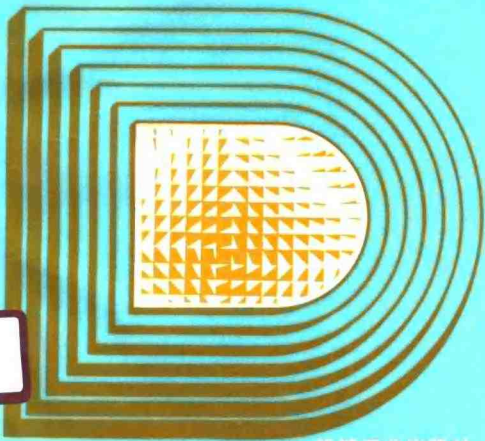


高等学校适用教材

电路理论

(基础部分)

周欣荣 主编



机械工业出版社

本书根据1987年国家教委批准试行的《电路课程教学基本要求》，由哈尔滨电工学院等九所高等院校联合编写的，并经九所院校的《电路理论》教材编审委员会审查通过。

本书共七章及一个附录，即电阻的基本概念和基本定律、电阻电路分析、正弦稳态分析、非正弦周期电流电路分析、电路的瞬态分析（一）、电路的瞬态分析（二）、离散系统Z域分析、链路和核心线网电路（附录）。各章后附有练习题。

本书可作为工科院校四年制电类各专业“电路”课程的教材，也可作为业大、电大、函大、职大等相关专业教材及工程技术人员、校外人员自学的参考书。

电 路 理 论

（基础部分）

周欣荣 主编

责任编辑：刘思源 版式设计：张世琴

封面设计：姚毅 责任校对：熊天空

责任印制：王因光

机械工业出版社出版（北京东黄城根北街25号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·机械工业出版社经销

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $12^{3/4}$ · 字数 333 千字
1989年8月北京第一版·1989年8月北京第一次印刷
印数 0,001—9,050 · 定价：6.60元

ISBN 7-111-01690-4/TM · 212

九所高等院校《电路理论》
教材编审委员会

主任委员	史乃	教授	(哈尔滨电工学院)
副主任委员	朱国玺	教授	(东北林业大学)
	王尔智	副教授	(沈阳工业大学)
	周欣荣	副教授	(哈尔滨电工学院)
委员	岳云龙	副教授	(哈尔滨科学技术大学)
	温书田	副教授	(吉林工业大学)
	潘孟强	副教授	(沈阳工业大学)

出版说明

本套教材是根据国家教委于1987年批准试行的《电路课程教学基本要求》，认真总结了教学改革的经验，并参考了国内外相近教材编写的。

这套教材包括《电路理论（基础部分）》、《电路理论（现代部分）》、《电路理论例题习题集》、《电路理论学习指导》、《电路理论实验指导》、《电路的计算机辅助分析程序》和《电类专业英语阅读》，共七册。全套教材是互相联系的有机的统一体。

本套教材体现了电路课程既是电工学科的入门课，又是各电类专业的技术基础课的性质；适应了实验、计算机使用和外语学习不断线的需要；贯彻了理论联系实际的原则；着眼于培养学生的自学能力，以及分析计算能力、实验操作能力、使用计算机能力和运用外语的能力。

本套教材在培养学生基本理论、基本知识、基本技能方面，注意到体现科学性、启发性、先进性和教学的适用性。力图通过理论学习、实验、习题、外文的阅读、计算机辅助分析等教学环节，使他们初步掌握研究和学习电工理论的方法和手段，增强学生的能力和开拓创新的精神。

参加本套教材编审工作的单位有哈尔滨电工学院、沈阳工业大学、吉林工业大学、哈尔滨科学技术大学、东北林业大学、无锡轻工业学院、大庆石油学院、太原重型机械学院和上海机械学院。哈尔滨电工学院为主编单位。

