一流学校 一流老师 一流资源

三一丛书

自动控制理论

要点与解题

葛思臻 张爱民 杜行俭 杨清宇 编著

西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

西安交大教学资源文库　三一丛书

自动控制理论
要点与解题

葛思擘　张爱民
杜行俭　杨清宇　编著

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书依据《自动控制理论》课程的教学大纲，根据作者多年的教学经验，并参考了国内外相关教材编写而成。覆盖了经典控制理论的主要内容和现代控制理论的基础内容。全书分为六章，分别为绪论、线性控制系统的数学模型、线性系统的时域分析、线性系统的根轨迹分析法、线性系统的频域分析法和线性系统的状态空间分析。每章均由基本知识点、重点与难点、典型题解析和自我检测题四部分组成。附录部分包括拉普拉斯变换表、自我检测题的部分参考答案和西安交通大学自动化系近年来硕士研究生入学考试《自动控制理论》试题。

本书可作为普通高等院校大学生学习《自动控制理论》课程的辅助教材，也可作为报考相关专业硕士研究生的复习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论要点与解题/葛思擘等编著，—西安：西安交通大学出版社，2006.8
（西安交大教学资源文库．三一丛书）
ISBN 7-5605-2249-1

Ⅰ．自… Ⅱ．葛… Ⅲ．自动控制理论-高等学校-教学参考资料 Ⅳ．TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 080767 号

书　　名：自动控制理论要点与解题
编　　著：葛思擘　张爱民　杜行俭　杨清宇
出版发行：西安交通大学出版社
地　　址：西安市兴庆南路 25 号(邮编：710049)
电　　话：(029)82668357　82667874(发行部)
　　(029)82668315　82669096(总编办)
印　　刷：陕西宝石兰印务有限责任公司
字　　数：313 千字
开　　本：880 mm×1 230 mm　1/32
印　　张：8.625
版　　次：2006 年 8 月第 1 版　2006 年 9 月第 2 次印刷
书　　号：ISBN 7-5605-2249-1/TP・442
定　　价：13.80 元

版权所有　侵权必究

丛书总序

为了使普通高等学校理工类专业的大学生更好地学习、掌握基础课和专业基础课知识，我们组织出版了这套“三一”丛书，目的就是提供一流的学习资源，使大家共享一流教师的教学经验和教学成果，为今后的学习打下良好的基础。

西安交通大学是国内仅有的几所具有百年历史的高等学府，是首批进入国家“211 工程”建设的七所大学之一，1999 年被国家确定为我国中西部地区惟一一所以建设世界知名高水平大学为目标的学校。西安交大历来重视本科生教学，1996 年成为全国首家本科教学评估为优秀的大学。学校拥有国家级、省部级、校级教学名师数十名，具有丰富的、一流的教学资源。本丛书均由西安交通大学长期在教学一线主讲的教授、副教授主编，他们具有丰富的基础课、专业基础课教学和辅导经验。丛书作者们在长期的教学实践中，深深了解学生在学习基础课、专业基础课时的难点和困惑点之所在，对如何使学生更有效地学习、掌握课程的基本知识和解题技巧进行了深入的探索和研究，并将成果体现于书中。

本丛书针对中少学时课程的特点和教学要求，以普通高等学校的学生为主要对象，不拘泥于某一本教材，而是将有特色和使用量较大的各种版本的教材加以归纳总结，取其精华，自成一体。书中对课程的基本内容、研究对象、教学要求、学习方法、解题思路进行了全面、系统的总结和提炼，按基本知识点、重点与难点、典型题解析、自我检测题等环

节进行编排。本丛书既可单独使用，也可与其他教材配合使用。

我们衷心希望本丛书成为您大学基础课和专业基础课学习阶段的良师益友，帮助您克服困难，进入大学学习的自由王国，并祝您早日成为国家的栋梁之材！

在学习使用过程中，您如果发现书中有不妥之处或有好的建议，敬请批评指正并反馈给我们，我们会进一步改进自己的工作，力争使您满意。

真诚感谢您使用西安交大版图书。

西安交大出版社网址：http://press.xjtu.edu.cn
http://www.xjtupress.com
理工医事业部信箱：jdlgy31@126.com

