

微地形微气象 对送电线路的影响

王守礼 李家垣 编著
李跋群 审校

中国电力出版社

内 容 简 介

本书根据送电线路的运行经验,结合大量实地考察资料,系统地介绍了微地形、微气象对送电线路的影响问题。书中着重阐述:微地形、微气象的概念及定义,研究微地形、微气象的意义及调查方法,送电线路微地形、微气象点的典型实例及事故分析,云南山区送电线路微地形、微气象的调查研究及改进措施,国外送电线路微地形、微气象概况等。

本书可供送电线路设计、建设、运行以及电力、邮电、气象等部门的工程技术人员和大中专院校有关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

微地形微气象对送电线路的影响/王守礼,李家垣编著.
北京:中国电力出版社,1999

ISBN 7-80125-960-2

I. 微… II. ①王… ②李… III. ①微地形-影响-输电线路②小气候-气候影响-输电线路 IV. TM726

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第04222号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市梨园彩印厂印刷

各地新华书店经售

*

1999年4月第一版 1999年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 5.125印张 112千字

印数0001—2000册 定价10.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序



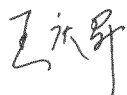
电线覆冰是一种分布广泛的自然现象，对安全供电有很大的危害性，挪威、日本、原苏联、美国、加拿大等国都在探索研究这个课题。我国是世界上送电线路覆冰严重的国家之一。云南省地处云贵高原，海拔高而地形复杂，山势险峻，气候多变，在个别特殊地段形成的垭口、峡谷、分水岭等微地形、微气象点，覆冰及风速特大，每年冬天，在山区及高寒山区，因严重覆冰及大风而造成的送电线路倒杆、断线的事故很多，其中以 1960~1965 年最为频繁。70 年代以后，云南省电力设计院按气象条件划分了冰区等级，在设计上充分考虑各类冰区的特点分别对待，同时采取了“避、抗、改”等反事故措施，运行情况才有所改善，事故率已逐年下降。

改革开放以后，我国的电力工业迅速发展，各省的电网建设发展很快，通过复杂地形及恶劣气候地区的送电线路日益增多，在微地形、微气象点发生的事故也较为突出。最近几年，我国 330~500kV 输电线路因大风及覆冰连续发生了几起严重的倒塔、断线事故，已引起电力工业部领导的重视，1994 年 1 月由电力工业部安全监察与生产协调司、国家电力调度通信中心及电力规划设计总院三个单位共同召开了 500 (330) kV 送电线路倒塔事故分析及对策会议，对事故原因进行了分析，提出了相应的对策及技术措施，并颁发了安生技 (1994) 28 号文件。

在 1991~1996 年期间，云南电网 220kV 线路在轻冰区、中冰区的微地形、微气象点相继发生四次倒塔事故，其原因都是由于不均匀覆冰及大风而造成的。云南省电力局领导对此十分重视，及时召开了事故分析研讨会，遵照电力部安生技（1994）28 号文的精神，由省电力设计院及五个供电局对我省已投入运行的 220kV 线路在地形特殊的微地形、微气象点进行复核。结果表明：在 1254km，3065 基杆塔中存在隐患必须改造加强的有 118 基，占 3.85%。

本书作者之一的王守礼同志是我局电力设计院线路室原主任工程师、教授级高级工程师、云南电力优秀科技工作者，长期从事线路设计及电线覆冰的研究，先后参加了滇东北冰害事故的调查改造，编制了《云南地区输电线路气象分区》，参与了三个电线覆冰观测站的建设，参加了电力工业部组织的《重冰区架空送电线路设计技术规定》的编写工作，发表过线路专题论文 20 余篇，其中：1987 年撰写的《云南高海拔地区架空送电线路的覆冰及防护》及 1996 年撰写的《影响电线覆冰因素的研究及分析》两篇论文（英文稿）被选入国际会议论文集。1993~1994 年他和云南省气象局李家垣同志共同编写了《云南高海拔地区电线覆冰问题研究》及《电力气候》两书，前者获得电力部及云南省颁发的科技进步奖。90 年代初先后应邀去青海、江西、四川等省的微地形、微气象点进行考察及协同解决工程问题。1996 年 10 月至 1997 年 4 月参加了云南省电力工业局组织的微地形、微气象点的现场调查工作，提出了改进措施，撰写了专题报告，此报告在 1997 年 5 月电力部科技司召开的“高压输电线路防冰害技术研讨会”上得到国内专家的好评和热情鼓励。为此，作者系统整理了多年积累的资料，结合现场调

查研究的成果，介绍了国内外冰害事故的情况及抗冰措施，编纂成书，全面论述了微地形、微气象对送电线路的影响，对提高我国送电线路的设计水平及安全供电提供了可贵的参考资料。王守礼同志现虽已退休，但仍在发挥余热，这种精神殊为可嘉，是为序。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王守礼' (Wang Shouli), written in a cursive style.

