

电力网线损的 理论计算和分析

杨秀台

水利电力出版社

内 容 简 介

本书较全面地阐述各种电压等级的电力网中线损的计算和分析方法，从线损的基本知识和一般手算方法入手，着重介绍电子计算机用于线损的计算和分析，最后阐明降低线损的主要技术措施。

本书可供从事电力网线损管理的工程技术人员、专业工人以及与线损工作有关的电力网调度、计划、设计人员参考，对于高等及中等学校中电力系统专业的学生在学习有关专业课时亦有参考价值。

电力网线损的理论计算和分析

杨 秀 台

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路 6 号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 9.25印张 205千字

1985年5月第一版 1985年5月北京第一次印刷

印数00001—11510册 定价1.90元

书号 15143·5692

目 录

前 言

第一章	概述	1
第二章	线损理论计算和分析的一些共同问题	6
2-1	电力网线损计算的范围	6
2-2	电力网线损计算需要的原始数据	7
2-3	电力网的负荷及负荷曲线	9
2-4	导线电阻随温度变化的修正方法	13
2-5	电晕损失电量计算	15
2-6	变压器的铁芯损耗	29
2-7	调相机、电容器、电抗器的电能损耗计算	30
2-8	变电站二次回路设备的电能损耗及自用电量	35
第三章	电力网线损计算和分析的一般方法	37
3-1	已知负荷曲线时电能损耗的计算	37
3-2	损失因数法	39
3-3	最大负荷损耗小时数	44
3-4	损失因数和最大负荷损耗时间之间的关系	51
3-5	利用日均方根电流计算电力网的线损电量	53
3-6	0.4kV低压配电网线损的计算	64
第四章	结点等效功率法	69
4-1	结点等效功率法的基本原理	70
4-2	利用方差计算等效功率	74
4-3	利用等效系数计算等效功率	82
4-4	复杂电力网的线损计算	94

4-5	结点平均功率损失的修正	106
第五章	计算配电网中电能损耗的等值模型	114
5-1	配电线路和配电网的等值电阻模型	114
5-2	配电线路和配电网的概率统计模型	124
5-3	配电线路和配电网的等值阻抗模型	127
第六章	回归分析方法在线损计算和分析中的应用	135
6-1	问题的提出	135
6-2	一元线性回归分析	136
6-3	多元线性回归分析	155
6-4	配电网线损理论计算中回归分析的数学模型	165
6-5	逐步回归分析及程序框图	169
6-6	判别分析及聚类分析方法用于线损的分析和计算	189
第七章	考虑负荷曲线和发电出力曲线影响时电力 网线损计算方法和实用程序	215
7-1	负荷曲线的形状及发电出力曲线的形状对线损的 影响	217
7-2	线损计算实用程序的组成	225
7-3	线损计算实用程序的使用说明	232
7-4	各种线损理论计算方法的评述	261
第八章	降低电力网线损的技术措施	265
8-1	电力网的改造	265
8-2	电力网及其设备的经济运行	267
8-3	电力网负荷的无功功率补偿	284
	参考文献	290

第一章 概 述

电力系统中发电厂生产的电能是通过电力网的输电、变电和配电环节供给用户的。在输送和分配电能的过程中，电力网中各元件（变压器、输电线路、补偿和调整设备以及测量和保护装置等）都要耗费一定的电能。

在给定时段（日、月、季、年）内，电力网的所有元件中产生的电能损耗称为电力网的线损电量，简称线损并记作 ΔA 。通常，线损是用电度表计量的“总供电量(A_{dem})”和“总售电量(A_s)”相减得出的，即 $\Delta A = A_{dem} - A_s$ 。我们把线损电量占供电量的百分数称为线损率，即

$$\begin{aligned}\Delta A(\%) &= \Delta A \times 100\% / A_{dem} \\ &= (A_{dem} - A_s) \times 100\% / A_{dem}\end{aligned}$$

在电力网的实际运行中，用电度表计量统计出的供电量和售电量之差得到的线损电量，称为统计线损电量（相应的线损率称为统计线损率）。在统计线损电量中，有一部分是电能 在输、变、配过程中不可避免的，其数值由相应时段内运行参数和设备参数所决定。其中包括：与电流平方成正比的变压器绕组和输电线路导线中的电能损耗（ I^2R 损耗或负载损耗）；与运行电压有关的变压器铁芯、电容器和电缆的绝缘介质损耗以及电晕损耗（空载损耗）等。这部份损耗电量习惯称为“技术线损电量”，它可以通过理论计算得出，所以又称为理论线损电量（相应的线损率为理论线损率）。它可以通过技术措施予以降低。统计线损的另一部份

