



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

电 路 分 析

胡翔骏 编



高 等 教 育 出 版 社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

电路分析

胡翔骏 编

高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,其内容符合教育部颁布的《电路课程教学基本要求》。主要有以下内容:电路的基本概念和定律、线性电阻电路分析、计算机辅助电路分析、网络定理、多端元件和双口网络、简单非线性电阻电路分析、动态电路中电压电流的约束关系、一阶电路分析、二阶电路分析、正弦稳态分析、正弦稳态电路的功率、三相电路、网络函数和频率特性、含耦合电感的电路分析及两个附录。本书附有一张软盘,提供解题、分析、演示等程序。

本书可供普通高等学校中后续设有“信号与系统”课程的电气信息类专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/胡翔骏编. —北京:高等教育出版社, 2001

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-04-009195-X

I. 电… II. 胡… III. 电路分析—高等学校—教材

IV. TN711.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 77541 号

责任编辑 刘淑扬 封面设计 张楠 责任绘图 朱静

版式设计 马静茹 责任校对 朱惠芳 责任印制 宋克学

电路分析

胡翔骏 编

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电话 010-64054588

传真 010-64014048

网址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经销 新华书店北京发行所

印刷 北京地质印刷厂

开本 787×960 1/16

版次 2001 年 6 月第 1 版

印张 37.5

印次 2001 年 6 月第 1 次印刷

字数 700 000

定价 39.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

《电路分析》是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”中“电气信息类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”这一项目的研究成果。编写教材的依据是原国家教育委员会 1995 年颁布的“高等学校工科本科电路分析基础课程教学基本要求”,供高等学校工科电子、通信及信息专业使用。本书由电阻电路分析和动态电路分析两部分组成,在附录中介绍了线性动态电路的复频域分析和电路分析程序的使用方法。

为了满足培养 21 世纪创新人才的要求,在教材中增加了计算机分析电路的方法和引用计算机程序分析各种线性电路的内容,体现出教材的先进性。计算机分析电路的通用性和普遍性也体现在对电路基本概念、基本定理和基本分析方法的陈述上。书中突出了单口网络和双口网络的端口特性,增加了建立动态电路微分方程的例题和用计算机程序分析高阶动态电路的内容。为了便于自学,除阐述力求深入浅出、通俗易懂外,书中还安排了比较多的例题和习题,其中包括用计算机分析电路的例题和习题。书中举了几个实际电路的例题,便于学生了解实际电路与电路模型的关系,有助于提高学生分析和解决实际电路问题能力。

考虑到教学上应该以学生为中心的思想,书中配有一张磁盘,装有“电路分析演示解答系统”软件的学生版。其中的“演示系统”可以对在黑板上难以表达的很多电路概念进行动画演示。“电路分析解答系统”所提供的四个通用电路分析程序可以对电路理论所涉及的各种线性电路进行分析。该软件曾获得全国普通高等学校优秀计算机辅助教学软件二等奖,是学习电路课程的一种很好的工具,可以解决学生自学中遇到的很多问题,使学生能够更好地掌握现代电路的基本理论,掌握用计算机分析和设计电路的基本方法,从而提高学生分析和解决电路问题的能力以及培养学生的创新精神。

上海大学吴锡龙教授详细审阅了全书,提出了不少宝贵意见,谨致以衷心的感谢。在教材和软件的试用过程中,我校教师和学生提出过十分有益的意见和建议,编者深表谢意。

为了便于教师采用现代化的教学手段(多媒体教学和网络教学)进行教学,还准备了《电路分析》的电子教案和习题解答幻灯片,可以在单个计算机和网络上工作,全部软件放在一张光盘中,由高等教育出版社单独发行,欢迎教师使用。