最后谨向帮助与支持编写、出版本套教材的有关单位和同志，致以诚挚的谢意。

九所高等院校《电路理论》教材编审委员会

1988.7

序 言

本书由哈尔滨电工学院等九所高等院校联合编写。侧重于电路理论的“经典”内容，讲授电阻电路和动态电路的基本理论、基本概念和基本分析方法。书中以线性电路分析为主，将非线性电路分析的内容分散到有关章节中，使线性、非线性电路分析融为一体；将基本分析方法、基本定律、定理和原理比较集中放在电阻电路分析中阐述，意在加强电阻电路分析，开阔读者思路，培养学生分析和解决问题的能力；将电路模型理论分散到相应章节介绍，使之与相关课程和本书内容衔接较紧，学以致用；设有“离散系统Z域分析”一章，使读者对离散系统分析有初步了解，以“*”标出，供有关专业选用；考虑到有关专业的后续课程还附有“磁路和铁心线圈电路”一章，也可供读者自学。为突出基本内容，力求削枝强干，简明扼要。

本书由周欣荣同志主编，参加编写工作的有樊德新、徐月季、怀新江、林安、李章燮、杨育青、冯庆宽。由岳云龙同志主审。该书于1988年5月完稿，经编审委员会讨论后于同年7月再次校定。在编辑过程中，张则惠同志审校了全书，为书稿增色付出了辛勤劳动。

本书在成稿过程中，除编审者而外还渗透了各兄弟院校电工基础教研室同志们的劳动。在此，向曾经支持、指导本书编写和出版工作的同志们谨表谢忱。

限于编者水平，缺点和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者
1988.7

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
§ 1-1 电路的组成	1
§ 1-2 电流和电压的参考方向	3
§ 1-3 能量与功率	5
§ 1-4 基尔霍夫定律	7
第二章 电阻电路分析	13
§ 2-1 电阻器件模型	13
§ 2-2 有源器件模型	17
§ 2-3 电阻电路的联接	25
§ 2-4 节点电压分析法	33
§ 2-5 回路电流分析法	39
§ 2-6 表格分析法	44
§ 2-7 叠加定理和替代定理	51
§ 2-8 戴维南定理与诺顿定理	57
§ 2-9 对偶原理	64
§ 2-10 互易定理	69
§ 2-11 特勒根定理	75
第三章 正弦稳态分析	82
§ 3-1 储能元件模型	82
§ 3-2 正弦交流电的相量表示	95
§ 3-3 复阻抗和复导纳	104
§ 3-4 相量分析法	114
§ 3-5 正弦稳态电路的功率	122
§ 3-6 磁耦合电路分析	134
§ 3-7 空心变压器和理想变压器	143
§ 3-8 谐振电路	152
§ 3-9 RC移相电路频率特性	165
§ 3-10 对称三相电路	171

§ 3-11 不对称三相电路的概念	183
第四章 非正弦周期电流电路分析	190
§ 4-1 周期函数分解为傅里叶级数	190
§ 4-2 非正弦周期量的有效值、平均值及平均功率	208
§ 4-3 非正弦周期电流电路的计算	212
§ 4-4 非线性电路的小信号分析	218
§ 4-5 折线法、整流与滤波的概念	224
第五章 电路瞬态分析 (一)	232
§ 5-1 动态电路的换路	232
§ 5-2 一阶电路的零输入响应	236
§ 5-3 一阶电路零状态响应	245
§ 5-4 一阶电路的全响应	253
§ 5-5 正弦激励下一阶电路的响应	256
§ 5-6 三要素分析法	260
* § 5-7 一阶电路的冲激响应	266
* § 5-8 二阶电路的时域分析	271
* § 5-9 非线性动态电路的数值解	288
* § 5-10 非线性电路的分段线性化方法	294
* § 5-11 强迫跃变	297
第六章 电路瞬态分析 (二)	302
§ 6-1 拉普拉斯变换	302
§ 6-2 拉氏变换的基本性质	305
§ 6-3 电路基本定律的复频域形式	309
§ 6-4 拉氏反变换	313
§ 6-5 用拉氏变换分析和计算线性电路的动态过程	319
§ 6-6 网络函数	325
§ 6-7 卷积积分和卷积定理	334
第七章 离散系统 Z 域分析	340
§ 7-1 离散系统概述	340
§ 7-2 Z 变换	345
§ 7-3 离散系统的描述	355
§ 7-4 离散系统的 Z 域分析	353