西安交通大学出版社
2006 年 6 月

前　言

《自动控制理论》作为普通高等院校电类和部分非电类专业的专业基础课，越来越受到人们的重视。控制理论中分析问题和解决问题的思想方法已使各行各业的人们受益。本书是编者根据多年的教学经验，参考了国内外的相关教材，编写而成。

本书的主要阅读对象是普通高等院校自动化及其相关专业的学生，同时可作为报考硕士研究生考生的复习参考书。

本书由六章组成，包括以传递函数为基础的经典控制理论的主要内容和以状态空间为基础的现代控制理论的基础内容。每章均由四部分组成：

(1)基本知识点　该部分是对自动控制理论基本内容的归纳和总结。

(2)重点与难点　给出了读者应该加以注意和重点学习的内容。

(3)典型题解析　列举了大量的典型例题，通过例题的解析，使读者加深对基本概念的理解，掌握解题思路。每个例子中的提示，指出了该例题包含的知识点和读者应从中得到的启示。

(4)自我检测题　该部分和典型题结合，巩固读者应该掌握的内容。

本书的附录提供了拉普拉斯变换对照表、自我检测题的部分参考答案和近几年西安交通大学自动化系硕士研究生入学考试《自动控制理论》试题。

本书第 1 章、第 2 章(经典控制部分数学模型)和第 3 章由葛思擘执笔，第 5 章由杜行俭执笔，第 2 章(现代控制部分数学模型)、第 4 章和第 6 章由张爱民和杨清宇执笔。本书的编写和出版得到了西安交通大学出版社的大力支持，在编写过程中参考的相关教材和资料，已在参

考文献中列出，这些参考文献使编者在许多方面得到了启发，在此一并表示感谢。

限于编者的学识水平，书中的不妥和疏漏之处恐难避免，恳请读者批评指正。

编　者

2006 年 6 月

目　录

丛书总序

前言

第1章　绪 论

1.1　基本知识点 …… (1)

1.2　重点与难点 …… (3)

1.3　典型题解析 …… (3)

1.4　自我检测题 …… (5)

第2章　线性控制系统的数学模型

2.1　基本知识点 …… (7)

2.1.1　数学模型 …… (7)

2.1.2　线性系统的微分方程 …… (8)

2.1.3　传递函数 …… (8)

2.1.4　结构图 …… (10)

2.1.5　信号流图 …… (12)

2.1.6　状态变量模型 …… (12)

2.2　重点与难点 …… (18)

2.3　典型题解析 …… (18)

2.4　自我检测题 …… (59)

第3章　线性控制系统的时域分析

3.1　基本知识点 …… (73)

3.1.1　时域分析概念 …… (73)

3.1.2　一阶系统动态性能分析 …… (75)

3.1.3　典型二阶系统的瞬态性能 …… (76)

3.1.4　高阶系统的单位阶跃响应 …… (81)

3.1.5　稳定性及代数稳定性判据 …… (82)

3.1.6　误差及稳态误差 …… (82)

3.2 重点与难点 …… (86)
3.3 典型题解析 …… (86)
3.4 自我检测题 …… (102)
第4章 线性系统的根轨迹分析法
4.1 基本知识点 …… (107)
4.1.1 基本概念 …… (107)
4.1.2 绘制常规根轨迹的基本法则 …… (108)
4.1.3 参量根轨迹的绘制 …… (109)
4.1.4 增加开环零点、极点对根轨迹的影响 …… (109)
4.1.5 利用根轨迹分析系统性能 …… (110)
4.2 重点与难点 …… (111)
4.3 典型题解析 …… (111)
4.4 自我检测题 …… (125)
第5章 线性系统的频率响应法
5.1 基本知识点 …… (129)
5.1.1 频率特性 …… (129)
5.1.2 典型环节的频率特性 …… (130)
5.1.3 非最小相位系统 …… (132)
5.1.4 开环频率特性曲线的绘制 …… (134)
5.1.5 幅角原理 …… (136)
5.1.6 有理分式 $F(s)$ 的选取 …… (136)
5.1.7 封闭曲线 Γ_s 的选取 …… (137)
5.1.8 奈奎斯特稳定判据 …… (138)
5.1.9 奈奎斯特稳定判据在对数坐标图上的应用 …… (139)
5.1.10 逆奈奎斯特稳定判据 …… (140)
5.1.11 频率域性能指标 …… (140)
5.2 重点与难点 …… (142)
5.3 典型题解析 …… (142)
5.4 自我检测题 …… (179)
第6章 线性系统的状态空间分析法
6.1 基本知识点 …… (185)
6.1.1 时间响应和状态转移矩阵 …… (185)
6.1.2 系统的能控性 …… (188)
6.1.3 系统的能观测性 …… (189)

