

# 电 力 气 候

云南省电力设计院  
云南省气象科学研究所

---

王守礼 李家垣 编著  
李叔琨 校阅

---

气象出版社

## 序

能源是当今世界各国面临的重大问题,是“社会的生命线”。电力是能源的重要组成部分,它是现代化工业、农业及交通运输的主要动力来源,又是通讯、自动及远程控制、尖端科学技术及近代化生活不可缺少的条件。在我国四化建设迅速发展,电力工业势必更要加速发展。

我国是世界上水能资源最丰富的国家,根据 1977 年到 1980 年全国水能资源普查的结果,装机 1 万 kW 以上的河流有 3019 条,共有水能资源 6.8 亿 kW,年发电量为 5.92 万亿 kW·h。在全国各地区中,西南水能资源最多,占全国的 70%,装机容量为 47331 万 kW;其次为西北,占全国的 12.5%,装机容量为 8417 万 kW;中南占全国的 9.5%,装机容量为 6408 万 kW;华东占全国的 4.4%,装机容量为 3004 万 kW;华北及东北水能资源较少,各占全国的 1.8%,装机容量分别为 1229 万 kW 和 1212 万 kW。我国的水能资源虽然很丰富,但开发得很少,至 1985 年止开发的水能资源只占可开发的 3.5%。

我国的煤炭资源主要分布在山西、内蒙古、新疆、贵州等地,占世界第三位。在大力开发水能资源的同时,还必须相应地建设核电站、火电厂(包括煤矿在内)及其配套的输变电工程。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、湘赣一带的送电线路曾发生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、狭谷、分水岭等高山局部特殊地段的气象资料掌握不够。在一条几十公里至几百公里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,不能满足电力线路对沿线气象资料的要求,更难反映局部微地形地段的实际气象情况。因此,设计时做好沿线气象和地形情况的收集工作,特别是对微地形、微气象的调查研究,正确选择设计气象条件,是保证线路安全运行的重要环节。

气候学是服务于其它科学和技术发展的一门科学。它的分支较多,如农业气候学、森林气候学、畜牧气候学等。众多学者认为,气候学分支虽不少,但远远跟不上科学技术发展的需要,有待进一步开发,建立更多的气候分支学科。《电力气候》这本书实际上就是电力、气象工作者合作建立的气候学的新分支的尝试。它将电力工业技术科学与气象、气候学紧密结合,两者相互渗透,相辅相成。《电力气候》的章节似乎像是气候学或应用气象学等的常规教材,然而它又确实是按电力设计、生产运行的一系列规程、规范进行编排的。所以说《电力气候》是紧紧地围绕着电力生产实际与自然气候条件影响的问题结合得很好的一本实用科学参考书。这是该书的主要特点之一。当然这本书使人不能不认为是电力与气象专家们多年潜心研究、通力合作的结晶。

《电力气候》全书近 40 万字,作者思路明确,以自始至终都贯串着气象学科紧紧地围绕着电力生产技术学科各个环节,进行深入浅出的叙述。两者结合之专著是一般气候学、气象学所无法比拟的。因为一般气候学、气象学都注重本门学科的发展,仅在有关章节部分提到电力设计、生产运行等方面的个别问题与气象的关系。而本书最主要的特点是应用气象学的原理和

研究方法来研究电力设计、生产运行的全过程中与自然气候条件有关的问题。

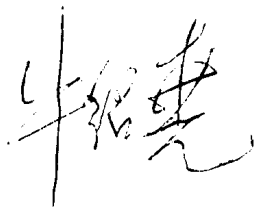
《电力气候》内容全面,从雷电、风雨到高温、高湿、低温结冰;从建电站、送电线路到电力网运行管理,以及气候与污闪、气候与电晕等方面都作了论述。

《电力气候》除作者的几十年经验阅历及研究成果外,还尽量收集国内外电力及气象工作者的积累和研究成果,所以,本书集众家之长也是其特点之一。

作者于 1993 年合作编著了《云南高海拔地区电线覆冰问题研究》一书,受到很多电力和气象专家们的好评。这次又合作编写《电力气候》,这无疑对我国电力事业的发展将会起到有益的作用。书中的内容很多已直接用于电力设计及生产运行中。如云南省自 1960 年以来,送电线路曾发生覆冰倒杆断线事故 101 次,少送电约 1200 万  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。近年来新建及改建的送电线路,认真调查气象,合理划分冰区,采用了本书介绍的抗冰措施,运行情况良好。

云南省 220 kV 以昭线者昭段,计长 105.58 km,初设审查时曾提出要增加一个 30 mm 特重冰区,设计过程中利用本书的成果,邀请气象专家赴现场实地考察后,确定只需对 20 mm 重冰区中的牛栏江梁子及云贵分水岭的局部地段按“微气象点”加强杆塔即可,不必增加 30 mm 特重冰区,这样选择适当的设计气象条件,便节省了基建投资 700 万元。

《电力气候》一书内容翔实,资料可靠,图文并茂,无论是理论研究还是实际应用,都是一本不可多得的好书。



1994 年 12 月

## 编著者的话

去年合编的《云南高海拔地区电线覆冰问题研究》由云南科技出版社发表后,得到了许多专家和工程技术人员的好评,认为该书名为云南地区,其实对全国重冰地段均有普遍指导意义。近来还收到许多专家好友的信函,希望能就各种气象条件尤其是灾害性天气对电力的生产、建设、运行的影响,将如何避害趋利使损失减少到最低限度,以及有关电力气候方面的分析研究成果和经验总结汇编成书。为了不负众望,我们在几十年工作实践的基础上,将一些对电力事业影响较大的气象条件进行系统地分析研究,并紧紧地结合电力设计、生产运行的实际编出《电力气候》一书。本书之所以能在较短的时间内完成从策划到收集资料、计算直至编辑成书,主要是得到云南省电力工业局、云南省气象局、云南省电力设计院、云南省气象科学研究所的领导及同仁们大力支持,特在此表示感谢!

本书是在云南省电力工业局下达的“影响电力输送的气候因素的研究和分析”的科研课题的基础上充实扩展,使之成为一部比较系统地阐述电力与气候的专著。

本书在编写过程中参阅了大量的有关学科的研究成果,因为书中内容多牵涉面广,是许多学科汇集的交叉学科,所以引用了许多专家、学者的代表作品,为了书中内容的丰实和资料的准确,所以还选用了大量的实地考察报告,在此也一并致谢!

