



“十四五”职业教育国家规划教材



扫描二维码
共享立体资源

新能源汽车 电工电子技术

工作页式教材

主 编 张树维



北京出版集团
北京出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

新能源汽车电工电子技术 / 张树维主编. —北京:
北京出版社, 2021.8 (2024 重印)
ISBN 978-7-200-16579-1

I. ①新… II. ①张… III. ①新能源—汽车—电工技术—高等学校—教材②新能源—汽车—电子技术—高等学校—教材 IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 157714 号

新能源汽车电工电子技术

XINNENGYUAN QICHE DIANGONG DIANZI JISHU

主 编: 张树维
出 版: 北京出版集团
北 京 出 版 社
地 址: 北京北三环中路 6 号
邮 编: 100120
网 址: www.bph.com.cn
总 发 行: 北京出版集团
经 销: 新华书店
印 刷: 定州启航印刷有限公司
版 印 次: 2021 年 8 月第 1 版 2023 年 12 月修订 2024 年 1 月第 2 次印刷
成品尺寸: 185 毫米 × 260 毫米
印 张: 14
字 数: 298 千字
书 号: ISBN 978-7-200-16579-1
定 价: 45.00 元

教材意见建议接收方式: 010-58572341 邮箱: jiaocai@bphg.com.cn

如有印装质量问题, 由本社负责调换

质量监督电话: 010-82685218 010-58572341 010-58572393



目录

学习工作页

学习单元一 新能源汽车电路的认知及应用 2

- 学习任务一 电路基本物理量的认知 2
- 学习任务二 电路基本元件的分析及应用 5
- 学习任务三 电路基本定律的分析及应用 8

学习单元二 新能源汽车数字电路的分析及应用 12

- 学习任务一 数字电路基础 12
- 学习任务二 组合逻辑电路 15
- 学习任务三 时序逻辑电路 19

学习单元三 新能源汽车模拟电路的分析及检测 23

- 学习任务一 二极管的分析及检测 23
- 学习任务二 三极管的分析及检测 26
- 学习任务三 整流装置的分析及检测 28

学习单元四 新能源汽车电机的分析及检测 32

- 学习任务一 新能源汽车起动机的分析及检测 32
- 学习任务二 新能源汽车直流电机的分析及检测 35
- 学习任务三 新能源汽车交流驱动电机的分析及检测 39

学习单元五 新能源汽车常用电磁元件的分析及检测 43

- 学习任务一 新能源汽车喇叭继电器的认知及检测 43
- 学习任务二 新能源汽车常用继电器及接触器的
分析及检测 46
- 学习任务三 旋转变压器的分析与检测 50

学习单元六 新能源汽车安全用电 53

- 学习任务一 安全用电常规规范 53
- 学习任务二 新能源汽车高压电路安全规范 56

▶ 学习参考 ◀

学习单元一 新能源汽车电路的认知及应用 62

- 学习任务一 电路基本物理量的认知 62
- 学习任务二 电路基本元件的分析及应用 68
- 学习任务三 电路基本定律的分析及应用 74

学习单元二 新能源汽车数字电路的分析及应用 81

- 学习任务一 数字电路基础 81
- 学习任务二 组合逻辑电路 88
- 学习任务三 时序逻辑电路 97

学习单元三 新能源汽车模拟电路的分析及检测 107

学习任务一	二极管的分析及检测	107
学习任务二	三极管的分析及检测	115
学习任务三	整流装置的分析及检测	124

学习单元四 新能源汽车电机的分析及检测 132

学习任务一	新能源汽车起动机分析及检测	132
学习任务二	新能源汽车直流电机的分析及检测	142
学习任务三	新能源汽车交流驱动电机的分析及检测	154

学习单元五 新能源汽车常用电磁元件的分析及检测 167

学习任务一	新能源汽车喇叭继电器的认知及检测	167
学习任务二	新能源汽车常用继电器及接触器的 分析及检测	177
学习任务三	旋转变压器的分析及检测	188

学习单元六 新能源汽车安全用电 198

学习任务一	安全用电常规规范	198
学习任务二	新能源汽车高压电路安全规范	205

参考文献 213

XUEXI 学习工作页
GONGZUOYE



学习单元一

新能源汽车电路的认知 及应用

传统燃油汽车主要由发动机、底盘、电气和车身四大部分构成。相比于燃油汽车，新能源汽车在电气和车身方面变化不大，但在底盘的传动系统和驱动方面变化较大，其中，电力驱动和控制系统是新能源汽车区别于传统燃油汽车最显著的方面。本学习单元中，我们将从电路的基本物理量和基本元件入手，循序渐进地了解新能源汽车的基本电路，并学习应用万用表对电流、电压、电阻等物理量进行测量，为后续学习新能源汽车的专业课程奠定基础。

学习任务一 电路基本物理量的认知

任务描述

电路基本物理量的分析和测量是学习新能源汽车电路的基础，在本学习任务中，我们通过分组搭建灯泡亮度可调的电路，学习应用万用表测量电阻、电压、电流等技能。

学习目标

1. 能够应用万用表合适的挡位准确测量不同电阻的阻值。
2. 能够在既定的电压下，测量不同负载的压降及电流。
3. 能够针对具体的负载，根据测量的电压、电流、电阻等数值，计算功率。
4. 懂得在团队的学习生活中，让每个人都要贡献自己的力量，既要有分工，更要有合作。时刻牢记新时代的伟大成就是党和人民一道拼出来、干出来、奋斗出来的。



学习准备

一、知识准备

1. 万用表的使用规范（查阅学习参考“学习单元一学习任务一”）。
2. 功率的计算方法（查阅学习参考“学习单元一学习任务一”）。

找出任务描述中的关键词，通过查阅“学习参考”和相关维修手册，对应整理出完成该任务所需要的知识点和技能点，填写表 1-1-1。

表 1-1-1 知识点和技能点汇总

知识点	1.
	2.
	3.
技能点	1.
	2.
	3.

二、工作场所

理实一体化教室。

三、工作器材

多种规格的电阻、可调电阻箱一台、DC24 V 稳压电源一台、导线若干、小灯泡若干、开关、万用表、维修工具等。



计划与实施

1. 通过前面的学习准备和实验器件的认知，你认为构成一个闭合的回路，必需的元件有哪些？

2. 在教师的引导下分组，以小组为单位学习相关知识，并回答下列问题。

(1) 万用表使用时的注意事项是什么？

(2) 应用万用表测量电压时的要求是什么？

(3) 应用万用表测量电流时的要求是什么？

(4) 接通电源时的注意事项是什么？

3. 在教师的引导下，以小组为单位，连接一个灯泡亮度可调的电路，学习电阻、

电压、电流的测量及功率的计算，并填写表 1-1-2。

表 1-1-2 实验过程检查表

内容	检查结果
线路的连接是否正确	正确 ☐ 错误 ☐
测量电压时，万用表是否在合适的挡位	正确 ☐ 错误 ☐
测量电流时，万用表是否在合适的挡位	正确 ☐ 错误 ☐
测量电阻时，万用表是否在合适的挡位	正确 ☐ 错误 ☐
是否已充分理解功率的计算	理解 ☐ 不理解 ☐ 理解不充分 ☐



