

〔苏〕И. С. 塔耶夫 著

电 器 学

(基 本 理 论)

机 械 工 业 出 版 社



Электрические аппараты

ИВАН СЕРГЕЕВИЧ ТАЕВ

Москва. «ЭНЕРГИЯ» 1977

电 器 学

(基本理论)

[苏] И. С. 塔耶夫 著

任耀先 贾继钧 张金城 译

王哲生 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $11\frac{3}{4}$ · 字数 309 千字

1981 年 11 月北京第一版 · 1981 年 11 月北京第一次印刷

印数 0,001—8,200 · 定价 1.45 元

*

统一书号: 15033 · 5065

译 者 的 话

本书是根据苏联 И. С. ТАЕВ 著《ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ(Общая теория)》一书翻译的。该书是МОСКВА.《Энергия》1977年出版的，是苏联高等学校电器专业教学参考书。

全书内容共分三篇：第一篇叙述电路转换理论和机械转换理论的基本知识；第二篇叙述电器中的热转移和质量转移的理论问题；第三篇叙述电器中的电磁和电动现象的理论及其计算问题。

本书可作为高等学校电器及有关专业教学参考书，也可供从事电器技术工作的工程技术人员参考。

在翻译的过程中对原书中一些印刷错误作了改正。

本书由沈阳机电学院电器教研室任耀先、贾继钧、张金城同志翻译，由西安交通大学电器教研室王哲生同志校阅。

由于译者水平有限，译文可能会有不少的缺点和错误，恳请读者批评指正。

译者

1980年4月

序

电器绝大多数是控制电流的工具,它完成的控制功能有转换、调节和变换。除电机外,电器是电气化和自动化的基本工具。

在控制各种不同形式电力装备的工作状态中,电器得到极广泛的应用,电器的价值常常可以同被它控制的电机和装备的价值相比,甚至大大地超过了它们。电器已成为独立的和广泛的电工技术领域,绝大多数自动化工具都是属于这个范围的。

电器的理论目前已得到重要的发展。国内的许多学者对电器理论作了自己的概括[B-10, B-14, B-16, B-21]。但是,介绍电器基本理论的书籍数量还很少。例如它比相邻的电机少很多(相对比较),虽然在电器中发生的现象要比电机更为多样和复杂。

编写本书的目的是想把组成电器一般理论的各部分联系起来并进一步系统化,在这方面本书的研究工作不是已很完善,它仅仅是企图使其系统化,而在某些方面只是提出问题和介绍解决这些问题的可能途径。

全书共三篇:在第一篇中叙述电路转换理论和机械转换理论的基本知识,在第二篇中叙述电器中的热转移和质量转移(物质转移)理论的基本知识,第三篇中叙述电器中的电磁和电动现象的理论及其与电磁装置计算相联系的有关问题。

著者在写本书时总结了自己在莫斯科动力学院多年的科学研究和讲授电器学的经验,莫斯科动力学院电器专业的教学经验,也吸收了莫斯科动力学院电器教研室的教师和同事们的许多宝贵意见。

著者对苏联功勋科学与技术工作者、技术科学博士、教授O.Б布朗在评论和阅读手稿过程中提出的宝贵意见表示深切的感谢。著者对本书的校阅者技术科学付博士B.Г捷格佳里在本书中讲述的材料方面提供大量有益的意见和建议表示感谢。