6.1.4 传递函数与能控性和能观测性的关系 …… (190)
6.1.5 状态反馈与极点配置 …… (191)
6.1.6 状态估计与状态观测器 …… (192)
6.2 重点与难点 …… (193)
6.3 典型题解析 …… (193)
6.4 自我检测题 …… (216)

附录 1 拉普拉斯变换 …… (222)
附录 2 自我检测题参考答案 …… (225)
附录 3 西安交通大学近年硕士研究生入学考试自动控制理论试题 …… (251)
2003 年硕士研究生入学考试题 …… (251)
2004 年硕士研究生入学考试题 …… (254)
2005 年硕士研究生入学考试题 …… (258)
参考文献

第1章　绪　论

1.1　基本知识点

1. 自动控制和自动控制系统的基本概念

自动控制：所谓自动控制是在人不直接参与的情况下，利用外加的设备或装置使整个生产过程或工作机械（称为被控对象）自动地按预定的规律运行，或使其某个参数（称为被控量）按预定的要求变化。

自动控制系统：由被控对象和自动控制装置按一定的方式连接起来，完成一定的自动控制任务，并具有预定性能的动力学系统。

2. 反馈控制系统的组成、工作原理和特点

反馈控制系统可用结构图表示（如图 1－1 所示）。**反馈控制系统**由被控对象和自动控制装置（如结构图虚线部分所示）组成。

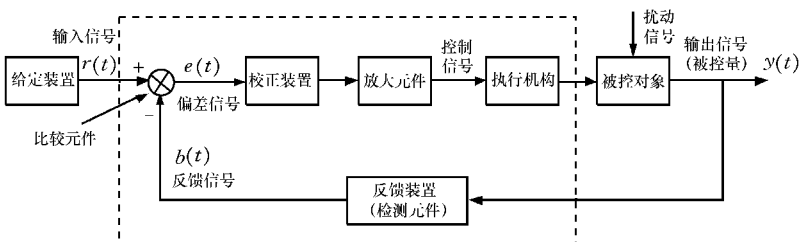


图 1－1　反馈控制系统结构图

自动控制装置主要包括以下几个部分：

给定装置：产生给定的输入量（输入信号）。

比较元件：将给定输入信号和反馈信号进行比较，得到偏差信号。

放大元件：将偏差信号的功率放大，以产生足够功率的控制信号驱动执行机构。

执行机构：按放大元件产生的控制信号驱动被控对象。

检测元件：对系统被控量进行测量和变换，产生反馈信号反馈到系统的输入端。

校正装置：由于被控对象和执行机构的性能有时难于满足要求，因此在构成

闭环控制系统时，通常需要引入校正装置对其性能进行校正。其功能是对偏差信号进行加工处理和运算，以形成合适的控制作用，或形成适当的控制规律，从而使系统的被控量按预定的规律变化。

在图 1－1 所示的闭环控制系统结构图中，各信号定义如下：

输入信号：系统的输入信号是指参考输入，又称给定量、给定值或输入量。它是控制着输出量变化规律的指令信号。

输出信号：系统的输出信号是指被控制对象中按一定规律变化的物理量，又称为被控量或输出量。

反馈信号：由系统的输出端取出并反向送回到系统输入端的信号。

偏差信号：指输入信号与反馈信号之差，简称偏差。

扰动信号：是一种不希望的，影响系统输出量的输入信号，简称干扰或扰动。

系统的输出量经测量和变换后反馈到输入端，构成信号回路的闭环结构。这种系统叫做反馈控制系统或闭环控制系统。

反馈控制系统的工作原理：反馈信号在输入端和给定输入量进行比较，得出偏差信号，经校正、放大和执行元件后产生控制作用，该控制作用使被控制量回复到或趋近于要求的输入值，从而使偏差减小或消除。

