

华北电力大学

专业硕士学位论文
基于光纤传感技术输电线路在线监测
的研究

**Research on Transmission Line Online Monitoring
Based on Optical Fiber Sensing Technology**

陈天英

2015 年 3 月

国内图书分类号：TP393
国际图书分类号：004

学校代码：10079
密级：公开

专业硕士学位论文

基于光纤传感技术输电线路在线监测 的研究

硕 士 研 究 生： 陈天英

导 师： 邸剑

申 请 学 位： 工程硕士

专 业 领 域： 软件工程

培 养 方 式： 全日制

所 在 学 院： 控制与计算机工程学院

答 辩 日 期： 2015 年 3 月

授予学位单位： 华北电力大学

Classified Index: TP393

U.D.C: 004

Thesis for the Master Degree
**Research on Transmission Line Online Monitoring
Based on Optical Fiber Sensing Technology**

Candidate:	Chen Tianying
Supervisor:	Prof. Di Jian
School:	School of Control and Computer Engineering
Date of Defence:	March,2015
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于光纤传感技术输电线路在线监测的研究》，是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《基于光纤传感技术输电线路在线监测的研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版本，同意学校将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，允许论文被查阅和借阅，学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）：

保密☐，在 年解密后适用本授权书

不保密☐

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

输电线路是电力系统的桥梁，关系到电网的可靠稳定运行，实时监测输电线路的运行状态对于电力系统输电环节至关重要。最初输电线路依靠人工巡检排查线路故障，这种方法浪费人力物力，效率低，不能实现实时的在线监测。之后普遍采用无线传感设备，将信号传输到监控终端，这种方式方便快捷，实现了在线监测，但无线传感器安全性低，容易受输电线路高电磁场的干扰。因此，光纤传感器应运而生，将光纤传感器应用于输电线路在线监测能实现全光网络的传输，真正解决了安全性和实时性的问题。

首先，针对光纤传感器应用于输电线路在线监测的可行性，自主设计了锥形光纤光栅传感器。由于光纤传感器本身存在温度和应力交叉敏感问题，而输电线路的基础参量便是温度和应力，只有测得线路的温度值和应力值才能获得线路覆冰、舞动等的实际变化量。该传感器采用单根光纤，与应用于其他领域的双光纤光栅相比，单根光纤传感器简单，便捷，更加适用于输电线路的安装。然后，建立各个参量的数学模型，将该传感器测得的温度和应力转化为输电线路覆冰的厚度，舞动的加速度，杆塔倾斜角度等值，并设计了各个参量（覆冰、舞动、杆塔倾斜）的监测装置。最后，根据电网的实际运行，设计出了各个参量监测装置在输电线路以及杆塔上的布设图。

通过之前对覆冰、舞动、杆塔倾斜等各个参量算法的研究，设计了输电线路软件框图，并对软件框图的用户管理模块、信号接收模块、系统管理模块、信息显示模块进行了设计和实现，实现了基于光纤传感技术输电线路的在线监测。该课题的研究是对光纤传感技术应用于输电线路在线监测领域的重大突破，对之后应用于整个电力系统打下了坚实的基础。

关键词：光纤传感技术；输电线路；锥形光纤传感器；在线监测；软件设计

Abstract

Transmission line is the bridge of power system, which is related to the stable and reliable operation of power system. Real-time monitoring of transmission line operation state is crucial for the transmission part of power system. Most of the time transmission line depends on manual inspection to investigate fault lines, and this method wastes manpower and material resources, which become low efficiency and can not realize online real-time monitoring. After that wireless sensing technology is widespread adopted, which is a convenient way to realize the online monitoring. But wireless sensor has low security, which is vulnerable to the high electromagnetic environment. Therefore, the optical fiber sensor was emerged as the times require, optical fiber sensor applied in online monitoring of transmission line can realize transmission of all-optical networks, which really solves the safety and real-time problem.

Firstly, for the feasibility of fiber optic sensor applied in on-line monitoring of transmission line, I independently design a tapered fiber grating sensor. Because the optical fiber sensor itself has the stress and temperature cross sensitivity problem, and the temperature and stress are basic parameters of transmission line, only line temperature and stress values are measured can we obtain the actual change amount of line icing and galloping. Then, I established the mathematical model for every parameter, including transferring the temperature and stress into transmission line icing thickness, galloping acceleration and the tower inclination angle. Finally, according to the actual operation of power system, I designed the layout of each parameter monitoring device in power transmission line and tower.

Through the algorithm research of icing and galloping, tower inclination, I designed the software block diagram, which included the user management module, signal receiving module, system management module and information display module. The research is a major breakthrough on optical fiber sensing technology applied in power transmission line monitoring, which laid a solid foundation for the development of the whole power system.

Keywords: Optical fiber sensing technology; Transmission line; Tapered optical fiber sensor; On-line monitoring; Software design

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题背景及研究目的和意义	1
1.2 光纤传感技术的发展	2
1.2.1 光纤传感技术简介	2
1.2.2 光纤传感技术分类	2
1.2.3 光纤传感技术在电网中的发展现状	4
1.3 输电线路在线监测现状	5
1.4 本文主要工作	6
第 2 章 光纤光栅传感器及其在线监测系统设计	7
2.1 光纤光栅传感器简介	7
2.1.1 光纤光栅耦合模理论	7
2.1.2 光纤光栅传感原理	9
2.2 光纤光栅传感器温度应力交叉敏感问题解决方案	11
2.2.1 双波长矩阵法	11
2.2.2 双参量法	12
2.2.3 温度补偿法	12
2.3 光纤传感器监测输电线路系统结构	13
2.4 输电线路各监测参量产生机理与选点原则	15
2.4.1 输电线路覆冰产生机理	15
2.4.2 输电线路舞动产生机理	15
2.4.3 输电线路微风振动产生机理	15
2.4.4 杆塔倾斜产生机理	16
2.5 本章小结	16
第 3 章 锥形光纤传感器设计及应用	18
3.1 一种新型的解决交叉敏感问题锥形光纤光栅传感器	18
3.1.1 基本原理	18
3.1.2 仿真验证实验	21
3.2 锥形光纤传感器在输电线路在线监测中的应用	25
3.2.1 锥形光纤传感器应用于输电线路覆冰	25
3.2.2 锥形光纤传感器应用于输电线路舞动及微风振动	28
3.2.3 锥形光纤传感器应用于杆塔倾斜	32
3.3 锥形光纤传感器在输电线路上的布设方案	34
3.4 本章小结	35
第 4 章 基于光纤传感技术输电线路在线监测软件设计	36
4.1 输电线路在线监测软件需求分析	36
4.2 用户管理模块设计	38
4.3 信号接收模块设计	40
4.4 系统管理模块设计	41

4.5 信息显示模块设计	43
4.6 本章小结	45
第 5 章 结论与展望	46
5.1 本文总结	46
5.2 课题展望	46
参考文献	48
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	51
致 谢	52

第 1 章 绪 论

1.1 课题背景及研究目的和意义

中国的经济蓬勃发展，GDP 总值逐年增高，而经济的发展离不开能源的支持。从奥运会持续不间断供电到寻常百姓的普通照明，电力能源的可靠稳定供应已经成为社会生活中必不可少的一部分。输电线路一直以来被誉为电力系统的“大动脉”、“生命线”。作为发电，输电，变电，配电，用电的环节中的第二环节，输电在电力系统中起着重大作用。近年来，世界各地频频发生大的停电事故——2003 年欧美大停电，2008 年我国南方输电线路大面积覆冰以及 2012 年印度一半以上国土大范围停电给其国家的经济造成重大损失，从而也证明了输电线路的重要性^[1]。纵观全球自然气象，我国地势复杂多变，气候差异万千，从而导致输电线路覆盖面积广，分布较偏僻，所处环境恶劣，这将给输电线路的管理与维护带来了很大的工作量。因此，如果能未雨绸缪在第一时间检测出故障点并进行排查检修，将对电力系统的可靠稳定运行提供巨大安全保障。

目前，我国采用的输电线路监测方法是人工巡检，工作人员定期巡视输电线路，凭借外观、仪器探测等进行判断。这种方式存在明显缺陷，其效率低，容易受个人主观因素的影响，无法做到全天候测量，这将为电网可靠运行埋下安全隐患。“十二五”期间，国网公司提出了“三集五大”的发展战略，其中的一个重要目标就是要实现人力资源的集约化管理。合理高效的利用人才是衡量公司绩效情况的重要指标。而且在此期间，世界各国根据各自国家电网的情况纷纷提出了“智能电网”的概念，我国将投资 5000 亿元，初步建成核心的世界一流的坚强智能电网。显而易见，目前主流的人工巡检已经远远不能满足电网智能化的需求，现在迫切需要建立输电线路在线监测系统，以提高电力系统的安全性、实时性、可靠性^[2-4]。

输电线路跟其他电力设备不同，其常年暴露在空气中，受到自重，风力，覆冰等荷载以及各种气象环境的影响。因此，根据监测对象不同，将输电线路在线监测技术分为两类：（1）输电线路设备在线监测技术^[5]，其中包括：输电导线温度、微风振动、舞动、风偏角、弧垂监测技术，绝缘子污闪监测技术，输电线路杆塔倾斜、振动、接地蚀、入侵、鸟巢等监测技术；（2）输电线路通道环境监测技术，其中包括：输电线路覆冰监测技术，微气象环境监测技术，生长物监测识别技术，雷电监测识别技术等^[6-8]。鉴于输电线路监测涉及面广，各种不同的监测对象需要各自相应的传感器，伴随传感器的快速发展，这一问题得以解决。

光纤具有快速、安全、抗干扰等其他载体无法比拟的优点，将光纤制作成传感器，结合输电线路在线监测的方法把线路上的重要参数通过光网络传送到位于供电公司的监控中心，操作人员就能实时了解输电线路的运行状况，确保电网的安全稳定运行。根据监测中心监测到的数据进行报警和趋势预测可以大大减少经济损失，有效的监测导线延长其寿命。由此可见，对输电线路运行状况在线监测进行研究可以使电力系统具有良好的安全性与可靠性，具有重要的社会效益和工程应用价值。

1.2 光纤传感技术的发展

1.2.1 光纤传感技术简介

20 世纪 70 年代，随着光纤通信的发展，光纤传感技术快速发展起来，该技术是以光波为载体，光纤为媒质，感知和传输外界被测量信号的新型传感技术。传输媒介光纤和在光纤中传播的光波具有一系列独特的、其他媒介和载体难以相比的优点。在一定条件下，光纤特别容易接受被测量或场的加载，是一种优良的敏感元件；光纤本身不带电，体积小，质量轻，易弯曲，抗电磁干扰，抗辐射性能好，特别适合于输电线路、变电设备等强电磁干扰环境下使用。

电力通信网络中的光纤不仅仅作为电力通信的载体，而且可作为输电线路在线监测中光纤传感的载体，因此，光纤同时具有“传”、“感”两种功能^[9]。因此，光纤传感技术自问世起就受到极大重视，一举成为传感技术的先导，推动着传感技术蓬勃发展。

1.2.2 光纤传感技术分类

光纤传感技术分为分布式光纤传感技术和准分布式传感技术两种。

分布式光纤传感技术根据散射效应不同分为：瑞利散射（Rayleigh scattering）、布里渊散射（Brillouin scattering）、拉曼散射（Raman scattering）。

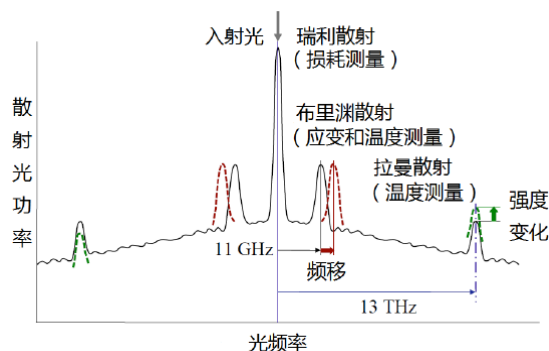


图 1-1 光纤内部散射效应

瑞利散射作为分布式光纤中最强的散射，对温度、应力的变化不敏感，故其主要用于光纤线路中的损耗测量。不同于瑞利散射，布里渊散射光跟入射光相比有频率的改变，所以布里渊散射能够同时测量温度、应力。但是实际上，将布里渊散射应用于输电线路应力的测量还存在诸多问题。与前两种相比，拉曼散射是目前在温度测量方面的应用中最为成熟的分布式光纤传感技术。但拉曼散射所存在先天的缺陷是信号弱，很难满足输电线路这样的长距离传输。由此可见分布式光纤传感技术的三种散射均有各自的优缺点和应用范围，但是应用于电力系统输电线路中仍存在很大问题^[10]。

准分布式传感技术的典型代表是光纤光栅传感技术。光纤光栅是利用光纤的光敏特性，在纤芯形成周期性折射率分布的一种光学器件，其原理与物理学上的光栅类似，就是在纤芯内形成一个窄带的（透射或反射）滤波，将待测量的特定波长反射回来，光纤光栅具体分类及特点如表 1-1 所示。

表 1-1 光纤光栅分类

类型	具体类型	特点	应用
均匀光纤光栅	光纤布拉格光栅	折射率调制深度、栅格周期为常数，光栅的波矢方向与光纤轴向一致	光纤激光器、光纤传感器等
	长周期光纤光栅	栅格周期较大，一般为几十到几百微米，是一种透射型光栅；光栅的波矢方向与光纤轴向一致	掺铒光纤放大器的增益平坦、光纤传感器
	倾斜光纤光栅	光栅的波矢方向与光纤轴向成一定的角度；入射光可耦合到后向传输的导模和包层模中；包层模同时受纤芯有效折射率和包层有效折射率的影响	衰减一定范围内的光功率、放大器的增益平坦
非均匀光纤光栅	线性啁啾光纤光栅	光栅周期沿纤芯轴向在整个区域内单调、连续、准周期性地变化；折射率调制深度为常数	色散补偿和光纤放大器的增益平坦
	分段啁啾光纤光栅	光栅周期沿纤芯轴向在分段区域内单调、连续、准周期性地变化；折射率调制深度为常数	色散补偿和光纤放大器的增益平坦
	相移光纤光栅	在普通光纤光栅的某些特定位置插入断点，以使折射率的空间分布不连续；折射率调制深度不变	多通道滤波器、掺铒光纤放大器
	超结构光纤光栅	折射率调制是周期性间断的，其调制深度不变	波分复用系统的色散补偿
	Tapered 光纤光栅	折射率调制深度被特定函数（高斯分布型与正弦调制型）调制，栅格周期不变	压制光纤光栅发射谱的边瓣进行色散补偿

经各种研究表明, 光纤光栅传感技术对温度和应力的检测已相当成熟, 除此之外, 还可检测覆冰、舞动、振动、风偏、弧垂等输电线路可能面临的情况, 其中多种光纤传感器已经步入了商业化, 是目前非常有前景的输电线路传感技术。

1.2.3 光纤传感技术在电网中的发展现状

在输电线路的监测中, 电源问题和电磁干扰制约了有源电子设备传感器的发展, 国内外学者纷纷将研究重点转移到光纤光栅传感器的研制并尝试将其应用于实践。20 世纪 70 年代开始, 光纤传感技术经历了快速发展, 众多学者纷纷对其进行理论的研究。1989 年, 美国 Mendez、Morey 首次提出利用光纤传感器检测钢筋混凝土等各种建筑的结构。自此之后, 世界各国对光纤传感技术展开广泛研究, 试图将其应用于社会中的各个领域^[11-15]。直到 20 世纪 90 年代后期, 才有学者将光纤传感技术引入到电网中的输电线路在线监测中来。

1997 年, 日本学者 Y. Ogawa, J. Iwasaki 和 K. Nakamura, 采用光纤传感技术测量导线应力的来检测导线的覆冰情况。在 30km 长的输电线路路上安装了 10 个光纤布拉格光栅传感器, 将光纤光栅传感器置于附在输电线路上的金属盘内, 通过测量上金属盘的应变来获得导线应力的变化, 从而测得导线覆冰重量。

1999 年, 英国克兰菲尔德大学的 S.W. James, M.L. Dockney 和 R.P. Tatam 等人利用两个光纤光栅传感器解决了光纤光栅的交叉敏感问题。将两个不同参数的光纤光栅传感器置于同一个输电线路路上, 通过测量到的两个不同的反射波长联立方程, 得到温度和应力各自的值。

2000 年, 挪威的 Leif Bjerkan 利用光纤光栅传感器测量导线的微风振动情况, 实验分别采用应力和温度两个光纤光栅传感器进行测量, 两个传感器均粘贴于输电线路上来得到输电线路应力和温度的值, 通过测量到的温度对应力进行温度补偿。经过长时间将不同的风速的测量结果与实际值进行对比, 表明该方法能很好的监测微风振动。