在电路教材中引入计算机分析还是一个新事物,由于编者水平有限,时间有

限,错误和不妥之处在所难免,请读者提出宝贵的意见,以便今后加以改进。

胡翔骏

2000年10月

于电子科技大学

目 录

上篇 电阻电路分析

第 1 章 电路的基本概念和定律	3
§ 1-1 电路和电路模型	3
§ 1-2 电路的基本物理量	7
§ 1-3 基尔霍夫定律	11
§ 1-4 电阻元件	15
§ 1-5 独立电压源和独立电流源	20
§ 1-6 两类约束和电路方程	26
§ 1-7 支路电流法和支路电压法	30
§ 1-8 分压电路和分流电路	32
习题一	37
第 2 章 线性电阻电路分析	45
§ 2-1 电阻单口网络	45
§ 2-2 电阻的星形联接与三角形联接	56
§ 2-3 网孔分析法及回路分析法	60
§ 2-4 结点分析法及割集分析法	66
§ 2-5 含受控源的电路分析	74
§ 2-6 电路分析的基本方法	82
习题二	87
第 3 章 计算机辅助电阻电路分析	94
§ 3-1 电路模型的矩阵表示方法	94
§ 3-2 电路的表格方程	95
§ 3-3 线性代数方程的求解	97
§ 3-4 电路分析程序举例	98
§ 3-5 直流电路分析程序 DCAP	102
§ 3-6 符号网络分析程序 SNAP	109
习题三	117
第 4 章 网络定理	123
§ 4-1 叠加定理	123
§ 4-2 戴维宁定理	128
§ 4-3 诺顿定理和含源单口的等效电路	137

§ 4-4 最大功率传输定理	145
§ 4-5 替代定理	148
§ 4-6 计算机分析电路举例	150
习题四	157
第 5 章 多端元件和双口网络	166
§ 5-1 理想变压器	166
§ 5-2 运算放大器的电路模型	171
§ 5-3 含运放的电阻电路分析	175
§ 5-4 双口网络的电压电流关系	183
§ 5-5 双口网络参数的计算	187
§ 5-6 互易双口和互易定理	198
§ 5-7 含双口网络的电路分析	202
§ 5-8 计算机分析电路举例	205
习题五	212
第 6 章 简单非线性电阻电路分析	221
§ 6-1 非线性电阻元件	221
§ 6-2 非线性电阻的串联与并联	222
§ 6-3 简单非线性电阻电路的分析	227
§ 6-4 小信号分析	230
习题六	234
下篇 动态电路分析	
第 7 章 动态电路中电压电流的约束关系	239
§ 7-1 集总参数电路中电压电流的约束关系	239
§ 7-2 电容元件	242
§ 7-3 电感元件	249
§ 7-4 动态电路的电路方程	255
§ 7-5 开关电路的初始条件	259
习题七	264
第 8 章 一阶电路分析	269
§ 8-1 零输入响应	269
§ 8-2 零状态响应	276
§ 8-3 完全响应	281
§ 8-4 三要素法	286
§ 8-5 阶跃函数和阶跃响应	297
* § 8-6 冲激函数和冲激响应	303
§ 8-7 计算机分析电路举例	310
§ 8-8 正弦信号激励的一阶电路	315

习题八	318
第 9 章 二阶电路分析	336
§ 9-1 RLC 串联电路的零输入响应	336
§ 9-2 直流激励下 RLC 串联电路的响应	344
§ 9-3 RLC 并联电路的响应	347
§ 9-4 一般二阶电路分析	349
§ 9-5 计算机分析电路举例	354
习题九	363
第 10 章 正弦稳态分析	371
§ 10-1 正弦电压和电流	371
§ 10-2 正弦稳态响应	379
§ 10-3 基尔霍夫定律的相量形式	384
§ 10-4 RLC 元件电压电流关系的相量形式	387
§ 10-5 正弦稳态的相量分析	396
§ 10-6 一般正弦稳态电路分析	405
§ 10-7 单口网络相量模型的等效	412
§ 10-8 双口网络的相量模型	420
§ 10-9 正弦稳态响应的叠加	425
§ 10-10 计算机分析电路举例	429
习题十	440
第 11 章 正弦稳态的功率 三相电路	454
§ 11-1 瞬时功率和平均功率	454
§ 11-2 复功率	459
§ 11-3 最大功率传输定理	461
§ 11-4 平均功率的叠加	464
§ 11-5 三相电路	467
§ 11-6 计算机分析电路举例	474
习题十一	481
第 12 章 网络函数和频率特性	487
§ 12-1 网络函数	487
§ 12-2 RC 电路的频率特性	491
§ 12-3 谐振电路	500
§ 12-4 谐振电路的频率特性	508
§ 12-5 计算机分析电路举例	511
习题十二	522
第 13 章 含耦合电感的电路分析	528
§ 13-1 耦合电感的电压电流关系	528
§ 13-2 耦合电感的串联与并联	532

