

高等学校教学用书

电 工 学

上 册

亚·謝·卡薩特金 著
米·亚·毕烈卡林

高等教育出版社

高等学校教学用书



电 工 学

上 册

亚·谢·卡萨特金，米·亚·毕烈卡林著

王众託 蔣德川 黄必信 译校
王 健 邓伟霖 王宏禹

高等教育出版社

本书原系根据苏联国立动力出版社 (Госэнергоиздат) 出版的亚·谢·卡萨特金 (А. С. Касаткин)、米·亚·毕烈卡林 (М. А. Перекатин)、保·谢·谢尔盖业夫 (П. С. Сергеев) 所著“电工学” (Электротехника) 1952 年重编第四版译出, 曾按 1953 年重编第五版和 1955 年由卡萨特金与毕烈卡林改写的第六版予以修订, 现又根据 1958 年重编第七版重加译校。新版原书经苏联高等教育部审定为高等学校非电工专业的教科书。

原书第七版与第六版相比较, 大部章节都作了重大的修订, 有一些章节, 如半导体、非线性电路的分析计算、交流电路中的谐振现象、四端网络、电感和电容对电流曲线的影响、电机放大器、半导体二极管、半导体三极管和半导体放大器等都是重新编写的。在 1953 年第五版中原来包含有“电气照明”一章, 在 1955 年第六版中曾将这一章删去, 而现在的 1958 年第七版又将这一章重新补入。此外, 在新版中, 在某些章的后面还附有相应的教学用的实验材料。

本书中译本分上、下两册出版。上册包括第一至第十二章, 内容包括直流电路、直流电路的计算方法、非线性直流电路、电磁铁和永久磁铁、电工设备的机电相互作用和电感、电工设备的电容和绝缘问题、正弦交流电路、三相电路、非正弦周期电流、交流非线性电路、电工装置里的过渡历程、电工量测。

先后参加本书前三版译校工作的有: 王众託、蒋德川、黄必信、王宏禹、王健、邓偉霖等同志。本版的修订工作是由我社编辑部负责的。

电 工 学

上 册

亚·谢·卡萨特金, 米·亚·毕烈卡林著

王众託等译校

高等教育出版社出版 北京宣武门内大街 7 号

(北京市书刊出版业营业许可出字第 054 号)

上海市印刷四厂印刷 新华书店发行

统一书号 15010·863 开本 850×1169 1/32 印张 9 11/16
字数 248,000 印数 1—22,000 定价 (4) 册 1.10

1953 年 11 月上册第 1 版 (共印 19,500 册)

1954 年 1 月中册第 1 版 (共印 15,500 册)

1954 年 5 月下册第 1 版 (共印 24,500 册)

1957 年 9 月合订本第 2 版 (共印 28,000 册)

1957 年 9 月第 2 版 1960 年 3 月第 3 版 (修订本)

1960 年 3 月上海第 9 次印刷

原作者中譯本序

中華人民共和國高等教育出版社即將出版我們所編的高等學校電工學教科書的中文譯本。我們這本書能夠幫助新中國的青年建設者們掌握電工技術，實感毋任榮幸。

中國的文化，歷史悠久，早在幾千年前，就已經開始萌芽滋長。但是中國人民過去長期地處於封建政權的統治下，近百年來，又遭受到帝國主義者深重的壓迫。因此人民群眾中潛在的天才大半得不到應有的發展。

我們的國家，在我們的共產黨領導下，首先開始了社會主義社會的建設，接着又開始建設共產主義社會。現在，中國人民在中國共產黨的領導下，擺脫了帝國主義加於他們身上的桎梏，開始向着自由發展自己生產力的道路上邁進。我國人民十分關切而且熱烈同情地注視着兄弟般的中國人民的勝利，並且隨時準備給予援助。

親愛的讀者們！我們衷心希望這本書能夠幫助你們很快地成為建設自由中國新生活的學者和工程師。如果這個任務能夠很好地完成，那麼我們在想到友好的中華人民共和國的文化與工業建設的勝利中也有我們平凡的一分時，一定覺得十分欣幸。

作者謹識

原 序

本书这一版(第七版)的材料已作了重大的修改和重写。作者认为自己有责任尽力改善本书的论述方法,并根据电工技术的进展补充新的材料。在新版中,下列各节予以重写:半导体、非线性电路的分析计算、交流电路中的谐振现象、四端网络、电感和电容对电流曲线形状的影响、电机放大器、半导体二极管、半导体三极管和半导体放大器等;“电气照明”一章又重新加入,本书的大部分章节都作了重大修订。

