

电力基础新编

◎ 王 璋 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

电力基础新编

王 璋 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

电力基础新编/王璋著. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 3

ISBN 978 - 7 - 5682 - 2060 - 6

I. ①电… II. ①王… III. ①电路理论 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 055818 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 15

字 数 / 352 千字

版 次 / 2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 60.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

新编——电工新说

警句（核心）——本书描述物质（包括电）运动规律的基本思路（概念性、概括总结）。

（1）惯性（作用=反作用）。

（2）电流生磁，磁变生电，磁与磁作用，你动我也动（发电机、变压器、电动机的工作原理）。

（3）同向后旋定则——多种 d 、 q 方程中 $\omega\Psi_d$ 及 $\omega\Psi_q$ 之前的正负号确定的准则（见附件一）。

写书的动机和特点

一、动机

鉴于多年来发现传统文献及国内外书刊有多处失误且长时未被发现和改正（虽经多人阅读和讲述），耐人深思（对于传统文献是否需要从不同的角度加以认识）。

鉴于和多处（上海、昆明、贵阳、广西和内蒙古等地）科技人员的交谈和接触（讨论会和讲习），深感人们对传统理论的认识有困惑感（也许是少数）。

二、写法及特点

（1）鉴于上述动机，所以本书特意提出以物质运动的共同规律——惯性，代替左、右手定则和楞次定律，从稳态到暂态（过渡过程）始终以通俗、明确概念性分析为主，伴以严谨的数学工具作总结。

（2）各个章节的分析方法首要以瞬时描述为主，然后以矢量、微积分和微分方程、拉氏变换等数学工具作概述。

（3）对上述数学工具首先以附注的方式，作概念性、通俗性解释，使高难的数学（如微分方程及拉氏变换等）通俗化、代数化。

（4）对复杂的暂态（过渡过程）现象以巧妙的分量方法，使其分析简易化、清晰化、深入透化。

三、结构特点

（1）正文以系统概念分析为主（从直流到交流，从基本规律到应用，从简单集中参数到长线分布参数）。

（2）为了不影响基本概念系统地串接，特将深入内容作成附录给读者，以缓解其心情，以更加充沛的精力去加深理解和掌握。

（3）对一些名词的概念性解释，为了不影响系统学习，都以小的附注形式放在有关内容后面。

（4）为了使读者更加清晰理解，在必要的部分〔比如过渡过程，行波（过电压）等〕都增补以物理解说内容。

（5）为增强理论基础，与主要参考书相比，增加第四章附录 B 中公式（A—5）的证明，RC 及 RLC 交流电路的过渡过程，变压器的基本概念和互感及复杂互感电路的过渡过程及其分析方法，分布参数（长线）的稳态和行波的过程。

四、新思路

由于采取了新的思路（以惯性原理代替传统文献的上述说法），使得本书的页码仅占主要参考书的 1/3，而内容却增加到 130%。作为电力基础能不能、敢不敢这样写，有没有点

改革的意思（作为尝试），请读者和专家鉴评、批评和指正。

五、分工

本书第一章、第二章由王汝源执笔，其他由王璋执笔。

作 者

目 录

第一篇 带电物质及其运动机理

第一章 带电物质是怎样的物质.....	(3)
第一节 带电物质的性质及其计量单位.....	(3)
第二节 电（力）源的形成及参考正方向的规定（选定）	(6)
第二章 交直流电路的特性分析.....	(8)
第一节 直流电路.....	(8)
第二节 交流电路.....	(9)
第三章 复杂网路分析及简化（三步曲）	(16)
第一节 网路简化初步（串并联）	(16)
第二节 网路简化之二——网路变换	(18)
第三节 复网路多电源的处理方式（三步）	(20)
第四节 电路分析中的其他技巧	(24)
第四章 直流网路中的过渡过程	(26)
第一节 物理解说（概念性说明）	(26)
附注一 关于数学工具的物理解说	(31)
第二节 过渡过程的数学解析	(34)
附录 A 不同 R 值对电路过渡过程影响的详细说明	(38)
附录 B 公式（A—5）的证明（另一种数学处理方法）	(42)
附录 C RLC 电路的详细完整充电过程及举例	(44)
附录 D RC 电路充电过程中能量转化关系	(45)
附录 E 关于时间常数 τ 的物理意义	(46)
第五章 交流网路及其过渡过程	(48)
第一节 交流网路的简化及分析举例（串并联）	(48)
第二节 简单 RL 交流电路的过渡过程	(51)

