

高等学校教材

自动控制理论

华中工学院 孙扬声 主编

水利电力出版社

高等学校教材

自动控制理论

华中工学院 孙扬声 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是全国高等院校电力工程类专业的统编教材。内容以解决电力工程实际问题常用的经典控制理论为主，也吸收了现代控制理论中的某些基本概念和基本方法。包括如下部分：控制系统数学模型的建立，技术性能要求，各种性能分析，系统综合，以及有关非线性系统和离散系统的必需知识等。为了与生产实践密切结合，书中列举了一些电力系统中的应用实例。

本书供高等院校“电力系统及其自动化”专业、“发电厂及电力系统”专业以及其它电力工程类专业作为80~90学时课程的教材，也可供从事电力系统自动化工作的工程技术人员参考。

高等学校教材

自动控制理论

华中工学院 孙扬声 主编

*

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

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 21.5印张 484千字

1986年6月第一版 1986年6月北京第一次印刷

印数00001—14410册 定价3.10元

书号 15143·5958

前 言

本书是根据水电部高等学校电力工程类专业教材编审委员会继电保护及自动化教材编审小组在一九八二年九月会议上审订的《自动控制理论》教学大纲，作为全国高等工业院校“电力系统及其自动化”专业、“发电厂及电力系统”专业以及其他电力工程类专业的教材而编写的。

本书重点叙述经典控制理论，也涉及到现代控制理论。在两者关系的处理上，力求把属于经典控制理论基础的传递函数法和属于现代控制理论基础的状态空间法有机地结合起来，使其浑然一体，以便读者能获得全面而完整的概念。在内容编排上，既照顾到理论体系的完整，又力求贯彻“少而精”的原则，以对控制系统进行分析与综合的体系为线索，讲清其中的一两种理论方法。重点是频率响应法和根轨迹法。在理论与实践的结合上，力求举出电力系统中的实例，以提高学生运用控制理论解决实际工程问题的能力。此外，在编写中也考虑到当前已在岗位上从事电力系统自动化工作的工程技术人员对掌握控制理论解决实际问题的迫切愿望，使他们也能从本书获得帮助。

全书共分十一章。其中第四、五、六章的初稿由华中工学院张永立同志编写；第八、十、十一章的初稿由天津大学孙雅明同志编写。其余各章的编写和全书的体系编排、内容取舍、最后成文等统稿工作均由主编人完成。每章后所附习题大部分由张永立、孙雅明两同志提供。此外，张永立同志根据用本书油印稿在本科学生中讲授的经验，对原稿提出了一些修改意见。本书中如有错误，应由主编人负责。

全书由山东工业大学张荣祥同志主审，并提出了许多宝贵意见。在高等学校电力工程类专业教材编审委员会继电保护及自动化编审小组一九八三年和一九八四年两届扩大会议上，编审委员和其余代表对编写提纲和油印稿进行了讨论，也提出过一些很好的建议。主编人在统稿过程中和最后定稿时，对这些意见均进行了认真的考虑。愿借此机会向以上有关同志表示衷心的感谢！

书稿虽经再三讨论、修改，但由于编写水平有限，肯定还存在许多缺点和错误，因此恳请广大读者批评指正。

主 编

一九八五年五月一日 于华中工学院电力系

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 自动控制	1
第二节 自动控制系统的基本属性	1
第三节 自动控制系统的基本结构	3
一、开环控制系统	4
二、闭环控制系统	6
习题	10
第二章 线性动态系统	11
第一节 动态系统及状态	11
一、系统——黑盒	11
二、什么是动态系统，什么是状态	12
第二节 关于动态系统的线性	14
第三节 线性动态系统的状态空间描述	15
一、单输入单输出系统	15
二、多输入多输出系统	17
三、状态变量的非唯一性	20
第四节 状态空间描述的Laplace变换	20
一、对Laplace变换的复习	20
二、状态空间描述的拉氏变换	22
第五节 状态转移矩阵	23
一、用拉氏变换求解状态转移矩阵	23
二、状态转移矩阵的指数形式	25
第六节 线性动态系统的输入输出描述	26
一、传递函数	26
二、冲激响应函数	28
第七节 完全表征	30
本章小结	32
习题	33
第三章 传递函数的建立	35
第一节 传递函数方框图	35
一、传递函数方框图的建立	35
二、方框图的变换规则	37
第二节 环节的传递函数及负载效应	41
一、传递函数的基本因子及典型环节	41
二、负载效应	45

