

# 电机过渡过程 的基本理论及 分析方法

上册

高景德 张麟征 编著

科学出版社

# 电机过渡过程的基本理论 及分析方法

上册

高景德 张麟征 编著

科学出版社

## 内 容 简 介

本书是根据作者在清华大学从事电机过渡过程课程的教学和科学研究及研究生培养等工作的经验和成果，并结合近年来新技术的发展和应编写而成的。全书共十章，分上、下两册出版。上册共六章，着重讲述电机过渡过程的基本理论和分析方法。下册为后四章，着重讲述电机在变速时的非线性问题及其线性化的处理方法和电力系统及电机半导体系统的有关问题。

书中第一、二两章中，根据分析电机过渡过程的需要，从电路的过渡过程入手，较系统地介绍了分析过渡过程的各种方法和数值解法，以及计算机辅助计算的方法。在第三、四两章中，侧重讨论了旋转电机的基本方程，参数及坐标转换等问题。在第五、六两章中，应用上述的基本方程，分析了同步电机在同步转速时的一些对称运行方式和同步电机在恒速时的一些特殊运行问题。

本书上册可作为高等院校电机及发电等专业本科的电机过渡过程课的教本或参考书。全书上下两册则可作为电机专业研究生的教本或参考书，并可供从事电力工程的科学技术人员和教师参考。

## 电机过渡过程的基本理论 及分析方法

### 上 册

高景德 张麟征 编著

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1982年8月第一版 开本：850×1168 1/32

1982年8月第一次印刷 印张：17

精 1—3,950 插页：精 3 平 2

印数：平 1—4,500 字数：452,000

统一书号：15031·415

本社书号：2644·15—5

定价：布脊精装 3.75 元  
平 装 3.15 元

## 前 言

近几十年来,电机过渡过程和运行方式的研究成果,极为丰硕,有关书刊及资料也为数极多。但适合我国高等院校师生和科学技术人员参考的书刊仍嫌不足。

结合电机专门课程的讲授和研究生培养工作的需要,编著者之一曾在1963年编著出版过《交流电机过渡历程及运行方式的分析》一书,以后又在1964年前后,根据当时教学工作的需要,编著者之一又在合肥工业大学的吴本炎同志和北京工业大学的欧阳楷同志的参加下,编写了一份《电机过渡过程的基本理论》讲义,并在清华大学、合肥工业大学和北京工业大学作为教材用过几遍。1978年高等院校恢复了培养研究生的制度,清华大学又开始招收了电机方面的研究生,迫切需要一套较为系统的教材。考虑到近二十年来科学技术迅速发展的状况,特别是计算机技术的突飞猛进,考虑到今后我国高等教育和科学技术迅速发展和提高的需要,深感有对上述教材进行重新编写和扩充的必要。本书正是在这种情况下,在总结作者教学经验和科学研究成果的基础上编写而成的。

近二十年来利用矩阵和状态变量分析电机过渡过程的书籍增多,但对电机参数和应用计算机求解的讲述仍嫌不够。在编著本书的过程中,作者力求将电机基本理论和分析方法结合起来,以期读者在学习电机过渡过程基本理论的同时,还能掌握其分析计算的方法,包括应用计算机进行计算分析的方法。在讨论电机过渡过程的基本方程和参数时,为了使读者能够得到较为清晰的物理概念,作者进行了较为详细的论述。在应用基本方程分析电机过渡过程问题时,作者采取了按问题特点分类讲述的方法,以期读者通过一些典型问题的分析,体会和掌握电机过渡过程分析方法的规律。

本书共十章,分上下两册出版。上册共六章,着重讲述了电机过渡过程的基本理论和分析方法。在第一和第二章中,根据分析电机过渡过程的需要,从电路的过渡过程入手,较系统地介绍了分析过渡过程的各种方法和数值解法,以及计算机辅助计算的方法。在第三和第四章中,侧重讨论了旋转电机的基本方程,参数及坐标转换等问题。在第五和第六章中,应用这些基本方程,分析了同步电机在同步转速时的一些对称运行方式和同步电机在恒速时的一些特殊运行问题。

