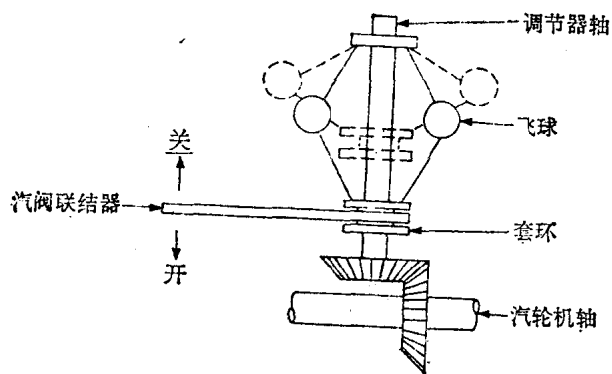


图 1-1 飞球调节器

地升高。

很快就会明白试图改善自动控制精度就必然伴随出现不稳定性。不稳定性的特征为围绕系统的某个规定工作状态作振动或摆动。汽轮机在有调节器控制的情况下，其转速必然围绕预期值波动。早先为消除不稳定性所作的努力在很大程度上是以直觉或试凑为基础的。

自动控制理论研究最早的是 1868 年吉米·克拉克·马克士威耳

(James Clerk Maxwell) 对飞球调节器的稳定性研究。稍后一点是，1875 年胡尔维茨 (Hurwitz)，1884 年劳斯 (Routh)，以及 1892 年李雅普诺夫 (Liapounov) 对自动控制理论的重要贡献。紧接着出现的是调节器在其它发动机上的应用；在 19 世纪初期，调节器开始用于工业控制。大约在此同时，研制出了诸如用于轮船驾驶之类的自动控制装置。

一般认为 1934 年哈仁 (H. L. Hazen) 发表了关于自动控制系统的第一篇严格的理论，由那年起才开始了现代控制。这个理论是根据早期创作者的著作研究得出的。同时也深受同期奈魁斯特 (H. Nyquist)、布拉克 (H. S. Black) 以及波德 (H. W. Bode) 等有关电话系统稳定放大器设计方面著作的启示。

第二次世界大战的需要大大加速了自动控制领域的工作。尤其是船舶、飞机，以及雷达天线系统需要精密而快速的控制导致了理论与实践的巨大进步。随着 1945 年战时安全限制法的废除，控制领域出现了飞跃的发展。从那时起写出了许多书籍以及无数的报告和论文，而在工业和军事上控制系统的应用已经几乎没有什么限制了。

在 1940 到 1950 年间发展了两种性质不同而又相互联系的对控制系统进行分析和设计的方法。在美国主要是采用频率响应法，而在苏联则是采用暂态分析或时间响应法。近年来这两种方法已经互相溶合了，而大多数当代的分析都是以同时应用这两种方法为基础的。

半导体器件与电子计算机两者平行发展的结果使现代自动控制在许多方面获得了成功。电子管、晶体管和集成电路的成功使用提供了可以提高精确性、可靠性以及经济性的控制设备和测试仪器。计算机时代的出现对控制系统具有显著的影响。快速数字计算机将控制领域扩大到包含着一系列相互联系的物理量的大型复杂系统。在工业过程控制系统中数字计算机正获得广泛应用，对许多变量同时进行测量和控制，以获得最佳性能。

1-3 开环控制与闭环控制

“控制”这个词，可以从辞典中找到若干种含意，如命令、指挥、管理和调节等。控制系统则可认为是一组物理部件，能用来指挥输入某个机器或某个过程中去的能量流，实现预期的操作。

“自动化”这个词的意思是自己运动或者自己动作；因此自动控制系统就是自己动作的控制系统。

对控制系统不论是自动化的还是其它形式的，都存在着一个重要区别，即究竟是开环操

纵的还是闭环操纵的。下面用一个简单例子就可以很好地说明自动控制的这两种区别。

假如图 1-2 中的烘箱被电热器加热, 用一个转换开关能给加热元件提供几档电流来控制加热器。开关的设定位置代表输入量, 因为它触发该系统产生输出。烘箱的温度是输出量或被控制量。因为流入加热器的电流是可改变的被操纵量。

