



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家精品课程教材

Exercises for Principles of Automatic Control

自动控制原理习题详解

王建辉 等 编著

Wang Jianhui

清华大学出版社





全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家精品课程教材

Exercises for Principles of Automatic Control

自动控制原理习题详解

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为《自动控制原理》(王建辉、顾树生主编,杨自厚主审,清华大学出版社2007年4月出版)教材的配套用书。书中对教材每章后的全部习题(思考题除外)作了详细解答。

教材中所给出的习题,题型丰富,难易比例适当。本书可作为全国普通高等学校自动化及仪表、电气传动、计算机、机械、化工、航天航空等相关专业的学生深入学习和理解《自动控制原理》课程内容的辅助用书,也可以作为工程技术人员自学该课程的参考资料,并可作为考研人员的学习辅导材料。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理习题详解/王建辉等编著. —北京:清华大学出版社,2010.5

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-21443-4

I. 自… II. 王… III. 自动控制理论—高等学校—解题 IV. TP13-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 207116 号

责任编辑:王一玲 刘佩伟

责任校对:白 蕾

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:14.25 字 数:287 千字

版 次:2010 年 5 月第 1 版 印 次:2010 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:25.00 元

产品编号:031539-01

出版说明

《全国高等学校自动化专业系列教材》



为适应我国对高等学校自动化专业人才培养的需要,配合各高校教学改革的进程,创建一套符合自动化专业培养目标和教学改革要求的新型自动化专业系列教材,“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”(简称“教指委”)联合了“中国自动化学会教育工作委员会”、“中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会”、“中国系统仿真学会教育工作委员会”和“中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科委员会”四个委员会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革为方针,设立专项资助基金,采用全国公开招标方式,组织编写出版了一套自动化专业系列教材——《全国高等学校自动化专业系列教材》。

本系列教材主要面向本科生,同时兼顾研究生;覆盖面包括专业基础课、专业核心课、专业选修课、实践环节课和专业综合训练课;重点突出自动化专业基础理论和前沿技术;以文字教材为主,适当包括多媒体教材;以主教材为主,适当包括习题集、实验指导书、教师参考书、多媒体课件、网络课程脚本等辅助教材;力求做到符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要;努力创造使之成为具有先进性、创新性、适用性和系统性的特色品牌教材。

本系列教材在“教指委”的领导下,从2004年起,通过招标机制,计划用3~4年时间出版50本左右教材,2006年开始陆续出版问世。为满足多层面、多类型的教学需求,同类教材可能出版多种版本。

本系列教材的主要读者群是自动化专业及相关专业的大学生和研究生,以及相关领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望本系列教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者和工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的参考资料。感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并欢迎提出批评和意见。

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

2005年10月于北京

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

顾问 (按姓氏笔画):

王行愚(华东理工大学)	冯纯伯(东南大学)
孙优贤(浙江大学)	吴启迪(同济大学)
张嗣瀛(东北大学)	陈伯时(上海大学)
陈翰馥(中国科学院)	郑大钟(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)	韩崇昭(西安交通大学)

主任委员: 吴澄(清华大学)

副主任委员: 赵光宙(浙江大学) 萧德云(清华大学)

委员 (按姓氏笔画):

王雄(清华大学)	方华京(华中科技大学)
史震(哈尔滨工程大学)	田作华(上海交通大学)
卢京潮(西北工业大学)	孙鹤旭(河北工业大学)
刘建昌(东北大学)	吴刚(中国科技大学)
吴成东(沈阳建筑工程学院)	吴爱国(天津大学)
陈庆伟(南京理工大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
郑志强(国防科技大学)	赵曜(四川大学)
段其昌(重庆大学)	程鹏(北京航空航天大学)
谢克明(太原理工大学)	韩九强(西安交通大学)
褚健(浙江大学)	蔡鸿程(清华大学出版社)
廖晓钟(北京理工大学)	戴先中(东南大学)

工作小组(组长): 萧德云(清华大学)

(成员): 陈伯时(上海大学) 郑大钟(清华大学)
田作华(上海交通大学) 赵光宙(浙江大学)
韩九强(西安交通大学) 陈兴林(哈尔滨工业大学)
陈庆伟(南京理工大学)

(助理): 郭晓华(清华大学)

责任编辑: 王一玲(清华大学出版社)

