

国家自然科学基金项目资助

架空输电导线的磨损特性 及其影响行为研究

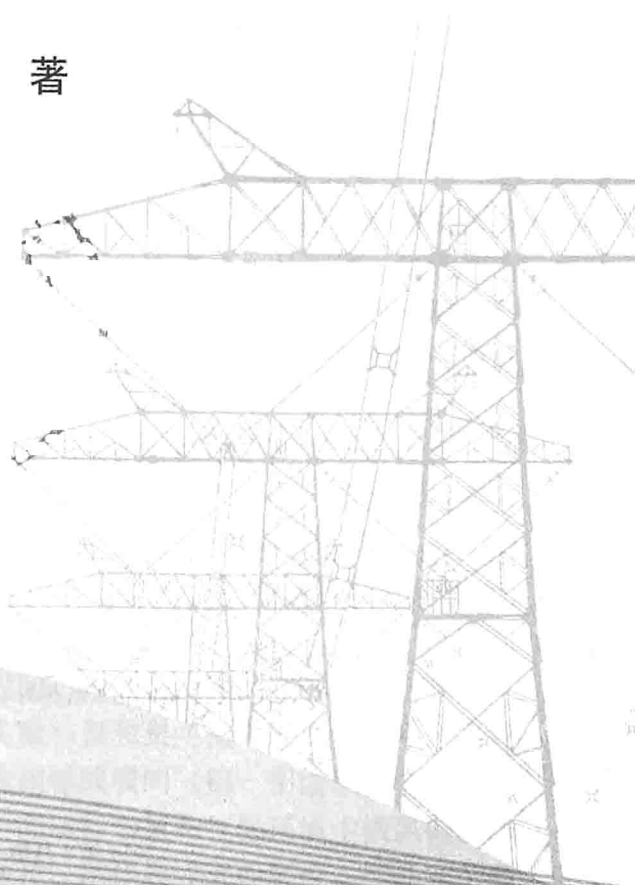
赵新泽 赵美云 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

架空输电导线的磨损特性 及其影响行为研究

赵新泽 赵美云 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以我国目前常用的架空输电导线为研究对象,通过试验和理论分析,系统研究了钢芯铝绞线在微风振动下的磨损特性,以及磨损对导线的机械、电学性能的影响行为,揭示了架空输电导线的磨损与电晕放电之间的内在联系及规律,是一本较为全面系统地研究架空输电导线的磨损及其影响行为的专著。本书的主要内容包括架空输电导线的力学特性及微风振动特点、导线于微风振动下的微动磨损试验装置与试验方法、钢芯铝绞线线股间和导线与金具间的接触力学问题、多种环境氛围和运行参数下导线的摩擦学特性、微风振动下导线微动磨损疲劳断裂特性、导线的磨损对其电晕特性的影响,最后提出了架空输电导线的摩擦学设计方法等。

本书可供从事摩擦学、表面工程、疲劳与失效等研究的科技人员和大专院校师生参考,也可供电力建设、导线金具生产领域从事产品研究、设计、制造、使用、运行与维护等方面技术与管理参考。

图书在版编目(CIP)数据

架空输电导线的磨损特性及其影响行为研究/赵新泽,赵美云著. —北京:中国电力出版社,2014.3

ISBN 978-7-5123-5354-1

I. ①架… II. ①赵…②赵… III. ①架空线路—输电导线—磨损—研究 IV. ①TM726.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第321224号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014年3月第一版 2014年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 11.25印张 269千字

定价 48.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

我国能源和用电负荷地理分布极不均衡,决定了我国在大力开发水电和火电的同时,要建设全国能源传输通道,实现长距离、大容量、大跨越的“西电东送”和“北电南送”。而架空线路是输送电能的重要载体,是保证电力系统安全运行的重要组成部分,随之而来的输电线路线损与环境问题也日益受到关切。因此在建立健全架空输电线路的同时,需要全面考虑各种环境下导线的运行情况,提高输电线路的安全性及运行寿命。

我国目前服役的架空输电导线一般以 LGJ 系列钢芯铝绞线(ACSR)为主,它由铝和钢两种线材分层同轴绞制而成。该类导线除本身制造过程中可能出现的表面划伤、油污等表面问题外,由于长期暴露于空气中,不可避免地受到自然条件(风、雨、冰雪等)和其他外界条件的影响,导致线股间会出现损伤,其中由导线振动引起的破坏占较大部分。导线的振动大致可分为高频微幅的微风振动、中频中幅的次档距振动和低频大振幅的舞动等三种形式,其中导线处于微风振动的时间约占全年时间的 30%~50%,这不仅会引起导线的微动疲劳断股、金具的疲劳损坏,而且还会引起导线线股间、导线线夹间的磨损,从而增加电晕放电造成的功率损失,其危害性非常大,因此研究微风振动所引起的导线微动磨损的机理和特点,寻找减少微动磨损的方法,是提高架空线路运行可靠性、延长其使用寿命的重要措施之一。

本课题组为了全面研究架空输电导线在微风振动下的磨损特性及其影响行为,进行了长期的理论探索与试验工作。结合钢芯铝绞线的结构特性和微风振动环境,计算了导线张力、导线内部线股张力、导线纵向内力、线与线之间的接触应力及导线与线夹间的接触应力等,并对微风振动下架空导线常见故障及影响因素,微动磨损起因、机理及相关影响因素,电晕放电原理及影响因素做了系统深入的研究。

针对架空输电导线微风振动特点,为研究导线线股间、导线与线夹间在各种运行条件下的系统磨损规律,自主研制了双股绞线微动磨损模拟实验装置和架空输电导线整线微风振动模拟试验装置。前者完成在不同模拟试验条件下导线内相邻线股间(铝—铝线股)的微动磨损试验及其疲劳损伤断裂过程分析;后者模拟导线在不同运行参数和气候环境中微风振动条件下的导线微动磨损。通过对试验过程中收集的磨损微粒、试样导线表面磨痕、微动疲劳断面的定量与定性、宏观与微观分析,结合试验条件,比较全面地分析了导线在微风振动下的磨损行为和疲劳损伤特性。