评价与反馈

一、学习效果评价

1. 填空题

- (1) 电路主要由 _____、_____、_____ 和 _____ 控制部分按一定的方式组合在一起。
- (2) 对于电流的方向，一般规定 _____ 移动的方向为电流的实际方向。
- (3) 不同参考点的选取，会影响某点的具体电压，但对于一个既定的回路，任意两点间的电压不会随 _____ 而改变。
- (4) 电压的实际极性是由 _____ 端指向 _____ 端。
- (5) 电气设备的额定值和 _____ 值不一定相等。
- (6) 应用万用表测量电流时，表笔需要 _____ 在被测电路中，测量电压时，表笔需要 _____ 在被测电路中。



万用表的使用常识

2. 技能考核

如果不用可调电阻箱，如何应用本实验中现有的电阻，连接成一个指定电阻值的电路？

二、实验总结

根据已经完成的实验，记录分析难点和重点，填写表 1-1-3。

表 1-1-3 学生实验记录表

班级		实验分组	
姓名		实验器材	
学号		本组实验时长	
实验流程			

续表

结果分析	
难点分析	
本组评价	良好 ☐ 合格 ☐ 不合格 ☐
教师评价	良好 ☐ 合格 ☐ 不合格 ☐ 教师姓名： 年 月 日

学习任务二 电路基本元件的分析及应用

任务描述

任何物理量的存在都以具体的元件为载体或依托，在本学习任务中，我们将学习电感元件、电容元件等电路基本元件的特性，并通过电磁感应式车速传感器的应用，加强对电感元件、电磁感应定律的理解。

学习目标

1. 能够应用万用表对不同的电容进行测量。
2. 能够应用合理的工具对电磁感应式车速传感器进行检测。
3. 能够应用合理的工具对电容元件进行检测。
4. 通过电容元件、电感元件的伏安特性公式，引导学生关注不同科目之间的关联，牢固树立系统思维，把握好多学科之间的整体性、关联性、协调性、集成性。



学习准备

一、知识准备

1. 电容元件的定义、单位、符号及伏安特性（查阅学习参考“学习单元一学习任

- 务二”)。
2. 电感元件的定义、单位、符号及伏安特性（查阅学习参考“学习单元一学习任务二”）。
3. 电磁感应式车速传感器的原理（查阅学习参考“学习单元一学习任务二”）。
- 找出任务描述中的关键词，通过查阅“学习参考”和相关维修手册，对应整理出完成该任务所需要的知识点和技能点，填写表 1-1-4。

表 1-1-4 知识点和技能点汇总

知识点	1.
	2.
	3.
技能点	1.
	2.
	3.

二、工作场所

理实一体化教室。

三、工作器材

不同容量的电解电容 6 只、不同容量的陶瓷电容 6 只、不同检测距离的电磁感应式车速传感器 6 只、车速传感器检测齿轮 6 个、DC12 V 稳压电源两台、导线若干、万用表、维修工具等。



计划与实施

1. 从直观上看，相同容量的电解电容和陶瓷电容的核心差别是什么？
2. 在教师的引导下分组，以小组为单位学习相关知识，并回答下列问题。
- （1）如何应用万用表测量电容？
- （2）不同检测距离的电磁感应式车速传感器在外观上最大的差别是什么？
- （3）电磁感应式车速传感器共有几根连接线，分别如何连接？

(4) 实验中, 车速传感器检测齿轮是什么材质的? 如果换成其他材质的, 如橡胶、塑料等非金属, 是否可以?

3. 在教师的引导下, 以小组为单位, 对电磁感应式车速传感器进行连线, 并在合适的位置上转动检测齿轮, 应用万用表测量输出电压, 并填写表 1-1-5。

表 1-1-5 实验过程检查表

内容	检查结果
电磁感应式车速传感器的线路连接是否正确	正确 ☐ 错误 ☐
检测齿轮的位置调整得是否合适	正确 ☐ 错误 ☐
测量电容时, 万用表是否在合适的挡位	正确 ☐ 错误 ☐
测量车速传感器时, 万用表是否在合适的挡位	正确 ☐ 错误 ☐
是否已充分理解电磁感应式车速传感器的检测流程	理解 ☐ 不理解 ☐ 理解不充分 ☐



评价与反馈

一、学习效果评价

1. 填空题

- (1) 电感元件能够储存 _____ 能量。
- (2) 电容元件能够储存 _____ 能量。
- (3) 最初的电容器, 间隔的介质是 _____, 后来又研发制造了以陶瓷、云母等为介质的电容器。电容器的命名也以 _____ 而定义。
- (4) 超级电容器实际上是一种新型的储能元件, 功能介于 _____ 和 _____ 之间。
- (5) 从原理角度分析, 电磁感应式车速传感器主要由 _____、_____ 等组成。
- (6) 假设电感线圈两端加恒定的直流电流, 则电感电压为 _____, 此时, 电感元件可视为 _____。
- (7) 当对电容器两端加上恒定的直流电压, 电容两端的电流没有变化, 当加上交流电压时, 电容器的电流才发生变化, 电容的这种特性称作 _____。

2. 技能考核

在电磁感应式车速传感器实验中, 检测齿轮是什么材质的? 如果换成其他材质的, 如橡胶、塑料等非金属, 是否可以?



电磁感应式车速传感器的原理及检测

二、实验总结

根据已经完成的实验，记录分析难点和重点，填写表 1-1-6。

表 1-1-6 学生实验记录表

班级		实验分组	
姓名		实验器材	
学号		本组实验时长	
实验流程			
结果分析			
难点分析			
本组评价	良好 ☐ 合格 ☐ 不合格 ☐		
教师评价	良好 ☐ 合格 ☐ 不合格 ☐ 教师姓名： 年 月 日		

学习任务三 电路基本定律的分析及应用

任务描述

在本学习任务中，我们通过分组测量复杂电路中的具体参数，掌握 KCL 定律和 KVL 定律的内涵。

学习目标

- 1. 能够针对具体的节点，应用万用表合理测量负载的电流值。
- 2. 能够针对具体的回路，应用万用表合理测量负载的电压值。
- 3. 学习中外杰出科学家的突出贡献和优秀品格，德技双修、术业专攻。引导学生树立科技是第一生产力、人才是第一资源、创新是第一动力的思想。



学习准备

一、知识准备

1. 掌握基尔霍夫电流定律 (KCL) 在具体电路中的应用 (查阅学习参考“学习单元一学习任务三”)。

2. 掌握基尔霍夫电压定律 (KVL) 在具体电路中的应用 (查阅学习参考“学习单元一学习任务三”)。

3. 掌握毫安表在电路中的连接方式。

找出任务描述中的关键词,通过查阅“学习参考”和相关维修手册,对应整理出完成该任务所需要的知识点和技能点,填写表 1-1-7。



基尔霍夫定律的
补充说明

表 1-1-7 知识点和技能点汇总

知识点	1.
	2.
	3.
技能点	1.
	2.
	3.

二、工作场所

理实一体化实验室。

三、工作器材

电工电子实验台、多种规格的电阻 (510 Ω 、330 Ω 、1 k Ω 等)、可调电阻箱一台、DC6 V 电源、DC12 V 电源、直流毫安表、导线若干、万用表、维修工具等。电阻、毫安表的具体数量参照图 1-1-1 所示。

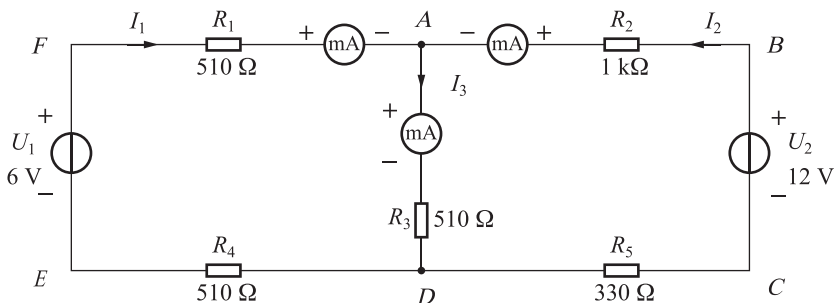


图 1-1-1 基尔霍夫定律分析电路图



计划与实施

1. 通过前面的学习准备和实验器件的认知,你认为如果直流电压源在连接时和图 1-1-1 所示的相反,毫安表将会如何指示?