1998年11月

序 二

山区地形复杂，天气多变，气候多样，与人类活动关系密切。正因为如此，山地的天气、气候引起人们的注意。随着云南电力建设的发展，电力资源的开发，输电网络的扩大，各种复杂地形下的气象条件和局部地区的灾害性天气对输电线路的影响，自然得到气象科技工作者的重视。

众所周知，下垫面是形成气候的三大自然因子之一，在相同的太阳辐射和大气环流的条件下，不同的下垫面可以形成彼此大相径庭的气候。同样，在相同的天气系统影响下，不同的地形条件可以造成程度不同的灾害性天气。例如，地形对降水的影响，地形对风速的影响，地形对结冰的影响等等。可见，深入开展局部地区大风、电线积冰等灾害性天气规律的研究，对提高线路设计的科学性和减少送电线路事故的损失具有十分重要的意义。

继出版《云南高海拔地区电线覆冰问题研究》和《电力气候》两书之后，电力和气象科技工作者又携手推出了《微地形、微气象对送电线路的影响》这一应用气象研究的力作。该书收集研究了国内外大量的资料，总结了在云南复杂的地形下，建设输电线路中实地考察和调查的成果。对微地形、微气象的概念、定义、调查方法、典型事故分析及防护措施等，进行了比较深入系统的论述和探讨，具有较大的科学价值和实用价值。

当代科学技术发展的重要趋势是学科之间的交叉、渗

透、融合，导致学科的综合化，整体化。运用多学科知识和方法研究解决重大课题，组织多学科联合攻关，是当代科学研究的又一大特点，也是科技发展最有前途的方向。上述代表当代科技发展和科技开发研究的思想方法在该书得到了较好的体现，因此，该书提供的科学思想和技术方法成为解决生产实际问题的实用成果。电力与气象科技工作者跨学科合作，开发具有广泛应用领域的成果是本书的又一特点。

虽然气象科学已经进入一个新的阶段，各种新的探测仪器不断出现，电子计算机的普及应用都为获取气象资料和研究开辟了新的途径，但是由于地形对天气气候的影响因素相当复杂，各类地形差异显著，而送电线路建设对地形、气象条件的要求又是那样的具体详细，一般性的理论研究和大气气候的观测资料远远不能满足要求。因此，实地调查和精密仪器观测仍不失为有效的方法。可见该书提供的微地形、微气象调查研究的技术方法和实例具有重要的参考作用。

本书第二作者李家垣同志，高级工程师，1958年毕业于南京大学气象学系，先后在云南省气象台、云南大学、云南气象科学研究所工作近40年，在云南省的天气预报业务、气象科研、气象教学中，均有一定建树，积累了丰富经验。在天气预报方面著有《单站气象要素统计预报天气方法研究》、《印度季风对我国降水的贡献》、《云南暴雨的初步分析》、《能量及耗散原理等预报天气方法》、《南支槽对云南天气的影响》等气象论文。在教学方面编译了《西南天气分析和预报》、《强对流天气》、《能量预报方法》等四本讲义。特别是近几年来，致力于应用气象研究，尤其是与云南电力建设密切相关的电力气象研究，与王守礼同志合作，先后完成了《云南高海拔地区电线覆冰问题研究》、《电力气候》和

《微地形、微气象对送电线路的影响》三本专著，还具体参与了滇东北部分 110kV、220kV 送电线路的考察以及云南仅有的两条 500kV 超高压送电线路气象条件研究工作。共发表论文、科研报告 20 余篇，曾荣获省部级二等奖（电线覆冰）1 个，三等奖（林火预报、电线覆冰等）3 个。

Handwritten signature in black ink, consisting of two characters: '谭' (Tan) and '乾' (Qian).