是由于管理工作上的原因造成的，它包括：各种各样的电度表综合误差、抄表不同时、漏抄及错抄错算所造成的统计数值不准确；带电设备绝缘不良引起的漏电、无表用电和窃电等造成的损失电量。这部份电量习惯称为“管理线损电量”。它应该而且可以采取必要的组织措施和管理措施予以避免或减少。在线损管理工作中，既要重视降低“技术线损电量”，也要重视避免和减少“管理线损电量”。

由于统计线损电量包括了“管理线损电量”部份，因此统计线损不一定能反映电力网的真实损耗情况；并且由于电力网的结构、电源类型和布局、负荷性质及负荷曲线等均有很大的不同，所以各地区不同的电力网的线损率也是不同的，有时差别还较大。因此一般不能象同类型发电设备有相同的考核指标那样，用统一规定的某个标准值作为衡量和考核各个电力网线损的指标。这就给各电力网线损的“可比性”带来困难。除加强线损的小指标考核外，一般只好通过理论计算求出电力网的理论线损率，再与统计线损率进行比较，两者应是相符合或接近的。如果计算准确而两者相差又太大，则说明“管理线损”部份过大，即线损管理工作中存在需要改进的地方。

线损理论计算工作，除对加强线损管理及制定合理线损考核指标有重要的作用外，对降低损耗的各种技术措施方案进行技术经济比较和考察各种降低损耗措施的实际效果等，也是很重要的。通过计算，可以基本上知道电力网中损耗的构成情况，如理论线损占多少，不明损耗占多少，电力网中各级电压电网的损耗占多少，各元件中损耗是多少，变压器及其绕组和铁芯中损耗是多少等等，以便于掌握总的情况，有利于线损的分级、分压、分区管理。尤其在对需要增加投

资的降损措施进行各种方案的技术经济比较时，更应该进行较准确的线损理论计算。此外，经验表明，通过计算还可以发现和改进技术管理工作中的薄弱环节，如表计计量工作和技术档案管理工作是否经常化和制度化等。由此可见，线损理论计算对于线损管理工作可以起到指导和促进的作用。

从世界各主要国家线损的变化情况来看，线损率大约从1950年前后的10%以上逐渐降到目前的5~8%（参见表1-1和图1-1）。而且，在七十年代以后，它逐渐稳定下来，并保持在一定的水平上。

表 1-1 八个主要工业国家电力网线损率 单位：%

年 份	美国	苏联	日本	西 德	英 国	法 国	加 拿 大	意大利
1960	8.4	7.3	11.4	6.6	9.5	9.5	9.4	13.0
1965	8.0	6.9	8.7	6.0	8.3	7.9	8.9	10.0
1970	8.1	7.9	6.7	5.6	7.7	7.1	8.1	8.7
1971	8.8	8.0	6.6	5.7	7.9	7.0	7.8	8.6
1972	8.9	8.2	6.6	5.2	7.7	6.8	8.1	8.1
1973	8.5	8.0	6.4	5.0	7.4	6.6	9.0	8.7
1974	8.4	8.0	6.1	4.8	7.2	6.5	9.3	7.9
1975	8.8	8.0	6.4	5.1	7.6	6.8	10.5	9.0
1976	8.5		6.3	4.8	7.3	6.9	9.8	8.9

由表1-1可以看出，八个主要工业国家近年来的线损率相互间的差别还是较大的。这是由于各国的能源分布和组成情况不同；超高压远距离输电的比重不同；以及用电水平，供用电体制，输电、供电和配电电压等级及变电层次不同等多种因素决定的。

