

双色版 

YONGDIAN NENGXIAO YU JIENENG SHOUC

用电能效与节能

手册

牛迎水 编著

吕志民 奚振乾 李志学 主审



电耗怎么样，标准来衡量
治理高损耗，书中有法宝



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

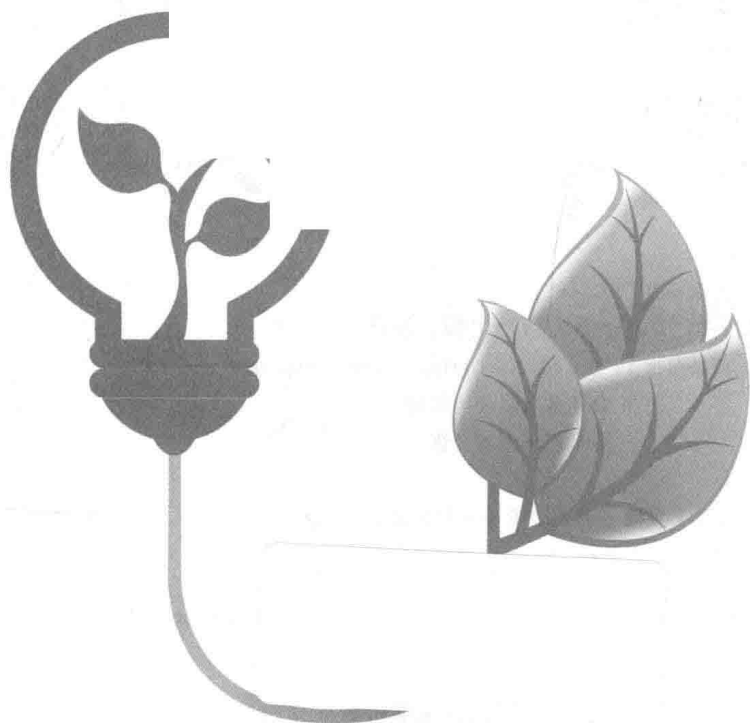
YONGDIAN NENGXIAO YU JIENENG SHOUCE

用电能效与节能

手册

牛迎水 编著

吕志民 奚振乾 李志学 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电能与人类息息相关,人们借助线路、变压器、开关等设施把电能引入到电动机、行业电器、家用电器及照明灯具,以满足各种生产、生活需要。在电能引入、应用的过程中,会产生多种电能损耗,如何减少这些损耗、节约能源、提高用电效率,这是本书研究解决的问题。

本书以国家最新的能效及相关标准为依据,汇集基础术语、诠释能效标准;详细研究了不同类型线路、变压器运行时的能效规律与节能方法,介绍了电动机、行业电器、家用电器及照明灯具等多种设备的能效标准及节电措施,是一本通俗易懂、图表并茂、实用性强的节能增效手册。

本书既是各行各业用电者降本增效的良师益友,也是供电企业用电能效管理的工具书,对用电能效培训机构也有较大参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

用电能效与节能手册/牛迎水编著. —北京:中国电力出版社, 2016.7

ISBN 978-7-5123-9265-6

I. ①用… II. ①牛… III. ①用电管理-技术手册
IV. ①TM92-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 094517 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 7 月第一版 2016 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 30.5 印张 784 千字

印数 0001—2000 册 定价 79.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

用电节能
利国利己利民
降本增效
共识共享共赢

肖幸海题

能效，是能源效率的简称，是指能源开发、加工、输送、转换、利用等各个过程的效率。世界能源委员会对能源效率的定义为“减少提供同等能源服务的能源投入”。能源效率是研究单位能源所带来的经济效益多少的问题，带来的效益多，说明能源效率高。节能，是节约能源的简称，是指通过加强用能管理，采用技术上可行、经济上合理以及环境和社会可以承受的措施，减少从能源生产到消费各个环节中的损失和浪费，更加有效、合理地利用能源。可见，能效与节能从本质上来讲基本是一致的，能效既包含了节能的内容，如节电、节水、节油、节煤、节汽等，又可以从更深层次揭示企业应用能源的综合效益及企业运营成本的关系。企业运营成本中相当一部分是与能源及设备密切相关的，节约能源，为设备提供最佳运行环境，延长设备使用寿命、提高设备生产力、减少设备故障率、降低设备维护及更新费用，已经成为企业核心竞争力的重要组成部分。