2007 年, Leif Bjerkan, Tarun K. Gangopadhyay 和 Mukul C. Paul 在印度一条 400kV 的输电线路路上安装了光纤光栅温度传感器。将光纤光栅传感器置于椭圆形外壳内用螺丝固定于输电线路路上, 通过光纤传输到监控中心。为避免光纤接入杆塔设备存在电位差, 使用光纤复合绝缘子串装置将光纤从高压输电线路路上引入到地面设备中来, 架构图如图 1-2 所示。截止到 2009 年, 该光纤光栅传感器已成功运行 2 年, 充分验证了光纤传感技术可以应用于电网中的输电线路路上。

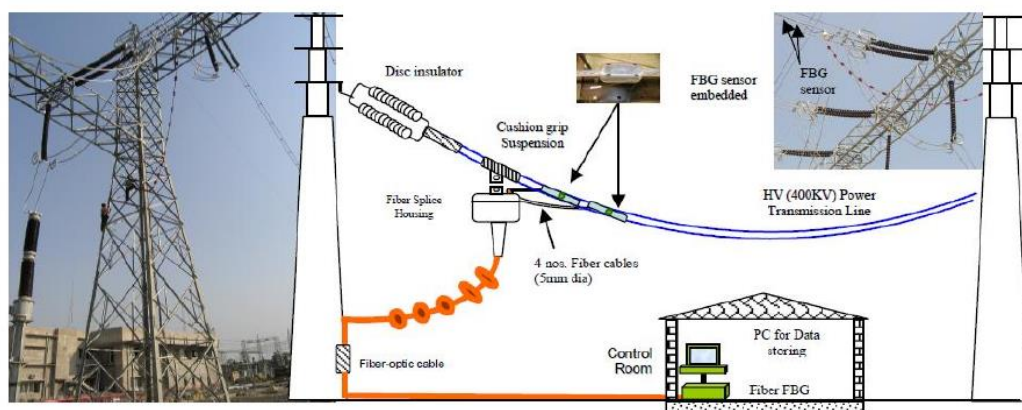


图 1-2 印度 400kV 输电线路上的光纤传感装置监测系统架构图

2009 年，国内首条 110 千伏复合光纤测温导线（OPPC）在华北电网唐山供电公司成功挂网运行。将虹窝线 C 相更换光纤测温及复合相线光缆，该带电运行的导线内含光纤，在送电并承受电压的同时，具有通信能力和对导线温度的实时检测功能。经过一个多月的运行检验，信号返回正常，数据准确有效，通信、测温系统运行良好。

2012 年，江西省电力公司研发的基于光纤传感技术的输电线路无源在线监测系统经专家审核通过。该项目自研发之后选择典型区域——九江 110 千伏妙星线蛇头岭高海拔处的 5 号到 6 号塔、星子大岭风电场的 111 号到 112 号塔作为试运行区域。2011 年，江西瑞昌市发生了震源深度为 17 千米的 4.6 级地震^[16-20]。该系统实时将监测到的位于震区地带的杆塔塔基应力及倾斜数据传回，经对比分析，该回传数据与现场勘测报送的信息数据完全吻合，具有广阔的应用前景。

1.3 输电线路在线监测现状

输电线路在线监测技术是指在不影响线路正常运行的情况下，由安装在线路上的设备实时反映运行中设备的状态。实现线路在线监测主要困难在于线路与监测设备必须同时正常运行，所以，监测系统与工作于额定电压的输电线路需做到可靠隔离。国外的输电线路在线监测技术也比我国起步早，早在 20 世纪 80 年代，国外很多公司已经生产出成熟的在线监测设备并投入电网运行。

20 世纪 80 年代，美国 Valley Group 公司最先开展输电线路在线监测设备研究工作，经不懈努力研制出 CAT-1 输电线路在线监测装置，该设备安装于绝缘子和杆塔挂环之间，既能监测温度又能监测应力。在监测装置与杆塔基站之间采用有线方式，杆塔基站与监控中心之间采用无线方式。

同一时期，日本也开始在电力设备在线监测方面投入研究，其中日本电力系统（JPS）公司对输电线路故障定位监测、线路温度报告、气象环境监测、接地电阻

测量、导线拉力等方面做了深入研究。

国内对输电线路在线监测的研究起步比较晚，直到 2008 年南方遭遇罕见冰霜雨雪灾害，输电线路大面积覆冰，造成重大经济损失，给人们敲响警钟。国网公司提出电网线路尽快实现“周期巡检”到“状态检修”的转变。由于国内输电线路在线监测技术不成熟，各个公司对监测设备的生产没有统一标准，致使一直不能大面积投入运行。

2010 年，国网公司发布了《输电线路状态监测装置通用技术规范》，该规范适用于 60kV~1000kV 交流线路和 $\pm 400\text{kV} \sim \pm 800\text{kV}$ 直流线路，为企业生产的监测装置的基本功能、技术要求、安装调试、包装储运等提供技术规范^[21,22]。

1.4 本文主要工作

基于光纤传感技术的输电线路在线监测国内外应用进行分析，本文设计了一种新型锥形光纤传感器能用一根传感器同时监测温度和应力，实现了用单根解决光纤传感器解决交叉敏感问题，并且提出了该锥形光纤传感器在输电线路覆冰、舞动、杆塔倾斜等中的应用方案，最后设计了监测软件和传感器的布设。因此，本文研究主要内容有：

（1）阐述了课题研究目的和意义，并调研光纤传感技术和输电线路在线监测的国内外发展及研究现状。

（2）介绍光纤光栅耦合模理论和传感器原理，研究利用两个光纤传感器解决温度应力交叉敏感问题，深入研究利用光纤光栅传感技术输电线路在线监测系统架构，并介绍输电线路各参量（覆冰、舞动等）的产生机理和选点原则。

（3）设计一种新型锥形光纤光栅传感器解决温度应力交叉敏感问题，并将该传感器应用于输电线路在线监测，得到研究输电线路覆冰厚度，舞动加速度和杆塔倾斜角度的算法。

（4）设计了将锥形光纤光栅应用于输电线路在线监测的软件部分，并对软件框图的用户管理模块、信号接收模块、系统管理模块、信息显示模块进行了设计和实现。

（5）对整个输电线路监测方案进行总结，并提出了将锥形光纤光栅传感器应用于电网其他部分，如发电网、配电网等的设想与展望。

第 2 章 光纤光栅传感器及其在线监测系统设计

目前，在电力系统中，输电线路在线监测广泛采用无线通信方式，主要包括 GPRS、CDMA、3G 等。采用无线接入方式能够在现有的网络架构上快速实现输电线路组网，但存在保密性差、传输速率小、对偏远地区不能有效覆盖、公网维护困难等问题。本文利用光纤复合架空地线（OPGW）、光纤复合架空相线（OPPC）、自承式光缆（ADSS）中光纤安全性高、传输速率快、无源器件的优点，进行输电线路的振动、舞动、覆冰的在线监测，彻底克服了无线通信方式的缺陷。

2.1 光纤光栅传感器简介

光纤光栅（FBG: Fiber Bragg Grating）传感器是利用光纤材料的光敏性，在纤芯内形成空间相位光栅，实质上是在纤芯内形成一个窄带（透射或反射）滤波或反射镜。光纤光栅的成栅原理是利用两束相干紫外光形成的空间干涉条纹来照射光纤，这样就在纤芯内形成了永久的周期性折射率^[23]。在介绍光纤光栅传感原理之前，有必要先了解一下光纤光栅的基本特性——光纤光栅耦合模理论^[24-27]。

2.1.1 光纤光栅耦合模理论

光纤光栅使沿 z 轴传播的纤芯模和沿 $-z$ 轴方向传播的纤芯模之间产生耦合，属于两个反向模之间的耦合，取沿 z 轴传播的模的振幅为 A ，沿 $-z$ 轴方向传播的模的振幅为 B ，只考虑这两个模之间的耦合，则光纤光栅耦合模方程如下所示

$$\frac{dA}{dz} = jA K_1 + jB K_2 e^{-j2\beta z} \quad (2-1)$$

$$\frac{dB}{dz} = -jB K_1 - jA K_2 e^{j2\beta z} \quad (2-2)$$

光纤光栅的折射率分布表示为

$$n_1(z) = n_1 \left\{ 1 + \sigma(z) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \right] \right\} \quad (2-3)$$

其中， Λ 为光栅周期， $\sigma(z)$ 为折射率调制的缓变包络， $n_1\sigma$ 相当于坐标 z 处折射率改变的幅值。该折射率分布接近方波，经傅里叶变换后只取第一项，折射率该变量为

$$\Delta n_1(z) = n_1 \sigma(z) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \right] = \overline{\Delta n}(z) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \right] \quad (2-4)$$

其中, $\overline{\Delta n}(z) = n_1 \sigma(z)$ 。

将时 (2-4) 代入耦合系数 $K_{\nu\mu}^t$ 中, 并改写为

$$K_{\nu\mu}^t = \kappa_{\nu\mu}(z) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \right] \quad (2-5)$$

其中, $\kappa_{\nu\mu}(z) = \frac{\omega \varepsilon_0 n_1^2}{2} \sigma(z) \iint e_{i\nu}(x, y) \bullet e_{i\mu}^*(x, y) dx dy$, 对于光纤光栅来说 $\nu = \mu = 1$ 。

利用关系 $\cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) = \frac{1}{2} (e^{j\frac{2\pi}{\Lambda} z} + e^{-j\frac{2\pi}{\Lambda} z})$, 将 $K_{\nu\mu}^t$ 的表达式中余弦表示为指数形

式, 则会出现这样的指数项 $e^{\pm(2\beta \pm \frac{2\pi}{\Lambda})z}$ 。在耦合模方程中, 只有该项的指数部分为零时, 才会使两个模之间发生较强的耦合, 略去不会发生强耦合项后, 可以得到如下方程

$$\frac{dA}{dz} = jB\kappa e^{-j2\delta z} \quad (2-6)$$

$$\frac{dB}{dz} = -jA\kappa^* e^{j2\delta z} \quad (2-7)$$

其中, $\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}$, $\kappa = \kappa_{12}/2 = \kappa_{21}^*/2 = k_0 \overline{\delta n_{eff}}/2 = \frac{\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}}$ 。

求解该方程组后得到 A 和 B。设栅区分布在 0~L, 取边界条件, z=0 时, A=A(0); z=L 时, B=B(L)。当 $\kappa^2 > \delta^2$ 时, 可以得到方程的解为

$$A(z) = e^{-j\delta z} \left\{ \frac{s \cosh[s(L-z)] - j\delta \sinh[s(L-z)]}{s \cosh sL - j\delta \sinh sL} A(0) - e^{-j\delta L} \frac{j\kappa \sinh(sz)}{s \cosh(sL) - j\delta \sinh(sL)} B(L) \right\} \quad (2-8)$$

$$B(z) = e^{j\delta z} \left\{ \frac{j\kappa^* \sinh[s(L-z)]}{s \cosh(sL) - j\delta \sinh(sL)} A(0) + e^{-j\delta L} \frac{s \cosh(sz) - j\delta \sinh(sz)}{s \cosh(sL) - j\delta \sinh(sL)} B(L) \right\} \quad (2-9)$$

其中, $s^2 = \kappa\kappa^* - \delta^2 = \kappa^2 - \delta^2$ 。对一般情况, 可取 A(0)=1, B(L)=0, 则可得到光纤光栅的反射率和透射率为

$$R = \frac{P_B(0)}{P_A(0)} = \frac{|B(0)|^2}{|A(0)|^2} = \frac{\kappa\kappa^* \sinh^2(sL)}{s^2 \cosh^2(sL) + \delta^2 \sinh^2(sL)} \quad (2-10)$$

$$T = \frac{P_A(L)}{P_A(0)} = \frac{|A(L)|^2}{|A(0)|^2} = \frac{s^2}{s^2 \cosh^2(sL) + \delta^2 \sinh^2(sL)} \quad (2-11)$$

在 $\kappa^2 < \delta^2$ 时, 令 $s^2 = \delta^2 - \kappa^2$, 由于 $\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}$, 而 β 与波长有关, $s = \sqrt{\kappa^2 - \delta^2}$

可能是实数或虚数，实际上，反射率应为

$$R = \begin{cases} \frac{\kappa \kappa^* \sinh^2(sL)}{s^2 \cosh^2(sL) + \delta^2 \sinh^2(sL)}, & \kappa^2 > \delta^2, \quad s = \sqrt{\kappa^2 - \delta^2} \\ \frac{\kappa \kappa^* \sin^2(sL)}{s^2 \cos^2(sL) + \delta^2 \sin^2(sL)}, & \kappa^2 < \delta^2, \quad s = \sqrt{\delta^2 - \kappa^2} \end{cases} \quad (2-12)$$

在相位匹配条件下， $\delta = 0$ 对应了最大反射率和最大透射率即 $\beta - \pi/\Lambda = 0$ 。利用传播常数和有效折射率的关系 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}$ ，故可以得到

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2-13)$$

2.1.2 光纤光栅传感原理

一束激光经耦合器射入单模光纤，经光纤光栅会返回特定的波长 λ 如下图 2-1 所示，绿色波即为返回的波长 λ ，其他颜色波长的光则透射出去，通过光谱解调仪接收反射回的波长 λ 来监测波长的变化^[28-31]。

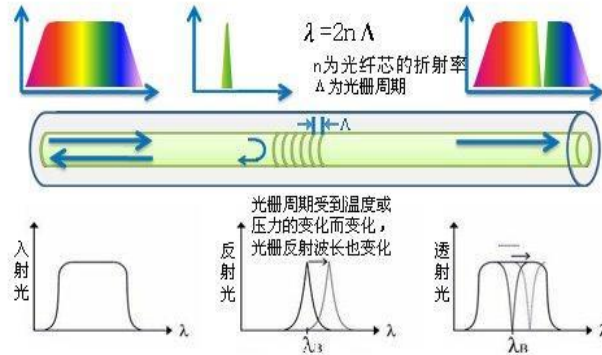


图 2-1 光纤光栅传感器原理图

由上一节耦合模理论可知，由光纤光栅返回的特定波长满足 $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ 。当光纤所处环境温度 and 应力变化时，光纤光栅周期 Λ 和纤芯折射率 n 均发生变化，故反射波长 λ_B 会发生变化。由式 (2-13) 可得

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\Delta n_{eff} + 2n_{eff}\Delta\Lambda \quad (2-14)$$

式 (2-14) 中， $\Delta\Lambda$ 为温度应力变化时，光栅周期的变化量； Δn_{eff} 为温度应力变化时，有效折射率的变化量。由式 (2-14) 和 (2-13) 求比可得

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (2-15)$$

当光纤光栅处于恒温环境中，只受轴向应力时，对于典型的石英光纤，光纤光

栅的波长变化量与应力之间的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 0.78\varepsilon \quad (2-16)$$

式(2-16)中, ε 为光纤光栅轴性应变变量。

当光纤光栅处于不受力的自然情况下, 若温度发生 ΔT 变化, 则光纤光栅的波长变化量与温度变量之间关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \beta) \cdot \Delta T \quad (2-17)$$

式(2-17)中: α 为光纤的热膨胀系数, β 为光纤的热光系数, 光纤光栅的波长变化量跟温度变量直接也呈线性关系。对于典型的石英光纤光栅 $\alpha = 0.55 \times 10^{-6} K^{-1}$, $\beta = 6.3 \times 10^{-6} K^{-1}$ 。对于常用的 1550nm 波段的光纤光栅随温度变化量由式(2-17)可得大约为 11pm/C。

综上所述, 当光纤光栅受到外界环境温度和应力的变化量时, 光栅周期 Λ 会发生变化, 当然有效折射率 n_{eff} 也会发生变化, 但变化量很小可以忽略不计。光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 的变化直接导致反射波长 λ_B 的变化。光纤布拉格光栅反射波长 λ_B 与温度和应变的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \beta)\Delta T + (1 + P_e)\Delta\varepsilon \quad (2-18)$$

式(2-18)中, $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$ 为光纤的热膨胀系数, $\beta = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ 为光纤的热光系数,

$P_e = -\frac{1}{n} \frac{dn}{d\varepsilon}$ 为光纤的弹光系数。

由式(2-18)可以看出, 光纤光栅能直接反映温度和应力的变化量, 然而温度和应力在同时发生着变化, 无法区分反射波长变化量哪一部分是由温度引起的变化, 哪一部分是由应力引起的变化, 故存在温度应力交叉敏感问题。如何解决这一问题在接下来章节中将做详细的研究。

