

# Study on Curing Temperature of Dry-Type Air-Core Reactor Based on Fiber Bragg Grating

Yangyang Wu<sup>1,2</sup>, Pei Tian<sup>2</sup>, Xiangyu Tan<sup>3</sup>, Youkuan Liu<sup>3</sup>, Peng Xu<sup>1</sup>, Jie Zhang<sup>1</sup>,  
Mingda Wang<sup>2</sup>, Jianghao Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding

<sup>2</sup>Yunnan Power Grid Corporation Graduate Workstation, Kunming

<sup>3</sup>Yunnan Electric Power Test & Research Institute (Group) Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Kunming  
Email: [445800890@qq.com](mailto:445800890@qq.com)

Received: Oct. 13<sup>th</sup>, 2014; revised: Oct. 24<sup>th</sup>, 2014; accepted: Nov. 7<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

Curing temperature rise of dry-type air-core reactor is one of the most key links in the production process. The environment temperature changes directly affect the turn-to-turn insulation of dry resistance. In this paper, combining the manufacturers' many years of experience of curing temperature rise, it designs a set of on-line monitoring system based on fiber Bragg grating. This system can do on-line measurement of dry-type air-core reactor temperature and strain of the coating layer. Through the online measurement of the curing temperature experiments of dry resistance, change trends of temperature and strain in each coating layer can be concluded. The results of the study will provide important theoretical basis and equipment support for the real-time monitoring of dry-type air-core reactor in transformer substation.

## Keywords

Dry-Type Air-Core reactor, Fiber Bragg Grating, Curing Temperature, Coating Layer, Temperature, Strain

# 基于Bragg光纤光栅对干式空心电抗器 固化温升的研究

伍阳阳<sup>1,2</sup>, 田 沛<sup>2</sup>, 谭向宇<sup>3</sup>, 刘友宽<sup>3</sup>, 徐 鹏<sup>1</sup>, 张 洁<sup>1</sup>, 王明达<sup>2</sup>, 李江浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华北电力大学, 保定

<sup>2</sup>云南电网公司研究生工作站, 昆明

<sup>3</sup>云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院, 昆明

Email: [445800890@qq.com](mailto:445800890@qq.com)

收稿日期: 2014年10月13日; 修回日期: 2014年10月24日; 录用日期: 2014年11月7日

## 摘要

干式空心电抗器的固化温升作为其生产流程中最关键环节之一, 其环境温度的变化直接影响到干扰的匝间绝缘。本文结合厂家多年固化温升的经验, 设计了一套基于Bragg光纤光栅的在线监测系统, 该系统可对干式空心电抗器包封层的温度和应变进行在线测量。通过对干扰的现场固化温升实验的在线测量, 得出了各包封层的温度和应变变化趋势。该研究成果将为变电站的干式空心电抗器实时监测提供重要的理论依据和设备支持。

## 关键词

干式空心电抗器, Bragg光纤光栅, 固化温升, 包封层, 温度, 应变

## 1. 引言

近年来随着 35 kV 并联干式空心电抗器的应用的增加, 正常运行中烧损故障较频繁发生, 特别是近期 500 kV 和平变的一起烧损故障持续燃烧 3 个小时, 等 119 赶到后才被扑灭, 给电力系统的安全稳定运行带来了较大的安全隐患[1]-[3]。为了查清事故原因, 避免缺陷的再次发生, 本文设计一套干式空心电抗器实时监测系统, 对干式并联空心电抗器在固化温升过程中, 进行温度和应变实时监测, 分析监测数据, 验证此监测系统的可行性。同时, 这也为今后现场变电站的干式空心电抗器实时监测给予一定的试验依据。

## 2. 干式空心电抗器固化温升监测系统的组成

干式空心电抗器固化温升监测系统主要由四部分组成: 光纤光栅传感器, 耦合器, 光纤光栅解调仪, PC 机等。如图 1 所示:

## 3. 系统各部分的设计

### 3.1. 干式空心电抗器结构

35 kV 干式空心并联电抗器一般由 11 个包封组成, 即 11 个同心圆筒, 由里到外依次是 1 至 11 包封。同心圆筒之间靠引拔棒支撑, 引拔棒是一根从下到上贯通的环氧玻璃布板条, 每一包封内有 6 至 12 根带有股间(也即匝间)绝缘的不同线规的铝线紧密并联绕制而成, 由内外侧的环氧树脂与玻璃纤维包封起来。第一包封有 12 根线、第二至第十包封每包封内有 6 根线、第十一包封有 8 根线。共有 74 根线, 相当于有 74 个绕组(阻抗)并联, 而且每一包封所选用的线径还不尽相同、缠绕匝数也不一样。如图 2 所示。

