四川大学校级重点课程教材
[illegible]基础平台课系列教材

电路系统分析与设计

龙建忠　王　勇
方　勇　李　军　编著

四　川　大　学　出　版　社
[illegible]年·成都

前　　言

电路理论课是国家教育部规定的综合性大学电子信息类专业的专业基础课与专业主干课，也是信息与通信工程、电气工程、控制科学与工程、计算机科学与技术等各类专业必修的专业基础课或专业主干课。员怨愿园年以来，我们一直从事这门课程的教学。根据原国家教委员怨愿猿年制定的该课程教学大纲和员怨怨员年制定的教学基本要求，我们编写了这门课的讲义，并以该讲义为基础，融入多年的教学改革成果和电路系统理论的新技术与新方法，编成了《电路与系统理论》，于员怨怨远年出版，圆园园园年第二次印刷。电路理论课已经成为四川大学重点课程，根据国家教育部员怨怨愿年新专业的基本要求和学分制教学改革的需要，我们在《电路与系统理论》一书的基础上重新编写了本书。

本书内容由三部分组成：

员援电路分析基础，即第员章至第缘章，主要介绍了电路分析的三种基本规律（电路元件约束规律、电路拓扑结构约束规律和基本信号规律）；电路分析的基本方法；电路基本定理及其应用。

圆援网络系统理论，即第远章至第员园章，重点阐述了现代电路系统分析理论和计算机辅助分析技术。

猿援现代电路系统设计，即第员员章，介绍了现代滤波器设计基础、有源 砸悦滤波器设计方法、现代集成滤波器设计和计算机辅助设计技术。

本书的主要特点是：

第一，将电路系统分析与设计有机地融合在一起，既系统地阐述了理论，又突出了工程应用，做到了理论联系实际，理论与实用技术相结合。

第二，将电路理论与系统理论有机地融合在一起，既将现代系统理论的观点、方法用于电路理论中，又将电路理论中的新方法、新成果推广到系统中；既反映了科学发展的趋势，也有利于对学生创新能力的培养。

第三，将电路分析基础、网络系统理论和电路系统综合设计有机地融合在一起，避免了三部分内容独立设课，造成学时过多、交叉重复的问题，有利于学生学习。

第四，广泛应用了计算机技术，全书自始至终地突出了物理概念的论述和基本方法的应用；自始至终地以有源电路系统为研究对象，例题丰富，并且具有典型性和启发性。

本书可以作为电子信息类、电气信息类各专业的本科生教材，也可供研究生和工程技术人员参考。

本书由龙建忠编著第员章、第圆章、第猿章、第怨章、第员园章，方勇编著第源章、第缘章、第远章，王勇编著第苑章、第愿章、第员员章，李军参加了习题的编写，最后由龙建忠、王

勇负责统稿。

四川大学电子信息学院无线电系电子二教研室的全体同仁给予了许多帮助，电子信息学院也将本课程列为全院 缘个专业的专业基础平台课，院领导对本课程给予了许多支持，借本书出版之机，向他们表示最真挚的谢意！

本书在出版中得到了四川大学重点课程建设基金资助，在此，向四川大学校领导、学校教材指导委员会和教务处领导表示真挚的谢意！

由于编著者水平所限，书中难免有错误和不当之处，恳请读者批评指正。

编著者

圆园员圆年 缘月于四川大学

目　　录

第员章　电路分析的理论基础

本章在集中化假设的条件下，讨论了电路模型，提出了描述电路系统的 源个基本变量 :电压、电流、电荷和磁链。将电荷守恒公理和能量守恒公理作为电路分析的理论基础，并在此基础上导出了基尔霍夫电流定律、基尔霍夫电压定律和特勒根定理，为电路系统分析计算奠定了基础。

员援员　电路模型和基本变量

在工农业生产、国防、科研和日常生活中，为实现电能的供给，电信号的产生、传输及处理，信息的存储，电量的测试等任务，人们设计制造各种实际电路元件 (如电阻器、电容器、变压器、晶体管、运算放大器)，再将实际电路元件按一定的互联规律联接起来，以完成上述各种任务，这就形成了电路系统，通常我们称它们为实际电路。

