



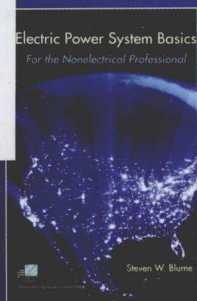
Steven W. Blume

电力系统基础

Electric Power System Basics

For the Nonelectrical Professional

〔美〕史蒂芬·W·布鲁姆 著
余华兴 译



WILEY



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



Steven W. Blume

电力系统基础

Electric Power System Basics

For the Nonelectrical Professional

[美] 史蒂芬·W·布鲁姆 著
余华兴 译



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

Electric Power System Basics For the Nonelectrical Professional/Steven W. Blume
ISBN:978-0470-129876

Copyright©2007 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, scanning, or otherwise, except as permitted under Section 107 or 108 of the 1976 United States Copyright Act, without either the prior written permission of the Publisher, or authorization through payment of the appropriate per-copy fee to the Copyright Clearance Center, Inc., 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, (978)750-8400, fax (978)750-4470, or on the web at www.copyright.com. Requests to the Publisher for permission should be addressed to the Permissions Department, John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, (201)748-6011, fax (201)748-6008, or online at <http://www.wiley.com/go/permission>.

All Rights Reserved. This translation published under license.

陕西省版权局著作权合同登记号:图字 25-2014-243 号

图书在版编目(CIP)数据

电力系统基础(美)布鲁姆(Blume, S. W.)著;余华兴译.

—西安:西安交通大学出版社,2015.3

书名原文:Electric power system basics for the nonelectrical professional

ISBN 978-7-5605-7299-4

I. ①电… II. ①余… III. ①电力系统—基本知识 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 092128 号

书 名	电力系统基础
著 者	(美)史蒂芬·W·布鲁姆
译 者	余华兴
责任编辑	曹 朕 陈 昕
责任校对	李 文

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路10号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)

传 真 (029)82668280
印 刷 中煤地西安地图制印有限公司

开 本	700mm×1000mm	1/16	印张 12.75	字数 227 千字
版次印次	2015 年 7 月第 1 版	2015 年 7 月第 1 次印刷		
书 号	ISBN 978-7-5605-7299-4/TM·105			
定 价	69.00 元			

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

前 言

关于此书

这本书旨在面向非电子专业的人员,使他们对规模比较庞大的电力电子系统有一个基本的理解,包括有关术语、电学概念、设计参考、建设实践、工业标准,以及正常和紧急情况下的控制室操作,还有维护、消费、通信和安全。所提供的一些实践性的例子、图片、电路图和说明将帮助读者获得对电力电子系统的基本了解。写这本书的目的是让非电力电子专业的读者对电力系统如何工作有一个逐步深入的了解,从电子产生到电线分布再到已连接应用的消费。

这本书从术语和用在工业领域的电气科学的基本概念开始,接着对电气电力的产生、传输和分布分别进行阐述。读者可以全方位地接触到互联电力系统的重要的方方面面。其他的话题涉及到能源管理、电气系统能量的转换和消费特征,以及控制管理方面,以帮助读者理解现代电力系统,便于更为高效地和经验丰富的工程师、设备制造商、区域人员、监管官员、议案提议者、政客、律师和其他工作在电力行业中的人交流。

章节小结

以下是每一章节的主要内容概览。我们认为知道何时何处了解具体内容,以及这本书的架构组织,将有助于读者更加容易理解素材及内容。所使用的语言反映了实际的工业术语。

第1章对于我们今天知道的电力系统提供了主要且宽广的历史讨论。接着提供了系统主要架构,并伴随着电子电力系统内主要分支的讨论。对基本定义和常识性的术语,如电压、电流、功率和能量也有所讨论。基础的概念,如直流电流和交流电流(dc和ac)、单相和三相产生、

负载类型以及电力系统效率也都被提及,用来为更多高级的学习做铺垫。

第1章还展示了非常基本的电子学公式,这些公式也会偶尔出现在本书的其他位置。有意这样做是为了帮助解释有关电力电子系统的术语和基本概念。读者对数学公式不应太过恐慌或刻意关注,这些公式旨在描述和解释关系。