反馈控制系统的特点：

①从信号的流向看，输出量经测量后回送到输入端。回送的反馈信号使回路闭合，构成闭环系统。

②从控制作用的产生看，它是由偏差引起的。偏差产生的控制作用使系统沿减小或消除偏差的方向运动。

③由于形成了闭环系统，因而能有效地抑制被反馈通道包围的前向通道中各种扰动对系统输出量的影响。

④由于闭环系统可能引起过调，因而带来了系统稳定性的问题。

⑤ 反馈控制系统可以减小被控对象的参数变化对系统输出量的影响。

3. 控制系统的分类

按控制系统结构分类：开环、闭环和复合控制系统。

按控制系统功用分类：恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

按控制系统特性分类：线性和非线性系统、连续和离散系统、定常系统和时变系统。

4. 经典控制理论的主要研究内容

(1)控制系统分析　对已知的系统，分析其稳定性、静态和动态性能。对控制系统的基本要求是稳：要求系统稳定；准：稳态误差要小；快：动态响应快，超调量要小，调节时间要短。

(2)控制系统的设计　根据所要求系统的性能指标来设计系统。

1.2　重点与难点

1. 自动控制和自动控制系统的含义；

2. 反馈的概念，反馈控制原理，反馈控制系统的组成和特点；

3. 控制系统的分类，对控制系统的基本要求；

4. 确定控制系统的被控对象、被控量和给定量，绘制控制系统的结构图，分析实际系统的控制原理。

1.3　典型题解析

例 1－1　设热水电加热器如图 1－2 所示。为了保持希望的温度，由温控开关接通或断开电加热器的电源。在使用热水时，水箱中流出热水并补充冷水。试说明系统的被控对象、输出量、输入量、工作原理并画出系统原理结构图。

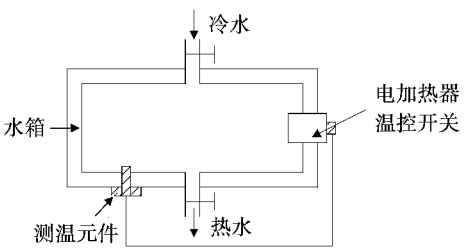


图 1－2　电加热系统

解：在热水电加热器系统中，输入量为预定的希望温度（给定值），设为 $T_{希}$，被控量（输出量）为水箱实际水温，设为 T，控制对象为水箱。扰动信号主要是由于放出热水并注入冷水而产生的降温作用。当 $T=T_{希}$ 时，温控开关断开，电加热器不工作，此时水箱中水温保持在希望水温上。当使用热水时，由于扰动作用使实际水温下降，测温元件感受 $T<T_{希}$ 的变化，并把这一温度变化转换为电信号使温控开关接通电源，电加热器工作，使水箱中的水温上升，直到 $T=T_{希}$ 为止。系统原理结构图如图 1－3 所示：