1998 年 11 月

目 录

序一	王庆昇
序二	恽 彭
第一章 概述	(1)
第二章 微地形、微气象的概念及定义	(6)
第一节 地形的成因及分类	(7)
第二节 微地形的定义	(9)
第三节 气候的成因及分类	(12)
第四节 微气象的定义	(17)
第三章 研究微地形、微气象的意义	(19)
第四章 微地形、微气象的调查方法及内容	(20)
第一节 调查前的准备	(20)
第二节 微气象观测	(20)
第三节 微地形考察	(22)
第五章 微地形、微气象点的典型事故分析	(24)
第一节 典型大风事故分析	(24)
第二节 典型冰害事故分析	(33)
第六章 我国部分送电线路通过微地形、 微气象点的实例	(50)
第一节 垭口型	(50)
第二节 高山分水岭型	(60)
第三节 水气增大型	(65)
第四节 地形抬升型	(72)
第七章 设计中微地形、微气象点 采取的技术措施	(82)

第八章 云南山区送电线路微地形、 微气象的调查研究	(85)
第一节 500kV 送电线路微地形、微气象的调查研究	(85)
第二节 220kV 送电线路微地形、微气象点的调查 研究及改进措施	(117)
第九章 国外部分送电线路微地形、微气象简介	(127)
第一节 挪威关于架空线路冰荷载的推测、覆冰荷载 测量及微地形事故实例	(127)
第二节 日本送电线路覆冰概况、微地形事 故实例及覆冰观测	(131)
第三节 前苏联送电线路覆冰概况及微地形事故实例	(138)
第四节 国外与地形有关的冰害事故实例	(143)
编著者的话	(149)
参考文献	(151)

第一章 概 述

随着电网的发展延伸，通过复杂地形及恶劣气候条件地区的输电线路日益增多。云贵高原、川陕山区、湘赣一带曾发生频繁的电线覆冰引起的倒杆断线事故；近年来我国电网的主干线 500（330）kV 线路也因大风及覆冰接连发生了倒塔事故。产生上述事故的原因之一，是设计时对微地形、微气象的认识不足，对沿线风口、峡谷、分水岭等高山局部特殊地段的气象资料掌握不够。在一条几十千米至几百千米长的山区送电线路中，山岭纵横、海拔高程悬殊，气象变化显著，小气候特点十分突出，邻近气象台（站）的观测记录，不能满足微地形地段线路设计的要求，更难反映局部微地形点的实际气象情况。

微地形对大风形成及电线覆冰强度等气象因子都会产生很大的影响。在微地形对风速增大的影响方面，线路横跨陡峻的河谷，当谷口正迎主导风向时，风速较大；当气流由开阔地区进入狭窄地区时，由于狭管效应，风速增大；突出开阔的山顶，高空强劲的风速受不到周围山脉的阻挡，风速较大。在电线覆冰方面，山脉的走向与坡向不同，覆冰都会有很大的差异，一般迎风坡及开阔地区覆冰重，背风坡及闭塞地区覆冰轻；山体部位不同，电线覆冰也会有明显的差异，一般山顶、分水岭、垭口等地覆冰重，山脚、山腰、山凹等地覆冰较轻；线路靠近江湖水体，水气充足，覆冰较重，线路远离水体，空气干燥地区覆冰较轻。在山区线路设计中，

无论是无冰、轻冰、中冰区或重冰区，都会遇到“微地形”问题。特别是云南高原具有明显的立体气候特征，在一个小范围内，由于地形的不同，气候会有很大的差异，故有“十里不同天”之谚。因而电线覆冰具有多样性、局部性的小地形特点。无冰区的局部高山、垭口会出现冻结现象；反之，覆冰地区的局部深沟、河谷也会有不冻结的情况。在山川纵横，垂直高度悬殊，天气变化受地形影响显著的局部地段，电力设计单位与当地气象部门协作，进行“微地形、微气象”考察是十分必要的。正如《电力气候》^[1]中所说的那样，合理选择气象条件就能得到经济效益，气象条件选择不当就会造成经济损失。这方面的经验教训是很多的。

一、合理选择气象条件得到的经济效益

使用合理的气候指标值和充分利用气候资源，不但可以预防灾害，还可以得到很大受益。如新安江水电站至杭州的双回路高压送电线路，设计风速比原定的减小 5m/s ，既能保证安全，又使总投资节省 50 万元。杨柳青电厂要设计一个 90m 高、 3500m^2 蒸发面积的冷却塔，取不同的风压值所需的钢筋量列于表 1-1，假定以第一方案塔顶的风压作为 1.0，那么第 V 方案的风压为第一方案的 2.5 倍。以第一方案的钢筋用量为 1.0，则第 V 方案为第一方案的 3 倍。

德国一条高压送电线路原设计建立 500 个铁塔，根据气象分析，认为可以减少 10 个左右，相当于节约 12.5 万美元。前苏联乌里扬诺夫斯克（Ульяновск）周围地区设计送电线路时，降低了雨淞积冰的极大值，相应地节省 100 万卢布。在我国援建巴基斯坦比拉—瓦赫 230kV 送电线路中，巴方提出的风压为 1244.6Pa ，但按我国的计算方法，结合当地气候条件分析，认为取 754.6Pa 即可，仅就钢材而论，