本书由云南省电力设计院主任工程师教授级高级工程师王守礼及云南省气象科学研究所高级工程师李家垣共同编著,执笔和分工为:

第二章第二、四、五、六、七、八节,第四章第二、四、五、六节,第五章第一、四节,第六章第一、三、七、八节,第七章第一、二节,第八章,第十章第一、二节为王守礼编写。

第二章第一、三节,第五章第二、三节,第六章第六节,第九章第一、三、四节为李家垣编写。

第一章,第三章,第四章第一、三节,第六章第二、四、五节,第七章第三节,第九章第二节,第十章第三节为王守礼、李家垣共同编写。

全书由云南省电力设计院教授级高级工程师李叔琨同志进行了校阅。本书得到云南省电力设计院总工程师教授级高级工程师罗康麟同志、副总工程师教授级高级工程师姜存信同志及云南省地理研究所高级工程师王瑞元同志的大力支持,承蒙王云朋高级工程师等同志帮助清绘插图,特此一并致谢!

承蒙云南省副省长牛绍尧同志在百忙中为本书作序,鼓励我们更好地完成编著工作。

本书虽在《云南高海拔地区电线覆冰问题研究》一书编写之后,有一定的经验,但由于时间仓促,编者水平有限,难免有疏漏,甚至谬误之处,望读者提出宝贵意见,谢谢!

编著者

1994年12月

# 目 录

## 序

## 编著者的话

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 第一章 电力气候概论 .....           | (1)   |
| 第一节 电力气候的定义 .....          | (1)   |
| 第二节 电力气候的内容 .....          | (1)   |
| 第三节 电力气候的经济效益 .....        | (3)   |
| 第二章 大风对送电线路的影响 .....       | (5)   |
| 第一节 大风的成因 .....            | (5)   |
| 第二节 大风的地区分布 .....          | (7)   |
| 第三节 大风的时间分布 .....          | (9)   |
| 第四节 线路最大设计风速值的选择 .....     | (10)  |
| 第五节 风压计算 .....             | (16)  |
| 第六节 大风事故分析范例 .....         | (21)  |
| 第七节 微风振动对电线断股的影响 .....     | (36)  |
| 第八节 防止大风事故的几点看法 .....      | (38)  |
| 第三章 电线覆冰问题 .....           | (41)  |
| 第一节 概况 .....               | (41)  |
| 第二节 电线覆冰的成因及种类 .....       | (44)  |
| 第三节 影响电线覆冰的因素 .....        | (50)  |
| 第四节 电线覆冰的危害 .....          | (58)  |
| 第五节 重冰区送电线路设计的几个特殊问题 ..... | (62)  |
| 第六节 电线覆冰的观测 .....          | (78)  |
| 第七节 覆冰绝缘子的电气性能 .....       | (86)  |
| 第八节 防止冰害事故的措施 .....        | (89)  |
| 第四章 雷电对电力网的危害 .....        | (96)  |
| 第一节 雷电的形成 .....            | (96)  |
| 第二节 直击雷与感应雷 .....          | (99)  |
| 第三节 我国雷电活动简况及雷电的地区分布 ..... | (104) |
| 第四节 雷电对电力网的危害 .....        | (106) |
| 第五节 影响雷击选择性的因素 .....       | (111) |
| 第六节 防止雷害事故的措施 .....        | (113) |
| 第五章 气温对电线拉力弧垂的影响 .....     | (117) |
| 第一节 气温与电线拉力弧垂 .....        | (117) |

|      |                       |       |
|------|-----------------------|-------|
| 第二节  | 决定气温及其变化的因素           | (118) |
| 第三节  | 我国气温的分布               | (119) |
| 第四节  | 高温情况下电线弧垂增大造成的危害      | (123) |
| 第六章  | 气候与电力系统污闪事故           | (125) |
| 第一节  | 污闪的定义及分类              | (125) |
| 第二节  | 500 kV 线路污闪的外因        | (125) |
| 第三节  | 影响污闪的气象因素             | (127) |
| 第四节  | 影响污闪的气象资料的调查统计        | (131) |
| 第五节  | 气象分布图及污区分布图的绘制        | (134) |
| 第六节  | 污秽地区变电站站址选择的气象考察实例    | (146) |
| 第七节  | 污闪事故概述                | (152) |
| 第八节  | 防止污闪事故的措施             | (153) |
| 第七章  | 气候与电晕                 | (156) |
| 第一节  | 输电线路导线上的电晕            | (156) |
| 第二节  | 电晕产生的危害               | (158) |
| 第三节  | 电晕损失计算                | (161) |
| 第四节  | 电晕损失计算范例              | (169) |
| 第八章  | 气候对电线舞动的影响            | (189) |
| 第一节  | 电线舞动的特征               | (189) |
| 第二节  | 电线舞动造成的危害             | (190) |
| 第三节  | 电线舞动的气象条件             | (191) |
| 第四节  | 国内外电线舞动简况             | (195) |
| 第五节  | 防止电线舞动的措施             | (198) |
| 第九章  | 气候与发电                 | (202) |
| 第一节  | 气候与火力发电               | (202) |
| 第二节  | 气候与水力发电               | (207) |
| 第三节  | 气候与风力发电               | (216) |
| 第四节  | 气候与其它能源发电             | (218) |
| 第十章  | 其 它                   | (226) |
| 第一节  | 气候对电力系统通信的影响          | (226) |
| 第二节  | 气候对高压输电线路大跨越气球放线施工的影响 | (227) |
| 第三节  | 微地形、微气象概述             | (228) |
| 参考文献 |                       | (232) |

# 第一章 电力气候概论

建电厂(站)、变电所和送电线路,都要考虑厂(站)址或路径选择是否科学合理,其首先要考虑的问题是自然界的气候因子,如大风、雨雾、雷暴、湿度、温度等等,尤其是要掌握在该地区的几种灾害性天气和它们出现时所能产生的影响,从而对电力开发利用起到良好的作用。