输电导线表面的粗糙度状态对构成线损的电晕损耗部分影响显著,目前的研究者均认为导线表面粗糙度主要与运行环境(气氛)、制造与安装过程中的损伤及自身特性有关,而没有考虑导线在运行过程中由于自身结构、相关力学等引起的磨损及磨损产物导致导线表面粗糙度与表面电荷分布的变化。针对这一问题,本书作者通过完成经微风振动模拟试验的导线试样电晕测试工作,证明了导线发生微动磨损时,其磨损微粒向导线表面外溢并吸附在导线

表面, 该类磨损微粒的存在对导线电晕具有一定的影响。在此基础上, 作者还研究了不同试验工况对导线电晕放电特性的影响规律, 并寻找了导线磨损量与电晕放电间的关系, 并通过导线表面磨损微粒对导线表面场强影响的仿真研究, 验证了导线表面磨损微粒的存在对其电晕特性的影响作用。

试验发现了导线在微风振动试验条件下, 电流和大气环境对导线磨损的影响大, 预张力和振动频率次之。具有酸性、盐氛的腐蚀环境对导线的磨损程度贡献显著, 表明导线的耐腐蚀性能与环境条件密切相关。在载流试验条件下 (实际运行中, 钢芯铝绞线的铝线股主要承载导电功能, 钢芯线承载力学功能), 导线内铝线股的温度较高, 材料组织变软, 内外层铝线股接触磨损区组织, 产生厚层次的塑性变形迁移, 其磨损主要是黏着磨损, 并伴有磨损微粒磨损行为; 铝线股与钢芯接触处的磨损主要是疲劳磨损和磨损微粒磨损, 且两者间均存在腐蚀磨损, 严重时表面出现明显的疲劳裂纹或龟裂现象。无电负荷的情况下, 导线内铝线股接触处主要为黏着磨损, 铝线股与钢芯接触处为疲劳磨损。对试验导线的电晕特性测试表明, 相同试验参数条件下导线振动周次越大, 全面起晕电压越低; 预张力为 20%RTS 时, 导线的起晕电压最高; 具有腐蚀大气环境下的试验导线起晕电压低于干燥条件下的起晕电压。相同试验条件下, 直流电压下的起晕电压远远高于交流高压下的起晕电压。

本书是在三峡大学赵新泽教授的主导及指导下完成的, 并得到了国家自然科学基金“典型大气条件下架空导线的磨损对其线损相关特性的影响研究 (51075235)”项目的资助。本书部分内容由赵美云博士编写。杨振兴、彭巍、汪启峰、张少庆、杨志成、劳海军、高伟、王锐锋等同学给予了大力协助, 作者在此表示衷心的感谢!

架空输电导线的磨损疲劳及其寿命预测还在进一步研究中, 同时限于水平和时间, 难免存在一些不妥之处, 敬请读者和同行不吝批评指正。

作者

2013 年 10 月

前言

第 1 章 概述	1
1.1 架空输电导线简介	1
1.2 架空输电导线力学特性	4
1.3 微动磨损的基本知识	12
1.4 架空输电导线电晕特性	14
本章小结	17
本章参考文献	18
第 2 章 架空输电导线的微动磨损试验	20
2.1 概述	20
2.2 架空输电导线微动磨损试验装置的研制	21
2.3 试验参数的标定	25
2.4 磨损分析方法	30
2.5 试验方法	32
本章小结	35
本章参考文献	36
第 3 章 架空输电导线的接触力学问题	37
3.1 接触基本问题	37
3.2 两线股间接触应力的计算	38
3.3 多层绞线间接触应力的计算	41
3.4 导线与金具间的接触问题	47
3.5 接触应力的有限元分析	51
本章小结	62
本章参考文献	63
第 4 章 架空输电导线磨损特性	65
4.1 试验因素对导线磨损量影响分析	65
4.2 微风振动模拟试验导线接触表面形貌分析	69
4.3 电载荷条件下导线磨损特性分析	94
4.4 双股铝线微动磨损特性分析	99
4.5 服役导线线股磨损表面形貌分析	107
4.6 导线磨粒分析	110
本章小结	121

本章参考文献·····	121
第 5 章 微动磨损下架空输电导线疲劳断裂特性研究·····	122
5.1 概述·····	122
5.2 微动磨损下导线铝线股疲劳断裂试验·····	123
5.3 导线铝线股断裂断口表面特征分析·····	126
本章小结·····	133
本章参考文献·····	134
第 6 章 架空输电导线磨损对电晕特性的影响·····	135
6.1 导线磨损磨粒对其表面场强的影响仿真研究·····	135
6.2 磨损导线电晕测试试验·····	141
6.3 试验导线电晕测试结果分析·····	146
6.4 导线磨损与电晕特性间的关系·····	153
本章小结·····	156
本章参考文献·····	156
第 7 章 架空输电导线的摩擦学设计·····	158
7.1 概述·····	158
7.2 架空导线摩擦学设计涉及的主要问题·····	159
7.3 导线绕制角的优化设计·····	160
7.4 导线节径比的优化设计·····	161
7.5 线夹结构的优化设计·····	164
7.6 架线施工·····	168
7.7 微风振动监测·····	170
本章小结·····	171
本章参考文献·····	171