2. 在教师的引导下分组,以小组为单位学习相关知识,并回答下列问题。

(1) 图 1-1-1 中共有几个网孔、几个回路、几条支路、几个节点?

(2) 对图 1-1-1 中的两个网孔,如何选定绕行方向?

(3) 连接毫安表时,如果与参考方向不一致,会显示什么样的指示?

3. 在教师的引导下,以小组为单位,根据实验的结果,填写表 1-1-8。

表 1-1-8 实验数据记录表

被测物 理量	I_1 (mA)	I_2 (mA)	I_3 (mA)	U_1 (V)	U_2 (V)	U_{FA} (V)	U_{AB} (V)	U_{AD} (V)	U_{CD} (V)	U_{DE} (V)
实测值										
计算值										



评价与反馈

一、学习效果评价

1. 填空题

- (1) 回路是指电路中的任一 _____ 路径。
- (2) 在回路内部, _____ 的回路称为网孔。
- (3) 基尔霍夫电流定律表述的是:在任一瞬间,流入或流出节点的 _____ 恒为零。
- (4) 在基尔霍夫电流定律中,一般规定,流入节点的电流为 _____。
- (5) 基尔霍夫电压定律表述的是:在任一瞬间,对于电路中的任一回路,沿任一指定方向绕行一周,各部分 _____ 恒为零。
- (6) 在基尔霍夫电压定律中,一般先任意规定绕行方向,各部分电压参考方向与 _____。

绕行方向一致时，取 ____ 号，不一致时，取 ____ 号。

2. 技能考核

如果图 1-1-1 中 DC12 V 电源反接，影响的数据有哪些？

二、实验总结

根据已经完成的实验，记录分析难点和重点，填写表 1-1-9。

表 1-1-9 学生实验记录表

班级		实验分组	
姓名		实验器材	
学号		本组实验时长	
实验流程			
结果分析			
难点分析			
本组评价	良好 ☐ 合格 ☐ 不合格 ☐		
教师评价	良好 ☐ 合格 ☐ 不合格 ☐ 教师姓名： 年 月 日		

XUEXI 学习参考
CANKAO



学习任务一 电路基本物理量的认知



相关知识

一、电路的组成及工作状态

(一) 电路的组成

从简单意义上讲，电路也就是电流的通路，它主要由电源、负载、导线、控制部分按一定的方式组合在一起，进而实现既定的功能。

电源是提供电能的设备。电源的功能是把非电能转变成电能。例如，电池是把化学能转变成电能；发电机是把机械能转变成电能。电源分为电压源与电流源两种，只允许同等大小的电压源并联，同样也只允许同等大小的电流源串联。电压源不能短路，电流源不能断路。

负载是指连接在电路中电源两端的电子或电气元件。负载能够把电能转换成其他形式的能量，如动能、机械能、光能等，常用的负载有电阻、电动机、电灯泡等。电阻能把电能转换成热能，电动机能把电能转换成机械能，电灯泡能把电能转换成热能和光能，扬声器能把电能转换成声能。对负载最基本的要求是阻抗匹配和所能承受的功率。电路中不应没有负载而直接把电源两极相连，这种连接称为短路。

实际应用的电路都比较复杂，因此，为了便于分析电路的实质，通常用符号表示组成电路的实际元件及其连接线，即画成所谓电路图。例如，电力系统的电路、手电筒的电路、手机的电路，都是与我们的生产生活紧密联系的应用实例。如图 2-1-1 所示的电路图是一个简易的电路构成示意图。

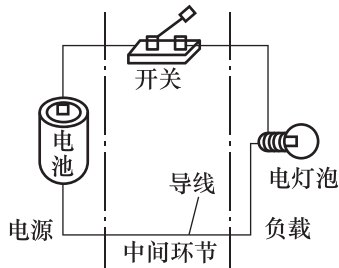


图 2-1-1 电路构成示意图

(二) 电路的工作状态

电路主要有三种工作状态，分别是通路、开路和短路。

1. 通路

通路是指电路的额定工作状态，在这种状态下，开关或控制器处于闭合状态，电源向负载提供能量，负载处于正常的工作状态。

2. 开路

开路也称为空载工作状态，当开关断开或连接导线折断时，就发生这种状态。在这种状态下，电源不能向负载提供能量，负载不工作，外电路的电阻可以看作无穷大。这种状态下，一般对电路无损害。

3. 短路

短路属于一种非正常的工作状态，对电路、设备或工作人员都具有很强的危险性。当电源未经过任何负载而直接由导线接通成闭合回路时，即形成了短路。短路时，因为没有负载分压，电路中瞬间电流很大，进而产生设备损坏、开关击穿等现象。这种状态是我们在生产生活中应极力避免的一种状态。

上述三种电路状态从负载电流、负载电压、消耗功率角度来分析，不同状态下电路的特征，如表 2-1-1 所示。

表 2-1-1 不同状态下电路的特征

电路状态	负载电流 (I)	负载电压 (U)	消耗功率 (P)
通路	取决于负载的大小	等于负载两端的电压	等于负载所消耗的功率
开路	0	电源电压	0
短路	短路电流	0	0

二、电路中的常用物理量

如果要分析或描述电路的特性，需要借助相应的物理量。描述电路的物理量很多，如电流、电压、电荷、磁链、功率等。常用的电路物理量有电流、电压、功率，分别记为 $i(t)$ 、 $u(t)$ 、 $p(t)$ 。在本学习单元中，只分析常用的物理量。

(一) 电流的定义及参考方向

电流，也就是电流的强度，是指单位时间通过导体横截面的电荷量，即

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (2-1-1)$$

电荷的单位是库仑 (C)，电流的单位是安培 (A)，1 安培 = 1 库仑 / 秒。表征电流大小的其他单位还有：mA、 μA 。不同单位之间的换算关系为：1 A = 1000 mA、1 mA = 1000 μA 。

其中，大小和方向均不随时间变化的电流是直流电流，可用 I 表示。大小和方向均随时间变化的电流是交流电流，如果变化规律符合正弦函数，即为正弦交流电流。电流常用 i 表示。

对于电流的方向，一般规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。

为了便于分析，一般先假设一个电流的方向，这个假设的方向称为参考方向或正向。在已设定的参考方向下，计算出的电流值为正，即 $i > 0$ ，则说明实际方向与假设的参考方向一致；如果计算出的电流值为负，即 $i < 0$ ，则说明实际方向与参考方向相反。如图 2-1-2 所示。