## 第一节 电力气候的定义

电力气候学是利用气象学的基本理论,解决电力建设及生产中的具体气候问题的一门实用科学,它是应用气象学的一部分。我国学者谭冠日教授等在《应用气候》一书中曾作了如下论述:气候是自然环境的一个组成部分,它能促进或阻碍人类活动。气候变化对电力生产活动可能是有利的,也可能是有害的。所以,在电力生产建设中要求获得气候资料,并研究气候对电力的影响。首先,要得出适当的气候指标——电力对气候的具体要求或电力与气候的定量关系。然后利用气候资料分析这些指标的空间分布和随时间变化的规律性,使电力工业能充分利用有利气候条件,预防不利的气候影响。

电力气候学是由于生产实际的需要而形成的,其研究的成果为有关部门提供有价值的规划、设计及生产的依据。

1979年召开的“世界气候大会”提出了“世界气候计划(WCP)”,特别强调气候知识在国民经济各部门的应用。该计划提出:“气候知识应用计划的基本目标是推动社会提高其完成各项活动的能力,在不同的气候条件下获得最大的经济社会效益,并保持环境的完整性。”这清楚地说明了应用气候的目标及性质<sup>[1]</sup>。

我国的电力资源极为丰富,其分布较广并具有一定的规律性。象西南地区的云南、贵州、四川、西藏等省(区)以及三峡和黄河的峡谷地区都有巨大的电力资源。至于我国的丘陵地带及沿海等地的有利地形也多有小型的电力资源可以利用。然而电力能否顺利安全地开发、输送都与整个国计民生息息相关。当然恶劣的天气如大风、雷暴、低温等,都会给电力开发利用造成严重的损失。所以研究电力气候就显得更加重要。

## 第二节 电力气候的内容

### 一、电力规划

我国电力事业的发展应该适合国情,国情的一个重要方面乃是包括气候在内的自然条件。因此,制定电力发展规划,应该适应各地的气候情况,以期充分利用有利条件,避免或克服不利条件,获得发展的高速度、高质量和高效益。

电力是一种重要的能源,制定电力规划应认真收集气候资料,顺应气候规律,遵循我国发展能源的方针政策,开发和节约并重,“因地制宜,多能互补,综合利用,讲求实效”。

人类几千年活动的最大优点是有目的地利用自然、改造自然。我们知道自然界的动能较

多,如风能、太阳能、水能(包括潮汐)等都可以转化为电能。如风能主要是根据风力大小进行规划,再根据需求和可能进行开发利用。当前我国以风能为辅助能源来解决农村、边远地区和海岛上的电力问题。风力发电机以 10 kW 以下为主,将来拟发展大、中型发电机,如正在设计的 200 kW 以上的风力发电机,可为工、农业提供较大的功率。为此,需研究各地风能密度以及 50~100 m 高度上的风速,以便进行全国风力发电规划及建设工作。荷兰根据实际计算,到 2000 年风力发电将占所需电力的 20%,西德计划使风力发电能提供发电量的 8%,相当于现在的水力发电。

太阳能发展规划是根据太阳辐射量进行区划的。美国规划到 2000 年太阳能可提供所需能量的 7%,到 2020 年达 25%。我国对太阳能电池、太阳能发电已开始探索试验<sup>[1]</sup>。

水能发展规划需根据河流水文气象资料,正确预测水电站来水情况,准确估计电站出力范围及其调峰能力。例如,关于三峡水电站接入华中电网的调峰问题,华中电管局曾进行了专题研究。三峡电站总装机 1820 万 kW,枯水期出力 499 万 kW。根据历年水文气象资料及电力系统运行的要求,长江在丰水年、平水年、枯水年以及每年汛期、枯水期来水情况和防洪、航运等制约因素,规划制定出最合理的调峰方案<sup>[2]</sup>。

## 二、电力工程设计

电力气候学的一个重要任务是为了使工程建设适应气候条件,使设计符合技术先进、经济合理和安全适用的原则。发电、变电及送电工程都要准确设计和精心施工,气候情报和资料是必不可少的,它直接影响到工程质量的好坏及经济效益。

发电厂及变电所设计需要对厂(所)址附近的气候进行研究。为了得到合理的厂房建筑设计,风压是重要的问题,其次是雪压。地基基础和管、线需埋在季节性冻土层之下。采暖、通风和空气调节,需要温度、湿度、辐射、日照等气候资料作为设计依据。

火电厂设计需考虑烟囱排放废气对周围环境污染的影响,需收集大风常年风向风速频率、大气温度层结、大气湍流扩散、雨雾天数等气候资料;水电站堤坝的设计要以最大可能降水、一定频率的暴雨洪水、降水时程分配和点面关系等为依据,坝的结构还要考虑风荷载;送电线路设计要考虑电线可能遇到的最大风速和最大电线覆冰荷载,还要计算极端最高气温时的电线弧垂和最低气温时电线张力,并按年平均气温进行送电线路的防振设计。

雷暴在送电线路和电力设备中可能产生短时的“大气过电压”,有时会击穿绝缘,造成闪络放电事故。所以,雷电日或雷电小时数是进行防雷设计的依据。

计算超高压输电线路的电晕及电晕损失,需搜集线路所经地区的年降雨量、空气湿度、空气密度、雨、雪、霜、雾等各种天气日数;选择高海拔地区电气绝缘水平时,需搜集海拔高度、空气密度、大气压力、大气温度梯度等资料。

## 三、电力生产管理

应用气候资料和情报,能加强电力企业管理,减少天气变化所造成的损失,一个工程的规划和设计即使都很完善,若管理不当,也得不到应有的经济效益。

水电站的管理,要掌握流域面积内的水文气象资料,根据降水的年变程及当前的降水形势,利用调节水库争取蓄水,以保证枯水期的发电出力。如丰满水力发电厂,装机 72.4 万 kW,吉林省电力局及气象部门专门研究了丰满等大型水库流域降水过程的物理量变化特征及降水形成的环流背景等物理因素,制订了松花江流域大中型水库蓄水期雨量预报系统,为水库调洪蓄水发挥了较好的作用,效益较明显。

影响电网安全运行的一些大气现象如暴雨、冰凌、风吹雪等,这些恶劣气象条件,常常造成电网停电事故。应了解在什么天气情况下易于形成雨凇、雾凇、风吹雪、雪崩、流冰及特大暴风,并调查分析其出现时间和频率,以便采取预防措施。

