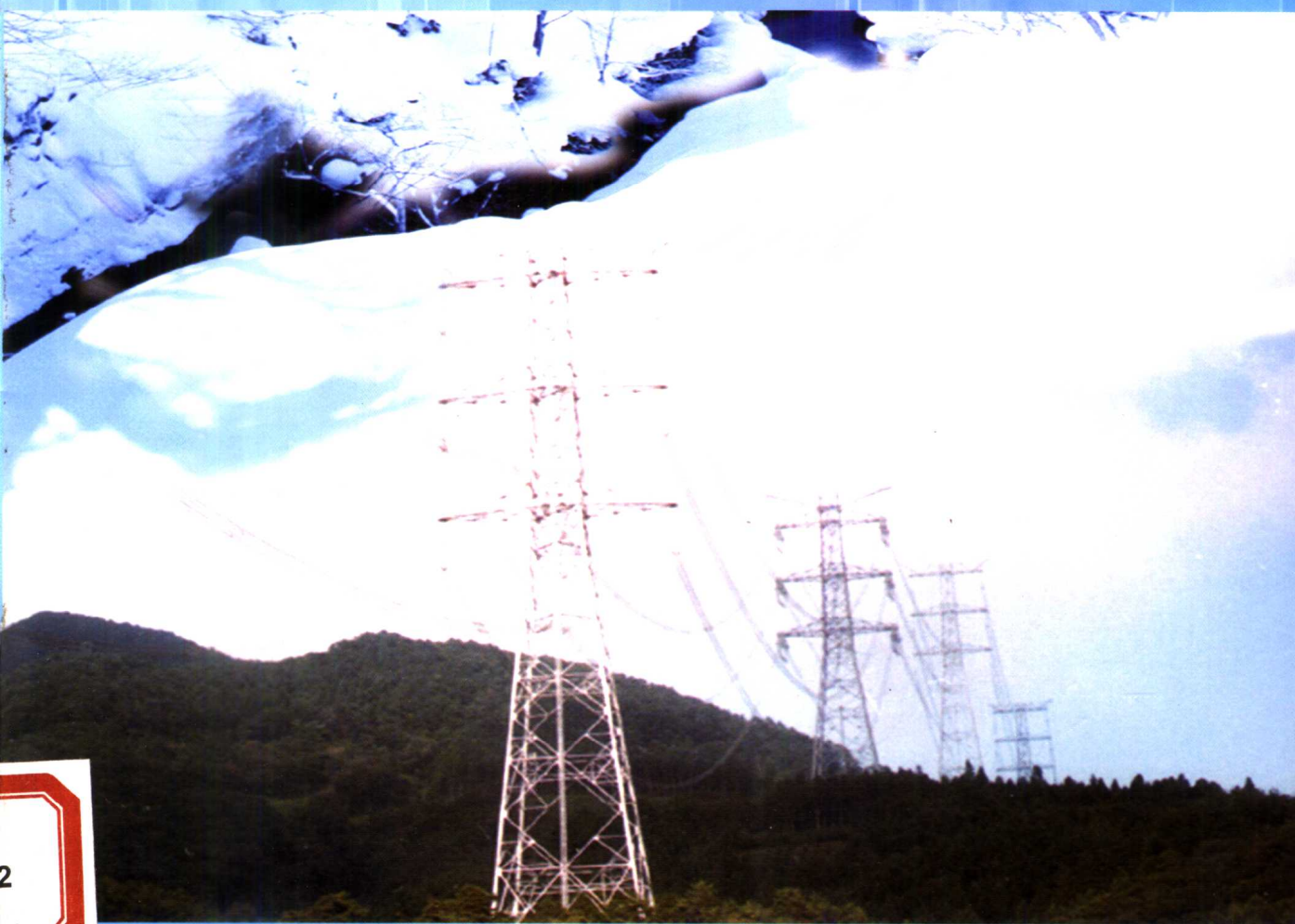


大气环境 电气外绝缘

孙才新 司马文霞 舒立春 著



2



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

大气环境与电气外绝缘

孙才新 司马文霞 舒立春 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书旨在对恶劣大气环境地区的输电线路和变电站的设计和运行提供有益的依据, 主要包括: 地貌、气候与空气污染, 大气参数对电气外绝缘放电的影响, 淋雨状态下的沿面放电, 污秽绝缘的沿面放电, 恶劣大气环境中的沿面放电, 复杂大气环境中电气外绝缘的选择。

图书在版编目 (CIP) 数据

大气环境与电气外绝缘/孙才新, 司马文霞, 舒立春
著. —北京: 中国电力出版社, 2002

ISBN 7-5083-1039-X

I. 大... II. ①孙...②司...③舒... III. 大气环境-影响-电气绝缘 IV. TM85

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 032887 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](http://www.cepp.com.cn))

北京通天印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 9 月第一版 2002 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 9.25 印张 202 千字

印数 0001—3000 册 定价 16.00 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)



实施西部大开发战略、加快中西部地区发展,是我国现代化建设的重要组成部分。加快西部地区丰富的水电和煤电资源开发,实现“西电东送”战略,将从根本上优化我国能源资源配置、给推动电力结构调整和全国联网创造有利条件。但是,占全国陆地国土面积57%的西部地区大气环境十分复杂,在实施“西电东送”过程中,水电和煤电基地的建设,输电线路和变电站的设计及运行,首先要解决的关键技术之一是在高海拔、覆冰(雪)、污秽、酸性湿沉降等复杂大气环境中的电气外绝缘技术难题。由于我国地域辽阔,全国各电网覆盖区域都不同程度地存在这种局部的恶劣大气环境,自然也是人们极为关注的具有重大实际意义的技术问题;同时,因全球大气环境错综复杂,恶劣大气环境对电气外绝缘的影响已成为本学科的前沿课题。虽然国内外不少学者长期致力于此项研究,但至今仍处于很不完善的状态,因此,还有待于人们长期持续地不懈研究。