第三节 电气环节的传递函数	46
一、复阻抗	46
二、由运算放大器构成的环节	48
第四节 发电机励磁控制系统	50
一、励磁控制系统的构成及动作原理	50
二、发电机的传递函数	52
三、功率励磁装置的传递函数	54
四、励磁控制系统的传递函数方框图	55
第五节 信号流程图及Mason公式	56
一、信号流程图	56
二、Mason公式	57
第六节 由传递函数求状态空间描述	60
一、由传递函数方框图绘制状态变量模拟图	60
二、传递函数的实现	62
本章小结	66
习题	67
第四章 反馈控制系统的性能及暂态、稳态性能分析	71
第一节 反馈控制系统性能概述	71
一、以单位反馈系统作为研究的主要对象	71
二、性能与误差的关系	73
三、性能与输入的关系	74
四、性能准则	75
第二节 暂态性能	76
第三节 二阶系统的暂态性能分析	79
一、典型二阶系统及其暂态响应	79
二、性能指标与闭环极点位置的关系	82
三、非典型二阶系统	86
第四节 高阶系统的暂态性能与闭环零、极点配置的关系	87
一、闭环零、极点及留数	87
二、闭环主导极点	89
第五节 参考输入作用下的稳态误差分析	90
一、系统按稳态误差划分的型	90
二、稳态误差分析	91
第六节 扰动对稳态误差的影响及补偿措施	94
一、调差率	94
二、稳态误差的消除与所需调差率的获得	97
本章小结	100
习题	101
第五章 频率特性	104
第一节 频率特性	104
一、频率响应与频率特性	104
二、由零、极点配置确定频率特性	107
第二节 频率特性的极坐标图(Nyquist图)	108

一、一阶环节的极坐标图	108
二、二阶环节的极坐标图	110
三、高阶系统极坐标图的一般形状	111
第三节 频率特性的对数坐标图(Bode图)	114
一、Bode图及其特点	114
二、基本因子的Bode图	115
三、Bode图的合成法	121
第四节 由闭环频率特性估计暂态性能	126
一、频域带宽与暂态性能的关系	126
二、频域谐振峰值与时域过调量的关系	128
第五节 由开环Nyquist图确定闭环频率特性	129
本章小结	132
习题	133
第六章 稳定性分析	135
第一节 线性系统有界输入有界输出(BIBO)稳定性	135
第二节 特征方程与稳定性的关系	137
第三节 Liapunov稳定性及渐近稳定性	138
一、自由系统的平衡状态	138
二、Liapunov稳定性与渐近稳定性的定义	139
第四节 Liapunov直接法	141
一、基本定理	141
二、Liapunov直接法在线性系统中的应用	144
第五节 Routh稳定判据	145
一、Routh稳定判据	146
二、利用Routh判据估计稳定裕量	149
第六节 复平面上的围线映射	150
第七节 Nyquist稳定判据	153
一、基本思路	153
二、Nyquist稳定判据	155
三、虚轴上存在极点时的Nyquist稳定判据	156
第八节 稳定裕量	158
一、利用开环Nyquist图确定稳定裕量	158
二、相位裕量、幅值裕量与谐振峰值的关系	160
第九节 Bode图上的稳定性分析	163
一、利用Bode图确定稳定裕量	163
二、Bode定理介绍	165
本章小结	168
习题	169
第七章 基于Bode图的设计及校正	173
第一节 设计概述	173
第二节 校正的任务与类型	175
第三节 并联校正与PID控制作用	177

一、引入积分控制作用	177
二、引入微分控制作用	180
三、引入积分加微分控制作用	182
第四节 等效谐波输入法与稳态误差 禁区	184
一、等效谐波输入法	185
二、稳态误差系数与禁区的关系	188
第五节 串联校正	192
一、超前校正	193
二、滞后校正	197
三、滞后—超前校正	201
第六节 局部反馈校正	204
一、削弱非线性的影响	205
二、减小时间常数	209
三、正反馈	210
本章小结	211
习题	212
第八章 根轨迹法	214
第一节 特征根的希望位置	214
第二节 什么是根轨迹法	215
第三节 根轨迹图的 绘制	218
一、幅角条件与 幅值条件	218
二、绘制根轨迹的 一般 规则	219
第四节 超前和滞后环节对根轨迹的影响	229
一、超前环节对根轨迹的影响	229
二、滞后环节对根轨迹的影响	231
第五节 基于根轨迹法的校正	233
一、超前 校正	234
二、滞后校正	238
本章小结	239
习题	239
第九章 线性最佳控制 系统	242
第一节 基于二次型性能指标的最佳控制 问题	242
一、什么是最佳控制问题	242
二、最佳调节器问题	243
第二节 用Liapunov直接法求解 最佳调节器 问题	245
一、最佳状态调节器问题的解	245
二、输出调节器问题转化成状态调节器问题	247
第三节 Riccati方程的解	249
一、预备知识	249
二、Riccati方程的唯一 正 定解	249
第四节 最佳调节器的频域分析	253
一、频域中的重要 关系式	253

