

# 架空输电导线覆冰及舞动在线监测技术综述

宁妍<sup>1,2</sup>, 黄琦<sup>1,2</sup>, 张昌华<sup>1,2</sup>, 曹永兴<sup>1,3</sup>

(1. 电力系统与广域测量与控制四川省重点实验室, 四川 成都 610054;

2. 电子科技大学电力自动化工程学院, 四川 成都 610054; 3. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:**近年来, 架空输电线路的覆冰和舞动在线监测技术取得了长足的发展。介绍导线覆冰舞动造成的危害、覆冰舞动的产生机理和监测方式以及导线覆冰舞动在线监测技术国内外的应用现状和发展趋势; 重点介绍了光纤传感器在输电导线覆冰舞动监测技术应用中的优越性。

**关键词:**覆冰; 舞动; 输电导线; 在线监测; 光纤传感器

**Abstract:** In recent years, the monitoring techniques on icing and galloping for overhead transmission lines have been progressed actively. The mechanisms of icing and galloping and their possible harms to the real transmission lines are described. The applications status and the development trend of various online monitoring techniques for icing and galloping in transmission lines are also briefly summarized. The superior application prospects of fiber optical sensors are particularly presented.

**Key words:** icing; galloping; transmission lines; online monitoring; fiber optical sensor

**中图分类号:** TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0067-04

## 0 前言

架空输电导线覆冰是指冷的雨滴或降雪落到低于冰点 ( $0^{\circ}\text{C}$ ) 导线上凝结成覆冰的现象。导线覆冰做为特殊的气象条件, 给架空线路的安全运行造成严重影响。由于覆冰荷载过重, 造成冰闪跳闸、导线舞动和倒塔断线等事故频繁, 直接影响电网的正常运行。架空输电导线舞动是一种低频 ( $0.1\sim 3\text{ Hz}$ )、大振幅 ( $>10\text{ m}$ ) 的振动现象, 且舞动波为驻波, 舞动时全档架空线做大幅度的波浪式的震荡, 并兼有摆动。导线舞动也是威胁电网安全运行的重要因素。导线舞动会发生诸如: 导线电弧烧伤、金具损坏、导线断股、断线、倒塔等事故。2008年初, 全国电力系统因雪灾造成的直接经济损失为 400 亿元, 占全国雪灾造成损失的 22.3%。其中, 由于覆冰舞动造成输、变电设备损害, 是这次电网受灾比较严重的重要原因之一。此次电网雪灾引起了人们对输电导线覆冰舞动在线监测技术的重视和投入。

## 1 输电导线覆冰在线监测技术

### 1.1 导线覆冰监测技术

输电导线覆冰在线监测系统是线路在线监测技术的重要组成部分之一。目前线路覆冰的发现主要是依靠人工巡检, 在高压线路分布的区域地形复杂、环境恶劣, 给巡检工作带来很大困难, 覆冰在线监测系统克服了人工巡检带来的危险及困难, 大大节省了人力、财力。它取代了造价高、维护困难的观冰站; 能准确、详实的记录现场覆冰过程的相关参数信息, 为线路设计、防冰改造提供真实的数据信息参考; 对冰害及时预警, 提高覆冰区电网运行的安全性。从覆冰监测原理及分析方法来说, 可以分为图像法<sup>[1]</sup>、称重法<sup>[1]</sup>、导线倾角-弧垂法<sup>[2~3]</sup>, 如表 1 所示。

从表 1 所见, 目前应用较广泛的是称重法。随着光纤传感器 (FOS fiber optical sensor) 技术的不断发展, 光纤传感器在测量导线应力方面的优势不断体现出来。光纤传感器与以电测量原理为基础的传感器有本质区别, 它是一种用光作为敏感信息载体, 用光纤作为传递敏感信息媒质的新型传感器。因此, 光纤传感器具有很好的电绝缘性、很强的抗电磁干扰能力和较高的灵敏度; 可实现不带电的全光型探头; 便于与计算机和光纤传输系统相连实现对被测信号的远距离监控。光纤传感器很适合在输电网的高压、强电磁干扰、强腐蚀等恶劣环境下工作, 且较其他方法而言更能保障测量数据的精确度及监测系统工作的稳