为了对复杂大气环境地区输电线路和变电站(发电厂升压站)的设计和运行提供有益的依据,我们总结了重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室及作者长期从事恶劣大气环境中电气外绝缘研究的成果和教学经验,同时,也吸取了国内外同行的研究成果,撰写成本专著,为深入开展复杂大气环境中电气外绝缘研究抛砖引玉。

本书第三、四、五章由孙才新、司马文霞、舒立春共同撰写初稿,司马文霞统稿,其余各章由孙才新撰写,全书由孙才新、司马文霞统稿。

本书可作为高等学校电气工程本科生的选修、研究生的必修教材或参考书,同时,也为从事电力工程设计、运行、制造、科研部门的技术人员提供了具有实用价值的技术参考书。

本书包含了历届本科生、研究生,特别是高电压绝缘与系统信息监测课题组同事们长期执着研究的成果,清华大学谈克雄教授在百忙中对全书进行了认真审阅,并提出了十分有益的建议。由于大气环境与外绝缘的研究难度大,诸多问题尚未取得共识,因此,恳请读者指正,借此一并致以谢忱。

正值本书最后修订出版之际,为复杂大气环境中电气外绝缘研究付出毕生精力、并在病重期间一直关注本书出版的顾乐观教授,因积劳成疾,过早地与世长辞!愿以此书能给我们风雨同舟的导师在九泉之下一点点欣慰。

作者于 重庆大学

2001年8月

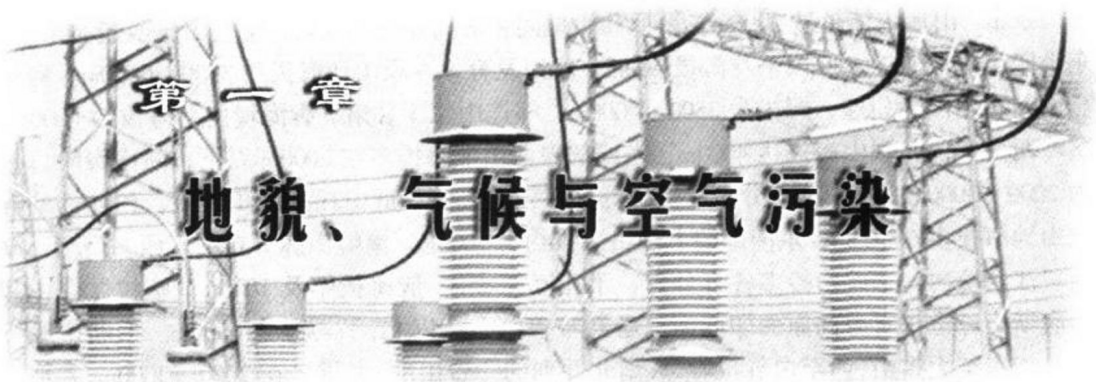
目 录



前言

第一章 地貌、气候与空气污染	1
第一节 我国的基本地貌、气候与电力资源分布及电网发展	1
第二节 大气的气象要素和湿沉降	8
第三节 空气的污染和污秽度参数	17
第二章 大气参数对电气外绝缘放电的影响	27
第一节 相对空气密度与电气外绝缘放电电压的关系	27
第二节 空气湿度与电气外绝缘放电电压的关系	33
第三节 大气参数对电气外绝缘放电电压影响的校正	40
第三章 淋雨状态下的沿面放电	44
第一节 沿淋湿表面放电的物理过程及影响湿放电的外绝缘结构参数	44
第二节 绝缘子的湿闪络特性	48
第三节 大气环境因素对湿放电特性的影响	52
第四章 污秽绝缘的沿面放电	57
第一节 污秽放电的电路模型理论	57
第二节 污秽放电的电场模型理论	63
第三节 绝缘子的污秽放电特性	74
第五章 恶劣大气环境中的沿面放电	81
第一节 覆冰状态下的沿面放电	81
第二节 覆雪状态下的沿面放电	92
第三节 低气压下沿污秽表面的放电	97
第四节 酸性湿沉降对沿面放电的影响	104
第五节 污秽、覆冰及低气压共存环境中的沿面放电	109

第六章 复杂大气环境中电气外绝缘的选择	119
第一节 绝缘选择的基本原则和计算方法	119
第二节 污秽绝缘的闪络率计算	124
第三节 复杂大气环境中电气外绝缘的选择	129
参考文献	136



我国的领土面积约 960 万 km^2 ，占全世界陆地总面积的 $1/15$ ，是亚洲面积的 $1/4$ 。从全球看，我国位于北半球东经中纬地带，南至北纬 $3^\circ 32'$ ，北至北纬 $53^\circ 31'$ ，南北跨占纬度 49° 以上，相距 5500km；最西约至东经 $73^\circ 40'$ ，最东约至东经 $135^\circ 21'$ ，东西相差 61° 多，直线距离 5200km。如此辽阔的地域构成的独特的地貌、气候与日益加剧的空气污染，给我实现电力要超速发展的宏伟目标和输电线路及变电站的设计、运行维护提出了许多急待解决的复杂的科研课题。

