

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19920121152742

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

一种用于高压断路器的光纤温度传感
技术与应用

A Technology and Application of Fiber Temperature
Sensor for High Voltage Circuit Breaker

单晓宇

指导教师姓名: 关明杰副教授 陈文蓁教授

专业名称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2015 年 04 月

论文答辩时间: 2015 年 05 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015 年 04 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

随着中国经济的高速发展，电网规模的日益庞大，高压断路器作为电力系统中必不可少的电气设备之一，其工作状态是否正常关乎整个电力系统能否安全高效地运行。为了避免高压断路器因电阻过大或其他故障引起的局部温度超过国家标准而引发停电、火灾等大规模事故，对高压断路器的温度进行实时监测是十分必要的。

针对 10KV 断路器在线温度监测难的问题，本文提出一种基于反射式强度调制的光纤温度传感系统。本温度传感系统具有非接触、抗电磁干扰能力强、安装便利、性能稳定等优点，此外，本文选用双金属片作为温度敏感元件，价格低廉，适于大规模批量生产。本光纤温度传感系统利用双金属对温度敏感变形的特性，将温度的变化量调制到接收光纤输出的光通量上，通过对红外接收管输出电压的检测，实现对温度的测量。文中详述了反射式强度调制型光纤温度传感器的理论基础，通过理论推导和仿真，证实了测量系统输出电压与温度变化具有线性相关性。根据所建立的数学模型，给出了具体的温度传感探头结构，提出一种基于低功耗 AVR 单片机 ATmega16 的红外传输通信技术。针对本文所述的测温系统，设计出相关的实验装置，并在 ICCAVR 的开发环境下利用相关实验装置进行了 30-120℃ 温度范围内的测试实验。

本文最后给出了传感器在断路器触头的安装方法及实验结果。实验结果与理论推导吻合，且显示出较优秀的特性，其测量误差优于 5%，重复性良好。

关键词：断路器触头测温；温度传感器；光纤；双金属

Abstract

With the rapid development of China's economy, the scale of the grid is expanding fast. As one of the indispensable electric equipment in power system, high voltage circuit breaker's normal working state can influence whether the whole power system can run safely or efficiently. The part-temperature of the high voltage circuit breaker will be higher than the national standards when there is too much resistance or other faults, and this situation may lead to some serious accidents such as power failure and fires. In order to avoid these accidents, it is necessary to build a system to achieve the temperature real-time monitoring of the high voltage circuit breaker.

In order to achieve on-line temperature monitoring to the 10KV circuit breaker, this paper puts forward a kind of optical fiber temperature sensor system, which is based on the changing of reflective intensity modulation. As a kind of fiber optic temperature sensor, this design has many advantages such as non-contact, capability of anti-electromagnetic interference, convenient installation, performance, stability etc. In addition, a bimetal strip, which has a low price, is used as the temperature sensitive element. So it can save costs and this sensor is suitable for mass production. In this system, the luminous flux of the receiving optical fiber will be changed when the bimetal deforms following the temperature changing. And through detecting the voltage of the infrared receiving tube, we could achieve the measurement of the temperature. This paper introduces the theoretical foundation of the reflective intensity modulated fiber optic temperature sensor in detail. Through the theoretical analysis and simulation, we have confirmed that there is a linear relationship between the measuring system output voltage and temperature variations. According to the mathematical model, this paper shows the specific structure of this temperature sensing probes, proposes an infrared transmission communication technology based on low-power microcontroller ATmega16 AVR and designs the related experiment

devices. In this paper, under the environment of ICCAVR, a number of experiments have been tested by related experimental device within the experimental temperature range of 30-120 °C.

Finally, this paper shows the installation method of this temperature sensor on the circuit breaker contacts. The experimental result is in conformity with the theoretical derivation and shows the more excellent features. Moreover, it indicates that this system has a measurement error better than 5% and good repeatability.

