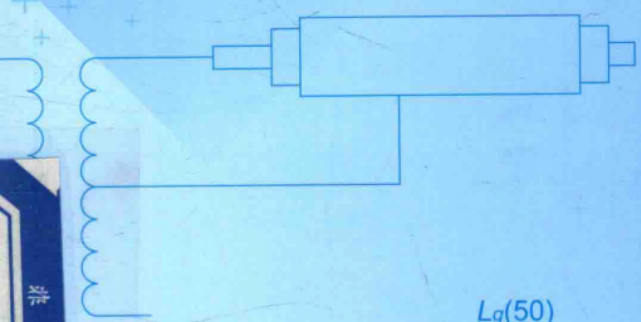
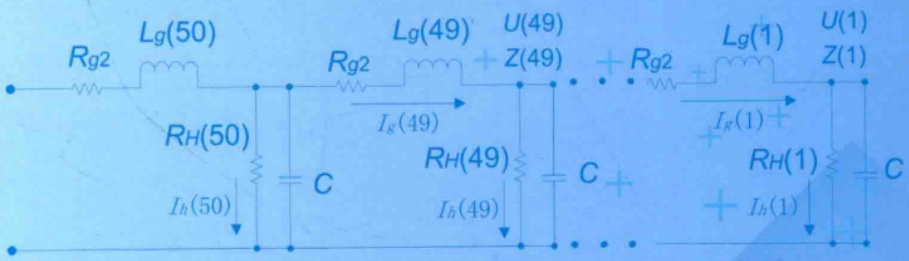
自制热导线及其用于在线防冰融冰的理论和技术

ZIZHI REDAOXIAN JIQI YONGYU
ZAIXIAN FANGBING RONGBING DE LILUN HE JISHU

莫思特　李碧雄　刘天琪 / 著





四川大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

自制热导线及其用于在线防冰融冰的理论和技术

ZIZHI REDAOXIAN JIQI YONGYU
ZAIXIAN FANGBING RONGBING DE LILUN HE JISHU

莫思特　李碧雄　刘天琪 / 著

四川大学出版社

项目策划：宋绍峰　唐　飞
责任编辑：胡晓燕
责任校对：王　锋
封面设计：墨创文化
责任印制：王　炜

图书在版编目（CIP）数据

自制热导线及其用于在线防冰融冰的理论和技术 / 莫思特，李碧雄，刘天琪著．-- 成都 ：四川大学出版社，2018.9
ISBN 978-7-5690-2379-4

Ⅰ．①自… Ⅱ．①莫… ②李… ③刘… Ⅲ．①输电线路－融冰化雪－研究 Ⅳ．①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 213228 号

书名　自制热导线及其用于在线防冰融冰的理论和技术

著　　者	莫思特　李碧雄　刘天琪
出　　版	四川大学出版社
地　　址	成都市一环路南一段 24 号（610065）
发　　行	四川大学出版社
书　　号	ISBN 978-7-5690-2379-4
印　　刷	成都新凯江印刷有限公司
成品尺寸	185mm×260mm
印　　张	10.25
字　　数	257 千字
版　　次	2019 年 5 月第 1 版
印　　次	2019 年 5 月第 1 次印刷
定　　价	45.00 元

版权所有 ◆ 侵权必究

◆ 读者邮购本书，请与本社发行科联系。
电话：(028)85408408/(028)85401670/
(028)86408023　邮政编码：610065
◆ 本社图书如有印装质量问题，请寄回出版社调换。
◆ 网址：http://press.scu.edu.cn

四川大学出版社
微信公众号

前　言

全球气候变化引起的极端天气日趋严重，冰雪天气导致电网灾害频繁发生。人类生产生活已经离不开电力供应，电网损毁不仅直接导致经济损失严重，其间接影响更不可估量。我国西电东送电力格局导致大量电力需穿越地势险恶、冰雪灾害严重地区，给实施电网融冰除冰作业带来巨大挑战。

架空输电导线抗冰技术包括防冰技术、融冰技术和除冰技术。其中，交流短路融冰法和直流短路融冰法是工程实践上采用得较多的方法，但尚存在如下问题：交流短路融冰法和直流短路融冰法只能在停电的状态下实施，输电线路必须退出运行。输电线路覆冰的时间往往是一年内最寒冷的季节，处于一年内的用电高峰，当需要融冰的输电线路退出运行，将加剧电力系统供需矛盾，并对电力系统安全运行造成影响。

交流短路融冰和直流短路融冰利用了导线的焦耳热，焦耳热与导线电阻和电流平方成正比。利用导线焦耳热也可以实现实时在线融冰，但要求导线有比较大的电阻；为减少线损，输电线路要求导线具有较小的电阻。融冰与输电对导线电阻的不同需求，是利用焦耳热实现实时在线融冰的技术瓶颈。

架空输电导线由钢芯与铝绞线构成，钢芯有较大的电阻，用于受力，铝绞线电阻较小，用于输电。现有输电导线，钢芯与铝绞线为并联关系，输电电流主要从铝绞线流过，流经钢芯的电流很少。如果在钢芯与铝绞线之间加入绝缘材料或高分子导电材料，破坏钢芯与铝绞线的并联关系，利用钢芯焦耳热融冰或者高分子导电材料制热融冰，就可破解输电线路实时在线融冰这一难题。

