



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材
电子信息学科基础课程系列教材



控制工程基础 习题解答

杜继宏 王诗宓 编著

清华大学出版社





普通高等教育“十一五”国家级规划教材



教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材
电子信息学科基础课程系列教材

控制工程基础 习题解答

杜继宏 王诗宓 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是与《控制工程基础》配套的教材,它包含了《控制工程基础》书中全部习题的参考解答(文字解答题除外)。对每道习题都给出了比较详细的、步骤清晰的解题过程。对许多习题,在题解之外还附加了一项或几项说明,这些说明或者介绍多种不同的解法,或者对题目没有直接提问的相关问题进行更深入的讨论,或者给出方程在无法采用公式求解时的试探法求解过程。这些说明可以帮助读者更好地理解题目涉及的基本概念、基本方法,也有助于启发读者对各种问题作进一步的思考和分析,同时了解试探法求解某些方程的过程。对于频率特性图和根轨迹图的绘制,采用了两种方法,一是手工绘制简单实用的示意图,二是利用 MATLAB 绘制准确曲线图。

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

控制工程基础习题解答/杜继宏,王诗宓编著. —北京:清华大学出版社,2009.9

(电子信息学科基础课程系列教材)

ISBN 978-7-302-19714-0

I. 控… II. ①杜… ②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 037124 号

责任编辑:陈志辉 徐跃进

责任校对:李建庄

责任印制:杨 艳

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:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:15 字 数:350 千字

版 次:2009 年 9 月第 1 版 印 次:2009 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:23.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:032459-01

《电子信息学科基础课程系列教材》 编 审 委 员 会

主任委员

王志功(东南大学)

委员 (按姓氏笔画)

马旭东(东南大学)	邓建国(西安交通大学)
王小海(浙江大学)	王诗宓(清华大学)
王 萍(天津大学)	王福昌(华中科技大学)
刘宗行(重庆大学)	刘润华(中国石油大学)
刘新元(北京大学)	张 石(东北大学)
张晓林(北京航空航天大学)	沈连丰(东南大学)
陈后金(北京交通大学)	郑宝玉(南京邮电大学)
郭宝龙(西安电子科技大学)	柯亨玉(武汉大学)
高上凯(清华大学)	高小榕(清华大学)
徐淑华(青岛大学)	袁建生(清华大学)
崔 翔(华北电力大学)	傅丰林(西安电子科技大学)
董在望(清华大学)	曾孝平(重庆大学)
蒋宗礼(北京工业大学)	

《电子信息学科基础课程系列教材》

丛书序

电子信息学科是当今世界上发展最快的学科,作为众多应用技术的理论基础,对人类文明的发展起着重要的作用。它包含诸如电子科学与技术、电子信息工程、通信工程和微波工程等一系列子学科,同时涉及计算机、自动化和生物电子等众多相关学科。对于这样一个庞大的体系,想要在学校将所有知识教给学生已不可能。以专业教育为主要目的的大学教育,必须对自己的学科知识体系进行必要的梳理。本系列丛书就是试图搭建一个电子信息学科的基础知识体系平台。

目前,中国电子信息类学科高等教育的教学中存在着如下问题:

- (1) 在课程设置和教学实践中,学科分立,课程分立,缺乏集成和贯通;
- (2) 部分知识缺乏前沿性,局部知识过细、过难,缺乏整体性和纲领性;
- (3) 教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息学科人才不能很好地满足社会的需求。

在新世纪之初,积极总结我国电子信息类学科高等教育的经验,分析发展趋势,研究教学与实践模式,从而制定出一个完整的电子信息学科基础教程体系,是非常有意义的。

根据教育部高教司 2003 年 8 月 28 日发出的[2003]141 号文件,教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会(基础课分教指委)在 2004—2005 两年期间制定了“电路分析”、“信号与系统”、“电磁场”、“电子技术”和“电工学”5 个方向电子信息科学与电气信息类基础课程的教学基本要求。然而,这些教学要求基本上是按方向独立开展工作的,没有深入开展整个课程体系的研究,并且提出的是各课程最基本的教学要求,针对的是“2+X+Y”或者“211 工程”和“985 工程”之外的大学。