第 1 章 概 述

1.1 架空输电导线简介

我国能源和用电负荷的地理分布极不均衡，水力资源的 68% 左右分布在西南地区，煤炭资源的 76% 左右分布在华北、西北地区，而用电负荷的 70% 左右则主要集中在东部沿海附近^[1-1]。另外我国幅员广阔，从现有电网覆盖的范围来看，南北纬度相差约 25°，东西经度相差约 35°，南北负荷季节性相差很大。以东北和华东为例，东北电网年高峰负荷发生在 11 月至 12 月，而夏季是全年负荷最低的时段；华东则正好相反，年高峰负荷一般发生在夏季，而冬季负荷不是很高^[1-2]。因此我国必须在大力开发水电和火电的同时，要建设全国能源传输通道，实现长距离、大容量、大跨越（导线穿越高山、丘陵、河流等不同的地形）的“西电东送”和“北电南送”，从而也导致我国的电力输送容量和输送距离迅速增长，大容量、远距离的输电线路陆续投入运行，输送电压等级也不断提高。而架空线路是输送电能的重要载体，是保证电力系统安全运行的重要组成部分，输电线路线损与环境问题也日益受到关切。因此在建立健全架空输电线路的同时，需要全面考虑各种环境下导线的运行情况，尽可能地减少电能在输送过程中的线损。

我国超高压输电线路的建设经历了三个阶段。第一阶段的标志是 1965~1972 年刘一天一关 330kV 线路建成送电，随后在西北地区逐步形成 330kV 联合电网，揭开了我国超高压输电的序幕。第二阶段的标志是 1981 年平武 500kV 线路投入运行，随后东北、华北、华东、华中、西南、华南地区和山东省相继建成了一批 500kV 线路，奠定了除西北以外全国其他地区的 500kV 网架格局，使我国超高压输电技术达到一个新水平。第三阶段的标志是 1989 年建成葛洲坝至上海±500kV 直流线路，实现华中、华东联网，标志着我国超高压输电进入交、直流并举的阶段。其中西北联合电网已有 330kV 线路 6000km，东北、华北、华中、华东、西南、华南、山东 7 个电网运行的交、直流 500kV 线路总长度已超过 1.2 万 km。此外，另有数十条总长度约 1 万 km 的交、直流超高压线路正在建设中。已建成的特大跨越超高压线路近 20 处，最大档距 1.8km，塔高超过 250m，均属世界少有。目前，正在建设的云贵向两广、蒙西向京津、山西向江苏输电以及二滩、伊敏等大型水、火电厂外送等多项多回路 500kV 线路，总长度已接近 1 万 km，由三峡水力发电厂送出的交、直流超高压线路约达 1 万 km^[1-3]。2010 年 7 月 8 日，向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程成功投入运行。它跨越 8 省市，线路全长 1907km。另外世界上运行电压最高的 1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程也已于 2010 年 8 月通过国家验收^[1-4]。

目前电力传输都以架空线路为主，我国的架空输电导线主要采用 LGJ 系列钢芯铝绞线 (ACSR)，这类导线的应用历史已超过 100 年。随着电力工业的迅速发展，除 ACSR 外，钢

芯铝合金绞线、碳纤维复合芯导线、高导电耐热铝合金线、耐热铝合金铝包钢绞线、全铝合金导线、自消振（阻尼）导线等也获得了广泛应用。

1.1.1 钢芯铝绞线 (ACSR)

钢芯铝绞线由冷拉铝线和镀锌钢线组成，以镀锌钢线为中心，钢芯和冷拉铝线分层后均匀、紧密地同轴绞制而成。每层绞线方向相反，最外层绞线的绞制方向为右向。绞成后的钢芯线股自然排列，钢芯切断后，钢芯易于复位，铝线股同样如此。钢芯铝绞线导线的截面如图 1.1 所示。铝线具有相对较好的导线性能，但是其机械强度较小，而镀锌钢线具有很高的机械强度，但其导电性能差。为了充分利用铝和钢两种材料的优点以补其不足，将其结合起来制成钢芯铝绞线。

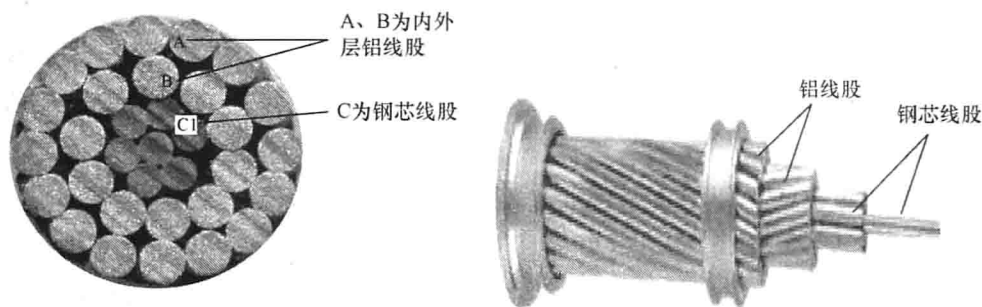


图 1.1 钢芯铝绞线

规格参数是导线选择的依据，钢芯铝绞线的主要参数有标称截面积铝/钢 (mm^2)、钢芯线的根数/直径 (mm)、铝绞线的根数/直径 (mm)、外径 (mm)、直流电阻 (Ω/km)、计算拉断力 (N)、计算质量 (kg/km)、连续允许 (70°C) 和短时允许 (90°C) 载流量 (A) 等。如在选择 35kV 交流架空输电导线时，一般使用 LGJ150/25 型钢芯铝绞线，该型号导线的标称截面积铝/钢分别为 150mm^2 和 25mm^2 ，钢芯线的根数/直径为 7/2.1mm，铝绞线的根数/直径为 26/2.7mm，外径为 17.1mm，计算拉断力为 54 110N，计算质量为 601kg/km。

钢芯铝绞线具有较高的机械强度，它所承受的机械应力是由钢芯线和铝线共同分担的，并且交流电流的集肤效应可以使钢芯线中通过的电流几乎为零，电流基本上是由铝线传导的。因此，钢芯铝绞线的导电性能良好，且具有足够的机械强度、抗拉强度，同时还具有结构简单、架设与维护方便、线路造价低、传输容量大、便于跨越江河和山谷等特殊地理条件的铺设、适用于大档距架空配电线路等优点，广泛应用于各种电压等级的架空输配电线路中。