基于上述思路，笔者提出了在钢芯与铝绞线之间嵌入绝缘材料或高分子导电材料的自制热导线设计方法，并开展了利用自制热导线实现实时在线融冰的相关研究。本书共分七章：

(1) 第 1 章简述架空输电线路防冰融冰国内外研究现状，分析了现有研究存在的问题。

(2) 第 2 章研究了自制热导线用于输电和防冰融冰一体化的输电系统的相关热、电基础理论和技术问题。针对不同结构类型的钢芯铝绞线，设计了对应结构的嵌入高分子导电制热材料的自制热导线，提出了高分子导电制热材料连续式设计和高分子导电制热材料分段式设计两种方法，并以此分别建立了自制热导线的等效电路模型；基于防冰过程和融冰过程中的热量消耗需求分析，建立自制热导线进行防冰与融冰的热量消耗模型。

(3) 第 3 章针对实际工况，建立了确定自制热导线运行参数的计算分析方法。具体针对直流与交流电源制热两种制热方式、单端电源与双端电源两种制热供电方案、均匀功率与均匀材料两种工程应用方法，分别提出了简易分析和有限元分析两种运行参数分析计算方法。

（4）第4章建立了防冰融冰输电装置中融冰电源和输电电路之间的协同作用数学模型，并形成了相应的设计方法。针对电网输电类型和融冰距离，分别设计了交流输电—交流融冰装置、直流输电—直流融冰装置。对于交流输电线路，在三绕组变压器的基础上，设计了两种结构的交流输电—交流融冰装置：常规交流输电—交流融冰装置和自耦交流输电—交流融冰装置，并建立了交流输电—交流融冰输电装置的数学模型。应用多模块技术，设计了交流输电—直流融冰装置。对于直流输电线路，设计了直流输电—直流融冰装置。

（5）第5章针对输电线路的结冰类型，提出了一种基于现场实时监控的输电线覆冰预测方法，并针对输电电路防冰融冰阶段的不同控制需求，提出了防冰融冰控制算法。现场实时监控系统由导线覆冰实时监测系统、微气象监测系统和模拟导线监测系统构成。视频信号与数字图像处理技术应用于监测覆冰厚度；微气象系统用于监测环境温度、风速、湿度、降雨量等气象信息；模拟导线系统用于监测导线覆冰过程，模拟导线防冰和融冰的控制过程和控制效果。应用上述监控系统采集的数据，基于灰色理论和支持向量机理论，提出了超短期导线精准覆冰预测方法，建立了自适应动态控制方法以实现导线恒温控制。在模拟导线上分别运行模糊自适应PID控制方法和模型预测PID控制方法，对比两种控制方法的误差平方和，定期选择误差平方和最小的控制方法作为导线恒温控制方法。

（6）第6章针对实际自制热导线模型，运用上述理论和技术进行了模拟分析和验证。模拟实际110 kV输电线路的材料、结构以及可能的覆冰状况，计算分析了融冰与防冰功率需求；针对直流与交流电源制热两种制热方式、单端电源与双端电源两种制热供电方案、均匀功率与均匀材料两种工程应用方法，进行模拟。

（7）第7章对上述研究成果进行了总结，并提出了工程应用往后的研究内容和研究方向。

上述研究得到了四川大学谢和平院士和电网输变电设备防灾减灾实验室陆佳政教授的大力支持，在此表示最衷心的感谢！同时，深深感谢妻子和女儿对笔者研究过程的关心、帮助和鼓励。

本文的研究属于一个全新的研究领域，由于知识水平所限，书中难免存在疏漏，恳请读者批评指正。

莫思特

2018年7月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目 录

1 绪 论 …… (1)
1.1 研究背景 …… (1)
1.2 高压架空输电线路覆冰的危害 …… (2)
1.2.1 国外高压架空输电线路覆冰的危害事例 …… (2)
1.2.2 国内高压架空输电线路覆冰的危害事例 …… (2)
1.2.3 覆冰危害具体表现形式 …… (4)
1.3 输电线路防冰融冰国内外研究现状 …… (6)
1.3.1 输电线路覆冰与气象条件之间的关系 …… (6)
1.3.2 导线覆冰预测方法 …… (6)
1.3.3 防冰方法 …… (7)
1.3.4 融冰方法 …… (7)
1.3.5 除冰方法 …… (9)
1.3.6 现有防冰融冰方法存在的问题 …… (9)
2 自制热导线模型 …… (11)
2.1 自制热导线基本原理 …… (11)
2.1.1 导线结构 …… (11)
2.1.2 防冰融冰输电装置设计 …… (11)
2.1.3 不同结构自制热导线设计 …… (12)
2.1.4 制热材料的分布方式 …… (14)
2.2 连续分布自制热导线等效电路模型 …… (14)
2.2.1 总体模型 …… (14)
2.2.2 串联电阻 …… (15)
2.2.3 串联电感 …… (16)
2.2.4 并联电容 …… (16)
2.3 间断分布自制热导线等效电路模型 …… (16)
2.3.1 串联电阻 …… (17)
2.3.2 串联电感 …… (17)
2.3.3 并联电容 …… (18)
2.4 分段融冰及地线融冰方法 …… (18)
2.4.1 分段防冰融冰控制 …… (18)
2.4.2 电阻分段递减 …… (19)
2.4.3 双端电源制热 …… (19)