§ 7-5 系统的传输函数和稳定性分析.....	363
附录 磁路和铁心线圈电路	368
§ A-1 磁路与磁路	368
§ A-2 铁磁性物质的磁性能	371
§ A-3 磁路定律	376
§ A-4 恒定磁通无分支磁路的计算	378
§ A-5 对称分支磁路的计算	383
§ A-6 正弦电压作用下铁心线圈中的磁通	383
§ A-7 电流波形	385
§ A-8 铁心损耗	389
§ A-9 正弦磁路的计算	391
§ A-10 铁心线圈电路.....	394
主要参考文献	396

第一章 电路的基本概念和基本定律

内 容 提 要

本章介绍了作为电路理论基本概念的模式化概念和参考方向；一般性地讨论了电路中的能量和功率；最后研究了由于元件的联接给支路电压和支路电流带来的约束，即基尔霍夫定律。

§ 1-1 电 路 的 组 成

1.1.1 电路和电路模型

实际电路是由若干电气设备和器件按照一定方式组合起来构成的电流通路。在电路中随着电流的流动，总是进行着电能与其它形式的能量互相转换或信号处理等过程。例如电力系统，经发电机组把热能、水能、原子能或风能等变成电能，通过变压器、输电线等将电能输送给用户，再由那里的电动机、电热器和电灯等将电能转变成机械能、热能和光能。其中发电机是向电路提供电能的设备，我们把这类电气设备称为电源，而把电动机、电热器和电灯等用电设备称为负载。又如收音机电路，通过天线线圈接收无线电信号，经过调谐、检波和放大电路，将输入信号加工、放大成所要求的音响信号，最后经扬声器将电能转变成声能。我们称输入的电信号为激励，输出的电信号为响应。在其它场合，如自动控制、计算机和通讯系统存在着形式繁多、功能各异的种种电路。

实际的电气设备和器件在工作过程中，所涉及的物理过程相当广泛。上述诸例中就包含了电、磁、热、光、声等方面的问题。电路理论，所研究的是其中的电磁过程，而且是由电路里各部分的电压、电流、电荷和磁通所表征的电磁过程。电压、电流、电荷和磁通是本门课的基本物理量。此外，功率和能量也很重要。

为了便于用数学的方法分析和设计电路，常常把实际电路及其部件模型化，即在一定条件下能足够准确地反映实际电路及其部件的电磁性能的抽象模型。有些实际部件的模型只需用一种反映单一电磁性质的抽象化、理想化的电路元件来构成，有些实际部件的模型则应由几种电路元件来构成。一个实际电路[⊖]的电路模型在某种条件下，就可以通过电路元件以一定的联接方式来构成。有时将电路模型简称为电路。

本课程的主要任务就是根据已建立起来的电路模型，研究其中电压、电流以及由它们所形成的电功率之间的关系（必要时还将涉及电荷与磁通），为分析和设计实际电路准备理论基础和训练基本技能。

1.1.2 电路的分类

按照电路的特性、功能不同，电路有多种类型。如我们常见的电路，它们的电路元件都是集中元件，其特性可由它们端点上的电压和电流之间关系（有时还须涉及电荷、磁通）来确切地表达。这种关系通常可用参数来描述。这类电路称为集总参数电路。本书主要讲集总参数电路。注意，用集总参数电路来近似实际电路是有条件的，这就是实际电路的几何尺寸要远小于电路工作时的电磁波的波长。若不能满足这个条件，就需要用所谓分布参数电路来近似实际电路。进行这类电路分析时，需要研究沿电路的电压和电流分布规律。其参数是分布在电路中的。我们单列了一章予以介绍。又如传统的电路及模拟的基本单元是线性的连续的，而随着计算机的发展出现的数字系统则是非线性的和离散的。此外，电路参数按其是否随时间而变化可以分为定常和时变两类电路。

本课程主要内容是电路分析[⊖]。它探讨电路的基本定律和定理，并讨论电路的各种计算方法。电路设计问题是作为分析的一

⊖ 本书不涉及超导电路。

⊖ 网络分析、网络综合和故障诊断是网络理论三大分支，本书不涉及故障诊断。

个应用，在“网络综合基础”一章中介绍。

§ 1-2 电流和电压的参考方向

电流是电荷的定向运动。我们规定正电荷净流量的方向为电流的方向。电流在一段导体或一个电路元件中流动的实际方向，只有两种可能。见图1-1，或由A端经元件流向B端，或者相反。