1.1.2 耐热铝合金导线 (TACSR)

耐热铝合金导线是用耐热铝合金圆线和镀锌钢线绞合而成的，与钢芯铝绞线采用相同的绞制工艺。但为了提高铝绞线的耐热效果，原铝线用耐热铝合金线取代。日本开发出在铝中添加 0.1% 左右锆的耐热铝合金导线，并于 20 世纪 60 年代初开始在输电线路中实际应用，其他国家也相继开发了不同类型的耐热铝合金导线。钢芯耐热铝合金导线为其中一种，它连续运行温度及短时允许温度比常规钢芯铝绞线要提高 60°C ，分别为 150°C 及 180°C ，因此大大提高了输电能力。目前，耐热铝合金导线的生产主要采用连铸连轧技术。

耐热铝合金导线的结构参数表示方法与普通钢芯铝绞线相同，但其连续允许载流量大约为普通钢芯铝绞线的 1.6 倍，短时允许载流量大约为普通钢芯铝绞线的 1.35 倍。这种导线

比较适用于旧线路增容改造或新建大容量输电线路^[1-6]。

1.1.3 碳纤维复合芯导线 (JRLX/T)

碳纤维复合芯导线是一种节能型增容导线，其加强芯由特高强度碳纤维合成的芯棒替代传统的钢芯和钢绞线，外层铝采用定形铝绞合而成，如图 1.2 所示。在相同导体截面积的情况下，相对于传统钢芯铝绞线，碳纤维复合芯导线是能输送更多电能的新型导线。

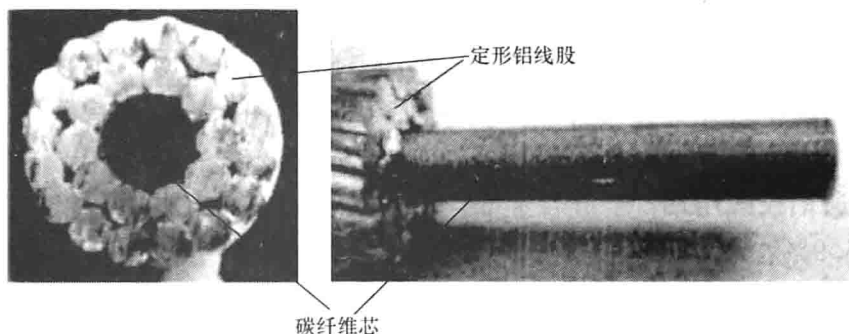


图 1.2 碳纤维复合芯导线

碳纤维复合芯导线具有如下特点：①强度高。一般钢丝的抗拉强度为 1240MPa，高强钢丝为 1410MPa，而碳纤维复合导线采用碳纤维和玻璃纤维混合芯棒，其抗拉强度可达到 2399MPa，分别为前两者的 1.93 倍和 1.7 倍。②电导率高，载流量大。由于碳纤维复合芯导线不存在钢丝材料引起的磁损和热效应，而且在输送相同负荷的条件下，具有更低的运行温度，因此可以减少输电损失约 6%。相同直径（如为 28.14mm 时）碳纤维复合芯导线的铝材截面积为常规钢芯铝绞线的 1.29 倍，可以提高载流量 29%，在 180℃ 条件下运行时，其载流量能达到常规导线的两倍。③线膨胀系数小，弛度小。碳纤维复合芯导线与钢芯铝绞线相比，具有显著的低弛度特性，在相同的实验条件下，温度从 26℃ 上升到 183℃ 时，常规钢芯铝绞线的弛度从 236mm 增加到 1422mm，提高了 5 倍，而碳纤维复合芯导线的弛度仅从 198mm 增加到 312mm，提高 0.57 倍。碳纤维复合芯导线弛度的变化量仅为常规钢芯铝绞线的 9.6%。在高温下，弧垂不到钢芯铝绞线的 1/10，能有效减少架空线路的绝缘空间走廊，提高了导线运行的安全性和可靠性。④质量轻。碳纤维复合芯材料的比重约为钢的 1/4，在相同的外径下，碳纤维复合芯导线的铝截面积为常规钢芯铝绞线的 1.29 倍，碳纤维复合芯导线的计算质量约为常规钢芯铝绞线的 60%~80%，显示了碳纤维复合芯导线质量轻的优点。常规钢芯铝绞线（以 LGJ240/55 为例）计算质量为 1.108kg/m（其中铝材部分为 0.651kg/m，钢芯部分为 0.439kg/m），而碳纤维复合芯导线（以 Linnet 431kcmil 为例）为 0.653kg/m（其中复合材料芯仅为 0.051kg/m）。⑤耐腐蚀，使用寿命长。碳纤维复合材料与环境亲和，而且又避免了导体在通电时铝线与镀锌钢线之间的电化腐蚀问题，较好地解决铝导线长期运行的老化问题，而且能使用常规的技术和设备进行安装。⑥该导线在加强芯的外围采用退火铝线绞合的结构，使得它具有自阻尼特性，从而可以不需要防振锤和其他减振装置即可实现线路防振，但该类导线自身及相应线路金具等附件成本较高。

1.1.4 其他架空输电导线

1. 全铝合金绞线 (AAAC)

这种导线全部由铝-镁-硅合金（又称为电工合金）单线绞合而成，这种合金单线具有较

高的机械强度和电导率。其电导率不小于 52.5%IACS，抗拉强度为 300~340MPa。

2. 5005 型导线

这种导线中的单线由含 1% 镁的铝镁合金制成，其抗拉强度大约为 250MPa，电导率不小于 53.5%IACS。与全铝合金绞线相比，其强度和电导率的组合不十分理想。因此，这种 5005 型导线极少使用。