关于发电的基本概念在第2章出现。这些概念包括使电机和发电机工作的基本原理,伴随着不同种类的发电机的旋转转子的驱动原始动力,以及与电子电力产生有关的主要部件。这一章阐述的基本原理适用于整个电子电力系统的基础。贯穿整本书,本章阐述的电力学原理将贯彻于发展一个成熟的电子电力系统的整个环节中。

阐述完有关发电机的基本原理,接着会讨论在电力设备中用来旋转发电机轴干部分的不同的主要转子。有关主要转子的讨论包括使用蒸汽、水力发电和风力涡轮机。一些非转动的发电机电源也在讨论之列,例如光伏系统。有关不同主要转子的基本环境问题也有所提及。

接着讨论了关于每一种电力设备的主要设计结构部件,例如锅炉、冷却塔、锅炉供给泵以及高低压系统。读者应该对电力设备的基础有个基本的了解,因为这些都关系到电子电力系统的产生。

第3章解释了使用超高电压电力线路相对于低电压电力线路的原因。并讨论了传输线的基本部件,例如导体、绝缘体、空气沟以及屏蔽等。直流电传输线和交流电传输线分别从地下和空中传输两种方式进行了比较。读者此时应该对传输线设计参数和使用高电压传输提高电力电子系统的效率有更好的理解。

第4章涵盖了在变电站使用的设备,变电站将非常高电压的电子电力能量转换成更多可使用的形式,用来分发和损耗。我们将会讨论这些设备(如转换器、断路开关、隔离开关、调节器等)本身和它们在系统保护、维护操作和系统控制操作中的关系。

第5章描述了主要配电系统,包括地上的和地下的,它们是如何被设计、操作以及用于住宅、商业和工业消费者的。我们将重点关注变电站和消费端(如服务接入设备)之间的配电系统。同时还将涉及到地上和地下传输线配置、电压标准和在配电系统中常用的设备仪器等。读者

将对配电系统的设计和它如何对终端用户提供稳定可靠的电力有所了解。

关于分布在消费服务接入设备(如分布点)和实际负载(消费类设备)之间的设备将在第 6 章讨论。用来连接住宅、商业和工业负载的设备也包括在内。紧急发电机组和不间断电源供应系统(UPS)将会随着大电力消费端的发布、问题和解决方案一起展开讨论。

关于系统防护和个人防护(如安全)的区别将在第 7 章给予解释,这一章将专注于“系统防护”,即电子电力系统如何避免设备失效、雷击、疏忽操作和其他会导致系统干扰的因素。“个人防护”在第 10 章讨论。

稳定的服务取决于正确地设计和周期性地检测保护继电器系统。这些系统和它们的保护继电器用来解释传输线、变电站和输送线路。读者将学习到整个电子电力系统是如何自我保护的。

第 8 章首先从对北美三个主要电网的讨论开始,内容包括这些电网在地域上是如何分割、操作、控制和规划的。重点将解释各个独立的电力公司是如何连接以改善整体性能、可靠性、稳定性和整个电网的安全。其他讨论的内容包括发电/负载平衡、资源规划以及在正常和紧急条件下的操作条件。在本章的最后还会讨论减少电力中断的方法,例如轮流停电、节约用电、分区停电和其他服务可靠性问题。

第 9 章的主题是系统控制中心,它在日常的电力系统操作中是极其重要的。这一章解释了系统控制中心如何操作监视器,使用先进的计算机程序和电子通信系统控制位于变电站外面的电力线路和实际的负载地区的设备。这些工具确保电力系统操作人员经济地调度电力以满足负荷电力能量要求,并在正常和紧急维护情况下控制设备。本章还包括对 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition, 监视控制和数据采集)和 EMS(Energy Management Systems, 紧急管理系统)的解释和应用。

本章还讨论了不同功能和优点的多种类型的通信系统,使用这些系统将系统控制中心与远程终端连接起来。这些电信系统包括光纤、微波、电力线载波、无线电和铜线电力线路。提供高速防护继电器、客户服务呼叫中心和数字数据/语音/视频通信服务的方法也在此基础上加以讨论。

这本书在第 10 章总结,主要讨论电力安全:在电力系统及其周围的个人保护和安全工作流程。描述了个人防护设备,例如橡胶绝缘产品和有效接地的必要设备。同时讨论了常规安全操作流程和安全操作方法。理解“接地端电势上升”“接触电势”和“逐级电势”,对于在电力线路、变电站甚至家里的适当安全防护有重要作用。