Keywords: temperature measurement for circuit breaker; temperature sensor; optical fiber; double metal

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题的研究背景和意义	1
1.2 常用测温方法比较	1
1.3 光纤传感器概述	5
1.3.1 光纤传感技术的发展.....	5
1.3.2 光纤传感器的原理与分类.....	7
1.4 双金属片概述	8
第二章 反射式强度调制型光纤传感器原理	10
2.1 光纤传光原理	10
2.2 光纤纤端光场分析	12
2.2.1 均匀分布.....	12
2.2.2 圆台分布.....	13
2.2.3 高斯分布.....	13
2.2.4 准高斯分布.....	14
2.3 单光纤对反射式光强调制模型	15
2.3.1 光强调制函数介绍.....	15
2.3.2 单光纤对反射式光强调制模型.....	16
2.4 本章小结	15
第三章 反射式光纤温度传感器结构与数学模型	20
3.1 反射式光纤温度传感器结构设计	20
3.2 反射式光纤温度传感器数学模型	20
3.2.1 热双金属的悬臂梁力学模型.....	20
3.2.1 收发光纤的补偿模型.....	22
3.2.3 传感器数学模型.....	26
3.3 本章小结	31

第四章 光电信号处理系统硬件选取与设计	31
4.1 关键硬件部件选取	32
4.1.1 光源的选取.....	32
4.1.2 光电探测器的选取.....	34
4.1.3 光纤的选取.....	38
4.1.4 热双金属片的选取.....	39
4.2 光电信号系统的硬件设计	40
4.2.1 嵌入式系统与微控制器简介.....	40
4.2.2 微控制器最小单元设计.....	43
4.2.3 测量电路设计.....	47
4.3 本章小结	53
第五章 光电信号系统软件设计	53
5.1 软件系统开发环境介绍	54
5.2 系统软件结构	55
5.2.1 系统初始化.....	56
5.2.2 A/D 转换程序设计.....	56
5.2.3 红外信号调制程序设计.....	57
5.2.4 串口通信程序设计.....	58
5.3 本章小结	59
第六章 系统性能测试与结果分析	60
6.1 软硬件调试	60
6.2 实验平台搭建和测试结果分析	61
6.2.1 实验平台搭建与实验方法.....	61
6.2.2 实验结果分析.....	61
6.2.3 传感探头在断路器中的测试实验.....	66
6.3 本章小结	68
第七章 总结与展望	69
7.1 总结	69

7.2 展望	69
参考文献	71
致谢.....	74
攻读硕士学位期间研究成果	75

厦门大学博硕士论文摘要库

Content

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background and Value	1
1.2 Comparison between Different Methods for Temperature testing	1
1.3 Summary of Optical Fiber Sensor	5
1.3.1 Development of Optical Fiber Sensing Technology	5
1.3.2 Principles and Classification of Fiber Optic Sensor	7
1.4 Bimetal Overview	8
Chapter 2 The principle of reflective intensity modulated fiber optic sensor	10
2.1 Fiber Optical Transmission Theory	10
2.2 Analysis of the Optical Fiber Endsurface	12
2.2.1 Distribution of Uniform	12
2.2.2 Distribution of Frustum of a Cone	13
2.2.3 Distribution of the Gaussian	13
2.2.4 Distribution of the Quasi Gaussian	14
2.3 Reflective Intensity Modulation Model	15
2.3.1 Description of the Intensity Modulation Function	15
2.3.2 Reflective Intensity Modulation Model of the Single Couple of Fiber	16
Chapter 3 Structure and Mathematical Design of the Reflective Optical Fiber Temperature Sensor	20
3.1 Structure Design of the Reflective Optical Fiber Temperature Sensor	20
3.2 Mathematical model of the Reflective Optical Fiber Temperature Sensor	20
3.2.1 The Mechanical Model of Cantilever Beam of Bimetal	20
3.2.1 The Model of Compensating Optical Fiber	22
3.2.3 Mathematical Model of the Temperature Sensor	26
Chapter 4 Selection and Design of the Photoelectric Signal Processing Hardware System	31
4.1 The hardware selection	32