附录 A RC 电路的过渡过程	(56)
附录 B RLC 电路的过渡过程	(59)
第六章 实用三相电路的分析	(62)
第一节 三相交流电源的形成	(62)
第二节 交流电动机的工作原理	(63)
第三节 三相交流电路	(65)
第四节 三相电源和负载之间的可能连接方式	(70)
第五节 三相不对称工作电路	(72)
第六节 负载接入电源时的不同接线方式	(74)
附录 A 有效值	(75)
附录 B 无功功率	(76)
第七章 变压器与互感电路	(77)
第一节 变压器及其等值电路	(77)
第二节 互感电路及其过渡过程分析	(81)
第三节 互耦关系电路的不同表示法	(86)
附录 A 复杂互耦网路分析简介	(89)
第八章 复杂网路计算方程的编写及其过渡过程分析	(92)
第一节 有关矩阵知识的介绍	(92)
第二节 网路方程表达形式举例	(95)
第三节 分析复杂网路的具体计算步骤	(96)

第二篇 电路基本理论的扩展及电路中 可能出现的一些特殊问题

第九章 电路理论在电子电路分析中的应用	(103)
第一节 电源转换与节点电位法的应用	(103)
第二节 网路(简化)变换——密勒定理	(106)
第十章 端口网路与信号传递特性	(108)
第一节 端口特性	(108)
第二节 端口网路特性研讨举例	(111)
附录 A 有关信号网路参数的推证及实用单位介绍	(112)

第十一章 交流网路中的谐振现象·····	(115)
第一节 有关串联谐振的问题·····	(116)
第二节 有关并联谐振的一些特点·····	(117)
第十二章 图论及其在电路分析中的应用·····	(120)
第一节 图论中有关点线关系的描述·····	(120)
第二节 图论在电工理论分析中的应用·····	(121)
第三节 电路状态方程的编写举例·····	(126)
第十三章 非正弦电量的处理方法·····	(129)
第一节 以分量法逼近非正弦函数曲线·····	(129)
第二节 非正弦波形中有效值、平均值以及功率关系·····	(131)
第三节 非正弦周期电流电路的计算·····	(133)
第四节 对称三相电路中的高次谐波·····	(136)
第十四章 非线性电路的特点及分析方法·····	(137)
第一节 非线性电阻电路·····	(137)
第二节 非线性电阻电路的图解及迭代法·····	(138)
第三节 不同物质的磁性及非线性电感电路(简介)·····	(140)
第十五章 分析复杂电路的数学工具	
——拉普拉斯变换·····	(145)
附录 A 关于拉氏变换性质的一些补充说明·····	(149)
附录 B 拉氏变换与脉冲函数的特殊作用举例(值得讨论的例子)·····	(150)
附录 C 利用拉氏变换求解不同形式(非直流、非正弦)电压作用的 网路响应·····	(152)
附录 D 拉氏变换的特点及另一个特例·····	(153)
附录 E 关于 RC 电路的另一个特例·····	(154)

第三篇 超长线路特性及有关行波问题

第十六章 超长分布参数网路的稳态运行特性·····	(159)
第一节 均匀长线的电气方程式及其物理概念分析·····	(159)
第二节 均匀长线运行方式分析·····	(161)

第十七章 分布参数网路中的暂态过程.....	(169)
第一节 物理解说.....	(169)
第二节 行波方程.....	(169)
第三节 典型波沿导线移动示例（对不同情况的反应）.....	(171)
附录 A 关于内过电压的物理解说.....	(177)
附录 B 复数（矢量、符号法）在电气理论分析中的应用举例.....	(178)
附录 C 关于过渡过程分析方法总结.....	(181)
思考练习及选作题.....	(183)
答案.....	(212)
附表.....	(215)
评书参考路线.....	(216)
附件一 认识瞬变机理——概念化分析法.....	(217)
附件二 部分同志对本人书中写法的意见（代表）.....	(226)
主要参考文献.....	(228)
后记（本书特点）.....	(229)