二、Nyquist图分析	254
本章小结	257
习题	258
第十章 非线性控制系统	260
第一节 非线性系统的特异现象	260
一、典型静态非线性环节	260
二、动态行为上的特异现象	262
第二节 Liapunov稳定概念的拓广	264
一、关于参考轨迹的稳定性	265
二、极限环的稳定性	267
第三节 描述函数	268
第四节 用描述函数法分析非线性系统的稳定性	276
一、谐波平衡方程	276
二、在Nyquist图上的稳定性分析	278
三、在Bode图上的稳定性分析	282
本章小结	286
习题	287
第十一章 离散系统	289
第一节 连续信号的采样与复现	289
一、采样过程及其数学描述	290
二、保持器	292
三、采样定理	294
第二节 Z变换	297
一、定义	297
二、变换方法	298
三、Z变换的性质	302
四、Z反变换	306
第三节 离散系统的时域描述	308
一、线性差分方程	308
二、离散系统的状态方程	310
三、用Z变换解差分方程	314
第四节 脉冲传递函数	317
一、定义	317
二、系统脉冲传递函数的求法	318
第五节 在Z平面上的稳定性分析	322
一、Z平面上的稳定性	322
二、稳定性的代数判据	325
三、Nyquist稳定判据	327
四、根轨迹法	329
本章小结	330
习题	331

第一章 绪 论

第一节 自动 控制

所谓自动控制,指无需人经常直接参与,而是通过某种装置对某一对象施加合乎目的的作用,以使其产生所希望的行为或变化的控制。上述控制虽然不是由人力来直接完成的,但却是由人为了某种目的而预先造好的装置来完成的。这样的装置称为控制器。后者按照人的预先安排,接收某种信息,并遵循一定的法则加工这个信息使其变为控制作用,以施加在对象上。这样的对象称为被控对象。被控对象在控制作用的影响下,在其功能的限度内改变自己的状态。

这里,控制的目的是很重要的。对同一个被控对象,如果目的不同,所要求的控制也会不同。以一台同步发电机为例,若我们的目的是将它开动起来,那么就需要一系列启动、升速的控制设备,按照确定的启动程序进行控制。这属于自动程序控制之类。若我们的目的是使运行中的发电机的电压符合给定值,那么就需要一台自动电压控制器,通过改变发电机的励磁实现对发电机电压的自动控制。

其目的是为了被控对象的状态符合某种常数的这种控制,也可以称为调节。例如上例中的后一种就可以称为自动电压调节。因此调节是控制的局部情形。

由控制器、被控对象等部件为了一定的目的有机地联结成的一个进行自动控制的总体,称为自动控制系统。

自动控制理论这门科学,以自动控制系统为研究对象,用动力学的方法在运动和发展中考察系统,揭示出为所有类型或某些类型系统所共有的普遍规律,并在此基础上指出将理论用于工程实际的途径。具体些说,自动控制理论的任务是采用数学方法对自动控制系统进行分析与综合。在这里,所谓分析,指在给出系统数学模型的基础上,确定系统的性能。所谓综合,指在对系统性能提出要求的基础上,确定一个满足要求的系统模型。

需要指出,尽管构成各个实际物理系统的具体结构形形色色,但是就某种目的来说,只要它们具有同样的功能,就都可用同一的数学模型来表征。当一个系统的数学模型一旦建立起来,那末对它们的研究,便可以纳入自动控制理论的统一的研究轨道。从这个意义上说,大多数从事不同专业的工程技术人员和科学工作者,都可以应用而且也都需要一定的自动控制理论知识。

第二节 自动控制系统的基本属性

自动控制系统是一般的系统的一种。关于系统的概念,连同关于控制、信息及反馈的概念,是包括自动控制理论在内的一门更具有普遍性的科学——控制论的几个最重要、最

基本的概念。明确而深刻地指出它们的重要性，是本世纪五十年代的事。功绩应属于控制论的奠基人美国学者N. Wiener。

系统是一个很广泛的概念，包括我们所感兴趣的几乎所有可以作为一个有机整体来研究的事物。系统可以定义为：若干元素为了某种目的有机地相互结成的一个总体。这个定义指出了系统的三种基本属性，即：（1）整体性；（2）各元素之间的关联性；（3）人所把它当作系统的目的性。