第一节 我国的基本地貌、气候与电力资源 分布及电网发展

一、我国地貌的主要特征及类型

我国地貌类型多样，山多而高，地势西高东低，以青藏高原为基点，呈阶梯状向东倾斜，形成了西高东低的梯级大斜面。由两条山岭组成的地貌界线，明显地把大陆分成三级阶梯。西南的一条是由昆仑山——祁连山——岷山——邛崃山以及沿横断山 3000m 等高线；东面的一条是大兴安岭——太行山——巫山——雪峰山一线。第一级是青藏高原，平均海拔 4000m，称之为“世界屋脊”；第二级是由阿尔泰山、天山、阴山、秦岭等山脉，内蒙古高原、黄土高原、云贵高原以及塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地等一系列高山、高原和盆地组成，海拔为 1000 ~ 2000m；第三级阶梯沿着北东走向的大兴安岭、太行山，巫山——雪峰山一线以东直至滨海，其中东北、华北和长江中下游平原的海拔在 200m 以下，东南丘陵的海拔大多在 500m 以上，只有少数山岭超过 1000m。

我国地貌类型齐全。除山地、丘陵、高原、盆地和平原五大常态地貌外，独特的自然地理条件下还发育了山岳冰川、冻土、风沙、黄土地、红层、岩溶等多种多样的特殊地貌。阿尔泰山脉在我国境内的南坡部分，所属的大部分山峰海拔为 2500 ~ 3500m，从东南向西递升，层次分明。天山山脉位于我国境内部分长约 1500km，把新疆分成准噶尔和塔里木两个盆地，海拔一般为 3000 ~ 4000m，山地广布积雪和冰川。阴山山脉崛起在内蒙古河套以北，向西没入阿拉善高原，向东延伸到张家口、大同、沽源、商都以南，平均海拔



约 1500m, 山地主体超过 2000m, 平原和山地间相对高差约 1000m。昆仑山脉西起帕米尔, 东至四川盆地西缘, 西段平均海拔 600m, 冰川发育, 东段山地海拔约 3000~6000m。阿尔金山与祁连山脉相连, 海拔为 3500~4000m; 祁连山位于甘肃、青海境内, 海拔约 4000m。秦岭西高东低, 岷山海拔达 4000m, 东段的豫西山地海拔多在 2000m 以下, 陕南秦岭海拔为 2000~3000m。淮阴山地分布在皖、鄂、豫三省之间, 低山丘陵面积广阔, 西北部的桐柏山地海拔多在 500m, 东南部的大别山海拔约为 1000m。南岭山脉分布在广西、广东、湖南、江西境内, 这些山岭多各自分立, 不相互衔接, 一般海拔不及 1000m。喀拉昆仑山和冈底斯山脉位于青藏高原的印度河上游和雅鲁藏布江以北, 平均海拔 6000m。横断山脉一般是指东至大雪山, 西至白舒拉岭, 成南北并列的一带山地, 海拔多在 2000~3000m, 谷地和峰顶的相对高度达 1000~2000m。大兴安岭是内蒙古高原东缘顶部比较平坦的块状隆起山地, 海拔 1000~1400m; 小兴安岭西北接伊勒呼里山, 东南止于松花江岸, 海拔 400~800m。东北东部山地东起自松花江南岸, 西南止于辽东半岛, 海拔 500~1000m。台湾山脉分布在台湾岛东部, 山势高峻, 山岭两侧多断层, 沿断层线分布着许多盆地和湖泊, 超过 3000m 的山峰就有 62 个。喜马拉雅山脉的主体在我国境内, 平均海拔 6000m, 山地的积雪和冰川发达, 具有多种多样的冰川地貌。在我国著名的四大丘陵中, 只有山东丘陵的崂山山地海拔达 1130m, 鲁中南低山丘陵海拔为 1000m 左右, 其他均为 500~1000m。在大型盆地中, 柴达木盆地海拔为 2600~3000m、盐湖达 100 多个, 塔里木盆地的平均海拔达 1000m, 准噶尔盆地东端有 1000m, 四川盆地的川东平行岭谷海拔最高也超过 1000m。在我国的高原中, 内蒙古高原西起北山, 东至大兴安岭, 南至祁连山麓, 北至国境线的广大地区, 平均海拔 1000~1500m。黄土高原位于太行山以西, 乌鞘岭以东, 秦岭以北, 长城以南, 海拔 1000~1500m, 新老黄土层的厚度一般超过 100m, 自西北向东南逐渐转薄, 分布着许多山地、地堑式盆地或谷地, 水土流失严重。云贵高原位于四川盆地、青藏高原以南, 江南丘陵、两广丘陵以西的西南连续边疆, 除云、贵两省外, 还包括广西、湖南、湖北等省的边缘地带, 海拔 1000~4000m, 高原上山、丘陵广布, 其中并夹有小盆地和谷地。青藏高原位于我国西部, 面积约为全国的 1/4, 平均海拔 4000m 以上。

综上所述, 我国山地丘陵约占 43%、高原 26%、盆地 19%, 平原仅占 12%; 海拔在 1000m 以上的山地和高原超过全国土地总面积的 2/3。

二、地形对我国气候的影响

我国领土辽阔, 地形地貌复杂, 既有纵横交错的河系和冰川雪原, 又有位于亚欧大陆南部, 濒临太平洋, 海、陆位置对我国气候都有强烈影响, 气候的特征是季风盛行、大陆性强、复杂多样。

我国大部分地区属季风气候, 盛行风向有明显的季节变化, 冬季盛行偏北风, 夏季盛行偏南风。随冬夏季风的变化, 形成不同的气候和天气。同时, 由于季风环流的发展, 使我国与世界其他纬度地区的气候截然不同。我国面海背陆, 气候上具有强烈的大陆性, 其重要表现是气温变幅大, 降水少而季节分配不均。绝大部分地区气温年较差在 10~30℃之间, 蒙古、新疆一带高达 35~45℃; 气温日较差为 6~14℃, 西北内陆沙漠地可超过 25℃, 甚至达