4.1.1 Selection of the Light Source.....	32
4.1.2 Selection of the Photoelectric Detector.....	34
4.1.3 Selection of the Optical Fiber	38
4.1.4 Selection of the Bimetal.....	39
4.2 Design of the Photoelectric Signal Processing Hardware System	40
4.2.1 Introduction of Embedded System and Micro Controller.....	40
4.2.2 Unit Design of the Micro Controller.....	43
4.2.3 Design of the Measuring Circuit.....	47
Chapter 5 Design of the Photoelectric Signal Processing Software System	53
5.1 Introduction of the Software IDE.....	54
5.2 Software Structure of the System.....	55
5.2.1 System Initialization	56
5.2.2 Design of A/D Conversion Program.....	56
5.2.3 Infrared Signal Modulation Program	57
5.2.4 Design of Serial Port Communication Program	58
Chapter 6 Testing Performance and Result Analysis	60
6.1 Software and Hardware Debugging.....	60
6.2 Experimental Platform Structures and the Analysis of Test Results.....	61
6.2.1 Experimental Platform Structures and testing methods.....	61
6.2.2 Analysis of Test Results.....	61
6.2.3 Test on the High Voltage Circuit Breaker	66
Chapter 7 Summary and Outlook.....	66
7.1 Summary.....	66
7.2 Outlook.....	66
References.....	69
Acknowledgements	74
Introduction of Achievement in Scientific Research.....	75

第一章 绪论

1.1 课题的研究背景和意义

19 世纪中期第二次工业革命以后人类社会进入了电气时代，电能被广泛应用于各种领域，电力逐渐成为推动科学进步、国民经济发展的重要力量，各国电力系统向着高电压、大机组以及大容量方向迅猛发展。电力设备安全、平稳、可靠地工作才能保证整个电网安全可靠地运行。高压断路器作为高压开关柜内的核心部件，在整个电力系统中发挥着必不可少的作用。高压断路器正常工作时，能够接通或关断流经高压断路器的高压线路中的空载或负荷电流，当系统中出现异常情况时，高压断路器可以与其他保护设备及自动装置相配合，快速切断异常电流，避免事故进一步恶化，为电力系统安全有效地运行提供保障。

高压断路器在实际运行时，由于电阻和介质损耗会有正常的发热现象，但是当设备的导电接点或触点因为松动等原因引起接触电阻增大或存在其他故障时，会导致局部过热，从而可能造成其性能受到破坏，危及整个系统的正常运转^[1]。

国家标准 GB/T 11022-2011《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》中要求在空气中高压开关设备和控制设备裸铜或裸铜合金触头处所允许的温度最大值为 75℃，为了避免因导电连接处温度超过最高标准而引起电力系统受损，或者由于局部温度过高从而导致用户大面积停电，甚至发生火灾等安全事故，在高压开关柜，特别是高压断路器导电连接处设置温度传感器，是保证电力系统正常运转，保障企业正常生产运作，减少经济损失的必要举措。

1.2 常用测温方法比较

温度作为在工农业生产、科学研究等各个领域的一项重要物理参数，其检测的准确性关系到设备的有效控制和生产的安全。对于温度的检测，很早以前就开始了研究，如热电偶、热敏电阻、光学高温计等传统的温度测量技术已大量应用在各个领域。