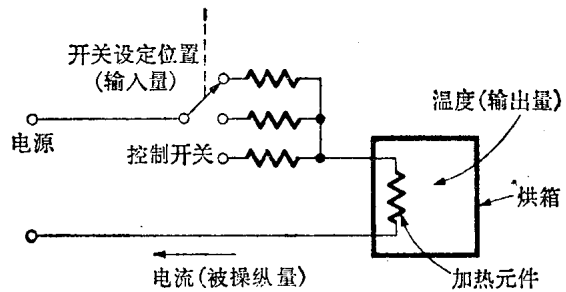


图 1-2 烘箱温度控制开环

相对于控制开关的某一设定位置, 烘箱温度也要达到一个值, 该值与加热器电流以及通过烘箱壁的热损失有关。如果温度不能令人满意, 但实际情况又没有办法来改变烘箱控制的输入量, 即输出量对输入量没有影响。这样的控制系统就被认为是开环控制系统。如果烘箱周围的环境温度改变, 烘箱温度也就随之改变。也就是说开环控制系统不能校正由于干扰了被控量而发生的变化。

人可以加入该系统来把烘箱温度维持在预期值。如图 1-3 所示。通过观察烘箱中的温度计, 人可以改变控制开关的位置使其更接近于需要的温度。这里重要的原因是操作人员能使输出反馈回来与预期值进行比较。加热元件的实际控制取决于误差, 或实际温度与预期温度之差。因此控制开关位置的改变必须按此误差的减小方向作出。如果温度低了, 加热器电流增大, 以供给更多的热量。

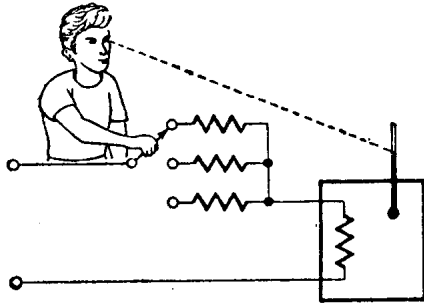


图 1-3 手动闭环式烘箱温度控制

输出影响输入的系统称为闭环控制系统, 或可更通俗地称为反馈控制系统。图 1-3 系统的反馈性质可以通过对闭环的探讨来弄清楚。很明显, 实际温度与预期值的比较功能是由操作者的头脑来实现, 并由他的肌肉反应来执行的。即使烘箱的闭环控制是由操作者建立起来的, 但其结果可能并不那么满意。随着操作者调节转换开关, 温度将在预期值附近周期地波动。凭着操作者的经验而使偏差趋于减小。电源电压波动或者烘箱周围环境温度变化都将影响系统的输出, 使操作者要“重新弄清楚”转换开关的位置。此外, 监视温度计和操作转换开关将是一种呆板而费时的的工作。这种方案可以叫做手动闭环控制系统。

为了进一步改善性能并获得更精密的控制, 可以用机械、电气或者其它形式的比较部件和控制部件来代替人。图 1-4 乃是在自动化的基础上, 即无人参与而执行闭环控制的烘箱控制系统。现在是用一种热电偶装置来测量温度 (见第 3-10 节), 它能产生与温度成比例的电压。这个电压被反馈回去与一个代表预期温度的参考电压进行比较。这两个电压之差经电子放大并用来控制作用于加热元件的电流。因为是从参考电压中减去反馈电压, 故称为负反馈信号。

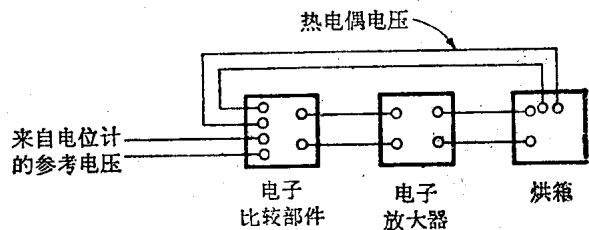


图 1-4 自动闭环式烘箱温度控制

这个例子说明了用自动闭环控制来完成任务比人完成得更快而且更协调。

并且可以把人从奴仆般的工作中解放出来。在闭环控制系统中使用负反馈是要使某个量或某个状态保持预期值,将测得的实际值与预期值进行比较,利用其差值作为初始作用去减小差值。负反馈的概念已成为自动控制系统设计的基础。

1-4 连续控制与不连续控制

根据开环与闭环控制的差别可以将控制作进一步分类,即是用什么样的启动信号去控制由动力源到负载的能量传递。这样就可能有两类控制方式,即不连续控制或数字控制和连续控制或模拟控制。