30℃。年降水量在 500ml 以下的地区占全国总面积的 1/2 强,不足 750ml 的地方占 2/3 以上;夏季降水量一般占年降水量的 40% ~ 75%,愈往西北,降水愈少,季节分配愈不均衡。从东南沿海至西北内陆,可分为湿润、半湿润、半干旱和干旱地区;东西之间降水和湿度差异大,地势高寒的青藏高原多数地方具有寒带和苔原气候的某些特点。

影响气候的地形因素主要有海拔、地面形态和方位。地面的海拔高度能够影响温度、气压、湿度等气候要素,高度差异越大,气候的差异也越大,气候类型也随之发生改变。地面形状可分为凸出地形(丘陵、山峰、山脊等),凹入地形(盆地、山谷)和凸凹地形(鞍形山脊、隧道等)。山脉是气候的分界,甚至微小岗坑的地形差异也会在气候上有所反映,同一山地,也可因方位的影响而使各坡的气候情况显然不同。三种地形因子对气候影响是同时发生作用的,决不能截然分开。在山地,随高度的增加,太阳光通过大气的路程缩短,空气稀薄和大气透明度增大,水汽减少,平均每升高 100m,气温降低 0.5 ~ 0.6℃,二氧化碳和尘埃也随之减少。气温的日振幅随海拔高度增加而减小,一般在 2000m 以上为 1 ~ 2℃,或更小些,气温的年振幅一般也随海拔高度的增加而减少。由于山坡有各种不同坡向和坡度,往往因地面受热不均,在山谷及其低空形成山风和谷风。每天上午,山顶和东、南山坡收入的热量较山谷为多,易于形成反谷风;夜间,山顶和山坡温度较低,空气密度较同高度山坡上空的空气密度大,又易形成反山风;当风沿着地面吹过时,一旦遇到崎岖地形,就要绕过高地的侧面或越过高地,在背风处风速减弱或静止无风,在山口处因气流集中而使风速加强,在背风坡就易形成无风区;当气流方向与谷地走向平行时,易于生成上升气流;当盛行风向垂直谷地时,风速往往减弱。水汽含量随海拔高度的增加而减少,一直到超过地形抬升影响的高度为止,降水随高度递增,达到某一高度则降水递减,这个临界高度因地而异。在山坡山顶和谷地上部,最大降水出现在下午或傍晚;在谷地深处与山麓,最大降水量和频率都发生在夜间。此外,山地是气流运动的障碍物,往往一山之隔,气候就存在很大的差异。地形方位主要影响由地面局部特征(湖岸、林带、乡镇等)差异和 2m 以下近地层形成的小气候。地面水分的蒸发以南坡最盛,东、西坡次之,北坡最弱;凸出的小丘和斜坡上部无霜期较低洼的谷地和盆地长,夜晚坡上的冷空气往往顺坡下行,流入低凹地方,停积在谷中;凹形地方温度低,风速小,相对湿度小,因而形成露、霜和雾的频率也较大;背风坡易于形成涡旋;向风坡的毛毛雨、雪花降落缓慢,而背风坡不仅从山顶附近吹来大量的小雨滴或雪花,而且因风速小,雨滴易于沉降,则使其降水量增多。在森林区内,空气几乎与大气隔绝,空气湿度大,风力静弱,温度变化缓和;在水域区,蒸发量大,在空气中积累起来,到夜间或冬季再传播给周围邻近的地区,形成地方性环流,使湿度增大;农田地区植物的多寡对小气候有巨大的影响,在植物浓密的田野地方,白天太阳辐射射入较少,用在蒸发上的热量较多,夜间地面辐射又受到一定阻碍,所以,白昼温度较低,湿度较大。总之,小气候的重要特征是温度、湿度和风的垂直变化大,相对湿度的日变化以早晨为最高,易于形成露、霜和雾。

三、我国的电力资源分布

我国的常规能源资源,包括水能资源和煤炭资源,主要分布在西部地区:煤炭资源的



理论蕴藏量约为 15000 亿 t，现已勘探查明有 6000 多亿 t；水能资源的理论蕴藏量为 6.8 亿 kW，可开发量为 3.7 亿 kW。电力是唯一能够大规模利用煤炭、水力、核能和其他各种再生能源的二次能源，在我国总能源消耗中，电能约占 35%。根据预测，到 2010 年，电力消费在总能源消费中的比重为：煤炭比重下降到 64.1%，水电和核电比重将分别增加到 9.4% 和 2.0%。

我国的煤炭资源虽然丰富，但 73% 位于晋、陕、蒙和新、甘、青、宁几个省区，其中“三西”地区（山西、陕西及内蒙古西部）原煤产量占全国 1/3。因此，我国的火电则要大力开发山西、内蒙、陕西、贵州、河南等能源基地，初步规划 2010 年前，重点在山西、内蒙西部、陕西、宁夏以及东北的东三蒙等地，建成投产 30~40GW 矿口电厂，在交通方便的沿线和负荷中心地区建设若干港口电厂和路口电厂。在火电基地建设中，要选择储量大、开采条件好、可使用现代化大型采煤机械的年产 300 万 t 煤以上的矿区建设矿口电厂，如内蒙大雁三矿、安徽新集矿、陕西和内蒙的大抑塔矿、补连塔矿、甘肃的华亭矿、河北的蔚县矿、河南永夏矿和东滩矿等；同时，可开采的大型露天矿有保尔希勒、伊敏、霍林河、准格尔、平朔、锡林浩特及昭通等；可建大型井矿的矿区有大保当、金鸡准、神木、东胜、晋城、大同、彬长、灵武、鸡西新区等矿区。我国目前的火电设备容量占总装机的 75% 以上，到 2010 年全国总装机容量将达到 540GW，而火电装机容量则约为 400GW 以上，需要用煤约为 10 亿 t，相当于每年需增加用煤量 4000 万 t 左右，预计这也是我国煤炭产量可以安排用于电力的最大煤量。