著者

目 录

译者的话

序

绪论 电器的概念 1

第一篇 电路转换理论和机械转换理论的某些知识

第一章 一般问题 7

§ 1-1 电路转换的基本定律 7

§ 1-2 关于线性和非线性电路过渡过程计算方法的一般概念 9

§ 1-3 电路的接通过程 13

§ 1-4 电路开断过程的一般特性 19

§ 1-5 交流和直流电路的开断过程 23

第二章 有触点电器转换装置中的气体放电过程 32

§ 2-1 开断电路时在电器触头间隙中气体放电阶段〔2-2~2-6〕 32

§ 2-2 在气体放电通道中的基本过程 39

§ 2-3 电弧的一般特性〔2-8~2-10〕 45

§ 2-4 电弧的伏安特性 54

§ 2-5 电弧特性的数学描述 58

§ 2-6 电弧及弧根沿触头的运动 67

第三章 电器转换装置的介质恢复强度 71

§ 3-1 概述 71

§ 3-2 关于有触点转换装置介质强度恢复过程的一般知识 80

§ 3-3 低压交流自由电弧弧柱的恢复强度 82

§ 3-4 在控制电器的熄弧装置中的恢复强度 90

§ 3-5 弧柱近极区域强度恢复过程的分析 98

§ 3-6 半导体元件的转换特性 103

第四章 电器转换元件上的恢复电压 108

§ 4-1	概述	108
§ 4-2	在单频回路中电压的恢复	113
§ 4-3	在双频回路中电压的恢复	118
§ 4-4	剩余电阻和电流	119
§ 4-5	等值线路的等效参数	121
§ 4-6	在工频电网和试验装置中恢复电压的参数	125
§ 4-7	当开断长线和近区短路时恢复电压的特点	130
第五章 电器的转换装置及其计算		133
§ 5-1	各种电路开断过程的特点	133
§ 5-2	影响电弧开断的方法	135
§ 5-3	无触点和无弧转换电器	141
§ 5-4	电路开断过程计算的一般问题	146
§ 5-5	在电弧动态方程的基础上不稳定电弧的理论分析	148
§ 5-6	熄弧装置工程计算的基础	154
第六章 机械转换理论的某些知识		158
§ 6-1	一般知识	158
§ 6-2	直动和转动型系统的动力学	162
§ 6-3	阻尼装置	166
§ 6-4	当运动系统冲击时元件的振动	170
 第二篇 电器中的热转移与质量转移的理论		
第七章 一般问题		173
§ 7-1	电器中的热源	173
§ 7-2	电器中的热转移形式	178
§ 7-3	电器中的热学问题及其解决方法	185
第八章 电器载流部分的发热和冷却		195
§ 8-1	根据牛顿公式计算载流部分的热状态〔B-21, 8-1〕	195
§ 8-2	载流部分于不同发热状态时的等效长期电流〔B-18〕	200
§ 8-3	用热传导方程计算载流部分的热状态〔8-2〕	203
§ 8-4	载流部分通过短路电流状态下的计算	208
§ 8-5	电器线圈的温度状态	211
第九章 电接触及其热转移与质量转移的现象		217

§ 9-1 电接触中的物理现象	217
§ 9-2 触头的材料与结构	224
§ 9-3 触头在长期载流状态下的发热	238
§ 9-4 短路电流通过时的触头	244
§ 9-5 触头中的质量转移 (触头的腐蚀与磨损)	252
§ 9-6 触头上弧根的温度状态	257
第十章 开断电弧中的热转移与质量转移	265
§ 10-1 概述	265
§ 10-2 电弧温度状态的分析研究	269
§ 10-3 电弧 (等离子流) 中的质量转移	276

第三篇 电器中的电磁和电动现象

第十一章 电磁现象和电磁铁	282
§ 11-1 电器中的电磁场	282
§ 11-2 电器的磁路	289
§ 11-3 电器中采用的磁性材料	295
§ 11-4 磁路计算方法	306
§ 11-5 空气隙磁导	316
§ 11-6 电磁铁的电感电磁力	321
§ 11-7 永久磁铁和极化系统	327
§ 11-8 交流电磁铁	331
§ 11-9 直流电磁铁的动特性	339
§ 11-10 交流电磁铁的动特性	348
§ 11-11 带有附加激磁的磁路	351
第十二章 电器中的电动现象	356
§ 12-1 电动现象的一般特点	356
§ 12-2 最简单形式的载流系统中的电动力	360
文献目录	363