### 3.2. 光纤光栅传感器的原理

Bragg 光纤光栅是指单模掺铈光纤经紫外光照射成栅技术而形成的全新光纤型 Bragg 光栅, 成栅后的

光纤纤芯折射率呈现周期性分布条纹并产生 Bragg 光栅效应，其基本光学特性就是以共振波长为中心的窄带光学滤波器，满足如下光学方程[4] [5]:

$$\lambda_b = 2n\Lambda \tag{1}$$

式中： $\lambda_b$ —Bragg波长；

$\Lambda$ —光栅周期或光栅栅距；

$n$ —光纤模式的有效折射率。

Bragg 光纤光栅作为传感器的原理如图 3 所示：如果将一束宽带光源射入带光栅的光纤内，则只有满

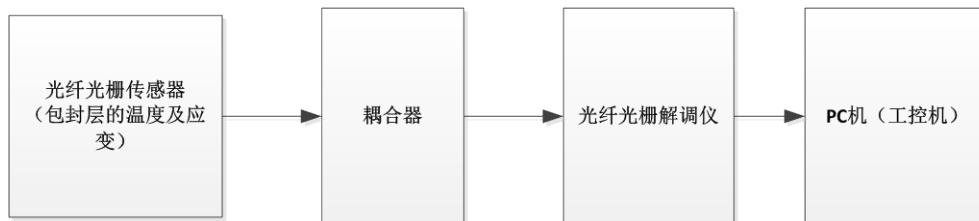


Figure 1. Dry-type air-core reactor curing temperature monitoring system

图 1. 干式空心电抗器固化温升监测系统



Figure 2. Dry-type air-core reactor site

图 2. 干式空心电抗器现场示意图

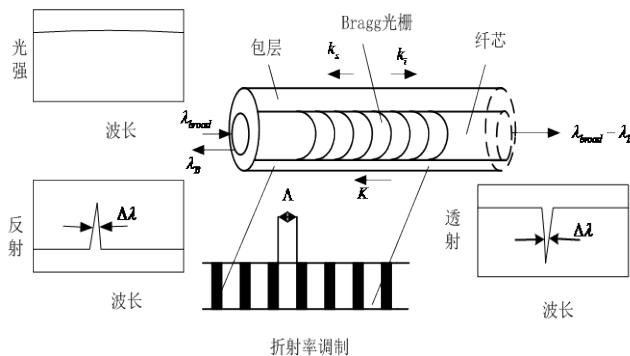


Figure 3. The working principle of fiber Bragg grating sensor

图 3. 光纤光栅传感器的工作原理

是布拉格条件 $\lambda_b = 2n\Lambda$ 的入射光波长会被光纤光栅反射，这时反射光谱在Bragg波长 $\lambda_b$ 形成峰值，其余波长的光会透过光纤光栅传输到另一端。同理当外部非电量场，如温度、应变等作用在光栅上时，光栅周期 $\Lambda$ 将随之发生变化，这样就改变了波长 $\lambda_b$ 的大小。测量出 $\lambda_b$ 光谱峰值的移动，就可以确定待测部相应参数(温度、应变等)的变化。

### 3.3. 光纤光栅传感器的预埋

在 20,000 Kvar 35 kV 的干式空心并联电抗器中，由于现场生产工艺的要求以及预埋光纤光栅传感器成活率要求，选择干式空心电抗器的第 1、5、7、11 包封层预埋传感器，如图 4 所示，这是预埋传感器在包封层的位置，在预埋点处有三个传感器的，一个是测量轴向应变，一个是测量径向应变，另外一个测量温度，作为应变传感器的温度补偿。

具体预埋传感器以第 1 包封层为例：

第一步：在电抗器外包封玻璃丝带表面用米尺确定预埋位置，在相邻的两根通风条之间的通风道内，从包封上沿开始自上而下铺设网格布，在其上面自下向上涂灰色绝缘胶。

第二步：传感探头浸胶(环氧树脂)后，在距网格布下端 100 mm 区域中部布设传感探头，将温度传感器 T1，应变传感器 S3，应变传感器 S8 均匀布成品字形，应变传感器 S3 在偏下位置径向预埋，应变传感器 S8 轴向预埋，温度传感器 T1 轴向预埋。传感探头上部引出的光纤成 S 弯形黏贴在灰色绝缘胶上，尤其是径向布设的应变传感器引出光纤的曲率半径要大，避免弯折过度影响信号输出。使得所有传感探头以及引出的光纤均在相邻两根通风条之间的通风道内，剩余连接光纤从线圈顶部引出，如图 5 所示。