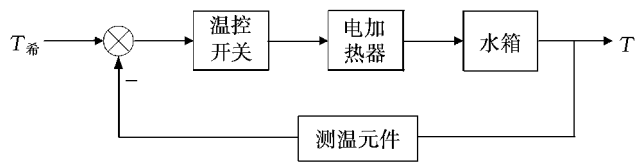


图 1－3　系统原理结构图

例 1－2　船舶驾驶舵角位置跟踪系统如图 1－4 所示。试分析其工作原理，并画出系统结构图。

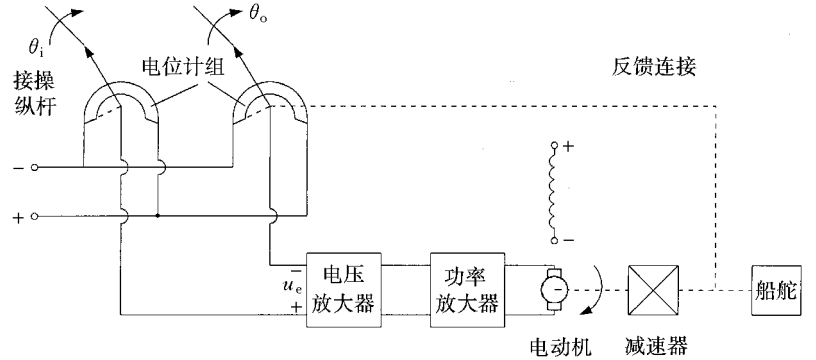


图 1－4　船舶舵角位置跟踪系统

解：该系统的任务是实现船舶舵角位置 θ_o 跟踪操纵杆角位置 θ_i。被控对象是船舵，被控量（输出量）是船舵的角位置 θ_o，给定量（输入量）是操纵杆角位置。理想跟踪情况下，$\theta_o=\theta_i$，两环形电位计组成的桥式电路处于平衡状态，输出电压 $u_e=0$，电动机不转。系统相对静止。

如果操纵杆角 θ_i 改变了，而船舵仍处于原位，则电位器输出 $u_e\neq 0$，u_e 经放大后使电动机通过减速器连同船舵和输出电位计滑臂一起作跟随给定值 θ_i 的运动。当 $\theta_o=\theta_i$ 时，电动机停转，系统达到新的平衡状态，从而实现角位置跟踪的目的。

由以上分析可见，操纵杆是给定装置，电位计组同时完成测量和比较功能，电压、功率放大器完成放大元件工作，电动机和减速器共同起执行机构的作用。

系统的原理结构图如图 1－5 所示。

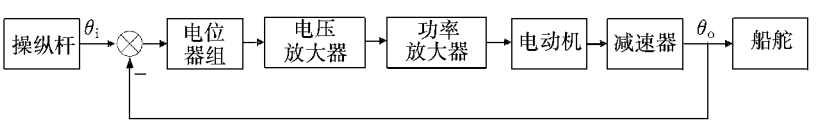


图 1－5　船舶舵角位置跟踪系统原理结构图

例 1－3　仓库大门自动控制系统原理示意图如图 1－6 所示。试说明自动控制大门开关的工作原理并画出结构图。

解：当合上开门开关时，电位器桥式测量电路的偏差电压经放大器放大后，驱动伺服电动机带动绞盘转动，将大门向上提起，与此同时，和大门连在一起的电刷

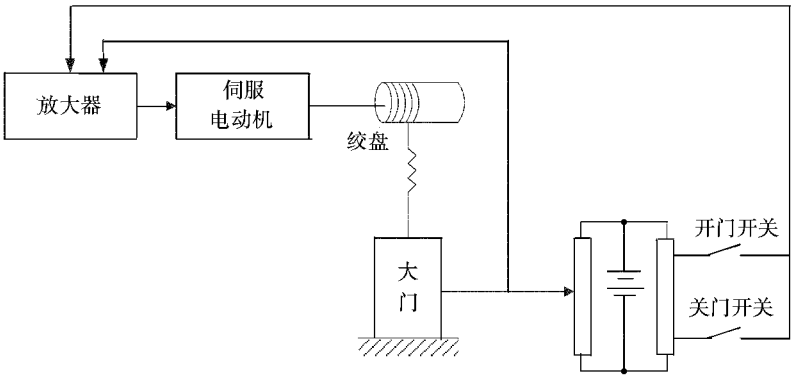


图 1－6　大门自动开闭控制系统

也向上移动。直到桥式测量电路达到平衡，电动机停止转动，大门到达开启位置。反之当合上关门开关时，电动机带动绞盘使大门关闭，从而实现了远距离自动控制大门开闭。控制系统结构图如图 1－7 所示。