表 1 输电线覆冰在线监测方法分类

分类依据	简介
机理	从杆塔视频装置中采集图片,利用导线固有几何尺寸,计算出覆冰面积,再换算到等效的覆冰厚度。
图像法	优点 该方法简单易行,能直观地观察气候环境恶劣地区的覆冰情况。
	缺点 摄像头只能观测近处覆冰状况,采集信息量有限,在积雪较厚的气候条件下,摄像头有可能被冰雪覆盖,致使整个监测系统瘫痪,并且现场视频只能固定若干点,无法自由控制。
称重法	机理 将拉力传感器替换球头挂环,测量在一个垂直档距内导线的质量,通过排除法,最终得出覆冰质量,再通过米顿换算为等值覆冰厚度。
	优点 这种方法直接、计算简便、相对较可靠;充分掌握沿线气象条件;可以全面收集和长期积累气象资料。
倾角-弧垂法	缺点 国内各厂家生产的覆冰在线监测系统装置,由于没有统一的设计、制造和试验标准,导致运行的稳定性和测量精度有较大的差异。
	机理 将采集到导线倾角、弧垂等参数,结合输电线路状态方程、线路参数和气象环境参数,计算导线的覆冰重量和覆冰平均厚度等参数。
	优点 可应用输电导线状态方程简化不规则计算。
	缺点 这种方案计算出的覆冰厚度是档内平均值,无法反应覆冰具体分布情况,并且在不均匀覆冰情况下,使用输电线路状态方程计算,误差较大。

定性。

### 1.2 导线覆冰在线监测应用情况

1997年,日本科学家通过使用光纤传感器测量导线应变的方法监测导线覆冰情况。在 30 km 的输电线上安装了一套 10 个 FBG (in-fiber bragg grating 光纤布拉格光栅)传感器的复用 FBG 系统,通过附着在线上金属盘的应变来体现负载变化,从而测得导线覆冰重量<sup>[4]</sup>。2005 年底,乌克兰国家电力公司安装了 8 套覆冰在线监控系统,通过监测导线重量变化反应导线覆冰情况。在中国,山西、湖南、湖北、广东等地区已部分建成了输电线路覆冰在线监测系统。2006 年 2 月,在山西省忻州重覆冰区,安装了覆冰在线监控系统,该系统通过测量导线荷载变化监测覆冰情况,截至 2007 年 3 月,该系统成功监测了 3 次导线覆冰。湖南省电网公司在 14 个地区安装了 68 个覆冰监测点,初步构建了湖南电网输电线路覆冰在线监测网络。该系统通过安装于杆塔上的传感器采集数据,监测冰情;湖北省电网公司采用高性能摄像机拍摄覆冰现场图像监测导线覆冰情况。在 2008 年冰害的预警、监测中导线覆冰在线监测系统发挥了重要作用。2009 年初,广东电网公司,应用称重法原理结合摄像机图像采集技术,在韶关坪石和清远连州地区建立了导线覆冰在线监测系统网。南方电网公司分别在贵阳局、柳州局和梧州局所辖的易覆冰区域线路上安装了 5 套监测终端,构成了导线覆冰在线监测系统网。完善的输电线路覆冰在线监测系统,是降低覆冰灾害损失的有效手段之一。

## 2 输电导线舞动在线监测技术

输电导线舞动是一个包含众多因素的复杂现象,它的研究涉及到空气动力学、耦合振动学、气象学、力学等多学科。输电导线舞动监测系统应用实时监护原理,监测输电导线舞动时的气候条件、获取舞动信息,实时地远程监测输电导线的舞动情况。随着国内外科学家、学者对导线舞动现象的研究,导线舞动在线监测技术取得了很大成就。