自动化学科有着光荣的历史和重要的地位,20 世纪 50 年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养。五十多年来,自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用,如航空、航天等,两弹一星的伟大工程就包含了许多自动化科学技术的成果。自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌,不论是石油化工、电力、钢铁,还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段,在国防工业中自动化的作用更是巨大的。现在,世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术,比如机器人、月球车等。另外,自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用,例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、控制论、信息论的影响下得到不断的发展。在整个世界已经进入信息时代的背景下,中国要完成工业化的任务还很重,或者说我们正处在后工业化的阶段。因此,国家提出走新型工业化的道路和“信息化带动工业化,工业化促进信息化”的科学发展观,这对自动化科学技术的发展是一个前所未有的战略机遇。

机遇难得,人才更难得。要发展自动化学科,人才是基础、是关键。高等学校是人才培养的基地,或者说人才培养是高等学校的根本。作为高等学校的领导和教师始终要把人才培养放在第一位,具体对自动化系或自动化学院的领导和教师来说,要时刻想着为国家关键行业和战线培养和输送优秀的自动化技术人才。

影响人才培养的因素很多,涉及教学改革方方面面,包括如何拓宽专业口径、优化教学计划、增强教学柔性、强化通识教育、提高知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践等,其中构建融会贯通、紧密配合、有机联系的课程体系,编写有利于促进学生个性发展、培养学生创新能力的教材尤为重要。清华大学吴澄院士领导的《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会,根据自动化学科对自动化技术人才素质与能力的需求,充分吸取国外自动化教材的优势与特点,在全国范围内,以招标方式,组织编写了这套自动化专业系列教材,这对推动高等学校自动化专业发展与人才培养具有重要的意义。这套系列教材的建设有新思路、新机制,适应了高等学校教学改革与发展的新形势,立足创建精品教材,重视实

践性环节在人才培养中的作用,采用了竞争机制,以激励和推动教材建设。在此,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写的老师致以诚挚的感谢,并希望该系列教材在全国高等学校自动化专业人才培养中发挥应有的作用。

吴佑迪 教授

2005 年 10 月于教育部

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会在对国内外部分大学有关自动化专业的教材做深入调研的基础上,广泛听取了各方面的意见,以招标方式,组织编写了一套面向全国本科生(兼顾研究生)、体现自动化专业教材整体规划和课程体系、强调专业基础和理论联系实际的系列教材,自2006年起将陆续面世。全套系列教材共50多本,涵盖了自动化学科的主要知识领域,大部分教材都配置了包括电子教案、多媒体课件、习题辅导、课程实验指导书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教育,培养创新人才”的教学改革思想,还特别规划了一组专业实验教程,包括《自动控制原理实验教程》、《运动控制实验教程》、《过程控制实验教程》、《检测技术实验教程》和《计算机控制系统实验教程》等。

自动化科学技术是一门应用性很强的学科,面对的是各种各样错综复杂的系统,控制对象可能是确定性的,也可能是随机性的;控制方法可能是常规控制,也可能需要优化控制。这样的学科专业人才应该具有什么样的知识结构,又应该如何通过专业教材来体现,这正是“系列教材编审委员会”规划系列教材时所面临的问题。为此,设立了《自动化专业课程体系结构研究》专项研究课题,成立了由清华大学萧德云教授负责,包括清华大学、上海交通大学、西安交通大学和东北大学等多所院校参与的联合研究小组,对自动化专业课程体系结构进行深入研究,提出了按“控制理论与工程、控制系统与技术、系统理论与工程、信息处理与分析、计算机与网络、软件基础与工程、专业课程实验”等知识板块构建的课程体系结构。以此为基础,组织规划了一套涵盖几十门自动化专业基础课程和专业课程的系列教材。从基础理论到控制技术,从系统理论到工程实践,从计算机技术到信号处理,从设计分析到课程实验,涉及的知识单元多达数百个、知识点几千个,介入的学校50多所,参与的教授120多人,是一项庞大的系统工程。从编制招标要求、公布招标公告,到组织投标和评审,最后商定教材大纲,凝聚着全国百余名教授的心血;为的是编写出版一套具有一定规模、富有特色的、既考虑研究型大学又考虑应用型大学的自动化专业创新型系列教材。

然而,如何进一步构建完善的自动化专业教材体系结构?如何建设基础知识与最新知识有机融合的教材?如何充分利用现代技术,适应现代大学生的接受习惯,改变教材单一形态,建设数字化、电子化、网络化等多元形态、开放性的“广义教材”?等等,这些都还有待我们进行更深入的研究。