解放以来，我国的电力网有了很大的发展。电力网在发展的同时也在不断地改造和完善。特别是近年来加强了对电

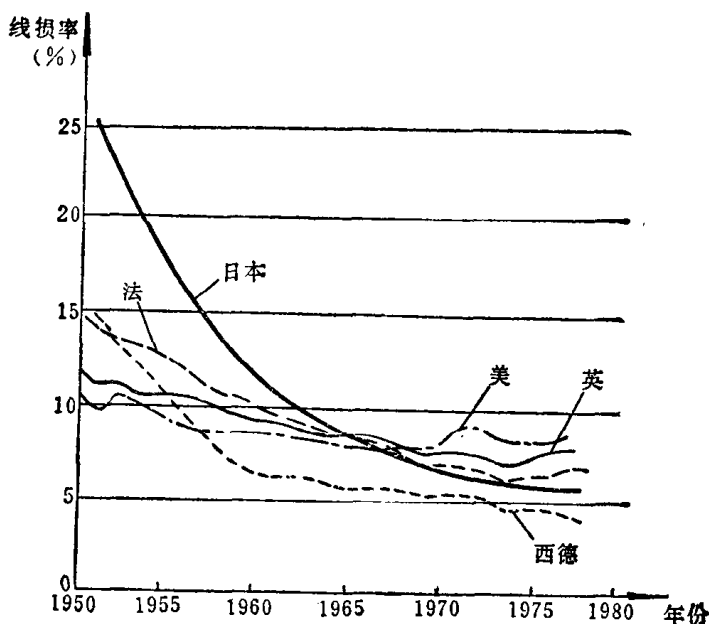


图 1-1 五个国家线损率的变化情况

力网的技术改造和技术管理，因而线损率达到了目前约 9 % 的水平。但比起各主要工业国家来还是偏高的。这是由于：我国目前超高压（330kV及以上电压）输电线路的线损比例不大（八个国家330kV以上电网线损占10~15%）；各级供电电压的电力网中，尤其是在10/0.4kV变压器和0.4kV馈电网（通常这两部份低压电网线损约占总线损的一半以上）中存在大量的高压侧计量的用户自维专用变压器，这种变压器及由它供电的低压电网的线损均计入用户的购电量中。因此，总的说来，我国的电力网中还大有降损节能的潜力。当然，由于我国幅员广大，供电分散，电网的投资和发展速度与电源和用户的发展不相适应，以及人民生活用电及农村用电比例的增长等原因，降低线损也是有一定限度的。

由上述可知，线损率是电力系统的一项重要技术经济指标。它是综合衡量电力企业管理水平的主要标志之一。特别对供用电部门来说，它是一项主要的技术经济考核指标。目前，如果全国平均线损率能下降 1%，每年就可以少损耗电能约 $30 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$ 。因此，我们不但应该在电能的生产过程中努力提高发电效率，降低自用电消耗，降低煤耗率，节约国家能源，降低发电成本，而且还应该在电能的输配过程中，加强线损管理，采取降损措施，降低线损率。

最后还需着重指出，电力网的线损是指一定时段内网络各个元件上的功率损耗对时间的积分值的总和。在这个意义上讲，准确的线损计算比在电力系统确定的运行方式下稳态潮流计算还复杂。这是因为：表征用户用电特性的负荷曲线具有很大的随机特性，各元件上的功率损耗对时间的解析函数关系难以表达出来，只好用数理统计的方法去解决；同时由于表计配置不齐备，运行数据收集不全，网络的元件和结点数太多（尤其是配电网），使运行数据和结构参数收集整理很费事，造成线损计算工作量大。因此，应该根据不同的要求和具体情况（例如，是制定合理考核指标，还是局部电网补偿方案的技术经济比较；是供电网的线损计算，还是配电网的线损计算等），采用不同的线损简化计算方法，以便尽量少花费人力物力而又能达到要求的准确度。

第二章 线损理论计算和分析的 一些共同问题

本章分析与各种线损计算和分析方法有关的几个共同问题。

2-1 电力网线损计算的范围

电力网线损计算的范围是：从发电机出口装设的电度表处开始（但不包括厂用电度）到各用户电度表处为止（包括用户电度表本身损耗）。在这个范围内，一切输电、变电、配电元件中各种形式的电能损耗均应计入电力网线损中。应当计算线损的元件有：