请注意在大多数章节的一些部分中,对于详细论述的一些概念还提供了额外的细节和背景描述。这些部分被标以“选读”,读者也可以跳过而不影响对主要内容的理解。

史蒂芬·W·布鲁姆

卡尔斯巴德,加利福尼亚

2007 年 5 月

致 谢

我谨以个人的名义向为我的事业的成功和这本书的成功出版做出贡献的人们表示感谢。致支持我超过 40 余年的妻子,谢谢你的指导、理解和鼓励,还有很多很多。谢谢 Michele Wynne,非常感激你的热情、组织能力和富有创造力的思想。谢谢 Bill Ackerman,你是一个追求专业技术和课件不断完善的达人,总是向我们呈现出你的职业性和负责任的一面。谢谢 John McDonald,非常感激你的鼓励、视野和认可。

S. W. B

目 录

前言

致谢

第 1 章 系统概述、术语和基本概念	(1)
1.1 电力系统的历史	(1)
1.2 系统概述	(2)
1.3 术语和基本概念	(3)
第 2 章 发电	(10)
2.1 交流电压发电	(10)
2.2 三相交流发电机	(11)
2.3 实时发电	(16)
2.4 发电机连接方式	(16)
2.5 定子的三角形连接和星形连接	(17)
2.6 发电站和原动机	(18)
第 3 章 输电线路	(36)
3.1 输电线路	(36)
3.2 导体	(38)
3.3 输电线路设计参数(选读)	(42)
3.4 地下输电线路(选读)	(43)
3.5 直流输电线路(选读)	(44)
第 4 章 变电所	(46)
4.1 变电所设备	(46)
4.2 变压器	(47)
4.3 调压器	(55)

4.4	断路器	(60)
4.5	重合器	(65)
4.6	隔离开关	(67)
4.7	避雷器	(69)
4.8	电气总线	(70)
4.9	电容器组	(71)
4.10	电抗器	(73)
4.11	静态无功补偿器	(74)
4.12	调度室	(75)
4.13	预防性维护	(76)
第5章	电力配送	(77)
5.1	配电系统	(77)
5.2	变压器连接(选读)	(86)
5.3	保险丝和保险器	(93)
5.4	下杆和地磁极	(94)
5.5	地下服务	(94)
第6章	消耗	(101)
6.1	电能消耗	(101)
6.2	电力系统效率	(104)
6.3	功率因数	(105)
6.4	供应和需求	(105)
6.5	需求侧管理	(106)
6.6	计量	(107)
6.7	基于性能的费率	(110)
6.8	服务入口设备	(111)
第7章	系统防护	(121)
7.1	两种防护类型	(121)
7.2	系统防护设备和概念	(122)
7.3	配电保护	(126)
7.4	传输线防护	(128)
7.5	变电站防护	(130)
7.6	发电机防护	(131)

7.7	发电机同步	(132)
7.8	全套传输线防护	(134)
第 8 章	互联电力系统	(136)
8.1	互联电力系统	(136)
8.2	北美电网	(137)
8.3	监管环境	(138)
8.4	交换计划	(140)
8.5	互联系统操作	(141)
8.6	系统需求和发电机负载	(145)
8.7	电网的可靠运行	(148)
第 9 章	系统控制中心和通信控制	(152)
9.1	电力系统控制中心	(152)
9.2	监视控制和数据采集(SCADA)	(154)
9.3	能量管理系统	(156)
9.4	通信	(159)
第 10 章	人身保护(安全)	(166)
10.1	电气安全	(166)
10.2	个人防护	(166)
附录		(175)
附录 A	均方根值的推导	(175)
附录 B	功率因数的图形分析	(176)
术语表		(178)

第 1 章

系统概述、术语和 基本概念



学习目标

- ✓ 讨论电力的历史。
- ✓ 呈现今天电子电力系统的基本面貌。
- ✓ 讨论在电力工业领域中的通用术语和基本概念。
- ✓ 解释电压、电流、功率和能量这些关键术语。
- ✓ 讨论电力特性和术语关系。
- ✓ 描述消耗负载的三种类型和它们的特点。