本套系列教材的出版,对更新自动化专业的知识体系、改善教学条件、创造个性化的教学环境,一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限,本套教材从整体结构到每本书的知识组成都可能存在许多不当甚至谬误之处,还望使用本套教材的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

吴阶 院士

2005 年 10 月于清华大学



信息化时代的到来,为自动控制技术的应用开拓了更加广阔的空间。作为有关自动控制技术的基础理论——自动控制原理,已成为各高校许多学科和专业必修的技术基础课。深入理解和掌握《自动控制原理》中主要内容,无论是对自动控制理论的进一步学习,还是为后续专业课的学习打下理论基础,都是非常关键的。

我们编写的教材《自动控制原理》(杨自厚主编,冶金工业出版社出版),自1980年出版以来,经历了几次修订:1987年修订版(杨自厚主编);2001年第3版(顾树生、王建辉主编,杨自厚主审);2005年第4版(王建辉、顾树生主编,杨自厚主审),目前已累计发行15万册。与其相对应的《自动控制原理习题集》也随之不断地修改与完善:1983年由汪宜臣主编,冶金工业出版社出版了《自动控制原理习题集》;2005年由王建辉主编,冶金工业出版社出版了《自动控制原理习题详解》。

2004年,我们以《自动控制原理》(第3版)为基础,参与了《全国高等学校自动化专业系列教材》的招投标,并且通过了教材编审委员会组织的初审、终审,计划出版《自动控制原理》及相关的教辅材料。

2007年4月,《自动控制原理》(王建辉、顾树生主编,杨自厚主审)由清华大学出版社出版。

为帮助广大读者深入地理解和更好地掌握《自动控制原理》中有关自动控制系统的概念、自动控制系统的分析与设计方法,也为自学的方便,我们编写了这本与《自动控制原理》配套使用的《自动控制原理习题详解》。

考虑到本书是与《自动控制原理》(全国高等学校自动化专业系列教材)完全对应,所以在书中各个章节的要点中只给出了在解题过程中要加以注意的问题。相应的基本概念、基本方法等在《自动控制原理》中已有详细讲解,本书不加赘述。

本书汇集了东北大学历届讲授自动控制原理课程教师的几十年教学成果和经验,并在参考有关教材的基础上,由我们课程组主要成员编排整理而成的。其中,徐林负责第1章,方晓柯负责第2、6章,王建辉负责第3、4、8章,顾树生负责第5章,王大志负责第6章,徐建有负责第7章。全书由王建辉主编。

方晓柯负责完成了对全书的整理和校对工作。

我们的博士研究生肖倩、彭俊、李醒等在本书的录入、画图、校对等过程中做了许多工作,在此表示感谢!

由于我们水平有限,不妥之处在所难免,敬请广大读者谅解并予以指正,我们将不胜感激!

作 者

2010年1月于沈阳

第 1 章 自动控制系统的基本概念	1
1.1 内容提要	1
1.2 习题与解答	1
第 2 章 控制系统的数学模型	8
2.1 内容提要	8
2.2 习题与解答	9
第 3 章 自动控制系统的时域分析	31
3.1 内容提要	31
3.1.1 系统的暂态过程和稳定性	31
3.1.2 稳态误差	32
3.2 习题与解答	32
第 4 章 根轨迹法	54
4.1 内容提要	54
4.2 习题与解答	55
第 5 章 频率法	86
5.1 内容提要	86
5.2 习题与解答	87
第 6 章 控制系统的校正及综合	124
6.1 内容提要	124
6.2 习题与解答	124
第 7 章 非线性系统分析	157
7.1 内容提要	157
7.2 习题与解答	157