不连续信号或数字信号按不连续方式变化,在其变化范围内可以只取一定的不连续值。不连续控制最简单的一种形式是开关控制,在这种控制中输入信号的功能是将动力接通或断开。除了接通和断开转换之外没有别的控制。因为只存在两个不连续状态,这种操作可看成是不连续的。图 1-5a 所示的电灯线路是开关控制的一个例子。

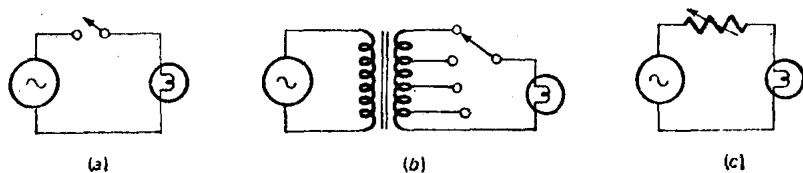


图 1-5 电灯的控制

(a) 开关控制; (b) 分级控制; (c) 连续控制

不连续控制的另一种形式是分级控制,在这种控制中能够用几个可能梯级的任一级来传递能量。例如具有次级抽头和多位开关的变压器可与灯泡连接成如图 1-5b 所示。在这种情况下可以用好几级电压向灯泡供给不同数量的电能。此外图 1-2 和图 1-3 所示的烘箱温度控制也代表了一种分级控制系统。

在模拟系统中通过系统的信号是按连续方式变化的,在可供使用的最大值和最小值之间可以取得任意值。在图 1-5c 中将一个可变电阻与灯泡串联。改变电阻则传递到灯泡的能量也将随之作连续的变化。图 1-4 中的烘箱控制也是一个连续控制的例子。

由于种种原因,在这本书中我们只考虑连续控制系统。连续控制比不连续控制用得广泛得多,尤其在基本控制场合中。另外,连续控制的反馈控制理论由于所用的数学不太复杂,容易懂。学习不连续控制就不一样了。因为不连续控制被认为是学习的先进领域,一般不属于基础控制教材的范围。

1-5 方块图

控制系统是由一系列互相联系的部件组成的。因此在进一步进行系统的分析和设计之前,有必要熟悉系统的表示方法。为了简化具体的系统,常用一系列互相联系的方框或方块来表示它。这种表示方法常称为方块图。这些方块不一定都表示一个完整的装置,有时只代表在系统中出现的某个功能。一方块只有当它的输出与另一方块的输入端相连接而基本不受其影响时才能认为是独立的。当用若干直线段将若干个方块联系起来时,这些方块就表示系统的函数运算。每段连线代表系统中的某个量或变量,箭头则代表信息的单向流动。于是在一个方块中表示的函数信息趋向于强调系统中正在发生什么而未表明借以完成

的是什么手段。

从一个方块输出的信号与相应的输入信号的比值表示此信号通过该方块的传递方式。因此这个比值被定义为该方块的传递函数。由于各系统必定具有一系列互相连系的方块，如果引进了传递函数的简化符号就很容易进行分析。常用的表示法是用一个带适当角标的字母 G 。图 1-6a 表示一个方块所具有的大小为 G_1 的简单比例函数或增益函数。对于这个方块，

$$\text{传递函数} = \frac{\text{输出}}{\text{输入}}$$

$$\text{或者} \quad G_1 = \frac{B}{A} \quad (1-1)$$

其中 A 和 B 分别为输入量和输出量。

首先必须指出几乎没有任何系统

元件具有输出能立即响应输入变化的传递函数。一般在输出响应中都表现出一定的时延或滞后。因此为了表征方块的时间从属特性或动态特性，其传递函数应当具有相应的规定。在后面各章中将要论述这样的传递函数。为了眼前介绍方块图表示法，将限于只具有增益特性的那些传递函数。

若将各方块串联起来，就是把一个方块的输出与另一方块的输入相连接，它们的传递函数可以合并。其总传递函数是各方块的传递函数的乘积。这种方法适用于任意个串联的具有线性传递函数(直线性将在第 2-2 节中讨论)的方块。作为一个例子，图 1-6(b) 中串联方块总的传递函数 G_T ，

$$G_T = \frac{C}{A} = \frac{B}{A} \times \frac{C}{B} = G_1 \times G_2 \quad (1-2)$$