自动控制系统除了具有这三种属性而外，还具有一定的个性，即它是一个动态系统，并在其中存在着自动控制作用。

所谓动态系统，就是说在系统中从一个状态到另一个状态的变化不能瞬时地完成，而只能是一个渐变的过程。其所以如此，是因为任何一个真实的动态系统中状态的变化，总是通过系统中存在着的物质与能量的转换或传递而体现出来，这种转换或传递显然不能瞬时地完成。从这个意义上，严格地说，一切真实的系统都是动态系统。但是如果系统中某部分状态的渐变过程的持续时间与其他部分的相比可以忽略不计，并且其渐变过程的性质对分析整个系统的行为也没有重大影响的话，那么就不必考虑该部分的动态性质，即可以假设其中状态的变化是随着产生它们的原因而瞬时地出现的。

在任何系统中的各元素之间以及系统作为一个整体与外界之间都存在着相互联系、相互作用。自动控制系统中的控制器对被控对象的作用即控制作用，是代表这种系统的特征之一。控制作用以及系统中其他的相互联系、相互作用，实质上就是系统中的物质与能量的转换或传递。但是有一类联系或作用的主导因素是信息内容，即把关于一个元素的状态的消息、情报或数据传送到另一个元素上去。这时信息的物质形式或能量形式是次要的。以一定的物质形式或能量形式出现、用以传送信息的载体称为信号。在自动控制系统中的控制作用，是控制器通过其输入信号从系统外部或内部取得信息经加工而产生的。

由于 Wiener 的工作和控制论的出现，冲击了关于世界由物质和能量组成的旧观念，代之以世界由物质、能量和信息这三种部分组成的新观念。关于信息概念的重要性由此可见一斑。但对这个内容极为深刻的哲学概念进行详述，不是我们的目的。只是顺便再说明一句：在控制系统的信息交换中，信息的反馈是特别重要的（关于反馈，见第三节）。

系统是一个相对的概念，由于考察的目的性不同，对某一组元素的总体我们可以当作一个系统，有时也可以把总体中的一部分当作一个系统，只要它们符合系统的三种基本属性。由总体中的一部分构成的系统，称为子系统。

还须指出，在控制理论中，把一个控制系统划分成元素或子系统，主要不是依据这些元素或子系统是否具有相对独立的物理结构，而是依据它们是否具有相对独立的功能或运动规律。在本书中，我们有时也称功能结构单位为环节。

考虑一个电动机控制系统的例子，如图1-1(a)所示。该系统由控制器和被控对象（电动机）两个部分组成，它们各用一个方框表示。该系统可以分成三个环节，如图1-1(b)所示。

这个系统通过从外界输入电压 u_r （称为参考输入电压）来确定电动机的角位移 θ 。在这里， θ 是被控制量，或者称为系统的输出变量。 u_r 是人们为得到所希望的角位移而施加

于控制器上的参考输入信号。不同的 u_r 对应于角位移的不同希望值。设后者表为 $\hat{\theta}$ ，则 u_r 应与 $\hat{\theta}$ 相对应，同时要求实际角位移 θ 能尽可能准确地跟踪 $\hat{\theta}$ 的变化（图中未示出 $\hat{\theta}$ ，只示出了 u_r ）。

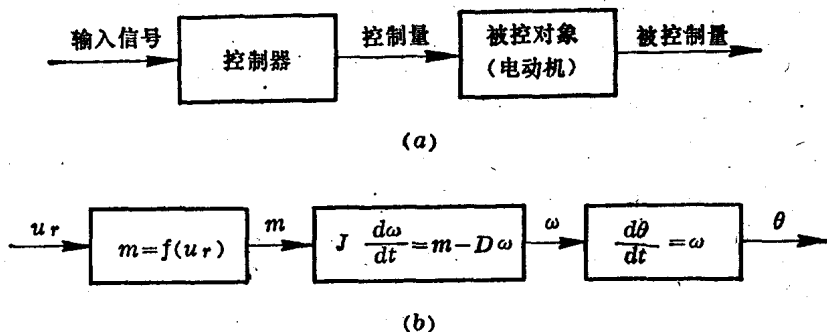


图 1-1 电动机控制系统

(a)方框示意图；(b)系统中的三个环节。

u_r —参考输入电压； m —作用于电动机上的电磁转矩； ω 、 θ —电动机的转速与角位移； J —电动机及被拖动机构的转动惯量； $D\omega$ 、 D —阻尼转矩及阻尼系数