第 8 章 线性离散系统的理论基础	188
8.1 内容提要	188
8.2 习题与解答	188
参考文献	207

1.1 内容提要

基本术语：反馈量，扰动量，输入量，输出量，被控对象；

基本结构：开环，闭环，复合；

基本类型：线性和非线性，连续和离散，程序控制与随动；

基本要求：暂态，稳态，稳定性。

本章要解决的问题，是在自动控制系统的基本概念基础上，能够针对一个实际的控制系统，找出其被控对象、输入量、输出量，并分析其结构、类型和工作原理。

1.2 习题与解答

题 1-5 试举几个工业生产中开环与闭环自动控制系统的例子，画出它们的框图，并说明它们的工作原理，讨论其特点。

答 图 1-1 所示为直流电动机的开环控制系统示意图。

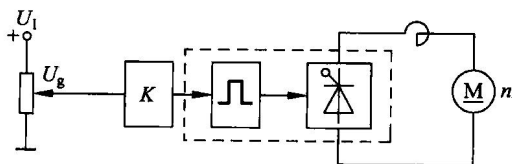


图 1-1 直流电动机开环控制系统示意图

该系统的结构图可用图 1-2 表示。



图 1-2 开环系统结构图

在本系统中,要控制的是直流电动机的转速,所以直流电动机是控制对象,直流电动机的转速是系统的输出量。在励磁电流 I_f 与负载恒定的条件下,当电位器滑动端在某一位置时(电位器对应的输出电压用 U_g 表示),电动机就以一定的转速 n 运转。如果由于外部或内部扰动,例如由于负载突然增加,使电动机转速下降,那么电动机在无人干预的情况下将偏离给定速度。也就是说开环控制系统只有输入量对输出量产生作用,输出量没有参与统一控制。

图 1-3 所示为直流电动机的闭环控制系统示意图。

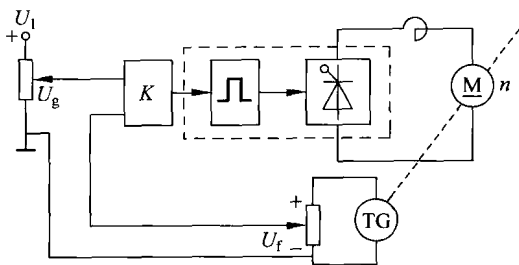


图 1-3 直流电动机闭环控制系统示意图

该系统的结构图如图 1-4 所示。

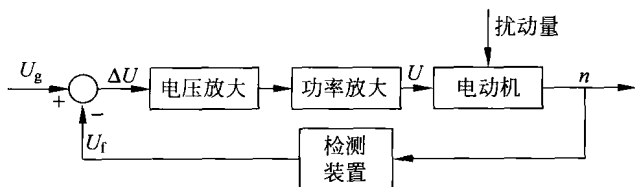


图 1-4 闭环控制结构图

这里,用测速发电机将输出量 n 检测出来,并转换成与给定电压物理量相同的反馈电压 U_f ,然后反馈到输入端与给定电压 U_g 相比较,其偏差 ΔU 经过运算放大器放大后,用来控制功率放大器的输出电压 U 和电动机的转速 n 。当电位器滑动到某一位置时,电动机就以一个指定的转速转动。由于外部或内部扰动,例如,由于负载突然增加,使电动机转速降低,那么这一速度的变化,将由测速发电机检测出来。此时反馈电压相应降低,与给定电压比较后,偏差电压增大,再经过功率放大器放大后,将功率放大器输出电压 U 升高,从而减小或消除电动机的转速偏差。这样,不用人的干预,系统就可以近似保持给定速度不变。由此可看出,闭环系统是把输出量反馈到输入端形成闭环,使得输出量参与系统的控制。

题 1-6 图 P1-1 所示为一直流发电机电压自动控制系统。图中,1 为发电机;2 为减速器;3 为执行机构;4 为比例放大器;5 为可调电位器。

(1) 该系统由哪些环节组成? 各起什么作用?

(2) 绘出系统的框图,说明当负载电流变化时,系统如何保持发电机的电压恒定。

(3) 该系统是有差还是无差系统?

(4) 系统中有哪些可能的扰动?