同一时期,清华大学出版社成立了“电子信息学科基础教程研究组”,历时 3 年,组织了各类教学研讨会,以各种方式和渠道对国内外一些大学的 EE(电子电气)专业的课程体系进行收集和研究,并在国内率先推出了关于电子信息学科基础课程的体系研究报告《电子信息学科基础教程 2004》。该成果得到教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会的高度评价,认为该成果“适应我国电子信息学科基础教学的需要,有较好的指导意义,达到了国内领先水平”,“对不同类型院校构建相关学科基础教学平台均有较好的参考价值”。

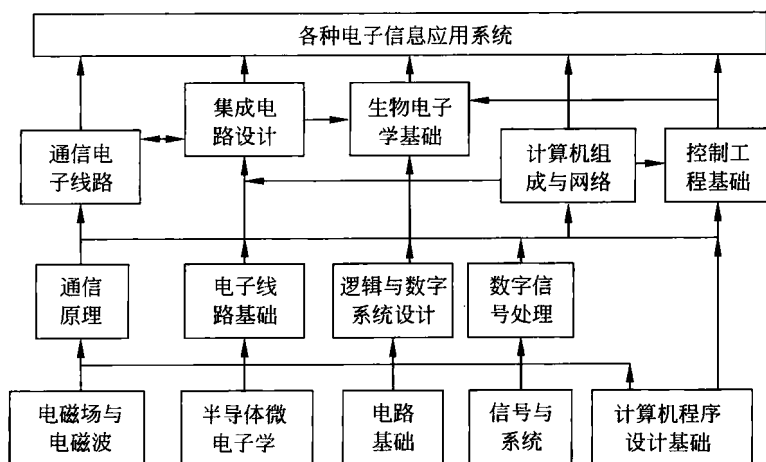
在此基础上,由我担任主编,筹建了“电子信息学科基础课程系列教材”编委会。编委会多次组织部分高校的教学名师、主讲教师和教育部高等学校教学指导委员会委员,进一步探讨和完善《电子信息学科基础教程 2004》研究成果,并组织编写了这套“电子信息学科基础课程系列教材”。

在教材的编写过程中,我们强调了“基础性、系统性、集成性、可行性”的编写原则,突出了以下特点:

- (1) 体现科学技术领域已经确立的新知识和新成果。
- (2) 学习国外先进教学经验,汇集国内最先进的教学成果。
- (3) 定位于国内重点院校,着重于理工结合。
- (4) 建立在对教学计划和课程体系的研究基础之上,尽可能覆盖电子信息学科的全部基础。本丛书规划的 14 门课程,覆盖了电气信息类如下全部 7 个本科专业:

- 电子信息工程
- 通信工程
- 信息工程
- 计算机科学与技术
- 自动化
- 电气工程与自动化
- 生物医学工程

(5) 课程体系整体设计,各课程知识点合理划分,前后衔接,避免各课程内容之间交叉重复,目标是使各门课程的知识点形成有机的整体,使学生能够在规定的课时数内,掌握必需的知识和技术。各课程之间的知识点关联如下图所示:



即力争将本科生的课程限定在有限的与精选的一套核心概念上,强调知识的广度。

(6) 以主教材为核心,配套出版习题解答、实验指导书、多媒体课件,提供全面的教学解决方案,实现多角度、多层面的人才培养模式。

(7) 由国内重点大学的精品课主讲教师、教学名师和教指委委员担任相关课程的设计和教材的编写,力争反映国内最先进的教改成果。

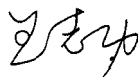
我国高等学校电子信息类专业的办学背景各不相同,教学和科研水平相差较大。本系列教材广泛听取了各方面的意见,汲取了国内优秀的教学成果,希望能为电子信息学科教学提供一份精心配备的搭配科学、营养全面的“套餐”,能为国内高等学校教学内容

和课程体系的改革发挥积极的作用。

然而,对于高等院校如何培养出既具有扎实的基本功,又富有挑战精神和创造意识的社会栋梁,以满足科学技术发展和国家建设发展的需要,还有许多值得思考和探索的问题。比如,如何为学生营造一个宽松的学习氛围?如何引导学生主动学习,超越自己?如何为学生打下宽厚的知识基础和培养某一领域的研究能力?如何增加工程方法训练,将扎实的基础和宽广的领域才能转化为工程实践中的创造力?如何激发学生深入探索的勇气?这些都需要我们教育工作者进行更深入的研究。

提高教学质量,深化教学改革,始终是高等学校的工作重点,需要所有关心我国高等教育事业人士的热心支持。在此,谨向所有参与本系列教材建设工作的同仁致以衷心的感谢!