表 1-1 不同设计风速钢筋用量比较

项 目	设计风速 (m/s)	基本风压 ($\times 9.8\text{Pa}$)	高度 系数	超载 系数
I	60 年一遇, 20m 高, 10min, 平均	50	1.64	1.4
II	60 年一遇, 10m 高, 10min, 平均	$50/1.25=40$	1.90	1.3
III	100 年一遇, 20m 高, 10min, 平均	$50 \times 1.1=55$	1.64	1.3
IV	100 年一遇, 20m 高, 瞬时	$50 \times 1.5=75$	1.64	1.3
V	100 年一遇, 20m 高, 瞬时	$50 \times 1.5=75$	1.64	1.3

项 目	风 振 系 数	重要性 系 数	塔顶计算风压 ($\times 9.8\text{Pa}$)	计算风 压 比	计算用钢 筋量 (t)
I			115	1.0	68
II	1.5		148	1.29	92
III	1.5		176	1.53	113
IV		1.2	192	1.67	125
V	1.5	1.2	288	2.50	205

就节约 500~600t。云南者海至昭通 220kV 送电线路, 通过滇东北重冰区, 经气象专家现场考察鉴定, 对个别微地形、微气象点采取加强措施后, 最大设计冰厚由 30mm 特重冰区降低为 20mm 重冰区, 可节省基建投资约 700 万元。

合理利用和开发气候资源所产生的经济效益有时是难以估量的。这里仅就风力开发利用中的几个事例加以说明。如江苏兴化地区, 1967 年有风车达 36278 部, 用风力机进行农田灌溉与使用柴油抽水机相比, 全年可节约柴油 1 万 t 左右。又如 1982 年在原国家能委支持下, 对我国大中型风力发电站址进行了调查比较, 以 200kW 风力发电机为例, 安装在不同地区的发电量和经济效益就有较大差异, 如发电量, 平潭 (北井) 为 73 万 kW·h, 嵯泗为 50 万 kW·h, 福

建东山为 62 万 kW·h，按折算每年节约柴油分别为 201t、153t 和 146t。

二、气象条件选择不当造成的经济损失

在电力建设的规化和设计中，违背气候规律或是对气候的指标选择不当，都可能造成很大的经济损失。如湖南省 1954 年底至 1955 年初发生一次严重的冰凌，全省普遍冰冻十多天，电线覆冰最大值均超过设计冰厚 10mm，湖区达 50~70mm，沅江最大达 120mm，南岳衡山（海拔高程 1266m）冰厚达 320mm，大部分送电线路发生断线和倒杆事故，使工矿企业停电，经济损失很大。造成这次事故的原因，一是出现了超过规程规定重现期的稀有的特大冰凌，二是在设计中对可能出现的冰凌厚度估计偏小。1961 年 1 月 4 日，云南 110kV 以东线位于金沙江与小江分水岭上的 53 号杆被大风吹倒，造成东川铜矿停电 7 天，经济损失非常惨重。云南 220kV 小昆 II 回线，位于南盘江与华西河分水岭的 108 号猫型直线塔，于 1991 年 12 月 29 日由于不均匀覆冰，不平衡张力的作用造成塔头从猫脖子处向覆冰较重的山顶风口处倒塌的重大事故。1992 年 10 月 4 日至 5 日，青海高原的 330kV 龙黄线、龙花 I、II 回线，在湟源县与蝗中县交界的崾山地区，由于导地线严重覆冰，发生 8 基铁塔倒塌事故。华中地区的 500kV 葛双 II 回线 231~235 号局部地段，因严重覆冰，于 1993 年 11 月 19 日及 1994 年 11 月 16 日连续两年发生倒塔事故。

这些事故与设计荷载取值偏低及设计中对送电线路经过的微地形、微气象点未进行深入的考察研究有关。

有一个火力发电厂，由于设计选址没有认真考虑气象条件，待基建完成发电机投产运行时，发现在山谷里烟尘排放

不出去，造成周围严重空气污染，只好被迫减少发电机组。一个按 40 万 kW 发电量建设的电厂，现在只能安装 12 万 kW 的机组，造成基建投资的巨大浪费。英国渡桥（Ferry-bridge）电站 8 座巨型冷却塔，塔高 114.3m（375ft），分列两排。在 1965 年 11 月 1 日的一次大风中后排的 3 座被吹垮，也是由于设计风压比标准规定偏小 10% 造成的。