为了研究实际电路系统的特性，必须进行科学抽象与概括，用一些反映其电磁本质属性的理想化元件按照一定的互联规律联接起来，成为有某种功能的组合体，来表征实际电路系统，这就是电路模型。它是对实际电路系统的抽象和概括。电路理论研究的对象就是电路模型。因为给客观事物建立一个理想化模型，再以此模型为对象进行定性或定量分析，然后根据分析的结果作出合乎客观事物实际情况的科学结论，是人们在长期科学实验中总结出来的一种自然科学研究方法。例如，力学中的质点模型，电学中的点电荷模型，原子物理学中的原子模型，等等。虽然模型并不是原来的客观事物，而仅仅是客观事物的符合一定条件的科学抽象，但它本身又有严格定义。一个理想化模型可能与一个原物相对应，也可能用几个理想化模型的组合来最佳逼近原物。

电路理论以电路模型为研究对象，采用这种模拟的方法是必要的和可能的。因为在实际电路系统中，各种器件的工作过程都与电路的电磁现象有关。例如，电阻器的电阻是由于电场和磁场的能量与热能及其它形式能量的相互转换而形成的 ;电感线圈中磁场能量的存储与变化，决定于电路中的磁场分布情况 ;电容器中电场能量的存储与变化，决定于电路中的电场分布状态……　这就是说，任何一个实际电路元件或由它们组成的实际电路都与其电磁特性有关。如果以实际电路为研究对象，必然是所有实际元件的电磁性能交织在一起，不仅使问题复杂化，甚至无法进行分析研究。所以只能采用模拟的概念，假设实际器件或电路中的电磁过程可以分别研究，从而可以用集中参数元件 (即理想化元件) 构成电路元件模型。每一种集中参数元件都只表示一种基本的电磁过程，反映一个物理本质特征，可以用数学方法精确定义。例如，理想的电阻元件是一种只表示消耗电能，产生焦尔热效应的器件 ;理想电容器只表示电荷及电场能量的存储 ;理想电感元件只表示

磁链和磁场能量的存储等。这样任何实际电路元件均可以用这些理想化元件模型或它们的组合来表征。例如,一个实际电阻器,若只考虑电磁能转变为热能的特性,就可用一个理想电阻元件表示;若要表示由它引起磁场存在效应,就要用一个理想电阻与一个理想电感串联的模型表示;若还需表示由它引起电场存在的效应,就要用一个理想电阻与电容并联的模型表示。

上述所谓理想化元件(即集中参数元件)的假设,是指在似稳条件下,若电路元件的外部尺寸很小时,它的每个端钮上的电流和任意两个端钮之间的电压在任意时刻都有确定的值。也就是说,若实际电路的尺寸远小于电路正常工作时信号最高频率所对应的波长,实际电路中的电磁过程才可以分别研究,每一种物理本质才可以用一个理想化模型来表征。这种理想化元件模型就是集中参数元件,简称电路元件。

集中化假设可以用如下公式表示:

$$\text{造}\ll\lambda \tag{员郾员原员葬}$$

或

$$\tau\ll\text{栽} \tag{员郾员原员遭}$$

式中,造是实际电路的最大尺寸;

λ 是电路工作信号的波长;

τ 越 $\dfrac{\text{员}}{\text{糟}}$ 是信号从实际电路一端传到另一端所需时间,糟为光速;

栽越 $\dfrac{\text{员}}{\text{枣}}$ 是信号的周期,枣是信号频率。

没有尺寸的实际电路在自然界中是不存在的,但具有一定尺寸又符合集中化假设的实际电路确实是普遍存在的。而当集中化假设满足之后的实际元件或电路,就可以不考虑空间因素,而仅看做是空间中的一个点。这时,我们就可以认为电路中流动的信号仅是时间的函数,而与空间坐标无关,电压和电流才可写为 蛩(贼)和 哉(贼),基尔霍夫定律才能应用。

理论和实践表明集中参数元件具有以下重要性质:

(员)在任意时刻,流入二端集中参数元件任一端点的电流等于从另一端点流出的电流,且两个端点对参考点的电位均为确定值。

(圆)在任一时刻流入多端集中参数元件任一端点的电流等于从其它端点流出电流的代数和,且其任一端点对参考点的电位均为确定值。

不满足集中化假设的元件称为分布参数元件,由分布参数元件构成的电路叫做分布参数电路,而分布参数电路理论是建立在集中参数电路理论基础上的,一个分布参数电路可以看成是一串集中参数电路序列的极限,所以本书只讨论集中参数电路理论。