3. 合金芯加强铝绞线 (ACAR)

该导线将普通镀锌钢芯线用合金芯替代，虽然其强度比同截面积的全铝合金绞线低，但电导率较高^[1-7]。

4. 钢芯铝合金绞线

该导线将普通铝绞线用铝-镁-硅合金取代。与钢芯铝绞线相比，铝合金的载流量一般为铝的 94.6%~95.9%，两者很接近；钢芯铝合金绞线的电能损耗为钢芯铝绞线的 1.18~1.28 倍；其强度则比后者高出 30% 以上；弧垂特性（拉断力与单位长度之比）为后者的 1.3~1.4 倍。由于钢芯铝合金绞线的这些优点以及积累的运行经验，国际电工委员会从 20 世纪 50 年代起就将其作为推荐采用的架空用导线之一。

5. 铝包钢线

铝包钢线是薄层纯铝同心地包覆在高强度钢线上的一种双金属导线。由于铝的电导率高、耐蚀性好、密度低，而钢线强度高，将两种材料的优良性能完美地结合在一起，能充分发挥它们各自的特长，因而铝包钢线是大跨越导线中一种极为理想的导线^[1-8]。

1.2 架空输电导线力学特性

1.2.1 导线张力分析

导线张力是导线与线夹及导线内线股间产生磨损的前提条件，对导线的磨损特性具有重大影响。

1. 导线张力计算

考虑架空输电线路的档距比架空导线的截面积尺寸大很多，即整档架空导线的刚性对其

悬挂空间曲线形状的影响很小。计算导线任意点的张力时，可假设：①架空导线是没有刚性的柔性锁链，即架空导线只承受张力而不承受力矩；②作用在架空导线上的载荷沿其线长均匀分布。根据这两个假设，悬挂在两基塔间的架空导线呈悬链线形状，因此，可以用悬链线方程来计算导线任意点的张力。计算时一般不考虑导线覆冰和风载。

图 1.3 所示为等高悬点架空导线的悬挂曲线及坐标定义。由于对称性，等高悬点架空导线的弧垂最低点位于档距中央，将坐标原点取在该点， x 轴取水平方向， y 轴竖直向上。从

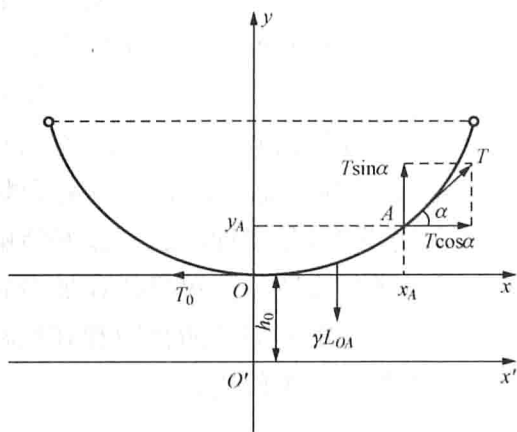


图 1.3 等高悬点架空导线的悬挂曲线及坐标定义

导线上任取一点 A, 以最低点 O 到 A 点的一段导线 OA 做受力分析。

假设导线 OA 在最低点 O 处, 受到水平方向的张力为 T_0 , 在 A 点有沿切线方向的张力 T , 导线质量为均匀分布时, 整根导线的质量等于计算质量 q 与导线长度 L 的乘积, 即 qL 。这三个力使导线处于平衡状态。

将 A 点所受张力 T (T 与水平方向的夹角为 α) 分解成垂直分量和水平分量, 则有

$$T \sin \alpha = q_0 L \quad (1-1)$$

$$T \cos \alpha = T_0 \quad (1-2)$$

文献 [1-9], 推导出了等高悬点架空线的悬链线方程、弧垂和任意点张力的计算公式, 分别为式 (1-3) ~ 式 (1-6)。

$$y = h_0 \operatorname{ch} \frac{x}{h_0} - h_0 \quad (1-3)$$

$$f = h_0 \operatorname{ch} \frac{l}{2h_0} - h_0 \quad (1-4)$$

$$T = q_0 y = T_0 \operatorname{ch} \frac{x}{h_0} \quad (1-5)$$

$$h_0 = \frac{T_0}{q_0} \quad (1-6)$$

式中 q_0 ——导线单位长度的质量, kg/m;

T_0 ——导线在最低点所受的水平张力, N;

f ——导线的弧垂, m;

l ——导线档距, m。

由式 (1-3) ~ 式 (1-6) 可知, 悬链线上任意点的张力等于导线单位长度的质量 q_0 乘以该点的纵坐标 y , 即导线任意点的张力对应于一段导线的质量。在已知导线档距和弧垂的情况下, 就可以求出最低点的水平张力 T_0 , 从而进一步求得导线任意点的张力 T 。

2. 导线内线股张力计算

钢芯铝绞线在正常服役过程中, 其张力 T 由钢芯线和铝绞线共同承担。导线中各线股所受张力与导线所受的外载荷、线股的截面积和弹性模量有关, 其所受张力的计算公式分别为^[1-10]

$$T_s = \frac{E_s A_s}{E_s A_s + E_a A_a} \times T \quad (1-7)$$

$$T_a = \frac{E_a A_a}{E_s A_s + E_a A_a} \times T \quad (1-8)$$

式中 T ——导线所受张力, N;

T_s ——钢芯所受张力, N;

T_a ——铝股所受张力, N;

E_s ——钢芯弹性模量, MPa;

E_a ——铝股弹性模量, MPa;

A_s ——钢芯截面积, mm^2 ;