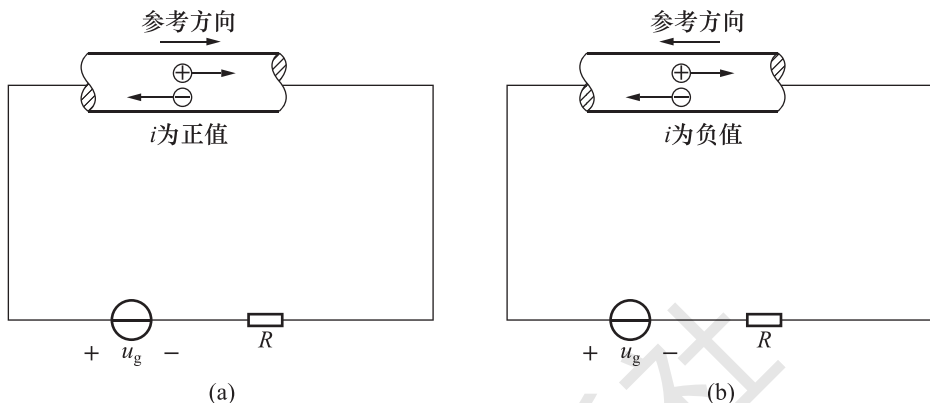


图 2-1-2 电流的方向示意图

参考方向是任选的，但一经选定即不再变更，但电流的实际方向由电路的最终计算结果判定。

(二) 电压的定义及其参考极性

在一个电路中，指定任意两点 a 、 b ，此两点间的电压定义为：单位正电荷由 a 点移动到 b 点所获得或失去的能量，即

$$u(t) = \frac{dw}{dq} \quad (2-1-2)$$

如果正电荷由 a 移动到 b 失去能量，则 a 点为高电位， b 点为低电位，即 a 为正极， b 为负极。若由 a 移动到 b 获得能量，则 a 点为低电位， b 点为高电位，即 a 为负极， b 为正极。

大小和极性均不随时间变化的电压是恒定电压或称直流电压，可用 U 表示。

电压单位为伏特 (V)，1 伏特 (V) = 1 焦耳 (J) / 库仑 (C)。电压的其他常用单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV)，它们之间的换算关系为：1 kV = 1 000 V，1 V = 1 000 mV。

在电路中，任意两点间的电位差即为电压。如图 2-1-3 所示， a 、 b 两点间的电压为

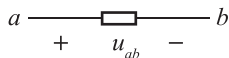


图 2-1-3 电压的参考极性图

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (2-1-3)$$

电路中的电位，与参考电位的选取直接相关。若电路中某一点被设定为参考点 (电位为 0)，那么电路中各点的电位即为该点到参考点的电压。

不同参考点的选取，会影响某点的具体电压，但对于一个既定的回路，任意两点

间的电压不会随参考点的不同而改变。

电压的实际极性是由高电位端指向低电位端。

(三) 功率

在电路中, 某一支路单位时间内所吸收的能量, 称为该支路吸收的电功率, 用 $p(t)$ 表示, 即

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u(t) \cdot i(t) \quad (2-1-4)$$

式 (2-1-4) 也表示, 电路的功率等于电压与电流的乘积。

功率的单位是瓦特 (W), $1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W}$, $1 \text{ W} = 1000 \text{ mW}$ 。

例 2.1.1 如图 2-1-4 所示, 已知某电阻支路电压和电流参考方向。如 $i = 2 \text{ mA}$, $u = 2.5 \text{ mV}$, 求电阻元件吸收的功率。

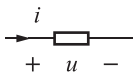


图 2-1-4 电压和电流参考的方向

[解]

$$p = ui = 2.5 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{-3} = 5 \times 10^{-6} \text{ W}$$

(四) 万用表及其使用

万用表是电路测量中广泛应用的测量仪器。当前应用广泛的是数字式万用表。它具有功能丰富、读数便捷、过载能力强等优点。本学习任务以 DT-9205A 型数字万用表 (图 2-1-5) 为例, 讲述数字式万用表的使用方法和注意事项。



图 2-1-5 DT-9205A 型数字万用表外形图

1. 万用表的面板结构

(1) 万用表面板上部是液晶显示屏, 显示当前的测量值或需要保持的数值, 最大显示为 1999。

- (2) 万用表面板中部是量程转换开关,可调节的量程。
- (3) 万用表面板下部是表笔插孔,用于红、黑两种表笔的插接。

2. 万用表的使用方法

(1) 首先按下电源开关。检查万用表是否有异常显示,常见的异常显示是“LOBAT”或“BAT”,说明万用表电池电压过低,需更换电池。

(2) 调整量程转换开关位置。根据被测量项目的不同,如直流电压、直流电流、交流电压、交流电流等,调整量程转换开关至相应的挡位。

(3) 根据被测量项目的不同,将表笔插接入对应的插孔。

如果测量电压或电阻,黑色表笔插接在“COM”插孔,红色表笔插接在最右侧标注有“V”“ Ω ”和“二极管”的插孔上。

如果测量 20 mA 以下的电流,黑色表笔插接在“COM”插孔,红色表笔插接在标注有“mA”指示的插孔中。

如果测量 20 mA~20 A 的电流,黑色表笔插接在“COM”插孔,红色表笔插接在标注有“20 A”指示的插孔中。

(4) 电容测量:首先将量程转换开关调整于“F”处,被测电容插入“两孔电容测试插孔”中,如果电容有极性,需要注意极性不要插错。特别强调:不能用表笔测量电容;对于容量较大的电容,需要先将被测电容放电,才能插入测量插孔,而且要等读数稳定后再读取数值。

(5) 二极管测量:首先将量程转换开关调整到二极管挡,黑色表笔插接在“COM”插孔,红色表笔插接在最右侧标注有“V”“ Ω ”和“二极管”的插孔上。用红色表笔的另一端连接在待测二极管的正极,黑色表笔的另一端连接在待测二极管负极,读数为二极管正向压降的近似值。