电能与人类息息相关，人们借助线路、变压器、开关等设施把电能引入到电动机、行业电器、家用电器及照明灯具，以满足各种生产、生活需要。用电能效就是指用电使用者在电能引入、使用过程中的效率，它包括电能在使用线路、变压器、电动机、行业电器、家用电器及照明等多个用电环节或场所的利用效率。本书中，把各行各业通用的泵、风机、空压机、电焊机等用电设备称为行业电器；把计算机（电脑）、电视机、空调器、电冰箱、电磁灶等用电产品称为家用电器。在电能引入、应用过程中，用电器具会产生各种各样的电能损耗，直接影响着用电设备和器具的使用效率。如何有效甄别与治理高损低效元件、减少用电损耗、节约能源、提高用电效率，是本书旨在研究和解决的问题。

本书以国家最新的能效标准、规程、规定、规范、导则等为依据，以线路、变压器、电动机、行业电器、家用电器、绿色照明为研究对象，逐一探索和解答了本书所述用电设备和器具的能效标准、能效影响因素及节能措施，涉及国家标准 90 余个，制表 380 余个，制图和算式各 120 余个，信息量巨大，实用性和针对性极强。全书共分为 6 章，第 1 章汇编了电阻、电感、电容、电压、电流、功率、负荷、负载、电能、电能质量等基础术语，电厂、电力网、负荷与系统、电力系统运营等电力系统术语，导线、电线电缆、高压开关设备、变压器、电容器与无功补偿、计量装置等电力装备术语，电机、泵、风机、压缩机、电焊机、家用电器、绿色照明等用电设备术语，能源分类、能源消耗、节能减排、电力电量管理、能效评价与管理

等能源与节能减排术语,方便读者全面准确地理解相关概念。第2章汇编了与用电能效相关的国家标准,包括电压、特低电压、频率、电流、安全距离、噪声等基础标准,供电电压偏差、三相电压不平衡、电力系统频率偏差、公共电网谐波、供电可靠率等电能质量标准,无功电力平衡与补偿、母线电压与线路电压、功率因数标准等无功电力标准,电压无功管理标准,国家节能减排标准与各类高能耗用电行业的产品能耗限额,用户用电规范标准等。第3章编著了用电线路的能效基础与经济、极限输送功率,研究分析了用电线路运行状态下的能效理论与能效影响因素,给出了各种电压等级、不同类型用电线路运行时的电能损耗率和电压损失率表,从线路电源点的科学分布、线路与负荷的合理匹配、高能效线路的组建、节能导线的应用、无功补偿技术等多方面进行了能效提升措施的详细论述。第4章编著了变压器的能效基础理论,研究了变压器静态、动态能效影响因素与损耗率规律,给出了不同类型变压器的能效标准,编著了不同电压等级不同类型变压器的能效表及图形,并指明了最佳负载区。从变压器的科学选择、经济运行、无功补偿等多方面以案例的方式详细论述了其相关的节电技术。第5章编写了电动机的基础理论与常识,阐述了不同类型异步电动机的能效指标与能效标准,研究分析了异步电动机的能效影响因素、经济运行及节电技术。第6章汇总编写了行业电器(泵、风机、空压机、电焊机等)、家用电器(微机、电视机、空调器、电冰箱、电磁灶等)以及照明灯具的能效标准与节能措施。

本书汇集基础术语、诠释能效标准,详细研究了不同类型线路、变压器运行时的能效规律与节能方法,展示了电动机、行业电器、家用电器及照明灯等多种设备的能效标准及节电措施,是作者30余年来的学习与工作实践的结晶。本书通俗易懂、图表并茂、实用性强,是一部内容丰富、方便快捷的节能增效工具书,可帮助读者在用电能效与节能管理工作中对照查阅。

“电耗怎么样,标准来衡量;治理高损耗,书中有法宝;用电能效高,节能效益好”。希望本书对读者开展用电节能、降损增效工作能够有所帮助。

本书的编著得到了国家电网公司系统降损节能资深专家国网河南省电力公司吕志民高工、安徽省电力公司奚振乾高工、国网河南省电力公司鹤壁供电公司李志学高工的审稿,得到了国网河南省电力公司鹤壁供电公司郭强、宋习凌等公司领导和各位同仁的支持,陕西艺术职业学院副院长、陕西书画研究会秘书长、张家界市山水画院院长、国家高级美术师肖幸海教授为本书做了题词。在此,对于他们的关心和帮助,表示衷心的感谢与诚挚的敬意。