以上对于光纤光栅作为传感器进行了性能分析, 得到了应变和温度两个参量与光纤光栅反射波长的关系。欲将光纤光栅传感器应用于输电线路, 只得到温度和应力时远远不够的, 导线舞动、微风振动、覆冰等参量必须得到测量。而恰恰输电线路这些待测状态量的测量都是在温度和应力值的基础上或者利用一些其他能改变光纤光栅波长的性能研究得到的。所以利用这一研究成果可以巧妙地将光纤光栅传感技术应用于输电线路在线监测的研究中。

对于现有的光源质量和优良的传输介质, 光纤光栅传感器可保证 100km 的测量距离, 且由于各个光纤光栅串联在一起, 多个光纤光栅传感器可以使用一个光纤解

调仪进行解调，这样的测量方法称之为准分布式测量，光纤可覆盖的测量距离由如下公式所示

$$S = (P_{IN} - A_{FBG} - IL - P_{OUT})2a \quad (2-19)$$

式（2-19）中， S 为光纤光栅传感器可监测的距离； P_{IN} 为系统光源输出功率； A_{FBG} 为光在 FBG 上反射传输衰减的光功率； IL 为插入各种光学器件的损耗即插入损耗（Insertion Loss）； P_{OUT} 为波长解调系统可检测到的光功率； a 为光纤的传输衰减系数。

2.2 光纤光栅传感器温度应力交叉敏感问题解决方案

通过以上的光纤光栅原理分析可知本文所设计的光纤光栅传感器是波长解调传感器，这与传统电子型传感器有很大区别，正是由于光纤光栅传感器的波长调制解调这一原理，才使光纤应用于输电线路在线监测成为可能，从而可以充分利用光纤优于其他通信设备的种种优点。

但是在实际测量中，温度和应力是同时存在的。当光纤光栅用于测量时，解调仪无法区分温度和应力引起的波长变化，这便是长期制约光纤传感技术发展的温度应力交叉敏感问题。要想将光纤光栅传感器应用于实际中，必须解决交叉敏感问题，接下来我们深入分析研究几种解决方案供大家参考。

2.2.1 双波长矩阵法

双波长矩阵法^[32-36]是最容易想到的方法，也是最早发明的方法，如双光栅，温度（应力）参考光栅等。以双光栅法为例进行说明。双光栅法的原理是利用两个不同参数的光纤光栅传感器得到两个相对应的波长 λ_1 ， λ_2 ，通过解联立方程组来确定温度和应力的值，通过式（2-14）可得

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

$K_{\varepsilon 1}$ 和 $K_{\varepsilon 2}$ 为光纤光栅应力传感系数； K_{T1} ， K_{T2} 为光纤光栅温度传感系数。但这一方法要求 $\begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix} \neq 0$ ，即 $K_{\varepsilon 1}/K_{\varepsilon 2} \neq K_{T1}/K_{T2}$ ，相当于要求两个光栅的特性不同。显然，不能简单的在一根光纤上使用两个不同周期的光栅区分温度和应力引起的波长漂移，可以使用两个写在同一根光纤上但周期不同的光栅，安装时使两个光栅相距较近，可以认为处于相同的温度场中，但其中一个光栅不受应力影响，而处于自然状态，即 $K_{\varepsilon 2} = 0$ 。采用两个光纤光栅进行测量的不足之处是要达到一定精

度和灵敏度需要两个波长差别较大，因此需要两个光源和波长监测装置，增加了成本。

2.2.2 双参量法

双参量法^[37-40]的原理和采用两个光纤光栅方法类似，区别是双参量法可以使用一个光纤光栅结合其他一个与温度和应力成线性关系的参量组成双参量矩阵方程，通过解方程能分别得到温度和应力的值，如图 2-2 所示

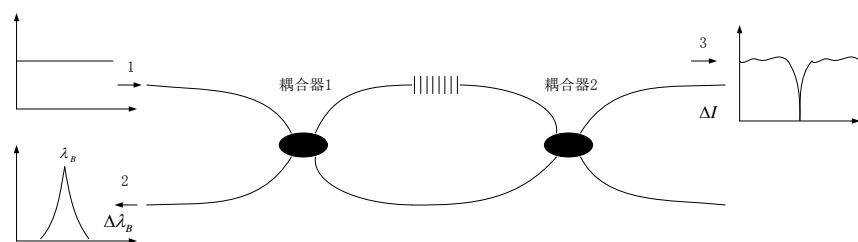


图 2-2 传感器原理图

当光源沿端口 1 射入，遇光纤光栅后，返回的中心反射波长经耦合器 1 从端口 2 射出；剩余的光经耦合器 2 进入端口 3。由光谱检测仪分别在端口 2 和端口 3 处得到反射波长 $\Delta\lambda_B$ 和光强度 ΔI 。而且 $\Delta\lambda_B$ 和 ΔI 与温度和应力均成线性关系，如下所示

$$\begin{cases} \Delta\lambda_B = \kappa_{11}\Delta\varepsilon + \kappa_{12}\Delta T \\ \Delta I = \kappa_{21}\Delta\varepsilon + \kappa_{22}\Delta T \end{cases} \quad (2-21)$$

通过使用一个光纤光栅和另一个与温度和应力呈线性关系的光强度 ΔI ，联立方程求解能分别得到温度和应力的值。

2.2.3 温度补偿法

温度补偿法^[41-45]是目前广泛采用的方法，原理是通过某种方法将温度对反射波长造成的影响剔除掉，只留下应力的变化。可以利用负温度膨胀系数材料对光纤光栅进行封装，或采用光纤光栅和长周期光栅相结合的方法等，温度补偿法主要是由对光纤的处理或接触材料的性质不同，对光纤的封装技术要求比较高。因此在实际工程中，光纤传感器的设计需满足以下要求：

1) 性能指标要求

即传感器的感测物理量与传感器中心波长之间的函数关系要准确，产品一致性、量程和测量精度满足工程需要。

2) 稳定性和重复性的要求

要求传感器的稳定性高，尤其是长时间测量的稳定性和重复性保证在 1% FS。

3) 工程适用性

便于工程安装，安装过程不影响传感器性能。传感器保护好，传感器本身和串接的光纤连接安全科学，正常工程施工活动不会对传感器和连接光缆造成损害。

4) 寿命要求

与建筑结构的使用寿命相关，一般电力设备设计使用寿命30年，大型桥梁50年，大坝100年。传感器产品使用寿命目前没有国家标准要求，一般根据测试需要确定。

5) 符合标准和使用习惯

产品符合国家标准和工程的使用习惯，对尚没有国家标准的新产品，应尽可能参照传统产品的标准和尺寸。

2.3 光纤传感器监测输电线路系统结构

鉴于前两节介绍的光纤光栅传感器的原理，结合光纤的优势创新性的提出了利用光纤传感原理的输电线路在线监测系统结构。该系统结构由安装于导线或杆塔上的 FBG 传感器、光纤复合架空地线或相线（OPGW、OPPC）、置于变电站内的光谱解调仪、监控中心的安装有监控软件的客户端构成。整个监测系统的架构如图 2-3 所示。

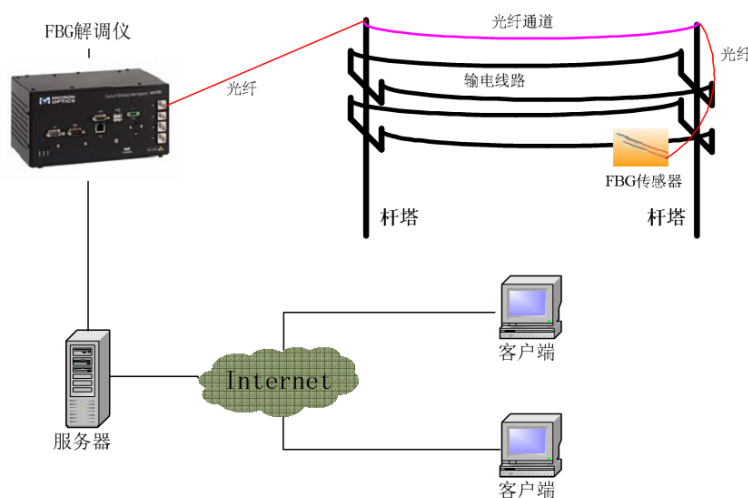


图 2-3 输电线路在线监测系统结构示意图

如图 2-3 所示，以安装于杆塔上的 FBG 传感器为例进行说明，通过置于变电站内的 FBG 解调仪来接收光纤光栅返回的布拉格波长，将 FBG 解调仪解调的数据通过输电线路光缆传输到监控中心软件客户端。该监测系统充分利用了电力通信网中的光纤资源，实现了输电线路可靠在线监测，使电网监测更加智能化。

信息采集部分的研究重点是光纤光栅的安装位置和数量，该系统将光纤光栅传感器置于壳体内固定在导线或杆塔上，最终通过光纤将所有传感器串联在一起焊接在杆塔上的光缆接续盒中，随 OPGW 传输到调制解调仪中。

光纤光栅调制解调仪是实时监测光纤光栅反射波长 λ_b 变化的一个设备，可以置

于距离监测点 200Km 外的变电站或监控中心内，不用考虑电源供电问题。本系统采用北京基康科技有限公司生产的 FBG8210 便携式解调仪。该解调仪主机采用波分复用解调技术来解调串联的 FBG 阵列，数据处理模块采用高速 DPS 处理技术。还可以通过 RS232 将数据上传给 PC 主机，即监控终端。FBG8210 解调仪的主要指标和参数如表 2-1 所示。

表 2-1 FBG8210 解调仪指标和参数

型号	FBG8210 参量
通道数	1
最大测点数	80
采样频率	2Hz
波长范围	1525~1565nm
精度	$\pm 5\text{pm}$
动态范围	>50db
分辨率	1pm
光学接头	FC/APC 或 FC/PC
传感器类型	光栅传感器
充电电压	100~240VAC, 50~60Hz 或 12VDC $\pm 10\%$
最大功耗	典型值: 5w; 最大值: 8w
数据接口	RS232 串口（可选）、USB 口
数据输出	荷载、温度、波长、能量
显示方式	点阵式液晶屏: 240x128
工作环境	-10~50℃
工作湿度	0~80% 无结雾
存储环境	-20~60℃
存储湿度	0~95% 无结雾
外形尺寸	278mm \times 228mm \times 98mm
重量	2g

监控中心为安装有分析处理监测数据功能软件的多个计算机，其通常位于变电站内，是取代人工监测数据，实现实时在线监测的必要部分。监控中心的主要任务是把光纤传感器采集到的输电线路相关参量进行分析处理，由图形显示模块呈现给用户，让用户实时便捷的掌握输电线路的各个方面的运行状况。同时也可以监测光纤传感器的工作状况，为整个输电线路在线监测系统的健康平稳运行保驾护航。

图 2-3 只是基于光纤传感器在线监测系统一种较理想方案，如果考虑成本或实际应用问题，可采用光源发射装置（激光）附于监测点处来取代解调仪长距离发射光源引起的独占整条光纤的问题。

2.4 输电线路各监测参量产生机理与选点原则

基于光纤光栅传感技术监测输电线路覆冰、舞动、振动等情况是电网在线监测领域的一大创新点。虽然输电线路覆冰、舞动、振动等状态主要是自然环境的变化造成的，但是了解导线各个状态是在什么条件下产生的是传感器设计和如何选则监测点的基础。下面详细介绍输电线路覆冰、舞动、振动、电力线弧垂的产生机理和选点原则。

2.4.1 输电线路覆冰产生机理

输电线路覆冰是雾凇和雨凇凝结在导线上形成的导线冰棍。输电线路覆冰的产生必须具备三个气象条件：温度、湿度、风速。温度需在 $-8 \sim 10^{\circ}\text{C}$ ，不能太低，温度太低使水分冻结成雪花反而不容易凝结；湿度相对于空气来说在85%以上，这一因素是覆冰多发生在我国南方的原因；风速需大于 1m/s 。

2.4.2 输电线路舞动产生机理

输电线路舞动是指对不规则导线产生的一种低频（约 $0.1 \sim 3\text{Hz}$ ）、大振幅的导线自激振动，最大幅值可以达到导线直径的5~300倍。导线舞动多发生在冬季覆冰的导线上，由于振动峰值通常可达到10多米，以至容易引起相间闪络、金具损坏，造成线路跳闸停电或引起烧伤导线、杆塔倒塌，导线折断等严重事故，造成重大经济损失，因此成为输电线路，尤其是超高压、大跨越线路的重大灾害之一。

舞动的形成取决于三方面的因素：覆冰、导线的结构参数以及风激励。覆冰机理上一节已经讨论过。不规则的导线结构参数容易引起导线舞动是由于不规则导线扭转刚度大。然而当舞动发生后，导线不太容易发生扭动，更多的是像驻波一样沿档距前后传递。所以在设计导线的模型时可以将舞动波当做驻波来设计，如图2-4所示。

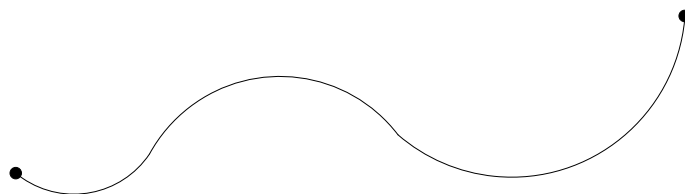


图 2-4 输电线路舞动计算模型

2.4.3 输电线路微风振动产生机理

输电线路微风振动与舞动的区别是振动的幅值小但频率高。当导线受到沿特定角度 $5 \sim 10\text{m/s}$ 风速吹动时，会引起线路幅值为 $1 \sim 5\text{mm}$ ，频率为 $3 \sim 50\text{Hz}$ 的振动。

这种振动短期内不会受影响，但大气中时刻都会吹起微风，导线也会每时每刻进行着小频率的振动，日积月累造成导线疲劳，尤其是绝缘子下端悬垂线夹、防振锤等金具与导线的长期接触中会造成断线，这是输电线路在线监测必须要长期监测的参量。

微风振动是导线长期存在的一种状态，其形成条件与许多因素有关，其中有

- (1) 环境因素：风速、风向、气候温度等；
- (2) 自身因素：导线材质结构，悬挂点高度、档距的距离、导线运行时间等；
- (3) 附件性质：金具（悬垂线夹、防震锤等）特性、防震方式等。

在输电线路各参量的监测中短期内微风振动对导线的影响最小，有人认为不需要在线监测，只要做到定期巡检就可以。其实不是这样，当导线疲劳到一定程度很容易造成断股，定期巡检并不能及时发现，会出现大面积停电等不可挽回的后果。

2.4.4 杆塔倾斜产生机理

杆塔倾斜顾名思义是杆塔中心偏离了铅垂位置。在煤炭资源过渡开采后被废弃的地区，即采空区常出现地面坍塌，相应的该区域的杆塔极有可能出现倾斜、滑移、沉降等现象。杆塔倾斜跟微风振动相比对输电线路的危害更加的隐形，巡线工作人员几乎很难用肉眼发现杆塔初期的倾斜。当肉眼观察到杆塔倾斜时，输电线路已经处于十分危险的情况之中，会造成悬垂线夹与绝缘子形成角度，造成杆塔间档距变化，进而弧垂发生不可预测的变化，极有可能导致相间闪络、断电等后果。所以必须采用输电线路的在线监测系统实时的监测杆塔的倾斜度。

经调查研究，输电线路在线监测各参量选点原则总结如表 2-2 所示。

表 2-2 输电线路监测参量选点原则

监测参数	导线覆冰监测	导线舞动监测	微风振动监测	杆塔倾斜监测
选 点 原 则	输电线路与冬季风向的夹角需大于 45 度	输电线路与冬季风向夹角大于 45 度	有防震锤夹头、悬垂线夹等金具端部	煤炭采空区、常年挖沙石、土方等破坏塔基地区
	迎风山坡，水面上空等特殊地理环境	易发生舞动的微气象区	悬挂点较高线路	重覆冰的极端气象地区
	线路重风口区	大档距区	大档距线路	飓风区
	重积雪区	易覆冰区	地形开阔区	地震多发区

2.5 本章小结

本章研究了光纤光栅传感器原理及输电线路在线监测系统设计。首先阐述基于

光纤光栅耦合模理论光纤光栅传感器的传感原理，其次分析利用两根光纤解决光纤传感器温度应力交叉敏感问题，然后设计利用光纤传感原理的输电线路在线系统设计，最后介绍输电线路覆冰、舞动或振动、杆塔倾斜等的形成机理及各参量传感器的选点原则。