A_a ——铝股截面积, mm^2 。

理想情况下, 同一层中每根股线的受力相同, 因而各层线股沿导线轴向的张力可按式

(1-9) 和式 (1-10) 计算。

钢芯层:

$$T_i = \frac{n_i}{n_s} \times T_s \quad (1-9)$$

铝线层:

$$T_i = \frac{n_i}{n_a} \times T_a \quad (1-10)$$

式中 T_i ——第 i 层线股的张力 ($i=1, 2, \dots$), N;

n_i ——第 i 层线股的数量;

n_s ——钢线的总数量;

n_a ——铝线的总数量。

3. 线股纵向内力计算

由于钢线和铝线的弹性模量不同, 在受到张力 T 作用时, 两者所产生的应变并不相等, 但由于铝股线紧密绞合在钢芯上, 所以可认为钢芯线与铝绞线的伸长量相等, 即钢线和铝线部分的应变相等, 即

$$V_i = V_0 \quad (1-11)$$

式中 V_i ——第 i 层的纵向变形 ($i=1, 2, \dots, n$, n 为绞线层数);

V_0 ——导线中心线的纵向变形。

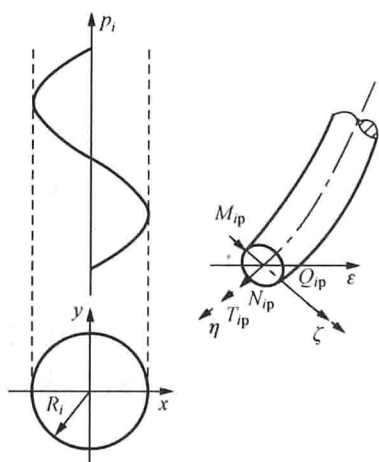


图 1.4 线股在纵向力作用下的内力分析

假设各绞线股沿导线轴线方向的纵向力为 P_i , 在其作用下横截面上的内力分析如图 1.4 所示。

设第 i 层线股的螺旋升角为 α_i , 根据几何关系和前面的假设, 线股上的内力可以按下列公式计算^[1-11]:

$$N_{ip} = p_i \sin \alpha_i \quad (1-12)$$

$$Q_{ip} = p_i \cos \alpha_i \quad (1-13)$$

$$M_{ip} = -p_i R_i \sin \alpha_i \quad (1-14)$$

$$T_{ip} = p_i R_i \cos \alpha_i \quad (1-15)$$

式中 N_{ip} ——轴向力, N;

Q_{ip} ——剪切力, N;

M_{ip} ——弯矩, N·m;

T_{ip} ——扭矩, N·m。

1.2.2 导线的微风振动

架空输电导线工作时, 由于风的作用, 导线时刻处于振动状态。根据频率和振幅的不同, 导线的振动大致可分为三种: 高频微幅的微风振动、中频中幅的次档距振动和低频大振幅的舞动。三种振动都会引起导线材料疲劳, 最后导致断股、断线事故, 破坏线路的正常安全运行。通常导线处于微风振动的时间占全年时间的 30%~50%^[1-12], 本书重点研究导线的微风振动及微风振动下的磨损特性。

1. 导线微风振动原因

架空输电导线受到垂直于导线轴线方向微风 (1~3 级) 吹拂时, 微风在导线的背风面上部或下部产生上下交替的“旋涡” (称为卡门旋涡), 因而对导线产生上下交替的冲击力。

当“旋涡”位于导线的右下侧时，导线受到向上的冲击力，这时导线将向上移动。随着导线的向上移动，“旋涡”上方的气压减小，“旋涡”将以更快的速度向上移动，又使导线受到向下的冲击力，如图 1.5 所示。在此交替冲击力的作用下，导线将振动起来并将振动沿导线向远处传播。导线受到冲击力作用的频率，就是“旋涡”交替出现的频率，一般它与风速成正比，并与导线的直径有关。

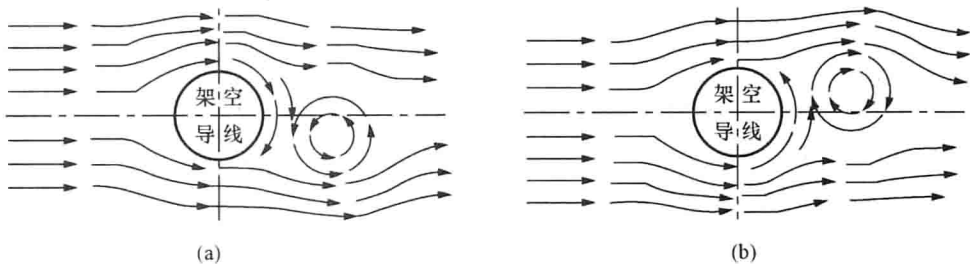


图 1.5 导线的卡门涡旋效应示意图

(a) 导线受力向上的情况；(b) 导线受力向下的情况

导线微风振动时振幅小，一般不超过导线直径的 2~3 倍；频率高，通常为 3~120Hz；持续时间长，一般为数小时，在开阔地带和风速均匀稳定的情况下，振动时间将更长^[1-12]。

2. 导线微风振动的特征

(1) 导线振动的振型。导线的振动是沿整档导线呈驻波分布的，即导线离开平衡位置的位移大小，无论在时间上还是沿档距长度上都是按正弦规律变化的。同时在同一频率下，波腹点（最大振幅）及波节（即半波长的整数倍）在导线上的位置恒定不变，如图 1.6 所示。导线任一点离开其原始平衡位置的位移可表示为

$$Y = A \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin 2\pi f_c t \tag{1-16}$$