在方块图上信息相加点用一个圆圈表示。两个以上的变量可以在一个相加点上相加

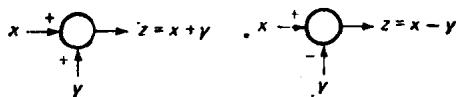


图 1-7 相加点表示法

或相减。图 1-7 表示两个变量的合并。在相加点上有具正号的变量通过相加点后不变号；具有负号的变量通过后要变号。

在相加点上合并的量必须单位相同；例如两个电压可以合并，但是一个电压和一个电流就不能合

并。任意个变量都可进入同一个相加点。

当一个方块的输出要作用到两个以上的方块上时，就要使用引出点。引出点被简单地表示为一个点，如图 1-8 所示。

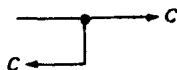


图 1-8 引出点表示法

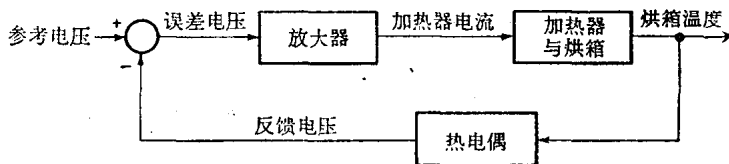


图 1-9 烘箱温度控制方块图

为了说明一个系统的方块图表示法，让我们再来考察前节讨论的烘箱温度控制。该系统用方块图形式表示为图 1-9。在这个具体的图中不同的方块相当于系统中不同的元件。

方块图有助于了解系统的物理关系，并为分析系统提供了方便的基础。我们还可看出

方块图在指出表面上无关的系统之间的相似性方面也是有用的。必须强调指出联系各方块之间的线段代表了系统中控制信息的流动，而系统的主要动力源则不必包括在方块图内。

1-6 方块图的简化法

为一个系统最初画出的方块图可能包括了大量的方块和信号通道，要比预期的复杂得多。在这种情况下可以作出简化方法来将该方块图简化为只有少数几个方块的形式。将一个系统图重新整理为有效的简化图的数学称为方块图代数，因为它与代数方程的简化法相似。但是比起简化的一个系统方程来说，简化的方块图的优点是能够更好了解系统中各元件的相互关系。

如 1-5 节所述，将串联的若干方块合并为一个方块显然是走向简化的一步。作为另一个可能方法，有时围绕一个方块移动相加点也是有用的，如图 1-10 所示。应当注意到输入

表 1-1 方块图恒等式

序号	变 换	原 方 块 图	等 效 方 块 图
1.	合并串联的方块		
2.	合并并联的方块		
3.	移动方块前的相加点		
4.	移动方块后的相加点		
5.	移动方块前的引出点		
6.	移动方块后的引出点		
7.	闭环系统的简化		

量 A 和 B 都通过一个带有函数 G 的方块, 而相加点正是围绕这样一个方块转移的. 应用代数的分配律得知

$$C = (A+B)G = AG + BG$$

所以这两个图等效.

表 1-1 列出了若干个用来简化方块图的变换式, 这些变换式可以用两个等效图的输出相等来证明. 注意这些原始恒等式与等效恒等式可以互换使用.

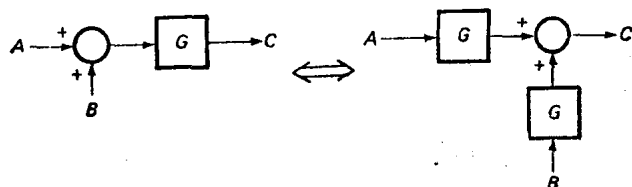


图 1-10 围绕一个方块移动相加点

1-7 闭环传递函数

因为某些函数和变量常与反馈控制系统有关, 可以作出一个公式化的通用方块图并推导出有关的闭环传递函数. 在这种情况下要利用已有的与反馈控制系统有关的一些标准符号和术语.

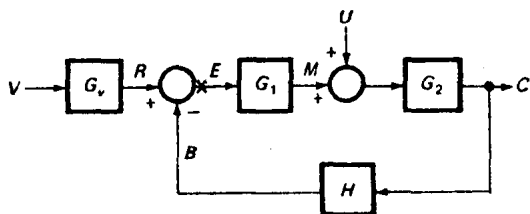


图 1-11 控制系统的通用方块图

图 1-11 是闭环控制系统的通用方块图.

重点是要清楚地理解图中所用到的名词.

系统的变量:

预期值 V ——一个加给系统的外部信号, 它能使过程产生一个特定的输出. 预期值有时可称为系统命令或设定点.