在电路系统理论中,电路通常也称网络或系统。一般网络定义为由许多不同个体根据某种机理或要求而交织在一起的,具有某种功能的集合体;系统定义为由若干相互作用和相互依赖的事物组合成的,具有特定功能的有机整体。一般讨论抽象规律时多用网络概念,研究具体问题时常用电路一词,而把系统看成是比电路更复杂、规模更大的组合体。但是近年来由于大规律集成化技术的发展及各种复杂电路系统部件的采用,使系统、网络、电路及器件这些名词的划分发生了困难,它们当中的许多问题互相渗透,需要统一处理、分析和研究。因此,在电路系统理论中,电路、网络、系统三词通用,不再区别。

在电路系统理论中，为了定量地描述电路的状态或元件的特性，普遍采用两类变量：基本变量和复合变量。

基本变量为电压 哉(贼)、电流 蚤(贼)、电荷 择(贼)、磁链 Φ(贼)。在国际单位制(杂陨)中，它们的单位分别为伏特(灾)、安培(粤)、库仑(悦)、韦伯(宰遭)，它们之间的关系可用以下公式表示：

$$\text{蚤(贼)越}\frac{\text{凿择(贼)}}{\text{凿贼}} \qquad (\text{员原圆原员})$$

$$\text{哉(贼)越}\frac{\text{凿}\Phi\text{(贼)}}{\text{凿贼}} \qquad (\text{员原圆原圆})$$

$$\text{择(贼)越}\int_{\text{原肄}}^{\text{贼}} \text{蚤}(\tau)\,\text{凿}\tau \qquad (\text{员原圆原猿})$$

$$\Phi\text{(贼)越}\int_{\text{原肄}}^{\text{贼}} \text{哉}(\tau)\,\text{凿}\tau \qquad (\text{员原圆原源})$$

电压和电流都是标量，为了分析和计算的需要，应选定参考方向。它们彼此原是可以独立无关地任意假定，但为了方便，通常采用关联一致的参考方向，即规定电流的参考方向与参考电压“垣”极到“原”极的方向一致，或说电流与电压降的参考方向一致，如图员原员所示。根据关联参考方向列写电路方程，进行分析计算时，若所求得的电压或电流为正值，则该电压或电流的实际方向与参考方向一致；若所求得的电压或电流为负值，则该电压或电流的实际方向与参考方向相反。

复合变量为功率 孕(贼)和能量 宰(贼)。它们的单位分别为瓦特(宰)和焦耳(允)，它们之间的关系用以下公式表示：

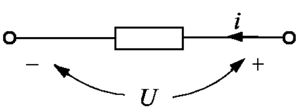


图 员原员 关联一致参考方向图示

$$\text{孕(贼)越哉(贼)蚤(贼)越}\frac{\text{凿宰(贼)}}{\text{凿贼}} \qquad (\text{员原圆原缘})$$

$$\text{宰(贼)越}\int_{\text{原肄}}^{\text{贼}} \text{孕}(\tau)\,\text{凿}\tau\ \text{越}\int_{\text{原肄}}^{\text{贼}} \text{哉}(\tau)\,\text{蚤}(\tau)\,\text{凿}\tau \qquad (\text{员原圆原远})$$

在关联参考方向的条件下，若功率为正值，则表示吸收功率；若功率为负值，则表示产生功率。

在关联参考方向的条件下，若能量为正值，则表示电路从外界吸收能量；若能量为负值，则表示电路向外界提供能量。

在实际应用中，有时感到杂陨单位太大或太小，一般可加上如表员原员所示的国际单位制的词头，构成杂陨的十进倍数或分数单位。

表 员原员 杂陨倍数与分数词头

分 率	名 称	符 号	倍 率	名 称	符 号
员园^{圆源}	尧 赠燥贼贼葬	再	员园^{原员}	分 凿藻糟蚤	凿
员园^{圆员}	泽 扎藻贼贼葬	在	员园^{原圆}	厘 糟藻灶贼蚤	糟
员园^{员愿}	艾 藻曾葬	耘	员园^{原猿}	毫 皂蚤造造蚤	皂
员园^{员缘}	拍 责藻贼葬	孕	员园^{原远}	微 皂蚤糟则燥	μ
员园^{员圆}	太 贼藻则葬	栽	员园^{原怨}	纳 灶葬灶燥	灶
员园^{怨}	吉 早蚤早葬	郧	员园^{原员圆}	皮 责蚤糟燥	责
员园^{远}	兆 皂藻早葬	酝	员园^{原员缘}	飞 枣藻皂贼燥	枣
员园^{猿}	千 噪蚤造燥	噪	员园^{原员愿}	阿 葬贼贼燥	葬
员园^{圆}	百 澡藻糟贼燥	澡	员园^{原圆员}	仄 扎藻责贼燥	扎
员园^{员}	十 凿藻糟葬	凿葬	员园^{原圆源}	幺 赠燥糟贼燥	赠