式中 Y ——导线任一点离开其原始平衡位置的位移，mm；

A ——导线振动波腹点的最大振幅，mm；

x ——自振动点至导线任一点的距离，m；

f_c ——振动的频率，Hz；

t ——计算时间，s。

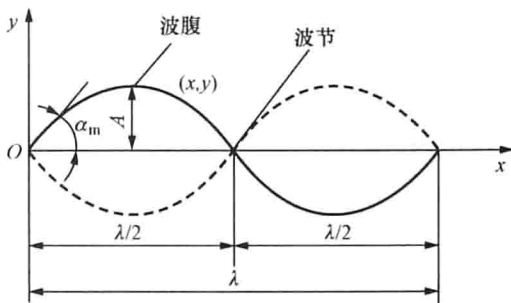


图 1.6 导线振动的波形

(2) 导线振幅。导线振动呈“驻波”分布，其振动时，振幅的绝对值与波长有关，从测量和观测结果可知，导线微风振动的振幅一般不超过几厘米，并且是低频振动，在最大波长时振幅才达到最大值。

(3) 导线风振频率^{[1-14],[1-15]}。

1) 风的冲击频率 f_w 。该频率与风速及导线直径有关，经验计算公式为

$$f_w = k(v/d)$$

式中 f_w ——风的冲击频率，Hz；

v ——垂直于导线的风速，m/s；

d ——导线直径，mm；

k ——系数，与雷诺数有关， $k=200$ 。

2) 导线的固有频率 f_c 。将导线看成是两端固定的弦线振动形式, 故导线的固有频率可以按式 (1-17) 计算, 即

$$f_c = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (1-17)$$

式中 f_c ——导线的固有频率, Hz;

n ——档距内振动半波数, 为正整数;

L ——档距内导线长度, m;

T ——导线水平张力, N;

m ——导线单位质量, kg/m;

λ ——导线振动波长, m。

当 $f_w = f_c$ 时, 可求出波长 λ 为

$$\lambda = \frac{d}{200v} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (1-18)$$

此外, 当冲击频率等于导线固有频率时, 导线背风侧的旋涡出现频率也为 f_c , 且 f_w 有 $\pm 20\%$ 变化时, 导线振动频率不会改变, 这种现象称为锁定效应, 也叫同步效应。

3) 考虑导线刚度时的固有频率。导线并非理想的柔线, 因此刚度会影响其振动频率, 假设刚度为 EI , 张力为 T , 则考虑其刚度时振动的固有频率为

$$\omega_n = \frac{n\pi}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \sqrt{1 + \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2 T}} \quad (1-19)$$

式中 n ——阶次, $n=1, 2, \dots$ 。

对应于主模态的位移为

$$y_n = \sin \frac{n\pi}{L} x (A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t) \quad (1-20)$$

各阶主模态叠加得出的有刚度无阻尼导线的位移为

$$y_n = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi}{L} x (A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t) \quad (1-21)$$

A_n 和 B_n 由初始位置和初始速度确定。

(4) 导线的振动角。在节点处导线对中心平衡位置的位移角度称为振动角。振动角由节点处振动波的斜率来确定。同时振动角的大小随着振幅的变化而变化, 振动角最大时, 振幅也达到最大。图 1.6 中 α_m 为波节点最大振动角。在一定振动频率下, 振动波在波节点只有角位移, 且在导线上的位置不变。由于档距两端的悬垂线夹对导线有位置约束作用, 导线两端的悬挂点成为振动波的节点。夹持区导线的角位移会使内外层导线接触面间产生微小相对位移或趋势, 在拉伸、弯曲和扭转等多种应力作用下, 该区域很容易出现磨损, 导致断股现象。

波节点最大振动角为

$$\alpha_m = 60 \tan^{-1} \left(\frac{2\pi A}{\lambda} \right) \quad (1-22)$$

一般说来, 测量导线振动的严重程度或校验防振装置的效果, 可用最大振幅来表示, 但从振动对导线的破坏性方面看, 用导线悬挂点 (波节点) 处振动角的大小来表示, 则更为直观。实际上振动角的范围在 $30^\circ \sim 50^\circ$, 在这样大的振动角下, 振动不需要很长时间便会造成

导线的疲劳破坏。因此,目前世界上的许多国家都规定,导线紧好后,必须当天就将防振装置安装好。防振保护的要求是:在一般线路上,振动角的大小不能超过 10° ;在导线应力较高或跨越等重要线路上,振动角不宜大于 5° 。这是设计防振措施时应达到的标准^[1-15]。

3. 影响导线振动的因素

影响导线振动的因素主要有风速、风向、导线的直径与档距、悬点高度、导线应力以及地形、地物等。

(1) 风的影响。引起导线微风振动的基本因素是均匀稳定的微风。因为一方面导线振动的产生和维持需要一定的能量(克服空气阻力、导线股线间的摩擦力等所需的最小能量),而这些能量需由气流旋涡对导线的冲击能量转化而来(一般产生导线振动的最小风速为 $0.5\sim 0.8\text{m/s}$,风速再小就不会发生振动);另一方面,要维持导线的持续振动,则其振动频率必须相对稳定,即要求风速应具有一定的均匀性,如果风速不规则地大幅度变化,则导线不可能形成持续的振动,甚至不发生振动。影响风速均匀性的因素有风速的大小、导线悬挂高度、档距、风向和地貌等。

当风速较大时,由于风(空气流)和地面摩擦加剧,地面以上一定高度范围内的风速均匀性遭到破坏。如果档距增大,为保证导线对地距离,则导线悬挂点必然增高。离地面越高,风速受地貌的影响越小,均匀性越好。

综上所述,一定条件下的架空导线只有在适当的风速范围,才能产生持续的微风振动。例如,当风速小于 0.5m/s 时,虽然可形成均匀稳定的气流,但它给予导线的能量太小而不足以使导线振动,能够使导线振动的最小风速称为下限风速;保证导线产生振动的最大风速称为上限风速,其值约 5m/s 左右。

同时,引起导线的振动还与风向有关。在平原开阔地区的观察结果表明^[1-16]:当风向和线路方向成 $45^\circ\sim 90^\circ$ 夹角时,导线易产生稳定振动;在 $30^\circ\sim 45^\circ$ 时,振动的稳定性较小;夹角小于 20° 时,则很少出现振动。风向影响着导线的振动是否稳定。

