

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

自动控制理论 (第三版)

孙扬声 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

普通高等教育



“十五”

PUTONG

GAODENG JIAOYU

SHIWU

GUIHUA JIAOCAI

规划教材

自动控制理论

(第三版)

主编 孙扬声

编写 孙扬声 张永立

孙雅明 罗毅

主审 涂光瑜



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十五”规划教材,内容以解决电力工程实际问题中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,离散控制系统及现代控制系统的必需知识等。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。

本书主要作为高等院校电气工程及其自动化专业、电力系统及其自动化专业、发电厂及电力系统专业及其他电力工程类专业的教材,也可作为从事电力系统自动化工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论/孙扬声主编. —3版. —北京:中国电力出版社,2004

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-2150-2

I. 自... II. 孙... III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 022607 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1986年6月第一版

2004年5月第三版 2004年5月北京第九次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19.25印张 444千字

印数 60151—64150册 定价 29.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多种教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222）

中国电力教育协会

二〇〇二年八月

第三版前言

本书当前的版本是第三版。第一版在1986年6月出版,根据当时水电部高等学校电力工程类专业教材编审委员会在1982年9月会议上审订的《自动控制理论教学大纲》编写的,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。之后经过7年,即在1993年,又根据当时能源部高等学校电力工程类专业教学委员会的决定,在总结各校使用本书学习和授课经验的基础上,对本书进行了重新修订再版。从第二版至今又经过了10年,承蒙全国本专业院校同仁的厚爱,提出过许多宝贵的意见和建议,使得本书能较坚实地存在和发展下去。现在,中国电力教育协会于2002年11月发文,已决定将孙扬声主编的《自动控制理论》(第三版)列入普通高等教育“十五”教材规划。在吸取使用前两版教材经验的基础上,第三版在全体编审人员的共同努力下,又进行数次较仔细地审阅和修订。希望本书更茁壮地发展下去,并力争将其打造成为精品图书。经与出版社协商,在参编人员方面也适当加强,选聘本专业一位年轻教师参加第三版的部分编写工作。

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、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和综合的体系为线索,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,力求举出电力系统自动化中的实例,以提高学生运用控制理论解决实际工程问题的能力;所选实例已经过适当简化,去粗取精,既能使学生易于接受,又能提高学习兴趣。此外,本书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。

对本版进行修订的指导原则是:保持前两版在内容编排上已被证明是行之有效的体系结构;加强对本学科中的基本概念、基本理论和基本方法叙述的简明性和准确性;修正已发现的某些错误和不妥之处。在每章开头,有关于本章的内容提要和将要用到的关键词两个小段;在每章结尾,有对本章内容进行总结性的小结。本书修订后保持了原书的体系、特色不变。此外,为适应最佳控制理论在电力系统自动化工程中广泛应用的势态,在书的最后加入了“线性最佳控制系统”一章,以饷读者。

当前计算机技术在电力工程中已广泛应用,在编写第三版过程中曾考虑加入用计算机软件工具包求解自动控制工程问题的内容,但考虑到本书篇幅有限,并且大多数学生在学习本门课程时并未接触过类似软件,因此决定在本版中暂不增加该内容。但编者建议对这方面的问题有兴趣的高年级学生,在不影响正常学习进程的情况下,可以参考有关资料自学。

本书修订后共分十章,包括:绪论,线性动态系统(含状态空间描述、输入输出描述),

传递函数的建立 (含传递函数方框图、Mason 公式和信号流图、状态变量模拟图), 反馈控制系统的性能及时域分析 (含暂态性能、稳态性能), 频率特性及其图示 (含极坐标图、Bode 图), 稳定性分析 (含 Liapunov 稳定、BIBO 稳定、几种主要稳定判据), 基于 Bode 图的设计及校正 (含串联及并联校正, PID 控制), 根轨迹法 (含根轨迹图及校正), 离散控制系统 (含 Z 变换及用差分方程描述的状态方程), 线性最佳控制系统 (含二次型性能指标、Riccati 方程、最佳调节器的频域分析)。