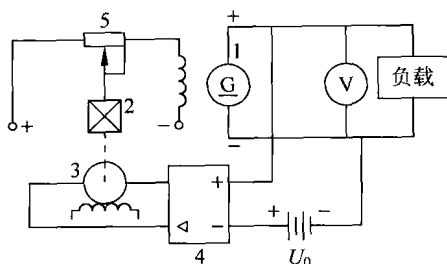


图 P1-1 电压自动控制系统

答 (1) 该系统由给定环节、比较环节、中间环节、执行机构、被控对象、检测环节等组成。

给定环节：电压源 U_0 。用来设定直流发电机电压的给定值。

比较环节：本系统所实现的被控量与给定量进行比较,是通过给定电压与反馈电压反极性相接加到比例放大器上实现的。

中间环节：比例放大器。它的作用是将偏差信号放大,使其足以带动执行机构工作。该环节又称为放大环节。

执行机构：该环节由执行电机、减速器和可调电位器构成。该环节的作用是:通过改变发电机励磁回路的电阻值,改变发电机的磁场,调节发电机的输出电压。

被控对象：发电机。其作用是供给负载恒定不变的电压。

检测环节：检测发电机电枢两端电压作为反馈量,它的作用是将系统的输出量直接反馈到系统的输入端。

(2) 系统结构框图如图 1-5 所示。当负载电流变化,如增大时,发电机电压下降,电压偏差增大,偏差电压经过运算放大器放大后,控制可逆伺服电动机,带动可调电阻器的滑动端使励磁电流增大,使发电机的电压增大,直至恢复到给定电压的数值,实现电压的恒定控制。

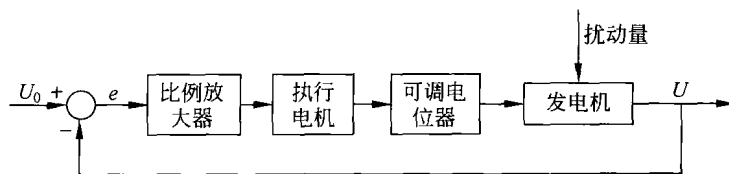


图 1-5 系统结构框图

负载电流减小的情况与此同理。

(3) 假设在系统稳定运行状态下,发电机输出的电压与给定的电压 U_0 相等,也就是我们所谓的无差系统。此时,比例放大器输出电压为零,执行电机不转动,可调电阻器的滑动端不动,发电机磁场不变化,从而保持发电机输出电压 U 等于给定

电压 U_0 。假设成立,故该系统为无差系统。

(4) 系统中可能出现的外部扰动:负载电流的变化(增加或减少)。可能出现的内部扰动:系统长时间工作使电源电压 U_0 降低,执行机构、减速器等的机械性能的改变等。

题 1-7 图 1-6 所示闭环调速系统,如果将反馈电压 U_f 的极性接反,成为正反馈系统,对系统工作有什么影响?此时各环节工作处于什么状态?电动机的转速能否按照给定值运行?

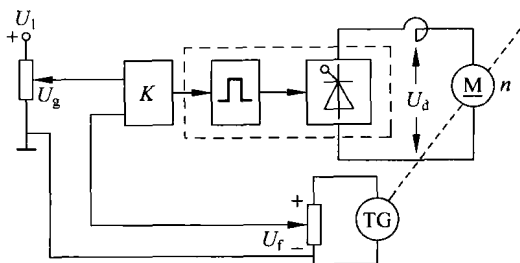


图 1-6 闭环调速系统示意图

答 正反馈系统的比较环节是使反馈电压 U_f 与给定电压 U_g 相加。加给控制器的信号 $\Delta U = U_f + U_g$ 必然总在给定电压基础上增大,系统将不具备调节能力,各环节的输出量将处于饱和状态,电动机转速不能按给定的值运行。

题 1-8 图 P1-2 为仓库大门自动控制系统。试说明自动控制大门开启和关闭的工作原理。如果大门不能全开或全关,则怎样进行调整?

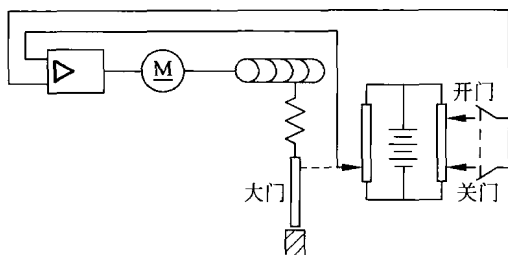


图 P1-2 仓库大门控制系统

答 系统中,“开门”和“关门”两个开关是互锁的,即在任意时刻,只有“开门”(或“关门”)一个状态,这一状态对应的电压和与大门连接的滑动端对应的电压接成反极性(即形成偏差信号)送入放大器。放大器的输出电压送给直流电动机 M ,直流电动机与卷筒同轴相连,大门的开启和关闭是通过电动机的正、反转来控制的。与大门连接的滑动端对应的电压与“开门”滑动端对应的电压相等时,大门停止开启;与大门连接的滑动端对应的电压与“关门”滑动端对应的电压相等时,大门停止关闭。

设“开门”滑动端对应的电压为 u_{gk} ，“关门”滑动端对应的电压为 $u_{g\bar{k}}$ ，与大门连接的滑动端对应的电压为 u_f 。