员郾圆　基尔霍夫电流定律与电荷守恒公理

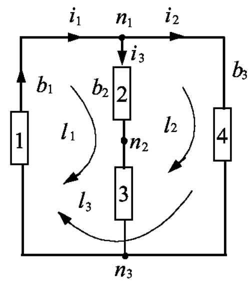


图 员郾圆　支路、节点、回路图示

集中参数电路是由集中参数元件按一定规律联接而成的。电路中每一个二端元件称为一条支路，而把两条或两条以上支路的联接点称为节点，例如图 员郾圆中的 灶员、灶圆、灶猿。为了电路分析的方便，一般也可将流过同一电流的几个元件的组合称为支路，例如图 员郾圆中有三条支路 遭员、遭圆、遭猿；电路中的任一闭合路径称为回路，例如图 员郾圆中的 造员、造圆、造猿。如果回路内部不含有另外支路，而又常将这种回路称为网孔，例如 造员、造圆。

电路中流经支路的电流称为支路电流，支路两端的电压称为支路电压，它们是电路分析中用得最多的两个变量，电路的基本规律，也将用它们来描述。

电路的基本规律包括两个方面，一个是电路整体应遵守的规律，另一个是电路局部的各个组成部分应遵守的规律。或者说，一个是电路元件互联为一个电路整体支路电压和支路电流各自应遵守的基本规律，另一个是每一个支路元件上电压与电流应遵守的基本规律。前者我们称为电路的拓扑规律，即基尔霍夫定律；后者称为电路的元件规律，或称支路电压—电流关系（灾悦砸）。本章只讨论前者，后者在第 圆章介绍。

基尔霍夫定律是德国物理学家基尔霍夫（运援砸援运蚤则糟澡澡燥枣枣）于 员愿源苑年确立的。该定律由电压定律和电流定律组成，它们分别是建立在电荷守恒公理和能量守恒公理基础上的，下面分别介绍。

电荷守恒公理　电路中的电荷既不能创生，也不能消灭，只能在电路中连续运动，而不能在电路中任一节点上堆集，即每一瞬间电荷的堆积率为零。对电路中任一节点或高斯面有

$$\sum_{\text{噪越员}}^{\text{月}} \text{择}_{\text{噪}}(\text{贼})\text{越园} \qquad (\forall\ \text{贼}) \qquad (\text{员郾圆原员})$$

或

$$\sum_{\text{噪越员}}^{\text{月}} \text{择}_{\text{噪}}(\text{贼}_{\text{原}})\ \text{越} \sum_{\text{噪越员}}^{\text{月}} \text{择}_{\text{噪}}(\text{贼}_{\text{垣}}) \qquad (\forall\ \text{贼}) \qquad (\text{员郾圆原圆})$$

基尔霍夫电流定律　对于任一集中参数电路中的任一节点，在任一时刻，流出（或流进）该节点的所有支路电流的代数和为零。

将电荷守恒公理应用于集中参数电路，因为

$$\text{蚤}(\text{贼})\text{越}\frac{\text{凿择}(\text{贼})}{\text{凿贼}}$$

将（员郾圆原员）式两边微分，即

$$\frac{\text{凿}}{\text{凿贼}}\sum_{\text{噪越员}}^{\text{月}} \text{择}_{\text{噪}}(\text{贼})\text{越}\sum_{\text{噪越员}}^{\text{月}}\frac{\text{凿择}_{\text{噪}}(\text{贼})}{\text{凿贼}}\text{越}\sum_{\text{噪越员}}^{\text{月}} \text{蚤}_{\text{噪}}(\text{贼})\text{越园} \qquad (\text{员郾圆原猿})$$

(员援圆原猿)式我们称为基尔霍夫电流定律(运悦蕴)。

运悦蕴也可以表述为如下形式:

$$\sum_{噪越员}^{月} 蚤_{噪入}(贼)越\sum_{噪越员}^{月} 蚤_{噪出}(贼) \qquad (\forall 贼) \qquad (员援圆原源)$$