#### 四、预测气候灾害可能出现的概率

电力气候一方面要选择优良的气象条件,另一方面要推算一些气象灾害和极端气象状况可能出现的概率,以便采取预防措施。

设计架空送电线路采用离地面 15 m 高处 15 年一遇自记 10 min 平均最大风速和 15 年一遇的最大电线覆冰。在沿线地区,一方面利用概率统计方法计算最大风速,还要借助历史上出现过的特大风速进行校验。如广东湛江,1954 年 9 月 30 日一次台风,瞬时风速达 60 m/s,经查历史资料,得知这样大的风速,1617、1776、1906 和 1954 年共发生过 4 次,估计其重现期为 90 年一遇<sup>[1]</sup>。

### 第三节 电力气候的经济效益

世界气象组织气象学与气候学专门应用委员会第六届会议指出:如果涉及到长期性、战略性或计划性的活动时,忽视了气候因子的作用或对气候影响估计出现错误,那么任何准确的天气预报也不能避免重大损失。既然气候因子如此重要,在当前长期天气预报水平还较低的情况下,对气候影响进行宏观的评价就显得特别重要。如果不注重这方面的研究或不注意这方面研究成果的应用,必然会对社会和经济活动带来重大损失。在我国电力部门这方面的经验教训也是很深刻的。

#### 一、顺应气候规律得到的经济效益

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 5 m/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 90 m 高、3500 m<sup>2</sup> 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 I 方案塔顶的风压作为 1.0,那么第 V 方案的风压为第 I 方案的 2.5 倍。以第 I 方案的钢筋用量为 1.0,第 V 方案为第 I 方案的 3 倍<sup>[1]</sup>。

表 1-1 不同设计风速钢筋用量比较

| 方 案 | 项 目 | 设计风速<br>(m/s)            |  | 基本风压<br>(kgf/m <sup>2</sup> ) | 高度<br>系数 | 超载<br>系数 |
|-----|-----|--------------------------|--|-------------------------------|----------|----------|
| I   |     | 60 年一遇 20 m 高 10 min 平均  |  | 50                            | 1.64     | 1.4      |
| II  |     | 60 年一遇 10 m 高 10 min 平均  |  | 50/1.25=40                    | 1.90     | 1.3      |
| III |     | 100 年一遇 20 m 高 10 min 平均 |  | 50×1.1=55                     | 1.64     | 1.3      |
| IV  |     | 100 年一遇 20 m 高瞬时         |  | 50×1.5=75                     | 1.64     | 1.3      |
| V   |     | 100 年一遇 20 m 高瞬时         |  | 50×1.5=75                     | 1.64     | 1.3      |

| 方 案 | 项 目 | 风振<br>系数 | 重要性<br>系数 | 塔顶计算风压<br>(kgf/m <sup>2</sup> ) | 计算<br>风压比 | 计算用钢<br>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           |

注:1kgf≈9.81N。

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 230 kV 送电线路中,巴方提出的风压为  $127 \text{ kgf/m}^2$ ,但按我国的计算方法,结合当地天气气候条件分析,认为取  $77 \text{ kgf/m}^2$  即可,仅就钢材而论,就节约 500~600 t<sup>[1]</sup>。云南者海至昭通 220 kV 送电线路,通过滇东北重冰区,经邀请气象专家现场考察鉴定,最大设计冰厚由 30 mm 特重冰区降低为 20 mm 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,它所产生的经济效益有时是难以估量的。这里仅就风能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,全年可节约柴油一万吨左右。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 200 kW 风力发电机为例,安装在不同地区发电量和经济效益就有较大差异,如发电量在平潭(北井)为 73 万  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,嵎洒为 50 万  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,福建东山为 62 万  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,按折算每年可节约柴油分别为 201 t、153 t 和 146 t<sup>[1]</sup>。

## 二、违背气候规律造成的经济损失

在电力建设的规划和设计中,违背气候规律或是对气候指标的选择不当,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 10 mm,湖区达 50~70 mm,沅江最大达 120 mm,南岳衡山(海拔高程 1266 m)冰厚达 320 mm,大部份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。1979 年我国 220 kV 送电线路在大风中发生 5 起严重倒塔、倒杆事故,少送电 6800 万  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,损失很大。1980 年华北地区的 220 kV 双回送电线路,在大风中倒塔 8 基,倒杆 76 基,直接损失几百万元,用户的间接损失更难估计。这些事故与设计风压取值偏低或没有考虑风振系数有关。

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,发现在山谷里烟体排放不出去,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  $\text{kW}$  发电量建设的厂,现在只能安装 12 万  $\text{kW}$  的机组,造成基建投资的巨大浪费。火电厂的污染可使附近果树不结实,农作物减产,牲畜死亡。如我国在 50 年代投产的望亭电厂、微水电厂,因粉尘及二氧化硫污染,向附近农民赔过款。英国渡桥(Ferrybridge)电站 8 座巨型冷却塔,塔高 375 ft (1 ft = 0.3048 m, 375 ft 约为 114.3 m),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。

倘若一座功率较大的发电机,安装在风速较小的地方,那么风力发电机就很少能达到原来设计的输出功率。此外,一个风力发电机考虑风压、风振不当,就可能使风力发电机被风吹毁,如 1939 年美国制造的双叶片的 1250 kW 的风力发电机组,安装在佛蒙特州拉特兰山上,风轮直径 53.3 m,因大风使叶片损坏而拆除。我国也有 50 kW 的风力发电机因风振使叶片损坏过<sup>[1]</sup>。

## 第二章 大风对送电线路的影响

风可变为电力为人类造福,而大风也可对农作物造成危害。大风对建筑物及送电线路的危害是不容忽视的。俗话说:“天有不测风云。”所以在线路设计时要对大风很好地进行分析研究。

### 第一节 大风的成因

简单地说,空气流动称为风。实际上空气流动的方向是复杂多变的,所以气象上就定义:空气杂乱无章的运动为乱流,作上下垂直运动为对流;在水平方向上流动才称为风。我们知道,空气是有重量的,在水平方向上的空气由于某种原因常存在重力差异,自然重力大的地方上的空气要指向重力小的地方,于是产生旁压力,即所谓的气压梯度力。空气一般就在这种气压梯度力的推动下,从气压高值区流向气压低值区。若两地气压差异愈大,则气压梯度力就愈大,空气流动速度就愈快,表现为风刮得就愈猛烈。一般规定平均风速达到 6 级(11m/s)以上,就称为大风<sup>[3]</sup>。