本书第三版仍由华中科技大学孙扬声任主编, 参编者有华中科技大学张永立 (第四、五、六章), 天津大学孙雅明 (第八、九章) 和华中科技大学的罗毅 (第十章)。由涂光瑜教授主审。

此前编写的《自动控制理论习题集》, 由水利电力出版社于 1992 年底出版, 仍可作为本书的辅助教材, 供读者参考。

由于编者水平有限, 肯定还存在不少缺点和错误, 恳请广大读者继续批评指正。

主 编

2003 年 11 月于华中科技大学电气与电子工程学院

(邮编: 430074)

第三版前言

本书第一版系根据水电部高等学校电力工程专业教材编审委员会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”专业及其他电力工程类专业的教材而编写的，于1986年6月出第一版。现根据能源部高等学校电力工程专业教学委员会的决定，在总结各校使用本书授课经验的基础上，对本书进行重新修订再版。

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，俾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。

这次修订中，根据能源部教育司1989年3月审定的《自动控制理论》课程教学基本要求的精神，取消了原书中“线性最佳控制系统”和“非线性系统”两章；对其他各章未做大的改动，修正了某些错误和不妥之处；对每章后的习题做了较大的改动与充实。修订后的本书基本保证了原书的体系、特色不变，内容编排上会更紧凑、连贯。

修订后的本书共分九章，包括：绪论，线性动态系统，传递函数的建立，反馈控制系统的性能及时域分析，频率特性及其图示，稳定性分析，基于Bode图的设计及校正，根轨迹法，离散系统。

本书由华中理工大学孙扬声任主编，张永立（第四、五、六章及全书习题的修订）及天津大学孙雅明（第八、九章）参加编写，由山东工业大学张荣祥任主审。

另外，根据能源部教育司审定的《1990~1992年高等学校教材编审出版计划》的要求，编者又编写了《自动控制理论习题集》一书，作为配合本书的辅助教材，可供读者参考。

由于编者水平有限，肯定还存在不少缺点和错误，恳请广大读者继续批评指正。

主 编

1991年12月于华中理工大学电力系

（邮编：430074）

第一版前言

本书是根据水电部高等学校电力工程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

1985年5月1日 于华中工学院电力系

目 录

序

第三版前言

第二版前言

第一版前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 自动控制系统的基本结构	3
习题	9
第二章 线性动态系统	11
第一节 动态系统及其状态	11
第二节 关于动态系统的线性	15
第三节 线性动态系统的状态空间描述	16
第四节 状态空间描述的 Laplace 变换	22
第五节 状态转移矩阵	24
第六节 线性动态系统的输入输出描述	26
第七节 完全表征	30
第八节 非线性系统的局部线性化	32
本章小结	34
习题	34
第三章 传递函数的建立	38
第一节 传递函数方框图	38
第二节 环节的传递函数及负载效应	44
第三节 电气环节的传递函数	49
第四节 发电机励磁控制系统	52
第五节 信号流程图及 Mason 公式	58
第六节 由传递函数求状态空间描述	61
本章小结	66
习题	68
第四章 反馈控制系统的性能及时域分析	73
第一节 反馈控制系统性能概述	73
第二节 暂态性能指标	78
第三节 典型二阶系统的暂态性能分析	81
第四节 高阶系统的暂态性能与闭环零点、极点配置的关系	88
第五节 参考输入作用下的稳态误差分析	91