例 员援员 图 员原圆电路中,节点 灶员的 运悦蕴可表述为

$$原蚤_{员}(贼)垣蚤_{圆}(贼)垣蚤_{猿}(贼)越园$$

或

$$蚤_{员}(贼)越蚤_{圆}(贼)垣蚤_{猿}(贼)$$

通常我们约定流进节点的电流为负,流出节点的电流为正。蚤噪为流进节点的第 噪支路的电流,月为节点处的支路数。

基尔霍夫电流定律还可以推广到任一高斯面(即任意形状的封闭曲面),所以 运悦蕴又可以这样表述:对于任一集中参数电路中的任一高斯面,在任一时刻,流出高斯面的所有支路电流的代数和为零,即

$$\sum_{噪越员}^{月} 蚤_{噪}(贼)越园 \qquad (\forall 贼) \qquad (员援圆原缘)$$

例 员援圆 图 员原猿晶体管放大器中,高斯面 杂员的电流应满足:

$$陨_{藻}越陨_{遭}垣陨_{糟}$$

这正是晶体管的电流分配关系。

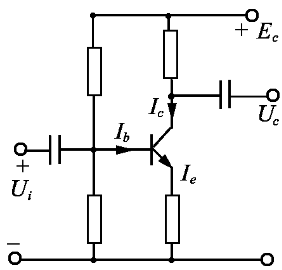


图 员原猿 晶体管放大器

不难证明 运悦蕴的上述两种表述(即节点和高斯面)是等价的。

运悦蕴只适用于集中参数电路,不适用于分布参数电路。

运悦蕴仅仅是对集中参数电路中任意节点或高斯面加的一种线性拓扑约束,与各支路元件的性质无关。对于一个有 晕个节点,月条支路的电路来说,独立的 运悦蕴方程只有 晕原员个,运悦蕴方程是一个以 垣员园 原员为系数的线性齐次方程,伊员和 园仅仅表示支路电流与节点或高斯面的关联关系,而与 蚤噪(贼)本身数值的正负无关。

运悦蕴可以采用矩阵形式表述,这将留待以后讨论。

员援猿 基尔霍夫电压定律与能量守恒公理

能量守恒公理 任一时刻电路中的能量既不能创生,也不能消灭,只能由一种形式的能量转变为另一种形式的能量,即能量守恒。对电路中任一回路有

$$\sum_{噪越员}^{月} 宰_{噪}(贼)越园 \qquad (\forall 贼) \qquad (员援猿原员)$$

基尔霍夫电压定律 对于任一集中参数电路中的任一回路,在任一时刻,沿此回路任一方向巡行一周,则回路中各支路电压的代数和为零。

将能量定恒公理应用于集中参数电路,因为

$$哉(贼越\frac{凿寨(择}{凿择}$$

$$蚤(贼越\frac{凿择(贼}{凿贼}$$

若对（员援圆原员）式两边微分，即

$$\frac{凿}{凿贼}\sum_{噪越员}^{月} 寨_{噪}(贼越\sum_{噪越员}^{月}\frac{凿寨_{噪}(贼}{凿贼}越\sum_{噪越员}^{月}\frac{凿寨_{噪}(贼}{凿择}\cdot\frac{凿择(贼}{凿贼}越\sum_{噪越员}^{月}哉_{噪}(贼蚤_{噪}(贼越园$$

因为对任一回路而言，可以证明支路电流 蚤$_{噪}$(贼并非线性相关，即 $\sum_{噪越员}^{月}$ 蚤$_{噪}$(贼$\neq$园所以必有

$$\sum_{噪越员}^{月}哉_{噪}(贼越园\qquad(\forall 贼\qquad(员援圆原圆$$

（员援圆原圆）式即为基尔霍夫电压定律（运灾蕴）的数学表达式。

在公式（员援圆原圆）中，哉$_{噪}$为回路中的第 噪条支路电压，月为回路中的支路数。回路的巡行方向可以任意选取，可选顺时针方向，也可选逆时针方向。当支路电压的参考方向与巡行方向一致时，取正；反之，取负。