（1）各个升压和降压变电站的主变压器及联络变压器（用户自维专用变压器除外）；

（2）各级电压的输电线路（用户自维专用线路除外）；

（3）6~10kV及以上的高压配电线路（用户自维专用线路除外）；

（4）配电变压器（用户自维配电变压器除外）；

（5）供电部门所属的0.4kV低压配电线路；

（6）升压及降压变电站内的各种一次及二次运行设备。它包括：各种串联、并联静电电容器和电抗器，调相机，电流、电压互感器，各级电压母线，保护、测量、控制、信号回路等各种二次设备；

(7) 变电站的自用电 (不包括变电站生活用电, 扩建和改建时施工用电, 设备大修时检修用电等);

(8) 接户线及用户电度表。

在上述输电、变电、配电元件中, 导线电阻的发热损耗, 铁芯损耗, 调相机的机械损耗, 电缆和电容器的介质损耗, 架空输电线路的电晕损耗和绝缘子漏电损耗等均属线损计算范围内。

2-2 电力网线损计算需要的原始数据

电力网线损计算的误差一般决定于: 原始资料的准确性; 线损计算依据的数学模型的精确性; 数学方法的精确性以及计算机上的舍入误差等。对于稳态计算来说, 设总误差为100, 则上述各项占总误差的百分数大致为:

由于原始数据不准确所造成的误差为82~84%;

由于数学模型不精确所造成的误差为14~15%;

由于数学方法不精确所造成的误差为2~3%。

显然, 主要误差是原始数据不准确造成的。对于线损计算来说, 因为原始数据中包括具有随机特性的负荷及负荷曲线, 所以, 由它造成的计算误差的百分数范围可能更大。可以说, 原始数据 (主要指负荷资料) 是否准确和齐备是影响线损计算准确性的关键因素。

线损计算所依据的原始数据分为两类, 一类是有关电力网结构的元件参数及结线图; 另一类是有关电力网运行的数据 (如电流、电压、功率因数、有功和无功功率、计算时段内的有功和无功电量等)。

电力网元件参数比起运行数据来实际上变化是很小的。

在所计算的时段内，元件参数经常是不变的，只有设备的计划和事故检修，改建、新建或扩建以及进行电网经济调度等使设备投入或退出运行而使运行方式改变时，元件参数才会有明显变化。所以元件参数部份数据的变化与观察研究的时段有关。但是可以认为，元件参数方面的资料总是能够获得的。

电力网运行资料决定于：在分析计算的时段内网络各结点的电压和负荷曲线；通过各元件的有功和无功功率及其随时间的变化规律；各电源点的出力；补偿设备的运行方式等。由此可见，运行数据的变化是很大的，且具有随机特性。其中，最关键的资料是网络中各结点的负荷曲线。各结点的负荷曲线直接影响元件中的电流变化及电源出力。所以对负荷及负荷曲线进行较详细的分析是十分必要的。

必须指出，对于全电力网的线损计算，要求的原始数据的收集整理的工作量很大。所以线损计算的方法应该考虑到使用尽可能少的必要的运行和结构数据，而又满足计算准确性的要求。特别应该研究在配电网的资料不充分的情况下线损的计算方法。显然，在一般情况下，数据愈充分、愈准确时，计算结果的误差也愈小，但工作量也愈大。所以应根据不同的准确性要求（例如，目的是进行线损预测，拟定考核指标，还是在具体情况下对需要增加投资进行的降损措施方案的技术经济比较等）提出不同的计算方法，以便尽量减少数据的收集范围。

只有发展对主要负荷的直接监控和测量系统及计算机网的数据处理系统，才能更有效地解决线损计算所要求的原始资料问题。

2-3 电力网的负荷及负荷曲线

如上所述，掌握负荷变化规律是进行较准确的线损计算的关键。电力网中的负荷是随时间变化的，表示负荷随时间变化的曲线称为负荷曲线。

负荷曲线以横坐标表示时间，纵坐标表示负荷的大小。如图2-1所示的有功功率日负荷曲线，表示电力网负荷在一天当中的变化规律。实际的日负荷曲线是一条连续曲线，如图2-1(a)所示。为了计算分析方便，可以近似地用变电站每小时值班记录数据绘制的阶梯形负荷曲线来代替，如图2-1(b)所示。为了表示日负荷曲线的起伏特性，常用下列系数说明。