1.1 电力系统的历史

1706 年出生的本杰明·富兰克林因为发现了电而闻名于世。在 18 世纪 50 年代早期,他开始学习电学。他通过包括风筝实验的观察,明确了电的特性。他知道闪电十分强大也非常危险。1752 年著名的风筝实验,是在风筝顶部放置一个尖的金属杆,并在风筝线尾部放置一个金属钥匙,风筝线穿过钥匙系到一个莱顿瓶上(莱顿瓶包含两端导体,被中间的绝缘体分隔开)。富兰克林用一个干丝巾抓住风筝线,丝巾将雷电与人隔离开。他在雷电中放飞风筝。他注意到风筝的麻绳上有一些松散的线头全都直立了起来,彼此独立。(大麻纤维是一种多年生的美国植物,印第安人用它来制作麻绳。)他继续用手拉着钥匙,结果感觉到了微弱的电击。

在 1750 至 1850 年间,伏特、库伦、高斯、亨利、法拉第等其他科学家发现了电

和磁的多项重大原理。人们发现电流动可以产生磁场,运动的磁场在电线上又可以产生电流。这些原理催生了很多新的发明,例如电池(1800年)、发电机(1831年)、电机(1831年)、电报(1837年)、电话(1876年)等及其他有趣的发明。

1879年,托马斯·爱迪生发明了高效的电灯泡,和我们现在使用的灯泡类似。1882年,他将电子植物首次放置在古老的珍珠街上,并在纽约市里搭建了第一个由1万个电灯泡组成的直流电流分布系统。19世纪80年代后期,供给电机的功率要求24小时服务,显著地提升了用于传输和其他工业应用的电力供应需求。到了19世纪80年代结束时,美国境内分布着少数集中的小电力变电站。每个变电站中心服务范围只有少量几个街区,因为传输直流电流的能力有限。在直流电流系统中,电压也无法增大或减小,急需一种可以远距离传输电能功率的系统。

为了解决更远距离传输电力的问题,乔治·威斯汀豪斯发明了一种叫做“变压器”的设备。变压器使得电能有效地传输更远的距离,电力发电站向很远的家庭和商业体提供电力成为可能。变电站的实施要求配电系统不使用直流电流,而使用交流电流。

1896年尼亚加拉大瀑布的水力发电站开启了发电站远离负载消费地区的时代。尼亚加拉发电站向20英里以外的布法罗和纽约提供电力。有了尼亚加拉发电站,威斯汀豪斯更加明确了交流电流远距离传输电力的优越性。尼亚加拉也建立了第一个单一传输线向多个大规模消费终端传输电能的大型电力系统。

直到20世纪初,交流电流电力系统遍布整个美国。这些电力系统互相连接,形成了今天我们熟悉的美国和加拿大的三个主要电力网络。本章节以下部分将要讨论的,正是基于这段历史在当代电子电力系统里涉及到的基本术语。

1.2 系统概述

电子电力系统是一个实时传输的系统。实时是指开关开启,能量即刻产生、传输和供给。电子电力系统不像供水系统或是供气系统这样的存储系统,而是发电机根据需要发电。

图1-1展示了电子电力系统的基本组成部分。该系统从发电开始,发电厂产生电能,传输到电力站,转换成更适合高效远距离传输的高压电能。发电厂还将其他多种能量转化为电能,比如热能、机械能、水力、化学能、太阳能、风能、地热能、核能及产生电能的其他能量。在电子电力系统中,高压电力传输线能有效地将电能传输至很远距离的负载终端。最后,变电站将这些高压电能转换为低电压电能,用来在配电站电力传输线之间传输,便于电能传输到居民、商业及工业用电场所等终