(2) 导线的直径和档距的影响。由式(1-18)可知,振动波的波长和导线直径有关。另一方面,在振动过程中,档距 L 中振动波的半波数 n 应为整数,即 $n=2L/\lambda$,由此可得

$$n = 400Lv\sqrt{\frac{m}{T}} = \frac{L}{d} \times 400v\sqrt{\frac{g_1}{9.8\sigma}} \quad (1-23)$$

式中 σ ——导线的应力,MPa;

g_1 ——导线的自重比载, $\text{N}/(\text{m}\cdot\text{mm}^2)$ 。

由式(1-23)可知,档距越大、导线直径越小,档距中形成完整半波数的机会越多,也就是导线产生共振的机会越多,导线共振程度也越严重。实际观测证实,线路档距在 120m 以上时,导线振动就多些;线路在跨越河流、山谷等高杆塔、大档距的地方,可以观测到较强烈的振动;线路在通过平原、沼地、漫岗、横跨河流和平坦的风道时,也易产生振动;线路走向和全年主导风向垂直或夹角大于 45° 时,有较强的振动。

(3) 导线张力对振动的影响。导线的张力是影响导线振动强度的关键因素,且对导线振动的频带宽度有直接影响。由式(1-17)可知,导线的固有频率与导线的张力成正比,静态张力越大,振动的频带宽度越宽,越容易产生振动。另一方面,导线长期受振动脉动力的作用,这相当于一个动态应力叠加在由导线静张力产生的静态应力上,而导线的最大允许应力是一定的。因此可见,静态应力越大,振动越厉害;动态应力越大,对线路的危害越严

重。而且,随着静态应力的增大,导线本身对振动的阻尼作用也显著降低。这更加重了振动的强度,更易使导线材料疲劳,引起断股、断线事故。特别是,在导线的悬挂点处总是波节点,而且此点的静态应力也最大。因此,最易使导线振动的可能气象条件下的导线最大允许应力应有所限定,一般用年平均运行应力作为导线的可能控制应力。

4. 导线振动的危害^{[1-17]~[1-18]}

架空输电导线振动除对线路装备、电气等直接影响外,从摩擦学角度分析,导线振动存在 3 个方面危害。

(1) 加速线路疲劳断裂。目前研究认为,导线的微风振动磨损会造成微动疲劳,促使微裂纹的形成和扩展,加快了线路的疲劳断裂。导线断裂处除了有导线的塑性变形外,还存在明显的磨损痕迹,如图 1.7 所示。有文献表明,导线线股的疲劳断裂不同于材料一般的疲劳断裂,线股间的磨损起了非常重要的作用。

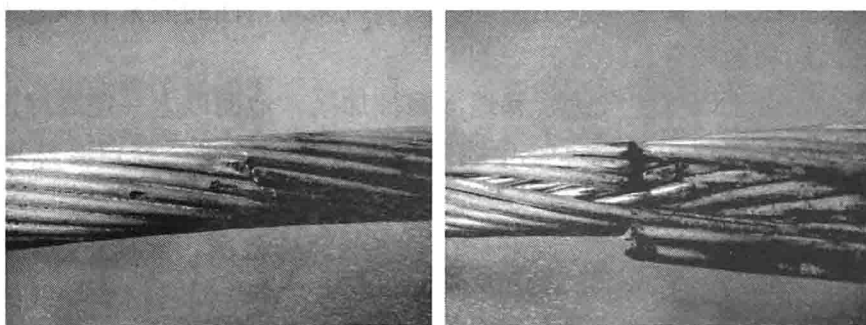


图 1.7 导线线股疲劳断裂的外观形貌

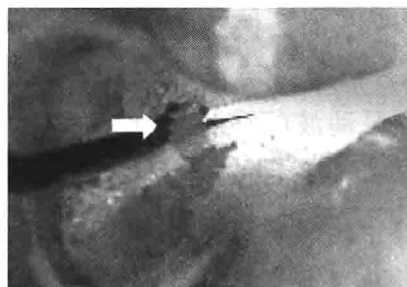


图 1.8 间隔棒夹具内侧的磨损痕迹

(2) 加速线路金具的磨损。微风振动会引起间隔棒等线路金具的接触处微动损伤,与导线内股线间的磨损相比,外层线股与夹具的磨损更为严重,图 1.8 所示为间隔棒夹具内侧的磨损痕迹,这主要是由铝线与夹具内侧接触面间的微动引起的。此外微风振动磨损必然会引起材料表面的损伤,加上气候条件的影响,会加剧夹具的腐蚀。

(3) 增加线路功率损耗。高压输电中存在电晕放电现象,且电压越高,电晕现象越严重。图 1.9 所示为不同电压下导线电晕放电产生的光子数,光子数越多,电学现象越明显。电晕产生的线损是不容忽视的,对于由一条 110kV 电力线路和一座 110kV 变电站组成的电力系统,如有 50 个地方产生电晕放电,那么这个电力系统所损耗的功率就有 11~55kW,其电能损耗不亚于一台 20 000kVA 的电力变压器的空载损耗。对于远距离输电线路,其电晕能量损耗在总线损中的地位尤其重要。有关资料表明,三相 500kV 输电线路的电晕损耗约为 2~8kW/km,在潮湿的气候条件下,损耗还将增大 20~30 倍,可见长距离输电线路一年的电晕损耗是惊人的^[1-19]。据不完全统计,全国每年因电晕损失的电能达到了 20.5 亿 kWh^[1-21]。实践证明,影响输电线路电晕放电的主要因素有^{[1-20],[1-21]}: ①输电线路本身特性,如电压等级、导线直径、输电线路导线的排列方式、相间距离、对地高度等; ②导线表面状况以及外部环境的影响,如导线表面光洁度、污秽程度、湿度等; ③导线磨损的影响^{[1-22]~[1-27]},在风载等的作用