由于作者阅历和水平有限,不足和不妥之处在所难免,恳请广大读者和技术同仁批评指正。

作 者

2016年5月

前言

第1章 基本术语	1
1.1 电工基础术语	1
1.1.1 正弦量与额定值	1
1.1.2 电阻及其特性	2
1.1.3 电感、电容及其特性	6
1.1.4 电压及相关概念	7
1.1.5 电流及相关概念	17
1.1.6 功率及相关概念	22
1.1.7 负荷及相关概念	26
1.1.8 负载及其状态	30
1.1.9 电能与电能损耗	31
1.1.10 电能质量及其指标	34
1.2 电力系统术语	38
1.2.1 电厂(电源)	39
1.2.2 电力网	40
1.2.3 负荷与系统	42
1.2.4 电力系统运营	45
1.3 电力装备术语	47
1.3.1 导线	47
1.3.2 电线电缆	49
1.3.3 高压开关设备	53
1.3.4 变压器	56
1.3.5 电容器与无功补偿	59
1.3.6 计量装置	62
1.4 用电设备术语	64
1.4.1 电机	64
1.4.2 泵	68
1.4.3 风机、压缩机	70
1.4.4 电焊机	72
1.4.5 家用电器	75

1.4.6 绿色照明	76
1.5 能源与节能减排	78
1.5.1 能源分类	78
1.5.2 能源消费	80
1.5.3 节能减排	82
1.5.4 电力电能管理	84
1.5.5 能效评价与管理	89
第2章 常用标准	93
2.1 基础标准	93
2.1.1 标准电压	93
2.1.2 特低电压限值	95
2.1.3 标准频率	96
2.1.4 标准电流	96
2.1.5 安全距离标准	97
2.1.6 噪声标准	104
2.2 电能质量标准	104
2.2.1 供电电压偏差	105
2.2.2 三相电压不平衡	107
2.2.3 电力系统频率偏差	108
2.2.4 公共电网谐波	109
2.2.5 供电可靠率	112
2.3 无功电力标准	112
2.3.1 无功电力平衡与补偿	113
2.3.2 母线电压与线路电压	114
2.3.3 功率因数标准	116
2.4 电压无功管理	117
2.4.1 责任分工	117
2.4.2 电压无功管理标准	118
2.4.3 无功补偿容量配置	119
2.5 节能减排标准	121
2.5.1 减排目标与空气质量标准	121
2.5.2 电力节能减排限额标准	124
2.5.3 高能耗产品能耗限额标准	128
2.6 用户用电规范	140
2.6.1 电源与电压选择	140
2.6.2 供配电方式	142
2.6.3 电能质量及其控制	144
2.6.4 居民负荷计算	145

2.6.5	特殊用户供电	146
2.6.6	低压配电	147
第3章	线路的能效与节能	149
3.1	线路的能效基础	149
3.1.1	圆线同心绞架空导线性能	149
3.1.2	架空绝缘导线 (JK) 性能	163
3.1.3	电力电缆性能	167
3.1.4	电缆导体的电阻标准	186
3.1.5	线路的经济输送功率与极限输送功率	190
3.1.6	线路能效的理论依据	196
3.2	110 (66) kV 线路能效	197
3.2.1	影响线路能效的因素	198
3.2.2	110kV 线路的能效	198
3.2.3	66kV 线路的能效	203
3.3	35kV 线路能效	205
3.3.1	35kV 线路的能效计算	205
3.3.2	35kV 架空线路的能效	206
3.3.3	35kV 电缆线路的能效	207
3.4	10 (20、6) kV 线路能效	209
3.4.1	10 (20、6) kV 线路的能效计算	209
3.4.2	20kV 线路的能效	210
3.4.3	10kV 线路的能效	214
3.4.4	6kV 线路的能效	222
3.5	低压线路能效	225
3.5.1	低压线路的能效计算	225
3.5.2	低压架空线路的能效	226
3.5.3	低压电缆线路的能效	230
3.5.4	低压单相电缆线路的能效	236
3.6	线路的节能技术	240
3.6.1	以负荷为导向, 优化电源分布	240
3.6.2	以负荷为根本, 配置高效线路	243
3.6.3	以高效为目标, 控制电压无功	245
3.6.4	以经济为条件, 选择节能装备	247
第4章	变压器能效与节能	251
4.1	变压器的能效基础	251
4.1.1	变压器的构成	251
4.1.2	变压器的分类	259
4.1.3	变压器的原理与参数	262