参考输入信号作用于控制器，后者按某种确定的规律对输入信号进行加工，从而产生相应的控制量

$$m = f(u_r) \quad (1-1)$$

这个控制量 m 假定是作用于电动机上的电磁转矩。电动机在 m 的作用下，产生旋转运动。根据动力学中的牛顿定律和运动方程，可以求得关于转速 ω 与角位移 θ 的关系式如下：

$$J \frac{d\omega}{dt} = m - D\omega \quad (1-2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (1-3)$$

上列三式分别表征了系统中三个环节的函数功能，用方框图表示如图 1-1 (b) 所示。

在图 1-1 中，每一个方框代表系统中的一个元素、环节或子系统。用以联系各个方框之间和系统与外界之间、具有单方向指向的有向线段，代表方框的输入、输出变量。这样的图解表示，称为系统的方框图。用这种图形表示系统的功能，具有比较直观和醒目的特点，在本书中将经常采用。

第三节 自动控制系统的基本结构

自动控制系统的性能，在很大程度上取决于系统中的控制器为了产生控制作用而必须接收的信息的来源。这个来源，除了一般来自系统外部的参考输入信号以外，还可能来自被控对象的输出变量，以作为被控对象的行为或状态的信息。把从被控对象输出端获得的信息，通过中间环节（称为反馈环节）再送回到控制器的输入端，称为反馈。传送反馈信息的载体，称为反馈信号。是否采用反馈，对控制系统的性能影响极大。因此，系统的基本结构也就按有无反馈而分为两大类：开环控制系统和闭环控制系统。

一、开环控制系统

一个控制系统，如果在其控制器的信息来源中不包含来自被控对象输出端的反馈信息，则称为开环控制系统，或前馈控制系统。图 1-1 所示的系统就是一个开环控制系统。

此外，还可以举出在电力系统中广泛应用的发电机自动励磁控制系统的例子，如图 1-2 所示。

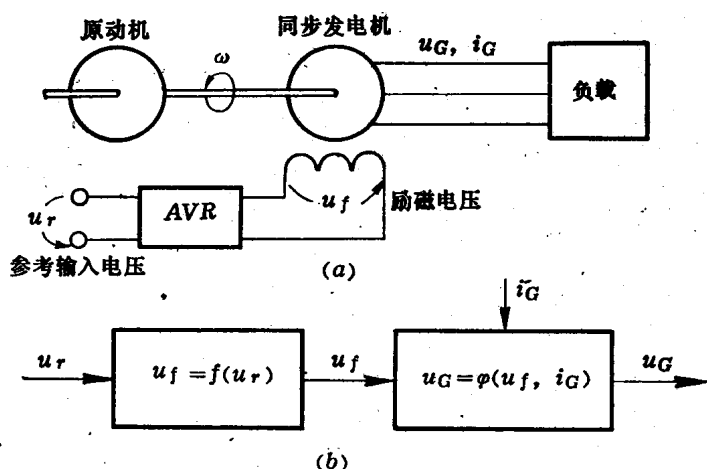


图 1-2 开环状态的发电机自动励磁控制系统

(a) 电气接线图, (b) 系统方框图

图中的被控对象是三相交流同步发电机。这里的控制器称为自动电压调节器 AVR (Automatic Voltage Regulator)。发电机由原动机带动旋转，并向所接负荷供给电力。系统的被控制量即输出变量是发电机的机端电压 u_G (有效值)。控制的目的是在随机变化着的负载电流 i_G (有效值) 之下，维持 u_G 符合某一恒定的希望值 $\hat{u}_G = \text{const}$ 。正如前面已经提过的，这种控制又可称为调节；而相应的系统，则也可以称为自动励磁调节系统。系统的参考输入信号 u_r 是与 $\hat{u}_G$ 相对应 (成比例) 的直流电压。通常 u_r 从具有恒定直流电源的一个可调分压器上取得所需电压。

控制系统中控制器的输出变量 (即控制量) 对其输入变量的依存关系，称为控制规律。图 1-2 中的控制器 AVR 的输入量是 u_r ，而其输出量则是供给发电机励磁绕组的励磁电压 u_f 。这里的控制规律可以表为

$$u_f = f(u_r) \quad (1-4)$$

如上述，反映系统希望值的这种输入，我们称为参考输入。此外，从所研究的系统外部还可能有一些其他输入，对系统的行为也会产生影响。这样的输入，我们称为外界扰动输入 (简称扰动)。