本套教材可能会存在一些不当甚至谬误之处,欢迎广大的使用者提出批评和意见,以促进教材的进一步完善。



2008年1月

《控制工程基础习题解答》是与《控制工程基础》配套的教辅,它包含了《控制工程基础》书中全部习题的参考解答(文字解答题除外)。

“控制工程基础”是电子信息学科的基础课程之一。清华大学出版社于2008年9月出版并发行的《控制工程基础》的基本出发点是体现宽口径的教学思想,设法满足多学科交叉背景学生的教学需要。为了能使读者更好地掌握、熟悉有关控制工程的基本原理和方法,该书包含了丰富的例题和习题。熟悉这些例题并熟练完成习题,对读者理解概念和掌握方法会有很大的帮助。

为此,编者根据多年教学体会编写了这本习题解答,对每道习题都给出了比较详细的、步骤清晰的解题过程。对相当多的习题,在题解之后还附加了一项或几项说明。这些说明或者介绍不同的解法,或者对习题没有直接提问的相关问题作更深入的讨论,或者给出在缺少计算工具时可以采用的试探法求解过程。这些说明可以帮助读者更好地理解习题所涉及的基本概念、基本方法,也有助于启发读者对各种问题做进一步的思考和分析。对于伯德图和根轨迹图的绘制,根据题目的不同采用了两种方法,一种是根据基本原理和性质徒手绘制简单的草图,二是利用 MATLAB 绘制准确的曲线。这两种方法是相辅相成的,对于读者理解知识和分析问题都是有用的。

习题覆盖了相应章节所讨论的全部内容,读者最好在熟悉相应章节的内容,并对习题做初步思考或者解答之后再来阅读习题解答。如果时间允许,建议读者在阅读习题解答后再掩卷,独立完成一次解题过程。这样,就很容易根据自己完成习题的情况来检查自己对本章内容掌握的程度。

尽管本书对每道习题都给出了详细的计算步骤和结果,但编者认为它们只能算是一种参考解答。因为有些习题的解答不是唯一的,计算的步骤和过程也不是唯一的。所以,如果读者能尝试从不同角度、以不同方法解决同一问题,就不仅能够检验自己的计算结果,而且能够对本课程的基本原理有更加深入的理解和感受。

本书附录 A 给出了常用的拉普拉斯变换表;附录 B 给出了常用的 $\mathcal{Z}$ 变换和修正的 $\mathcal{Z}$ 变换表。附录 C 给出了 MATLAB 的基本命令和常用命令,读者如果学会使用这些命令,对检查自己的解题结果、验证自己对同一问题的多方面思考结果和提高学习兴趣是十分有益的。附录 D 给出了两份控制理论科目的试题,这是为清华大学自动化系控制工程领域专业学位(工程硕士)研究生入学复试准备的样卷,可供有兴趣的读者参考。需要说明的是,这些试题中均含有“线性系统理论基础”(即现代控制理论)的内容,它们不在本参考解答的范围之内。

本书的插图都按章统一编号。为便于阅读,对某些运算公式也做了编号。但是,除非特别注明,这些运算公式的序号和题后说明的序号都只在该习题内有效,不按全章或全书统一编排。

本书共分 9 章,章标题与《控制工程基础》一书的章标题一致。本书第 1、2、3、4、5 章由王诗宓执笔,第 6、7、8、9 章由杜继宏执笔,王诗宓对全书的符号、插图等进行了统一的校准。

在编写本书的过程中,参考了许多相关的优秀教材和著作,编者向收录于参考文献中的各位作者表示真诚的谢意。对于本书的错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 7 月于清华园

第 1 章 绪论	1
第 2 章 控制系统的数学描述	5
第 3 章 线性控制系统的运动	25
第 4 章 频率响应法	47
第 5 章 控制系统的频域校正	76
第 6 章 根轨迹方法及控制系统的校正	104
第 7 章 多回路控制策略	145
第 8 章 线性离散控制系统	161
第 9 章 离散控制系统的设计校正	184
附录 A 拉普拉斯变换表	214
附录 B $\mathcal{Z}$ 变换表和修正的 $\mathcal{Z}$ 变换表	217
附录 C 常用 MATLAB 命令和函数	218
附录 D 试题样卷	222
参考文献	226