4.1.4	变压器绕组的联结	266
4.2	变压器的能效及其规律	270
4.2.1	变压器的静态能效	270
4.2.2	变压器的动态能效计算	279
4.2.3	配电变压器的无功消耗对电网能效的影响	282
4.2.4	电力变压器无功消耗对电网能效的影响	285
4.2.5	变压器的综合功率损耗规律	289
4.3	电力变压器的运行能效	292
4.3.1	110kV 变压器的运行能效	292
4.3.2	66kV 变压器的运行能效	299
4.3.3	35kV 变压器的运行能效	306
4.4	配电变压器的运行能效	313
4.4.1	油浸电工钢带配电变压器的运行能效	313
4.4.2	干式电工钢带配电变压器的运行能效	323
4.4.3	非晶合金配电变压器的运行能效	333
4.5	变压器的节能技术	343
4.5.1	使用节能变压器, 技术降损促效益	343
4.5.2	选用经济额定容量, 配电变压器运行经济又安全	344
4.5.3	按负载变化投切变压器, 变电站主变压器运行更经济	346
4.5.4	维持电压合格, 保障变压器高效运行	349
4.5.5	采用动态无功补偿, 提高设备运行效率	351
第 5 章	电动机的能效与节能	353
5.1	电动机的能效基础	353
5.1.1	异步电动机的构成	353
5.1.2	异步电动机的分类	355
5.1.3	异步电动机的原理	359
5.1.4	异步电动机铭牌参数	361
5.2	电动机的能效标准	367
5.2.1	电动机的能效指标与标准简介	367
5.2.2	中小型异步电动机的能效标准	369
5.2.3	高压异步电动机的能效标准	370
5.3	电动机的能效影响因素与经济运行	378
5.3.1	影响电动机能效的因素	378
5.3.2	异步电动机的经济运行	381
5.3.3	异步电动机的技改与节能	390
5.4	电动机的节能措施	391
5.4.1	异步电动机设计节能	391
5.4.2	异步电动机选用节能	393

5.4.3	异步电动机运行节能	396
5.4.4	异步电动机改造节能	403
第6章	用电设备的能效与节能	406
6.1	泵的能效与节能	406
6.1.1	泵的能效基础	406
6.1.2	清水离心泵的能效标准	408
6.1.3	泵的节能措施	411
6.2	风机的能效与节能	415
6.2.1	风机的能效基础	415
6.2.2	风机的能效标准	419
6.2.3	风机的节能措施	421
6.3	空压机的能效与节能	423
6.3.1	空压机的能效基础	423
6.3.2	空压机的能效标准	425
6.3.3	空压机的节能措施	434
6.4	电焊机的能效与节能	435
6.4.1	电焊机的能效基础	435
6.4.2	电弧焊机的能效标准	438
6.4.3	电弧焊机的节能措施	440
6.5	家用电器的能效与节能	442
6.5.1	微机的能效与节能	443
6.5.2	电视机的能效与节能	446
6.5.3	空调器的能效与节能	448
6.5.4	电冰箱的能效与节能	452
6.5.5	电磁灶的能效与节能	454
6.6	绿色照明	457
6.6.1	绿色照明基础	457
6.6.2	照明灯能效标准	465
6.6.3	照明节电技术	472

参考文献

基本术语

1.1 电工基础术语

电工, 广义地讲, 是指研究电磁领域客观规律及其应用的科学技术, 包括电力生产和电工制造两大工业生产体系; 狭义地讲, 是指安装、维护、操作、修理电气设备或装置并保持其正常运行的工作人员。电工水平是衡量社会现代化程度的重要标志之一, 常用的电工基础术语分述如下。

1.1.1 正弦量与额定值

人们在生产和生活中离不开量, (可测的) 量是可以定性区别和定量确定的一种现象、物体或物质的属性。

1. 标量与矢量

标量: 在一已定单位制中可用一个数来表征的量, 其数值为单个实数或复数, 与方向无关。即有些物理量, 只有数值大小, 而没有方向, 部分有正负之分。这些量之间的运算遵循一般的代数法则, 如质量、密度、温度、功、能量、路程、速率、体积、时间、热量、电阻、功率、势能等。

矢量: 在 n 维空间内可用按给定次序的 n 个标量来表征的量。对于二维或三维空间, 矢量可用一个由其方向和长度表征的有向线段表示, 又称为向量。即有些物理量, 既有数值大小, 又有方向才能完全确定, 量之间的运算并不遵循一般的代数法则, 而遵循特殊的运算法则 (如矢量的加法遵循平行四边形法则或者三角形法则)。例如位移、速度、加速度、力、力矩、动量、冲量等。一般来说, 矢量只有在同方向上才可比较大小, 不同方向上的矢量一般不能比较大小。