由于地球近似圆球体,地表又极其复杂,所以各地受太阳照射所吸收的热量就不同,因之就会引起空气密度的变化,一般冷而重的空气区域常向暖而轻的空气区域流动。由此可以认为风与气压场及地形等都是密切相关的。其中还包含了地形对风的机械作用,如山脉对空气流动的阻挡作用;气流从开阔的地区流入峡谷时所形成的狭管作用,这些在输电线路规划时都应结合实际进行研究。在气象上常把风分为系统性的风及地方性的风两大类。

系统性的风如冷锋(包括其前沿的飕线所造成的龙卷风等)大风、副高西侧的偏南大风、低压(包括东北低压、江淮气旋、东海低压、南海低压、台风、印度季风低压等)大风、雷雨大风等。这些天气系统所形成的大风,突出地表现为气压梯度力的明显加大,如冷锋大风,当冷锋过境后由于北方冷高压向气压较低的南方推移时,能造成气压梯度力的激烈增大,在我国北方常出现偏北大风就属此类。另外低压加深发展时,尤其是台风(季风)低压移来时,它强大的气压梯度力就会在其所经过或停留的地区产生大风。

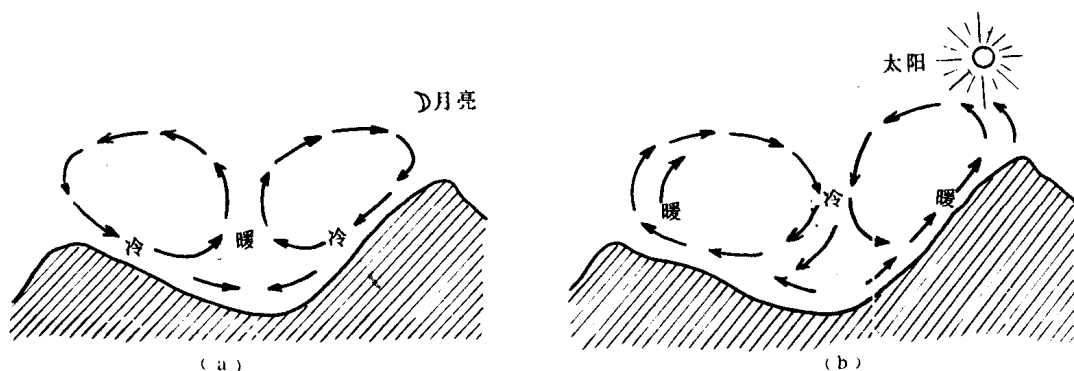


图 2-1 山谷风示意图

(a)山风 (b)谷风

地方性的风如海陆风、山谷风、焚风、干热风、冰川风等。这些地方性的风突出表现为热力因子与地形因子的综合作用所造成的。诸如山谷风,因为白天山坡上受热较多,空气增温较高,而与山坡同高度的谷地上受热相比,其上空的气温不易增高,所以冷而重的空气就下沉到谷底,坡上暖而轻的空气就沿坡上升形成谷风。夜间就反过来,山坡辐射冷却较快,冷而重的空气就沿坡下沉到谷底,而谷底较暖而轻的空气就垂直上升形成山风,如图 2-1。

为了判别风力的大小,将风力划分为如下等级<sup>[3]</sup>。

表 2-1 风力等级表

| 风力等级 | 风的名称  | 相当风速      |         |         |
|------|-------|-----------|---------|---------|
|      |       | m/s       | km/h    | n mil/h |
| 0    | 无风    | 0~0.2     | <1      | <1      |
| 1    | 软风    | 0.3~1.5   | 1~5     | 1~3     |
| 2    | 轻风    | 1.6~3.3   | 6~11    | 4~6     |
| 3    | 微风    | 3.4~5.4   | 12~19   | 7~10    |
| 4    | 和风    | 5.5~7.9   | 20~28   | 11~16   |
| 5    | 清风    | 8.0~10.7  | 29~38   | 17~21   |
| 6    | 强风    | 10.8~13.8 | 39~49   | 22~27   |
| 7    | 疾风    | 13.9~17.1 | 50~61   | 28~33   |
| 8    | 大风    | 17.2~20.7 | 62~74   | 34~40   |
| 9    | 烈风    | 20.8~24.4 | 75~88   | 41~47   |
| 10   | 狂风    | 24.5~28.4 | 89~102  | 48~55   |
| 11   | 暴风    | 28.5~32.6 | 103~117 | 56~63   |
| 12   | 飓(台)风 | 32.7~36.9 | 118~133 | 64~71   |
| 13   | ~     | 37.0~41.4 | 134~149 | 72~80   |
| 14   | ~     | 41.5~46.1 | 150~166 | 81~89   |
| 15   | ~     | 46.2~50.9 | 167~183 | 90~99   |
| 16   | ~     | 51.0~56.0 | 184~201 | 100~108 |
| 17   | ~     | 56.1~61.2 | 202~220 | 109~118 |

一般风速大小都用平均风速(m/s)大小来表示,其实阵性(瞬时)风速有时可以很大,比平均风速大一倍或一倍以上。据统计 6 级以下的风一般不会引起较大的危害。而一般 6 级以上的大风常伴有较大级数的阵性大风出现,其危害就不得不考虑了。值得提出的是风随高度变化也是不容忽视的,据统计 10 m 高处的风速为 3 级时,风速平均为 4.4 m/s;这时 20 m 高处风速可以大到 4 级,其增值约为 12~26%,即 4.9~5.5 m/s;200 m 高处风速可增大到 6 级,其增值约为 54%,平均风速达 11.9 m/s,其瞬时风速当然就更大。在考虑风速随高度变化时,要注意空气上下交换的问题。一般情况下,风随高度分布是上层风速大,下层风速小,若上下层风向差别不大,考虑上下交换的结果,常使上层较大的空气动量传递到下层,可使下层风速加大;反之下层空气较小的动量传递到上层,也可使上层风速减小。值得提出的是这种动量传递作用的强弱,与大气的层结稳定度和风的垂直切变相关。大气越不稳定,风的垂直切变越大,则动量的传递作用就越强。