从长远看：“三西”地区水资源严重短缺，在某种程度上会限制煤炭开发规模，更会限制坑口电厂发展；晋、陕、蒙、宁、新等五省区的煤炭保有储量占全国的 77.4%，全国其他省市（除台湾省外）的煤炭保有储量只占全国的 22.6%，即使是煤炭保有储量除上述五省区外相对较多的贵州、安徽等省，建设火电厂的装机容量也是十分有限的；过分依赖煤电，引起环境污染已相当严重，我国酸雨区面积已达国土面积的 1/3；我国的煤炭资源集中在西部几个省区，而负荷中心主要集中在东南沿海经济发达地区，如果要在经济发达地区建设大型火电厂，必然给铁路运输带来巨大的压力。因此，我国以西部大开发为契机，促进电力结构战略性调整。结合资源分布特点，优先、大力发展西部水电，促进形成西南水电基地、西北五省水电和煤电基地、三西（即陕西、山西和蒙西）和贵州煤电基地，加强核电开发力度，以减少对煤炭和环境的压力；加速新能源的开发，尽可能改善和优化能源结构。

我国江河众多，流域集水面积在 100km² 以上的河流达 5000 余条，流域集水面积超过 1000km² 的也有 1600 多条；全国径流总量将近 26000 亿 m³，相当于世界河川径流总量的 6.8%，仅次于巴西和苏联；水电蕴藏量约为 6.8 亿 kW，目前仅开发 3% 左右。由于我国地形总的趋势是西高东低，使大多数外流河呈自西向东的纬向流向，自干燥区流向湿润区，并切断了东北——西南走向的华夏构造线，形成了一系列雄伟峡谷的巨大落差。因此，我国水电资源主要分布在长江、黄河、珠江三大水系。长江发源于青藏高原唐古拉山，干流横贯 10 个省市，全长 6300 余 km，是世界第三大河，水电资源达 2.3 亿 kW，约占全国水电总蕴藏量的 40%。河源地有璿马尔河、沱沱河、尕尔曲、布曲和当曲等几条



较大的河流，构成通天河上游的扇状水系。璊马尔河与当曲河汇合后称为通天河，它流经海拔 4500m 左右的青藏高原，水电资源丰富。自青海玉树至宜宾一段称为金沙江，它从玉树向南流，奔腾于川藏之间的横断峡谷地，河谷深切，比降增大，江水湍急；到云南石鼓，受构造线控制，突然折向东北，进入虎跳峡，落差竟达 200m，出虎跳峡穿过云贵高原北部，接纳雅砻江等大支流而进入四川盆地，在宜宾与岷江相会，其干流总落差达 3000 多 m。金沙江的支流雅砻江源出巴颜喀拉山，至攀枝花市东入金沙江，全长达 1870km，是金沙江水系的重要水电基地。长江自宜宾至宜昌一段常称川江。嘉陵江、岷江、沱江、乌江等分别自南北两侧注入川江，形成不对称的向心状水系；川江水系不仅与金沙江水系构成长江丰富的水电资源，而且沿岸工业城市繁多，与我国工业发达地区的距离逐渐缩短，其强大水力资源的开发就更具有经济价值。处于长江上游（含川江，金沙江）的支流——雅砻江、乌江、嘉陵江、岷江、沱江、龙溪河、大渡河、赤水河及金沙江、川江干流都适宜建设梯级水电站。长江有 200 多条支流，总长 8 万多 km，已兴建 20 多座大中型水电站。黄河发源于青海省的巴颜喀拉山，流经九省区，全长 5464km。龙羊峡以上的河源段大部流于高原上，河道曲折，两岸多湖泊、沼泽、草滩、水量很大。从龙羊峡到青铜峡为峡谷地段，其间有龙羊峡、积石峡、刘家峡、青铜峡等 19 个峡谷，峡谷里河流比降大，水流湍急，峡谷崖陡，是我国西北的水电基地。出青铜峡后，黄河向东北沿鄂尔多斯高原边界流动，几乎无支流加入，干流两岸分布着银川、河套等大片冲积平原。从托克托至孟津为中游，黄河从托克托南转，穿行于晋陕峡谷之中，比降很大，如壶口瀑布、平水时瀑布跌落 17m。龙门以下到潼关，接纳了汾、洛、泾、渭等不少重要支流，水量增大，同时也带入大量的泥沙，过潼关后折向东流，进入最后一个峡谷地段，著名的三门峡水电站就处于这里。黄河干流和主要支流上建有 100 多座大中型水利水电工程，处于高海拔地区的黄河中、上游的峡谷是西北地区电力的主要基地。珠江水系含西、北、东三大支流，其中西江最长，常称为珠江干流。西江主源为南盘江、源于云南沾益马雄山，至册亨县会北盘江后称为红水河；向东南流至广西石龙与柳江汇合后称黔江；到桂平汇合郁江后称浔江；直到梧州汇合桂江后始称西江。西江石龙以上为上游，河床深切、滩多水急，落差大；石龙至梧州为中游，河段内峡谷平坝相间，沿河有黄茅峡、大藤峡等。北江上泊为浈水，发源于江西、广东之间的大庾岭南，至韶关附近与武水相汇后称北江。发源于江西安远县南岭山地的寻乌水，自龙川以下始称东江。北江和东江河道情况相似，中上游为山区性河流，适宜兴建梯级电站。珠江水系大部分流经山地丘陵，多峡谷、急流和瀑布，流量丰富、含沙量少，水电资源占全国的 5.2%。除上述三大水系之外，高海拔地区的塔里木河、雅鲁藏布江、怒江、澜沧江，坡陡流急，也有着丰富的水电资源。由此可见，我国水电资源虽然丰富，但空间分布不均衡，主要集中在大气环境恶劣、经济基础差、交通不便、远离负荷中心的西南地区，约占全国总量的 67.8%，其次在中南地区占 15.5%，西北占 9.9%，而东部的华东、东北、华北三大区仅占 6.8%，即整个西部地区占 77.9%（见表 1-1）。而开发程度西南地区为 22.76%，西北地区为 76.75%，即西南地区的开发程度最低。我国 12 个大水电基地仅在西部地区就有黄河上游、金沙江、大渡河、雅砻江、乌江、澜沧江和南盘江红水河七个（见表 1-2）；除已建成或在建的天生