§ 13-3 耦合电感的去耦等效电路·····	535
§ 13-4 空心变压器电路的分析·····	537
§ 13-5 耦合电感与理想变压器的关系·····	542
§ 13-6 计算机分析电路举例·····	544
习题十三 ·····	549
附录 A 动态电路的频域分析与计算机分析程序 ·····	555
§ A-1 拉普拉斯变换 ·····	556
§ A-2 动态电路的频域分析 ·····	557
§ A-3 线性时不变电路的性质 ·····	560
§ A-4 动态网络分析程序 DNAP ·····	566
§ A-5 符号网络分析程序 SNAP ·····	576
附录 B 电路分析程序 DCAP 和 ACAP ·····	582
§ B-1 直流电路分析程序 DCAP ·····	582
§ B-2 正弦电路分析程序 ACAP ·····	584
§ B-3 计算机分析电路常见问题分析 ·····	588
参考书目 ·····	592

上 篇

电阻电路分析

第 1 章

电路的基本概念和定律

本章介绍电路的基本概念和基本变量,阐述集总参数电路的基本定律——基尔霍夫定律。定义三种常用的电路元件:电阻、独立电压源和独立电流源。最后讨论集总参数电路中电压和电流必须满足的两类约束。这些内容是全书的基础。

§ 1-1 电路和电路模型

一、电路

电在日常生活、生产和科学研究工作中得到了广泛应用。在收录机、电视机、录像机、音响设备、计算机、通信系统和电力网络中都可以看到各种各样的电路。这些电路的特性和作用各不相同。电路的一种作用是实现电能的传输和转换,例如电力网络将电能从发电厂输送到各个工厂、广大农村和千家万户,供各种电气设备使用;电路的另外一种作用是实现电信号的传输、处理和存储,例如电视接收天线将接收到的含有声音和图像信息的高频电视信号,通过高频传输线送到电视机中,这些信号经过选择、变频、放大和检波等处理,恢复出原来的声音和图像信息,在扬声器发出声音并在显像管屏幕上呈现图像。

由电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、运算放大器、传输线、电池、发电机和信号发生器等电气器件和设备连接而成的电路,称为实际电路。根据实际电路的几何尺寸(d)与其工作信号波长(λ)的关系,可以将它们分为两大类:满足 $d \ll \lambda$ 条件的电路称为集总参数电路,其特点是电路中任意两个端点间的电压和流入任一器件端钮的电流是完全确定的,与器件的几何尺寸和空间位置无关;不满足 $d \ll \lambda$ 条件的另一类电路称为分布参数电路,其特点是电路中的电压和电流不仅是时间的函数,也与器件的几何尺寸和空间位置有关,由波导和高频传输线组成的电路是分布参数电路的典型例子。本书只讨论集总参数电路,为叙述方便起见,今后常简称为电路。

例如,一个音频放大电路的最高工作频率为 $f = 25 \text{ kHz}$,其波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{25 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 12 \times 10^3 \text{ m} = 12 \text{ km}$$

一般的音频放大电路和音响设备的几何尺寸(d)远比这个波长(λ)为小,均应视为集总参数电路。

表1-1列举了我国国家标准中的部分图形符号。采用这些图形符号,可以画出表明实际电路中各个器件互相连接关系的电原理图。例如图1-1(a)表示日常生活中使用的手电筒电路,它由干电池、灯泡、开关和手电筒壳(连接导体)组成。图1-1(b)是用电气图形符号表示的手电筒电路的电原理图。又如图1-2(a)表示一个最简单的晶体管放大电路,它由传声器、晶体管、电阻器、电池、变压器和扬声器组成,其电原理图如图1-2(b)所示。