在图示系统中，发电机电压 u_G 是系统的输出，而发电机电流 i_G 则应视为受外界负荷变动影响的一个扰动输入。亦即，这里的被控对象有两个输入，被控制量由它们确定：

$$u_G = \varphi(u_f, i_G) \quad (1-5)$$

从图 1-2(b) 清楚看出，由于控制器 AVR 的输出只由 u_r 确定而与扰动 i_G 无关，所以要

想在随机变化着的 i_a 的作用下保持 u_a 符合恒定的希望值 $\hat{u}_a$ 是不可能的。因此，这种开环自动控制系统，实际上很少作为一个自动控制系统而使用。

但我们可以考虑一个补偿措施：将扰动的信息引入控制器的输入端，用控制器的控制作用来抵消扰动对被控对象的影响。具体的做法是：对于开环的自动励磁控制系统，可以在发电机定子电流回路中加装电流互感器，用以检测电流 i_a ，再将检测所得结果 i_{a2} （电流互感器的二次电流），通过整流器变换成相应的直流信号，送入AVR中。图1-3所示即为加上补偿后的开环励磁控制系统。

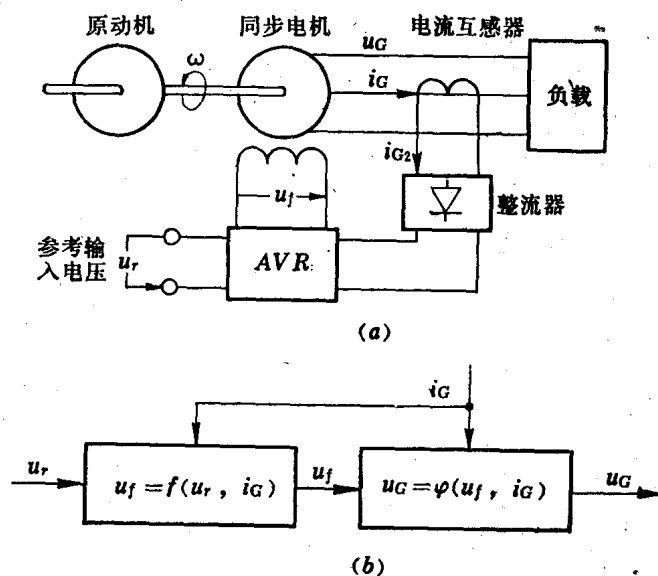


图 1-3 带补偿的开环励磁控制系统
(a) 电气接线图；(b) 系统方框图

图1-3这种按扰动进行补偿的系统，仍然属于开环控制系统，原因是：AVR的输入信息中虽然包含了扰动的信息，但却不包含由被控对象提供的输出信息。

从理论上说，适当选择控制规律

$$u_f = f(u_r, i_a) \quad (1-6)$$

可以抵消扰动 i_a 对系统输出 u_a 的影响，从而使 u_a 只由参考输入 u_r 确定。这就是按扰动进行补偿的基本思想。在完全补偿的情况下，若保持 u_r 等于某一与希望值 $\hat{u}_a$ 相对应的数值，那么系统的输出 u_a 就能保持等于希望的 $\hat{u}_a$ 。

对于图1-3(b)，设 u_a 由电流扰动所造成的变化量为 $\Delta u_a(i_a)$ ，在AVR中由于加上电流扰动的补偿所引起的控制量的变化量为 $\Delta u_f(i_a)$ ；后者又引起 u_a 的变化，设表为 $\Delta u_a[\Delta u_f(i_a)]$ 。当 u_a 的两个变化量的大小相等，符号相反，即

$$\Delta u_a(i_a) = -\Delta u_a[\Delta u_f(i_a)] \quad (1-7)$$

时，扰动对系统输出的影响就得到了完全的补偿。

在实际励磁控制系统中，单纯按补偿原理构成的自动电压调节器已有应用，例如用在小型发电机上。

工作于开环状态、并且采用按电流扰动进行补偿的自动励磁控制系统，实际上仍然无法使发电机输出的机端电压令人满意地符合希望值。原因是除已被补偿的电流扰动而外，还会存在其他扰动，例如发电机原动机转速 ω 的变化等。此外，发电机定子、转子温度的变化（在运行中这种变化幅度颇大）以及控制器等设备中元器件的老化等，也都会引起系统输出的变化。显然，对这些多种扰动、多种因素引起的输出的变化，采用一一补偿的办法解决几乎是不可能的，即使可能也是十分困难的。

二、闭环控制系统

一个控制系统，如果在其控制器的信息来源中包含有来自被控对象输出端的反馈信息，则称为闭环控制系统，或称为反馈控制系统。

图1-4是闭环控制系统的方框图。图中的控制器输入端，至少有两个（还可能有其他）输入信号：（1）来自系统外部、由希望值所确定的参考输入信号；（2）来自被控对象的输出端、经反馈环节而得到的反馈信号。在控制器中，反馈信号与参考输入信号进行比较而得出差值，且控制规律是这个差值的某种函数关系。这种控制方式，较之开环控制方式可以使被控制量在更高的准确程度上符合希望值。