绪论 电器的概念

发电机供给电流，把机械能变成电能。电动机或其他能量接收装置消耗电流，把电能变成机械能，热能或其他形式的能量。用电器控制电流从电源向用电设备（接收装置）传送的路径。因为在各种不同电压下实现对电流的控制，所以在一般情况下可以说，电器实现从电源到用户的能量的控制。

控制电流的功能包括各种不同形式：电流的转换、稳定、调节和变换。

转换（commutatio——变化，相互变化）可以是断续的（阶跃的）或平滑的（连续的）。断续的转换——例如用电器触头接通或开断电路。实现电路中电流平滑的转换，例如工作在放大状态下的各种不同放大器，平滑的改变输入参数引起输出参数平滑的改变。假如放大器工作在所谓转换（继电）状态，它同样也可以完成输出参数的断续变化（跃变）。

电器不仅可以实现一次的（非周期的）电流转换，还可实现严格的周期的电流转换。最典型的开关电器——断路器一般地是完成非周期转换，虽然在具有一定频率重复接通的工作状态时它的工作制表现为周期性的特征。

完成变换作用和称为静变换器的电器的特征是周期的转换电流。属于这种电器的有，例如交流变直流的变换器（或相反），电流频率变换器（电机——能量变换器不属于这种类型）。

稳定（stabilis——稳定的）在技术意义上通常理解为使某一个参数或工作装置的负载处于稳定状态。与稳定这个概念相接近的调节（regulare）在技术上通常认为自动保持某一装置给定的工作状态或自动保持工作装备的某种技术参数于一定的水准上（电压、旋转频率、温度等等）。

实现电路转换功能的第一类电器：高压和低压断路器、熔断器、磁和半导体放大器等等。各种不同的继电器和发送器也同样用本身的执行机构转换带电流的电路。在继电器和发送器中电流的转换一般是容易的，因为转换电路的电压和电流不高。

完成机械负载转换的电器一般是建立在电磁原理上。属于这种类型的有：例如各种不同用途的牵引电磁铁，带有闸板的电磁—阀，这个闸板能够打开和关闭气动和液压装置的孔，在传动中能够实现主动轴和从动轴的联接和分离的电磁离合器等。

断路器接通和断开电流（电荷转移过程），从而完成电流的转换。电磁离合器联接和分离主动轴和从动轴，即《接通和断开》传动装置的传动部分的运动（旋转）过程。制动电磁铁在去掉制动力后，使提升——运输装置中的运动系统《接通运动》，当制动时，制动电磁铁停止了这些系统的运动。因此，在断路器、电磁离合器及制动电磁铁之类的电器间原理上是相似的。假如认为前者是完成转换电流的功能，则相似地可以认为，后者是完成机械转换的功能。机械运动的参数和特性的改变理解为机械转换[⊖]。当停车时机械系统运动的《断开》，停止和当装置起动时运动的《接通》是转换的极限状态。零件和元件从一个位置向另一个位置的机械移动也可以同样认为是机械转换。

对于开关电器而言，电路（或机械负载）的转换理论是基本的，它还没有得到应有的发展。

在许多电器中产生能量变换。例如在熄弧装置中线路的电磁能量变成热能。在电磁式电器中或者在其传动装置中完成把电能变换为机械能。但是在电器中的能量变换不是基本现象，而是伴随的。它是在电器完成自己的基本功能的过程中发生的。

自动调节器和稳定器的调节和稳定功能是第二类电器的特征。调节器的执行机构也同样转换电路，但象在继电器和发送器中一样，这些转换是容易的，因为转换的电流和电压一般都不高。

现代最完善的稳定器是自动调节的闭路系统。因此，它就像

⊖ 术语第一次采用。

自动调节器一样,自动调节理论是基本的。在这种情况下稳定器可以认为是调节器的变型,而稳定是调节过程的变态。变换器也常常工作在自动控制与调节系统中,在这种情况下,为了描述在变换器中的过程采用自动调节理论。