端的传输配电系统。

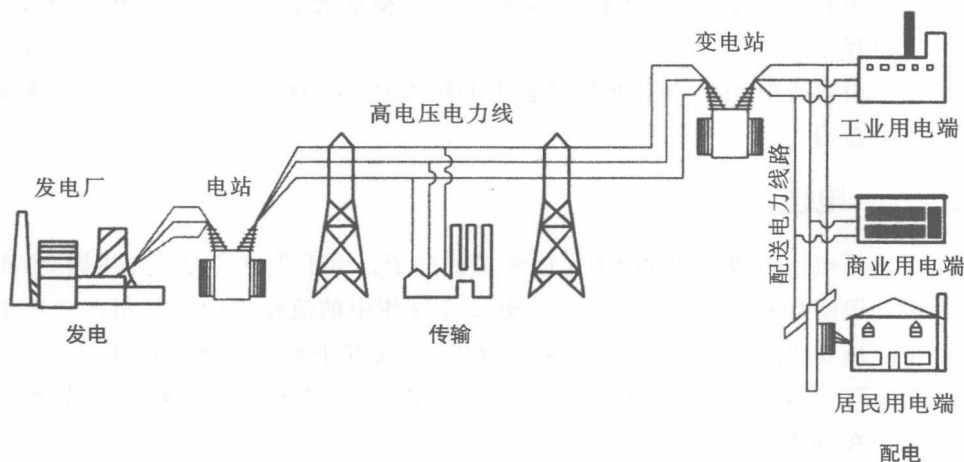


图 1-1 系统综述

实际使用的全功能电子电力系统比图 1-1 显示的组成结构复杂得多，不过这些基本的原理、概念、理论和术语都是一样的。我们先从基础开始，随着课程的深入逐渐添加复杂的内容。

1.3 术语和基本概念

我们先从对基本术语和概念的理解开始，这些术语常用于工业领域专业，专家们也用来描述和讨论由小至大的电力系统中的电力问题。请务必理解这些基本的术语和概念。它们将贯穿整本书，方便我们建立完整的电子电力系统知识。

1.3.1 电压

第一个需要理解的术语是电压。电压是电路中使一切运转的势能来源，也被称做电源电动势或 EMF。电源电动势(EMF)的基本测量单位是伏特。伏特这一名字是用来纪念发明了电池的意大利物理学家亚历山德罗·朱塞佩·安东尼奥·阿纳斯塔西奥·伏特(1745—1827)。电动势用“ e ”或“ E ”表示(一些参考书也用符号“ v ”或“ V ”表示)。

电压是电子电力系统的电势能量源。电压依赖电位或电势工作，是其激励和驱动力，常出现在两点之间。

通常电压是恒定的(如直流)或交变的。电子电力系统就是基于交流变化的电

压应用,将电压从低压 120 V 的住宅系统变到超高 765000 V 的传输系统。在电子电力系统中有低压转换和高压转换,这些电压变换范围基本覆盖了发电、配电、负载的全过程。

在水力系统中,电压与将水推进管道的压力对应。这个压力即便在水不流动时也是存在的。

1.3.2 电流

电流是指在导体(如电线)中定向流动的电子。电子受电场力的作用影响,在电路或一段闭合的电路中定向流动。电子在导体中的流动方向总是指向电压负极。电流用安培作为测量单位,通常写做安(一安等于每秒在导体中流动 628×10^{16} 个电子)。在一段电路中的电子总量不会减少。由于导体的电阻特性(如摩擦力),电子在导体中流动会产生热量。

电压总是驱动电流,所以当有一个完整的电路或闭合电路时,电压将会产生电流。电路中的阻抗将会减小电流并产生热量。此时电源中的电动势能量将被转化为电子流动的动能。这个动能接着被负载(如消耗设备)利用并转化为有用的功。

电流在导体中流动可以形象地类比为乒乓球在一个管子中顺序排列。参考图 1-2,管道一端的压力(电压)推着乒乓球在管子里运动。在电源端(电池)收集管子里的球,并将它们按照号码累加的顺序排列。管道里的每个球在管道里依次流动形成电流。电子朝某一方向定向流动形成电流。电流用符号“ i ”或“ I ”表示。

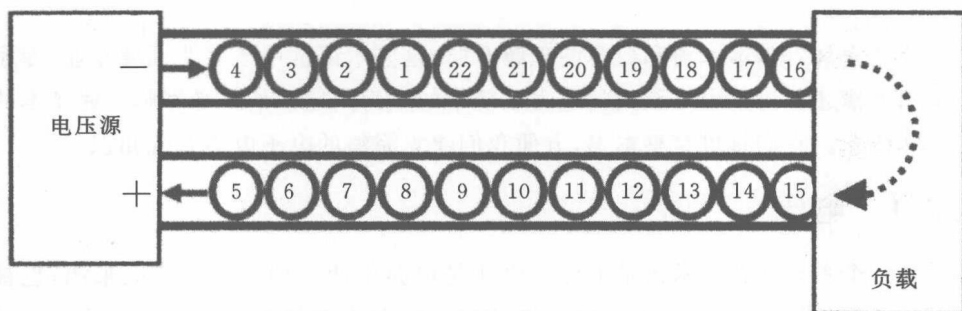


图 1-2 电流流动

1.3.2.1 空穴流和电子流

在电子离开原子向电源的正极运动时,电子流发生,并留下一个空穴。这些空穴可以理解为电流从电源的正极流向负极。所以,当电子流在电路里朝某一方向流动时,同一电路中的空穴朝与电子流相反的方向流动。电子流或空穴流的方向