第六节 扰动对稳态误差的影响及补偿措施	95
第七节 参数敏感度分析	100
本章小结	102
习题	103
第五章 频率特性及其图示	106
第一节 频率特性	106
第二节 频率特性的极坐标图 (Nyquist 图)	109
第三节 频率特性的对数坐标图 (Bode 图)	114
第四节 由闭环频率特性估计暂态性能	125
第五节 由开环 Nyquist 图确定闭环频率特性	128
本章小结	131
习题	132
第六章 稳定性分析	134
第一节 线性系统有界输入 - 有界输出 (BIBO) 稳定性	134
第二节 特征方程与稳定性的关系	136
第三节 Liapunov 稳定性及渐近稳定性	137
第四节 Liapunov 直接法	140
第五节 Routh 稳定判据	145
第六节 复平面上围线映射	149
第七节 Nyquist 稳定判据	152
第八节 稳定裕量	157
第九节 Bode 图上的稳定性分析	160
本章小结	163
习题	164
第七章 基于 Bode 图的设计及校正	167
第一节 设计概述	167
第二节 校正的任务与类型	169
第三节 并联校正与 PID 控制作用	171
第四节 稳态误差禁区	177
第五节 串联校正	182
第六节 局部反馈校正	193
本章小结	199
习题	200
第八章 根轨迹法	202
第一节 控制系统根轨迹的基本概念	202
第二节 根轨迹图的幅角条件与幅值条件	205
第三节 绘制根轨迹图的基本规则	207
第四节 控制系统根轨迹的性能分析	217
第五节 基于根轨迹法的校正	221

本章小结	226
习题	226
第九章 离散控制系统	229
第一节 离散控制系统的基本概念	229
第二节 离散信号的形成及其复现	230
第三节 离散控制系统的时域描述	236
第四节 Z 变换与反变换	242
第五节 用 Z 变换求解离散系统	253
第六节 脉冲传递函数	256
第七节 线性离散控制系统的性能分析	260
本章小结	271
习题	273
第十章 线性最佳控制系统	276
第一节 基于二次型性能指标的最佳控制问题	276
第二节 用 Liapunov 直接法求解最佳调节器问题	280
第三节 Riccati 方程的计算机解法	285
第四节 最佳调节器的频域分析	289
本章小结	292
习题	293

第一章 绪 论

关键词：控制，调节，系统，动态系统，静态系统，自动控制系统，控制器，被控对象，自动控制理论，数学模型，分析，综合，信息，信号，反馈，环节，方框图，（方框图中的）分支，分支点及相加点，开环控制系统－前馈控制系统，闭环控制系统－反馈控制系统，参考输入，扰动，（对扰动的）补偿，误差信号，误差检测器，系统偏差，单变量系统及多变量系统。

第一节 概 述

所谓自动控制，是指无需人经常直接参与，而是通过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。后者按照人的安排接受某种信息，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影响下，在其功能的限度内改变自己的状态。

这里，控制的目性往往是很重要的。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，若目的是将它开动起来，那就需要一系列启动、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。若目的是使运行中的发电机电压符合给定值，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。

有这样一种控制作用，其目的是使被控对象的状态符合某个常数值，则也可称其为调解。自动实现的调解称为自动调节。例如上述发电机电压控制器也可称为电压调节器。由此可见，调节属于控制的局部情形。

由控制器、被控对象等部件为了一定的目的，有机地连接而成进行自动控制的整体，称为自动控制系统。

自动控制理论这门学科，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，从而揭示出为相同类型或所有类型系统所共有的规律，并在此基础上得出将理论应用于工程实际的途径。对实际存在的控制系统的动态行为的数学描述，称为控制系统的数学模型。对不同技术领域内的控制系统的行为，为其建立专用的数学模型，显然需要具有各相应专门学科的知识。而自动控制理论的任务，则是给出建立数学模型的一般方法，并以数学模型为基础，对该系统进行分析 and 综合。所谓分析，是在已知系统数学模型的基础上，分析出系统的性能。所谓综合，指在对系统性能提出要求的基础上，找出满足要求的系统模型（数学模型）。

需要指出，尽管构成各个实际控制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。当一个实际控制系统的数学模型一旦建立起来,那么对它们的研究,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技工作者,都可应用而且也都需要一定的自动控制理论知识。

在 20 世纪 50 年代,控制论的奠基人、美国学者 N. Wiener 就指出了关于系统、控制、信息和反馈等概念的重要性,并且明确而深刻地阐明了它们之间的重要联系。

系统是一个很广泛的概念,涵盖我们所感兴趣的任何可作为整体来研究的事物。这样,由若干元素,为了某种目的而把它们有机地相互连接成的一个整体,就可以称为系统。这个定义指出了系统的三种属性:①系统的整体性;②各元素之间的关联性;③人们所以把它当成系统来研究的目的性。