下册共四章,着重讲述了分析电机在变速时的非线性问题及其线性化的处理方法和电力系统及电机半导体系统的有关问题。第七章讨论了交流电机在微干扰条件下的一些问题及其线性化的处理方法。第八章分析了交流电机在变速时的一些非线性问题。第九章讨论了电力系统过渡过程的一些问题和分析方法。第十章讨论了电机半导体系统的一些过渡过程问题和分析方法。

本书主要针对电机专业研究生学习的需要而编著的,但同时也考虑了大学本科学生学习的要求。因此,在编著本书的过程中,我们力求由浅入深,以期具有一定电路分析和电机学基础知识的高年级大学生即可阅读。本书上册主要讲述了分析电机过渡过程的基本理论和分析方法。这些内容已经能够满足电机及发电等专业大学生学习这一课程的要求。本书之所以分成上下两册,也正是考虑到这一需要而分别出版的。

在编著本书的过程中,我们曾参阅和利用了已有著作的结果,主要的已经列入书末的参考文献,以便读者了解本书内容的主要来源和进一步查阅某些感兴趣的问题,同时也表示对原著者的感谢。

在编著本书的过程中,金启玫同志参加了其中一部分章节的编写和整理工作,付出了辛勤的劳动,提出了宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。由于我们的水平有限和时间仓促,书中还会有一些缺点和错误,恳切希望读者给予批评和指正。

编著者 1980年12月

# 目 录

绪论	1
第一章 过渡过程的一些基本概念及分析方法	5
概述	5
§ 1.1 过渡过程的一些基本概念	7
§ 1.2 运算微积法及其若干定理	12
§ 1.3 运算微积法在过渡过程分析中的应用	18
§ 1.4 海维塞德运算法及其在过渡过程分析中的应用	28
§ 1.5 电路的运算形式	33
§ 1.6 过渡过程的数值解	42
§ 1.7 电路拓扑学的一些基本概念	50
§ 1.8 分析电路用的节点法	60
§ 1.9 分析电路用的回路法	69
§ 1.10 采用拉氏变换时的节点法和回路法	76
§ 1.11 节点电压方程和回路电流方程的数值解	83
第二章 网络的状态变量分析法	98
概述	98
§ 2.1 状态变量和状态方程的一些基本概念	99
§ 2.2 状态方程的建立	102
§ 2.3 特征方程及特征矢量	108
§ 2.4 状态方程在时域中的解析解法	119
§ 2.5 状态方程的拉氏解法	137
§ 2.6 按网络图的拓扑关系建立状态方程	140
§ 2.7 状态方程的几种数值解法	165
第三章 具有换向器的电机的基本电磁关系及某些运行方式的分析	181
概述	181
§ 3.1 他激直流电机的一些基本电磁关系	182

§ 3.2	他激直流电机的一些运行特性的分析	187
§ 3.3	具有纵横轴电枢绕组的直流电机的一些基本电磁关系	209
§ 3.4	交磁放大机的一些运行特性的分析	220
§ 3.5	单相换向器式交流电机的一些运行特性的分析	231
§ 3.6	直流发电机突然短路的分析	241
第四章	交流电机的基本电磁关系	260
	概述	260
§ 4.1	凸极同步电机绕组的电压方程及磁链方程	261
§ 4.2	凸极同步电机绕组的自感系数和互感系数	267
§ 4.3	凸极同步电机定子绕组和转子绕组的磁链及参数	289
§ 4.4	同步电机的标么值系统	300
§ 4.5	同步电机在 $d, q, 0$ 系统中的基本方程	310
§ 4.6	同步电机的等值电路及运算电抗	314
§ 4.7	同步电机转速为恒值时的状态方程	322
§ 4.8	同步电机基本方程的矩阵形式	324
§ 4.9	同步电机的输出功率及电磁转矩	336
§ 4.10	同步电机转子运动方程及惯性常数	339
§ 4.11	同步电机转速变化时的状态方程	342
第五章	同步电机在同步转速时的一些对称运行方式的分析	346
	概述	346
§ 5.1	同步电机的稳态对称运行方式	347
§ 5.2	同步电机定子绕组开路时, 在励磁绕组上突然加以电压后的过渡过程	355
§ 5.3	同步电机转子绕组短路时, 在定子绕组上突然加以电压后的过渡过程	366
§ 5.4	同步电机突然三相短路后的电流	386
§ 5.5	同步发电机在突然增加负载时的电压降落	395
§ 5.6	同步电机的瞬变电势	401
§ 5.7	同步电机在突然三相短路后的电磁转矩	409
§ 5.8	同步电机三相短路的突然拉开	416
第六章	同步电机在恒速时的一些特殊运行方式的分析	422