参考输入量 R ——由预期值得来, 是输入控制环路的外部信号. 它是作为与反馈信号作比较的参考信号.

被控输出量 C ——被控制的过程变量.

操纵变量 M ——由控制元件加给过程的控制信号.

反馈信号 B ——被控输出量的函数, 并且是与参考输入量相加的一个信号.

误差或启动信号 E ——指参考输入量与反馈信号的代数差, 根据此差值发出信号作用于控制元件.

干扰输入量 U ——是不希望有的进入系统的输入信号, 它会助长被控输出量偏离参考输入命令值. 干扰输入量是由加在系统上的负载变化而引起的. 例如 1-3 节所述烘箱周围环境温度的变化就是一种干扰, 因为它改变了烘箱需要的输入热量. 显然系统对干扰输入的响应应当最小.

系统的元件:

参考输入元件 G_v ——将预期值转换为参考输入信号.

控制元件 G_1 ——有时称为控制机(器), 根据误差信号而对过程发出控制信号的部件.

反馈元件 H ——测量或感受出被控输出值并要求转换为适用的反馈信号的部件.

系统元件或过程 G_2 ——指某一特定量受到控制的物体、过程或机器.

图 1-11 中表示的控制系统是由两个基本部分组成的. 标示 G_1 和 G_2 的方块所组成的启动信号与被控输出量之间的传递通道, 称为系统的前向增益通道. 方块 G_1 包含了控制元件, 而方块 G_2 乃是被控的过程或系统. 为了方便, 在分析图 1-12 中可用乘积 $G_1 \times G_2 = G$ 来代表前向增益. 通过方块 H 的反馈通道是从被控输出量到反馈信号的传递通道. 反馈信

号和参考输入信号在相加点进行比较,其差值即为误差信号。因此,在相加点上

$$E = R - B = R - CH \quad (1-3)$$

因为前向增益方块 G 的传递函数为 C/E , 故 $E = C/G$ 。在方程(1-3)中代入 E 得出

$$C/G = R - CH \quad (1-4)$$

闭环传递函数 C/R 可由解方程(1-4)获得

$$C/R = \frac{G}{1+GH} \quad (1-5)$$

注意此关系式正是表 1-7 中所示的恒等式 7。由方程(1-5)可揭示出闭环控制系统如下的一个重要特性。如果前向增益 G 大到足以使 $GH \gg 1$, 则闭环增益可简化为

$$C/R \approx \frac{1}{H} \quad (1-6)$$

即闭环的性能取决于反馈通道的特性,本质上与包括过程本身的前向增益的特性无关。如果前向增益因某种原因而变化,系统中的反馈将排除此变化对输出的影响。因此只需校准

反馈元件(例如图 1-4 中的热电偶)而不必校准该系统。

如果在某点(例如图 1-11 中的 X 点)将闭环中断,则循此环路的增益为 GH 。这个增益被称为开环传递函数并且常表示为反馈信号与误差信号之比。因此

$$\text{开环传递函数} = \frac{B}{E} = \frac{CH}{E} = \frac{EGH}{E} = GH \quad (1-7)$$

如果取 G 作为前向增益,方程(1-5)可解释为

$$\text{闭环传递函数} = \frac{\text{前向增益}}{1 + \text{开环传递函数}}$$

图 1-11 的一个特殊情况就是实际中常遇到的包含了输出与参考输入的直接比较。因为这时反馈方块的值为 1, 方程(1-5)变成

$$C/R = \frac{G}{1+G} \quad (1-8)$$

这时的系统称为单位反馈系统,被控输出量为参考输入量的复现。

分析干扰输入 U 的影响时可先假定参考输入为零。在这种情况下,可以把它看成图 1-12 所示的系统。

参照前面的分析,得到

$$C = G_2(U + M) - G_2U - G_1G_2HC \quad (1-9)$$

对响应 C/U 求解方程(1-9)得

$$C/U = \frac{G_2}{1+G_1G_2H} \approx \frac{1}{G_1H} \quad (1-10)$$

当 $G_1G_2H \gg 1$ 时从方程(1-10)看出,随着开环传递函数数值的增大,干扰输入的影响将被减小。由此可见控制机的高增益 G_1 可以保证精确的被控输出量,即对系统的干扰量极不敏感。