2.5 防冰融冰模型 …… (20)
2.5.1 建模思路 …… (20)
2.5.2 防冰方法及热学模型 …… (20)
2.5.3 融冰方法及热学模型 …… (22)
2.5.4 导线制热模型 …… (23)
3 导线制热参数分析方法 …… (24)
3.1 自制热导线微观等效电路 …… (24)
3.1.1 双端口微观等效电路 …… (24)
3.1.2 单端口微观等效电路 …… (25)
3.1.3 简化等效电路 …… (25)
3.2 直流分析方法 …… (26)
3.2.1 分布式直流等效电路 …… (26)
3.2.2 均匀材料分析 …… (27)
3.2.3 均匀功率分析 …… (31)
3.3 交流分析方法 …… (34)
3.3.1 分布式交流等效电路 …… (34)
3.3.2 均匀材料分析 …… (35)
3.3.3 均匀功率分析 …… (38)
3.3.4 分段阻性设计要求 …… (42)
3.4 分段方法 …… (42)
3.4.1 简易分段分析方法 …… (42)
3.4.2 有限元分段分析方法 …… (43)
4 防冰融冰输电装置模型 …… (44)
4.1 交流输电—交流融冰装置 …… (44)
4.1.1 交流输电—交流融冰装置功能 …… (44)
4.1.2 交流输电—交流融冰装置基本结构 …… (45)
4.1.3 常规交流输电—交流融冰装置 …… (49)
4.1.4 自耦交流输电—交流融冰装置数学模型 …… (51)
4.2 交流输电—直流融冰装置 …… (59)
4.2.1 多模块化技术基本原理 …… (59)
4.2.2 多模块化融冰装置结构 …… (61)
4.2.3 多模块化融冰装置分析 …… (62)
4.3 直流输电—直流融冰装置 …… (68)
4.4 直流输电—交流融冰装置 …… (68)
5 防冰融冰控制及覆冰预测方法 …… (69)
5.1 自制热导线功率控制 …… (69)
5.2 控制方法 …… (69)
5.2.1 模糊自适应 PID 控制 …… (70)
5.2.2 模型预测控制 …… (74)

5.2.3 自适应动态控制方法 …… (77)
5.2.4 PID初始参数整定方法 …… (78)
5.3 覆冰监测与预测方法 …… (79)
5.3.1 输电线路覆冰机理 …… (79)
5.3.2 冰厚视频监测系统 …… (81)
5.3.3 微气象监控系统 …… (89)
5.3.4 导线状态跟踪系统 …… (90)
5.3.5 超短期精准覆冰预测方法 …… (91)
5.4 防冰功率控制方法 …… (96)
5.4.1 控制思路 …… (96)
5.4.2 未来结冰预测方法 …… (96)
5.4.3 预测控制的预测模型建立 …… (97)
5.4.4 控制方法 …… (98)
5.5 融冰功率控制 …… (102)
5.5.1 控制思路 …… (102)
5.5.2 融冰功率增长预测 …… (102)
5.5.3 控制方法 …… (103)
5.6 导线防冰融冰综合控制流程 …… (104)
6 系统设计参数分析 …… (106)
6.1 基本参数 …… (106)
6.2 防冰融冰电源功率需求 …… (108)
6.2.1 防冰所需热量 …… (108)
6.2.2 融冰阶段电源功率需求 …… (109)
6.2.3 防冰融冰电源功率需求分析 …… (111)
6.3 LGJ－300/40的钢芯铝绞线等效电路 …… (112)
6.3.1 钢芯模型 …… (112)
6.3.2 铝绞线模型 …… (113)
6.3.3 钢芯与铝绞线之间互感 …… (113)
6.3.4 制热材料电阻及制热材料电阻率 …… (113)
6.3.5 电容 …… (114)
6.3.6 等效电路参数 …… (114)
6.4 制热功率分析 …… (114)
6.4.1 直流分析 …… (114)
6.4.2 交流分析 …… (124)
6.5 小结 …… (145)
7 结论与展望 …… (146)
7.1 本文的主要成果和结论 …… (146)
7.2 需要进一步研究的内容 …… (147)
参考文献 …… (148)

1 绪 论

1.1 研究背景

自工业化以来的近半个世纪，全球能源工业为全球经济与社会的发展做出了巨大贡献。化石能源的大量开发和使用，直接导致了全球环境污染，气候变暖，化石能源资源越来越短缺，继续下去，严重依赖化石能源的人类生产生活模式将很难持续，因此，改变能源生产和消费模式是目前能源发展急需解决的问题[1]。

当前，普遍认为的减少化石能源使用的有效方法是两个替代，即用清洁能源替代化石能源，用电能替代其他形式能源。水电、光伏、风电是目前清洁电能的主要形式，由于全球各地有时差、气候差，各地清洁电能的功率输出以及消费需求存在互补性，因此，全球能源互联网将是实施两个替代的关键技术[2,3]。

为应对全球气候变化，1992 年，联合国环境与发展大会通过了《联合国气候变化框架公约》，1997 年，达成《联合国气候变化框架公约的京都议定书》。2015 年，《联合国气候变化框架公约》近 200 个缔约国一致同意通过《巴黎协议》。我国在巴黎大会召开前提交的国家自主贡献文件中，提出将于 2030 年左右使二氧化碳排放达到峰值，2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%到 65%，非化石能源占一次能源消费比重达 20%左右。