第 3 章 锥形光纤传感器设计及应用

通过上一章对光纤光栅原理的介绍,我们知道由于FBG利用中心反射波长 λ_B 进行编码,而 λ_B 对应力和温度都敏感,无法将这两个参量区分开来,也就是说光纤光栅(FBG)传感器存在着应力和温度交叉敏感问题。针对这一问题介绍了几种目前比较流行的解决光纤光栅交叉敏感问题的方案,这些方案大多数都是采用两个光纤光栅或者一个光纤光栅结合一个与温度应力成线性关系的参量的方法。在降低系统成本和解调系统的制备复杂性方面有待提高。这一章我们通过仿真实验提出了一种新的设计方案,利用一根线性蚀刻锥形光纤解决交叉敏感问题,并将该传感器应用于输电线路在线监测中。

3.1 一种新型的解决交叉敏感问题锥形光纤光栅传感器

将现有的两根光纤制成的传感器取代电子传感器应用于输电线路在线监测中显然不现实,因为这需要占据 OPGW 或 OPPC 两根光纤,而且无法使用波分复用的调制解调系统。本文的目的是利用光纤的安全、快速等优点制成传感器应用于输电线路在线监测中,显然以现有的光纤传感技术不能直接拿就用,故设计了一种只用一根光纤的锥形光纤传感器以满足输电线路在线监测的需要。

该设计利用 FBG 传感器的中心反射波长 λ_B 和光谱半峰宽 FWHM 进行编码,而 FWHM 只随应力变化而与温度无关。实验结果由 Matlab 仿真得出,该方法大大简化了系统结构,操作简便,很容易应用于工程实际中。

3.1.1 基本原理

由 2.1 节可知,当光射入光纤光栅时,特定波长光沿轴向反射回来,称其为**中心反射波长 λ_B

,剩余波长的光仍按原路传播。根据耦合模理论, $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ 。其中, n_{eff} 为有效折射率, Λ 为光栅周期。

该锥形光纤传感器能解决需两根光纤光栅才能解决的光纤栅的交叉敏感问题。具体方法是**将该光纤光栅部分制成均匀的锥形形状,其示意图如图 3-1 所示,当线性蚀刻 FBG 受到的应力改变时光栅周期 Λ 也将随之变化,而这种变化沿 Z 轴是线性增大的。

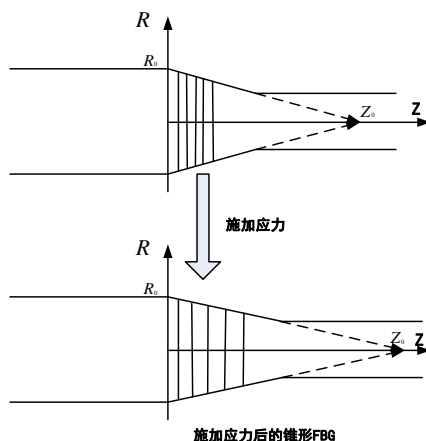


图 3-1 施加应力前后的锥形 FBG 蚀刻光纤

由光纤光栅示意图 3-1 可以得出，施加应力后光纤光栅时线性增大的，根据相似三角形判定准则，该锥形光纤沿 Z 轴的半径可以表示为

$$R(z) = R_0 * (1 - \frac{z}{z_0}) \quad (3-1)$$

式(3-1)中， R_0 是该光纤的最大半径， Z_0 是 z 轴上的一点，沿着这一点光纤半径趋于 0。

相应的光纤沿 Z 轴的横截面积可以表示为

$$A(z) = \pi * R(z)^2 \quad (3-2)$$

光纤沿 z 轴横截面单位面积受力用 $\varepsilon(z)$ 表示为

$$\varepsilon(z) = \frac{F}{E * A(z)} = \frac{F}{E * \pi * R_0^2 (1 - \frac{z}{z_0})^2} \quad (3-3)$$

式(3-3)中， F 是垂直于光纤的应力， E 是杨氏系数。设最大半径 R_0 处受力为

$\varepsilon(0)$ ，且 $\varepsilon(0) = \frac{F}{E * \pi * R_0^2}$ ，则 $\varepsilon(z)$ 写为

$$\varepsilon(z) = \frac{\varepsilon(0)}{(1 - \frac{z}{z_0})^2} \quad (3-4)$$

已知布拉格波长为

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda \quad (3-5)$$

很容易理解，光栅间距 Λ 会随着受力增大而增大。则 Λ 可以表示为

$$\Lambda(z) = \Lambda_0(1 + \varepsilon(z)) \quad (3-6)$$

式 (3-6) 中， Λ_0 是不受力时光栅的间距， $\varepsilon(z)$ 是 Z 轴上某一点的受力。因此，光栅间距变化量可表示为

$$\Delta\Lambda_{chirp} = \Lambda_0(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) \quad (3-7)$$

式 (3-7) 中， ε_{max} 是光纤受力的最大值，即锥形光纤最小半径处； ε_{min} 是光纤受力的最小值，即锥形光纤最大半径处。

则相应的锥形光纤光栅反射波长变化量表示为

$$\Delta\lambda_{chirp} = 2n_{ef}(\Lambda_{long} - \Lambda_{short}) = 2n_{ef}\Delta\Lambda_{chirp} \quad (3-8)$$

式 (3-8) 中， Λ_{long} 是光栅最大间距，即 ε_{max} 处； Λ_{short} 是光栅最小间距，即 ε_{min} 处。

由式 (3-3)、(3-7)、(3-8) 可得

$$\Delta\lambda_{chirp} = 2n_{ef}\Lambda_0 \frac{F}{E * \pi R_0^2} \left(\frac{1}{(1 - \frac{z_{max}}{z_0})^2} - 1 \right) \quad (3-9)$$

以上是针对锥形光纤光栅示意图 (3-1) 进行的一系列公式推导，由式 (3-9) 可知，光纤光栅的反射波长 $\Delta\lambda_{chirp}$ 与应力 F 成线性关系的，而且其系数与该锥形光纤的大小和性质有关，均为已知量。

由 2.2 节可知，当应力和温度运用到传感器时，光栅波长变化可以表示为式 (3-10) 所示

$$\Delta\lambda = K_{T1}\Delta T + K_{\varepsilon1}\Delta\varepsilon \quad (3-10)$$

式 (3-10) 中， K_{T1} 和 $K_{\varepsilon1}$ 分别是布拉格波长温度和应力的敏感系数。

接下来我们引入一个很重要的概念，即波长的半峰宽 (FWHM: full width at half maxima)，FWHM 是某个波形的峰值一半处波形的宽度。经研究表明，FWHM 与温度和应力也成线性关系，其值可表示为

$$\Delta FWHM = K_{T2}\Delta T + K_{\varepsilon2}\Delta\varepsilon \quad (3-11)$$

式 (3-11) 中, K_{T2} 和 $K_{\varepsilon 2}$ 是光谱宽度温度和应力的系数。

当锥形光纤同时受到温度和应力时, 考虑到光栅很小, 只要几十毫米长, 我们通常不考虑光纤光栅存在温度梯度, 光栅光谱会整体漂移, 即温度造成的光栅间距的增大 (减小) 量是相同的, 而应力会使光栅间距沿 z 轴线性增大 (减小)。

既然温度的变化使光谱表现为整体漂移, 也就是说 FWHM 是不变的, 则 $K_{T2}=0$, 所以式 (3-11) 演变为

$$\Delta FWHM = K_{\varepsilon 2} \Delta \varepsilon \quad (3-12)$$

因此, 结合公式 (3-10) 和 (3-12) 可以得到 ΔT 、 $\Delta \varepsilon$ 的矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 2} & -K_{\varepsilon 1} \\ 0 & K_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda \\ \Delta FWHM \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

式 (3-13) 中 $D = K_{T1} K_{\varepsilon 2}$ 。

通过矩阵 (3-13), 我们得到了求得光纤光栅温度和应力变化的方程。式中参数 K_{T1} 、 $K_{\varepsilon 1}$ 和 K_{T2} 、 $K_{\varepsilon 2}$ 均可求得, $\Delta \lambda$ 和 $\Delta FWHM$ 在光谱仪上均可以得到, 这样我们就分别得到了温度和应力的值, 实现用一根锥形光纤光栅解决了光纤光栅交叉敏感问题。

在通常的光纤光栅中, 光纤在半径最大 R_0 处承受应力的值最大, 记为 $F_{0\max}$

$$F_{0\max} = \varepsilon_{\max} * E * \pi R_0^2 \quad (3-14)$$

式 (3-14) 中 ε_{\max} 是光纤的断裂应变。

在锥形蚀刻光纤中, 半径沿 z 轴逐渐变小, 则抵抗能力逐渐减小。因此, 锥形蚀刻光纤能承受应力的最大值是

$$F_{\max} = \varepsilon_{\max} * E * \pi R_{\min}^2 \quad (3-15)$$

将式 (3-14) 和式 (3-15) 求比, 可以得到下式所示

$$\frac{F_{\max}}{F_{0\max}} = \left(\frac{R_{\min}}{R_0} \right)^2 \quad (3-16)$$

由式 (3-16) 可以得出, 与普通非锥形光纤相比, 由于存在 $(R_{\min}/R_0)^2$ 的原因, 锥形光纤将会降低光纤承受外界条件变化的工作范围。

3.1.2 仿真验证实验

下面我们通过一系列仿真实验来获得 K_{T1} 、 $K_{\varepsilon1}$ 和 K_{T2} 、 $K_{\varepsilon2}$ 这些参数的值，并且将参数值代入公式 (3.13) 后验证其正确性。理论上，光纤光栅传感器的制作可以由两步完成的。

第一步，用 244nm 激光通过相位掩膜技术写在直径为 $125\mu m$ 感光光纤上，以获得均匀的光纤光栅。相位掩膜技术是利用紫外光照射相位母板，让正负一级衍射形成干涉条纹，其原理如图 3-2 所示。

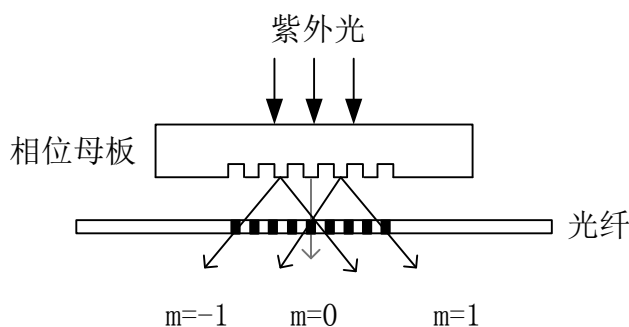


图 3-2 相位掩膜技术制作光纤光栅原理图

第二步，如图 3-3 所示，将该光纤光栅安装在由计算机控制的线性平移台上，并将其放入填充有 40% 氢氟酸 (HF) 水溶液的容器里。HF 溶液对光纤具有较强的腐蚀作用，由计算机控制移动平台移动速度来获得光纤浸入溶液部分的比例，则可获得所需要的锥形光纤。

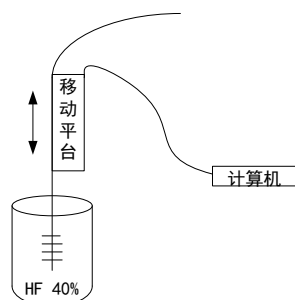
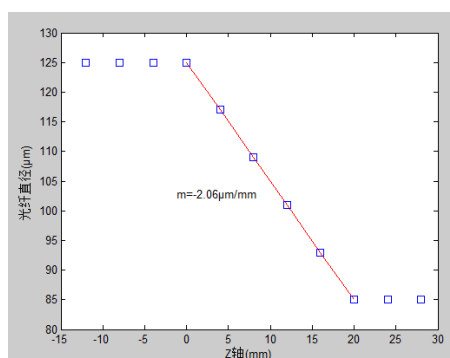


图 3-3 利用化学溶液蚀刻光纤光栅示意图

通过以上方法可以获得锥形光栅，接下来我们通过 Matlab 仿真对锥形光纤光栅的温度和应力系数进行求解。首先，先来看锥形光纤直径沿 Z 轴线性变化仿真图如图 3-4 所示。


 图 3-4 沿 z 轴锥形光纤的直径

结合图 3-1 和图 3-4, R_0 处为锥形的最大直径值为 $125\mu\text{m}$, 最小直径值为 $85\mu\text{m}$, 该锥形部分总长为 20mm 。由图 3-4 可知, 该实验所用光纤直径沿 z 轴线性减小, 即锥形光纤光栅。

接下来求 K_{ε_1} 和 K_{ε_2} 的值。当温度保持 25°C 不变, 对光纤光栅逐渐施加应力, 使光纤受力以 $250\mu\text{ε}$ 为增量从 $-250\mu\text{ε}$ 逐渐变到 $3000\mu\text{ε}$ 。传感器的峰值波长和半峰值宽波形如图 3-5 所示。

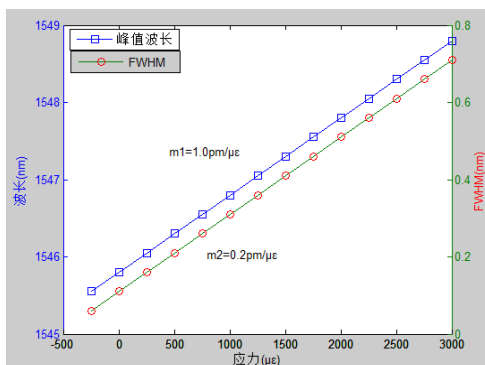


图 3-5 传感器对应力的响应

显然, 正如之前理论分析的那样, 当温度不变而应力变化时, 反射波长峰值和半峰宽均为线性变化的, 波长和半峰宽在图 3-5 中对应的斜率 $m1$ 和 $m2$ 即为所求参数 K_{ε_1} 和 K_{ε_2} 的值。

接下来求 K_{T_1} 和 K_{T_2} 的值。当光纤不受应力处于自然状态时, 使光纤温度以 5°C 为增量从 -5°C 变到 60°C 逐渐增加。传感器峰值波长和半峰宽波形如图 3-6 所示。

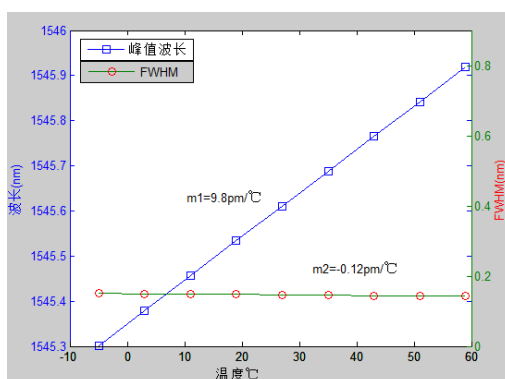


图 3-6 传感器对温度的响应

由图 3-6 可以看出，与传感器对应力的响应不同，在光纤不受力的情况下，随着温度的增长，波长峰值线性增长，但半峰宽基本保持不变，仍然是 0.12nm。则图 3-6 中波长和半峰宽对应的斜率 $m1$ 和 $m2$ 即为所求参数 K_{T1} 和 K_{T2} 的值。

将图 3-5 和图 3-6 得到的 $K_{\varepsilon1}$ 、 $K_{\varepsilon2}$ 、 K_{T1} 、 K_{T2} 这四个参数值代入公式 (3-13) 得到如下方程。

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{1.96} \begin{bmatrix} 0.2 & -1 \\ 0.12 & 9.8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda \\ \Delta FWHM \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

为了评估该传感器的性能，即公式 (3-17) 的准确性，我们另外设计了两个实验。第一个，该传感器在 $1500\mu\varepsilon$ 的应力下保持不变，同时温度从 20°C 变到 65°C 。在第二个，应力持续变化，而温度保持恒定在 40°C 。方程 (3-17) 用于获得所施加的应力和温度值，该结果如图 3-7 所示。

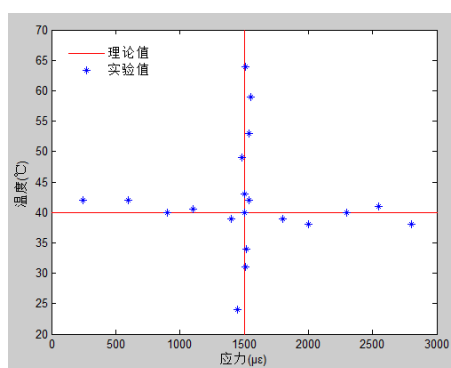


图 3-7 应力不变时温度变化和温度不变时应力的变化

通过理论值和实验值的分析，应力和温度的误差估计分别为 $\pm 15.3\mu\varepsilon$ 和 $\pm 1.9^\circ\text{C}$ ，该误差在光纤传感器合理的工作范围内。由此可以得出，我们设计的啁啾光纤光栅传感器很好的解决了交叉敏感问题，是利用单个光纤光栅传感器测量应力