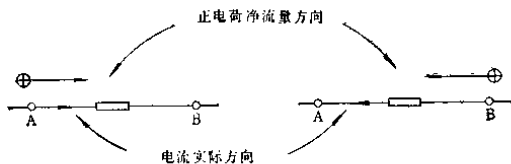


图1-1 电流的实际方向

在电路分析中，电路中某些分支的电流实际方向很难立即判断出来，有时还会遇到电路中电流的实际方向是不断改变的。如图1-2 a 所示的电路，其中BC分支的电流实际方向很难直观判断出来。又如图1-2 b 所示的电路，若电源电压是按正弦规律变化的，则电路元件中的电流大小及方向一般也是变化的。为了分析计算的需要，引入“参考方向”的概念。

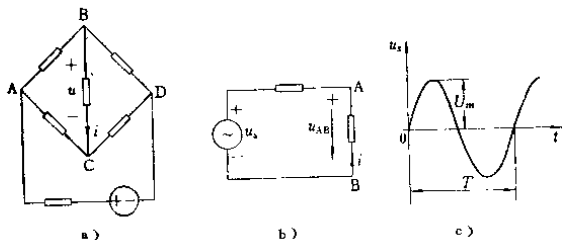


图1-2 电流和电压的参考方向

a) 关联参考方向 (BC段) b) 非关联参考方向 (AB段) c) 图 b 电路中电压源正弦电压波形

1.2.1 电流的参考方向

在图1-2 a 所示电路的 BC 分支上, 先选定某一个方向, 比如选定电流 i 由 B 端流向 C 端, 作为电流的方向, 这个方向称为电流的参考方向[⊖]。这时把电流看成一个代数量。这样, 按照所选定的电流参考方向, 求解电路, 可得到电流 i 的值。若 $i > 0$, 说明电流的实际方向与参考方向一致; 若 $i < 0$, 则说明电流的实际方向与参考方向相反。因此, 根据参考方向得到的电流值的正或负, 可以判断相应电流的实际方向。

电流的参考方向是任意指定的, 一般用箭头标于电路中。有时也用双下标表示, 如 i_{BC} , 其参考方向由 B 指向 C。

1.2.2 电压的参考方向

和电流参考方向一样, 一段电路中电压的参考方向也是任意指定的, 一般用正 (+)、负 (-) 极性表示, 由 (+) 极指向 (-) 极的方向就是所选定的电压参考方向。有时也用箭头或双下标表示, 见图1-2 b。这时把电压也看成一个代数量。这样, 按选定的电压参考方向求解电路, 得到电压值 u 。若 $u > 0$, 则电压的实际方向与参考方向一致, 反之为不一致。所以, 根据所选电压参考方向得到的电压值的正或负, 可以判断电压实际方向。

在同一段电路中, 电流和电压的参考方向是彼此独立且任意选定的。两者可以选为一致, 也可以不一致, 分别见图1-2 a、b。若电流和电压参考方向一致, 即电流从电压的 (+) 极, 经该段电路流向电压的 (-) 极, 则称为关联参考方向。否则为非关联参考方向。今后无特殊说明, 电路图中所标定的电压、电流方向均指参考方向。

参考方向是一个很重要的概念。有了参考方向以后, 便可以写出电流、电压的函数表达式 (为什么? 读者自行考虑)。如图1-2 b 中电源电压参考方向选定以后, 便可写成

$$u_s = U_m \sin \omega t$$

[⊖] 有的书上也称正方向。

对应的波形图如图1-2c所示。

在对任何电路进行分析时，都必须先选定电压、电流的参考方向。选为关联参考方向时，在电路图中可以只标定其中一个（电流或电压）的参考方向；选为非关联参考方向时，两者（电压和电流）参考方向都要在图中标出。