2030 年，我国要实现非化石能源占一次能源消费比重达到 20%左右，任务非常艰巨，大力发展水、风、光等清洁能源是实现这一目标的重要举措。我国的水、风、光电，主要集中在西部的四川、新疆、甘肃、宁夏、内蒙古等地，而我国电能消耗地主要在东部的经济发达地区，“西电东送”（将西部地区的电力资源送往东部地区）是我国电力发展的重要措施。保障远距离输电线路的安全运行，特别是高输电塔，大跨距的输电线的安全运行，将是今后输电线路研究的重要课题。

从远期考虑全球能源互联网的输电线路网架结构，以及我国能源“西电东送”的现状，输电网将穿过高原、山地、盆地、丘陵等多样化的地形地貌，以及海拔、纬度多样的地区，其气候特性复杂多变。每年冬季，许多地区将出现冰雪、冻雨等极端的气候现象，这类极端气候现象将导致输电线路覆冰，并因输电线路覆冰而破坏电网结构，造成输电线路的冰暴灾害以及其他灾害的发生。

为减少输电线路冰暴灾害所造成的影响，目前已有多种防冰融冰技术方案，但是工程应用的输电线路防冰技术没法适用于各种环境或不能长期应用[4,5]。而且，实际工程应用的主要输电线路融冰与除冰手段，均需要断电运行[6-8]。断电运行的融冰防冰技术，将使电网的生产、人民的工作与生活以及社会正常秩序受到影响，并给个人、集体、国家带来经济损失。可见，输电线路实时在线融冰、防冰技术是电力行业急需的关键技术，开展输

电线路实时在线融冰、防冰相关科学问题和关键技术的研究，具有重要的学术价值和应用价值。

1.2 高压架空输电线路覆冰的危害

高压架空输电线路属于各国电力系统的生命线，将在今后全球能源互联网以及国内“西电东送”工程中承担跨区域电力传输任务，只有保障高压架空输电线路的正常工作，才可能保证电网的安全运行。由于世界各地都存在冰暴气候地区，高压架空输电线路基本无法避开，因此高压架空输电线安全事故在世界各国都有发生，严重影响了当地企业的生产和人们的生活，并带来巨大的经济损失。造成高压架空输电线路安全事故的主要原因有冰暴[9,10]和受风[11]，其主要表现形式有倒塔[12,13]、线路脱冰振动[14]、线路舞动[15]、闪络[16]等。

1.2.1 国外高压架空输电线路覆冰的危害事例

只要输电线路经过覆冰区域，覆冰就将影响电力系统安全运行。

自 1932 年美国发生第一起输电线路覆冰事故，世界各地发生的电力系统的覆冰灾害就不断发生。

1998 年 1 月加拿大冰灾，致使魁北克、安大略等地区连续三次遭受了冻雨，导致输电电路覆冰，最大覆冰厚度达到 105 mm；超过 3000 km 线路遭到不同程度破坏，导致 1000 多基铁塔和 3000 基木杆倒塌，大约 470 万人的电力供应中断，受灾地区人数超过加拿大人口总数的 16%，直接经济损失超过 54 亿美元[17,18]。1994 年 2 月，美国东南部电网遭受严重冰灾，输电线路最大覆冰厚度达 125 mm，约 200 万人电力供应中断，直接经济损失超过 30 亿美元。2013 年，英国遭遇大规模降雪天气，导致贝尔法斯特高压变电站关闭，整个贝尔法斯特市供电停止，北爱尔兰将近 9 万户家庭电力供应中断，塞拉菲尔德核电站关闭[19]。

此外，俄罗斯、瑞典、冰岛、芬兰和日本等欧洲、亚洲等多个国家都曾遭受输电线路覆冰灾害，每次输电线路覆冰灾害都给当地政府、企业、老百姓带来巨大的经济财产损失。

1.2.2 国内高压架空输电线路覆冰的危害事例

我国是世界上输电线路覆冰最为严重的国家之一，中华人民共和国成立以来，大面积输电线路覆冰在全国各地时有发生。湖南、四川、江西、湖北、云南、贵州和浙江等省都曾因冻雨、风雪等极端天气导致架空输电线路覆冰，造成线路舞动、断裂、杆塔倒塌等严重事故。

1954 年 12 月到 1955 年 1 月，湖南省长株潭电网遭受严重的覆冰灾害，线路覆冰厚度达 60～95 mm，共造成 14 条 6～35 kV 输电线路大面积断线、倒塌等事故。1957 年 1 月中旬，长株潭电网因极端冻雨天气再次遭受特大覆冰灾害，线路覆冰厚度达到 110～120 mm，导致该地区电网大面积瓦解[20]。1992 年 10 月，青海日月山山口 330 kV 输电线路覆冰，造成了严重灾害，共计倒塌 8 基[21]。1993 年 11 月，寒流袭击江汉平原，导致湖

北省荆门地区 500 kV 输电线路受到严重冻雨灾害，结冰比重达 0.9，结冰厚度达36 mm，倒塌 7 基[22]。2004 年 12 月到 2005 年 2 月，我国华中电网发生了长达三个月的大面积覆冰灾害。2014 年 12 月 21—28 日，在湖南、湖北省内，500 kV 线路共计发生覆冰闪络 34 次，输电线路结冰厚度达 80～100 mm。根据华中电网统计结果，对于 220 kV 以上输电线路，杆塔倒塌共计 41 基，2004 年 12 月 20—28 日总共跳闸 28 次，2005 年 2 月 7—20 日，共计跳闸 80 次[23]。2012 年 2 月，南方电网的云南和贵州共计 88 条输电线路出现覆冰，云南电网、广西电网和贵州电网先后启动橙色和黄色预警以及四级应急响应[24]。