1. 热电偶温度传感器

热电偶型温度传感器实现温度测量的理论基础是热电偶的热电效应，热电效应示意图如图 1.1 所示，在由两种不同的导体或半导体材料（A 和 B）组成的闭合回路中，如果材料 A 和材料 B 的连接点 1 和连接点 2 处的温度不相等（即 $T \neq T_0$ ）时，此闭合回路中就会有电流产生，即回路中因两连接点处存在温差而有电动势产生，这种现象被称为热电效应^[2]。如果确定了 A、B 两种热电偶的两极材料，那么只要自由端温度 T_0 保持不变，回路中产生的热电动势的大小就只与测量端的温度 T 有关，即

$$E_{AB}(T, T_0) = f(T)$$

故通过对热电偶电动势的检测就可以得知测量端的温度情况。

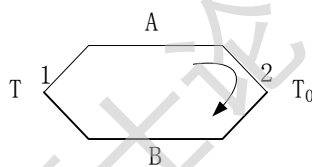


图 1.1 热电效应示意图

热电偶温度传感器因为其结构简单、测量范围宽、测量精度高、便于大规模生产等优点在工业领域得到了广泛应用。但是应用热电偶进行测温一般需要冷端补偿^[3]，这会使得电路复杂化，不利于调试。

2. 热敏电阻温度传感器

热敏电阻型温度传感器是利用热敏材料的温度特性实现温度到电量的转化。热敏电阻是用电阻值与所处环境的温度具有良好线性关系的材料制成，以负温度系数的热敏电阻为例，图 1.2 为负温度系数热敏电阻（NTC）的温度特性曲线。当热敏电阻所处环境的温度发生改变时，热敏电阻吸收辐射热，由于热敏材料阻值与温度具有良好的线性关系，所以可以通过对与阻值相关电量的检测完成对温度的测量。热敏电阻种类多样（阻值选取范围 $0.1 \sim 100 \text{k}\Omega$ ），常见的热敏电阻有铁热电阻、铜热电阻、镍热电阻和铂热电阻，在低温测量领域热电阻材料常选用钢、锰或碳等，体积小，反应灵敏，但是元件分散性比较大，元件更替性差^[4]。

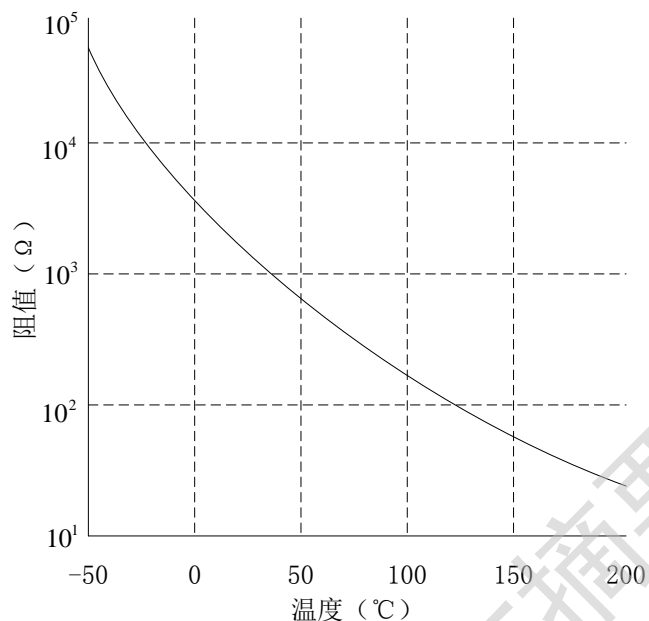


图 1.2 NTC 类热敏电阻温度特性曲线

3. 热辐射温度传感器

热辐射温度传感器是根据物体自身热辐射特性与温度之间的关系，利用辐射能实现温度到可测电量之间的转化。常用的红外辐射温度传感器就是一种典型的热辐射型温度传感器。红外辐射温度传感器的理论基础是物体内部的带电粒子在绝对零度以上时会不停地运动，并向外辐射不同波长的电磁波。物体辐射电磁波能量 E 的大小与波长 λ 跟温度 T 有关，其关系为^[5]：

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$$

式中 h 为普朗克常数， $h=6.626 \times 10^{-34}$ J/s； k 为波尔兹曼常数， $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K。