### 2.1 国内外研究导线舞动产生机理

自 20 世纪 30 年代起,国外学者开始对导线舞动进行了大量的实验和理论研究,提出了 Den Hartog 的空气动力理论<sup>[5]</sup>、O. Nigol 扭转舞动理论<sup>[6,7,8]</sup>和惯性耦合机理<sup>[9]</sup>,其他的舞动理论都是在这些理论的基础上发展起来的,例如日本的扭转反馈机理等。在此基础上,中国学者提出的低阻尼系统共振机理<sup>[10]</sup>以及动力学稳定性机理<sup>[11]</sup>。这些机理从不同角度阐述了舞动发生的机理,如表 2 所示。

针对不同的输电导线舞动机理,人们建立了不同的输电导线舞动的数学模型。其中,根据 Den Hartog 垂直舞动理论,建立了单自由度垂直振动模型;根据 O. Nigol 扭转舞动理论,将垂直振动和扭矩相结合提出了两自由度模型,由于两自由度模型不能很好的反应舞动特性,继而人们提出了三自由度模型,其中考虑水平、垂直和扭转的三自由度模型是目前考虑较全面的舞动模型<sup>[9,12,13,24]</sup>。不同的数学模型对应着不同的求解算法,这对导线舞动在线监测技术产生了一

表 2 国内外关于导线舞动产生机理的解释

舞动产生机理		简介
Den Hartog 垂直舞动理论	产生机理	当风吹向覆冰所致非圆截面时会产生升、阻力,只有当升力曲线斜率的负值大于阻力时,导线截面动力不稳定舞动才能产生,从而诱发导线舞动。
	优、缺点	该理论仅考虑了偏心覆冰导线在风激励下的空气动力特性,忽略了导线扭转的影响。试验表明,导线舞动也会发生在升力曲线正、负斜率区域 <sup>[17]</sup> ,这种现象不能用该理论解释。
O. Nigol 扭转舞动理论	产生机理	当覆冰导线的空气动力扭转阻尼为负且大于导线的固有扭转阻尼时,扭转运动成为自激振动,当扭转振动频率接近垂直或水平振动频率时,横向运动受耦合力的激励产生一交变力,在此力作用下导线发生大幅度的舞动。
	优、缺点	该理论考虑了偏心覆冰导线在风激励下的空气动力特性及导线扭转的影响;但该理论不能解决薄、无覆冰舞动等现象。
惯性耦合机理	产生机理	该理论认为,横向运动和扭转运动可能都是稳定的,只是由于偏心惯性作用引起攻角变化,从而使相应的升力对横向振动形成正反馈,加剧了横向振动,并逐渐积累能量,最后形成大幅度舞动。
	优、缺点	这种类型的舞动只会发生在偏心质量位于背风面的场合,具有一定的局限性。
低阻尼系统共振机理	产生机理	该机理认为,在风的作用下,整个架空输电线路各组成单元都会产生不同程度的振动;在特殊气象条件下,导线气动阻尼、结构阻尼降低,其振动会加剧,并激发线路产生系统共振,即形成舞动。
	优、缺点	该理论能解释传统舞动原理不能解释的许多舞动现象,如薄、无覆冰舞动等,但该理论缺乏试验研究,有待实践验证。
动力学稳定机理	产生机理	只有不稳定振动才能产生象舞动这样大的振幅。因此,可将舞动看作是一种动力不稳定现象。
	优、缺点	稳定性机理考虑了垂直、水平、扭转三个分量,并考虑了三者的互相耦合,从而可以模拟各种类型的舞动。原则上,稳定性舞动机理可以包括现有的各种舞动机理,换言之,现有的各种舞动机理可以看作作为稳定性舞动机理的某种特例。