此外,按照苏联国立动力出版社编辑部的意见,在某些章的后面附有相应的教学用的实验材料。这些实验远未包括全部的实验教材。书中没有包括磁路、过渡历程、电气测量仪器、同步电机以及电子学等方面的实验。如果要包括课程全部课题的实验,书的篇幅势必过于庞大。现在本书中所推荐的全部实验仅作为实验课指导的一些例子。整个实验课估计约需50学时,在设备相当简单的实验室内就可以实现。

在修订本书时,作者尽可能采纳许多科学工作者所提出的一系列宝贵的意见。作者有义务愉快地向他们表示深深的感谢。

第1—11章,除了§1-9、2-8、8-4、7-12、7-28、7-24、7-25、7-26、7-27、7-28、8-9、9-5和10-12外是由米·亚·毕烈卡林写的,其余是由亚·谢·卡萨特金写的。

目 录

原作者中譯本序	vii
原序	viii
緒論	1
第一章 直流电路	5
1-1. 电路和它的元件	5
1-2. 导电材料	10
1-3. 半导体	12
1-4. 原电池和蓄电池	15
1-5. 电流的功和功率	21
1-6. 电源和負載的串联	23
1-7. 导綫內的电压損失	25
1-8. 导綫发热的計算	27
1-9. 熔断保險器	29
第二章 直流电路的計算方法	33
2-1. 应用克希荷夫定律計算复杂电路	33
2-2. 混联的計算	37
2-3. 三角形电阻和星形电阻的等效互换	39
2-4. 电源的并联	43
2-5. 节点电压法	45
2-6. 回路电流法	48
2-7. 重迭法	50
2-8. 实验. 复杂直流电路	51
第三章 非綫性的直流电路	54
3-1. 非綫性的电路元件	54
3-2. 含有单个非綫性电阻的不分岔电路的图解	55
3-3. 含有单个电源的分岔电路的图解	56
3-4. 非綫性电路的解析計算法	57
第四章 电磁鉄和永久磁鉄	61

4-1. 磁場	61
4-2. 鉄磁性材料的磁性	66
4-3. 磁路的計算	70
4-4. 磁阻	73
4-5. 永久磁鉄	74
第五章 电工设备的机电相互作用和电感	77
5-1. 在磁場內的載流導綫	77
5-2. 兩載流導綫的相互作用	79
5-3. 电磁感应	80
5-4. 电感	84
5-5. 互感	88
5-6. 电磁力的計算	91
5-7. 有感电路的接通和短路	93
第六章 电工设备的电容和絕緣問題	97
6-1. 电場	97
6-2. 絕緣材料的电气性能	99
6-3. 电容和电容器	102
6-4. 平行板电容器	104
6-5. 充电电流和放电电流	106
6-6. 电場的能置	110
第七章 正弦交流电路	111
7-1. 交流电的获得	111
7-2. 正弦波交流电	114
7-3. 电流与电压的平均值	115
7-4. 电流与电压的有效值	115
7-5. 交流电的向量图	117
7-6. 不含电感与电容的电路中的交流电	120
7-7. 有感电路中的交流电	121
7-8. 集肤效应与邻近效应	124
7-9. 电阻与感抗的串联	127
7-10. 电容电路中的交流电	128
7-11. 电阻、感抗、容抗的串联	131
7-12. 交流电路中的諧振現象	134
7-13. 电压諧振	137
7-14. 交流电的瞬时功率与平均功率	139
7-15. 无功功率与表观功率	145