第1章 绪论

随着科学技术的飞速发展, 计算机在国民经济和国防建设中起着越来越重要的作用。在计算机系统中, 计算机组成原理是计算机系统的核心, 它研究计算机中数据的表示方法、运算方法和运算规则, 以及指令系统、中央处理器(CPU)的结构和组成等。本章主要介绍计算机组成原理的基本概念、术语和符号, 以及计算机系统的层次结构。



图 1-1 计算机内部结构图

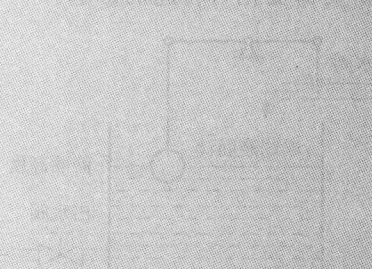


图 1-2 计算机外部结构图

计算机系统的层次结构如图 1-3 所示。计算机系统由硬件和软件两部分组成。硬件是指计算机系统中所有物理设备的总称, 包括中央处理器、总线系统、主存储器、辅助存储器、输入输出设备等。软件是指计算机系统中所有程序的总称, 包括操作系统、应用程序、编译程序等。计算机系统的发展经历了从第一代电子管计算机到第五代大规模集成电路计算机的五个阶段。

第一代电子管计算机: 1946 年 1 月, 世界上第一台电子管计算机 ENIAC 在美国宾夕法尼亚大学诞生。它占地 160 多平方米, 重达 30 吨, 耗电 15 千瓦, 运算速度每秒 500 次。

第二代晶体管计算机: 20 世纪 50 年代中期, 晶体管计算机开始出现。它的体积比电子管计算机小, 功耗低, 运算速度提高。

第三代中小规模集成电路计算机: 20 世纪 60 年代, 中小规模集成电路计算机开始出现。它的集成度高, 体积小, 功耗低, 运算速度快。

第四代大规模集成电路计算机: 20 世纪 70 年代, 大规模集成电路计算机开始出现。它的集成度更高, 体积更小, 功耗更低, 运算速度更快。

第五代大规模集成电路计算机: 20 世纪 80 年代, 大规模集成电路计算机开始出现。它的集成度更高, 体积更小, 功耗更低, 运算速度更快。

1.1 试列举日常生活中遇到的开环控制和闭环控制的示例,并说明它们的工作原理。

参考解答:(略)

1.2 图 1.1 所示为机械式液面控制系统,其中浮球液面计被用来测量水箱的水位。说明该系统的工作原理。

参考解答:

当出水阀门开度变大,流出量变大,液面下降时,浮球高度减少。浮球的位置变化通过杠杆使进水阀门开大,进水量增加,从而使水位回升,并达到某个平衡位置。当出水阀门开度变小,流出量变小,液面上升,浮球高度升高。浮球的位置变化通过杠杆使进水阀门关小,进水量减少,从而使水位下降,又达到某个平衡位置。所以,在该设备允许的用水范围内,容器内的水面会维持在某个适当的液面高度范围之内。

1.3 图 1.2 是直流并激电动机的示意图。 i_f 为激磁电流, e_a 是电动机电枢供电电压, L 和 R 是电枢的等效电感和电阻, ω 为电动机转速。在激磁电流固定时,改变电枢供电电压可以改变电动机的转速。画出以电枢供电电压为输入、转速为输出的开环系统框图,并分析负荷变化对转速的影响。

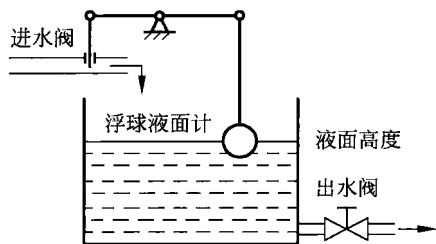


图 1.1 液面控制系统示意图

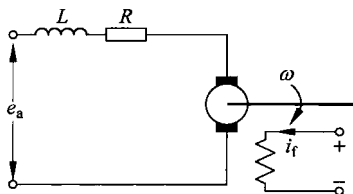


图 1.2 直流并激电动机示意图

参考解答:

图 1.3 是以电枢供电电压为输入、转速为输出的开环系统框图。在激磁电流 i_f 不变时,给定电枢电压 e_a 会产生固定的转速 ω 。但是,当负荷增加时, ω 会下降;负荷减少时, ω 会上升。所以该电动机不能维持固定的转速,转速会随负荷变化而波动。