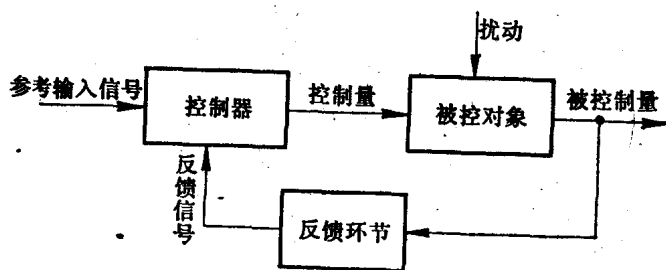


图 1-4 闭环反馈控制系统

图1-5是闭环的自动励磁控制系统的例子。此图由图1-3经适当改造而得：将图1-3(a)中用以检测电流 i_a 的环节改为检测机端电压 u_a 。为此应将原用的电流互感器换成电压互感器，再经过整流器以取得与 u_a 成比例的直流反馈电压 u_b （即图1-5(a)中AVR输入端电位器R上的压降）。此外，由外界供给的参考输入电压 u_r 与 u_b 相减，得到差电压

$$u_e = u_r - u_b \quad (1-8)$$

作为AVR的输入。在图1-5(b)中，式(1-8)的函数关系用带小圆圈的图形符号表示，称为误差检测器。用这种图形符号还可以表示多个变量的代数相加关系，所以在一般情况下又称为相加点。误差检测器的输入分别为参考输入信号和反馈信号，而其输出则是两者之差，称为误差信号，简称误差。在同一方框图上，为了取得被控制量 u_a ，在代表 u_a 的有向线段上引出一个分支。分支的交点称为分支点。分支点表示同一个信号作用于不同方向。

沿着图1-5(b)中各个变量的作用方向移动，就会构成一个闭环，从而可以形象地看出反馈控制系统或闭环控制系统的名称的由来。

系统的被控制量偏离希望值的差，称为系统偏差量，简称偏差。对于图1-5所示系统，设希望值表为 $\hat{u}_a$ ，则偏差

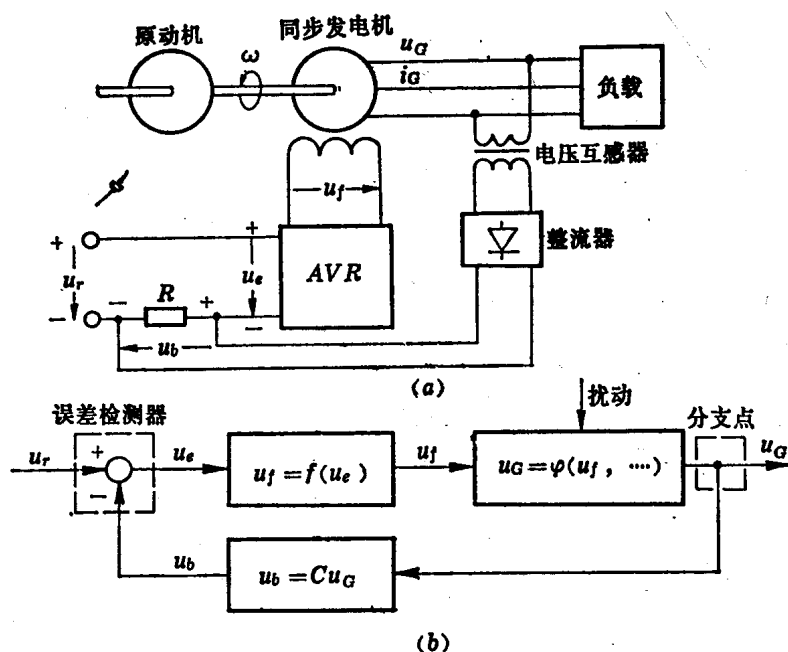


图 1-5 构成闭环的自动励磁控制系统
(a) 电气接线图; (b) 系统方框图

$$\Delta u_G = \hat{u}_G - u_G \quad (1-9)$$

对任何一个控制系统, 当希望值变化时, 或者当被控制量受外界扰动的影响而发生变化时, 我们总希望通过系统中的自动控制过程, 尽量减少产生的偏差。

为了说明图 1-5 中减少偏差的过程, 又不失一般性, 我们假定控制规律是比例型的, 即

$$u_f = f(u_e) = Ku_e \quad (1-10)$$

反馈电压 u_b 与机端电压 u_G 成比例:

$$u_b = Cu_G \quad (1-11)$$

而参考输入信号 u_r 与希望值 $\hat{u}_G$ 之间也具有与式 (1-11) 相同的比例:

$$u_r = C\hat{u}_G \quad (1-12)$$

各式中 K, C ——比例系数。

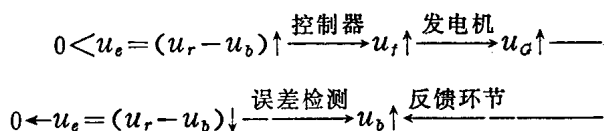
此外, 发电机在这里表现为一个动态系统, 且当励磁电压 u_f 增加或减少时, 机端电压 u_G 也随之增加或减少。但 u_G 的这种变化只能是一个渐变的过程, 即使假定 u_f 可以产生突变, u_G 也不能突变。

在发电机正常运行时, 机端电压应保持等于或近于希望值 $\hat{u}_G$, 偏差 Δu_G [式(1-9)] 不大。根据式 (1-11) 和 (1-12) 的关系, 图 1-5 中的误差 u_e 与偏差 Δu_G 成比例, 且有

$$u_e = u_r - u_b = C\hat{u}_G - Cu_G = C\Delta u_G \quad (1-13)$$

因此, 完全可以借助于图 1-5 中的误差来评价实际偏差的大小。

现在假定发电机外接负载发生变化, 使机端电压 u_G 下降, 反馈电压 u_b 同时下降, 图中的误差 $u_e = (u_r - u_b)$ 增大, 于是发生如下的调节过程:



实际的调节过程往往不能一次完成, 在几次振荡过程中, 误差逐渐减少, 最后使 u_G 接近于 $\hat{u}_G$ 。

通过上述调节过程的说明, 我们看到, 反馈控制系统属于按误差信号的大小进行调节的系统, 并且调节的总趋势是尽量减少所产生的误差。在这里, 加到误差检测器的反馈信号的正负符号, 起着重要的作用。象图1-5中所标示的符号下的反馈, 称为负反馈。对于以减少误差为目的的反馈, 都应采用负反馈方式。

如果将图1-5(b)误差检测器上的反馈信号取反, 则将构成一个具有正反馈的控制系统, 如图1-6所示。通过对系统中调节过程的分析, 不难看出, 在这种情况下当发电机受到外界扰动的影响引起误差 u_e 增大时, 系统的调节作用将不是减少所产生的误差, 反而会使其越来越增大。因此, 这样的励磁控制系统是无法正常工作的。

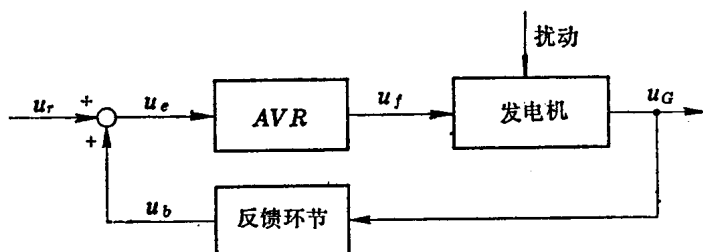


图 1-6 无法正常工作的正反馈励磁控制系统

本书将主要针对负反馈控制系统(以后简称反馈控制系统或反馈系统)进行分析研究。有些结论, 稍加变化也适用于正反馈控制系统。

对比反馈控制系统和开环控制系统, 可以看出: 前者在扰动因素较多且不可检测时, 能够自行减少或消除扰动对输出的影响; 相反, 后者却做不到这一点。这是前者相于后者的重要优点。

开环控制系统相对于反馈控制系统的优点在于: 在对特定的扰动采取补偿措施的情况下, 当扰动出现但未来得及影响到被控制量之前(考虑到任何实际被控对象都是一个动态系统, 即具有一定的惯性), 控制量就会直接按照扰动的变化而变化。这就是说, 开环控制系统具有响应快速的特点。

此外, 开环控制系统的工作一般不会出现不稳定的问题。而反馈控制系统的工作是否稳定, 如出现发散的振荡、不允许的过调等等, 却是必须仔细考虑的问题。

在某些情况下, 为了发扬两者的优点, 抑制其缺点, 可以在反馈控制系统结构的基础上加装对特定扰动的补偿环节。带补偿环节的反馈控制系统的典型方框图示于图1-7中。

图中除了对某一可以检测的扰动(一般为主要扰动)加装了补偿环节而外, 还以虚线