概述 .....	422
§ 6.1 同步电机坐标系统的转换及其公式 .....	423
§ 6.2 同步电机的突然两相短路 .....	437
§ 6.3 同步电机的稳态异步运行 .....	464
§ 6.4 同步电机超瞬变电抗的静测法 .....	476
§ 6.5 同步电动机的异步起动 .....	482
§ 6.6 同步电机的频率特性及其实验测定法 .....	492
§ 6.7 同步电机与电容相联运行时的分析 .....	520
附录一 .....	534
附录二 .....	535
参考文献 .....	536



## 绪 论

电机是电能生产及应用的基本装备，同时也是自动调节控制系统中的重要元件。工农业生产及人民生活中普遍应用的电能，几乎全部是通过发电机生产的；而生产出的电能，则有一半以上是通过电动机加以利用的。在自动控制系统中，电机则是作为放大元件、执行元件，以及量测和比较元件等普遍加以应用。

在把我国尽快建成一个具有现代农业、现代工业、现代国防、现代科学技术的伟大的社会主义强国的进程中，不仅对电机的需要量及品种的要求大大增加，而且对其性能的要求，也在不断提高。现在电机的单机容量正在迅速提高，应用领域也在不断扩大，而且运行条件日益复杂化和自动化。随着计算机的出现及其应用的迅速发展，不仅可以利用计算机研究许多过去难于分析的，甚至不可能分析的电机的过渡过程问题，而且也反过来提出了建立更加准确的分析电机过渡过程的数学模型问题，以及宜于应用计算机分析电机过渡过程的方法等。半导体可控硅技术的发展，进一步增加了电机自动调节和应用的技术内容，提出了需要研究的一系列新课题。这种日益增长的需要，都要求我们很好地了解和掌握电机的过渡过程和运行特性。

与电机相联的任何参量一旦发生突变时，必然引起电机的过渡过程。例如，正常工作时的负载突然增减及调配，电机的起动、整步及停车；故障发生时的突然短路、断线、跳闸等，均会引起相应的过渡过程。这些过渡过程虽然一般都是短时间的，但却可能引起严重后果。例如，在三相突然短路时，异步电机的冲击电流的瞬时值，可能达到其额定值的十倍以上；汽轮发电机的冲击电流的瞬时值，可能达到其额定值的二十倍左右。在不正确的同步并车的情况下，同步电机的冲击电流瞬时值，可能达到其额定值的三十倍

以上。在某些情况下，由于时间的短促，虽然这些电流并不会引起严重的温升，但却可能在电机绕组的端接部分引起很大的机械应力，其值可达 75 公斤/厘米左右，并严重危及电机。在另一些情况下，例如在起动、自激、以及脱落同步等情况下，由于时间较长，还可能引起较高的温升，从而使电机受到相应的损伤。庞大的电力系统中的同步电机的失去稳定可能造成较大地区的停电事故和十分严重的损失。异步电机的自激严重影响着配电网串联电容补偿技术的应用和推广。

在过渡过程中，还可能发生严重的过电压现象。这些过电压现象多半是由于雷电现象、负载的调配、不对称运行及短路，以及电机的自激等所引起。例如，同步电机在负载调配，电缆击穿，以及电弧间续点燃等情况下，其过电压的数值可能达到额定值的四、五倍左右，而在不对称短路及电机自激等情况下，过电压的数值则可能达到更高的数值。随着输电电压的提高，过去完全由雷电现象确定的绝缘水平，现在有些需要根据电力系统本身产生的过电压来考虑。

在过渡过程中，还可能发生很大的电磁转矩，机械振动，以及电机转速急剧增大，出现很高的飞逸转速等现象。例如，同步电机在三相突然短路后，其最大瞬时电磁转矩可能达额定转矩的六、七倍以上，并严重危及电机主轴，基座及其螺钉等。再如，在过渡过程中出现的脉振转矩，特别是在电机转子具有一定的滑差时，脉振转矩的频率很可能与主轴的扭振固有频率接近，而发生严重的扭转剪切应力，并危及主轴。已经出现过大型汽轮发电机主轴由于发生自激而断裂的事例。