第一篇

带电物质及其运动机理

第一章 带电物质是怎样的物质

带电的物质也是物质但又不同于一般眼见物质，因为它有自己独特的性质。

第一节 带电物质的性质及其计量单位

带电物质也是物质，就拿带负电荷的电子来说，它是极小的物质之一。其质量为 0.9×10^{-27} g，其半径为 10^{-13} cm，它在一般物质中像地球绕太阳那样被（带着正电荷的原子核）吸引而作圆周运动，如图 1—1（a）所示。由此可见，具有质量和运动这两点是物质的共性，但带电的物质却又有它们自己的（静）特性：比如它们之间有异性相吸和同性相斥的性质，如图 1—1（b）所示。

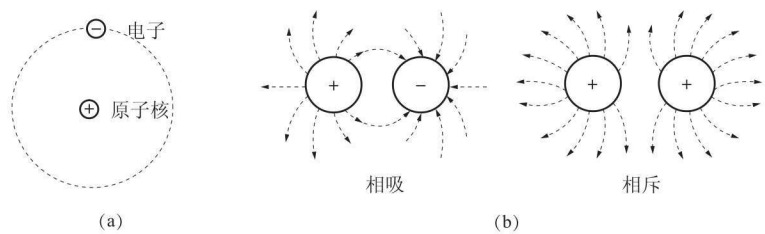


图 1—1 原子结构示意图及其特性

(a) 原子结构示意图；(b) 异性相吸与同性相斥

同时带电物质也还有自己的（动）特性（见图 1—2 四种典型动态图像）：叫作电流（习惯以小写 i 表示）即生磁（磁通与电流总相伴），如图 1—2（a）所示，磁变即生电，如图 1—2（b）、（c）所示。如铁芯一边电流变化（ Δi 出现）通过相应磁变会使铁芯另一边线圈中出现电势力，即感应电势和自感反电势。

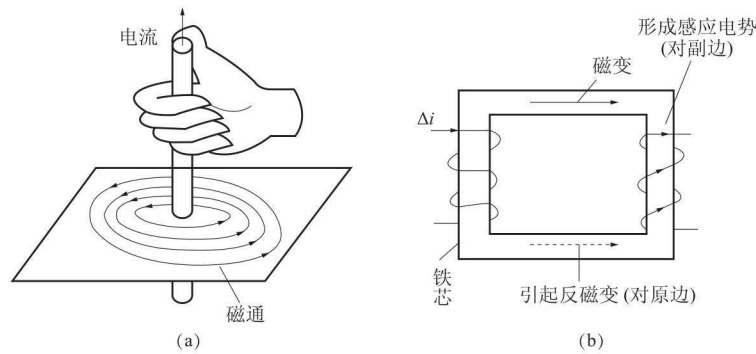


图 1—2 感应电势和自感反电势与电流变化的关系

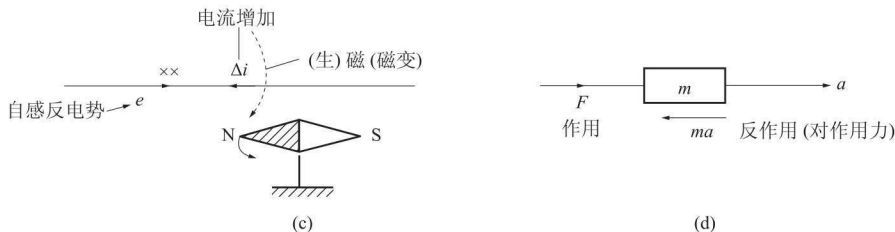


图 1—2 感应电势和自感反电势与电流变化的关系 (续)

(a) 电 (流) 磁 (通) 的实验关系; (b) 变压器中原边电流增加时;
 (c) 导体中电流突然出现; (d) 眼见物体的状态变化 (加速)