表1-1 部分电气图用图形符号

(根据国家标准 GB 4728)

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		传声器		电阻器	
连接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		线圈, 绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁心变压器	
灯		运算放大器		直流发电机	
电压表		电池		直流电动机	

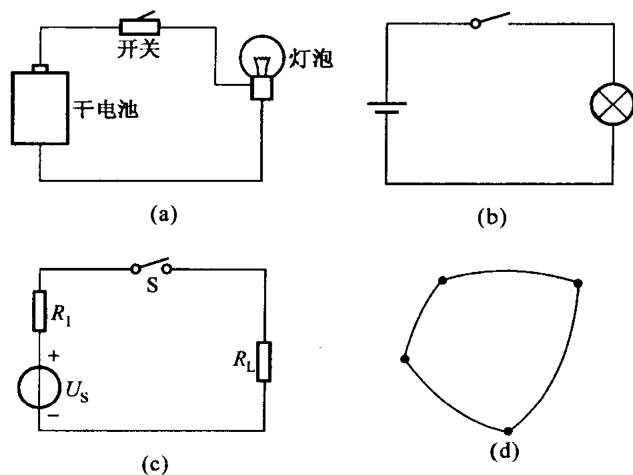


图1-1 手电筒电路

(a) 实际电路 (b) 电原理图 (c) 电路模型 (d) 拓扑结构图

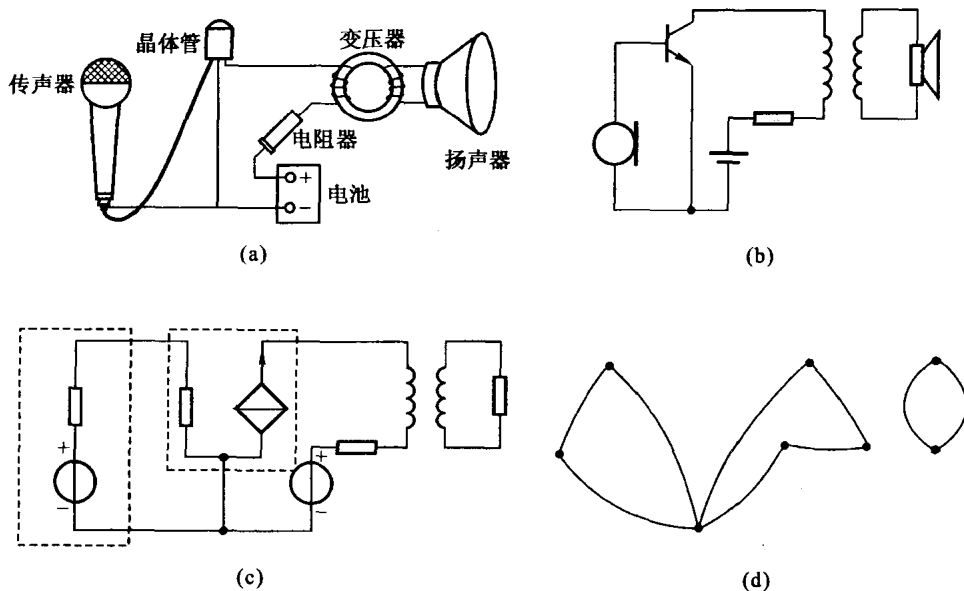


图 1-2 晶体管放大电路

(a) 实际电路 (b) 电原理图 (c) 电路模型 (d) 拓扑结构图

二、电路模型

研究集总参数电路特性的一种方法是用电气仪表对实际电路直接进行测量。另一种更重要的方法是将实际电路抽象为电路模型,用电路理论的方法分析计算出电路的电气特性。运用现代电路理论,借助于计算机,可以模拟各种实际电路的特性和设计出电气性能良好的大规模集成电路。