即为电流方向。在电路系统里,我们将“空穴流动”的方向定义为电流的标准方向。这样定义的原因是电池正负极的概念确立要远早于电子发现的时间。早期的实验简单地将电流的方向定义为从电池正极流向负极的方向,而并非真正知道电子实际流动的方向。

接下来我们具体讨论电线里电流流动的重要现象,即导体中电流流动产生磁场(见图1-3)。这是一个和重力现象类似的物理现象。只需记住,在一根电线里,当电压驱动电子定向运动时,电线上会自动产生磁场。注意:图1-3为根据“右手法则”所示的空穴流方向,即默认的电流方向示意图。

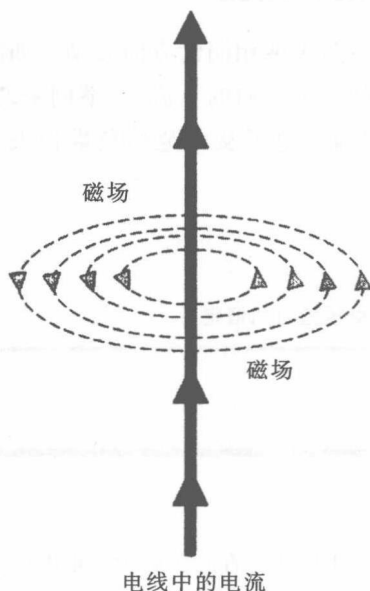


图1-3 电流和磁场

1.3.3 功率

功率的基本测量单位是瓦特。瓦特以发明蒸汽机的科学家詹姆斯·瓦特(1736—1819)命名。电压本身不做功,电流本身也不做任何功,但是电压和电流共同作用却能产生实际的功。电压值乘以电流值等于功率,功率用来产生实际的功。

举例来说,电力可以用来创造热能、旋转马达、点亮灯泡等。功率等于电压和电流共同作用是指,如果电压或电流的值为零,那么功率值也会为零。例如,电压是墙上的插座,一个烤面包机插入插座里,没有电流产生,因此也就没有功率。直到打开了插座上的开关(电压),电线里才会产生电流。

1.3.4 能量

电能是电子功率和时间的乘积。负载用电(电流产生)的时间乘以负载产生的功率(瓦特)是能量。测量能量的单位是瓦特·小时。在电子电力系统中,对于居民用电领域,表征能量更为常用的单位是千瓦时(kWh,意为1000瓦特·小时),而对于大规模的工业用电和电力公司本身,单位是兆瓦时(MWh,意为1000000瓦特·小时)。

1.3.5 直流(dc)电压和电流

直流电流是指电子在电路中朝相同的方向流动。如图1-4所示,当电压值恒定时,就会产生直流电流(如一个方向的电流)。举例来说,一个电池当连通在一段电路里时,就会产生直流电流。电子从电池的负端出发,沿着电路朝电池的正端流动。

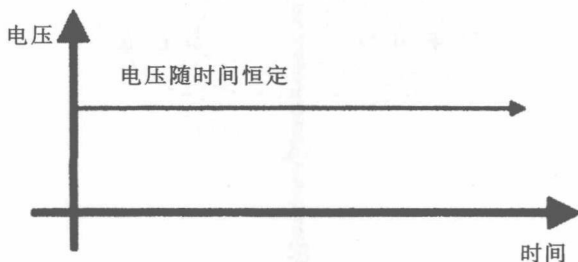


图1-4 直流电流(直流电压)

1.3.6 交流(ac)电压和电流

当电源(如电压)的正负极交替时,在这段电路里的电流流动方向也会在正极和负极之间转换。所以,交流电流产生在电压源交替变换时。

图1-5描述的是电压值从零变到正值的最大值,从该最大值减小到零并继续减小至负值,最后再次回到零的完整周期变化过程。在数学领域里,这描述的是一个正弦波。这个正弦波可以在一秒、一分钟、一个小时或一天之内重复很多次。我们把完成完整正弦波的变化过程所用的以秒为单位的时间定义为这个正弦波的周期。