注意: 所谓感应电势和自感反电势都是 (物质运动时) 惯性作用的产物, 和一般眼见物质类似, 如子弹碰到钢板, 速度被减 (呈现运动状态变化), 形成向前的惯性作用, 把钢板推向前, 把能量 (接力) 传给向前运动的钢板。对带电物质来说, 生活中较常见的变压器 (见图 1—2 (b)) 原边电流增加, 通过磁变在副边形成感应电势 (接力), 把能量转移至负载。而自感反电势是在带电物质向前运动的同时, 形成向后的惯性, 作用于推它运动的电源。如同眼见物体被推向前运动的同时向后给予使它运动的原动力以反作用类同。所以电流增加时给予电源以自感反电势。而电流减少时也会通过电感的惯性作用形成感应电势, 维持电流继续通过负载, 所以感应电势和自感反电势都是期望维持状态不变的惯性电势 (e)。其数学表达式为 $e = -L \frac{di}{dt}$, 当电流 (其中微量 di) 随时间 t 增加时即 $\frac{di}{dt}$ 为正时, 此时电势 e (取负值) 作用方向与电流方向相反, 作用于电源 (故称自感反电势); 当 i 减少时, 即 $\frac{di}{dt}$ 取负值时, 由于负负为正, e 取正值, 其作用方向和电流原方向相同, 有维持电流的作用。

分析图 1—2 (a)、(b)、(c) 中由于电流变化引起的感应电势 (及自感反电势) 都是企图维持带电物质的原始状态, 也称电磁惯性。所以这里用物质运动的速度 (v) 比拟瞬时电流 (i), 即 $v \rightarrow i$; 用加速度 (a) 比拟电流变化, 即 $a \rightarrow \frac{di}{dt}$ 。

其中:

$$a \text{ (加速度)} = \frac{dv}{dt} \text{ (速度变化)}$$

用作用力 (F) 比拟电压 (u), 即

$$F \rightarrow u$$

作用力迫使物体 (m) 产生加速运动, 如图 1—2 (d) 所示, 即

$$\frac{F}{m} = a = \frac{dv}{dt} \quad (1-1a)$$

电压 (u) 将迫使电感 L 中电流变化, 即

$$\frac{di}{dt} = \frac{u}{L} \quad (1-1b)$$

式中, m 为物体惯性质量; L 为带电物质的磁惯性参数 (自感), 即 L 相似于眼见物质的质量, 是带电物质的惯性参数。

这里需要注意的是反作用并未阻止物体加速，反电势也未阻止电流变化，相反正因为物体有向前的加速运动才会有向后的反作用，同样正因为有电流及相应的磁变才会有反电势，所以说反电势和反作用都是企图反对状态变化，是物质的共性。通过这一概念来理解反电势的性质，不但概念清楚，而且心中踏实，有助于消除电气现象的神秘感。

这里特别需要对公式(1-1)两式的物理模拟多加思考，作用力 F 能迫使质量为 m 的物体产生加速运动（即速度变化），电压 u 能促使电流变化（克服其惯性）。以上就是对带电物质的定性解说。

* 磁变即生电是一种形象说法，实质是通过磁变牵扯动周围电场变化形成感应电势。

那么怎样作定量估计呢？

关于电荷（或带电质点）的计量单位，它们是被这样规定的：在图 1-1 (b) 中，当点电荷在空中相距 (r) 1 cm，相互作用力 (F) 为 1 达因^[1]，且电量 q_1 与 q_2 相等时，此时的 q 被作为单位（绝对静电）电量，实用上则取 3×10^9 静电单位 = 1 库仑作为绝对实用单位电量。这是关于电荷的静态计量描述，关于电荷的动态特性，即它的移动速度或电流强度（可以通过图 1-3 所示导线的横截面 AA 来观察其单位时间通过的电量），常以库/秒来表示，作为电荷的动态计量单位，即电流（注意：文中电流习惯指的是正电荷运动方向，实际上导体中可移动的是电子，即实际上是电子在沿着电流的反方向移动，这是历史性的错误，已经沿用，未作改正，只有在电解液中移动的有带正电的离子） i 的计量单位为安（培）(A)。即：