2. 周期与频率

周期: 周期量的值在等地重复时, 自变量的两个值之间的最小差值。当自变量为时间时, 周期的符号用 T 表示。其中周期量是指在自变量 (时间、空间等) 相隔某一间隔处完全重复的量, 在一个周期内的平均值不等于零的周期量称为脉动量; 在一个周期内的平均值等于零的周期量称为交变量。

频率: 周期的倒数, 表示单位时间内完成周期性变化的次数, 是描述周期运动频繁程度的量, 用符号 f 表示, 单位为秒分之一。交流电的频率表示它每秒内周期性变化的次数, 单位是赫兹 (Hz)。现行交流电的频率标准一般为 50 赫兹 (如中国、欧盟、俄罗斯等) 或 60 赫兹 (如美国、加拿大、日本、韩国等), 而无线电技术中涉及的交流电频率一般较大, 达到千赫兹 (kHz) 甚至兆赫兹 (MHz) 的度量。

3. 平均值与方均根值

瞬时值与峰值: 时变量在给定时刻的值为瞬时值。在规定时间间隔内, 一个时变量的最大值称为峰值。注意, 对于周期量, 时间间隔为一个周期。



平均值：在规定时间间隔内，一个量的各瞬时值的算术平均值。

方均根值（有效值）：在规定时间间隔内，一个量的各瞬时值的平方的平均值的平方根。方均根值的同义词是有效值。

4. 正弦量与交流

正弦量：按照自变量的正弦函数而变化的量，它是由一实常数与正弦或余弦函数的乘积所表示的周期交变量，其辐角为自变量的线性函数。

角频率：频率 f 和因数 2π 的乘积。

(3) 相量：表示正弦量的复数量，其辐角等于初相，其模等于方均根值或振幅。如正弦量 $A\cos(\omega t + a)$ 或 $A\sin(\omega t + a)$ 的辐角 $(\omega t + a)$ ，其模为 A 或振幅 $\hat{A}$ 。相量 $a(t)$ 表示为： $a = \sqrt{2}A\cos(\omega t + a) = \hat{A}\cos(\omega t + a)$ 。

相位移（两正弦量间的）：在一给定瞬间，两正弦量的相位的差值。同义词：相位差。

交流：一般指大小和方向均随时间作周期性变化的电压或电流，这种“交变电流”，简称“交流”，它在一个周期内的运行平均值为零。当闭合线圈在匀强磁场中绕垂直于磁场的轴匀速转动时，线圈里就产生大小和方向作周期性改变的正弦交流电。

5. 额定值与限值

额定值：为规定元件、器件、设备或系统的运行条件所制定的用于规范目的的量值。

额定电压（设备的）：由制造厂家确定，用以规定元件、器件或设备的工作电压。一般用有效值表示。

额定电流（设备的）：由制造厂家确定，用以规定电气设备在规定的工作条件下的工作电流。

标称值：用以标志和识别一个元件、器件、设备或系统的量值。

限值：元件、器件、设备或系统的规范中，一个量的最大或最小允许值。

额定数据：额定值与运行条件的组合。

铭牌：永久固定于电器上的标牌，永久性地说明相关标准要求的额定数据和其他信息。

额定工况：工（作情）况是表征电机、电器或供电网络在指定时间内工作情况的全部电气量和机械量。额定工况是指由制造厂或有关技术部门对器件和设备经过技术鉴定后而确定的正常运转工况。

1.1.2 电阻及其特性

电阻 (R) 在物理学中表示导体对电流阻碍作用的大小，是导体本身的一种特性，它不会随电压、电流的变化而变化。根据导体通过直流电和交流电后呈现的效果不同，电阻分为直流电阻和交流电阻。

电阻的单位是欧姆，简称欧 (Ω)。欧姆是这样定义的：当在一个电阻器的两端加上 1 伏特的电压时，如果在这个电阻器中有 1 安培的电流通过，则这个电阻器的阻值就规定为 1 欧姆，即 $1\Omega = 1V/1A$ 。

常用的电阻单位还有兆欧 ($M\Omega$)、千欧 ($k\Omega$)、毫欧 ($m\Omega$)、微欧 ($\mu\Omega$)、纳欧 ($n\Omega$)。其换算关系为： $1M\Omega = 1000k\Omega$ ， $1k\Omega = 1000\Omega$ ， $1\Omega = 1000m\Omega$ ， $1m\Omega = 1000\mu\Omega$ ， $1\mu\Omega = 1000n\Omega$ 。