如何将实际电路抽象为电路模型呢?实际电路中发生的物理过程是十分复杂的,电磁现象发生在各器件和导线之中,相互交织在一起。对于集总参数电路,当不关心器件内部的情况,只关心器件端钮上的电压和电流时,可以定义一些理想化的电路元件来近似模拟器件端钮上的电气特性。例如,定义电阻元件是一种只吸收电能(它可以转换为热能或其他形式的能量)的元件,电容元件是一种只存储电场能量的元件,电感元件是一种只存储磁场能量的元件。用这些电阻、电容和电感等理想化的电路元件近似模拟实际电路中每个电气器件和设备,再根据这些器件的连接方式,用理想导线将这些电路元件连接起来,就得到该电路的电路模型。例如,图 1-1(c)是图 1-1(a)电路的电路模型。图 1-2(c)是图 1-2(a)电路的电路模型。这些电路模型是用电路元件的图形符号表示的,常称为电路图。在电路分析中,为了便于看出电路模型中各元件的连接关系,常采用仅仅表示元件连接关系的拓扑结构图,如图 1-1(d)和图 1-2(d)所

示。表1-2列举了本书采用的部分电路元件的图形符号,其中有一些符号与电气图所用的图形符号相同。这些电路元件的定义和特性将在以后陆续介绍。

表1-2 部分电路元件的图形符号

名 称	符 号	名 称	符 号	名 称	符 号
独立电流源		理想导线		电 容	
独立电压源		连接的导线		电 感	
受控电流源		电位参考点		理想变压器 耦合电感	
受控电压源		理想开关		回转器	
电 阻		开 路		理想运放	
可变电阻		短 路		二端元件	
非线性电阻		理想二极管			

电路模型近似地描述实际电路的电气特性。根据实际电路的不同工作条件以及对模型精确度的不同要求,应当用不同的电路模型模拟同一实际电路。例如图1-3(a)所示线圈,在低频交流工作条件下,用一个电阻和电感的串联来模拟,如图(b)所示;在高频交流工作条件下,则要再并联一个电容来模拟,如图(c)所示。

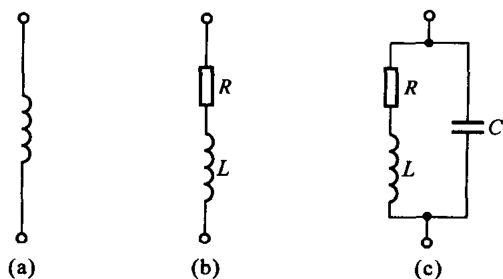


图1-3 线圈的几种电路模型

(a) 线圈的图形符号 (b) 线圈通过低频交流的模式 (c) 线圈通过高频交流的模式

将实际电路抽象为电路模型的工作,需要对各种电气器件的特性有深入的了解,有时非常复杂和困难。本书只能涉及一些简单的情况,其目的是为了牢固地树立“电路模型”的概念。本课程的主要任务是研究电路模型(简称为电路)的

各种分析方法,其目的是通过对电路(模型)的分析研究来预测实际电路的电气特性,以便指导改进实际电路的电气特性和设计制造出新的实际电路。电路的研究问题可以分为两类:一类是电路分析,已知电路结构和元件特性,分析电路的特性;另一类是网络^①综合,根据电路特性的要求来设计电路的结构和元件参数。本课程是电路的入门课程,主要讨论电路分析问题。

§ 1-2 电路的基本物理量

电路的特性是由电流、电压和电功率等物理量来描述的。电路分析的基本任务是计算电路中的电流、电压和电功率。

一、电流和电流的参考方向

带电粒子(电子、离子)定向移动形成电流。电子和负离子带负电荷,正离子带正电荷。电荷用符号 q 或 Q 表示,它的 SI 单位为库[仑]^② (C)。

单位时间内通过导体横截面的电荷定义为电流,用符号 i 或 I 表示,其数学表达式为

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

电流的 SI 单位是安[培](A)。

量值和方向均不随时间变化的电流,称为恒定电流,简称为直流(dc 或 DC),一般用符号 I 表示;量值和方向随时间变化的电流,称为时变电流,一般用符号 i 表示;量值和方向作周期性变化且平均值为零的时变电流,称为交流(ac 或 AC)。