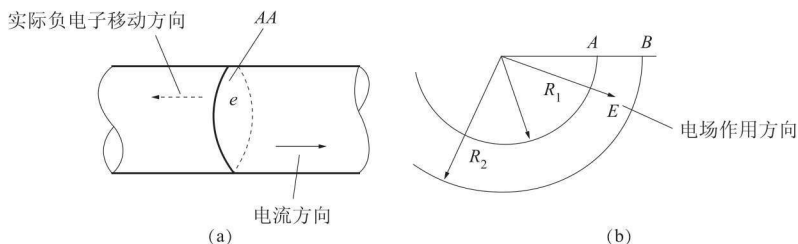


图 1-3 电流方向及电场做功

(a) 习惯定义的电流（正电荷移动）方向；(b) 电场做功示意图

$$\text{安(培)} = \frac{\text{库(仑)}}{\text{秒}} \text{ 或 } i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

式中， i 、 dq 、 dt 分别表示电荷移动的瞬间速度、瞬间通过界面的电量及相应的短时间。与此相应的实用单位还有千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA)，它们的换算关系如下：

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}; 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}; 1 \mu A = 10^{-6} \text{ A}$$

式 (1-2) 说明电流 i 是电量 q 与时间 t 的导出单位。那么电荷怎么会移动的呢？关于它的动力单位又是如何规定的呢？在最原始的情况下导致上述电荷移动的动力来源于正负电荷之间的吸力（或电场力）。在工程中标定电场力作用的强弱习惯以电位差（它类似于地位高低差）来表示。当电场力移动单位（库）正电荷由 A 到（见图 1-3 (b)）B 做功恰为一焦耳 (J) 时，称 AB 两点电位差（或电压降）为 1 伏特 (V)。可见电压（伏）是电量（库）

[1] 1 达因 = 10^{-5} 牛顿。

和功（焦耳）的导出单位。而电量（库）和时间（秒）都是基本单位。

其中电量（库）、电流（安）、电压（伏）正是电工（研究电物质质点运动规律）的常用计算单位。此外尚有千伏（kV）、毫伏（mV）、微伏（ μV ）等单位（ $1\text{ kV}=10^3\text{ V}$ ， $1\text{ mV}=10^{-3}\text{ V}$ ， $1\text{ }\mu\text{V}=10^{-6}\text{ V}$ ）。以上就是认识和研究电物质运动规律的必要准备工作之一。关于电荷移动的动力来源见第二节。

第二节 电（力）源的形成及参考正方向的规定（选定）

众所周知，在原始社会里人们并不知道如何用电，只是看到一些雷电（云中放电）现象。因为在正常情况下，一切物质质点中正、负电荷数量相等（经测试得知），都处于稳定中和状态。上述放电现象正是通过云层的运动（水汽质点的相互摩擦）使水汽质点的部分电子滞留到其他质点上导致平衡状态破坏，在云层中形成巨大的电位差，在一定水汽距离构成导电条件时立即形成放电现象。与此相似，在生活中，常看到玻璃棒与毛皮之类摩擦之后，也会形成放电现象。由此萌发了摩擦起电的思想，这正是最原始的电源形成方式之一。以后通过化学家的观测和细致的筛选，使不同的物质（电极）插在同样液体中通过化学作用会自然形成电位差，即通过化学反应（或作用）使两条极棒上的正、负电极性有差别，由此造成当前的蓄电（棒）池上的正、负电极。当极间以导线接通时，即会形成电流使灯光发亮。此时，由于电极与液体的化学作用力能通过外部电线使极上部分正负电在中和的过程中（通过化学作用又能即时给电极上的电荷加以补充）维持两极之间的电位差基本不变，习惯上称这样的电源为直流电源（因此时极间瞬时电流 i 的方向不变而幅值又基本恒定，此种电流习惯以 I 表示），如图 1—4 所示。