1. 电阻与电阻定律

(1) 直流电阻。

元件通过直流电时所呈现的对电流的阻碍作用，称为直流电阻，它是元件固有的、静态的电阻。电阻元件是耗能元件，如灯泡、电热炉等，电流经过它产生内能。电阻的主要物理特征是变电能热能。

电阻在电路中起分压、分流的作用。对信号来说,交流与直流信号都可以通过电阻。

(2) 电阻器。

电阻器是用导体制成具有一定阻值的元件,其主要职能就是阻碍电流流过,应用于限流、分流、降压、分压、负载与电容配合作滤波器及阻匹配等。按阻值特性分为固定电阻、可调电阻、特种电阻(敏感电阻)。

理想电阻器的电阻是电压除以电流之商。处于正弦稳定状态下的二端电路,其等效电阻是复数阻抗的实部,此时,在所考虑的频率下,其电压相量除以电流相量之商为一恒定值。

(3) 电阻定律。

导体的电阻值越大,表示导体对电流的阻碍作用越大。电阻元件的电阻值大小一般与其温度、材料、长度、截面积有关。导体的电阻 R 跟它的长度 L 成正比,跟它的横截面积 S 成反比,跟它的材料电阻率 ρ 成正比,这个规律就叫电阻定律,用公式表示为 $R = \rho L / S$ 。

(4) 电阻率。

电阻率 ρ 亦称电阻系数,是表示各种物质电阻特性的物理量,反映物质对电流阻碍作用的属性。在常温 20°C 条件下,将某种材料制成的长 1 米、横截面积 1 平方米的导线的电阻,叫作这种材料的电阻率,它的单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ 或 $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ 。

电阻率与导体长度、横截面积无关,只与导体的材料和温度有关,有些材料的电阻率随着温度的升高而增大,有些反之。常见导体材料电阻率及相关参数见表 1-1。

表 1-1 常见几种纯金属导体材料在 20°C 时的电阻率

材料	密度 (g/cm^3)	熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	电阻率 ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	电阻温度系数 α ($1/^{\circ}\text{C}$)
银	10.50	961.93	1.65×10^{-8}	3.80×10^{-3}
铜	8.92	1084.50	1.75×10^{-8}	3.93×10^{-3}
铝	2.70	660.37	2.83×10^{-8}	4.23×10^{-3}
铁	7.86	1541.00	9.78×10^{-8}	5.00×10^{-3}

电阻率越小,表明导体电阻小、导电性能越好。

(5) 交流电阻。

架空导线或电缆线路多采用钢芯铝绞线、铝合金类绞线或铜芯绞线,这些绞线在交流电流作用下会产生集肤效应、邻近效应、钢芯磁滞及涡流损耗,这样工况下导线的电阻,称为交流电阻,单位为 Ω/km 。

线路交流电阻通常比直流电阻偏大。由于铝线在空气中氧化后形成具有绝缘性的氧化铝膜,铝绞线或钢芯铝绞线通电后,电流是沿铝绞线作螺旋形方向流动的,形成轴向磁场。虽然导线中相邻层铝线的绞向相反,可使一部分磁化力抵消,但仍足以构成交变的剩余磁场强度,使钢芯中产生磁滞和涡流,导致功率损耗。同时由于集肤效应和邻近效应的影响,使导线中电流分布发生变化,导致导线的电阻比直流电阻值增大。

(6) 导体、绝缘体与半导体。

电阻率较低的物质称为导体,如金属银、铜、铝等;电阻率较高的物质称为绝缘体,如玻璃、橡胶、塑料等;介于导体和绝缘体之间的物质则称为半导体,如硅、锗、硒等。按照电工术语定义,导体与半导体定义如下。

导体:在电场作用下移动自由电荷的物体,是用以承载电流的元件,如线路或电缆中的导体。在足够低的温度和足够弱的磁场下,电阻率为零且具有完全抗磁性的物质称为超导体。



半导体：在一定温度范围内，由随温度升高而增加的电子和空穴来导电的物质。其电阻率处于金属与绝缘体之间，且可通过外部方法改变其载流子密度。

(7) 电导率。

电导率 γ ：物体传导电流的能力，是传导电流密度与电场强度之比的一个标量或矩阵量，在数值上是电阻率的倒数（若此倒数存在）。其单位是西门子/米（S/m）或西门子/厘米（S/cm）。电导率越大，则导电性能越强，反之越小。