习惯上把正电荷移动的方向规定为电流方向(实际方向)。在分析电路时,往往不能事先确定电流的实际方向,而且时变电流的实际方向又随时间不断变动,不能够在电路图上标出适合于任何时刻的电流实际方向。为了电路分析和计算的需要,任意规定一个电流参考方向,用箭头标在电路图上。若电流实际方向与参考方向相同,电流取正值;若电流实际方向与参考方向相反,电流取负值。根据电流的

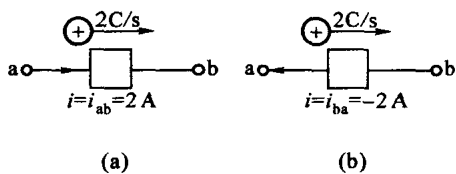


图 1-4 电流的参考方向

① 本书中网络(network)与电路(circuit)同义。

② 去掉方括弧为全称,去掉方括弧和其中的字为简称,以下同。本书只采用以 SI 为基础的我国法定计量单位,一般不介绍其他单位制单位。

参考方向以及电流量值的正负,就能确定电流的实际方向。例如在图 1-4 所示的二端元件中,每秒钟有 2 C 正电荷由 a 点移动到 b 点。当规定电流参考方向由 a 点指向 b 点时,该电流 $i = 2 \text{ A}$ [图 1-4(a)];若规定电流参考方向由 b 点指向 a 点时,则电流 $i = -2 \text{ A}$ [图 1-4(b)]。若采用双下标表示电流参考方向,则写为 $i_{ab} = 2 \text{ A}$ 或 $i_{ba} = -2 \text{ A}$ 。电路中任一电流有两种可能的参考方向,当对同一电流规定相反的参考方向时,相应的电流表达式相差一个负号,即

$$i_{ab} = -i_{ba} \quad (1-2)$$

今后,在分析电路时,必须事先规定电流变量的参考方向。所计算出的电流 $i(t) > 0$,表明该时刻电流的实际方向与参考方向相同;若电流 $i(t) < 0$,则表明该时刻电流的实际方向与参考方向相反。

二、电压和电压的参考极性

电荷在电路中移动,就会有能量的交换发生。单位正电荷由电路中 a 点移动到 b 点所获得或失去的能量,称为 ab 两点的电压,即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

其中 dq 为由 a 点移动到 b 点的电荷量,单位为库[仑](C), dW 为电荷移动过程中所获得或失去的能量,单位为焦[耳](J),电压的单位为伏[特](V)。

将电路中任一点作为参考点,把 a 点到参考点的电压称为 a 点的电位,用符号 v_a 或 V_a 表示。在集总参数电路中,元件端钮间的电压与路径无关,而仅与起点与终点的位置有关。电路中 a 点到 b 点的电压,就是 a 点电位与 b 点电位之差,即

$$u_{ab} = v_a - v_b \quad (1-4)$$

量值和方向均不随时间变化的电压,称为恒定电压或直流电压,一般用符号 U 表示;量值和方向随时间变化的电压,称为时变电压,一般用符号 u 表示。

习惯上认为电压的实际方向是从高电位指向低电位。将高电位称为正极,低电位称为负极。与电流类似,电路中各电压的实际方向或极性往往不能事先确定,在分析电路时,必须规定电压的参考方向或参考极性,用“+”号和“-”号分别标注在电路图的 a 点和 b 点附近。若计算出的电压 $u_{ab}(t) > 0$,表明该时刻 a 点电位比 b 点电位高;若电压 $u_{ab}(t) < 0$,表明该时刻 a 点的电位比 b 点电位低。例如图 1-5 所示 n 端元件中,若已知 $u_{12}(t_1) = 20 \text{ V}$,则表明在 t_1 时刻,1 点的电位比 2 点的电位高 20 V。若 $u_{12}(t_2) = -10 \text{ V}$,则表明在 t_2 时刻,1 点的电位比 2 点的电位低 10 V,或 2 点电位比 1 点电位高 10 V。对电路中同一电压规定相反参考极性时,相应的电压表达式相差一个负号,即

$$u_{ab} = -u_{ba} \quad (1-5)$$