定的影响。

监控中心计算机担任着数据保存、数据处理、结果显示等任务。根据输电导线舞动的不同数学模型,对测量得到的传感器数据,现在提出了 6 种处理方法。文献 [14] 从输电线垂直、扭转舞动机理出发,建立了输电线路双向稳定的两自由度模型,应用动力学和控制论稳定判据,对输电导线舞动方式进行分析;文献 [15] 建立了导线舞动的水平、垂直、扭转三自由度模型,通过摄动法判断稳定性;对同一数学模型文献 [16] 应用 Taylor 变换对其进行分析;文献 [17] 介绍了通过风能与导线系统损耗之间的能量守恒关系,估算舞动最大振幅的方法;文献 [18] 利用梁单元模

拟输电导线,通过坐标迭代和 Newmark 法进行静力、动力响应分析,应用有限元的思想进行舞动过程分析;在文献 [19] 中,介绍了神经网络算法在处理输电线舞动数据中的应用,该方法基于 B-P 算法的反传式神经网络结构,通过实现从输入到输出的非线性变换,解决导线舞动的识别问题。

## 2.2 导线舞动在线监测技术

目前,导线舞动监测技术主要采用两种方式:一种是通过视频采集技术来实现对舞动监测;另一种是通过传感器采集输电导线舞动参数,然后通过计算机建模处理,分析计算线路舞动情况。两种监测方式原理对比如表 3 所示。

表 3 输电线舞动在线监测方法分类

监测方法		简介
视频监控法 <sup>[20]</sup>	原理	根据生产输电线坐标系和安装摄像头以后的新坐标系之间的坐标平移参数和零度图像拟合参数及相关算法推导出舞动旋转角度。
	涉及技术	数字视频压缩技术、无线通信数据传输技术、新能源及低功耗应用技术。
传感器参数采集法	原理	根据加速度和位移的关系计算出导线舞动的振幅数据,将此数据与监控机上数据库的数据比较判断是否应该发出预警。
	技术方案	加速度传感器将舞动信号转化成电信号,并由单片机内部集成的 AD 转换器进行数字化采集,再进行简单的信号处理,然后将测量数据通过 GSM 模块将测量数据无线传输到监控机上进行综合评判。
光纤传感器 <sup>[22]</sup>	原理	将多个光纤传感器均布在输电导线上,构成准分布式光纤传感器网络,荷载变化经金属板传入光纤光栅,将采集的应力、温度信息传输回计算机控制中心。
	涉及技术	用波分复用技术对光栅反射信号进行解调,同时采用时分复用技术将采集数据通过无线网络设备传输到计算机监控中心。

从表 3 可见,和输电导线覆冰在线监测技术一样,由于光纤传感器的突出优点,它在输电导线舞动监测中得到应用。较视频法而言,光纤传感器法采用时分复用技术克服了数据传输量小缺点,且分布式光纤传感器系统可以采集更为全面的舞动信息,更易控制;较加速度传感器法而言,光纤传感器,可以同时采集应力和温度信息,且不受电磁干扰,保证了信号的精确度和传输速率。

### 2.3 导线舞动在线监测现状

在挪威,研究人员在 3 股长为 160m 的平行输电导线上,分别安装 3 个光纤传感器,分别测量了无覆冰情况下,微风振动和大风振动时,输电导线舞动的温度和应力数据,观测导线舞动波形<sup>[22]</sup>。在国内,导线舞动在线监测技术应用较少,现有的大都处于实验室研发状态,有待实际输电线路的考验。

## 3 架空输电导线在线监测系统中其他关键技术

对导线舞动在线监测技术的研究主要受 2 个技术因素制约,一是线路上监测装置的电源问题;二是监测数据的传输通信问题<sup>[23]</sup>。

### 3.1 电源

对于传感器而言,在信息接受/发送终端都是需要电源的。现在设计的输电导线舞动监测终端多采用太阳能蓄电池或自充电蓄电池系统为系统的电源。一种方案是自取电蓄电池系统,即利用市电供电或者直接把输电线的高压电变成所需电源对电池进行充放电;另一种是太阳能电池板充放电电源系统,该电源系统是一个独立的自给自足电源系统,不受市电或输电线路电源影响,但是太阳能蓄电池的转化效率较低,供电时间短,受天气影响较严重。在信号传输过程中,以电为基础的传感器采集到的数据传输需要电源供电的,由于传输通路存在一定阻抗,信号会有一定的衰减,影响了测量的精度;而以光为媒质的光纤传输信号不需要电源,且由于光的传播速度快,不受电磁干扰,保证了远距离测量数据的精度。