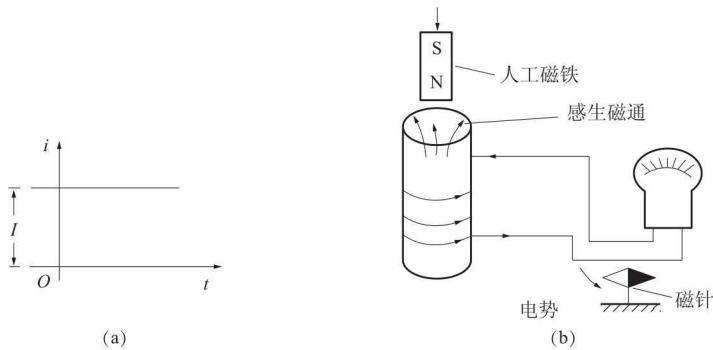


图 1—4 直流电源及磁变即生电

(a) 直流电流 (i) 与时间的关系 (代表电荷的匀速运动); (b) 磁变即生电

与此相应人们又发现磁铁出入线卷时电表中的指针有反应，又启发了人们造就电源的另一想法，叫作磁变即生电，如图 1—4 (b) 及图 1—5 (a) 所示。

由图 1—5 可以看出，其中图 1—5 (a) 以旋转代替了图 1—4 (b) 的往复运动，有利于被机械所推动，但形成的磁变效果却完全相同，即使灯泡发亮代替了电表指针的偏转。然而从图 1—5 (c) 中的电流（以向上为正）方向 [人们的规定（所谓参考正方向）] 可以看出，电流与时间的关系随时间不停地改变其大小（根据瞬时磁变数量的多少）和方向，与图 1—

4 (a) 中电流（幅值恒定）方向不变的直流电流相比是完全两样的，是谓交流（周期交变且平均值为零）电流。

那么为什么磁变能形成电势（力）呢？传统文献及书籍历来以左右手定则（见图 1—5 (b)）机械地规定磁力、动力和感应（或应变）电势之间的方向关系（指明这是实验结果）。其实从一般物质运动的（特性）共性（惯性）能更简易地（代替左右手定则的六个方向机械表达方式）确定感应电势（力）的方向。

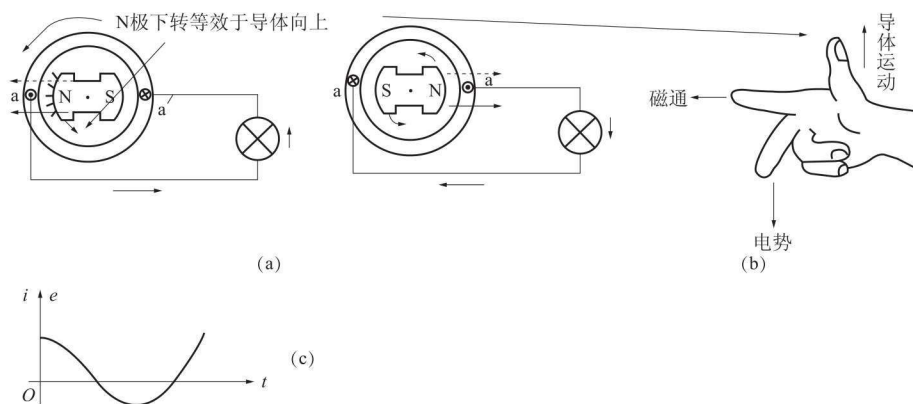


图 1—5 交流机简图、交流电势波形及右手定则

(a) 交流机简图；(b) 右手定则：电（势）磁（力）与力（导体运动）方向关系图；(c) 交流电势波形

因为在图 1—5 (a) 中，当磁极旋转使磁通从图中虚线位置变至实线状态时，根据一般物质的特性（惯性），导体 a 中必然有电流（图中点代表电流流出电机）要形成相应的磁通 [按图 1—2 的电流和磁通的（实验）关系] 以维持原始磁通在导体上方的原始状态。惯性是一般物质的共性，既然磁和带电物质都是物质（经科学工作者研究肯定），那么它们也具有惯性是自然的道理（实质一，即真正的根由或基因）。用这一方法来确定感应（应变）电势的方向既方便而又能除去传统文献所说的切割电势（一种好像有点神秘感觉的说法，因为磁通既看不见也摸不着怎么能切割呢？）。

以上叙述的两种电源就是当前我们生活中最重要的电力来源，这正是为下面分析带电物质运动规律所做的准备工作。现在我们开始分别研究在上述两种电源作用下电路中电流的运动特性和规律，即直流和交流电路。

所谓电路，文献中定义为由电工设备组成的总体。比如从电源（交直流发电机或电池）开始，经传输线路（包括变压器）到用户的用电设备（也包括信号系统中的放大电路等）的总体。电路的任务在于把经过加工（称激励）的信号传送至末端（称为响应）。