2008 年，我国华东、华中、南方等多区域遭遇了罕见的持续低温、雨雪和冰冻极端天气，恶劣的气候导致我国 14 个省级电网的 570 个县发生电网事故。现南方电网管辖的五省中，只有海南省的电力设施未受影响，而现国家电网管辖的湖南、江西、湖北、四川、重庆、江苏、安徽、福建、浙江等省级电网均遭受不同程度的破坏。综合各省电网的统计结果，详细破坏情况：220 kV 输电线路杆塔倒塌 1432 基，损坏 586 基；500 kV 输电线路杆塔倒塌 678 基，损坏 295 基。杆塔倒塌与受损分省统计数据见表 1.1。220 kV 输电线路停运 343 条，占受灾省份 220 kV 线路总数的 9.38%；500 kV 输电线路停运 119 条，占受灾省份 500 kV 线路总数的 19.01%。详细输电线路停运分省统计数据见表 1.2[25—27]。

表 1.1 杆塔倒塌与受损分省统计数据

电网区域	220 kV		500 kV	
	杆塔倒塌(基)	杆塔受损(基)	杆塔倒塌(基)	杆塔受损(基)
湖南	630	167	182	82
江西	144	18	116	0
湖北	0	2	15	13
浙江	43	16	167	28
安徽	0	0	2	2
四川	2	3	1	2
重庆	0	0	0	7
福建	1	2	0	0
贵州	147	86	169	134
云南	72	78	0	2
广西	90	38	26	25
广东	303	176	0	0
合计	1432	568	678	295

需要全本请访问 www.ertongbook.com

表 1.2 输电线路停运分省统计数据

电网区域	220 kV			500 kV		
	线路总数（条）	停运总数（条）	停运率（%）	线路总数（条）	停运总数（条）	停运率（%）
湖南	249	96	38.55	35	22	62.86
江西	181	70	38.67	19	18	94.74
湖北	241	1	0.41	86	5	5.81
浙江	463	21	4.54	79	23	29.11
安徽	229	0	0	35	1	2.86
四川	251	3	1.2	36	9	25
重庆	126	1	0.79	25	3	12
福建	227	2	0.88	20	0	0
贵州	147	94	63.95	45	29	64.44
云南	164	24	14.63	27	4	14.81
广西	135	19	14.07	53	5	9.43
广东	516	12	2.33	67	0	0
合计	2929	343	9.38	527	119	19.01

1.2.3 覆冰危害具体表现形式

高压架空输电线路覆冰将导致电网发生严重事故，事故主要表现形式有杆塔倒塌、输电线路舞动、输电线路脱冰振动、绝缘子闪络。

1.2.3.1 杆塔倒塌

当输电线路覆冰后，导线负载增加，并有可能导致超过输电杆塔的设计负载；脱冰引起的导线振动以及风荷载引起的导线舞动，都有可能导致导线断裂。导线断裂会使得输电杆塔遭受不平衡张力或冲击力，杆塔构件的薄弱部位将无法忍受过负载、不平衡张力或冲击力的作用，发生屈曲，并引起杆塔倒塌。

国际上，严重的冰暴灾害往往会导致输电线路杆塔倒塌事故：1972 年 12 月，日本北海道遭受冰灾，导致输电杆塔倒塌 56 基；1998 年 1 月，加拿大魁北克地区遭受严重的冻雨灾害，高压输电杆塔倒塌 1000 多基，配电杆塔倒塌 3000 多基；2007 年 1 月，美国内布拉斯加州遭受了严重的冰灾，输电杆塔损坏 1137 基。

由于输电线路设计能力没有充分考虑极端的气候因素，我国在冰暴气候下，也发生多起杆塔倒塌事故：1984 年年初，贵州电网遭受冰暴灾害，省电网杆塔倒塌 44 基，配电网倒杆 7613 基；1992 年，青海日月山 300 kV 线路遭受严重冰暴灾害，倒塌 8 基；湖北省荆门 500 kV 线路遭受冻雨灾害，1993 年杆塔倒塌 7 基，1994 年杆塔倒塌 3 基；2004 年年底到 2005 年年初，冰暴灾害导致华中电网 200 kV 以上线路杆塔倒塌 41 基；2008 年，

我国华东、华中、南方等多地区域遭遇冰暴灾害，220 kV 输电线路杆塔倒塌1432基，500 kV 输电线路杆塔倒塌 678 基。

杆塔倒塌后，由于杆塔重建需等到气候变暖，而且重建周期较长，将给电网造成巨大损失。

1.2.3.2 输电线路舞动

输电线路覆冰后，可能形成非对称圆截面，在风荷载的作用下，输电导线可能产生频率为 0.1～3 Hz，振动幅度为导线直径 5～300 倍的自激振动，此时，导线上下翻飞，形如龙舞，业内将这种自激振动称为输电线路舞动。由于输电线路舞动通常会持续较长时间，容易导致相间闪络，破坏金具，导线断裂，甚至会导致杆塔倒塌，严重影响输电线路的安全运行[28,29]。