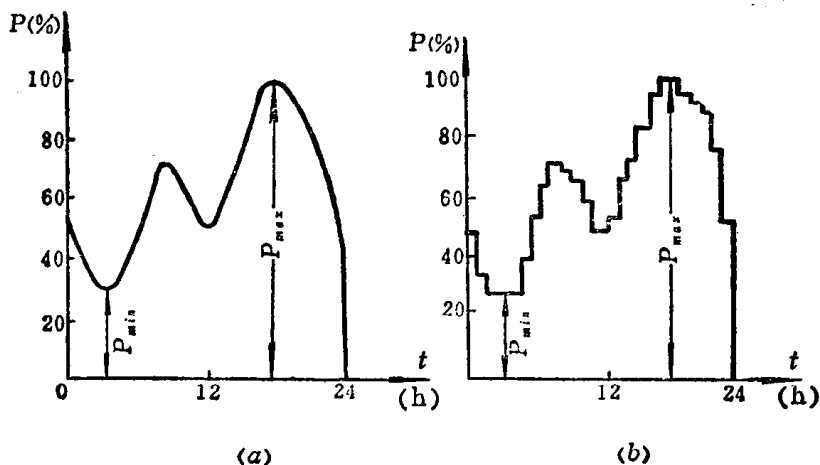


图 2-1 有功功率日负荷曲线
(a)连续的负荷曲线，(b)阶梯形负荷曲线

$$\left. \begin{aligned} \text{平均负荷系数 (简称负荷率)} f &= \frac{P_{av}}{P_{max}} \\ \text{最小负荷系数 (或称最小负荷率)} \alpha &= \frac{P_{min}}{P_{max}} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中 P_{max} 、 P_{av} 、 P_{min} ——分别表示日负荷曲线的最大值、平均值、最小值。

同样，也可绘制出无功功率负荷曲线。由于无功功率主要由变压器及异步电动机的绕组和铁芯中无功消耗所组成，而占比例很大的铁芯无功消耗与有功负荷基本无关，所以，通常综合负荷的无功功率负荷曲线比有功功率负荷曲线平坦一些。

在线损计算中，有时使用电流的负荷曲线更为方便。

在运行中，总是希望负荷曲线的高峰 (P_{max}) 和低谷 (P_{min}) 相差愈小愈好，因为这样不但可以使电气设备得到更充分的利用，而且给电力系统的调频调压都创造了有利条件，同时电网运行也经济一些，即在供电量相同的情况下线损较小。在我国优越的社会主义制度下，采取了“调荷节电”的各项措施，能够比较合理地、有计划地安排各类用户的用电时间，因而使电力网的日负荷曲线变得相当平坦。对于地区变电站来说，它使负荷率 f 、最小负荷率 α 均接近于 1。这不但有助于解决电力供不应求的矛盾，而且对电力系统经济运行，降低电力网的线损率也颇为有利。

电力网的日负荷曲线和变电站的日负荷曲线是由许多单个用户的日负荷曲线综合而成的。单个用户的日负荷曲线对 6~10kV 配电网的线损计算影响很大。它的形状和负荷的用电性质有关，不同行业的日负荷曲线差别很大。如图 2-2 (a) 所示的三班制生产的企业，它的负荷曲线很平坦，最小