系统是一个相对的概念。由于考察的目的不同,对某一组元素的总体,可以当作一个系统,有时也可以把其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。后者称为前者的子系统。当然,这一概念可以循环嵌套延伸:子系统中还可包含子系统。

而自动控制系统,除了具有上述三种普遍属性,还具有它的一定个性,即它还是一个动态系统,并在其中存在着自动控制作用。

所谓动态系统,就是说在这种系统中,从一个状态到另一个状态的变化,不可能瞬时完成,而只能是在过程中渐变地实现。任何一个真实的物理系统中状态的变化,总是通过系统中存在的物质和能量的转换或传递来实现。这种变化,显然不能瞬时完成。从这个意义上严格地说,一切真实的系统都是动态系统。但是从相对的观点看,在一个大的系统中,如果其中某些子系统,其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过程的行为也没有重大的影响,那么就不必考虑该子系统的动态性质,即可以假设这个子系统不是动态的:其状态随着产生它的原因而能瞬时变化。具有后一特征的系统称为静态系统。对动态系统和静态系统的概念,在第二章中还要从数学模型的角度详述。

在系统中,各个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。这就是系统的关联性。自动控制系统中的控制器对被控对象的控制作用,是代表这种系统的特征之一。控制作用以及系统中其他相互联系、相互作用,实质上是系统中的物质与能量的转换与传递。此外还有一类联系或作用,其主导因素是信息,即把关于一个元素的状态的消息、情报或数据,传递到另一些元素上去。这时信息的物理形式或能量形式是次要的,重要的是信息内容本身。以一定的物理形式或能量形式出现,用以传递信息的载体,称为信号。就自动控制系统说,控制器通过接收某些输入信号,从系统外部和/或内部取得信息,经过加工处理产生新的信息,以信号形式或以某种能量形式输出,实现控制作用。

由于 N. Wiener 的工作和控制论的出现,冲击了关于世界由物质和能量所组成的旧观念,代之以世界由物质、能量和信息这三者所组成的新观念。关于信息概念的重要性,由此可见一斑。对信息这一内容极为深刻的概念进行详述,不是本书的目的。这里只强调指出,在控制系统的信息交换过程中,有一种作用即信息的反馈,特别重要。关于反馈,将在本章第二节中讲述。

需要强调指出,在控制理论中,把一个系统划分成元素或子系统,不一定依据其是否具有相对独立的物理结构,重要的是看它们是否具有相对独立的功能或运动规律。在本书中,有时把功能单位也称为环节。一个环节具有一种特定的功能。

考虑一个例子,如图 1-1 (a) 所示是一台对电动机转速进行控制的简单的控制系统。该系统由控制器和作为被控对象的电动机所组成。它们各用一个方框代表。这样的系统按功能分,可分成三个环节,如图 1-1 (b) 所示。

这个系统外界输入的电压 u_r , 称为参考输入电压。通过它来确定电动机转动的角位移 θ 。角位移 θ 是被控制量, 又可称为系统的输出变量。参考输入电压 u_r 是为得到所希望的角位移 θ 而施加于控制器上的参考输入信号。不同的 u_r 将得到不同的 θ 。设与 u_r 相对应的角位移为 $\hat{\theta}$ (图中未画出 $\hat{\theta}$, 只画出了对应的 u_r), 要求实际输出的角位移 θ 尽可能准确地跟踪 $\hat{\theta}$ 的变化。