随着我国电网建设规模越来越大，经过易结冰地区的高压架空输电线路越来越多，因线路舞动导致的输电线路事故也越来越多。各种电压等级的输电线路，包括 500 kV、220 kV、110 kV、66 kV 等多种电压等级的输电线路，均发生过舞动事故[30]。1957 年到 2008 年，我国有观察记录的输电线路大型舞动 80 余例[31]。2000 年至 2010 年，我国有观察记录的输电线路大型舞动 740 余例[32]。1987 年、1988 年和 1990 年，姚双、双凤线均发生了舞动事故[33]，最大舞动幅度达到 10 m，其中时间最久的一次舞动时间持续了 60 个小时，造成大面积子导线断裂、相间短路跳闸、线夹销钉剪断和护线条断股。2003 年，内蒙古的永丰Ⅱ线和湖北龙斗线、斗双线均出现了大范围的舞动事故[34]，舞动峰值达到 7 m以上，舞动导致杆塔螺栓松动、塔身松弛、导线脱落等现象。2008 年，江西南乐Ⅰ线和Ⅱ线发生严重的舞动事故[35]，其中时间最久的一次舞动时间持续了 67 个小时，舞动峰值达到 8 m 以上。2009 年至 2010 年年初，河南 500 kV 输电线路发生了 3 次舞动事故[36]。2010 年，浙江衢州 2 条 500 kV 输电线路发生舞动，舞动峰值达到 10 m 以上[37]。

1.2.3.3 输电线路脱冰振动

输电线路覆冰以后，当气候转暖、风力增大或者人工除冰等因素导致覆冰脱落时，由于覆冰脱落的随机性，导致输电线路以及杆塔的受力呈现随机性，这种随机的受力将引起输电线的大幅振动和输电塔的振动，造成相间短路、输电线断裂、金具磨损、横担变形、杆塔倒塌等事故[38,39]。

输电线路脱冰振动往往与输电线路覆冰灾害一起统计，目前还没有检索到主要由脱冰振动导致的输电线路事故详细数据。

1.2.3.4 绝缘子闪络

绝缘子闪络是输电线路覆冰后的常见现象，在国内、国外经常出现。

1963 年 11 月，美国斯蒂文斯山口的 345 kV 输电线路，发生了绝缘子串覆冰，维护人员发现，在恢复送电过程中，覆冰绝缘子由微弱放电迅速发展成全面闪络。1966—1967 年，瑞士一条横跨阿尔卑斯山脉的 400 kV 输电线路，被观察到大量因绝缘子覆冰引起的刷形放电，多次出现闪络故障。1974 年，在美国田纳西峡谷地区，500 kV 输电线路发生了大面积绝缘子闪络事故。1982 年和 1986 年，加拿大安大略水电局的 500 kV 输电线路

多次发生绝缘子闪络事故[40]。

我国西北、西南、东北、华中等地区都因输电线路覆冰发生过绝缘子闪络事故。根据2003年统计数据，我国100～500 kV输电线路跳闸共计2446次，冰闪跳闸79次，占3.23%。其中，500 kV输电线路跳闸115次，冰闪跳闸13次，占11.3%。在500 kV输电线路跳闸故障中，冰闪仅位于外力破坏、雷击闪络之后而居第三位；在非计划停运中，由于冰闪的原因导致停运次数达23%，冰闪仅位于外力破坏之后而居第2位[41,42]。

1.3 输电线路防冰融冰国内外研究现状

1.3.1 输电线路覆冰与气象条件之间的关系

输电线路有5种覆冰类型：雨凇、混合凇、雾凇、雪凇和霜凇[43,44]。在这几种覆冰中，混合凇、雾凇、雪凇和霜凇因为密度不大，强度不高，对输电线路影响较小，对输电线路危害最大的是雨凇[45,46]。

输电线路覆冰，与气候因素和输电导线自身因素有关。影响输电线路覆冰的气候因素主要有湿度、温度、风速、风向、大气中过冷水滴的含量高低等；输电线自身因素主要有导线的直径、表面清洁度、电流负荷、扭转特性和电场强度等。

输电线路覆冰的实质是空气中的过冷水滴碰撞输电导线后变成冰，因此，空气中含水是输电线路覆冰的基础。衡量空气中含水量的参数是湿度，湿度的大小是影响输电线路覆冰的重要因素。而与水相关的另一个因素是过冷水滴的大小，过冷水滴直径越小，其相变潜热释放越快，过冷水滴冻结时间越短。过冷水滴的大小以及冻结时间的快慢将影响覆冰类型。

导致输电线路覆冰的最主要原因是温度。最容易引起输电线覆冰的温度范围是－5℃～0℃[47,48]；温度高于0℃，没法成冰；低于－5℃，导致输电线路覆冰的过冷却水滴将变成雪。

影响输电线路覆冰的另一个因素是风。风速是输电线表面覆冰热交换的主要因素，风速越大，输电线表面越容易失去热量，也越容易形成表面覆冰。风与输电线的夹角，将影响覆冰的形状和覆冰的类型，所检索的输电线路覆冰及融冰数学模型都要考虑风速和风向的因素[49－51]。

1.3.2 导线覆冰预测方法

电网覆冰预测可以提高覆冰灾害防治效率，降低电网覆冰灾害损失，是业内非常重要的研究方向之一。覆冰预测包括长期预测、中期预测和短期预测。长期预测是指提前一个月的输电线路冰灾预测，中期预测是提前3天的输电线路覆冰过程预测，短期预测是提前3天的输电线路覆冰厚度预测。