### 3.2 数据传输方式

现有监控数据传输方式有视频基带传输、宽频共缆传输、网络传输、微波传输、双绞线平衡传输、光纤传输六种传输方式。视频基带传输是指通过同轴电缆直接传输模拟信号;宽频共缆传输是指采用调幅调制、伴音调频搭载、FSK 数据信号调制等先进技术,可

将四十路监控图像、伴音、控制及报警信号集成到“一根”同轴电缆中双向传输;网络传输是指将音视频及其它信号数据压缩通过 GSM (Global System for Mobile Communications 全球移动通讯系统)无线数据传输;微波传输是指采用调频调制或调幅调制的办法,将信号搭载到高频载波上,转换为高频电磁波在空中传输;双绞线传输(平衡传输)是指将监控信号处理通过平衡对称方式传输;光纤传输是指通过把信号转换为光信号在光纤中传输。其中网络传输是近几年的新兴产业,以起无线传输、数据压缩技术及基于强大的网络构架,使监控数据传输变更加方便,迅速。

## 4 结 论

经过多年的研究和实践,架空输电导线覆冰舞动在线监测技术的研究及开发非常迅速。随着光纤传感器技术的发展及分布式光纤传感器网络的兴起,使输电导线覆冰舞动在线监测系统有了新的发展,分布式光纤传感器网络可同时获得被测量的空间分布状态和随时间变化的信息,可在整个光纤上对环境参数进行连续测量。且由于光纤传感器能与光纤遥测技术的内在相容性等优点,使架空导线覆冰舞动监测系统具有更好的实时性、在线性、可靠性。随着光纤传感器的成本下降,必将在架空输电导线覆冰舞动监测系统中得到更为广泛的应用。

### 参考文献

- [1] 张予. 架空输电线路导线覆冰在线监测系统 [J]. 高压技术, 2008, 34(9): 1992—1995.
- [2] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 44—47.
- [3] 王阳光, 尹项根, 游大海, 等. 基于无线传感器网络的电力设施冰灾实时监测与预警系统 [J]. 电网技术, 2009, 33(7): 14—19.
- [4] Ogawa Y, et al. A multiplexing loaded monitoring system of power transmission lines using fibre Bragg grating [A]. Proc. of the Optical Fibre Sensors Conf. (OFS 212) [C]. Williamsburg USA, 1997, 468—471.
- [5] Den Hartog. Transmission line vibration due to sleet [J]. AIEE Transactions, 1932, 1074—1086.
- [6] O. Nigol. Conductor galloping Part I—Den Hartog mechanism. IEEE Trans PAS, 1981, 100(2): 708—719.

(下转第 94 页)

电力系统运行状态分析和识别方法研究 ..... 程向辉 刘俊勇 杨嘉湜 等 (20)

考虑分布式电源的智能电网备用市场交易模型 ..... 张国芳 吕林 刘俊勇 (24)

超导储能技术对智能电网电压稳定的影响 ..... 徐建 邱晓燕 汪兴旺 (29)

超导储能技术在电力系统中的应用与展望 ..... 李勇 刘俊勇 胡灿 (33)

传统变电站检修向数字化变电站状态检修转变 ..... 刘阳 刘俊勇 张建明 (38)

基于 Google Earth 的电网信息可视化研究及实现 ..... 黄媛 刘俊勇 何迈 等 (43)

巡线机器人的研究综述及面向智能电网技术的一些探讨 ..... 佃松宜 翁桃 廖云杰 等 (47)