和温度问题的又一大理论创新点。为使该啁啾光纤光栅传感器运用于商业实践中，它还需要成熟统一的系统软件以获得理想的半峰宽。

本节基于线性蚀刻锥形光纤制成 FBG。该啁啾光栅不仅允许布拉格波长信息编码，也可以利用光栅的半峰宽编码。该实验结果由 Matlab 仿真获得，同时结合温度变化时半峰宽不变这一特性，很好的解决交叉敏感问题。

该方法与使用两个 FBG 的测量方法相比有了很大进步，其结构简单，操作方便，实现了使用单个光纤光栅同时测量应变和温度，并且在保持光纤传感器所有优势的情况下，允许增加光纤中传感器的数目。

3.2 锥形光纤传感器在输电线路在线监测中的应用

上文中仅仅由一根锥形光纤光栅得到了温度应力的变化，而要真正的将该理论应用到电网实际运行中则需要要建立相应的计算模型，把导线的温度应变等值转化成覆冰、舞动等参量，这是实时准确测量导线运行状态的前提之一，也是整个输电线路监测系统的核心工作。

3.2.1 锥形光纤传感器应用于输电线路覆冰

输电线路覆冰计算模型如图 3-8 所示，我们以 3 个杆塔为例，A 为主杆塔，B 为大号杆塔，C 为小号杆塔。 l_1 和 l_2 分别为杆塔 A、B 和杆塔 A、C 之间的档距； l_D^{AB} 和 l_D^{AC} 分别为杆塔等高时各自的等效档距； h_1 和 h_2 分别为杆塔 A、B 和杆塔 A、C 之间的高度差； θ_A 、 θ_B 、 θ_C 分别为三个绝缘子串与杆塔之间的夹角； T_H^{AB} 和 T_H^{AC} 分别为主杆塔 A 两侧导线的水平张力。 q 为作用在线路上风、冰载荷的集度。

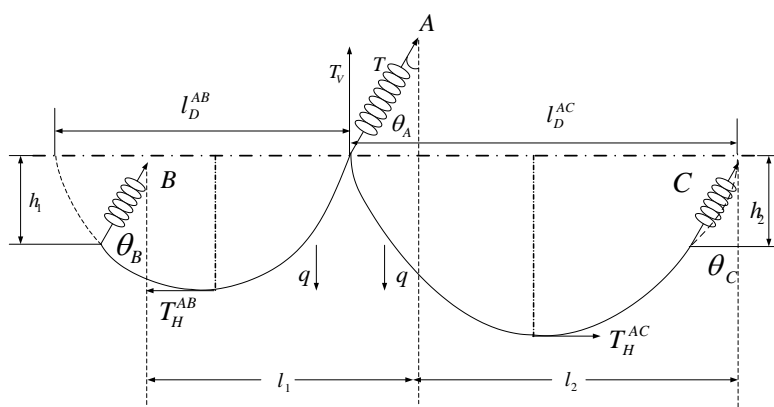


图 3-8 输电线路覆冰计算模型

与传统覆冰计算模型不同，本节设计的输电线路覆冰监测装置考虑到覆冰风力

的情况，绝缘子串连同导线沿同一方向倾斜，可同时获得覆冰的重量和绝缘子的倾斜角。设两条导线在不受力情况下长度分别为 S_1 和 S_2 ，由于覆冰情况下，温度肯定会降低，根据热胀冷缩的原理导线会收缩，设收缩后导线长度为 S_{t1} 和 S_{t2} ，则

$$\begin{cases} S_{t1} = S_1 - S_1 \alpha \Delta t \\ S_{t2} = S_2 - S_2 \alpha \Delta t \end{cases} \quad (3-18)$$

式 (3-18) 中， Δt 为覆冰前后输电线路的温度差； α 为输电线路的温度膨胀系数。

根据导线的力学方程，可以推导出不等高悬挂点两条输电线路的张力方程为

$$\begin{cases} T_H^{AB} = \sqrt{\frac{l_1^3 q_0^2}{24(S_{t1} - l_1 - \frac{h_1^2}{2l_1})}} \\ T_H^{AC} = \sqrt{\frac{l_2^3 q_0^2}{24(S_{t2} - l_2 - \frac{h_2^2}{2l_2})}} \end{cases} \quad (3-19)$$

式 (3-19) 可以得到两导线的水平张力，其中 q_0 为导线自重载荷集度。

由图 3-8 中的计算模型可知，主杆塔 A 两侧的等效档距 l_D^{AB} 和 l_D^{AC} 分别为

$$\begin{cases} l_D^{AB} = l_1 - l_A \sin \theta_A + l_B \sin \theta_B + \frac{2T_H^{AB}}{q_0} \bullet \operatorname{arsh} \frac{h_1 q_0}{2T_H^{AB} \operatorname{sh} \frac{(l_1 - l_A \sin \theta_A + l_B \sin \theta_B) q_0}{2T_H^{AB}}} \\ l_D^{AC} = l_2 + l_A \sin \theta_A - l_C \sin \theta_C + \frac{2T_H^{AC}}{q_0} \bullet \operatorname{arsh} \frac{h_2 q_0}{2T_H^{AC} \operatorname{sh} \frac{(l_2 + l_A \sin \theta_A - l_C \sin \theta_C) q_0}{2T_H^{AC}}} \end{cases} \quad (3-20)$$

式 (3-20) 中， l_A 、 l_B 和 l_C 分别为三个绝缘子串的长度。由等效档距 l_D^{AB} 和 l_D^{AC} 可以得到两侧导线长度 S_D^{AB} 和 S_D^{AC} 为

$$\begin{cases} S_D^{AB} = \frac{2T_H^{AB}}{q_0} \operatorname{sh} \frac{l_D^{AB} q_0}{2T_H^{AB}} \\ S_D^{AC} = \frac{2T_H^{AC}}{q_0} \operatorname{sh} \frac{l_D^{AC} q_0}{2T_H^{AC}} \end{cases} \quad (3-21)$$

主杆塔 A 上的绝缘子串竖直方向的受力为 $T_V = T \cos \theta_A$ ， T_V 与 A 两侧导线载荷

平衡，则由“平衡法”可得

$$\begin{aligned}\Delta T_V &= T_V - T_{V0} = (q_{wind} + q_{ice})(S_D^{AB} + S_D^{AC})/2 \\ &= q(S_D^{AB} + S_D^{AC})/2\end{aligned}\quad (3-22)$$

式(3-22)中， q_{wind} 为风载荷集度； q_{ice} 为覆冰载荷集度； ΔT_V 为风和覆冰的垂直载荷； T_{V0} 为自重下的垂直拉力，故可得到覆冰、风载荷集度 q 为

$$q = \frac{2\Delta T_V}{S_D^{AB} + S_D^{AC}} \quad (3-23)$$

覆冰载荷集度 $q_{ice} = q - q_{wind}$ ，覆冰情况下，风载荷集度为 $q_{wind} = \frac{10^{-3}\nu(2b+d)\psi}{1.6a}$ 。

其中， ν 为导线实际风速；覆冰厚度为 b ，导线直径为 d ； ψ 为风压系数。输电线路上的覆冰为均匀圆柱形，如图3-9所示。

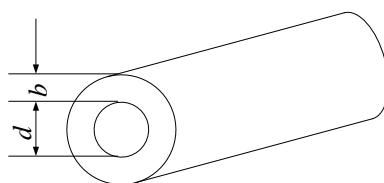


图 3-9 导线覆冰示意图

则覆冰厚度可表示为

$$b = \frac{\sqrt{\frac{4q_{ice}}{9.8\pi\gamma_0} + d^2} - d}{2} \quad (3-24)$$

由上一节对锥形光纤光栅传感器的介绍我们知道 $\Delta FWHM = K_e \Delta F$ ， ΔF 即为绝缘子受的力为 T ， $\Delta FWHM$ 由光纤解调仪得到，则只要安装一个锥形光纤拉力传感器测得绝缘子串受到的拉力 F ，就能得到导线覆冰的载荷集度或者厚度，则覆冰载荷集度 q_{ice} 为

$$q_{ice} = \frac{2(\frac{\Delta FWHM \cos \theta_A}{k_e} - T_{V0})}{S_D^{AB} + S_D^{AC}} - \frac{10^{-3}\nu(2b+d)\psi}{1.6a} \quad (3-25)$$

本设计将该锥形拉力传感器固定在工字形的壳体内，将传感器替换掉绝缘子串上的球头挂环。由于黏贴剂存在老化，易受环境影响等特点，所以我们不采用将锥

形光纤光栅传感器粘贴在弹性体上的方法，而是将其固定在金属槽 1、2 内，用螺丝固定，如图 3-10 为本设计的锥形光纤传感器的 3 维模型。

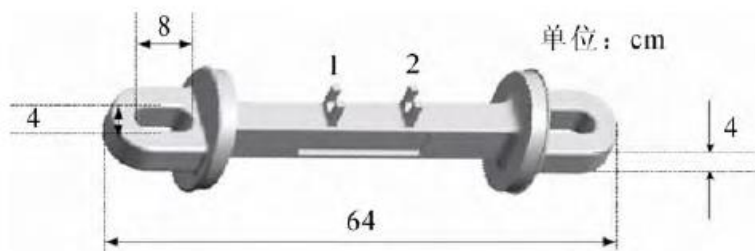


图 3-10 锥形光纤传感器 3 维模型

该锥形光纤传感器安装方式如图 3-11 所示，光纤从锥形光纤传感器引出到管线光栅解调仪，将传感器固定在定制金具上，并且焊接固定紧。

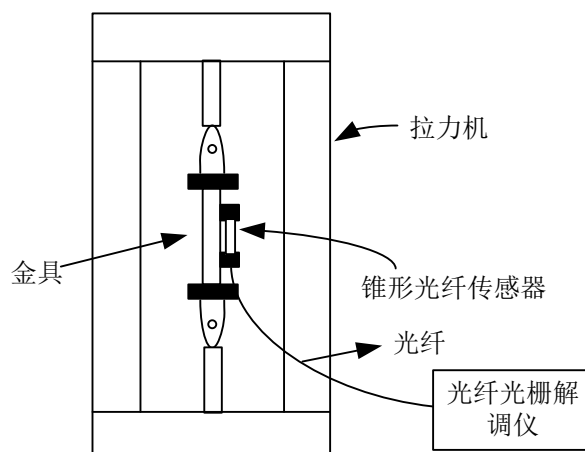


图 3-11 锥形光纤传感器安装示意图

锥形光纤传感器的金属结构组装完成后如图 3-12 所示 1、2 处均有螺纹，用螺丝固定住，为提高精准度，实际应用中需将螺纹处焊住以防止导线长久运动中螺纹的松动。



图 3-12 锥形光纤传感器金具安装方式

3.2.2 锥形光纤传感器应用于输电线路舞动及微风振动

输电线路舞动和微风振动的监测原理类似，所以本节设计的一种锥形光纤加速度传感器可以适用于舞动和振动的在线监测。我们不采用位移传感器，因为位移传感器是根据导线相对运动原理工作的。如果将位移传感器安装于导线上，当导线发生舞动或振动时，两者的相对位移并没有发生变化，而加速度传感器则不会出现这一为题，能够有效的避免。只要将测量出来的加速度值进行积分，就能够得到速度和位移的值。根据微积分的知识可知，进行定积分计算时设定初始值为零。

与覆冰监测物理量（覆冰厚度）不同，舞动和微风振动需要监测导线各个方向加速度的变化量。该锥形光纤加速度传感器结构简图如图 3-13 所示。

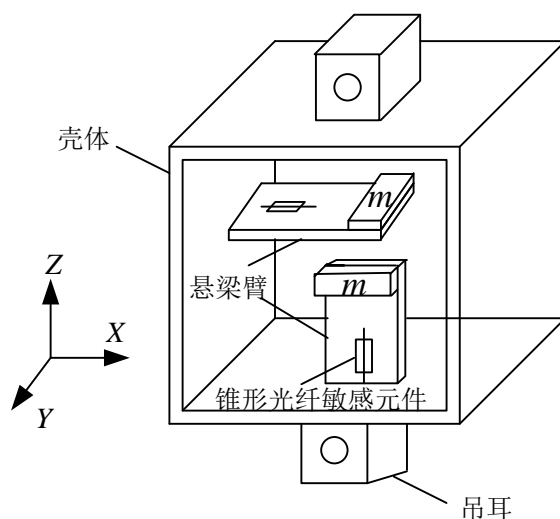
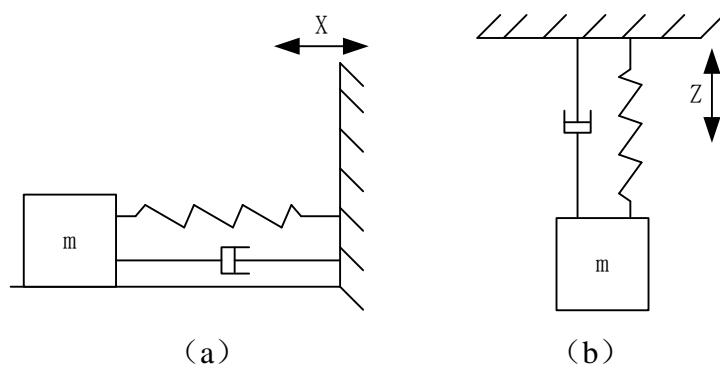


图 3-13 锥形光纤加速度传感器

由图 3-13 可以看出，该传感器由吊耳、壳体、悬梁臂、质量块和锥形光纤敏感元件组成。吊耳是用于将该壳体悬挂于输电线路监测点处；壳体主要起保护作用的；在壳体的侧壁（ X 方向）和底部（ Z 方向）上安装有悬梁臂，悬梁臂的端部固定有质量为 m 的质量块；悬梁臂沿 X 、 Z 中心内部延伸方向附有锥形光纤敏感元件。

当输电线路发生运动时，该锥形光纤加速度传感器随导线一起振动或舞动，则悬梁臂在两个方向发生拉伸或收缩，同样锥形光纤也会伴随拉伸或收缩，通过测量其半峰宽变化量间接测量导线的位移变化。

将以上两个悬梁臂结构简化为两个方向上的弹簧模型，如图 3-14 中， a 为 X 方向振动模型； b 为 Z 方向振动模型。


 图 3-14 x 和 Z 方向振动简化模型

导线的振动或舞动可以简化为一条悬链，在 Z 方向导线相当于上下振动的绳索，类似于带有阻尼振动的质量块 m 的上下振动。假设 Z 方向导线振动或舞动的位移为 z ，质量块 Z 方向相对于导线的位移为 z_m 。则导线的位移可以表示为

$$z = A \sin(\omega t) \quad (3-26)$$

式 (3-26) 中， ω 为舞动或振动角频率， A 为舞动或振动的幅值。

由“平衡法”可得

$$f_I + f_D + f_S = 0 \quad (3-27)$$

由式 (3-27) 可得， f_I 为惯性力； f_D 为阻尼力； f_S 为弹性力。阻尼力 f_D 和弹性力 f_S 与质量块的相对位移分别为 \dot{z}_m 和 z_m ，而惯性力 f_I 和质量块的总位移 \dot{z}' 有关，即 $f_D = c\dot{z}_m$ ， $f_S = kz_m$ ； $f_I = m\ddot{z}'$ 。

因此，平衡方程 (3-27) 求微分后可以改写为

$$c\dot{z}_m + kz_m + m\ddot{z}' = 0 \quad (3-28)$$

由于 $z' = z + z_m$ ，将该式等号两边对 t 进行两次微分代入 (3-27) 可得导线舞动或振动的微分方程

$$c\dot{z}_m + kz_m + m\ddot{z}_m = -m\ddot{z} \quad (3-29)$$

将式 (3-26) 代入式 (3-29) 得

$$\ddot{z}_m + 2\xi\omega_n\dot{z}_m + \omega_n^2 z_m = -A\omega^2 \sin(\omega t) \quad (3-30)$$

式 (3-30) 中，阻尼比 $\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ ，其中， c_c 为临界阻尼； $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 为固有频率。式 (3-30) 的稳态解为

$$z_m = B \sin(\omega t - \varphi) \quad (3-31)$$

假设 $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_n} \ll 1$ 且 $\xi < 1$ ，式 (3-31) 可以化简为

$$z_m \approx A \bar{\omega}^2 \sin(\omega t - \varphi) = -\frac{1}{\omega_n^2} \ddot{z} \quad (3-32)$$

由式 (3-32) 可知, 悬梁臂的质量块 m 与导线沿 Z 方向的相对位移 z_m 和导线舞动或振动加速度 \ddot{z} 成正比, 因此可以通过测量质量块的位移来监测导线运动的加速度。