(6) 三极管 β 测量:将量程转换开关调整到三极管挡,按三极管类型(NPN 或 PNP 型)正确插入测试插孔即可显示 β 值。

3. 万用表的使用注意事项

(1) 每次测量时,应确认量程是否正确,尤其是交流挡和直流挡,切不可调整错误。

(2) 测量电流时,表笔需要串联在被测电路中;测量电压时,表笔需要并联在被测电路中。

(3) 更换万用表电池时,应首先切断电源开关,并且电池型号要与原电池相同。



拓展知识

比亚迪 e5 新能源汽车照明电路图

比亚迪新能源汽车在市场上有广泛的占有率,如图 2-1-6 所示,是比亚迪 e5 新能源汽车部分照明电路图,主要包括前雾灯、昼行灯、前大灯等照明元件的控制。分析

这幅电路图，我们可以总结出汽车电路图的核心特点，主要有下三个方面。

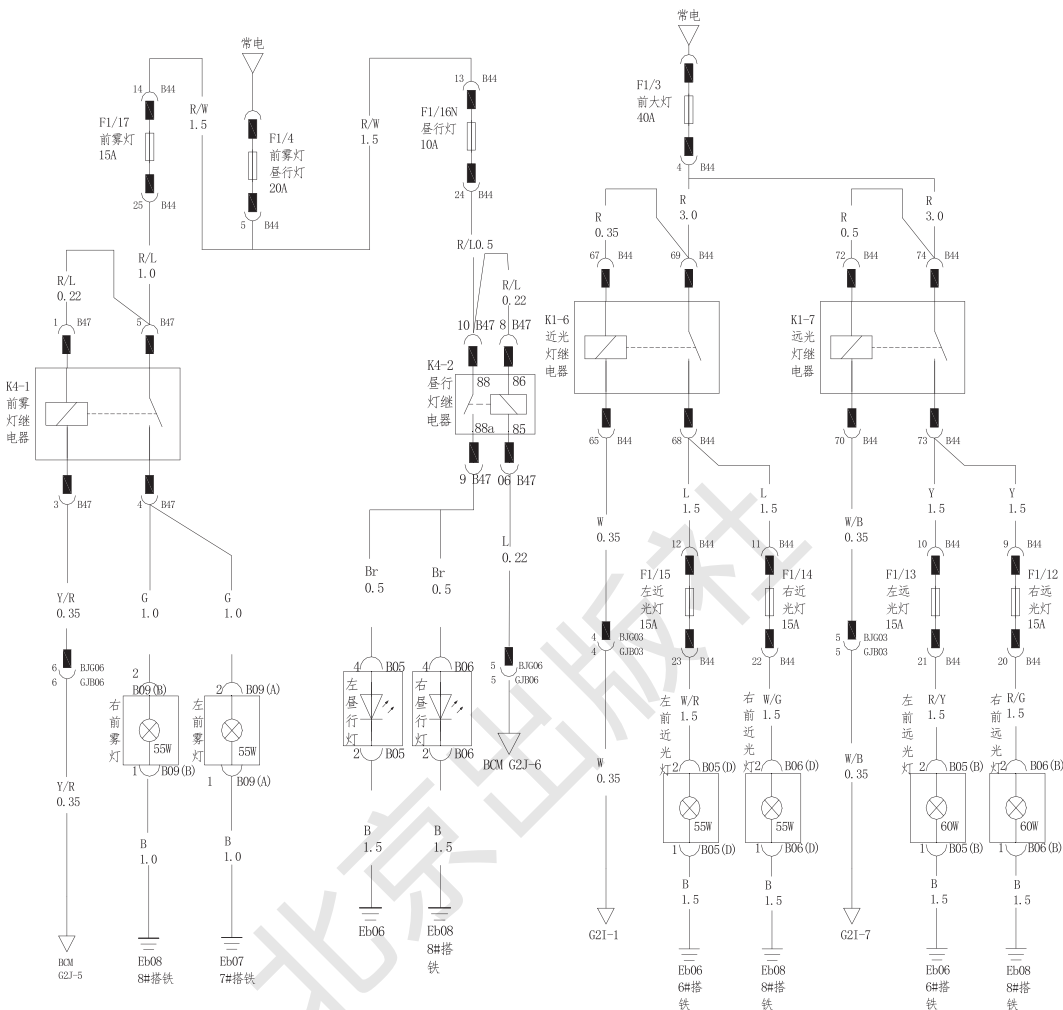


图 2-1-6 比亚迪 e5 新能源汽车部分照明电路图

(1) 低压直流供电。汽车电气系统的额定供电电压，一般都为直流 12 V 或 24 V。

(2) 单线制。从图 2-1-6 中可以看出，从控制继电器触点到负载照明灯，仅有一根控制线，这种控制方式不仅节省导线，而且便于安装和维修。而另一根导线由车架、发动机等金属导体代替。

(3) 负极搭铁。当控制线采用单线制时，另一端必须可靠地接到车架等金属导体上，简称“搭铁”。搭铁分为正极和负极两种，负极搭铁的抗干扰能力较强，所以我国一般选用负极搭铁。

学习任务二 电路基本元件的分析及应用



相关知识

一、电容元件

(一) 电容元件在新能源汽车上的广泛应用

我们在初高中物理课本中了解了一些常见的电容元件，如图 2-1-7 所示。

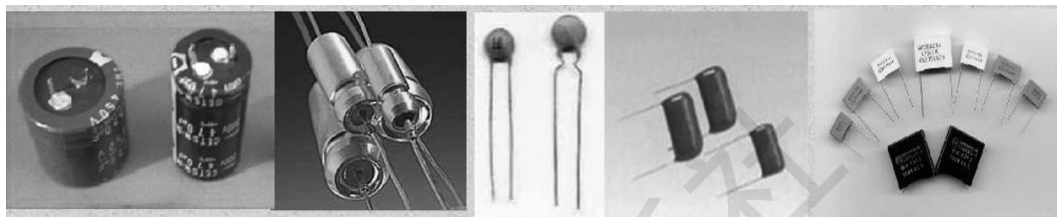


图 2-1-7 电容元件

通过初高中相关知识的学习，我们知道，电容元件广泛应用于充放电的场合。

随着新能源汽车的发展，电容元件在新能源汽车上也发挥着至关重要的作用。如图 2-1-8 和图 2-1-9 分别是新能源汽车动力部分实物图和充电桩实物图。观察这两幅图，带着问题思考，电容元件在新能源汽车动力部分或充电桩部分，究竟起到了哪些作用？为什么电容元件在新能源汽车上的应用如此普遍和广泛呢？

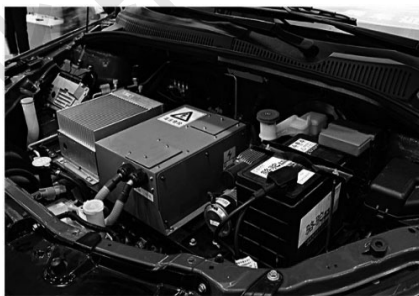


图 2-1-8 新能源汽车动力部分实物图



图 2-1-9 新能源汽车充电桩实物图

下面我们详细分析电容元件的特性。

(二) 电容元件的特性分析

我们对电容元件的应用，主要是由于电容能够储存电场能量。这种特性是由电容元件本身的结构及材质决定的。

传统电容器的核心是两块金属板，中间间隔特殊的介质。最初的电容器，间隔的介质是电解质，后来又研发制造了以陶瓷、云母等为介质的电容器。而电容器也以间隔介质来命名，如云母电容器、陶瓷电容器、电解质电容器等。

如果对电容器的两个极板端加上外接电源，正负电荷将等量聚集于极板上，从而形成电场。当去掉外电源之后，正负两极板上的电荷相互吸引，但因为绝缘介质不能中和，所以，电荷就储存在了电容之中，同时建立了电场。

1. 电容的定义

从抽象角度定义，电容是一个二端元件，在任意时刻，它承载的电荷量 q 与两极板所加的端电压 u 之间可以用 $u-q$ 平面上的一条曲线确定。如图 2-1-10 所示，这条曲线是一条通过原点的直线，斜率一定，这样的电容元件称为线性时不变电容。与之相对应的是非线性时变电容，即 $q(t) = Cu(t)$ 。

上式中的 C ，从数学角度分析，是特性曲线的斜率，是一个正的常数值。从物理角度分析，这个 C 被称为电容。

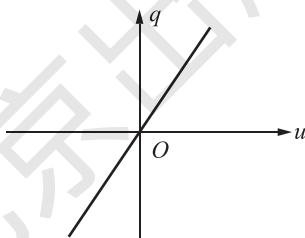


图 2-1-10 电容元件特性曲线

2. 电容元件的符号

电容元件的符号依据电容的不同有多种形式，每种形式之间有细微的差别，如图 2-1-11 所示为常用的三种。其中，图 2-1-11 (a) 表示无极性定值电容；图 2-1-11 (b) 表示电解电容；图 2-1-11 (c) 表示可调电容。

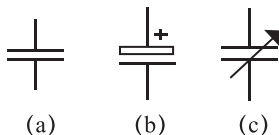


图 2-1-11 电容元件符号

3. 电容的单位

和电阻元件类似，电容元件的容量也有大小之分，这就需要用适合的单位来表示。在国际单位制中，电容的单位是法拉 (F)，但在生产应用中，更多地选用微法 (μF)