桥、二滩、三峡等大型水电站外，我国近期可能建设一批大型水电站（见表 1-3）。

表 1-1 我国西部地区各省（市、区）可开发水力资源分布情况

省(市、区)	可开发水力资源 (万 kW)	年发电量 (亿 kWh)	占全国百分数 (%)	省(市、区)	可开发水力资源 (万 kW)	年发电量 (亿 kWh)	占全国百分数 (%)
全国	37853	19233	100	甘肃	911	424	2.2
四川	9166	5152	26.8	青海	1799	772	4.0
云南	7117	3944	20.5	新疆	854	460	2.4
贵州	1292	652	3.4	宁夏	79	32	0.2
西藏	5659	3300	17.1	内蒙古西部	94	39	0.2
陕西	551	217	1.1	西部小计	27522	14992	77.9

注 1. 四川省数据已包括重庆市。

2. 按年发电量计算占全国百分数，如按可开发水力资源计算应为 72.7%

表 1-2 我国西部水电基地情况统计表

水电基地名称	所在省份	规划梯级数 (级)	总装机 (万 kW)	已建梯级装机 (万 kW)	在建梯级装机 (万 kW)	已开发梯级占 基地 (%)
黄河上游水电基地 (龙羊峡至青铜峡)		23	1415.5	365.3	160	37.0
金沙江水电基地 (石鼓至宜宾)	四川 云南	10	5820.0	0	0	0
大渡河水电基地 (双江口至河口)	四川	16	1805.5	130	0	7.2
雅砻江水电基地 (两河口至河口)	四川	11	1940.0	0	330	17.0
乌江干流水电 基地	云南 贵州	11	868.0	121.5	0	14.0
澜沧江水电基地 (云省境)	云南	14	2137.0	150	135	13.0
南盘江红水河水 电基地	云南 广西	11	1312.0	244	252	38.0

表 1-3 我国近期可能建设的大型水电站

电站名称	河流名称	所在地	装机容量(万 kW)	年发电量(亿 kWh)	最大坝高(m)
洪家渡	乌江	贵州织金黔西	54	15.9	182
公伯峡	黄河	青海化隆	150	51.4	127
小湾	澜沧江	云南凤庆南涧	420	190.6	292
龙滩	红水河	广西天峨	420	156.7	192
三板溪	清水江	贵州锦屏	100	24.3	185.5



续表

电站名称	河流名称	所在地	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿 kWh)	最大坝高 (m)
水布垭	清江	湖北巴东	160	39.2	233
百色	右江	广西百色	54	16.9	130
尼尔基	嫩江	黑龙江嫩江	25	5.1	40
溪洛渡	金沙江	四川雷波云南永善	1200	573	295
景洪	澜沧江	云南景洪	150	66.4	107
瀑布沟	大渡河	四川汉源甘洛	330	144.3	188
索风营	乌江	贵州黔西修文	54	21	113.4
小峡	黄河	甘肃白银	23	10	47
杂谷脑梯级	杂谷脑河	四川理县汶川	23	14.5	

注 近期可能建设的 14 座水电站中，西部地区 10 座。

四、我国的输电线路与电网发展概况

到 1999 年底，全国 35kV 及以上输电线路的总长度达到 379174km，其中：500kV 为 22444km；330kV 为 7949km；220kV 为 106011km；110kV 为 130021km。近期输电线路的建设规模不断扩大，增长速度明显加快。1999 年与 1998 年相比，线路总长度增长 3.21%，其中 500kV 线路增长 14.62%。全国已形成东北、华北、华东、华中、西北、南方和川渝 7 个跨省电网和福建、山东、新疆、海南、西藏 5 个独立省网。东北、华北、华东、华中、南方、川渝、山东、福建电网的最高输电电压为 500kV，西北电网最高输电电压为 330kV。此外，华中和华东两大电网之间通过葛洲坝至上海的 ± 500 kV 直流线路实现跨大区联网。