思考题：根据图1-2c波形曲线，试判断图1-2b中 u_s 的实际方向。

练习题

1-1 图1-3所示电路中所标电压、电流的方向均为参考方向，试确定它们的实际方向。

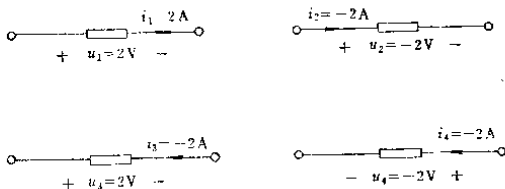


图1-3 练习题1-1

§ 1-3 能量与功率

功率是电路理论的基本物理量之一。能量是功率对时间的积分。本节对能量与功率进行一般性的讨论。

1.3.1 能量

正电荷从电路元件的电压（+）极，经该元件移到电压（-）极，电场力作功，元件吸收能量。反之，元件释放能量。



图1-4 元件吸收能量

图1-4所示电路元件，选定电压、电流为关联参考方向，则在 dt 时间内通过元件的净正电荷量为

$$dq = i dt \quad (1-1)$$

根据电压的定义（在数值上，A、B两点间的电压等于电场

力移动单位正电荷从A点到达B点时所做的功), 不难求得通过元件的净正电荷为 dq 时, 元件吸收的能量为

$$dw = u dq = ui dt \quad (1-2)$$

从 t_0 到 t 的时间内, 元件吸收的能量为

$$W = \int_{t_0}^t dw = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-3)$$

式中 u 、 i 一般都是时间的函数, 且为代数量, 故能量也是时间的函数, 且为代数量。当 $W > 0$, 则元件的确吸收能量; $W < 0$, 则元件实际释放能量。

1.3.2 功率

能量对时间的变化率就是功率。在电压电流关联参考方向下, 由式 (1-2) 求得元件吸收的功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1-4)$$

功率一般也是时间的函数, 且为代数量。当 $p > 0$, 则元件的确吸收功率; 当 $p < 0$, 则元件实际发出功率。

在电压、电流为非关联参考方向时, 我们往往明确提出要计算元件发出的功率, 其功率表达式仍和式 (1-4) 相同。不过此时, 功率值的正和负, 与前述计算元件吸收功率时的含义恰恰相反。

在国际单位制 (SI) 中, 电流单位是安[培] (A); 电荷的单位是库[仑] (C); 电压的单位是伏[特] (V); 能量的单位是焦[耳] (J); 而功率的单位是瓦[特] (W)。工程上往往要用到比这些单位要大或小的单位, 这是通过在国际单位前面加词头的办法解决的。如 5 吉瓦 (GW) = 5×10^9 瓦 (W); 4 千伏 (kV) = 4×10^3 伏 (V); 6 毫安 (mA) = 6×10^{-3} 安 (A); 2 微安 (μ A) = 2×10^{-6} 安 (A) 等等。

例题1-1 图1-4所示的一段电路中, 已知 $i = 5e^{-5t}$ (mA), $u = 10 \sin \omega t$ (V), 试计算电路吸收的功率。

⊙ [] 内的字, 是在不致混淆的情况下, 可以省略的字。

〔解〕 由图可知，电压、电流为关联参考方向，故电路吸收功率为

$$p = ui = 10\sin\omega t \times 5e^{-3t} = 50e^{-3t}\sin\omega t \quad (\text{mW})$$

练习题

1-2 在图1-5所示的示电路中，元件A吸收功率为30W，求电流 I_A ；元件B吸收功率为20W，求端电压 U_B ；元件C发出功率为15W，求电流 I_C ；元件D发出功率为10W，求电流 I_D 。

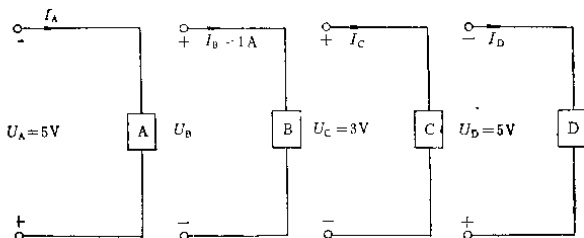


图1-5 练习1-2图

1-3 在图1-6所示电路中，若吸收功率为20W时，电流为2A，求电压 U ；若电路发出功率为20W时，电流为2A，重求电压 U ；求在1分钟（min）内吸收的能量。

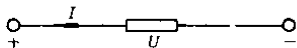


图1-6 练习1-3图

§ 1-4 基尔霍夫定律

对于集总参数电路，每一段电路上的电压和电流，必然受到两类约束。一类是元件特性对本元件电压、电流的约束关系，如线性电阻上的电压与电流之间满足欧姆定律，在关联参考方向下，有 $i = u/R$ 。另一类是电路模型的拓扑结构对支路电压和支路电流的约束关系，基尔霍夫定律概括了这种约束关系。