7-16. 电导、电纳与导纳	149
7-17. 负载的并联	152
7-18. 电流谐振	153
7-19. 相角差的补偿	157
7-20. 符号法	159
7-21. 欧姆定律的符号形式	160
7-22. 克希荷夫定律的符号形式	162
7-23. 四端网络	164
7-24. 实验。电阻和电感的串联	167
7-25. 实验。电容和电阻串联时的欧姆定律	170
7-26. 实验。电压谐振	172
7-27. 实验。交流电负载的并联	175
7-28. 实验。相角差的补偿	177
第八章 三相电路	179
8-1. 多相电路与多相系统	179
8-2. 三相系统	181
8-3. 星形联接	184
8-4. 三角形联接	186
8-5. 对称三相电路的功率	190
8-6. 各相负载不对称时的星形联接	191
8-7. 各相负载不对称时的三角形联接	195
8-8. 旋转磁场	197
8-9. 实验。三相电流负载的星形联接和三角形联接	201
第九章 非正弦周期电流	205
9-1. 非正弦周期电流的产生	205
9-2. 根据已知电压曲线绘制电流曲线	206
9-3. 非正弦电流与电压的有效值	209
9-4. 非正弦电流的有功功率	211
9-5. 电感和电容对电流曲线形状的影响	213
第十章 交流非线性电路	216
10-1. 交流电路中的非线性元件	216
10-2. 铁心线圈的磁通与电动势	216
10-3. 磁化电流曲线	219
10-4. 磁滞和涡流对线圈电流的影响	220
10-5. 铁心线圈的向量图和等效电路	223
10-6. 铁心线圈和电容器相串联	226

10-7. 磁放大器	223
10-8. 半波整流	231
10-9. 全波整流	233
10-10. 多相整流	235
10-11. 平滑滤波器	237
10-12. 实验。电压铁谐振电路的特性曲线和铁谐振稳压器	238
第十一章 电工装置里的过渡历程	241
11-1. 换接法则	241
11-2. 具有电阻与电感的电路接上正弦电压	242
11-3. 振荡回路方程式	244
11-4. 电容器对具有电阻和电感的电路振荡放电	246
第十二章 电工量测	251
12-1. 概论	251
12-2. 电测仪表的分类	252
12-3. 仪表的机械构造	254
12-4. 比率计	259
12-5. 分流器与附加电阻	261
12-6. 直读式电测仪表的类型	263
12-7. 瓦特计	273
12-8. 三相功率与电能的量测方法	282
12-9. 瓦时计	286
12-10. 绝缘情况试验和欧姆计	290
12-11. 频率计和相位计	293
12-12. 示波器	295
12-13. 电测非电学量的原理	297

緒 論

广义地說来,电工学是工程上应用电現象的寬广的領域。作为一門科学,电工学是讲述应用知識的一个相应部門。

在为数众多的电工技术問題中,下列問題的解决具有特別重要的国民經济意义:在有天然能源的地方得到大的功率,将这些功率相当简单地輸送到距离很远的需要功率的地方,以任何形式在負載間分配功率,最后,将电能輕便地变成其他形式的能量(机械能,热能,光能,化学能等等)。与此相应的国民經济部門称为电力部門。它是电气化的基础。电气化就是将电能应用到生产和生活中去,在社会主义国家中,它是国民經济和人民福利不断增长的可靠的基础。因此,苏联电气化的发展問題經常是苏联共产党和苏联政府的注意中心。党把电气化看成在走向共产主义的道路上国家经济发展的根本問題。自然,每一个苏維埃工程师或技术人員,不論他在那一个部門工作,都不能不关心其祖国电气化的主要阶段和規模,以及祖国所取得的成就和最近計劃达到的目标。

生活在这一技术新領域搖籃时期的馬克思主义奠基者对于电气化的意义作了崇高的評价。在1883年,恩格斯对于利用高压輸送电能的首批实验写道:“……这一发明几乎使工业彻底地摆脱了地域条件所引起的一切約束,使甚至是最遙远地方的水能的应用成为可能。而且,如果說开始时这一发明只对城市有利,那么归根到底,它必定会成为消灭城乡对立的最强大的杠杆。十分明显,其結果将使生产力增长得如此之高,以致于資产階級愈来愈沒有力量来控制生产力了”。

在19世紀,俄罗斯学者,进步的俄罗斯知識份子代表对电工技术

的意义也作了正确的评价；在本书中我们将要提到其中的许多学者。在电工方面，他们的发现或发明有：电弧、电灯、电气光源、变压器、三相电流、无线电以及许多其他的东西。

但是在经济落后的沙皇俄国并没有条件实际应用先进的技术思想，直到伟大的十月社会主义革命之前，俄国的电力和电气制造工业还是非常薄弱的。

俄国在1913年的电力状况可以用下面的事实来表示：总发电量为19.5亿千瓦-小时^①，而发电站的总设备容量为110万千瓦。绝大部分的发电站是小型的工场和工厂自备的发电站^②，这些发电站的利用情况很坏（每年平均1700小时），效率也低，并且是使用高价的远地运来的燃料。所利用的发电站的总的容量只有88万千瓦（小于古比雪夫水力发电站功率的六分之一）。革命前俄国大部分发电站的区域性可以从下面的数字看出，例如，在1913年，高压线的总长度只有820公里，而没有高压线是不可能将电能作远距离传输的。