X 方向和 Z 方向的加速度求法类似, X 方向质量块 m 的位移和舞动或振动加速度关系为

$$x_m \approx A' \bar{\omega}^2 \sin(\omega t - \varphi') = -\frac{1}{\omega_n^2} \ddot{x} \quad (3-33)$$

式 (3-33) 中, A' 为 X 方向振动或舞动的幅值。

图 3-13 中, X 和 Z 方向两个悬梁臂几何尺寸一样, 其长为 L , 宽为 b , 厚为 h 。根据材料力学可得, 由于质量块 m 存在惯性, 则在 X 和 Z 两个方向产生绕度为

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \frac{3h}{2L^2} z_m \\ \frac{3h}{2L^2} x_m \end{bmatrix} = \frac{3h}{2L^2} \begin{bmatrix} z_m \\ x_m \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

同样根据弹簧的弹性刚度 $k = \frac{bh^3}{4L^3} E$, 可得该传感系统的固有频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{bh^3 E}{4L^3 m}} \quad (3-35)$$

由锥形光纤传感器原理可得 $\Delta FWHM = k_\varepsilon \varepsilon$, 则

$$\frac{\Delta FWHM}{k_\varepsilon} = \frac{3h}{2L^2} \begin{bmatrix} z_m \\ x_m \end{bmatrix} = -\frac{6Lm}{bh^2 E} \begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

由式 (3-36) 可知, 锥形光纤半峰宽与导线 X 和 Z 方向的位移 x_m 和 z_m 成正比, 且和导线 X 和 Z 方向的加速度 \ddot{x} 和 \ddot{z} 成正比, 从而可以实现输电线路舞动和微风振动的测量。

导线振动一般发生在悬垂线夹前后的半个波距到一个波距之间 (约 20-40cm), 由于导线长期振动会使导线劳损而发生掉线事故。因微风振动的事故经常位于防震锤附近, 因此我们将振动的传感器的安装于防震锤附近为宜。我们直接测量导线离线夹出口 89mm 处的导线振动加速度或位移, 作为衡量线夹出口处导线上微风振动的指标, 有效避免了“能量平衡法”和“传递矩阵法”产生的计算误差, 能准确反映微风振动情况。将之前设计的传感器按图 3-15 所示在两个杆塔之间均匀分布 6 个光纤传感器, 导线舞动或振动加速度传感器安装示意图如下所示。

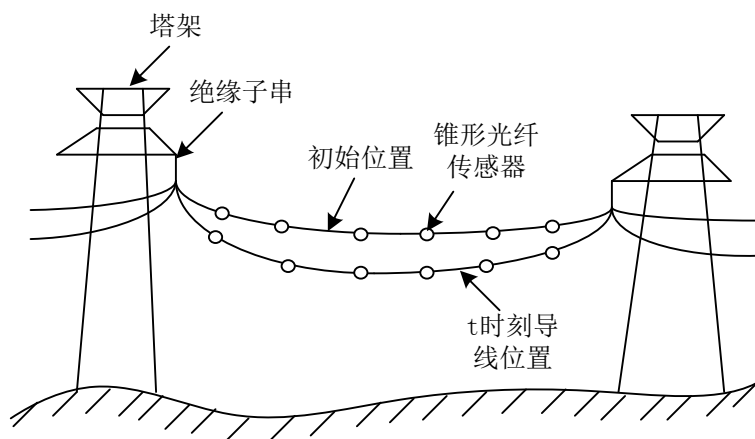


图 3-15 导线舞动或振动传感器示意图

3.2.3 锥形光纤传感器应用于杆塔倾斜

对于输电线路覆冰，锥形光纤传感器监测覆冰的厚度 b 或重量 q_{ice} ；导线舞动或振动，监测 X 和 Z 方向运动位移 x_m 和 z_m 或加速度 \ddot{x} 和 \ddot{z} ；而作为监测输电线路的支撑部分——杆塔，锥形光纤传感器的设计相对比较简单，主要监测杆塔的倾斜角度 θ 。本节设计的锥形光纤倾角传感器结构图如图 3-16 所示。

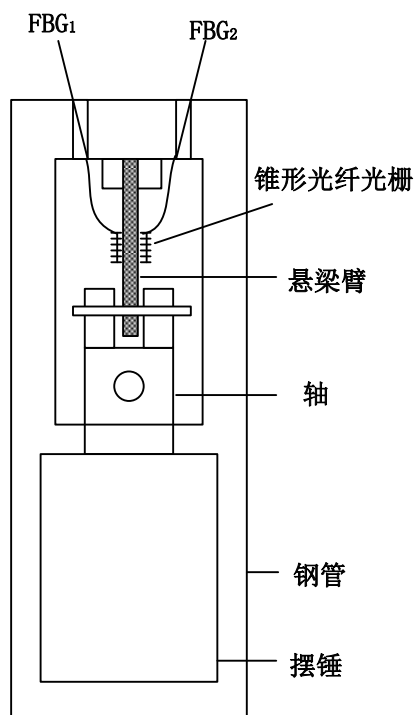


图 3-16 锥形光纤倾角传感器结构图

由图 3-16 所示，将两个锥形光纤光栅对称的安装于悬梁臂两侧，悬梁臂下方通

过轴承悬吊一个摆锤，并且封装于钢管内。为保证锥形光纤光栅与杆塔保持同步形变，钢管两端各留一个钻孔，以保证将该传感装置固定于杆塔上。该结构的原理图如图 3-17 所示。

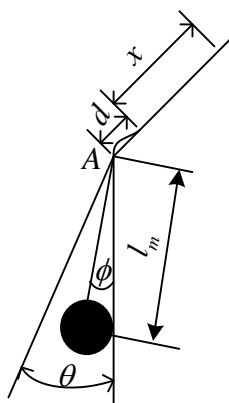


图 3-17 锥形光纤倾角传感器原理图

由图 3-17 所示，与摆锤质量相比，悬臂梁的质量可以忽略不计，假设杆塔倾斜了 θ 角， ϕ 为竖直杆塔与摆锤的夹角，摆锤质量为 m ，悬梁臂的臂长为 x ，悬梁臂产生扰度的力矩为 d ，摆锤到轴承的长度为 l_m 。A 点处的力矩平衡为

$$mgl_m \sin \phi = F \cdot d \quad (3-37)$$

式 (3-37) 中， $F = k \cdot \Delta$ ，其中

$$k = \frac{3EI}{l^3}, \quad \Delta = d \sin(\theta - \phi) \quad (3-38)$$

式 (3-38) 中， E 为悬臂梁的弹性模量； I 为悬臂梁的弯曲惯性距；即

$$kd^2 \sin(\theta - \phi) = mgl_m \sin \phi \quad (3-39)$$

由于 θ 和 ϕ 都很小，所以可以认为

$$kd^2(\theta - \phi) = mgl_m \phi \quad (3-40)$$

式 (3-40) 中， $\phi = \frac{kd^2 \theta}{mgl_m + kd^2}$ 。

距悬梁臂自由度 x 处的应变为

$$\varepsilon = \frac{k\Delta x}{EI} \cdot \frac{h}{2} \quad (3-41)$$

即：

$$\varepsilon = \frac{k h d x}{2 E I} \bullet \frac{m g l_m}{m g l_m + k d^2} \theta \quad (3-42)$$

由 3.1 节可知，锥形光纤传感器的半峰宽 $\Delta FWHM = k_\varepsilon \varepsilon$ ，由于两个锥形光纤对称分布在悬梁臂的两侧，所以认为两个光栅的应变传感系数近似相同，而且两个光栅一个拉伸，一个收缩，则两个应变大小相同，方向相反，即 $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$ ，则

$$\Delta FWHM_1 - \Delta FWHM_2 = k_\varepsilon \varepsilon_1 - k_\varepsilon \varepsilon_2 = 2 k_\varepsilon \varepsilon_1 \quad (3-43)$$

将式 (3-42) 和 (3-43) 联立得锥形光纤倾角传感器的倾角 θ 为

$$\theta = \frac{E I (m g l_m + k d^2)}{k k_\varepsilon m g l_m h d x} (\Delta FWHM_1 - \Delta FWHM_2) \quad (3-44)$$

由公式 (3-44) 即可得杆塔的倾斜角 θ 。

3.3 锥形光纤传感器在输电线路上的布设方案

目前光纤传感技术没有广泛应用于电力线路监测，所以锥形光纤传感器安装于输电线路的方案往往借鉴 FBG 传感器在其他领域的安装、光缆熔接和光缆保护方法。前面已经分别介绍了输电线路覆冰、舞动和杆塔倾角传感器的计算模型和安装位置和原则，接下来我们将监测各个参量的传感器综合起来安装于电网中，即输电线路在线监测硬件方面的布设方案，如图 3-18 所示。

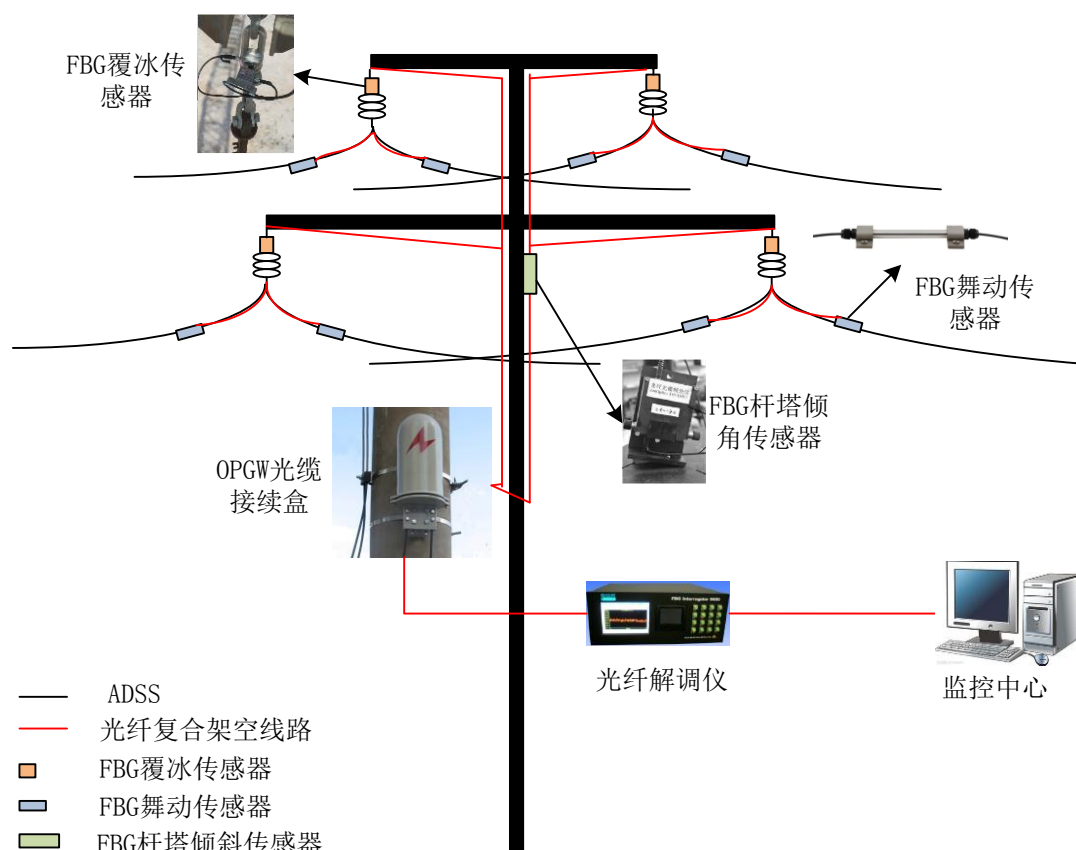


图 3-18 输电线路在线监测硬件布设方案

图 3-18 即为 FBG 传感器在输电线路和杆塔上的位置布设图。图中红线代表锥形光纤传感器发生温度或应力变化时，中心反射波长的传输路径。FBG 覆冰传感器取代球头挂环悬吊于绝缘子串上方，FBG 舞动或振动传感器安装于输电线路最大受力处——导线最容易断裂点，FBG 杆塔倾角传感器自然而然固定在杆塔上，这三类 FBG 传感器均通过光纤连接到 OPGW 光缆接续盒上，将光纤与光网络进行熔接，最后经光纤解调仪接入监控中心。

3.4 本章小结

本章设计研制一种新型的锥形光纤光栅传感器，并将该传感器应用于输电线路在线监测中。本章所设计的锥形光纤光栅实现了用一个传感器解决温度应力交叉敏感问题，解决了光纤传感技术应用于输电线路在线监测的瓶颈问题。之后研究了锥形光纤光栅传感器在输电线路覆冰、舞动、杆塔倾斜中的应用，并设计了 FBG 覆冰传感器、FBG 拉力传感器、FBG 杆塔倾角传感器的结构及在输电线路上的布设方案。

第4章 基于光纤传感技术输电线路在线监测软件设计

上一章节针对输电线路覆冰、舞动、振动、杆塔倾斜等计算模型进行了详细分析与设计，从而得到了输电线路各个监测参量（如：覆冰厚度、舞动加速度、杆塔倾斜角度等）的算法，本章利用其模型算法开发设计了输电线路在线监测的软件。结合电网公司的实际需求，该监控软件采用 Microsoft Visual C++6.0 作为系统研发基础，使用 SQL Server2008 R2 作为数据库。

4.1 输电线路在线监测软件需求分析

以往的输电线路在线监测是采用电信号的传感器进行测量，在强电磁环境下易受到信号干扰和丢失，无法实现参量的精准监测，而本系统利用锥形光纤传感器克服了这些缺点，能实现输电线路各参量的精准测量。

本章设计的监测软件的用户为输电线路安全负责人员，该系统能覆盖 40 公里内所有的输电线路，系统用户界面操作简单、整洁、美观，对于不具备专业知识的用户也很容易上手操作。

输电线路在线监测系统所要完成的功能是采用锥形光纤传感器监测线路的覆冰质量或厚度，舞动的位移或加速度，杆塔的倾斜角等。该系统的原理是通过光纤传感器获得所需物理参量，通过光纤解调仪来解调光信号并传入系统，系统通过第三章研究的算法得到所需的信息，通过相应的表盘将温度，应变等显示出来，并将数据存入数据库，以便日后查看和绘制历史图形。

输电线路覆冰、舞动和振动对线路设施产生恶劣的影响，杆塔倾斜对电网稳定埋下安全隐患，实时监测输电线路和杆塔的各个参量非常重要。针对仪表测量数据和导线所处环境的特点而言，该软件应能实现同步数据的储存和算法分析；对于导线监测者而言，该软件应能实现数据的同步显示和历史数据的生成及对用户的管理；针对项目的特点而言，该软件应能实现监测线路的管理和数据分析；对于仪表的特色而言，该软件应能实现对光纤传感器光信号的解调。因此，研发一整套实用性强的数据监测软件，对输电线路监测和导线覆冰、舞动及杆塔倾斜等的预防具有不可替代的作用。

基于光纤传感技术输电线路在线监测系统由用户管理模块，信号接收模块，系统管理模块及信息显示模块四个部分组成。该系统软件功能模块的架构如图 4-1 所示：

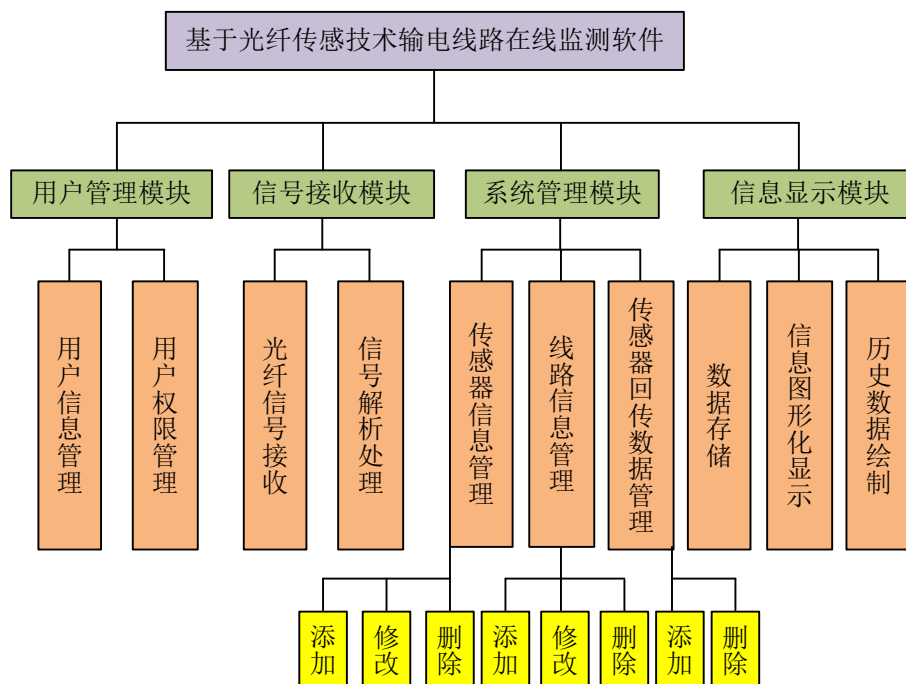


图 4-1 输电线路在线监测软件功能架构

(1) 用户管理模块主要包括用户信息管理和用户权限管理，其中用户管理模块主要管理：

- 1) 用户的基本信息，如修改用户名、修改密码等；
- 2) 用户登录验证，如验证用户名、密码是否存在且正确且密码错误次数不能超过限定值；
- 3) 用户权限，限制用户权限是为了防止普通管理者对监测参量进行了误操作，如修改或删除传感器或导线信息等，故将用户群分为普通管理者和高级管理者，只有高级管理者可以不受用户权限的限制。