业内学者采用数理统计分析法研究了输电线路覆冰长期预测的基本方法，所采用的数理统计分析法包括相关系数与置信度、支持向量机(Support Vector Machine，SVM)、神经网络、模糊隶属度、重现期计算方法等[52]。应用上述研究方法，取得的主要研究成果包括：①亚洲极涡是我国南方冷空气主要来源，亚洲极涡面积越大，我国南方冬季冷空气

越强，越容易发生覆冰灾害；②西太平洋副热带高压是影响我国气候的重要暖气流，冬季西太平洋副高越强，我国气候越温暖，发生覆冰灾害的可能性越小[53,54]；③地形对冬季冻雨的形成有非常重要的影响，输电线路覆冰程度与地形结构和山脉走向相关，输电线路重灾区主要发生在我国国内东北—西南走向的迎风面[55]；④太阳黑子活动影响地球大气运动，严重覆冰灾害往往发生在太阳黑子活动的极值年或极值年前后几年；⑤厄尔尼诺和拉尼娜现象将影响大气环流，发生严重覆冰灾害的年份，冬季前都会出现厄尔尼诺或拉尼娜现象；⑥夏季干旱与冬季覆冰有正相关关系，发生严重覆冰的年份，往往在夏季干旱之后；⑦亚洲的大气环流与我国输电线路覆冰有密切关系，当亚洲大气经向环流指数大，纬向环流指数小时，我国容易发生严重覆冰灾害；⑧当太阳黑子活跃、厄尔尼诺和拉尼娜现象、旱涝、极涡、副热带高压、经向环流指数等因素中的几个同时出现时，我国东北—西南走向的迎风面地区容易发生严重覆冰灾害，这种现象被称为“日地气耦合”电网覆冰规律[56]。

输电线路覆冰中的短期预报手段有气象形势预报和数值计算预报两种。

气象形势预报技术主要影响因素有：①如果在冬季形成“乌拉尔山阻塞高压+横槽”大气环流，未来7～10天内，我国南方将有冷空气过境，将有可能发生覆冰灾害；②当蒙古冷高压南下时，我国南方可能会发生冰冻天气，导致输电线路覆冰；③亚洲极涡面积迅速增大时，将使我国大面积降温，可能会导致南方覆冰；④当南支槽波动出现的频率较高时，江南地区可能会发生长时间阴雨天气，容易引起输电线路覆冰。

中短期数值计算预报技术主要影响因素有：①当大气出现逆温层时，容易形成冻雨，导致输电线路覆冰，逆温层越厚，覆冰范围越广；②输电线路覆冰与风速相关，存在覆冰厚度增速最大的风速极值，当风速小于极值时，覆冰厚度增速与风速成正相关，当风速大于极值时，覆冰厚度增速与风速成逆相关；③覆冰与架设输电线路的地形相关，风口、迎风坡、突出山体等地形更容易覆冰。

1.3.3 防冰方法

防冰技术是指在输电线路未覆冰之前采取措施，干扰输电线路覆冰条件，防止输电线路覆冰发生的相关技术。目前，研究中的主要防冰技术有涂防冰涂料和临界电流防冰技术两种。

涂防冰涂料，是指在输电导线表面涂上一层憎水(冰)性涂料，破坏水在输电线附着的条件，但该技术目前处于研究阶段，暂时没有可用于工程应用的防冰涂料[57]。临界电流防冰，是在输电线中流过可以使输电线路不覆冰的最小电流，当输电线通过该电流时，将导致输电线产生焦耳热，所产生的焦耳热破坏结冰条件，使得导线没法覆冰[58]。陈及时[59]、刘和云[60]等学者对临界电流计算公式和计算方法进行了研究，但是由于临界电流大小受气温、气压、风速、导线型号等因素的影响，计算方法非常复杂，能耗非常高，暂时没有工程应用实例。

1.3.4 融冰方法

融冰方法是使导线升温，将冰融化使其脱落的方法。目前，研究的主要融冰方法有直流短路融冰法、交流短路融冰法、高频电流融冰法、激光融冰法、分裂导线融冰法等，而

工程应用的融冰方法主要有直流短路融冰法和交流短路融冰法。

1.3.4.1 直流短路融冰法

这种方法是将两相输电导线的一端短路，另一端加入直流电源，在直流电源作用下，输电导线流过电流，产生焦耳热，使得导线覆冰升温融化并脱落。

早在1972年，苏联采用直流融冰技术进行了500 kV输电线路的融冰[61]。2005年，AREVA公司与加拿大的魁北克水电公司合作开发了直流短路融冰装置，并将其用于745 kV输电线路融冰和315 kV输电线路融冰[62]。

2008年，我国发生大面积严重电网冰灾后，南方电网公司和国家电网公司投入了大量的人力、物力和财力进行直流融冰技术的研究，成功研制了移动式直流融冰装置和固定式直流融冰装置[63]。固定式直流融冰装置用于安装在变电站，其融冰功率大，作用范围广。移动式直流融冰装置使用灵活，但融冰功率小，作用范围小。直流融冰装置研发成功后，南方电网公司安装了多套移动式直流融冰装置和固定式直流融冰装置，用于广东、广西、云南和贵州电网的融冰工作。