和皮法（pF）。三者之间的换算关系为

$$1\text{F}=10^6\mu\text{F}, 1\mu\text{F}=10^6\text{pF}。$$

4. 电容元件的伏安特性

当电容元件上电流和电压的参考方向相关联时，电容元件的伏安特性用如下公式表示：

$$i(t)=\frac{\mathrm{d}q(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}Cu(t)}{\mathrm{d}t}=C\frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t} \quad (2-1-5)$$

当电容元件上电流和电压的参考方向不相互关联时，需要加上负号，电容元件的付安特性用如下公式表示：

$$i(t)=-C\frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t} \quad (2-1-6)$$

由上述公式可以看出，在电容元件上，电流与电压的导数具有很强的相关性，电压的导数，表述的是电压的变化率。所以，当对电容器两端加上恒定的直流电压时，电容两端的电流没有变化，当加上交流电压时，电容器两端的电流才发生变化，这种特性也称作“隔直通交”。由于任一时刻电容的电流取决于该时刻的端电压的变化率，所以称电容为动态元件。

（三）电容元件的测量及超级电容器

1. 小容量电容元件的测量

应用数字万用表可以对小容量电容进行测量，测量方法如下。

首先，将电容两端短接，以释放掉电容中残余的电荷，这样主要是确保数字万用表的安全。

其次，把万用表的量程转换开关调整到电容（C）测量挡，并估选合适的量程，在无法估计时，一般选择最高挡位。

最后，将电容插入万用表 C_x 插孔，读取显示屏上数字。如图 2-1-12 所示。

2. 超级电容器

从万用表的量程设置上可以看出，上述测量方法仅适用于小容量电容元件的测量，对于较大容量的电容元件不适用。尤其是当前新研发的超级电容器，更不能应用万用表进行容量的测量。

超级电容器名称上虽有“电容”二字，但实际上它是一种新型的储能元件，功能介于传统电容器和电池之间，之所以冠以“超级”这样的修饰，主要是因为它的静电容量可达到几法拉到上百法拉。



图 2-1-12 应用数字万用表测量电容

二、电感线圈

(一) 电感线圈在新能源汽车上的广泛应用

电阻、电容在新能源汽车或其他产品上的应用，一般以独立的元件形式出现，有明确的标称值或容量范围，如 $1\text{ k}\Omega$ 的电阻、 1 F 的电容。与电阻或电容相比，电感在应用中一般以电感线圈的形式出现。对于应用了电感线圈的元件，也大多数以功能对元件进行命名，如变压器、互感器（图 2-1-13）、点火线圈等。



图 2-1-13 互感器

电感实际上是一种抽象的理想电路模型。简单地讲，就是将一根导线绕成线圈，给这一线圈通电，依据安培定则，环形线圈产生磁场，磁场产生之后，移除线圈两端的外加电源，根据磁场不能突变的特性，在理想情况下，磁场将稳定保持。概括而言，仅从储存磁场能量这一角度来看，能够储存磁场能量的器件即可称为电感元件。

(二) 电感的特性分析

1. 电感元件的定义

和电容元件类似, 电感元件从抽象角度分析, 是一个二端元件, 此元件中, 磁通量和电流一般具有线性的关系, 关系曲线为一条 $i-\psi$ 平面上通过原点的直线, 且不随时间而变化, 如图 2-1-14 所示, 则称此电感元件为线性时不变电感元件。

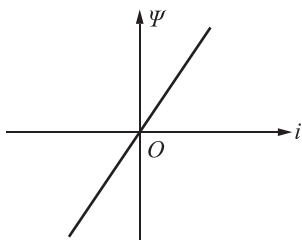


图 2-1-14 电感元件的特性曲线

ψ 与 i 的关系表示为

$$\psi(t) = Li(t) \quad (2-1-7)$$

式 (2-1-7) 中的 L 在数学上表征的是 $i-\psi$ 特性曲线的斜率, 是一个正值常量, 物理学上称为电感。

2. 电感元件的符号

电感元件的符号有多种形式, 如图 2-1-15 所示为常用的三种。其中, 图 2-1-15 (a) 表示无铁芯电感; 图 2-1-15 (b) 表示带铁芯电感; 图 2-1-15 (c) 表示可调电感。

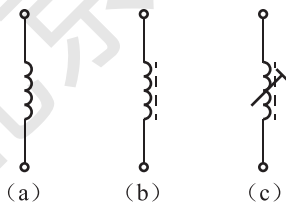


图 2-1-15 电感元件的符号

3. 电感的单位

电感的单位有亨利 (H)、毫亨 (mH)、微亨 (μH), 换算关系如下:

$$1 \text{ 亨利 (H)} = \frac{1 \text{ 韦伯 (Wb)}}{1 \text{ 安培 (A)}}, \quad 1 \text{ H} = 1000 \text{ mH}, \quad 1 \text{ mH} = 1000 \mu\text{H}.$$

4. 电感元件伏安特性

从电磁感应定律可知, 当电感线圈两端的电流随时间变化时, 磁通量也会跟随变化, 进而在线圈两端产生感应电压, 感应电压与磁通量的关系如下:

$$u = \frac{d\psi}{dt} \quad (2-1-8)$$

将式（2-1-7）与（2-1-8）合并可得：

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (2-1-9)$$

式（2-1-9）就是电感元件伏安特性的数学表达形式。如果感应电压与电流的方向不互相关联，式（2-1-9）的右侧需要加上负号。

从数学的角度分析，导数表征的是某一物理量的变化率，对于电感元件而言，在任一时刻，电感电压的大小由该时刻电感电流的变化率决定。假设电感线圈两端加恒定的直流电流，则电感电压为零，此时，电感元件可视为短路线。由此，也可分析出，电感是动态元件。



拓展知识

电磁感应式车速传感器

电感线圈在新能源汽车上以多种形式被应用，如变压器、点火线圈、电磁感应式车速传感器等。下面以电磁感应式车速传感器为例，以加深我们对电感元件的理解。

从功能角度分析，电磁感应式车速传感器安装在自动变速箱输出轴附近，主要用于检测自动变速器输出轴的转速，并把该转速反馈给 ECU，进行自动换挡的控制。

从原理角度分析，电磁感应式车速传感器主要由永久磁铁、电磁感应线圈等组成，如图 2-1-16 所示。

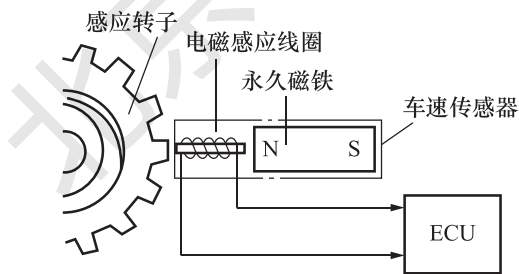


图 2-1-16 电磁感应式车速传感器结构原理图

在汽车行驶过程中，当输出轴转动时，感应转子齿轮随之同步转动，齿轮的凸起部分交替接近车速传感器的感应面。基于电磁感应原理，传感器内部的磁通量交替发生变化，产生感应电压，经过 A/D 转换后，输出脉冲信号。