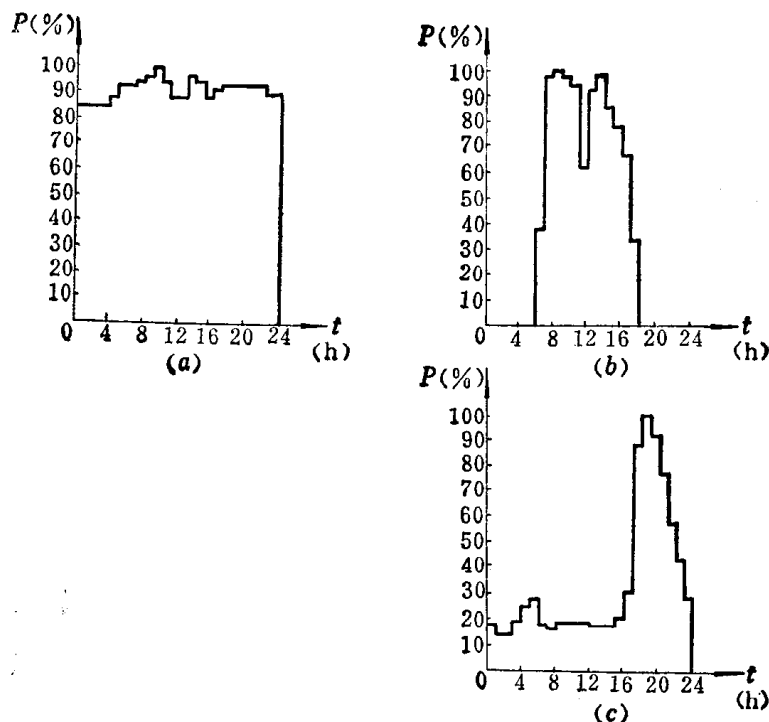


图 2-2 日负荷曲线
 (a)三班制生产企业, (b)一班制生产企业,
 (c)城市公用配电变压器负荷

负荷率 α 可达 0.85~0.9; 图 2-2(b) 所示的一班制生产的企业, 其负荷曲线变化幅度较大, 最小负荷率 α 为零; 供城市生活用电的公用配电变压器的负荷曲线如图 2-2(c) 所示, 它有明显的照明用电高峰。

除日负荷曲线外, 还有线损计算时段内负荷的变化规律曲线, 即月、季、年的负荷曲线。

年持续负荷曲线表示一年中负荷大小与使用时间的关系, 它是按负荷大小的顺序与相应使用时间的关系经过整理

而绘制的。

图2-3表示某用户的有功功率年持续负荷曲线,该用户年总用电时间为 8760h, 其中达到最大负荷的为 4000h, 达到 50% 最大负荷的有 3000h, 其余 1760h 为最大负荷的 25%。曲线下面的面积 $abcdefg$ 表示该用户的全年用电量 A , 即

$$A = \int_0^{8760} P dt \quad (2-2)$$

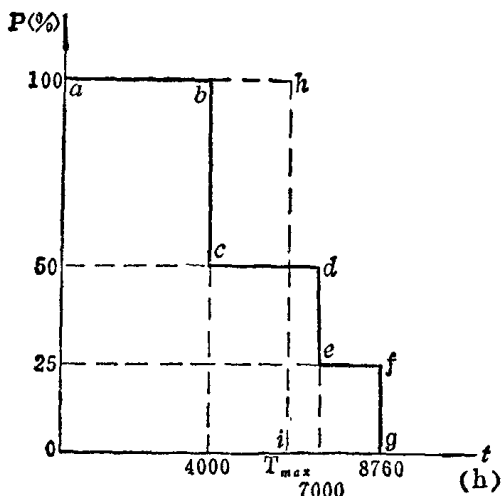


图 2-3 某用户的年持续负荷曲线图

在图2-3中, 若以最大负荷 P_{max} 为一边作矩形, 使矩形面积等于曲线下面的面积, 即

$$S_{ahio} = S_{abcdefgo},$$

则矩形的另一边 (在时间坐标上) oi 的长度称为最大负荷利用小时数, 用符号 T_{max} 表示。 T_{max} 的意义是用户以最大负荷 P_{max} 运行 T_{max} 小时时, 所吸取的电等于该用户全年实际上吸取的电 A 。显然

$$A = P_{max} T_{max} = \int_0^{8760} P dt$$

或

$$T_{max} = \frac{A}{P_{max}} = \frac{\int_0^{8760} P dt}{P_{max}} \quad (2-3)$$

对图2-3所示的负荷曲线

$$T_{max} = \frac{100 \times 4000 + 50 \times 3000 + 25 \times 1760}{100} = 5940 \text{ (h)}$$

各类用户全年所消耗的电能 A 及最大负荷 P_{max} ，都可以由电度表和功率表测得。因此最大负荷利用时间 T_{max} 可以由式(2-3)求得。根据运行经验，各类用户的最大负荷利用小时数的范围如表2-1所示。

表 2-1 各类用户最大负荷利用小时数的范围

负 荷 类 型	最大负荷利用小时数 T_{max}
户内照明及生活用电	2000~3000
一班制企业用电	1500~2200
二班制企业用电	3000~4500
三班制企业用电	6000~7000
农业排灌用电	1000~1500

2-4 导线电阻随温度变化的修正方法

输电线路导线的电阻值 R 与导线的温度有关，同时导线的温度由通过该导线的负荷电流及其环境温度所决定。为了