根据各种实际情况分析,还可以发现风不仅有明显的年际变化、季节变化,还有明显的日际变化。

## 第二节 大风的地区分布

我国大风的分布特点为<sup>[4]</sup>:

### 一、东南沿海为我国大陆上最大风速区

风速等值线与海岸平行,风速从沿海向内陆递减很快,这是与造成这一地区大风的天气系统——台风有关。这些地区面临海洋,正对着台风的来向,台风登陆环流遇山和陆地,由于摩擦加大,使台风强度很快减弱,风速减小,因此风速等值线逐渐向内陆递减。在这一区域内,大致有三个特大风速区(见全国基本风速分布图):一为湛江到琼海一线以东,风速在  $36 \text{ m/s}$  (风压  $0.80 \text{ kN/m}^2$ ) 或以上。这主要是由于这一地区面对太平洋和南海,受太平洋和南海台风影响频繁所致,加之这里的海岸线本身构成了圆弧形,成为天然的兜风地形,因此加大了风速,导致这一地区成为特大风速区。其他两个区分布在浙江与福建的交界处。这是由于台湾岛与大陆形成的狭管作用的原因。当台风穿过台湾而在大陆登陆时,风速就大为减弱,所以福建中部沿海受台湾岛的屏障阻挡,风速相对小于两侧。

从全国基本风压分布图(图 2-2)中可以看出风速指向内陆的削弱情况:到达离海岸  $50 \text{ km}$  处的风速仅为海边风速的  $75\%$ ;到达离海岸  $100 \text{ km}$  处则仅为  $50\%$  左右;再向内陆则风速变化很小,几乎不受台风影响。这与我国沿海风压的分布梯度,即从海边风压  $0.7 \sim 0.8 \text{ kN/m}^2$  (风速  $33 \sim 36 \text{ m/s}$ ),至离海岸  $50 \sim 100 \text{ km}$  处内陆风压为  $0.30 \sim 0.40 \text{ kN/m}^2$  (风速  $22 \sim 25 \text{ m/s}$ ) 也是相吻合的。

### 二、西北、华北和东北地区的北部为我国大陆上风速次大区

风速等值线梯度由北向南递减。这一地区的大风,主要与强冷空气活动相联系。冬半年每次强冷空气入侵时,在冷锋过境之处,都有大风出现,但由于路径不同,其所引起的大风强度和区域也就不同。夏半年,大风多伴雷雨,一般为时短暂,但个别情况下也能出现历年极端最大风速。由于强大冷空气南下或东南下,逐渐变性,风速逐渐减弱,故风压也愈向南愈小。

此外,春季东北低压发展,这时本地区南部海面为高压,气压梯度南高北低,形成偏南大风,往往也可造成年极端最大风速。

### 三、青藏高原为风速较大区

这一地区大风主要是海拔高程较高所造成的。该地区除了冷空气侵袭造成大风之外,高空动量下传也能造成大风。每年冬半年西风带南移到本区,高空常维持强劲的偏西风气流,此时,如有使乱流交换发展的天气条件,引起高空动量下传,即能形成地面偏西大风,这种风多在午后发生。

### 四、云贵高原和长江中下游风速较小区

这一地区,特别是四川中部、贵州、湘西和鄂西为我国风速最小的区域。大部分地区风速在  $24 \text{ m/s}$  (风压  $0.35 \text{ kN/m}^2$ ) 以下。一般台风到此地区已大为减弱,寒潮大风到此也已是强弩之末,甚至有些地区受不到台风或寒潮大风的影响;至于高空西风急流则在海上汇合,这些地区基本处在“死水区”,因此不可能有较大风速。