(2) 信号接收模块主要包括光纤信号接收和信号解析处理。

1) 光纤信号接收主要是装有监测软件的计算机接收经光纤解调仪转换的数据，解调仪自带通信协议，监测软件通过套接字接收固定地址所传入的数据，这部分很重要，需考虑接收数据的完整性、速率、实时性等。

2) 信号解析处理是对接收到的数据进行对比分析，如：得到覆冰质量或厚度后对覆冰的分析，这部分需要考虑各种可能情况，并对数据进行存档作为历史参考。

(3) 系统管理模块主要包括光纤传感器和线路的信息管理及传感器回传数据管理。

传感器和线路的信息管理主要是对监测的传感器和线路参量进行修改、添加或删除。设计时需注意，在数据库中存在但无需用户关心的一些信息，则没必要显示

出来。线路和传感器之间要有严格的对应关系和逻辑性，防止对应上的错误而造成混乱。

(4) 信息显示模块主要包括数据存储，信息图形化显示和历史数据绘制。

信息显示模块相当于把光纤传感器所测得的数据图形化。图形化显示就是根据不同的物理类型将数据用不同仪表显示出来，使各个监测参量表现的更加直观。

综上所述，基于光纤传感技术输电线路在线监测软件的4个功能模块涉及到了安全管理认证、信号检测与算法分析、数据库管理以及数据图形化显示等方面。基于光纤传感技术输电线路在线监测软件操作的具体流程图如图4-2所示。

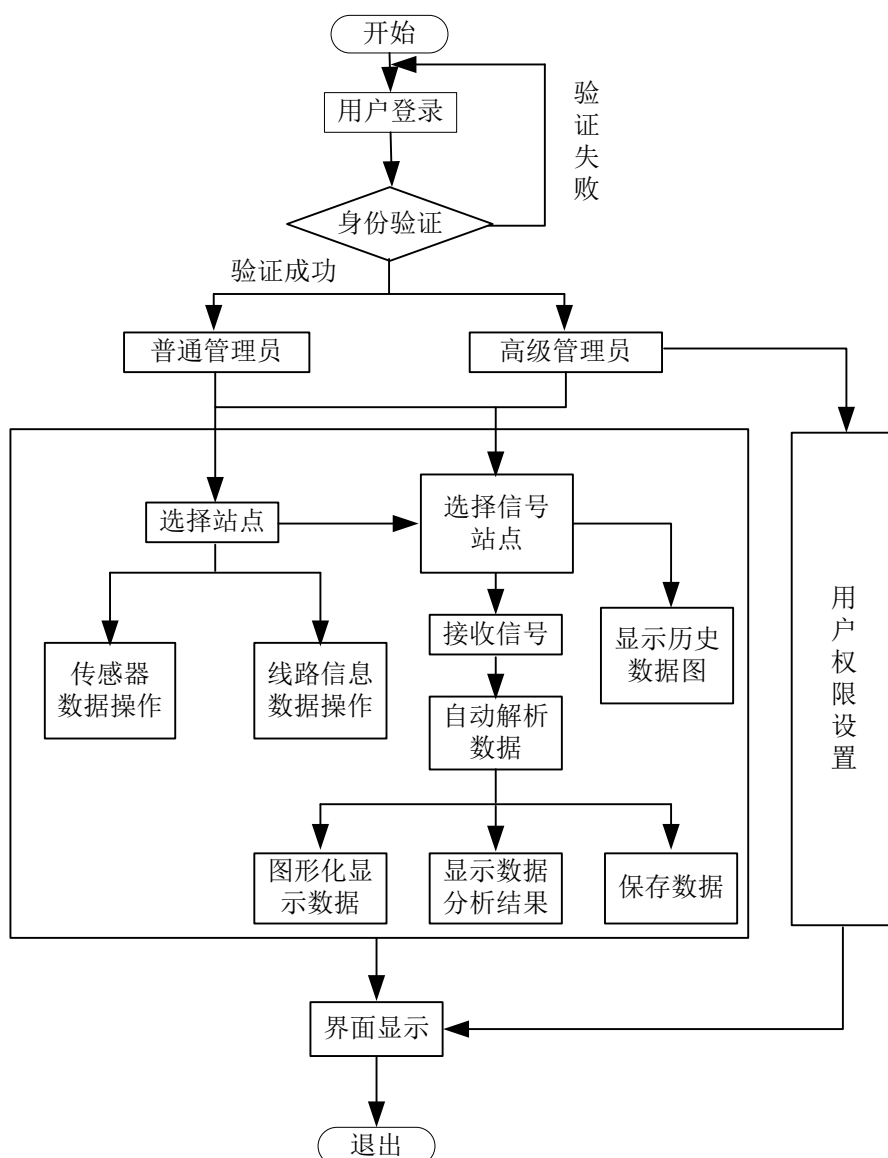


图 4-2 软件流程框图

4.2 用户管理模块设计

根据以往编写软件的经验，用户管理模块需满足：

- 1) 账户密码不能过于简单；
- 2) 账户密码填写错误次数限制；
- 3) 无需在任何地方记录明文密码；
- 4) 填写账户密码时需做好保密工作；
- 5) 密码更改的频率受到限制。

用户管理模块主要用来管理用户登陆验证、管理员身份验证、用户权限的设置以及用户名注册和管理。用户登录验证的作用是验证用户身份。登录软件的用户群分为普通管理员和高级管理员，其中高级管理员拥有设置新用户注册，注销和更改等权限。普通管理员只有登录软件后的使用权，没有设置用户权限的功能。

用户登陆验证以及权限设置与数据库相结合。所有这些用户信息，包括用户名、密码、权限级别都保存在 *SQL* 数据库中。用户登陆软件时首先选择登陆的权限级别，然后将用户名、密码、权限级别与数据库中所存的对应的用户信息比较。若数据库中存在对应的用户名和密码，则验证通过；若不存在对应信息，则验证失败。用户登陆验证流程图如图 4-3 所示。

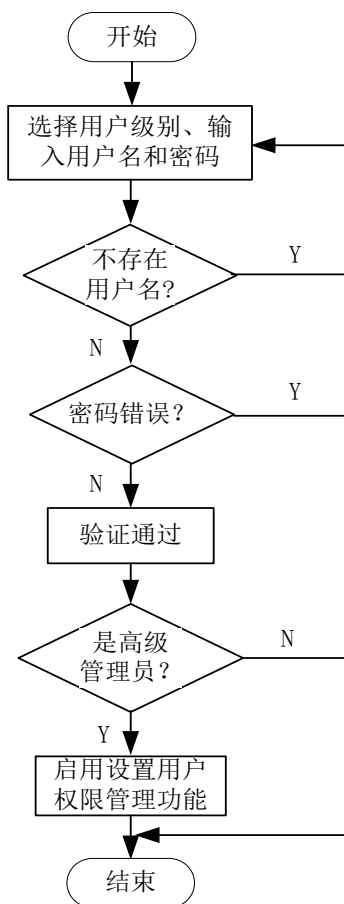


图 4-3 用户登录验证流程图

根据以上流程图，当登录系统前需要对用户的身份进行验证，其登录界面如图 4-4 所示。



图 4-4 监测系统登录界面

4.3 信号接收模块设计

根据以往编写软件的经验，信号接收模块需满足：

- 1) 数据接收前，对通信模块 IP 地址、端口完成配置；
- 2) 采用多线程、网络套接字等技术，对各种不同形式及传输方式的监测参量实现统一的接收；
- 3) 系统对接收的参量数据进行校验。校验成功后向对方监测装置发送应答包。

基于光纤传感技术输电线路在线监测系统使用锥形传感器来测量导线和杆塔的参量，则系统需要接收光信号。本系统采用北京基康有限公司生产的光解调仪 FBG8210 来解调光信号，FBG8210 采用光纤光栅节点作为分布测量点，具有很高的环境适应性、稳定性、测量重复精度及可扩展性，满足系统对信号精度的要求。

开始通信时，将 FBG8210 通过光网络与装有监测系统的电脑相连接，FBG8210 可将接收到的光信号通过以太网以报文的形式发送给电脑，电脑采用了 SOCKET 技术来接收以太网信号，FBG8210 与电脑通信采用了 TCP 协议通过 3 握手后开始发送数据。

首先电脑要向 FBG8210 发出请求命令，FBG8210 将根据命令的不同做出不同的回应。请求命令有很多如：传感器数据请求，解调仪版本请求等等。随后监测系统的接收模块根据 FBG8210 给定的报文形式将传感器信号取出，此时取出的数据即锥形光纤传感器的波长，通过相对应的算法后数据将变成覆冰厚度、舞动加速度等，最终将数据送往管理模块。系统采用多线程的技术来接收网络所传送的报文，以至

于不影响其他功能模块的正常运行。信号接收模块的流程图如图4-5所示：

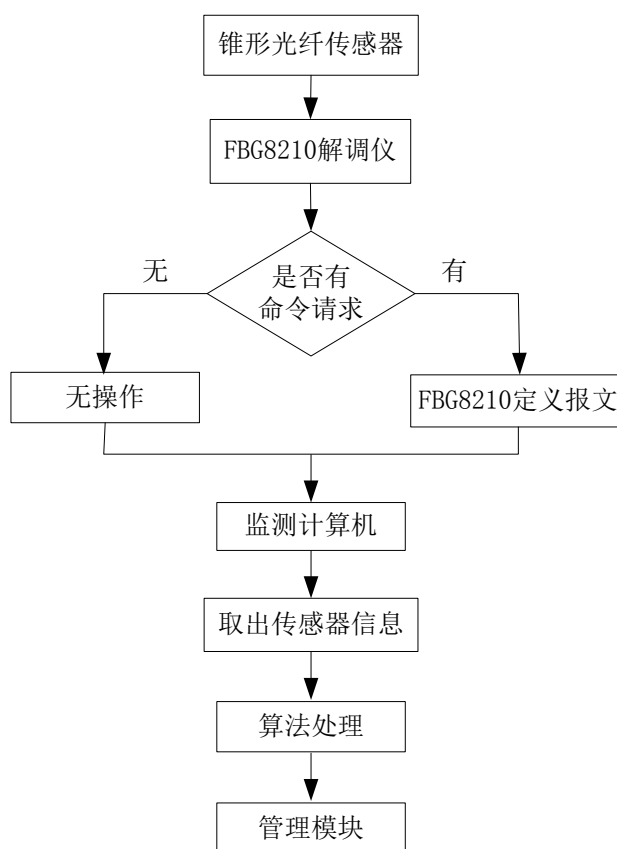


图 4-5 信号接收模块软件流程图

4.4 系统管理模块设计

根据以往编写软件的经验，系统管理模块需满足：

1) 信息的管理是实现对监测导线和锥形光纤传感器的添加、修改和删除。这一类数据作为监测平台的基础性数据，其特点是原子性和独立性较强，需通过基础数据的ID字段和名称字段建立索引等技术手段来提高查询速度。

2) 软件设计时需考虑，在数据库有对应条目的一些信息而用户无需关心，则这些信息就不需要显示出来。导线、杆塔和传感器之间的对应关系要有严格的逻辑性，以免对应错误造成混乱。

系统管理模块是整个系统良好运行的核心，模块的主要功能是管理并保存传感器、导线信息。

传感器管理的功能是为了明确传感器与线路、杆塔和数据之间的对应关系，并统一调配所有参与测量的传感器的信息。传感器管理主要包括在系统运行中可能碰到的传感器的添加、修改和删除等功能，例如：系统中新增加的传感器需要输入详

细的信息使其能够与实际已经安装的传感器相连接，其输入的信息包括：传感器测量的类型、波长范围、灵敏度、安装线路等；当某些传感器发生故障需更换或是拆除时，系统中可以通过修改和删除来完成。

线路信息管理的主要功能是对所有被监测的线路进行统一的管理，在管理的过程中把线路分为了两个部分：线和塔。线是以城市为区间的输电线路，详细定义如：线路起始于 A 城市终止于 B 城市则该线路的名称为 AB 线。而在 A 到 B 城市的区间内还包含许多县，乡镇及山村等区域，这些区域的输电线路统一用“塔”来定义，如在 AB 线中的某个地区的 C 号杆塔上安装了锥形光纤传感器，则在系统输入传感器信息时就要注明监测的线路是 AB 线的 C 塔，所有的监测输电线路都以“塔”为基础单位进行管理，以“线”为单位进行区域划分。当要监测一条新的输电线路时要在系统中输入其对应的线路和杆塔信息，若不需要再监测，则在系统中删除其相对应的资料，以杆塔查询为例如图 4-6 所示。



图 4-6 杆塔查询

传感器回传数据管理是对整个系统中的传感器测量到的数据进行存储和调用，数据将根据每个传感器所在的杆塔自动分类并将其对应的数据录入数据库对应的表中，录入的同时图形显示模块将数据取出并实时显示在表盘上。

综上所述，系统管理模块主要功能是在系统中是把所有被监测的线路、支撑线路的杆塔、线路及杆塔上的传感器及测量到的参量数据建立一个档案，存于数据库中。另外还有一个问题是如何避免中心反射波长的混叠，以免出现无法区分数据来

自哪个传感器的致命错误。

由于系统中设计了线路信息管理模块，所以可以区分不同的通道内的不同线路上的传感器参量，但是光纤光栅解调仪是所有传感器在同一时刻监测到的数据信息，我们还需保证在同一输电线路上的多个传感器的中心反射波长各自独立，不能叠加。例如：在某一通道内 AB 线路上有 6 个光纤传感器，通过一条光纤复合电力线传输到 FBG8210 解调仪上，则这 6 个光纤传感器必须拥有各自独立的中心反射波长且互不相交，才能得到同一条导线上不同传感器唯一的波长值。如果想要得到某个光纤传感器的监测数据则必须先从数据库的传感器信息管理表中取出该光纤传感器所对应的中心反射波长范围进行比对，最后计算出结果。如若不对传感器反射波长进行区分，则无法得到结果，例如：倾角和加速度两个传感器的波长区间混杂在一起后，如果测量的结果刚好位于交叠区间内，则系统无法分辨出到底是哪一个传感器的监测结果而向程序发送错误的信息，为在线监测带来困扰，由此可以看出对光纤传感器的管理是非常重要的，系统管理模块程序设计流程图 4-7 所示。

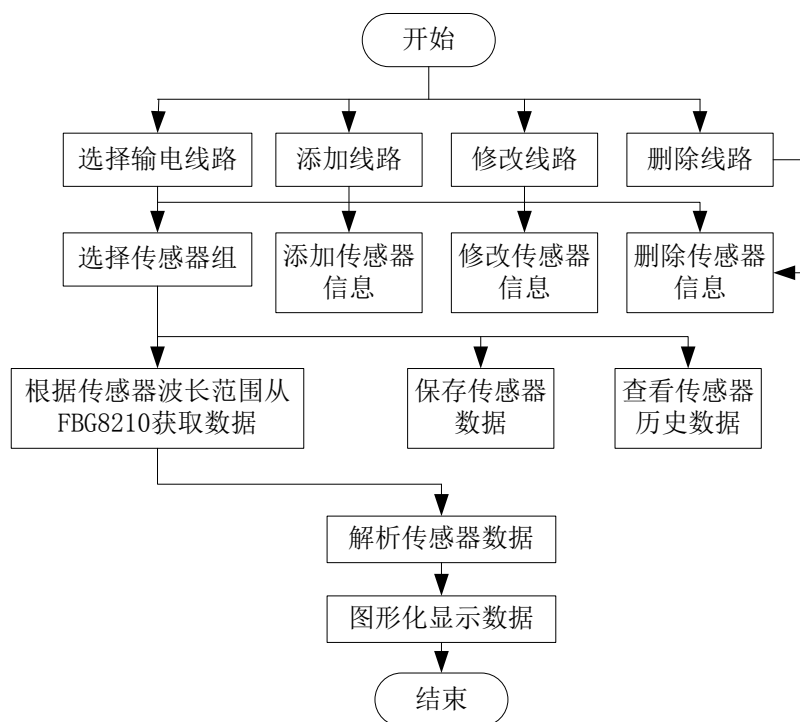


图 4-7 系统管理模块程序设计流程图

4.5 信息显示模块设计

根据以往编写软件的经验，信息显示模块需满足：

- 1) 表盘设计时应避免用户长时间观察造成的眼部疲劳，所以在颜色选取上应

以淡色为主，颜色种类不能太多，且表盘与背景色不能有太大的颜色反差，以免用户产生视觉误差；

2) 整个界面的排版要整洁、有条理，且表盘之间应保持适当的距离，避免拥挤感。按照功能不同，将界面划分区域，且根据功能的重要性分配所占区域的大小和位置；

3) 图形的显示与监测数据之间应准确、连贯的对应；

4) 图形显示的各个子模块之间应能顺利进入与退出等。

信息显示即为将数据解析模块处理过的参量数据采用仪表这一直观的方式呈现给用户，并将以合理友好的方式将其辅助信息、统计和分析结果按照行业标准显示出来，帮助工作人员实时了解线路情况，为线路的稳定运行提供保障。