对于各向同性介质，电导率是标量；对于各向异性介质，电导率是张量（从代数角度讲，张量是向量的推广；从几何角度讲，张量是一个不随参照系的坐标变换而变化的量）。

当吸收光子时其电导率增大的物质称为光电导体。

2. 电阻温度系数

(1) 定义。

电阻元件的电阻值大小一般与温度有关，衡量电阻受温度影响大小的物理量是温度系数，其定义为：温度每升高 1°C 时电阻值发生变化的百分数。

设任意一个电阻元件在温度 t_1 时的电阻值为 R_1 ，当温度升高到 t_2 时电阻值为 R_2 ，则该电阻在 $t_1 \sim t_2$ 温度范围内的（平均）温度系数 α 为

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)} \quad (1-1)$$

如果 $R_2 > R_1$ ，则 $\alpha > 0$ ，将 R 称为正温度系数电阻，即电阻值随着温度的升高而增大；如果 $R_2 < R_1$ ，则 $\alpha < 0$ ，将 R 称为负温度系数电阻，即电阻值随着温度的升高而减小。显然 α 的绝对值越大，表明电阻受温度的影响也越大。

(2) 温度变化后的电阻值。根据式 (1-1) 可导出温度变化后元件电阻 R_2 的计算公式为

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-2)$$

(3) 温升：所考虑部位的温度与外冷却介质温度之差。

(4) 月平均温度：某一月份中，日最高温度的平均数与日最低温度的平均数之和的一半的多年统计值。

(5) 年平均温度：全年中，各月平均温度之和的 $1/12$ 。

3. 电导

电导 (G) 是表示某一种导体传输电流能力强弱程度的物理量，单位是西门子 (Siemens, 姆欧)，简称西 (S)， $1\text{S} = 1/1\Omega$ 。

对于纯电阻线路，电导与电阻的关系方程为 $G = 1/R$ ，导体的电阻越小，电导就越大，数值上等于电阻的倒数，因此电导的单位西门子又叫姆欧，简称姆。

在交流线路中，电导是用来反映泄漏电流和空气游离所引起的有功功率损耗的一种参数，其定义为导纳的实部（注意：不是电阻的倒数），即： $Y = G + jB$ ，式中 B 为电纳。电导会随着温度的变化而有所变化。对于正弦电流，电导是与电路的端电压同相的电流分量除以端电压。等效电导是复数导纳的实部。

4. 阻抗、电抗与导纳

(1) 阻抗与有效电阻。

在具有电阻、电感和电容的交流电路里，对交流电起阻碍作用的物理量为交流电阻，一般称为阻抗。阻抗是电路的端电压除以通过的电流，常用 Z 表示，单位是欧 (Ω)，是一个复数，实部称为电阻 (R)，虚部称为电抗 (X)。阻抗的模是指二端电路中的电压方均根值除以电流方均

根值之商的一个标量。复数阻抗是指模为阻抗的模，辐角为电压的相角减去电流的相角的一个复数量。阻抗的计算要用向量计算，即 $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ ，其中 X_L 为感抗， X_C 为容抗。

有效电阻是指消耗的功率与电流的有效值的平方之比。对于正弦电流，它等于与电流同相的电压分量除以电流。

(2) 电抗 (X)。

电容和电感在电路中对交流电引起的阻碍作用总称为电抗，电抗是复数阻抗的虚部，单位为欧姆 (Ω)。有效电抗是指与电流正交的电压分量除以电流，其中包括感抗 X_L (电感和角频率的乘积) 和容抗 X_C (电容和角频率的乘积的倒数，带负号)， $X = X_L - X_C$ 。

电感线圈产生的自感电动势对电流所产生的阻碍作用称为线圈的电感电抗，简称感抗 X_L 。 $X_L = \omega L = 2\pi fL$ ，可见频率越高，感抗越大。容抗 X_C 表示电容 (C) 阻碍交流电通过的作用， $X_C = (\omega C)^{-1} = (2\pi fC)^{-1}$ ，可见频率越高，容抗越小。

电抗的倒数叫电纳 B ，单位为 $1/\Omega$ 。

对于送电线路，其电抗的意义是：当交流电通过三相导线时，其中一相周围存在交变磁场，磁通的变化使导线中产生感应电动势 (自感电动势)，其他两相导线上由于自感电动势作用会产生感应电流，构成互感电动势。所以线路的电抗则是由自感、互感组成的。自感和互感与导线的材料特性及其分布有关，因此，线路的电抗与三相导线间的距离、导线直径、导线材料的磁导系数等因素有关，通常情况是：电压越高，线路电抗越大；同一电压等级，截面越大，电抗越小。