电网发展的目标是建设一个全国统一的联合电网。在 2000 年已形成的大区电网和 5 个独立省网以及华中与华东、东北与华北已互联网的基础上，加紧实施大区之间和大区与独立省网之间互联。用 10 年左右的时间，在 2010 年前后，建成北部、中部、南部三个大联合电网，即以三峡电网为中心联结华中、华东、川渝的中部电网；由华北、东北、西北三个电网互联形成的北部电网；以及云、贵、两广四省（区）的南部电网。同时，北、中、南三大电网之间实现局部互联，初步形成全国统一的联合电网格局。然后再过 10 年，即 2020 年前后，随着金沙江的溪洛渡和向家坝水电站、黄河上游的拉西瓦水电站、澜沧江和红水河上的一系列大型水电站开发，蒙西、山西、陕西、豫西大型火电厂和沿海若干座核电站的建设，一批长距离、大容量输电工程的实施，全国联合电网的结构将进一步加强，真正形成一个“统一调度，分级管理，安全稳定，灵活开放”的全国联合电网，充分实现西部水电东送，北部火电南送的能源合理流动的格局。此外，北与俄罗斯、南与泰国之间也可能开展周边国际电网互联，输入西伯利亚多余的电力，输出澜沧江丰富的水电，实现跨国联网的效益。

综上所述，我国不仅水电和煤电基地主要集中在大气环境复杂的西部，而且以三峡水电站为中心的华东、华中、川东电力走廊，红水河为中心的南方电力走廊，雅砻江为中心



的二滩——自贡——成渝走廊，以黄河上游水电基地为中心的西北——华北、西北——四川电力走廊，以及北、中、南三大电网之间的互联，都要深入而系统地研究复杂大气环境对电气外绝缘的影响。



第二节 大气的气象要素和湿沉降

气候是指在太阳辐射、大气环流、下垫面性质和人类活动在长时间相互作用下，在某一时间内大气状态（气温、湿度、压强等）和大气现象（风、云、雾、降水等）的综合。天气却是指某一地区在某一瞬时或某一短时间内大气中气象要素和天气现象的综合。因此，气候和天气是两个既有联系又有区别的概念，天气过程是大气中的短期过程，而气候不仅包括某地多年来经常发生的天气状况，而且包括某些年份偶尔出现的极端天气状况。显然气象不仅包括气候和天气，而且还包括大气物理现象和物理过程。由于地球的引力作用，地球周围聚集着一气体圈层，人类就生活在这个大气层底部的“下垫面”，云、雨、雾、霜、露、冰、雪等主要大气现象都出现在下垫面底界地面的对流层中，并将对电力系统的外绝缘特性产生影响。

一、气象要素

大气是由多种气体、水和固体杂质组成的。通常把不含水分、尘埃和其他杂质的空气称为干洁空气或干空气，含有水汽的空气则称为湿空气，在常温常压下，都可以看成理想气体。虽然，理想气体是不存在的，但在通常大气温度和压强下，干空气和未饱和的湿空气却十分接近于理想气体。

干空气的状态方程为

$$p_d = \rho_d R_d T_d \quad (1-1)$$

式中 p_d ——干空气的压强；

ρ_d ——干空气的密度；

T_d ——干空气的温度；

R_d ——常数。

$$R_d = \frac{R^*}{\mu_d} = \dots = \frac{8.3144 \text{ J} / (\text{mol} \cdot \text{K})}{28.97} = 0.287 \text{ J} / (\text{mol} \cdot \text{K})$$

式中 μ_d ——干空气的分子量；

R^* ——普氏气体常数。

在实际大气中，近地面空气总是含有水汽的湿空气，其压强 p 为干空气部分压强 p_d 与水汽部分压强 p_w 之和，状态方程为

$$p = p_d + p_w = \rho R T \quad (1-2)$$

式中 ρ ——空气密度；

T ——空气实际温度；

R ——湿空气的比气体系数。



湿空气中水汽含量（克分子量为 μ_w ）是变化的，湿空气的比气体系数 R 不是常数。空气的密度为

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_d + \rho_w = \frac{p - p_w}{R_d T} + \frac{p_w}{R_w T} \\ &= \frac{1.608(p - p_w) + p_w}{1.608 R_d T} = \frac{p}{R_d T} \left(1 - 0.378 \frac{p_w}{p} \right)\end{aligned}\quad (1-3)$$

式中 R_w ——湿空气中水汽的比气体常数， $R_w = \frac{R^*}{\mu_w} = \frac{8.3144}{18.0153} \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 0.4615 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

将式 (1-3) 右边分子和分母同乘以 $\left(1 + 0.378 \frac{p_w}{p} \right)$ ，且考虑到 p_w 比 p 小得多，因而 $\left(0.378 \frac{p_w}{p} \right)^2$ 很小，则有

$$\rho = \frac{p}{R_d T \left(1 + 0.378 \frac{p_w}{p} \right)} \quad (1-4)$$

或

$$p = \rho R_d T \left(1 + 0.378 \frac{p_w}{p} \right) = \rho R_d T_v \quad (1-5)$$

式中 T_v ——虚温，是指在同一压强下， $\rho_d = \rho$ 时，干空气应有的温度， $T_v = \left(1 + 0.378 \frac{p_w}{p} \right) T$ 。

虚温与实温之差 $\Delta T = T_v - T = 0.378 \frac{p_w T}{p} > 0$ ，即空气中水汽含量越多（ p_w 越大），其 ΔT 就愈大。通常，为了方便起见，将式 (1-5) 表示的湿空气状态方程写成

$$p = \rho R_d T \quad (1-6)$$

实际上测量的是 T ，则虚温 T_v 以湿空气的实际温度 T 代之。当研究气象要素时，一般在低层大气，尤其是夏季 ρ_w 值较高，必须用湿空气状态方程，但在高空，用干空气状态方程不致造成大的误差。气象要素是指表示大气属性和大气现象的物理量。