在1913年，电气制造工业只有少数的电机工厂，它们大都为外国公司所有，而且主要是装配工厂。最重要的部件和零件，这些企业都是从国外得到的。这些企业是按照它们的主人——外国公司的主要工厂的图纸进行工作。1913年，俄国电机工业的总产值只有0.66亿卢布。这些产品只能满足国家为数甚少的需要的45%；而其他部分则要靠进口来解决。

伟大的十月社会主义革命将政权交给了工人阶级和最贫困的农民阶级——国家真正的关心的主人；这样，在我们祖国整个国民经济（其中也包括电力和电气制造工业）的发展中完成了根本的转变。共产党的天才的组织者和领袖弗·伊·列宁远在十月革命以前就认识到电气化对于建设社会主义的意义，而在建立了苏维埃政权后，他就把电气化看

① 在1913年，德国的发电量为51亿千瓦-小时，而英国为45亿千瓦-小时。

② 彼得堡由204个发电站供电。

成是最重要的國民經濟的任務之一。他的意味深長的公式：“共產主義——就是蘇維埃政權加上全國電氣化”為全世界所熟知。根據列寧的報告，於1920年召開的全俄第八次蘇維埃代表大會批准了由專家委員會按照列寧的指示所擬訂的全俄電氣化計劃。

這一計劃規定要建造30個新的區域發電站，總容量為150萬千瓦，同時將現有發電站的容量增加25萬千瓦。全俄電氣化計劃原定15年完成，但後來是提前完成了。全俄電氣化計劃貫徹到一系列的工業化五年計劃中去，蘇聯勞動人民在短時間內完成了這些五年計劃，从而使蘇聯變成了工業強國，使它的電力居世界第二位。當然，蘇聯計劃電氣化之所以成為可能，是由於蘇維埃政權將生產工具公有化，使之成為全體人民的財產以及建立了社會主義形式的經濟。

由於完成了第一個五年計劃（1928—1932年），1932年的發電量已達到185.4億千瓦-小時，而發電站的總容量則達470萬千瓦。在1932年十月，建成了以弗·伊·列寧命名的德涅伯水力發電站，在古比雪夫水力發電站建成前它是歐洲最大的水力發電站（56萬千瓦）。

在第二個五年計劃（1933—1937年）內，蘇聯增加了265.2萬千瓦的發電量，而在1937年，發電量已達到361億千瓦-小時。這時候蘇聯的電力占世界第三位，僅次於最強大的資本主義國家——美國和德國。

由於1941年法西斯德國向蘇聯進攻，第三個五年計劃（1938—1942年）只完成了一部分。在戰爭時期（1941—1945年），許多發電站和電力網都遭到了破壞：其中德涅伯水力發電站也被破壞了。但在這個時候，蘇聯人民在國家的東部緊張地建設發電站，以便保證我們祖國的戰時經濟。這樣使得有可能在戰爭的第二年阻止敵人的進攻，然後擊潰法西斯德國。

第四個五年計劃（1946—1950年）在電力方面的任務是恢復被破壞的發電站，並改裝整個設備使之現代化以增加這些發電站的容量。這一計劃的順利完成使得有可能將1950年的發電量增加到912億千

瓦-小时；此时，发电站的容量增加到 1960 万千瓦。

由于完成了第五个五年计划，在电力方面发电站的设备容量增加到 8700 万千瓦，而年发电量则增加到 1702 亿千瓦-小时。

在伟大的十月社会主义革命四十周年，苏联力能学家指出，我们祖国发电站的容量已达到 4600 万千瓦，而 1957 年的发电量则达到了 2090 亿千瓦-小时，超过 1913 年水平的 100 倍。

苏联所生产的电能较英国和西德的总和还多^①。苏联的发电量超过了除美国外的一切资本主义国家，并且我们将要很快地赶上美国。在 1928—1955 年期间，虽然战争带来了严重的破坏，但苏联的电能生产增长了 88 倍，而美国只增长了 4.8 倍。在历史的短期内，在电能生产方面赶上和超过美国的任务定将完成；已经显示出来的苏联科学和技术的优越性（人造地球卫星的发射，原子破冰船的制成等等）就足以清楚地证明了这点。