图中的参考输入信号 u_r 作用于控制器, 后者按某种确定的规律对前者进行加工, 产生相应的控制量 m

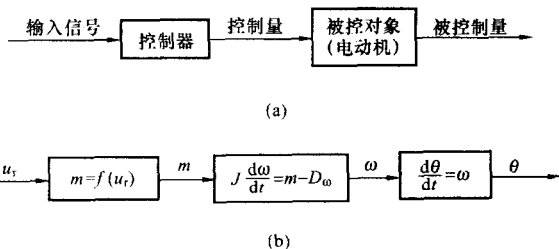


图 1-1 电动机控制系统

(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_ω , D —阻尼转矩及阻尼系数

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

m 是作用于电动机上的电磁转矩, 在其作用下电动机产生旋转运动。根据动力学中的牛顿定律和运动方程, 求出关于转速 ω 和角位移 θ 的关系式为

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

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

上列式 (1-1) ~ 式 (1-3) 分别描述了系统中对应的环节的功能, 如图 1-1 (b) 所示。

在图 1-1 中, 每一个方框代表一个元素或环节或子系统; 用以联系各个方框之间或系统与外界之间、具有单方向指向的有向线段, 代表方框的输入、输出变量。这种形式的图形, 称为系统的方框图。用方框图表示系统的功能及其相互作用, 具有比较直观和醒目的特点, 以后本书将经常采用。

第二节 自动控制系统的的基本结构

自动控制系统的性能和行为, 在很大程度上取决于控制器所接收的信息。这些信息有两个可能的来源: 一是来自系统外部, 即由系统输入端输入的参考输入信号; 另一种来自被控

对象的输出端,即反映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,通过中间环节再送回到控制器的输入端,称为反馈。所述的中间环节因此又称为反馈环节。传送反馈信息的载体,称为反馈信号。系统中是否采用了反馈,对系统性能的影响极大。故而系统的基本结构,也就按是否有无反馈而分成两大类: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,如果在其控制器所接收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,或称为前馈控制系统。图 1-1 即为开环控制系统的例子。还可以举出在电力系统中广泛应用的“发电机自动电压控制系统”的例,如图 1-2 所示。

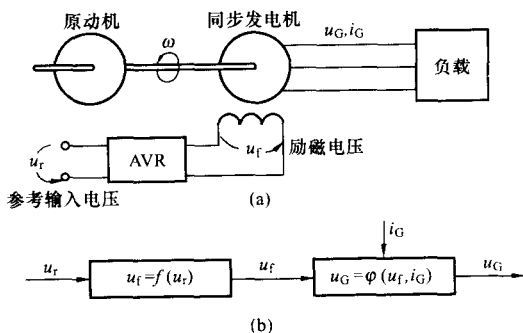


图 1-2 开环状态的发电机自动电压控制系统

(a) 电气接线图; (b) 系统方框图

图 1-2 中的一台三相交流同步发电机是系统中的被控对象。发电机由原动机带动旋转,产生电力供给负载用户。为了调节发电机输出的电压,以满足用户需要,装设了一台“自动电压调节器 AVR (Automatic Voltage Regulator)”。它就是这个系统中的控制器。发电机输出的机端电压 u_G 是系统的输出变量。控制的目的在于:在用户的负载电流 i_G 不断变化的过程中,维持电压在某一恒定的希望值: $u_G \approx \hat{u}_G = \text{const}$ 。正如前面已经提到的,这种控制作用又称为调解。相应的系统又称为自动电压调节系统。

调解过程如下:图 1-2 (a) 中的参考输入电压 u_r 是与恒定的希望值 $\hat{u}_G$ 成比例的某种电压 u_r , 通过图中的 AVR 加工处理后输出 u_f , 作为发电机的励磁电压。改变励磁电压 u_f 的大小,就能改变发电机的输出电压 u_G 。由于发电机电压主要通过调节励磁来实现,因此自动电压调节器有时也称为自动励磁调节器(但英文缩写符号 AVR 不变)。

控制系统中控制器的输出变量 u_f 对输入变量 u_r 的依存关系,称为控制规律,表示如下

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

反映系统希望值 $\hat{u}_G = \text{const}$ 的这种输入电压 u_r , 称为参考输入。此外,从所研究的系统的外部还可能有一些输入,对系统也会产生影响。后一种输入,称为外界扰动输入,简称为扰动。这种扰动,可能作用于系统的任何元素上,但大多是作用在被控对象上。

作为例子,图 1-2 (a) 中发电机的电压 u_G 是这个系统的输出,而发电机的负载电流 i_G , 则视为外界负载变动所引起的一种扰动输入。于是,对此系统就有了两个外界输入,即 u_r 和 i_G 。这时被控制量应表为