电磁感应式车速传感器的实物图如图 2-1-17 所示，根据车型的不同，在结构上会有细微的差别，但整体的参数基本相似。



图 2-1-17 电磁感应式车速传感器实物图

某品牌普通型和防水型电磁感应式车速传感器的参数，如表 2-1-2 所示，供大家参考。

表 2-1-2 电磁感应式车速传感器参数表

相关参数	普通型	防水型
检测方法	磁阻元件及磁性体齿轮	磁阻元件及磁性体齿轮
检测齿轮	强磁体（S20C、SS400 等），模数 0.5~3，齿宽 3 mm 以上	强磁体（S20C、SS400 等），模数 1~3，齿宽 3 mm 以上
检测距离	取决于齿轮的模数	取决于齿轮的模数
量程	1 Hz~20 kHz	1 Hz~20 kHz
输出方式	浮式接地	浮式接地
输出型号	方形波	方形波
输出阻抗	约 300 Ω	约 300 Ω
电源	DC 12V 左右，约 40 mA	
保护电路	电源极性保护	
耐电压	DC 250V 左右	
耐冲击	490 m/s ² ，X、Y、Z 方向 3 转（不通电的时候）	
重量	约 80 g（包括 2 个安装螺母）	约 130 g（包括 2 个安装螺母）
信号线	无	耐硝酸信号线 1.9 m，内置抽拉式
备注	无	防水型，保护等级 IPX7

学习任务三 电路基本定律的分析及应用



相关知识

一、简单电路的分析定律

我们在初中学习的电学基础知识中，针对一个简单的电路，确定一个或多个负载的电流与电压的关系，应用的是欧姆定律，即 $I = \frac{U}{R}$ 或 $U = IR$ 。由公式可知，某一段电

路中，电阻两端的电压与流经电阻的电流之间的关系曲线是线性的，这一线性曲线称为电阻的伏安特性曲线，如图 2-1-18 所示。

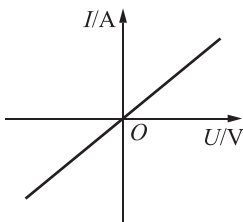


图 2-1-18 线性电阻的伏安特性曲线

二、基尔霍夫定律

欧姆定律在分析电阻电路时，简单高效，但针对如图 2-1-19 所示的复杂电路，如点 A 处的电流，只应用欧姆定律不能够完全确定。

1845 年，德国科学家基尔霍夫在继承前人研究的基础上，在一篇论文中首次提出针对类似如图 2-1-19 所示复杂电路的分析方法，后命名为基尔霍夫定律，此定律分为基尔霍夫电流定律（缩写为 KCL）和基尔霍夫电压定律（缩写为 KVL）。KCL 又称为节点电流平衡方程式，KVL 又称为回路电压平衡方程式。

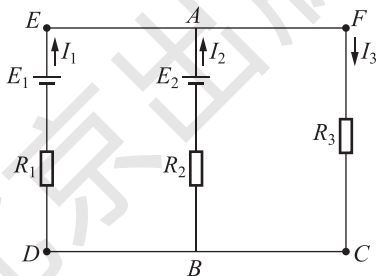


图 2-1-19 多节点复杂电路

在学习这两个定律之前，我们首先要理解这两个定律所涉及的名词及概念。

（1）支路：在电路中，支路为单个电路元件或是若干个电路元件的串联构成的一个分支，一个分支上流经的是同一个电流。电路中每个分支都称作支路。在一条支路中电流处处相等。流经该支路的电流和支路端电压称为支路电流和支路电压。

（2）节点：从狭义上讲，节点是支路与支路的连接点。

（3）回路：电路中有许多回路，所谓回路，就是电路中的闭合电路。

（4）网孔：闭合电路内不含其他支路的回路，称为网孔。因此，网孔是回路的一种，是一种较简单的回路。

电路中任一闭合路径都称为回路，凡是不可再分的回路称为网孔。例如，图 2-1-19 所示的多节点复杂电路图中，共有 A、B 两个节点，三条支路，闭合路径 ABDEA、ABCFA、CDEFC 都是回路，但只有 ABDEA 和 ABCFA 是网孔。因为 CDEFC 中包含支路 AB，所以不能称为网孔。

电荷守恒和能量守恒是自然界最基本的定律。在集总电路中，任意回路中的各条支路之间遵守能量守恒定律，连接任意节点的各条支路之间遵守电荷守恒定律，基尔霍夫定律表述了这两个关系。

(一) 基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL)

如图 2-1-20 所示电路，点 A 是 3 条支路的汇合点，在此点，既有流入的电流，也有流出的电流，但此点对电荷或电流仅仅起到了汇合的作用。根据电荷守恒定律，在任意时刻，流入此节点的电流均与流出此节点的电流相平衡。

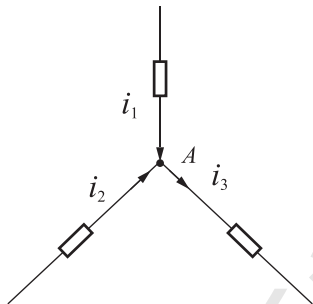


图 2-1-20 KCL 方程列写示意图

为了更好地描述这种平衡关系，需要设定电流的参考方向，一般来讲，流入节点的设定为正方向，流出节点的设定为负方向。用表达式表达如下：

$$\sum i_{\lambda} = \sum i_{\text{出}} \quad (2-1-10)$$

流入 A 点的电流分别是 $+i_1$ 、 $+i_2$ ，流出 A 点的电流是 $-i_3$ ，根据电荷守恒定律，流入节点 A 的电流，和流出节点 A 的电流相等，即 $i_1 + i_2 = i_3$ 。

结合如图 2-1-20 所示电路的分析，KCL 可以综合性地描述为：在任一时刻，任一电路中的任一节点，流入该节点的所有支路电流的和恒等于流出该节点的所有支路电流的和。数学表达式为

$$\sum_{k=1}^b i_k(t) = 0 \quad (2-1-11)$$

其中， b 为节点处的支路数， $i_k(t)$ 为第 k 条支路电流。

如果我们把节点这一概念延伸，对于一个闭合的平面，KCL 同样适用。如图 2-1-21 所示闭合面的电路图， I_1 、 I_6 、 I_7 和 I_8 之间遵循基尔霍夫电流定律，即 $I_1 + I_6 + I_8 = I_7$ 。

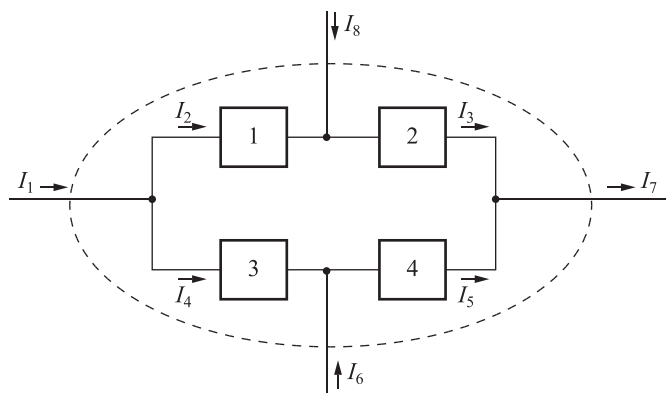


图 2-1-21 闭合面电路图

（二）基尔霍夫电压定律（Kirchhoff's Voltage Law, KVL）

基尔霍夫电压定律主要探讨集总电路中任一回路中的电压关系。

以图 2-1-22 为例，在此回路中，首先设定了此回路的绕行方向，即顺时针，以此方向为基准，回路中各负载上的电压方向有的和绕行方向一致，有的和绕行方向相反。我们规定，一致者，电压前面加正号；相反者，电压前面加负号。