1.3.4.2 交流短路融冰法

如果将直流短路融冰法的电源换成交流电源，便成为交流短路融冰法。交流短路融冰法可以使用系统电源工作，比直流短路融冰法更加方便。但是由于输电线路感抗的存在，交流短路融冰法需要提供大量的无功功率[64]。

早在20世纪50年代，苏联巴什基尔电网就安装了可大范围调节电流的融冰装置，有效实施了巴什基尔电网融冰和防冰[65]。20世纪70年代，加拿大Manitoba Hydro公司在33 kV、66 kV和115 kV等级的输电线路上安装了交流短路融冰装置[66]。1982年，美国也采用交流短路融冰技术对覆冰线路实施融冰。

自20世纪70年代以来，我国就开始采用交流短路融冰法对严重覆冰输电线路实施融冰，有效防止了部分冰灾[67]。2008年，湖南电网对多条输电线路进行了二十多次交流短路融冰，保障了所融冰线路的安全[68]。

1.3.4.3 高频电流融冰法

冰介质是有损介质，当覆冰的输电导线流过8～200 kHz的高频电流时，该高频电流将产生很强的电磁场，强电磁场穿过冰层时，导致冰层介质损耗增大，其损耗转换为热能，融化输电导线的覆冰。此外，由于导线集肤效应，在相同电流作用下，高频电流比低频电流产生的焦耳热要多。采用高频电流融冰的方法叫高频电流融冰法[69]。由于使高频电流融冰法效果较好的频率范围为20～150 kHz，这一频率强电磁场将对通信造成严重干扰[70]，并产生电磁污染，而且电源设计难度很大，因此目前还没有工程应用实例。

1.3.4.4 激光融冰法

激光具有方向性好、定向能量传输效率高的优点。当多束激光照射在覆冰输电线上时，可将能量也聚集在覆冰输电线上，多束激光的能量可以使覆冰输电线发热并将冰融化[71]。这种融冰方法被称为激光融冰法。由于激光器制造成本高，融冰损耗能量大，激

光融冰法目前难以在工程应用中推广。

1.3.4.5 分裂导线融冰法

分裂导线融冰法，是指改变同相子导线之间的连接形式，从而增加各子导线的电流，使得子导线焦耳热功率增加，以实施融冰的方法。目前，分裂导线融冰法主要有两种：分裂导线重构技术和可控分裂数导线技术。分裂导线融冰方法，目前尚处于理论和实验研究阶段，暂时没有检索到工程应用的例子。

(1) 分裂导线重构技术。

正常工作时，同相 n 分裂导线的各子导线是并联的，如果将同相各子导线的并联关系转变为串联关系进行重构，则重构导线的截面积为正常工作导线截面积的 n 分之一，重构导线的导线长度为重构前分裂导线的 n 倍，单根子导线上传输的电流变成重构前子导线电流的 n 倍。截面积减少以及长度增加，使整条重构导线的的电阻为重构前分裂导线的 n^2 倍，因此，重构分裂导线产生的焦耳热为重构前分裂导线的 n^3 倍[72]。

(2) 可控分裂数导线技术。

如果在分裂导线各子导线上接入可控的开关电路，只接入 n 分裂导线的一根子导线的开关，则接入开关的子导线电流为正常工作电流的 n 倍，焦耳热也为工作电流的 n 倍。与分裂导线重构技术相比，可控分裂数导线技术的优点是可以在线实时工作，缺点是融冰焦耳热低，且由于没有接入的子导线流过的电流为零，当一根子导线融冰时，其他子导线更容易结冰[73]。

1.3.5 除冰方法

除冰技术主要有机器人除冰、人工除冰以及除冰机器人技术。

最早的除冰方法是电力工人采用绝缘棒人工敲击覆冰线路，使得输电线路振动，导致覆冰脆性失效而脱落[74]。Polhman 等[67]提出了使用人工、猎枪或直升机等设备的 ADHOC 外力敲打除冰法，这种方法效果不好，而且不安全。1993 年，加拿大 Manitoba 水电局[75]提出一种滑轮刮铲法，即在覆冰输电线上挂一个连着牵引绳的滑轮刮铲，地面工作人员拉动牵引绳，在人工牵引下，通过移动滑轮刮铲铲除电线上的覆冰，这种方法效率比较低，用于分裂导线比较困难。

随着人工智能技术的发展，机器人技术在输电线路中的应用越来越多。目前，机器人主要用于输电线路的巡检[76]。因为除冰机器人工作环境恶劣，其功能、动力、通信等方面设计难度都比巡检机器人大很多，所以目前还没有可以在工程应用中推广的产品。2000 年，加拿大魁北克水电研究院开始研制除冰机器人[77]，可适用于各种直径的导线除冰，但没有越障能力，只能用于两线塔之间的除冰。山东电力研究院与加拿大魁北克水电研究院合作，对其除冰机器人做了技术改进，但仍不能越障。湖南大学在国家重大研究专项的资助下，与国防科技大学、武汉大学和山东大学等多家单位共同开展了除冰机器人研究，但仍然处于研发阶段，尚无可以工程应用的成果出现[78]。

1.3.6 现有防冰融冰方法存在的问题

输电线路冰暴灾害问题由来已久，也是各国必须面对的问题。如果采用提高输电线路

需要全本请访问 www.ertongbook.com