这些地区夏半年雷雨初降时,常有大风发生,势急而猛,造成极端最大风速,但持续时间并

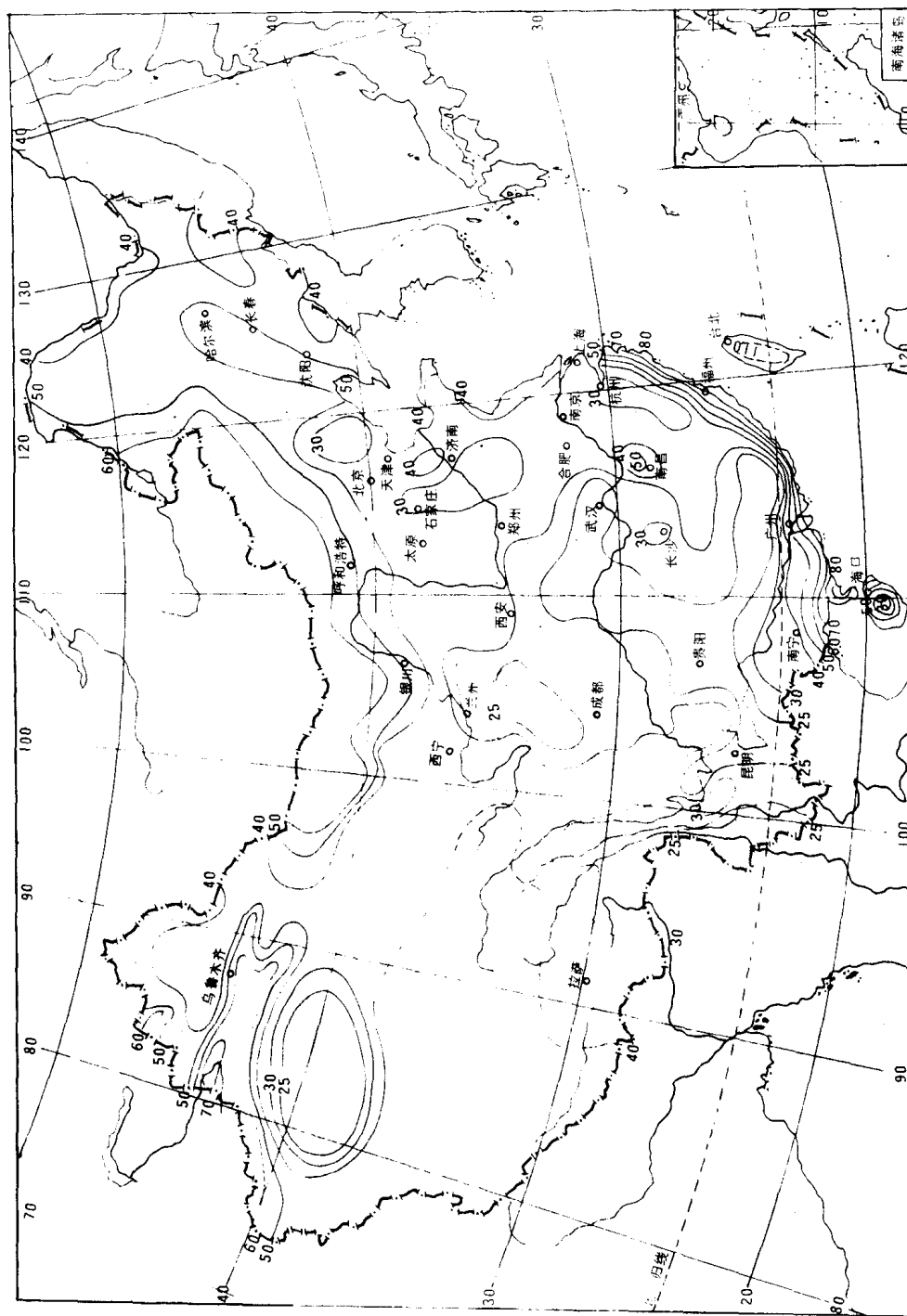


图 2-2 我国风速分布图 (单位 m/s)

不长,影响范围也较小。有时是飚线上的大风,其势虽凶猛但时间短暂。

### 五、台湾、海南岛和南海诸岛的风速则各自成一区

台湾是我国风速最大的地区,主要受太平洋台风的影响,风速可达  $49 \text{ m/s}$  (风压  $1.5 \text{ kN/m}^2$ )。台风由东岸登陆,由于中央山脉的屏障作用,西岸风速小于东岸。

海南岛由于纬度偏南,主要受南海台风的袭击,故东岸偏南有较大风速。太平洋台风的风

力大于南海台风,有时在岛的东北端登陆,因此,该区域也有很大风速,造成风灾。

西沙群岛受南海台风的影响,风力较大,风速达 47 m/s(风压 1.40 kN/m<sup>2</sup>)。南海其余诸岛的风速略小于西沙,但也相当可观。至于我国沿海其它小岛及近海海面的风速,一般比相应的陆上为大。

全国基本风速分布如图 2-2 所示。图中的基本风速系以当地比较空旷平坦地面上离地 10 m 高处的资料统计所得的 30 年一遇 10 min 平均最大风速  $v_0$ (m/s)为标准。基本风压按下式计算:

$$W_0 = \frac{v_0^2}{1600} \quad (2 \cdot 1)$$

式中  $W_0$ ——基本风压(kN/m<sup>2</sup>);

$v_0$ ——基本风速(m/s)。

### 第三节 大风的时间分布

风具有明显的日际变化、季节变化和年际变化。因为风的形成与天气系统、热力因素及地理纬度、地形地貌、海陆分布等都有很大的关系。而这些因素中的天气系统及热力因子等本身都具有一定的变化规律,所以大风更具有明显的时间分布特点。

#### 一、大风的日际变化

地表面受热与散热在一天之中变化都是很明显的。太阳辐射在午后可达到极大值,近地面层空气增热最多,于是空气膨胀上升,引起高层较冷的空气下沉,形成对流,导致高层动量下传。表现为高空较大风速传播到低层,在近地面层就出现较大风速,所以一天中一般午后风速可达到最大值。以后随着太阳的斜射和西沉,使地面受热量减少,上下对流减弱,高层对地面的影响也随之减弱,近地面风速也就随之减小,加之夜间辐射冷却,直到次日清晨日出前,地面风速可达到最小。一般在夏半年晴朗无云的日子,日照强烈,空气上下对流旺盛,所以风速日际变化就十分明显。若在增温不明显的地区,风速的日际变化也就不明显了。

风向的日际变化也是很明显的,地面位置、地形地貌、海陆分布等都是不可忽视的,这些因素对太阳辐射的吸收、释放的程度是不同的。如水面白天吸收热量较多,夜间散失的热量较少,陆面就不同了,这就造成了海陆风向日夜的反转;山谷风也是如此。这种风向的日夜变换都是与地形地貌、海陆分布和辐射冷却连系在一起的。另外在高层气流引导下风向的转变也或多或少具有一定的规律性。

#### 二、风的季节性变化

一般情况是这样的,冬春季节多以冷空气南下活动为主,所以冷锋大风天气多出现在冬春季节。

夏半年以低压系统活动为主。如台风、季风低压及雷暴等大风天气多发生在夏半年。

由上可见不同季节出现大风的频率是不相同的,从而可以看出一年中各季节大风分布的明显变化规律。

#### 三、大风的年际变化

上述天气系统如冬季的寒潮天气过程、夏季的台风及季风低压天气、副高的北上或西伸等每年出现的次数是不相同的,其强度也是有差别的,因此说这些天气系统本身就具有明显的年

际变化,其所造成的大风天气也必然具有明显的年际变化。至于瞬间大风的变化就显得更加复杂多变了。

#### 第四节 线路最大设计风速值的选择

我国规定,送电线路最大基本风速按电压分级,330 kV 及以下为距地面 15 m 高处 10 min 平均的最大风速,500 kV 为距地面 20 m 高处 30 年一遇 10 min 平均的最大风速。因此,确定最大基本风速之前,须先进行风速的选用、统计和数学分析。关于线路设计风速值的选择,东北电力设计院编写的《电力工程高压送电线路设计手册》<sup>[5]</sup>中作了详细论述,现阐述如下:

##### 一、最大基本风速的取值分析与选用

在选择最大风速之前,首先将收集到的不同高度、不同时段、不同观测次数的历年最大风速资料,统一换算为高度为 10 m 的连续自记 10 min 平均值。再根据保证率的要求(如 15 年一遇),经过概率计算求出的最大风速即为最大基本风速。