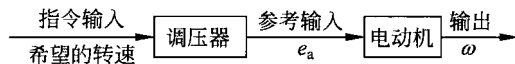


图 1.3 直流并激电动机的开环框图

1.4 图 1.4 是反应器温度控制系统示意图。参加反应的物料从入口进入反应器。反应是放热反应,为了维持正常的反应温度,需要改变流入冷却套中的冷水流量使反应器温度维持不变。试画出以温度设定值为参考输入、反应器温度为输出的闭环控制系统框图,并分析影响反应器温度的扰动因素。

参考解答:

图 1.5 是以温度设定值为参考输入、反应器温度为输出的闭环控制系统框图。

在反应过程中,反应物料的进料量和进料温度可能发生变化,反应器的传热状况和

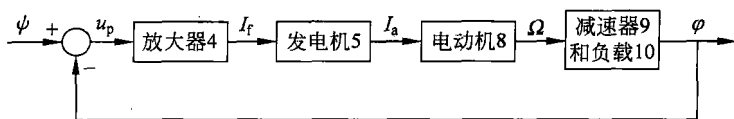


图 1.7 小功率随动系统框图

1.6 图 1.8 为函数记录仪的原理示意图。分析该系统的工作原理，并画出以被测函数为参考输入、记录笔位置为输出的闭环控制系统框图。

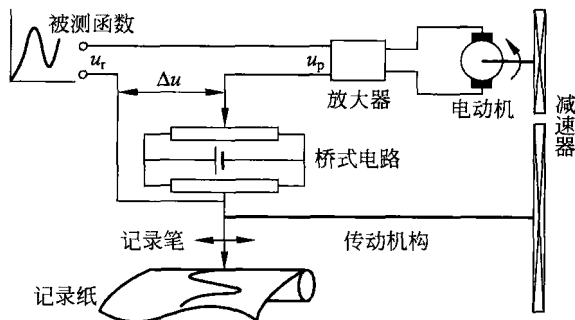


图 1.8 函数记录仪原理示意图

参考解答：

该系统受被测函数 u_r 作用时，会产生一个电压 u_p ，经放大器放大后驱动电动机，再经减速器带动记录笔来记录被测函数。当某时刻的记录笔位置和被测函数值相当时，桥式电路处于平衡状态，电压 $\Delta u = 0$ ， $u_p = u_r$ 。

现在假设，该记录仪在设计时已经保证当被测函数值 u_r 增大时驱动记录笔向正方向移动。

如果因为某种原因，记录笔位置未能准确对应被测函数的当前值，譬如记录笔指示值落后于 u_r 的当前值，从而使 $\Delta u < 0$ ，于是电压 $u_p = u_r + \Delta u$ 会使电动机驱动记录笔向正方向移动，以使记录笔指示值和 u_r 的当前值吻合。在相反情况下，即记录笔指示值略高于 u_r 的当前值时， $\Delta u > 0$ ，电动机就会驱动记录笔向反方向移动，以使记录笔指示值和 u_r 的当前值吻合。所以，在被测函数变化时，总会产生适当的电压 u_p 来移动记录笔，使其跟随被测函数的变化。显然记录笔记录的准确性与放大器的放大倍数、桥式电路的灵敏程度以及驱动机构的功率有关。相应的函数记录仪原理框图如图 1.9 所示。图 1.8 中没有标注 Δu 的极性，所以在图 1.9 中在反馈信号输入点处示意性地标了“+”号，不过这个加号并不意味着这个反馈是正反馈。

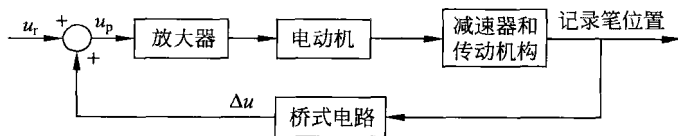


图 1.9 函数记录仪的原理框图

第2章

控制系统的数学描述

2.1 在图 2.1 中,电压 e_i 是输入变量, e_o 是输出变量,写出各电路输出变量的微分方程。

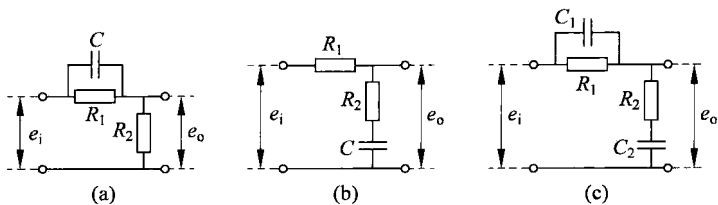


图 2.1 习题 2.1 的电路

参考解答:

(a) 设流过电阻 R_2 的电流为 i (见图 2.2),则有

$$\frac{e_i - e_o}{R_1} + C \frac{d(e_i - e_o)}{dt} = \frac{e_o}{R_2}$$

在零初始条件下对上式两端取拉普拉斯变换,可得

$$\frac{E_i(s) - E_o(s)}{R_1} + Cs[E_i(s) - E_o(s)] = \frac{E_o(s)}{R_2}$$

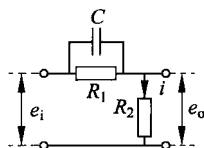


图 2.2 图 2.1(a)的电流方向

经整理可得

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{R_2 + R_1 R_2 Cs}{R_1 + R_2 + R_1 R_2 Cs} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1 + R_1 Cs}{1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} Cs}$$

令 $T = R_1 C, \alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2} < 1$, 则有

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \alpha \cdot \frac{1 + Ts}{1 + \alpha Ts}$$

也可以将 $E_o(s)/E_i(s)$ 写成

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1 + \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} Cs}{1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} Cs}$$

若令 $T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C, \alpha = \frac{R_1 + R_2}{R_2} > 1$, 则有

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1 + \alpha Ts}{1 + Ts}$$

(b) 设流过电路的电流为 i (见图 2.3), 则有

$$e_i - e_o = iR_1, \quad e_o = iR_2 + \frac{\int i dt}{C}$$

在零初始条件下对上两式两端取拉普拉斯变换,可得

$$E_i(s) - E_o(s) = I(s)R_1, \quad E_o(s) = I(s)R_2 + \frac{I(s)}{Cs}$$

经整理可得

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{1 + R_2 C s}{1 + (R_1 + R_2) C s} = \frac{1 + R_2 C s}{1 + \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot R_2 C s}$$

令 $T = R_2 C, \beta = \frac{R_1 + R_2}{R_2} > 1$, 则有

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{1 + T s}{1 + \beta T s}$$

(c) 设流过电阻 R_2 的电流为 i (见图 2.4), 则有

$$i = \frac{e_i - e_o}{R_1} + C_1 \frac{d(e_i - e_o)}{dt}, \quad e_o = i R_2 + \frac{\int i dt}{C_2}$$

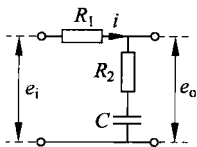


图 2.3 图 2.1(b) 的电流方向

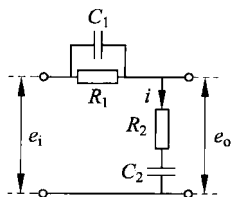


图 2.4 图 2.1(c) 的电流方向

在零初始条件下对上两式两端取拉普拉斯变换, 可得

$$I(s) R_1 = E_i(s) - E_o(s) + R_1 C_1 s [E_i(s) - E_o(s)], \quad E_o(s) = I(s) R_2 + \frac{I(s)}{C_2 s}$$

以

$$I(s) = \frac{C_2 s}{R_2 C_2 s + 1} E_o(s)$$

代入第一式, 可得

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{1 + R_1 C_1 s}{\frac{R_1 C_2 s}{R_2 C_2 s + 1} + 1 + R_1 C_1 s} = \frac{(1 + R_1 C_1 s)(1 + R_2 C_2 s)}{R_1 C_2 s + (1 + R_1 C_1 s)(1 + R_2 C_2 s)}$$

令 $T_1 = R_1 C_1, T_2 = R_2 C_2$, 则有

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}{R_1 C_2 s + (1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}$$

令

$$\begin{aligned} R_1 C_2 s + (1 + R_1 C_1 s)(1 + R_2 C_2 s) &= R_1 C_1 R_2 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2) s + 1 \\ &= \left(\frac{R_1 C_1}{\alpha} s + 1 \right) (\beta R_2 C_2 + 1) \end{aligned}$$

则有

$$\alpha = \beta, \quad \frac{R_1 C_1}{\beta} + \beta R_2 C_2 = R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2$$

即