对于任何一个闭合回路，根据能量守恒定律，单位正电荷沿回路绕行一周，所获得的能量恒等于所失去的能量，也就是，在此回路中，各部分电压的代数和恒等于零。

针对图 2-1-22，电压升分别是 u_3 、 u_4 ，电压降分别是 u_1 、 u_2 ，列等式表示是 $u_1 + u_2 = u_3 + u_4$ 或 $u_3 + u_4 - u_1 - u_2 = 0$ 。

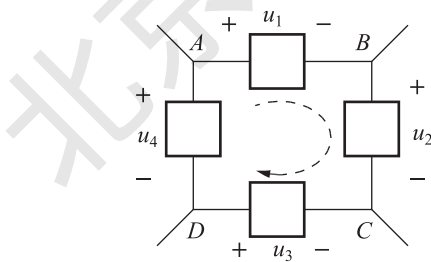


图 2-1-22 电路中的闭合回路

结合如图 2-1-22 所示电路的分析，KVL 可以综合性地描述为：对任一集总电路中的任一回路，在任一时刻，沿该回路的所有支路电压的代数和为零，即

$$\sum_{k=1}^K u_k(t) = 0 \quad (2-1-12)$$

其中， K ——回路中的支路个数；

$u_k(t)$ ——第 k 条支路电压。

(三) 基尔霍夫定律的扩展思考

(1) 从应用角度, KCL 描述复杂电路中节点上多个电流的约束关系, 揭示了电流连续性和电荷守恒。任一节点上, 电荷不会凭空消失, 也不会凭空产生, 在任何时刻流入该节点的电流等于流出该节点的电流。

(2) 同理, 从应用角度, KVL 描述了复杂电路中闭合回路中电压的约束关系, 揭示了能量守恒。任一闭合回路, 电压的升高与降低相平衡。

(3) KCL、KVL 不仅适用于阻性负载, 同时, 在感性或容性负载的电路中, 同样适用。

例 2.1.2 已知如图 2-1-23 所示的电路, 作如下分析和思考:

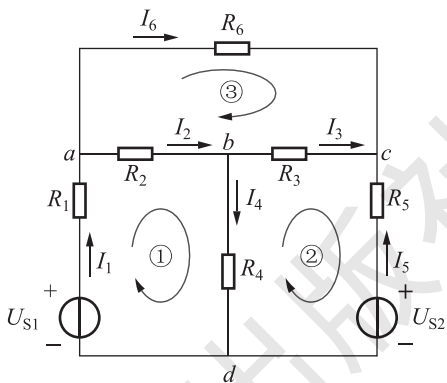


图 2-1-23 例 2.1.2 的电路图

(1) 分析该电路有多少个节点? 可以列写出多少个独立的 KCL 方程?

(2) 分析该电路有多少条支路? 可以列写出多少个独立的 KVL 方程?

(3) 列写出节点 a 、 b 、 c 的节点电流方程和回路①②③的回路电压方程。

[解] (1) 节点是支路与支路的交点, 该电路中共有 a 、 b 、 c 、 d 4 个节点。

(2) 支路的显著特征是支路中各处的电流相等, 由此可以分析出, 该电路中共有 6 条支路, 分别是电流 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 、 I_6 所流经的支路。

(3) 节点电流方程和回路电压方程分别如下。

节点电流方程为:

$$\text{节点 } a: I_1 - I_2 - I_6 = 0;$$

$$\text{节点 } b: I_2 - I_3 - I_4 = 0;$$

$$\text{节点 } c: I_3 + I_5 + I_6 = 0。$$

回路电压方程为:

$$\text{回路①: } I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_4 R_4 - U_{S1} = 0;$$

$$\text{回路②: } -I_5 R_5 + I_3 R_3 - I_4 R_4 + U_{S2} = 0;$$

$$\text{回路③: } -I_3 R_3 + I_6 R_6 - I_2 R_2 = 0。$$



拓展知识

基尔霍夫与中国著名科学家

基尔霍夫定律是 1845 年由年仅 21 岁的德国科学家基尔霍夫提出的。基尔霍夫出生于 1824 年 3 月，毕业于德国著名高等学府柯尼斯堡大学，提出此定律时，他刚刚大学毕业。

当时，德国完成了工业革命的准备阶段，各项技术有了较为快速的发展，尤其是电气技术发展很迅猛，电路越来越复杂，出现了多支路、多网络的复杂电路，核心参数的计算依靠欧姆定律或串、并联很难求得准确的数值。在此背景下，基尔霍夫发表的第一篇论文中明确阐明了计算此类复杂电路的方法，也就是著名的基尔霍夫定律。这一定律的提出，给复杂电路的计算指明了道路，对当时科技的发展起到了强有力的推动作用。时至今日，170 多年已经过去，物理学有了长足的发展，但基尔霍夫定律仍旧是基石、里程碑一样的存在。

基尔霍夫提出基尔霍夫定律之后，于 1847 年任教于柏林大学，后续又相继在布雷斯劳、海德堡大学做教授。51 岁时，再次回到柏林大学做理论物理教授。

在多所大学执教和做研究的过程中，基尔霍夫不仅在物理学上有突出的贡献，在热辐射、化学、光学等领域都有令人敬佩的成就。1860 年，基尔霍夫通过灯焰烧灼食盐的实验，依据热平衡理论做深入研究，总结出热辐射定律，即“任何物体对电磁辐射的发射本领和吸收本领的比值与物体特性无关，是波长和温度的普适函数，即与吸收系数成正比。”此定律延伸应用至天体物理领域。1862 年基尔霍夫又提出了“绝对黑体”的概念。基尔霍夫热辐射定律和绝对黑体概念对 20 世纪物理学的发展起到了引领和开辟的关键作用。

基尔霍夫在海德堡大学期间研制成功了光谱仪，并与化学家本生合作创立了光谱化学分析法，并依据此方法，发现了元素铯和铷。后来的科学家通过借鉴应用利用光谱化学分析法，相继发现了多种元素，如我们日常生活中不可或缺的元素碘，还有重金属元素铊。

像基尔霍夫这样具有奠基作用和开拓精神的物理学家或科学家，在中国的历史上也是层出不穷，古代有祖冲之、杨辉等，当代有杨振宁、钱学森、程开甲、邓稼先等（图 2-1-24）。

杨振宁与李政道合作，提出了“弱相互作用中宇称不守恒理论”，1957 年获得诺贝尔物理学奖。

钱学森被誉为中国的“中国航天之父”和“火箭之王”，曾任美国麻省理工学院和加州理工学院教授。新中国成立后，他放弃了国外优越的生活条件，冲破重重阻力回国效力。正是因为钱学森的回国，中国导弹、原子弹的研制成功至少提前了 20 年。



图 2-1-24 基尔霍夫、程开甲、邓稼先

程开甲，被誉为“中国的核司令”。在 20 世纪 60 年代，程开甲建立和发展了我国核爆炸理论，系统阐述了大气层核爆炸和地下核爆炸过程的物理现象及其产生、发展规律，并在历次核试验中不断完善验证，为我国核试验总体设计、安全论证和效应研究提供了重要依据。

邓稼先，中国核武器研制与发展的主要领导者，为了祖国的核武器计划隐姓埋名 30 余年。邓稼先始终坚守在中国核武器制造的第一线，领导了许多学者和技术人员，成功地设计了中国原子弹和氢弹，把中国国防自卫武器引领到了世界先进水平，是名副其实的“两弹之父”。

古今中外，正是因为有这样的为科学而努力、为真理而献身的科学家，科技才得以迭代更新，人民生活水平才有了质的飞跃。崇敬与感恩的同时，吾辈当“敬德修业、术业专攻”，早日扛起社会主义建设事业的大旗。