数字化变电站网络选型设计 ..... 罗小东 郑旭 舒勤 (52)

四川省电力公司应急通信建设管理概况及思考 ..... 邓创 肖行谏 (55)

光伏发电的政策与技术浅析 ..... 杜新伟 (61)

提高初期特高压互联电网稳定性措施初探 ..... 丁理杰 刘洋 杜新伟 等 (64)

对智能电网概念的理解与四川发展智能电网的思考 ..... 杜新伟 (68)

典型接线方式下智能配电网自愈功能实施的探讨 ..... 都健刚 (71)

供电企业建设坚强智能电网新技术应用策略的探讨 ..... 郑毅 (73)

智能电网初探 ..... 赖民昊 刘芸 (77)

(上接第 70 页)

[7] O. Nigol Conductor galloping Part II—Torsional mechanism. IEEE Trans PAS 1981, 100(2): 699—707.

[8] O. Nigol G. J. Clarke Conductor galloping and control based on torsional mechanism [J]. IEEE Paper 1974, 16(2): 31—41.

[9] 郭应龙, 李国兴, 尤传永. 输电线路舞动 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[10] 蔡廷湘. 输电线路舞动新机理研究 [J]. 中国电力, 1998, 31(10): 62—66.

[11] 尤传永. 导线舞动稳定性机理及其在输电线路上的应用 [J]. 电力设备, 2004, 5(6): 13—17.

[12] 陈晓明, 邓洪洲, 等. 大跨越输电线路舞动稳定性研究 [J]. 工程力学, 2004, 2, 21(1), 56—60.

[13] Y. M. Desai P. Yu N. Popplewelland · H. Shah Computer & Structures 1995, 57, 3): 407—420.

[14] 童国力, 韩富春. 输电导线防舞动的双向稳定性分析 [J]. 太原理工大学学报, 2007, 38(6).

[15] Desai Y M. Shah Y A H. Popplewill N. Perturbation—Baxed Finite Element Analyses of Transmission Line Galloping Journal of Sound and Vibration 1996, 191(4): 469—489.

[16] 梁焯宏. 高压架空输电线路舞动建模及计算机仿真 [D]. 华北电力大学, 2003.

[17] 卢明泉, 尤传永. 架空输电线路分裂导线舞动的非线性分析.

[18] 王丽新, 杨文兵, 杨新华, 等. 输电线路舞动的有限元分析 [J]. 华中科技大学学报, 2004, 21(1)

[19] 巫世晶, 向农. 神经网络在输电线导线舞动监测诊断系统中的应用 [D]. 武汉水利电力大学, 1998.

[20] 毛玉星, 张占龙, 邓军, 等. 架空输电线横向舞动角度仿真计算 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(23).

[21] 张帆, 熊兰, 刘钰. 基于加速传感器的输电线舞动检测系统 [J]. 电测与仪表, 2009, 46(517).

[22] L. Bjerkan Application of Fiber—Optic Bragg Grating Sensors in Monitoring Environmental Loads of Overhead Power Transmission Lines APPLIED OPTICS Vol 39, No 4, 2000.

[23] 黄新波, 孙钦东, 张冠军, 等. 在线监测和 GIS 用输电线路管理系统 [J]. 电网技术, 2007, 33(6): 118—122.

[24] R. D. Blevins W. D. Wan; The Galloping Response of a two—Degree—of—Freedom System. Journal of Applied Mechanics vol 41, No 4, 1974.

作者简介:

宁妍 (1984—), 女, 硕士研究生, 研究方向电力系统自动化。

黄琦 (1976—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统控制、大规模电力系统分布式并行计算和电力系统传感器网络等。

张昌华 (1975—), 男, 博士, 副教授, 目前研究反向为电力系统优化及控制、智能算法。

曹永兴 (1963—), 男, 高级工程师, 研究方向高压输电线架设及监测技术。

(收稿日期: 2009—09—02)