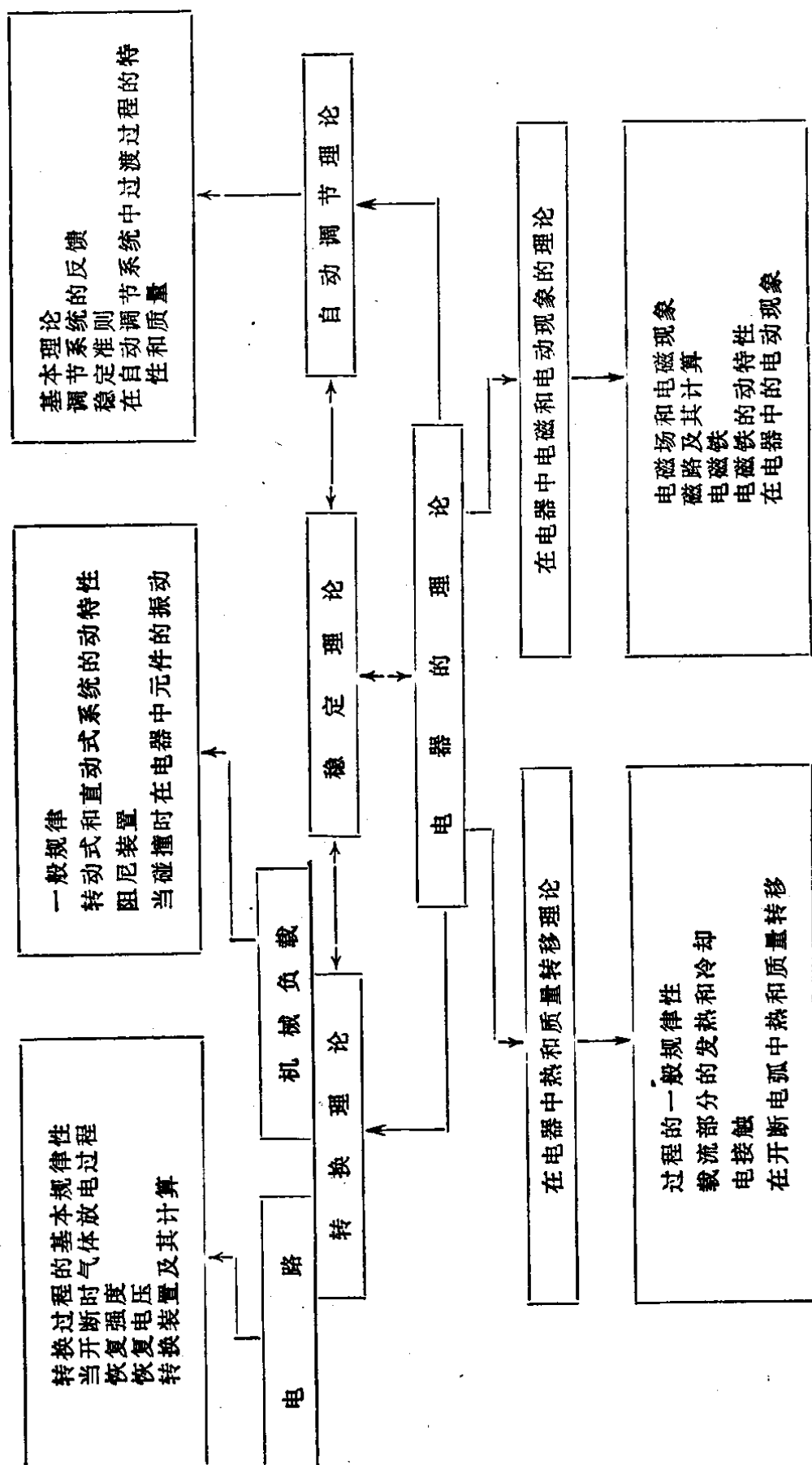
因此,转换理论和自动调节理论总括起来应该是构成电器的一般理论基础。虽然在自动调节理论和转换理论之间表面上存在差异,但它们可以有共同的基础,分析调节系统稳定的条件是调节理论的特征,而分析破坏稳定的条件可以认为是转换理论的特征,例如在被开断的回路中当电弧熄灭时分析它的不稳定条件,这个稳定和不稳定条件的分析可以认为是电器的一般理论的两个基本部分(自动调节理论和转换理论)的统一。