加拿大东部魁北克的 735kV 超高压输电线路，在海拔 450~1200m 的山区，由于设计时对局部微地形地段冰荷载取值偏低，于 1969 年 11 月末，导线覆冰重量达 37kg/m，覆冰直径为 20~23cm，使铁塔倒塌 28 基，经济损失很大。广西省 110kV 融桂线，通过平地、丘陵及高山大岭地区，全线统一按 5mm 覆冰厚度设计。1976 年 12 月至 1977 年 1 月间，三次寒潮入侵，在金竹坳及土地庙高山地区的微地形、微气象点，导线最大覆冰厚度达 30mm，超过设计冰厚的 3~6 倍，使送电线路发生三次接地短路跳闸事故，共停电 17 天，少送电 377 万 kW·h。

在设计山区送电线路时，对“微地形、微气象”的影响是不容忽视的。沿线气象区的划分及分段，必须深入现场调查研究，充分考虑微地形对大风及覆冰增大的影响，必要时可针对每一小段，甚至每一档的具体情况采取相应的技术措施，并适当加大线路部件的安全系数，以保证线路安全运行。

本书简要介绍微地形、微气象的定义，研究微地形、微气象的意义及调查方法，送电线路微地形点的典型事故分析，我国部分送电线路通过微地形、微气象点的实例，国外送电线路微地形、微气象概况，云南山区送电线路微地形、微气象的调查研究及改进措施等，供山区送电线路设计、施工及运行人员参考。

第二章 微地形、微气象 的概念及定义

给微地形、微气象下个具体明确的定义是很困难的。这里所说的定义也只是对微地形、微气象结合线路设计在某种意义上的注释。

正如王炳忠、张家诚两位气象学家所说^[2]：“随着科学技术的迅速发展，生产建设的日益扩大，气候学也正在发生很大的变化。概括起来说，就是向高、大、低、小、专五个方向发展。”工农业的迅猛发展，更要求了解小气候的规律性，而不是笼统的大气候。”我们知道在同样的大气候的条件下，小气候的变化却是十分复杂的。因为工农业等都分布于具体的环境之中，所以它们更迫切地了解小气候的特征，事实上小气候研究主要依据稠密的观测网点的资料。但是，稠密的观测网需要很大的人力、物力，不可能在大范围内常年进行。于是就出现了如何把小范围短时的观测资料推广到大范围的问题。其中主要的环节就是充分利用小气候与地形、植被等的关系和根据不同尺度的地形图、植被图、地貌图、土壤图等所提供的间接资料。经研究证明，这样的方法所得到的小气候特征与直接观测的结果基本上是一致的。事实上我们对云南高海拔地区的漫昆、大昆两条超高压线路气象条件的考察研究就是按照这个原则进行的，所以取得了令人满意的效果。云南是山区省分，气候多样，正如许多气候学家提出的那样^[3]：山区地形复杂，天气多变，气候多

样，与人类活动关系密切，正是因为如此，山地的天气和气候很久以来就引起了人们的关注，并进行了不同目的、不同规模、不同方式的气候考察活动。但是，由于山地环境的复杂性和观测的艰巨性，使得山地气象研究工作在过去相当长的时期内进展缓慢。今天，随着科学技术的发展，许多先进的技术装备，如卫星、雷达、飞机和无人气象站等成为获取山区气象资料的有力工具。再加之人们生产和生活对山区的需要日益迫切，因此山地气象考察和研究工作发展迅速。山地较多的一些发达国家，利用先进的仪器进行有计划有系统的山地气候观测，如欧洲的阿尔卑斯山和美国的落基山。在德国、前苏联和日本等国家也很重视山区气候的研究工作。我国山地丘陵占总面积的2/3，它对于我国的经济有着极为重要的作用，因此从50年代起就开始进行许多考察工作，其目的也多种多样，有的是为山区工厂污染物质的排放而进行的短期考察，有的是为农业气候资源合理利用而进行较长时间的定点观测，有的是为旅游服务的山地气象考察等。在全国一些主要山地基本上都开展了气象观测、调查工作，取得了大量的资料，发表了不少论文，写成了许多气候专著，如《西部山地云南哀牢山的观测》。这些对我们在考察漫昆、大昆线时都有一定的参考价值。

第一节 地形的成因及分类

地形——即地表地貌形态。地貌形态大小不等，千姿百态，成因复杂。总的来说，地貌形态是内外地质营力相互作用的结果。大如大陆，洋盆^[4]（亦称“大洋盆地”，深度2440~6000m间的海底盆地，除凸起的海脊和深凹的海沟