监控中心的管理采用树形图进行显示。输电线路的整个系统下面包含了各种线路，线路下面又包含了各个杆塔。树形图的数据显示是提取线路管理数据表中的信息后绘制而成的，系统每次启动时都会到线路管理数据表中提取新的线路信息，如果表中有添加、修改或删除的操作，树形图都可以如实显示。将数据库中的线路数据表读取到TXT文本中，根据线路的大小级别对其进行编号，根据选中杆塔的不同，表盘调用不同的数据表，且显示相对应站点的监控数据。

信息显示模块即为将锥形光纤传感器监测到的数据通过仪表的方式显现出来，首先将系统接收到的监测波长数据通过上一章计算模型转换成具体的参量数值，参量数值应先被写入数据库中的传感器管理表中，之后再传输给信息显示模块将其显示出来，这一顺序是为了将所有数据存入数据库中以便记录历史数据走势，从而避免信息显示完之后之前传递过来的数据。

数据实时显示界面是将所有接收的数据按照测量类型的不同用不同的表盘显示出来如：（温度、舞动幅值、覆冰厚度等），表盘能实时刷新以保证数据的实时性，而且仪表的显示为当前所选中线路的数据。历史数据走势图是将保存的历史数据按照不同的数据类型以图表的形式显示出来。

信息显示模块的实现是通过VC++6.0软件的绘图功能绘制显示的仪表盘，整个仪表盘采用GDI+控件绘制，GDI+本身带有的GDI绘图时存在锯齿，绘制的仪表缺乏美观与真实感，恰恰GDI+具有反锯齿功能，其能够有效的解决此类难题，以绘制出光滑且美观的仪表。GDI+是GDI的继承者，它在GDI的基础上添加了许多新功能如：渐变画刷、抗锯齿、混合等，所以GDI+功能更加完善，更加实用。绘制仪表盘时按照指针、背景、刻度分别进行绘制。将监测物理量的最大值与最小值作为刻度的两个极值，其余刻度则均匀的刻画在两极值之间。仪表背景则根据不同的表盘颜色设计不同的样式进行绘制。表盘指针通过定时器进行控制，定时器每隔0.5秒从数据表中提取最新的数据以达到实时动态显示的效果。信息界面显示如

图4-8所示。



图 4-8 信息模块界面显示

4.6 本章小结

本章基于第三章输电线路覆冰、舞动、杆塔倾斜等参量的算法研究，设计了基于光纤传感技术输电线路在线监测软件的4大模块——用户管理模块、信号接收模块、系统管理模块和信息显示模块，并详细介绍各个模块的功能以及实现，为光纤传感器应用于其他领域提供了理论依据。

第 5 章 结论与展望

5.1 本文总结

本文结合电网发展现状，针对目前输电线路在线监测系统存在的技术难题，提出了将光纤传感技术应用于输电线路在线监测系统。鉴于光纤应用于监测系统存在光纤传感器温度应力交叉敏感问题，本文自主研制了锥形光纤光栅传感器，通过 Matlab 仿真实验验证了其可行性。然后将其应用于输电线路覆冰、舞动、杆塔倾斜等运行状态中，结合各个运行状态算法设计了输电线路在线监测系统软件。

本文主要完成了以下几项工作：

(1) 通过对目前电网进行调研，明确了课题研究目的和意义，并阐述了光纤传感技术和输电线路在线监测的国内外发展及研究现状。

(2) 介绍光纤传感技术原理及输电线路在线监测原理。

介绍光纤光栅耦合模理论和传感器原理，研究利用两个光纤传感器解决温度应力交叉敏感问题，深入研究利用光纤光栅传感技术输电线路在线监测系统架构，并介绍输电线路各参量（覆冰、舞动等）的产生机理和选点原则。

(3) 自主设计一个锥形光纤光栅传感器。

设计一种新型锥形光纤光栅传感器解决温度应力交叉敏感问题，该传感器与监测装置固定在一起，随监测点运动而运动，经 Matlab 仿真证明，其可以将监测点温度和应力的值区分开。得到温度和应力值之后，将该传感器应用于输电线路在线监测，得到研究输电线路覆冰厚度，舞动水平和垂直方向的加速度，杆塔倾斜角度的算法及其监测装置。

(4) 设计了基于光纤传感技术输电线路在线监测系统软件。

该软件由 4 大模块组成分别为：用户管理模块、信号接收模块、系统管理模块、信息显示模块。结合之前各个参量覆冰厚度、舞动加速度、杆塔倾斜角度算法的研究对各个模块进行了设计和实现。

(5) 对整个输电线路监测方案进行总结，并提出了将锥形光纤光栅传感器应用于电网其他部分，如发电网、配电网等的设想与展望。

5.2 课题展望

输电线路在线监测研究还处于初步阶段，在应用上只是些许的试点工程，而且大部分是利用无线传感器进行信号采集，很少有应用光纤传感器来监测状态量的。随着我国智能电网的快速发展，光纤入户的大面积普及，光纤通信的优势将逐步显

现出来，而且未来的电网必然是以可靠性高，抗电磁干扰能力强，速度快的光纤作为主要传输介质。本文只是利用光纤解决输电线路的在线监测问题，之后的研究课题是将光纤传感技术应用于电网其他领域，如：发电环节、变电站、配电网、用电等参量的监测。总而言之，对输电线路的监测研究只是一个开端，结合智能电网，将现有的电网改造成全光网络，实现电网全部光纤信号传输任重而道远。

参考文献

- [1] Hyunbum Kim, Jorge A.Cobb. Simultaneous Optimization Of Transmission Range and Actor Movement in WSAWs[J]. Wireless Ad Hoc and Sensor Networks Symposium, 2012, 4(12): 985-989.
- [2] 洪义旺, 宋佳, 张波, 等. 基于无线传感器网络的光伏组件监测系统[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(1): 36-38.
- [3] Chakraborty. A , Khargonekar. P.P. Introduction to wide-area control of power system[J]. American control Conference(ACC), 2013, 3(15): 356-359.
- [4] Chang.J, Gara.L, Fong. P, Kyosey.Y. Application of a multifunctional distance protective IED in a 15KV distribution network[J]. Protective Relay Engineering, 2013, 5(11): 150-160.
- [5] 孙凤杰, 赵孟丹, 刘威, 等. 架空输电线路在线监测技术研究[J]. 南方电网技术, 2012, 6(4): 17-21.
- [6] Salehi. V, Mohammed. O. Real-time voltage stability monitoring and evaluation using synchrophasors[J]. North American Power Symposium(NAPS), 2011, 12(6): 1-7.
- [7] Jacob. N. D, McDermid. W. M, Kordi. B. On-line monitor of partial discharges in a HVDC station environment[J]. Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 2(10): 925-935.
- [8] 栗鸣, 徐拥军. 光纤光栅传感技术用于架空输电线路状态监测[J]. 电力系统通信, 2012, 33(241): 59-64.
- [9] RajuChintakindi, Sri.P.SrinathRajesh. Vital Role of FBG Sensors—2012 Developments in Electrical Power Systems[J]. 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), 2013, 3(10): 478-483.
- [10] 赵大伟, 洪晓斌, 黄国建, 等. 基于 Web 的输电线路监测平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(4): 801-803.
- [11] Xinliang Jiang, Ze Xiang, Zhijin Zhang. Predictive Model Equivalent Ice Thickness Load on Overhead Transmission Lines Based on Measured Insulator String Deviations[J]. Power Delivery, 2014, 5(6): 1659-1665.
- [12] Claudio Floridia, Flávio Borin, João B. Rosolem, et al. Temperature independent electrical field optical grating based sensor for high voltage applications[J]. International Microwave & Optoelectronics Conference, 2007, 32(12): 4-7.
- [13] Anbhawa Nand, Daniel J. Kitcher, Scott A. Wade, et al. Strain-independent Temperature Measurements using a Standard and a Chirped fiber Bragg Grating[J]. Optical Fibre Technology/Australian Optical Society, 2006, 2(31): 51-53.
- [14] 姚庆梅, 张天亮, 李冰, 等. 输电线路杆塔接地电阻在线测试仪的设计[J]. 微计算机信息, 2012, 28(10): 131-133.
- [15] 李立程, 阳林, 郝艳捧. 架空输电线路覆冰在线监测技术评述[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 241-242.

- [16] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 109-131.
- [17] 薛志航. 基于光纤传感器的架空线路覆冰在线监测系统的设计与实现[D]. 四川: 电子科技大学, 2012.
- [18] Hui Yu, Xiufeng Yang, Zhengrong Tong, et al. Temperature-Independent Rotational Angle Sensor Based on Fiber Bragg Grating[J]. IEEE SENSORS JOURNAL, 2011, 11(5): 1233-1235.
- [19] 史鹏翔, 贾书丽, 李晨露, 等. 光栅振动解调技术在输电线运动监测中的应用[J]. 电力系统通信, 2011, 32(230): 1-4.
- [20] 李路明, 孟小波, 张治国, 等. 基于光纤光栅应变传感器的架空输电线弧垂实时监测[J]. 电力建设, 2011, 32(7): 51-54.
- [21] Nath. S, Pal. S. A novel technique for determination of voltage stability margin[J]. System Safety, 2010, 3(15): 1-5.
- [22] 李正明, 张钰, 王政. 基于 WSN 的输电线路覆冰在线监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2013, 2(12): 46-48.
- [23] 王凯, 蔡炜, 邓雨荣. 输电线路在线监测系统应用和管理平台[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1274-1277.
- [24] 赵子岩, 刘建明, 张凯穗. 电力系统光纤传输网络在线监测系统[J]. 电力系统通信, 2003, 3(2): 1-4.
- [25] Amin Moghadas, Ronald Barnes, Mehdi Shadaram. An Innovative Fiber Bragg Grating Sensor Capable of Fault Detection in Radial Power Systems[J]. Systems Conference, 2010, 1(4): 32-37.
- [26] Tarun K.Gangopadhyay, Mukul C.Paul, LeifBjerkkan. Fiber-optic sensor for real-time monitoring of temperature on high voltage(400KV)power transmission[J]. ELECTRONICS LETTERS, 2009, 7 (4) : 23-25.
- [27] LeifBjerkkan. Application of fiber-optic Bragg grating sensor in monitoring environmental loads of overhead power transmission lines[J]. APPLIED OPTICS, 39(42000): 14-18.
- [28] Madhan T Chalapathi, P K Pattnaik. A Method to Discriminate Strain and Temperature in Fiber Bragg Grating Sensors[J]. Sensors for Industry Conference, 20(3417): 63-66.
- [29] Kai Ni, Xinyong Dong. Temperature-Independent Fiber Bragg Grating Tilt Sensor[J]. Photonics and Optoelectronic (SOPO), 2010, 4(6): 1-3.
- [30] Bai-Ou Guan, Hwa-Yaw Tam, Shun-Yee Liu. Temperature-Independent Fiber Bragg Grating Tilt Sensor[J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2004, 16(1): 2-6.
- [31] 卢涛. 基于组态软件与光纤光栅传感技术监测系统在铁路上的应用[J]. 微型机与应用, 2010, 29(14): 96-98.
- [32] 杨之望, 薛伍德. 架空输电线路的在线监测[J]. 华东电力, 2013, 41(4): 0780-0784.
- [33] 刘丽容, 王玉东, 肖智宏, 等. 输电线路在线监测系统通信传输方式研究[J]. 电力系统通信, 2011, 32(222): 20-23.
- [34] 黄会贤, 陈新岗, 汪能文, 等. 输电线路绝缘子闪络在线监测系统[J]. 重庆理

- 工大学学报, 2013, 27(1): 82-84.
- [35] 梁艺军, 刘志海, 杨军, 等. 测量微振动的光纤 Sagnace 干涉传感器[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(1): 118-120.
- [36] 郭涛, 曹建, 安晨光, 等. 基于 BS 架构的 DGA 在线监测数据平台设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(8): 82-84.
- [37] 皇甫晓洪, 刘月明, 刘涛, 等. 基于虚拟仪器的高温压力管道光纤光栅应变监测软件设计[J]. 仪表技术与传感器, 2013, 4(3): 47-49.
- [38] Abeykoon. A, Udawatta. L, Fonseka. M. Enhanced position sensing device for mobile robot application using an optical sensor[J]. Mechatronics(ICM), 2011,7(6): 597-602.
- [39] Woo-Seong Che, Kyong-Woo Kim. An intensity function for inclined multimode optical fiber sensor[J]. Electronic, Control, Measurement and Signal(ECMS), 2011, 3(1): 1-6.
- [40] Mohebbi. M, Khormaei. H. Modeling of an optical sensor for detection of nanoparticles at 1550nm[J]. Electrical Engineering(ICEE), 2012, 6(11): 36-40.
- [41] Pop. S, Clasci. I. Modeling the light of LED for position detection with an optical sensor[J]. Electrical Technology(ISSE), 2010, 2(15): 374-377.
- [42] Boonruang. S, Mohammed. W. Integrated diffractive optical elements for optical sensors applications[J]. Photonics(ICP), 2011, 16(3):53-59.
- [43] Aunhathaweesup. Y, Leelasantitham. A. Development of optical sensor device for pedobarograph acquisition[J]. Electrical Engineering Congress(IEECON), 2014, 5(6): 1-4.
- [44] 蒋奇, 隋青美, 马宾. 单模光纤耦合传感器的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2657-2659.
- [45] 李高健, 王晓峰. 基于 GIS 的复合海缆监测系统设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(9): 185-187.

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

研究生期间共发表 4 篇学术论文，一篇中文核心期刊，一篇 EI 核心期刊，两篇国际会议期刊，分别如下：

- [1] 邸剑，陈天英. 锥形光纤光栅传感器交叉敏感问题的仿真研究[J]. 光通信研究, 2014, 4(184): 64-66.
- [2] DI Jian, HOU Yang-jun, CHEN Tian-ying. High-speed and High-resistance-tolerance Fault Component Ground Distance Relay for UHV Double-circuit Transmission Line[J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 13(12): 2203-7.
- [3] Jian Di, Tianying Chen, Yangjun Hou. Review of Transmission Network Planning in Market Environment[J]. 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2013, 2(10): 1-5.
- [4] Jian Di, Tinaying Chen. Power Quality Signal Detection Analysis Based on HHT[J]. International Academic Conference on the Environment, Energy and Power Engineering(EEPE2014), 2014, 396-402.

致 谢

感谢我的导师邸剑高工在科研和学业上都给了我许多指导和支持，让我能够顺利完成研究生学业并取得较好的成绩。邸老师严谨的治学态度让我们敬佩，对学生润物无声的关爱更让我们感动。在日常生活中，邸老师经常教导我要德行并重，树立正确的人生观和价值观。总之，在邸老师的指导下，我度过了饱满的研究生时光，使我终生受益。

感谢朝夕相处的同学们，感谢同在一个实验室的师弟、师妹。我们亲如兄弟姐妹，一起感受集体生活的点点滴滴，我们同舟共济，一起沐浴着青春的阳光，我们之间的情谊是我人生道路上一笔宝贵的财富。

感谢华北电力大学对我多年的培养。华北电力大学计算机系严谨的学风、蓬勃的朝气令我终生难忘。

感谢我的父母、亲人和朋友。他们无私的付出和殷切的期望是我成长路上的巨大动力。我深深体会到亲情、友情的厚重和温馨。

最后，感谢答辩委员会的所有老师评阅我的论文。