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

对应的系统方框图示于图 1-2 (b)。由图中看出,控制器 AVR 的输出 u_f 只由参考输入 u_r 确定 [见式 (1-4)], 而与扰动 i_G 无关。因此,根据式 (1-5) 可知,只保持参考输入 u_r 为恒定,要想使被控对象的输出电压 u_G 在扰动 i_G 的作用下仍然保持恒定,是不可能的。

在实际应用中,这种发电机自动电压控制器,很少能当作一个实用的控制系统使用。

但对此可以采用如下措施来进行补救:将扰动的信息引入控制器的输入端,用控制器的控制作用去抵消扰动对被控对象的影响。具体做法如图 1-3 (a) 所示。在发电机定子电流回路中加装电流互感器,用以检测其电流 i_G , 得到 i_{G2} (电流互感器的二次电流)。通过整流器变换成与 i_G 的有效值成比例的直流电流,作用于控制器 AVR。这时 AVR 的输出可表为

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

从理论上说,选择适当的控制规律 $f(u_r, i_G)$ 可以抵消扰动 i_G 对发电机电压 u_G 的影响,使其只与参考输入 u_r 有关。这就是对这种系统进行补偿的基本思路。因此称图 1-3 为带补偿的开环电压控制系统。在理想的完全补偿的情况下,保持 u_r 为恒定值,即使 u_G 亦为恒定值。

在图 1-3 (b) 中,要想对 u_G 进行完全补偿,做法如下:设 u_G 因电流扰动所造成的变化量为 $\Delta u_G(i_G)$, 在 AVR 中由于加上对电流扰动 i_G 的补偿而引起的变化量为 $\Delta u_f(i_G)$ 。后者又引起 u_G 的变化,设为 $\Delta u_G[\Delta u_f(i_G)]$ 。当 u_G 的两个变化量大小相等、符号相反,即

$$\Delta u_G(i_G) = \Delta u_G[\Delta u_f(i_G)] \quad (1-7)$$

时,扰动对系统输出的影响就得到了完全的补偿。

必须指出,图 1-3 所示的补偿系统,仍然属于开环控制系统。原因是:控制器 AVR 的输入信息中虽然包含了扰动的信息,但却不包含被控对象提供的输出信息。包含不包含被控对象的输出信息,是区分一个系统属于开环控制系统,还是属于闭环控制系统(下一小节即将讲到)的决定因素。

单纯按电流补偿原理构成的自动电压调节装置,有时还在小型发电机上使用。但是,工作于开环状态的这种自动电压调节器,实际上无法维持发电机输出的电压 u_G 在某一恒定的希望值: $u_G \approx \hat{u}_G = \text{const}$ 。原因是:在这种系统中除已被补偿过的电流扰动之外,还会存在其他某些扰动,例如发电机原动机转速 ω 的变化,发电机定子、转子绕组温度的变化以及控制器等设备中元器件的老化等,也都会引起发电机输出的变化。显然,对众多扰动、多种因素引起的输出变化,采用一一补偿的办法几乎是不可能的,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的信息,则称为闭环控制系统,或者反馈控制系统,或者称为闭环反馈控制系统。

图 1-4 是闭环反馈控制系统的典型方框图。图中在控制器的输入端至少存在两个(还

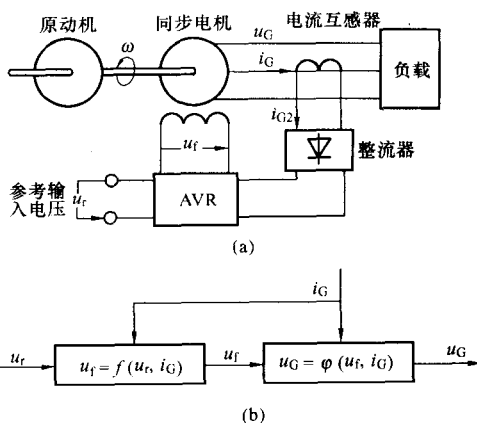


图 1-3 带补偿的开环电压控制系统

(a) 电气接线图; (b) 系统方框图