电器确切的一般定义暂时还没被建立起来。考虑到转换、稳定,调节和变换统一为共同的术语《控制电流》,则电器可以理解为是用于控制电流、机械负载或工作装备的各种不同技术参数的电气设备。换句话说,电器比较具体的定义是:用于转换电流,机械负载或工作装备的各种不同技术参数的稳定和调节的电气设备。

在(图 B-1)中给出构成电器一般理论的框图方案。其中基本部分是转换理论和自动调节理论。而电接触理论,热转移和质量转移理论,电磁和电动现象理论是电器一般理论的重要部分。

电器理论的发展遇到很多困难。电器一般是由许多相互联系的元件和环节总合而成的,而在这些元件和环节中发生各种不同的复杂的物理现象。描述这些现象的数学关系采用经典方法求解常常是不可能的,对于分析和解决电器中这些关系的相互联系来说是比较复杂和难以达到的。

随着计算技术的发展,为进一步完善电器理论提供了良好的可能性,有了计算机就可以用数字方法求解描述电器特性和过程的原始数学关系。利用电子计算机求解时花费的时间大大的缩短了,毫无疑问,广泛运用计算技术的工具和方法将有力地促进电器理论的发展。



电器一般按电压与电流的大小和按使用条件分类，划分为强电流（电流从5安到几十万安）和弱电流（5安以下）电器，低压（1000伏以下）和高压（从千伏到几十万伏）电器。

电器工作于电机及其他装置的自动和非自动控制系统；自动调节装置；电能分配系统和国民经济各部门的能量供给系统中。总括起来，电器分成六类：

1. 自动电器（低压电器），它包括：a) 继电器；б) 发送器。同自动电器具有许多共同点的各种不同的自动元件常常也属于这一类。

2. 自动调节器和稳定器。

3. 静止变换器（电流的，频率的及其他等等）。

4. 放大器，当输入端信号改变时实现输出端电流的转换，在放大器的基础上做成无触点继电器。

5. 1000伏以下设备中的能量分配器和控制电器（低压电器）。

6. 高压电器（1千伏~1500千伏）。

在（图B-2）中列出电器分类方案。

文献〔B-1~B-29〕是在电器理论方面（理论和试验研究）以及在电器发展史方面的最主要的研究成果。

第一篇 电路转换理论和机械转换理论的某些知识

第一章 一般问题

§ 1-1 电路转换的基本定律

电路转换就是指引起电路中的电流及其个别部分上电压发生变化的动作总称。电路的接通、开断，个别支路电流的转换，局部短路，电流方向的改变——所有这类现象用术语《转换》统一起来。开关电器的特点是实现非周期性电路的转换，其转换周期的时间间隔很长而且是非调节的。电器实现电路转换是依靠它的执行机构电阻的改变，例如触头间隙电阻的改变。

在一般情况下，转换和放大两种状态可以作为电器转换机构的特征。为了说明两种状态间的差别，分析（图 1-1a）的线路。负载电阻 z_n 和电器转换机构电阻 z_k 串联，而后者是受控制机构中电流 i_y 控制的。当 $i_y = 0$ 时，电阻 z_k 最大，当 i_y 最大时，电阻 z_k 最小