在研究基尔霍夫定律之前，先介绍几个电路术语。

(1) 支路：通过同一电流的每个分支称为支路[⊖]。图 1-7 所示电路中 ab 、 bd 和 aec 等都是支路。

(2) 节点：三条和三条以上支路的联接点称为节点。图 1-7 所示电路中， a 、 b 、 c 、 d 均为节点。

(3) 回路：由若干支路构成的，其中每个节点与且仅与两条支路联接的闭合路径称为回路。图 1-7 所示的电路中 $abda$ 、 $adcea$ 、 $abcea$ 等就是回路。但 $abceadc$ 不是回路，因为节点 a 、 c 联接了三条支路。

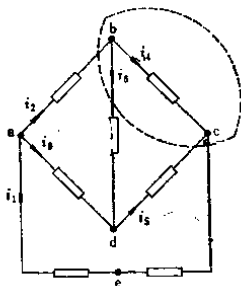


图 1-7 电路术语和 KCL 示例

(4) 网孔：在平面电路中（平面电路中的支路互不交叉、重叠），没有其它支路跨接的回路。图 1-7 所示电路中共有 $abda$ 、 $bcd b$ 、 $adcea$ 三个网孔。

1.4.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)[⊕]

基尔霍夫电流定律反应集总参数电路中，和任一节点相连接的全部支路电流间相互约束的关系，即：

在集总参数电路中，任一瞬间，对任一节点，流入此节点的支路电流之和等于流出该节点的支路电流之和。

例如图 1-7 所示的电路根据 KCL，对节点 a 、 b 分别列方程如下：

$$\text{节点 } a \quad i_1 = i_2 + i_3$$

$$\text{节点 } d \quad i_2 + i_5 = i_4$$

经移项处理得

$$\text{节点 } a \quad i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

⊖ 在网络拓扑中，一般以一个二端元件作为一个支路，其端点叫做节点。

⊕ KCL 为 Kirchhoff's Current Law 的缩写，今后常用 KCL 代表基尔霍夫电流定律。

$$\text{节点 d } i_3 - i_5 + i_6 = 0$$

由此可见，KCL可以换一种说法，即：

在集中参数电路中，任一瞬间，对任一节点，流入(或流出)此节点的支路电流代数和恒等于零。数学表达式为

$$\sum i = 0 \quad (1-5)$$

式(1-5)中，若规定流入节点的支路电流前面取正号，则流出节点的支路电流前面取负号。值得指出的是，KCL中的电流流向本来是指它们的实际方向，但由于列方程时采用了参考方向，所以式(1-5)中的电流流向是指参考方向。还必须注意的是，式(1-5)中电流前面的正、负号是由电流流入、流出节点决定的，与电流本身的正、负号无关。如已知图1-7中 $i_3 = 4\text{A}$ ， $i_6 = -3\text{A}$ ，则由KCL得 $i_5 = i_3 + i_6 = 4 + (-3) = 1\text{A}$ 。电流值的正或负是由参考方向与实际方向的关系决定的。式(1-5)称基尔霍夫电流方程或节点电流方程。

通常KCL用于普通节点，亦可用于任何一个包围若干节点和支路的闭合面。如图1-7中的虚线表示的闭合面，任一瞬间，流入此闭合面的电流代数和恒等于零，即

$$-i_1 + i_2 + i_5 - i_6 = 0$$

这种假想的闭合面包围着的节点和支路的集合，通常称为电路的广义节点。

KCL指出流入节点的支路电流等于流出节点的支路电流，实质是电流连续性的体现。只与元件的联接有关，与元件本身的性质无关。

1.4.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)⊖

基尔霍夫电压定律反映了集总参数电路，在任一瞬间，任一回路所关联的全部支路电压或元件电压间互相约束的关系，即在集总参数电路任何一个回路中，在任一瞬间，沿着任意选定的回路绕行方向，所有支路或元件电压的代数和恒等于零。数学式为

⊖ KVL是Kirchhoff's Voltage Law的缩写，今后经常用KVL来代表基尔霍夫电压定律。