在研究电力拖动系统，自动控制系统，以及电力系统的自动调节及保护等许多特性时，对作为其中的重要元件的电机过渡过程的了解，也是非常必要的；因为这些系统都要在较短的时间内完成其调节控制作用的。例如，电力系统中的继电保护及开关设备，要在不到十个周波的时间内完成其动作；同步电机的自动励磁调节，已经成为提高电力系统静态稳定和动态稳定的重要措施之一。同

步电机励磁电压的上升速度已经达到每秒数万伏的数值。就电力拖动系统及自动调节控制系统而言，电机的过渡过程也有重要意义，在某些情况下，电机的过渡过程几乎是决定这个系统随时间变化的特性的主要因素。例如，过渡过程的持续时间，电动机及工作机械的转速及加速等，往往是决定这个系统特性的重要指标。

因此，了解和掌握电机的过渡过程，不仅可以获得合理的电机设计，节省原材料和加工工时等，而且可以正确地选择运行时所需的自动保护装置及其附属设备，同时，还可提高电机及与它相联的其他设备的整个系统的运行性能和指标。

电机的过渡过程是相当复杂的，其中不但有电磁方面的、机械方面的、以及热方面的过渡过程，而且他们还是互为影响，互为因果的。但在实际工作中，这些过渡过程往往是可以分别加以研究的。例如，其中的热过程的变化一般远较其他过程为慢，因而在研究其他过渡过程时，可以不予考虑。再如，在研究电机的电磁过渡过程时，在许多情况下，可以对其中的机械过渡过程忽略不计。电机的过渡过程，除了与电机本身的参数有关外，还和与它相联的其他电机、电器、输电线、以及机械负载和原动机等有关。因此，在研究电机过渡过程时，还必须对这些因素加以考虑。

在研究电机过渡过程时，首先，需要确定描述电机过渡过程的基本参数及基本关系式；其次，需要根据给定的电机工作状态，求解相应的方程。为此，就需要很好地了解电机内的电磁关系和求解相应的方程的方法。具体说来，就是一方面，要很好地了解电机的电压、电流、磁链、转速及转矩等之间的关系，以及与他们相应的自感系数，互感系数和其他参数等，以便根据实际情况做出相应的假定，求出相应的参数，建立相应的基本关系式。另一方面，还要善于根据电机及所研究的问题的条件及特点，利用转换变数(或转换轴线)，运算微积、状态变量或其他数学方法来求解所建立起来的方程。数字计算机和模拟计算机与电力系统动态模拟等物理模拟，以及他们的配合使用，则是研究电力系统和电机过渡过程的重要手段。学会和善于根据具体问题和条件，分别或综合利用这些

手段,往往可以达到事半功倍的效果。

电机参数是研究电机过渡过程的基本依据,这些参数的设计计算方法及实验测定方法是电机理论的一个重要组成部分。前者属于另一类型的问题,本书不拟多加讨论。后者与电机过渡过程的理论一脉相通,因此,在本书中将得到一定的反映。

近几十年来,在电机过渡过程方面已经进行了大量的研究工作,积累了极为丰硕的研究成果,并且已经有了比较完整和系统的理论与研究方法。本书的任务,就是在有限的篇幅内,介绍这些研究成果的基本概念及分析方法,从而使读者具备进一步阅读和参考有关研究成果的能力。随着生产的不断发展和科学技术的迅速提高,不但在这方面要出现许多新的研究课题,而且也要求把已经解决的科学技术问题,更加提高一步。因此,读者还要在掌握这些基本内容的同时,注意培养独立应用及推广这些基本理论和方法的能力,起到触类旁通的作用。

# 第一章 过渡过程的一些基本概念及分析方法

## 概 述

电路或电机的过渡过程是区别于电路或电机稳态情况的另一种工作状态。为了便于说明问题起见，在第一、二章中，我们将讨论电路过渡过程的基本概念及分析方法。它是研究电机过渡过程的重要基础。关于电机过渡过程的分析，我们将在第三章以后详细论述。稳态时，电路中的各变量，或者是一些恒值常数，或者是时间 $t$ 的周期函数，它们的数值大小和变化规律，一方面取决于外部作用因素（例如外加电压）的大小和性质，同时也取决于电路本身各参数的大小和性质，以及它们的分布情况。在实际工作中，电路的外部作用因素及其本身的参数往往会发生突然地变化。在这种情况下，电路原来的稳态情况就受到破坏，并且逐步地建立起与新的情况相适应的另一稳态情况。这时，在电路中将存在着一个从前者向后者演变的中间过程，这一过程通常称为电路的过渡过程或瞬变过程。与稳态状态不同，在过渡过程中，电路中的变量不仅与外部作用因素和电路的参数情况有关，同时也与电路的初始条件有关。通常在瞬变变量中，除了含有与新的稳态情况相应的强制分量（即稳态分量）外，还要引入一个或多个以指数规律衰减的自由分量。