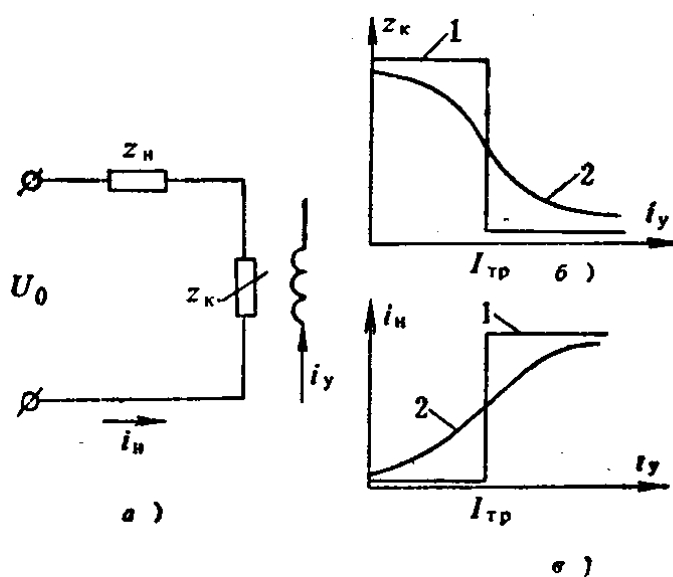


图1-1 关于电器的转换和放大工作状态的说明

a) 线路图 б) 电阻曲线 в) 电流曲线

（图 1-1 б），当控制线圈中的电流达到触动电流时（ $i_y = I_{Tp}$ ），触头闭合，电阻 z_k 突变减小，负载电流迅速增加到 $I_0 = U_0 / z_n$ （图

1-16 中曲线 1)。当控制电流有一个不大的增量时, 电器转换机构的电阻发生跃变和流过它的电流迅速增大, 这种状态称为转换状态(对于小电流电器也叫继电工作状态)。在这种状态下工作的电器实现了电路的断续转换。

当电器控制机构中电流增大或减小时, 转换机构电阻 z_x 和转换电路电流 i_x 发生平滑地变化称为放大状态(图 1-16 和 6 中曲线 2)。工作于放大状态的电器实现了电路的连续平滑的转换。

用电器开断电路是最有代表性的和最重要的转换形态, 电器触头开断电路的过程实质上就是电器触头间隙从导体状态变成绝缘体状态的过程。

当触头处于闭合状态时, 它的电阻 R_{xxx} 很小(触头的过渡电阻为微欧), 相反, 在断开状态触头间隙的电阻 R_{ox} 很大(绝缘电阻为兆欧)。这两个电阻的比值决定了电器的转换能力, 称为转换深度

$$h_x = R_{\text{ox}} / R_{\text{xxx}} \quad (1-1)$$

当开断电路时, 触头间隙的电阻值从 R_{xxx} 增长到 R_{ox} , 反之, 接通电路时, 从 R_{ox} 降低到 R_{xxx} , 对于有触点电器转换深度为 $h_x = 10^{10} \sim 10^{14}$, 对于无触点电器 $h_x = 10^4 \sim 10^7$ 。

电器从一个工作状态转到另一个工作状态不是瞬时发生的, 而占有一定的时间, 这是因为对应于每一个电路的稳定工作状态都存储一定的电场和磁场的能量。当转换到新的状态时都和这些场的能量增大或减小相联系的。在磁场中存储在电感 L 上的能量 $W_L = LI^2 / 2$ 和电场中电容 C 上的能量 $W_C = CU^2 / 2$ 是不能瞬间改变的。能量只能连续变化, 不会发生跃变, 否则, 功率(等于能量对时间的微分)会达到无穷大, 这在物理上是不可能的。对于带有电感 L 的线圈和带有电阻 R 的电阻器所组成的串联电路与电源电压 U 接通时, 其电压平衡方程式为 $L di/dt + Ri = U$, 如果电流 i 是跃变的, 则其导数等于 $di/dt = \infty$ 。那么, 上述方程式左边部分将不等于右边部分, 这是和克希荷夫第二定律相矛盾的。根据这些原理可以引出转换第一定律[B-26]。在转换开始的瞬