下面介绍影响电气外绝缘特性的几个主要气象要素。

(一) 气压

空气的气压为

$$p = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} \quad (1-7)$$

式中 A ——空气的面积；

F ——面积 A 上承受的压力；

m ——面积 A 上空气质量；

g ——重力加速度。

(二) 温度



湿度是表示大气中水汽量多少的物理量，通常用绝对湿度、相对湿度、比湿等来表示。

绝对湿度 (h_a) 是指单位体积空气中所含的水汽量，其单位是 g/m^3 ，显然，它就反映了空气中水汽的密度，水汽含量愈大，绝对湿度就愈大，水汽是空气的一部分，气体状态方程仍适用于水汽，即

$$p_w = \rho_w R_w T = \frac{M_w R_w T}{V} \quad (1-8)$$

或
$$p_w = \frac{n_w R_w T}{V} \times 18.0153 \quad (1-9)$$

式中 M_w 和 n_w 分别为体积 V 内水汽质量和水汽克分子数，其关系为

$$M_w = 18.0153 n_w \quad (1-10)$$

式中 18.053 为水汽的克分子量。

绝对湿度定义为

$$h_a = \frac{M_w}{V} \quad (1-11)$$

于是，代入式 (1-8) 得

$$p_w = h_a \cdot R_w T = 0.4615 h_a T \quad (1-12)$$

由此可见，只有含水汽的空气的实际温度 T 一定时，空气中的水汽压才与绝对湿度成正比。同时，当温度 T 一定时，单位体积空气中能容纳的水汽含量有一定限度，达到这个限度的空气称为饱和空气。常把饱和空气中的水汽压称为饱和水汽压 $p_{w,s}$ ，超过这个限度水汽就要凝结，因此，饱和水汽压又称最大水汽压。

相对湿度 (h_r) 是空气中的实际水汽压 p_w 与同温度下的饱和水汽压 $p_{w,s}$ 的比值，常用百分数表示，即

$$h_r = \frac{p_w}{p_{w,s}} \times 100\% \quad (1-13)$$

将式 (1-12) 代入式 (1-13) 得

$$h_r = 0.4615 \frac{Th_a}{p_{w,s}} \times 100\% \quad (1-14)$$

它不仅直接反映了空气距离饱和空气的程度，同时也表达了 h_r 、 h_a 、 T 三者之间的关系，在 T 一定时，空气的 h_r 与 h_a 成正比，一直到饱和。在饱和时， $h_r = 100\%$ ， $h_a = 2.16 p_{w,s}$ ，就只与 T 有关。因此， h_r 与 h_a 之间的线性关系不受 p_w 的影响，当相对湿度 h_r 保持不变时， h_a 随温度的升高而增大。当 h_a 不变时， h_r 将与温度的升高而下降。但必须引起注意的是： $p_{w,s}$ 是温度 t ($^{\circ}\text{C}$) 的指数函数；若以 p_d 为单位时， $p_{w,s}$ 在数值上大于绝对温度 $T = 243 + t$ ，且随 t ($^{\circ}\text{C}$) 的增加， $p_{w,s}$ 比 T 增加得更快，所以， h_a 与 t 及 h_r 与 t 间的关系都不是线性的。



比湿是在一团湿空气中水汽的质量 M_w 与该团空气的总质量 M 之比值, 单位为 g/g, 表示每 1g 湿空气中含多少 g 水汽, 即

$$W = \frac{M_w}{M} = \frac{M_w}{M_d + M_w} \quad (1-15)$$

式中 M_d 、 M_w 分别为该团空气中的干空气和水汽的质量。

由式 (1-8) 或式 (1-2) 的水汽和湿空气状态方程得

$$\frac{p_w}{p} = \frac{\rho_w R_w T}{\rho R_d T} = \frac{\frac{M_w}{V}}{\frac{M}{V}} = \frac{\mu_w}{\frac{R^*}{\mu_d}} = \frac{M_w}{M} \cdot \frac{\mu_d}{\mu_w} \quad (1-16)$$

式中 $\frac{M_w}{M} = W$ 、 $\mu_d = 28.97$ 、 $\mu_w = 18.01534$, 代入式 (1-16), 得比湿

$$W = 0.62198 \frac{p_w}{p} \quad (1-17)$$

因空气的相对密度

$$\delta = \frac{0.289p}{273 + t} = \frac{0.289p}{T}$$

则

$$p = \frac{\delta T}{0.289} \quad (1-18)$$

将式 (1-12) 和式 (1-18) 代入式 (1-17) 得

$$\begin{aligned} W &= 0.62198 \frac{0.46152 h_a T}{\frac{\delta T}{0.289}} \\ &= \frac{0.62198 \times 0.4615 \times 0.289}{\delta} \times h_a \\ &= 0.83899 \frac{h_a}{\delta} \end{aligned} \quad (1-19)$$

即比湿 W 与绝对湿度 h_a 成正比、与相对空气密度 δ 成反比, 同时 h_a 与 δ 是相互影响的。

当空气中水汽含量不变时, 在一定的气压下, 使空气冷却到达饱和时的温度称为露点温度或露点, 其单位与气温相同。显然, 当气压一定时, 露点的高低只与空气中的水汽含量有关, 水汽含量愈多, 露点就愈高, 因此, 根据实际温度和露点温度的差值, 就可以大致判断空气距离饱和的程度。

(三) 风

空气的水平运动叫做风。由于热力的原因, 在山地和平地间发展起来的山谷风对大气污染尤为重要。白天风经常从谷地吹向山坡 (谷风), 晚上从山顶吹向谷地 (山风), 在大范围内的水平气压场比较弱时, 这种山谷风就特别明显。在山风和谷风的转换期, 风向不