##### (一) 风速次时换算

我国许多气象台(站)以往多采用一天定时观测 4 次的 2 min 平均风速,显然会漏掉不少大风风速。因此,对于定时观测风速,必须经过观测时段和次数的两重订正,即次时换算,才能将定时 2 min 平均风速换算为连续自记 10 min 平均风速。这种换算是根据具有定时和连续自记的平行观测资料,而通过相关分析建立回归方程进行的。下面举例说明并在表 2-4 中列出全国各地按区建立的换算公式。

##### 1. 风压板定时观测 2 min 的平均风速 $v_2$ 换算为定时自记 10 min 平均风速 $v_{10}$

用相关法列出两者之间的回归方程式为

$$v_{10} = A v_2 + B \quad (2 \cdot 2)$$

$$A = \frac{\sum v_2 v_{10} - N \bar{v}_2 \bar{v}_{10}}{\sum v_2^2 - N \bar{v}_2^2} \quad (2 \cdot 3)$$

$$B = \bar{v}_{10} - A \bar{v}_2 \quad (2 \cdot 4)$$

上三式中  $\sum v_2 v_{10}$ ——各个对应观测点的风压板 2 min 平均风速和同时自记仪 10 min 平均风速之乘积的总和;

$N$ ——全部统计资料中  $v_2$ (或对应的  $v_{10}$ )出现的总次数;

$\bar{v}_2$ —— $v_2$  的算术平均值,  $\bar{v}_2 = \frac{\sum v_2}{N}$ ;

$\bar{v}_{10}$ —— $v_{10}$  的算术平均值,  $\bar{v}_{10} = \frac{\sum v_{10}}{N}$ 。

例题:从表 2-2 所列沈阳气象台 5 年间之观测(风压板每日 4 次定时观测)资料,计算  $v_2$  和  $v_{10}$  的关系。

解 已知  $N=60$  次,  $\sum v_2=841.0$ ,  $\sum v_{10}=1082.1$

$$\sum v_2 v_{10} = 15761, \sum v_2^2 = 12520$$

$$\bar{m} = \frac{841.0}{60} = 14.02$$

$$\bar{v}_{10} = \frac{1082.1}{60} = 18.03$$

$$\text{则 } A = \frac{15761 - 60 \times 14.02 \times 18.03}{12520 - 60 \times 14.02^2} = 0.818$$

$$B = 18.03 - 0.818 \times 14.02 = 6.66$$

将 A、B 系数代入式(2·2)中,即得换算方程式为

$$v_{10} = 0.81v_2 + 6.66$$

为了检查  $v_2$  与  $v_{10}$  的关系是否密切,可再计算相关比值,它越接近于 1,表明两种记录方法间的关系越密切,若接近 0,将不适于统一换算。

$$\rho = \frac{N \sum v_2 v_{10} - \sum v_2 \sum v_{10}}{\sqrt{[N \sum v_2^2 - (\sum v_2)^2][N \sum v_{10}^2 - (\sum v_{10})^2]}} \quad (2 \cdot 5)$$

将上例值代入,则得

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{60 \times 15761 - 841 \times 1082.1}{\sqrt{(60 \times 12520 - 841^2)(60 \times 20788 - 1082.1^2)}} \\ &= \frac{35641}{5790.3} = 0.615 \end{aligned}$$

现将东北地区三个主要城市的 A、B 值计算结果列入表 2-3,表中数字与算例稍有出入。

表 2-2 沈阳气象台  $v_2$  及  $v_{10}$  的观测资料

| 年份   | 风 月 份       | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1954 | 自记 $v_{10}$ | 20.7 | 28.3 | 21.0 | 29.7 | 25.0 | 17.7 | 13.3 | 13.3 | 16.3 | 20.0 | 15.2 | 17.7 |
|      | 风压板 $v_2$   | 16   | 20   | 16   | 16   | 24   | 10   | 10   | 10   | 12   | 12   | 18   | 12   |
| 1955 | 自记 $v_{10}$ | 16.7 | 20.8 | 19.7 | 26.7 | 15.7 | 14.5 | 14.3 | 16.7 | 21.0 | 18.0 | 24.0 | 20.7 |
|      | 风压板 $v_2$   | 14   | 16   | 18   | 18   | 12   | 12   | 14   | 10   | 10   | 14   | 14   | 14   |
| 1956 | 自记 $v_{10}$ | 22.2 | 23.3 | 23.7 | 27.5 | 20.8 | 20.0 | 15.5 | 11.7 | 13.0 | 26.3 | 20.7 | 13.3 |
|      | 风压板 $v_2$   | 18   | 18   | 16   | 24   | 20   | 14   | 12   | 10   | 10   | 12   | 12   | 16   |
| 1957 | 自记 $v_{10}$ | 12.3 | 12.0 | 15.0 | 20.2 | 20.8 | 16.0 | 12.5 | 13.5 | 16.8 | 20.7 | 16.7 | 20.7 |
|      | 风压板 $v_2$   | 10   | 9    | 12   | 14   | 16   | 14   | 10   | 12   | 12   | 14   | 12   | 12   |
| 1958 | 自记 $v_{10}$ | 17.1 | 15.2 | 18.7 | 17.3 | 18.0 | 17.8 | 17.3 | 9.2  | 12.0 | 13.0 | 11.3 | 13.0 |
|      | 风压板 $v_2$   | 16   | 16   | 20   | 16   | 18   | 16   | 9    | 9    | 14   | 12   | 12   | 12   |

表 2-3  $v_{10}$  与  $v_2$  换算公式

| 地 区 | 经验公式                       |
|-----|----------------------------|
| 沈 阳 | $v_{10} = 6.66 + 0.81v_2$  |
| 长 春 | $v_{10} = 2.22 + 0.982v_2$ |
| 哈尔滨 | $v_{10} = 2.96 + 0.95v_2$  |

注:  $v_{10}$  为定时观测之 10 min 平均风速;

$v_2$  为定时观测之 2 min 平均风速。

### 2. 10 min 定时自记平均风速换算为连续自记 10 min 平均风速

在设计时尚须考虑因定时观测而可能漏记的较大风速值,即尚须将本款 1. 中已求得的定时观测 10 min 平均值换算为 10 min 连续自记平均值。表 2-4 列出北京及东北地区部分换算关系式。