在过渡过程中，电路的变量是相互联系着的，并可根据电路的物理原理（如欧姆定律、基尔霍夫定律等）列写出相应的关系式。通常，它们是一组微分方程或积分微分方程。有了这些方程后，就可根据给定的条件解得所求变量的变化规律。

在这一章中，以及在今后的许多包括有电机的电路问题中，我们将主要讨论线性电路的过渡过程。与线性电路过渡过程相应的

微分方程,则是线性的微分方程。一般说来,这类微分方程的求解有两种基本方法,一种是直接求解法,另一种则是间接求解法。直接求解法是一种直接求解微分方程的方法,变量的时间函数不需经过转换。这种方法的缺点是,计算工作量比较大,需要根据初始条件进行确定积分常数的手续。但是,这种方法也有一定的优点,它可以给出清晰的物理概念,有助于对过渡过程的深入理解;而这一点即使在采用间接求解法时也是完全有益的。间接求解法又称运算微积法,依靠引入一种函数的积分变换,它可使原来的微分方程的运算转化为代数方程的运算。这种方法不仅可以简化函数的结构,避免微分积分的手续,同时也可免去根据初始条件确定积分常数的手续。除此之外,利用运算微积法来研究过渡过程时,还可导出传递函数和运算阻抗等概念,从而使得电工学中的一些基本定律能够在更为广泛的范畴内加以应用。由于它具备了这些优点,因此,在计算线性电路的过渡过程时,它实际上已成为一种大家都乐于采用的主要的解析求解法。

随着计算机计算技术的应用及发展,近一二十年来,在电路过渡过程的分析中,状态变量分析法得到了广泛的应用。有关这方面的问题,我们将在第二章中加以讨论。

线性电路过渡过程的一些基本概念及分析方法在电工基础课程中已经进行过详细的论述。但为了便于对本课程的学习,本章中将对其中某些概念或方法进行一些适当的介绍和讨论。

为了便于说明过渡过程的一些基本概念和方法,包括运算微积法、海氏运算法、微分方程的数值解法等,在本章的前几节内,我们将以简单电路的过渡过程为例加以说明。为了进一步说明较复杂电网过渡过程的分析方法,在本章的后几节内,我们将对节点分析法及回路分析法等进行一些讨论。这种方法的特点是,用矩阵方程的形式来描述较复杂的电网。这不仅可使数学表达式得到很大简化,便于推演和分析,而且可使分析问题的方法规格化,十分有利于计算机的应用。

## § 1.1 过渡过程的一些基本概念

为了便于说明概念起见,我们来研究简单的  $R-L$  串联电路的过渡过程。假设这一电路如图 1.1-1 所示,其中  $R$  为电阻,  $L$  为电感,  $u(t)$  为电源电压。现在我们就来讨论,当开关闭合后,电流  $i(t)$  的变化规律。