我们在这里不可能阐述苏联电气制造工业巨大的增长和发展的全部问题。苏联的电气制造工业与电力按比例地发展，同时保证电力进一步发展的一切需要。

苏联共产党第二十次代表大会在电力方面提出了宏伟的任务。在 1960 年，苏联电能的生产应达到 9200 亿千瓦-小时，其中水力发电站的发电量占 590 亿千瓦-小时。

在规划苏联电力进一步发展的远景时，党和国家向苏联的力能学家们提出的任务是：在今后 10—15 年期间，年发电量要增加到 8000—9000 亿千瓦-小时。为此，在 1965 年苏联发电站的容量应增加到 1 亿千瓦，而发电量将增加到 5000 亿千瓦-小时。到 1972 年发电站的容量应达到 1.8 亿千瓦，而发电量则为 9000 亿千瓦-小时。共产主义社会电能的基础就这样地在建设着。

^① 在 1955 年，英国的发电量为 890 亿千瓦-小时，西德为 700 亿千瓦-小时。

第一章 直流电路

1-1. 电路和它的元件

最简单的电气装置(图 1-1)是由一个电源(例如原电池、蓄电池、发电机)和一个负载(例如电灯、电热器、电动机)以及两根将电源和负载的端点联接起来的导线所组成。

电源将机械能、化学能、热能或者别种形式的能变成电磁能,电磁能常简称为电能;负载则与电源相反,它将电能变成其他形式的

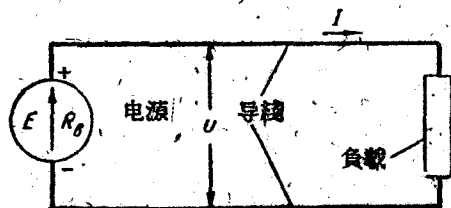


图 1-1. 最简单的电路。

能,譬如光能、热能、机械能等等。电源以及同它联接着的导线和负载,共同组成一个回路。在这回路内,发生电荷的循环运动(电流)。这个回路就叫做电路。对于电源来说,导线和负载构成通常所称的外电路。

电源的电动势是电路内发生电流的直接原因。在电路内,认为电流的方向和电动势的方向是相同的(它们的方向在图 1-1 上用箭头来表示)。电源上电流流往外电路去的这一端叫做正端(+),从外电路流回的这一端叫做负端(-)。因此在外电路内,电流从+流向-,在电源的内部,则从-流向+。外电路和电源本身同样都有电阻存在。电阻的数值由构成电路各该部分的导体的材料、形状和尺寸来决定。电路内的电流强度(或简称电流)由电动势和整个电路的电阻的大小决定。这三个量之间的关系,可用欧姆定律来表明。在电工学里,欧姆定律起着很大的作用,是许多实际运算的基础。根据这个定律,在电路里的电

流 I 和电动势 E 成正比, 和整个电路的电阻 R 成反比, 即

$$I = \frac{E}{R}. \quad (1-1)$$

欧姆定律不仅适用于整个电路, 也可以应用在电路中不包括电源在内的任何一段上。在这时候应该拿这一段首尾两端之间的电压 U (亦即电位差) 来代替公式 (1-1) 里的电动势, 并以这一段的电阻 R 来代替整个电路的电阻, 这样一来,

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1-2)$$

即这段电路的电流等于该段电压与电阻之比。

公式 (1-1) 和 (1-2) 里所有的量都应该用同一单位制内的单位来表示。在本课程内, 我们采用 MKSA (米、公斤、秒、安培) 绝对实用单位制。在这种单位制里, 安培是电流的单位, 伏特是电动势和电压的单位, 欧姆是电阻的单位。

在物理学里, 给这些单位下了精确的定义。为了使读者建立关于安培和伏特的具体观念, 今举出下列数字: 通过人身的电流到达 0.005 安时, 人就开始感觉到它, 超过 0.05 安时, 对于生命将有危险; 日常生活中最常用的白炽灯, 大概有 0.25—1 安的电流; 日用的热具, 承受 2 至 8 安; 电车则用到 100 安。原电池所供给的电压大部分比 1 伏要高一些, 铅蓄电池则近于 2 伏; 都市的照明电网, 线间电压约为 127 或 220 伏; 电车在接触导线和轨道之间的电压约为 600 伏; 市区或农村配电用的电压多半是 6600 伏; 远距离的输电线路则在 35,000、110,000 及 220,000 伏的电压下工作; 古比雪夫—莫斯科和斯大林格勒—莫斯科的输电线, 将使用 400,000—500,000 伏的电压; 最后谈到雷击, 它的电压往往超过 100,000,000 伏。