下面例子将说明表 1-1 方块图恒等式的使用及闭环系统总传递函数的简化方法。

【例 1-1】

试简化图 1-13 所示的方块图,并求出传递函数 C/R 。

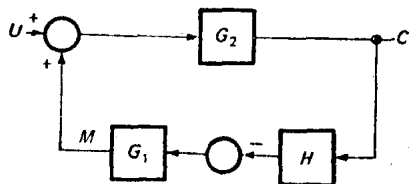


图 1-12 具有干扰输入的系统

解: 我们看出在该系统中有两个反馈通道。如果这两个通道是并联的, 可以利用表 1-1 中的恒等式 2 求出一个反馈函数。为达到这个目的需要重新排列系统元件。利用恒等式 4, 里面一个相加点可以移到左边如图 1-14a 所示。另外, 利用恒等式 5 可将里面一个引出点移到右边。然后将这些串联方块和并联的反馈方块合并成图 1-14b 所示的简化图。利用恒等式 7, 该闭环传递函数为

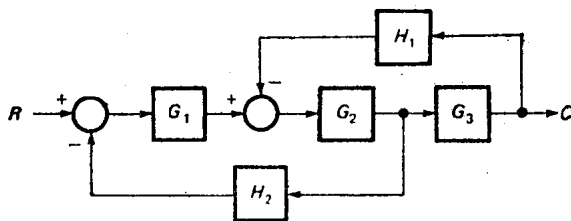


图 1-13 例 1-1 的方块图

$$C/R = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_1 G_2 G_3 [(H_1/G_1) + (H_2/G_3)]} = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_2 (G_3 H_1 + G_1 H_2)}$$

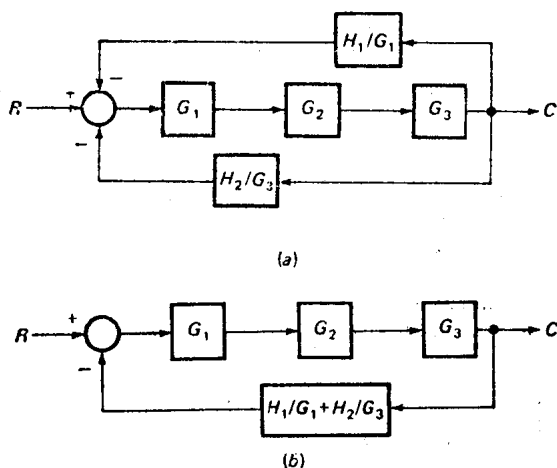


图 1-14 例 1-1 方块图的简化图

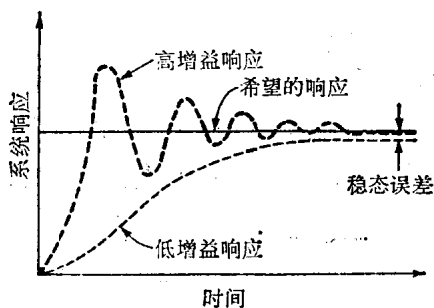


图 1-15 对于阶跃输入命令的系统响应

1-8 精度与稳定性

对控制系统的主要要求是, 当条件变化而系统受到干扰时被控变量应精确地保持在规定的限度之内。闭环控制对精确性有利, 因为负反馈力图连续减小任何误差使其达到可允许的数值。然而, 在一定条件下校正作用却会产生不稳定工作。稳定的系统对输入的响应能在一个合理的时间间隔内达到并保持为一个有效值。而一个不稳定的系统则不能有效地把被控变量保持在预期值。其输出可能激励到一个过大的极限值, 或者产生一个剧烈的持续振荡使得控制失灵或者甚至破坏。如果将稳定的闭环性能比作由熟练操作者操纵的手动系统, 则不稳定系统可以比作由未经训练的和不负责任的操作者操纵的手动系统。

各种控制元件和(或)被控系统在响应中的时延或滞后是不稳定性的根源。为了说明不稳定性, 我们假定误差信号为零, 系统不再需要校正。然而, 系统中固有的时延可能会阻止控制作用的及时停止。这就妨碍了阻止被控变量超调的作用, 因而超调将导致相反方向的校正作用。如此连续的校正作用将会持续下去并且可能造成输出的危险变动。

从另一个观点看, 系统的时延可能使反馈加强输入信号, 而不是减弱输入信号。这时的反馈已变成正反馈而不是负反馈, 它能引起连续振荡。应当看到正反馈有时也是有用的, 例如在振荡电路中产生一个预期的正弦波输出。