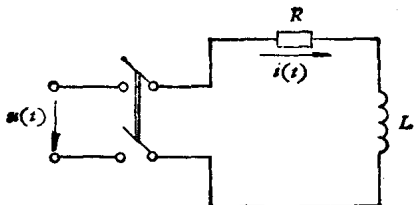


图 1.1-1

选开关闭合瞬间为时间  $t$  的零点。按照基尔霍夫定律,开关闭合后电路的电压平衡方程为

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = u(t) \quad (1.1-1)$$

这是一个一阶的非齐次微分方程,其中时间  $t$  为自变量,所求的变量  $i(t)$  则称为微分方程的解,式中  $R$  及  $L$  为微分方程的系数,当其中的系数与所求变量  $i(t)$  无关时,微分方程称为线性的;反之,当系数与所求的变量  $i(t)$  有关时,则微分方程称为非线性的。线性方程的系数也可能是自变量时间  $t$  的函数,当它们随着时间的变化而变化时,微分方程称为带有变系数的;反之,当它们与时间无关时,则微分方程称为带有常系数的。在目前情况下,我们只讨论线性电路,也就是说,假定  $R$ 、 $L$  是两个与电流无关的系数,进一步,为了方便起见,我们还假定  $R$ 、 $L$  与时间也无关,即认为方程 (1.1-1) 是一个非齐次的常系数线性微分方程。数学上已经证明,非齐次的线性微分方程的求解可分成两个步骤来进行:第一步,列出相应的齐次微分方程,并求出其通解;第二步,求出非

齐次微分方程的特解,最后将所得结果相加,即可得到全部的解答来。这一法则说明,就线性电路而言,可以使用迭加原理,即人为地将电路中的瞬变电流分成两个便于计算的分量来考虑。满足齐次微分方程通解要求的分量称为自由分量;而满足非齐次微分方程特解要求的分量则称为强制分量。

在式(1.1-1)中令  $u(t) = 0$ , 并以  $i_s$  表示瞬变电流中的自由分量, 则有

$$L \frac{di_s}{dt} + Ri_s = 0 \quad (1.1-2)$$

因为我们已假定  $R$ 、 $L$  为与时间无关的恒值, 故用  $p$  代表微分符号  $\frac{d}{dt}$  时, 则该常系数线性微分方程的特征方程为

$$Lp + R = 0$$

或

$$p = -\frac{R}{L}$$

因之

$$i_s = C e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1.1-3)$$

其中  $C$  为积分常数。

在恒值参数电路的情况下, 电流中的强制分量与外加电压具有相同的变化规律。因之, 在知道电压的时间函数和电路的参数后, 也就不难求出其相应的解答来。下面我们针对两种常见的情况来加以讨论, 一种是所加电压为恒值的直流电压, 另一种是所加电压为正弦变化的交变电压。

### (一) 所加电压为恒值的直流电压

在这种情况下,  $u(t) = U$  为常数。如果电流的强制分量(即稳态电流)以  $i_p$  来表示时, 则其表达式可列写如下:

$$i_p = \frac{U}{R} \quad (1.1-4)$$

(1.1-3) 式与 (1.1-4) 式相加, 即得电路在过渡过程中的瞬变电流



为

$$i(t) = i_p + i_s = \frac{U}{R} + C e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1.1-5)$$

方程 (1.1-5) 是  $R-L$  电路突然加上恒值的直流电压后, 电流过渡过程的一般表达式。对某一具体的过渡过程来说, 还必须根据初始条件来决定其中的积分常数。假设在开关闭合前, 电路中的电流为零, 则因电感电路中电流不能跃变的原因可知, 在  $t = 0$  时, 将有  $i(0) = 0$ , 即  $\frac{U}{R} + C = 0$ , 或  $C = -\frac{U}{R}$ 。故瞬变电流为

$$i(t) = \frac{U}{R} - \frac{U}{R} e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1.1-6)$$

其中  $T = \frac{L}{R}$  为电路的时间常数。

上式说明电路在接通恒值的直流电压后, 电流将以指数函数的形式由零的数值逐渐变化到数值为  $\frac{U}{R}$  的稳态值, 其相应的变化曲线如图 1.1-2 所示。上式还说明, 时间常数愈大, 自由分量衰减得愈慢, 过渡过程延续的时间愈长; 时间常数愈小, 自由分量衰减得愈快, 过渡过程延续的时间愈短; 因之, 时间常数  $T = \frac{L}{R}$  为一

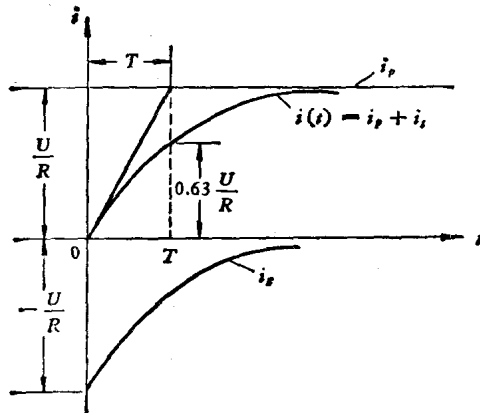


图 1.1-2