为了表示小量电流, 我们不用安而用较小的单位——毫安。这在实用上要比较简便些, 1 毫安等于 10^{-3} 安。有时甚至用更小一些的单位——微安, 它等于 10^{-6} 安。表示低电压可使用毫伏, 1 毫伏等于 10^{-3}

伏。表示高电压则可用千伏, 1 千伏是 1000 伏。

很大的电阻通常用千欧或兆欧做单位, 1 千欧 = 10^3 欧, 1 兆欧 = 10^6 欧。

电源或多或少总有一些内电阻, 所以电源两端的电压 (也就是电位差) 总比它的电动势要小, 相差者为电源内部的电压损失。根据欧姆定律, 该内电压损失等于电流 I 和电源内电阻 R_0 的乘积, 即

$$U = E - IR_0. \quad (1-3)$$

电源的内电阻往往是相当小的, 甚至可以略去上式中右边的后一项。这时电源的电压几乎就等于它的电动势。

当外电路开断, 也就是在电源空载的情况下, 这时 $I=0$, 方程式 (1-3) 和 R_0 的大小没有关系, 于是变成

$$U = E. \quad (1-4)$$

倘若外电路的电阻 (外电阻) 和电源的内电阻比较起来是很小的话, 那就可以认为 $U=0$, 并且要发生所谓电源的短路。在这种情况下, 按照方程式 (1-3), 电流

$$I = \frac{E}{R_0} \quad (1-5)$$

可以到达很大的数值, 因为 R_0 通常比较负载的电阻要小得多。例如从电源到负载的导线, 由于绝缘损坏的结果, 导线本身互相接触, 它们的电阻和负载的电阻比较起来是非常小的, 所以这时就有短路的情况出现。

电源和负载以及联接线的电阻, 往往象固态和液态导体的电阻一样, 与电流在它们之间的通路的长度成正比, 与此通路的横断面成反比, 并且要看导体的材料和它的温度而定。

倘若固态或液态导体的全长为 l , 截面积为 S , 并且粗细均匀 (例如金属线), 那么它的电阻可以用方程式

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-6)$$

来表示,其中 ρ 是导体在边长为单位长度的立方体时的电阻。这个量叫做电阻系数,其大小随着材料和温度的不同而有差别。在 MKSA 单位制里,长度和面积的基本单位是米和平方米,电阻系数的单位是欧·米。

如果只是用米作为长度的单位,而用平方毫米作为截面积的单位,那就比较方便一些。在这种情况下,公式(1-6)里的电阻系数的单位应该是 $\frac{\text{欧} \cdot \text{毫米}^2}{\text{米}}$ 。在数量上,它等于长度为 1 米而截面积为 1 平方毫米的导体的电阻。

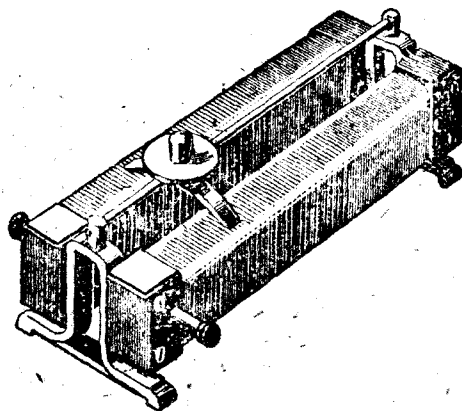


图 1-2. 电阻连续变化的变阻器。

计算粗大的导体(液体和地等等)的电阻系数时,长度和横向的尺寸往往用同一级的量来表示。它们通常用厘米表示,因而电阻系数用欧·厘米作单位。

在有些计算里,不用电阻而用它的倒数 $g = \frac{1}{R}$ 要比较方便些。这个倒数名叫电导。在这种情况下,代表欧姆定律的方程式(1-2)的形式改成

$$I = Ug. \quad (1-7)$$

电导的单位是 $\frac{1}{\text{欧}} = \text{欧}^{-1}$, 它没有特殊的名称。