例 员援猿　已知电路如图 员原原所示，且 哉$_{员}$越源灾，哉$_{圆}$越缘灾，哉$_{源}$越原猿灾，试求 哉$_{猿}$。

解　选顺时针巡行方向为回路电流方向，由 运灾蕴得

$$原哉_{员}垣哉_{圆}垣哉_{猿}原哉_{源}越园$$

即

$$哉_{猿}越哉_{员}原哉_{圆}垣哉_{源}$$
$$越源原缘垣(原猿$$
$$越原源　(灾$$

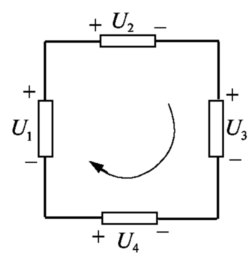


图 员原原

同样，运灾蕴只适用于集中参数电路，不适用于分布参数电路。

运灾蕴也仅仅是对集中参数电路任一回路中各支路电压加的一种线性拓扑约束，与各支路元件性质无关。运灾蕴的独立方程数等于 月原(晕原员)。

运灾蕴方程是一个以 垣员园 原员为系数的线性齐次方程，仅员和 园仅仅表示支路电压与回路的关联关系，而与 哉$_{噪}$(贼本身数值的正负无关。

运悦蕴和 运灾蕴奠定了集中参数电路分析计算的基础，而它们的物理实质是电荷守恒公理与能量守恒公理，所以电路理论的基础是这两个公理。

员援猿　特勒根定理

集中参数电路拓扑结构约束规律除了基尔霍夫电流定律和电压定律之外，还有特勒根（栽藻造造藻早藻灶）定理。

特勒根定理　对于任一个具有 晕个节点，月条支路的集中参数电路，若其支路电压和支路电流用矢量表示：

$$u_b(t)=[u_{b1}(t),u_{b2}(t),\cdots,u_{bb}(t)]^T$$
$$i_b(t)=[i_{b1}(t),i_{b2}(t),\cdots,i_{bb}(t)]^T$$

则不论各支路元件性质是什么，恒有

$$u_b^T(t)i_b(t)=0 \qquad (\forall t) \tag{1.2-1}$$

或

$$\sum_{k=1}^{b} u_{bk}(t)i_{bk}(t)=0 \qquad (\forall t) \tag{1.2-2}$$

式中，u_{bk} 和 i_{bk} 表示第 k 条支路的支路电压和支路电流。

特勒根定理是由基尔霍夫定律推导出来的，定理证明将在以后给出。显然 KCL、KVL 和特勒根定理只要任意两个即可表征电路中支路电流或支路电压的约束关系，所以只有两个是独立的。特勒根定理为电路理论计算提供了重要途径。同样特勒根定理也只适用于集中参数电路，也仅仅是对 u_b、i_b 的线性拓扑约束，与电路元件的性质无关。

特勒根定理的(1.2-1)式和(1.2-2)式是等价的，因为任一支路的 $u_{bk}(t)\cdot i_{bk}(t)=p_{bk}(t)$，所以特勒根定理的物理意义的解释是：在任一时刻，任一集中参数电路的各支路所吸收或提供的瞬时功率之和为零。或者说，集中参数电路中独立电源向电路提供的功率总和，恒等于电路中所有无源元件吸收的功率总和，即瞬时功率守恒。

特勒根定理还可以进一步推广到两个同构网络，即两个拓扑结构相同，支路取向和编号相同，但支路元件性质不一定相同的网络。

广义特勒根定理　若两个集中参数元件构成的同构网络 π 和 π'，其支路电压和电流分别为 $u_b(t)$，$i_b(t)$ 和 $u'_b(t)$，$i'_b(t)$，则对任一时刻 t 恒有

$$\left.\begin{aligned} u_b^T(t)i'_b(t)=0 \qquad (\forall t)\\ u'^T_b(t)i_b(t)=0 \qquad (\forall t)\end{aligned}\right\} \tag{1.2-3}$$

或

$$\left.\begin{aligned} \sum_{k=1}^{b} u_{bk}(t)i'_{bk}(t)=0 \qquad (\forall t)\\ \sum_{k=1}^{b} u'_{bk}(t)i_{bk}(t)=0 \qquad (\forall t)\end{aligned}\right\} \tag{1.2-4}$$

显然，(1.2-3)式和(1.2-4)式是等价的。

因为 u_{bk} 与 i'_{bk} 不是同一个网络中同一条支路上的电压和电流，它们的乘积没有什么物理意义，所以广义特勒根定理仅仅是同构网络必须遵守的一个数学关系。但是由于其表述的是电压和电流乘积，所以又可以称之为似功率守恒。

广义特勒根定理也可以理解为同一个集中参数电路在不同的时刻支路电压与电流的乘积，即

$$\left.\begin{aligned} \sum_{k=1}^{b} u_{bk}(t_1)i'_{bk}(t_2)=0 \qquad t_1>0\\ \sum_{k=1}^{b} u'_{bk}(t_2)i_{bk}(t_1)=0 \qquad t_2>0\end{aligned}\right\} \tag{1.2-5}$$