红外测温技术在现今生产生活中应用比较广泛，其具有体积小、精度高、操作方便等优点。并且红外测温技术属于非接触式测温，测量过程中对原温度场分布没有影响，反应灵敏，对运动的物体同样适用。但是因为使用红外测温时需要用红外探头正对待测目标，这使其会受到待测目标表面的反射率、探头与目标距离和检测环境中烟尘等因素的影响^[6]。尤其是高压开关柜内各种元件和线路的排布复杂，且空间狭小，可能会对红外探头到被测点的辐射光路受到阻碍，影响测

量精度。

4. 光纤温度传感器

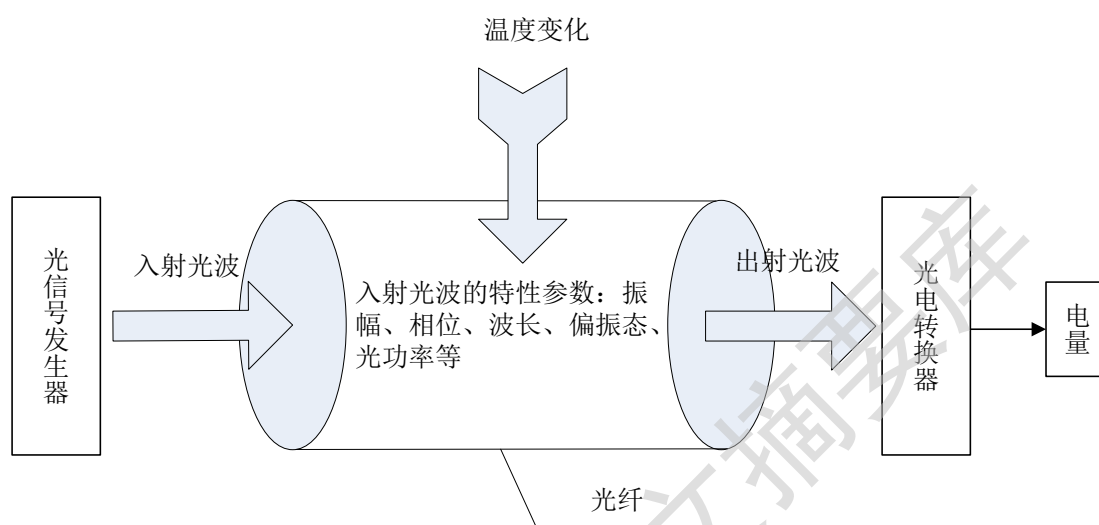


图 1.3 光纤温度传感器测量原理

图 1.3 为光纤温度传感器的测量原理示意图，光源信号发生器发送的入射光波经由光纤传至温度敏感元件（光纤或其他温度敏感元件），温度敏感元件使光波的某种特征参量因温度的改变而发生变化。当承载着温度变化信息的出射光波经由光纤被光电转换器件接收时，光信号会在光电转换器内进行光电转换，最终转化为可测的电量，实现对温度的测量^[7]。

在上述的四种温度传感器中前两种温度传感器的敏感特性是以电信号为基础进行工作的，即温度信号最先被调制为电信号。但在一些特殊的工作条件和环境中，比如在高电压、强电磁场、易燃、易爆或测量环境中具有腐蚀性较强的物质中，以电信号为基础的温度测量方式都不太适用，此时光纤温度传感技术优势明显，而且还能满足快速响应、非接触等要求。由于光纤材料具有电绝缘性，传输频带宽以及信息容量大等优点，使得光纤温度传感器具有电调制型温度传感器无法比拟的优势。此外，由于光纤温度传感器在工作时温度信号被调制成光信号，光信号在光纤中传输的损耗较低，可以实现远距离传输，这样就能避开恶劣的工况环境，在相对干扰小的环境中进行光电转换，进而完成对温度的测量。

具体来说，光纤温度传感器特性如下^[8-10]：

(1) 不受电磁场的干扰：这一特性是光纤传感器相对于其他电调制型传感器

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.