间, 电感中的电流只能从转换前的数值开始平滑的变化。

若用 $i_L(0_-)$ 表示转换开始前一瞬间流过线圈的电流, 而 $i_L(0_+)$ 表示转换开始后一瞬间的电流, 那么, 转换第一定律可以写成

$$i_L(0_-) = i_L(0_+)$$

在电感上的电压可以跃变。在这种情况下, 对于电路仍然不违背克希荷夫第二定律和能量关系。

由带有电容 C 的电容器和带有电阻 R 的电阻器组成的串联电路与电源电压 U 接通, 则电压平衡方程式为

$$Ri + u_c = U \quad (1-2)$$

式中 u_c ——电容上的电压。

因为 $i_c = Cdu_c/dt$, 所以 $RCdu_c/dt + u_c = U$ 。

假定电压 u_c 是突变的, 则 $du_c/dt = \infty$, 而上述方程式的左边部分将不等于右边。由此可见, 关于电容上电压跃变可能性的假定是与克希荷夫第二定律相矛盾的。在这些原理的基础上, 转换第二定律可以表述成, 在转换开始的一瞬间, 电容上的电压只能从转换前一瞬间的数值开始平滑地变化。这个定律可以写成

$$u_c(0_-) = u_c(0_+) \quad (1-3)$$

式中 $u_c(0_-)$ ——转换开始前一瞬间电容上的电压;

$u_c(0_+)$ ——转换开始一瞬间电容上的电压。

流过电容的电流可以跃变, 它也不违反克希荷夫第二定律和能量关系。

§ 1-2 关于线性和非线性电路过渡 过程计算方法的一般概念

当电路转换 (包括电路的接通和开断) 时会发生过渡过程, 其特点也是很不相同的, 它与转换条件, 转换线路参数的特点及其配合有关。因此, 这里只能适当地介绍关于带有集中参数和分布参数的线性与非线性电路过渡过程分析和计算方法的一般概念。在一般情况下, 分析带集中参数的线性电路过渡过程的方法归结为求解一般非齐次线性微分方程式, 这个方程式是根据克希荷夫第二定律列出的。例如如果含有 L , R , C 串联的电路

接到电压 $u(t)$ 上, 则其积微分方程式为

$$iR + Ldi/dt + \frac{1}{C} \int i dt = u(t)$$

这个方程经过微分后变成二阶非齐次微分方程

$$Ld^2i/dt^2 + Rdi/dt + i/C = du(t)/dt$$

上述方程的解等于非齐次方程的特解和齐次微分方程的通解之和〔(1-1)——(1-3)〕。

在线路参数 (R 、 C 、 L) 为常数的条件下, 可以采用叠加原理把过渡过程描述成线性微分方程, 这个原理可以归纳为, 总的转换因子决定于稳定的因子和过渡因子的代数和。过渡因子的衰减规律就像仅有它作用在回路中而无外加电压的影响时一样。在线路参数变化的条件下, 例如电器开断时触头间隙中的电阻是变化的, 这个原理便不能采用。

用经典方法分析过渡过程是寻找方程式的通解和特解。特解表示由电源给予的强制分量。假如方程式右边函数是常数或随时间周期变化时, 则强制分量是均匀稳定的, 稳定电流可用一般方法计算。

在给定初始条件下和无外加电源时, 通解决定电路的物理性质。由通解确定的函数称为自由的、过渡的分量 (电流, 电压等)。

在上述条件下, 齐次方程的形式为

$$Ld^2i/dt^2 + Rdi/dt + i/C = 0$$

其特征方程为

$$Lp^2 + Rp + 1/C = 0$$

假若特征方程的根用 p_1 和 p_2 表示, 则通解为

$$i_{cs}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$$

式中 A_1 和 A_2 ——由初始条件决定的积分常数。

线路的整个过渡电流等于强制电流和自由电流之和 $i(t) = i_{np}(t) + i_{cs}(t)$ 。

同样, 在过渡情况下线路任何部分上的电压, 电荷, 磁通和其他函数都是由强制分量和自由分量组成的。

由于必须根据初始条件确定积分常数, 所以在许多情况下采用求解线性微分方程的经典法来计算过渡过程是很困难的, 随着电路复杂程度和微分方程阶数的增加, 确定积分常数的困难也增大。

当给定的初始条件包括在原始方程之中, 并且为了求得未知函数、无