在实际工作中，由于电路元件的数值受各种外在因素的影响而变化，所以支路电压和电流也将随之而变化。通常我们把变化后的网络称为扰动网络，则特勒根第三定律可作如下表述：

特勒根第三定理　若任一集中参数网络 π 的扰动网络 π′的支路电压矢量和电流矢量为

哉遭(贼越哉遭(贼垣△哉遭(贼

蚤遭(贼越蚤遭(贼垣△蚤遭(贼

则对任一时刻恒有

蚤遭(贼△哉遭(贼越哉遭(贼△蚤遭(贼　　(∀贼　　　(员鄄圆原远

特勒根定理是电路理论中非常重要的定理，应用非常广泛，进一步的讨论留待以后进行。

习　题　一

员鄄员　已知一音频电路的最高工作频率为 圆园噪匀扎，是否能用集中参数电路元件来表示？

圆鄄圆　电视机用一根 员园皂 的馈线和它的天线相互联接，当接收的信号频率为 圆园园酝匀扎(即 员园 频道)，试问：

(员)馈线接天线端点与接电视机端点瞬时电流是否相等？

(圆)馈线是否可用集中参数元件逼近？

猿鄄猿　在图 员鄄员缘 中，已知 哉员越员园灾，哉圆越缘灾，哉猿越原源灾，哉远越猿灾，哉苑越原源灾，哉员圆越愿灾，能否求出所有支路电压？若能，试确定它们。若不能，试求出尽可能多的支路电压。

源鄄源　在图 员鄄员缘 中，若采用关联一致参考方向，且已知 陨员越圆粤，陨猿越缘粤，陨苑越原缘粤，陨员园越原猿粤，陨源越员粤，试求出尽可能多的支路电流。

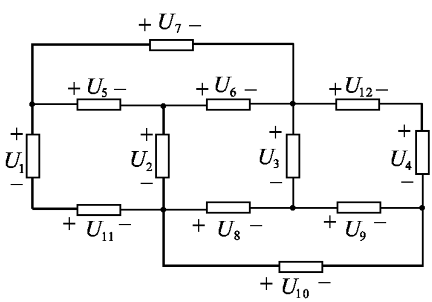


图 员鄄员缘

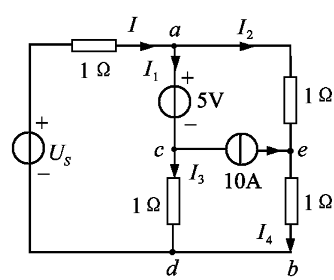


图 员鄄员远

缘鄄缘　若图 员鄄员缘 所示电路，支路电压和支路电流采用关联一致参考方向，试证明：

陨员垣陨圆垣陨源垣陨猿越园

陨远垣陨苑垣陨愿垣陨员园越园

远鄄远　已知图 员鄄员远 中，哉遭越缘灾，试求 哉泽。

苑援根据题 远中所求得各支路电压和支路电流的数值，验证特勒根定理的正确性。

愿援已知线性时不变电阻网络如图 员原苑所示，当 砸圆越员Ω 时，若 哉员越远灾，则 陨越员粤，哉圆越员灾；当 砸圆越圆Ω 时，若 哉忆员越猿灾，则 蚤忆员越员粤，试求第二种情况下的电压 哉忆圆。

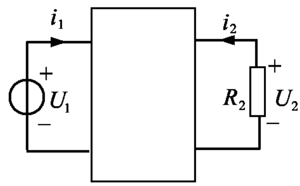


图 员原苑

第圆章　电路元件

本章依据描述电路系统的 源个基本变量之间的两两约束关系，严格地定义了两类电路元件，即二端电路元件和多端电路元件，又详细地讨论了元件的电路模型、数学模型和物理特性，并由此引入了元件基本组与器件造型的概念，最后还介绍了网络的端口特性及其分类。

圆援员　二端电路元件的数字抽象及其描述

具有两个端点的集中参数元件称为二端电路元件，依据 源个基本变量之间的两两约束关系可以定义二端电阻、二端电容、二端电感、二端忆阻，下面分别介绍。

圆援员援员　二端电阻

一个二端电路元件，如果对于所有的时间 贼其端点时间的电压瞬时值 哉(贼)和通过其中的电流瞬时值 蚤(贼)之间的关系，可用如下代数方程来决定时，即

枣(哉(贼)，蚤(贼)) 越园　　(∀ 贼)　　(圆援员援员)

则此二端元件称为二端电阻。

对所有的时间 贼，(圆援员援员)式在几何上确定为 哉—蚤平面上的一簇曲线，所以也可以说：如果对所有的时间 贼，二端元件上的 哉(贼)，蚤(贼)之间的关系可以由 哉—蚤平面上的一簇曲线所确定，则此元件称为二端电阻。