对于三相对称排列单回电力线路，每公里导线电抗 x_o 为

$$x_o = 0.0157\mu/N + 0.145\lg(d_m/D_s) \quad (\Omega/\text{km}) \tag{1-3}$$

式中 μ ——导线相对磁导率；

d_m ——三相几何均距，m；

D_s ——同相导线组间的几何均距；

N ——每相导线的根数。

一般地，220kV 及以下线路单位电抗值范围见表 1-2。

表 1-2 220kV 及以下线路单位电抗值范围一览表

电压等级 (kV)	线路布设方式	单位电抗值范围 (Ω/km)
220	架空	0.40~0.44
110	架空	0.38~0.42
	电缆	0.18
35	架空	0.36~0.42
	电缆	0.12
10 (6)	架空	0.32~0.40
	电缆	0.08
0.4	架空	0.29~0.35
	电缆	0.06~0.08

(3) 导纳 (Y)。

导纳是通过电路的电流除以端电压，即阻抗的倒数。导纳的模是指二端电路中的电流方均根值除以电压方均根值之商的一个标量。复数导纳是指模为导纳的模，辐角为电流的相角减去



电压的相角的一个复数量。电纳是复数导纳的虚部，单位为西 (S)。 $Y = (G^2 + B^2)^{1/2}$ 。

5. 欧姆定律

(1) 欧姆定律。

在同一电路中，通过导体的电流跟导体两端的电压成正比，跟导体的电阻阻值成反比，这就是欧姆定律，基本公式是 $I = U/R$ ，单位为：安培 (A) = 伏特 (V) / 欧姆 (Ω)。

欧姆定律适用于纯电阻电路、金属导电和电解液导电电路；在气体导电和半导体元件等电路中欧姆定律不适用。

(2) 交流电的欧姆定律。

只含有电阻元件的交流电路叫作纯电阻电路，如含有白炽灯、电炉、电烙铁等的电路。

设加在电阻 R 上的正弦交流电压瞬时值为 $u = U_m \sin(\omega t)$ ，则通过该电阻的电流瞬时值为 $i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t) = I_m \sin(\omega t)$ ，其中 $I_m = \frac{U_m}{R}$ ，是正弦交流电流的振幅。这说明，正弦交流电压和

电流的振幅之间满足欧姆定律。正弦交流电压和电流的有效值之间也满足欧姆定律。

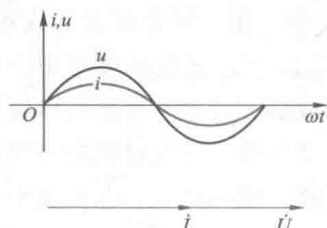


图 1-1 电阻电压 u 与电流 i 的波形图和相量图

6. 电阻的电压与电流特性

电阻电压与电流的关系为 $U = IR$ ，电阻的两端电压 u 与通过它的电流 i 同相，其波形图和相量图如图 1-1 所示。

1.1.3 电感、电容及其特性

1. 电感

电感是交流闭合回路的一种属性。当线圈通过电流后，在线圈中形成磁场感应，感应磁场又会产生感应电流来抵制通过线圈中的电流。这种电流与线圈的相互作用关系称为电的感抗，也就是电感，用符号 L 表示，单位是亨利 (H)。

(1) 自感。当线圈中有电流通过时，线圈的周围就会产生磁场。当线圈中电流发生变化时，其周围的磁场也产生相应的变化，此变化的磁场可使线圈自身产生感应电动势（感生电动势），这就是自感。

(2) 互感。两个电感线圈相互靠近时，一个电感线圈的磁场变化将影响另一个电感线圈，这种影响就是互感。互感的大小取决于电感线圈的自感与两个电感线圈耦合的程度，利用此原理制成的元件叫作互感器。

2. 感抗与电感器的作用

反映电感对交流电流阻碍作用程度的参数叫作感抗。纯电感电路中通过正弦交流电流时所呈现的感抗为 $X_L = \omega L = 2\pi fL$ 。

在线路中，线圈是产生电感及感抗的元件。将导线绕制成螺线管形式或在螺线管中插入铁心的电气设备称为电感器（也称为电抗器）。

不同的线圈形式构成不同的电感器，其作用也有所不同：①如果线圈中不含导磁介质，则叫空芯电感或线性电感。线性电感 L 在电路中是一常数，与外加电压或通电电流无关。②如果线圈中含有导磁介质时，则电感 L 将不是常数，而是与外加电压或通电电流有关的量，这样的电感叫作非线性电感，如铁芯电感。

用于“通直流、阻交流”的电感线圈叫作低频扼流圈；用于“通低频、阻高频”的电感线圈叫作高频扼流圈。