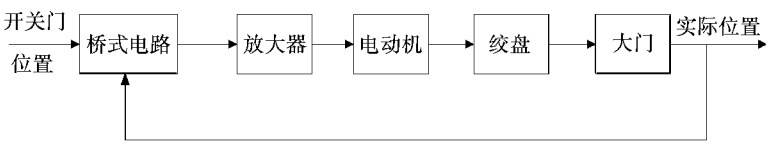


图 1－7　大门自动开闭控制系统原理结构图

1.4　自我检测题

1－1　试回答以下问题：

(1)自动控制装置一般包括哪几部分？论述各部分的功能。

(2)比较开环控制系统和闭环控制系统的主要特征，说明优、缺点。

(3)什么是反馈控制原理？

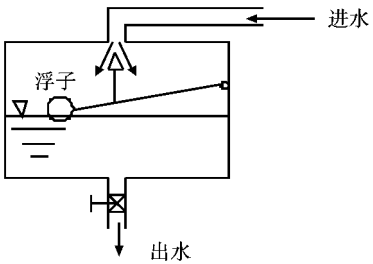
(4)对自动控制系统的基本要求是什么？

1－2　在下列过程中，哪些是开环控制？哪些是闭环控制？为什么？

(1)人驾驶汽车；　(2)空调器调节室温；

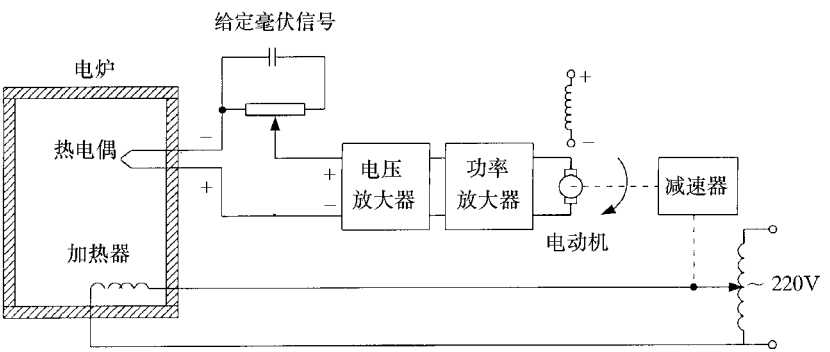
(3)机器人踢足球；　(4)投掷铅球。

1－3　题图 1－3 表示一个水位自动控制系统，试说明输入量、输出量、被控对象和工作原理，并画出结构图。



题图 1－3　水位自动控制系统

1－4　如题图 1－4 所示的温度控制系统。指出系统的输入量和被控量，区分控制对象和自动控制装置。画出结构图并说明控制系统是怎样出现偏差、检测偏差和消除偏差的。



题图 1－4　温度控制系统

第 2 章　线性控制系统的数学模型

2.1　基本知识点

2.1.1　数学模型

数学模型是描述系统内部各物理量之间动态关系的数学表达式，是系统分析和综合的基础。常用的数学模型有：微分方程、传递函数、结构图、信号流图、频率特性以及状态空间描述等多种。

1. 数学模型的建立方法

数学模型的建立方法有解析法和实验法两种。用解析法建立控制系统的数学模型时，应根据系统及元部件的特点和联接关系，按照它们遵循的物理定律，列写出各物理量之间的数学关系式。用实验法确定系统的数学模型时，要求对系统施加典型的测试信号，如阶跃、脉冲或正弦等信号，记录系统的时间响应曲线或频率响应曲线，从而估算出系统的传递函数。

2. 非线性系统的线性化

在经典控制领域，主要研究的是线性定常控制系统。如果描述系统的数学模型是线性常系数的微分方程，则称该系统为线性定常系统，其最重要的特性便是可以应用线性叠加原理，即系统的总输出可以由若干个输入引起的输出叠加得到。若描述系统的数学模型是非线性微分方程，则相应的系统称为非线性系统，这种系统不能使用线性叠加原理。在经典控制领域对非线性系统的处理能力是很小的。在工程应用中，除了含有强非线性环节或系统参数随时间变化较大的情况，一般对非线性系统采用近似的线性化方法。对于非线性方程，可在工作点附近用泰勒级数展开，取前面的线性项。采用这种方法时应注意：在工作点附近有较高的精度，而远离工作点则误差较大。

例如：流体通过薄壁小孔时，其流量公式为

$$Q = Kx\sqrt{P}$$

式中：Q 为流量，K 为常数，x 为开度，P 为压差。

这是一个典型的非线性方程，需将它线性化。可在某一工作点$(P_0,\ x_0)$附近