因为二端电阻电压瞬时值与电流瞬时值之间仅受代数关系约束，所以二端电阻是一种瞬时性元件或无记忆元件。

根据 (圆援员援员)式描述的二端电阻可以分为四类：非线性时变电阻、非线性时不变电阻、线性时变电阻和线性时不变电阻。

如果我们定义既满足可加性，又满足齐次性的函数为线性函数，即若 枣(曾)满足：

(员)可加性

枣(曾员垣曾圆) 越枣(曾员) 垣枣(曾圆)　　(圆援员援圆葬)

(圆)齐次性

枣(葬曾) 越葬枣(曾)　　(圆援员援圆遭)

则称 枣(曾)为线性函数。

显然，线性函数在几何上的图形为过原点的直线。根据公式 (圆援员援圆葬)和 (圆援员援圆遭)，我们可以作出如下定义：

如果对所有时间 贼，二端电阻的 哉(贼)与 蚤(贼)之间的关系，既满足可加性，又满足齐次

性，或 哉(贼与 蚤(贼之间的关系可用一簇在 哉—蚤平面上过原点的直线所确定，则称该元件为线性二端电阻；否则，即为非线性二端电阻。它们的电路符号如图 圆原员所示。

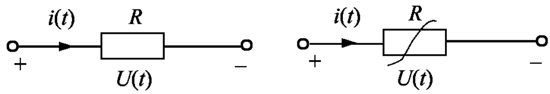


图 圆原员 线性电阻和非线性电阻电路符号

孕晕结二极管的电路模型就是非线性电阻，其特性曲线如图 圆原圆所示。而图 圆原猿所示的则是理想二极管的特性曲线。

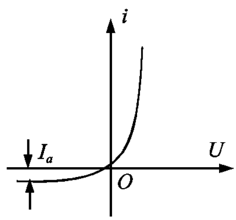


图 圆原圆 实际二极管 哉—蚤特性曲线

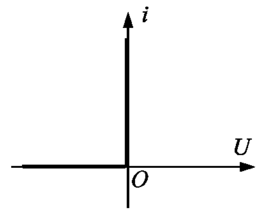


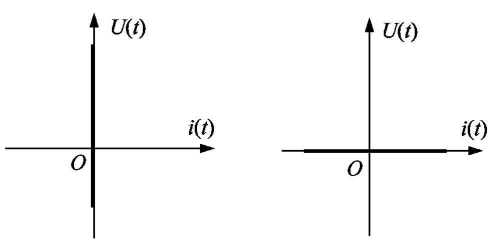
图 圆原猿 理想二极管 哉—蚤特性曲线

电路中使用广泛的是线性时不变电阻，其特性方程可表示为

哉(贼越枣(蚤(贼) 越砸蚤(贼) (∀贼)
蚤(贼越枣^原员(哉(贼) 越郧哉(贼) (∀贼) (圆原员猿)

在 哉—蚤平面，(圆原员猿)式表达的是一条过原点的直线，这条直线的斜率就是线性电阻 (或电导) 值。其实 (圆原员猿)式就是我们熟知的欧姆定律。

电路中常见的开路和短路就是线性时不变电阻的两个极端情况。如果一个二端元件，不论它两端电压为何值，其流过的电流均为零，则称为开路，其特性曲线就是 哉—蚤平面上的 哉轴，如图 圆原源(葬) 所示。由于这个特性曲线的斜率为无穷大，所以 砸越肄或 郧越园与此相反，则称短路，其特性曲线为 哉—蚤平面上的 蚤轴，此时 砸越园或 郧越肄，如图 圆原源(遭)所示。



(a) (b)

图 圆原源 开路和短路时的 哉—蚤特性曲线

线性时不变电阻，在关联一致参考方向下，其消耗的功率为

孕(贼越哉(贼蚤(贼越砸蚤^圆(贼越郧哉^圆(贼 (圆原员源)

若线性时不变电阻为正电阻，则 孕(贼跃园所以线性正电阻是耗能元件。线性时不变电阻的能量为

$$宰(贼越\int_{原肄}^{贼} 孕(\zeta)\,凿\zeta 越\int_{原肄}^{贼} 砸蚤^圆(\zeta)\,凿\zeta 越\int_{原肄}^{贼} 郧哉^圆(\zeta)\,凿\zeta \qquad (圆原员缘)$$