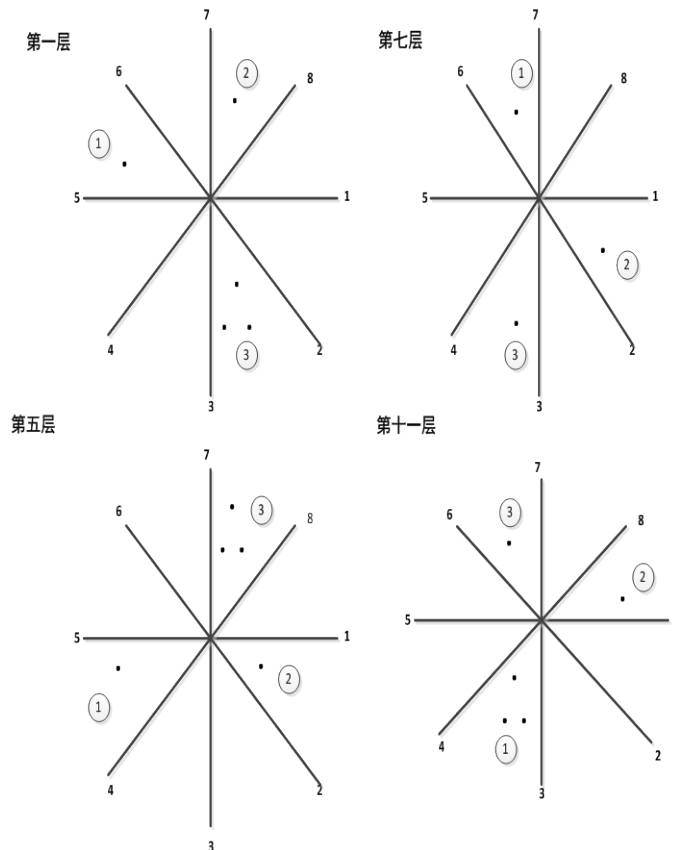


Figure 4. Sensors embedded location map

图 4. 传感器预埋位置分布图

第三步：在传感探头及其邻域再覆盖一层环氧树脂胶，以保证传感探头与底层紧密黏贴。剪取与步骤(1)同等大小的网格布覆盖在传感探头以及引出光纤表面，与底层网格布重合，并用手掌轻压网格布使其与下层完全黏合。

第四步：另外 2 支温度传感器 T3, T5 布设工序同上(1)~(3)。且 3 个布点沿周向间距 120°均匀分布。

第 1 包封层按照上面步骤安装完后，如图 6 所示，其它几层预埋方法也跟第 1 包封层预埋方法类似。

### 3.4. 信号耦合及传输

为了便于数据的处理和观察，将第 1、5、7、11 包封层测量的数据通过三个 8×1 的耦合器进行信号耦合，再通过光线光栅解调仪实现光电信号转换，最后通过 RS232 串口上传到 PC 机，进行数据实时监测。

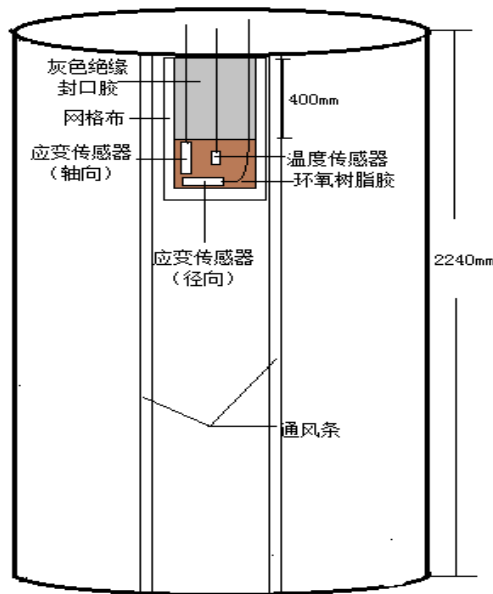


Figure 5. Sensor arrangement (positive)  
图 5. 传感器布置图(正面)

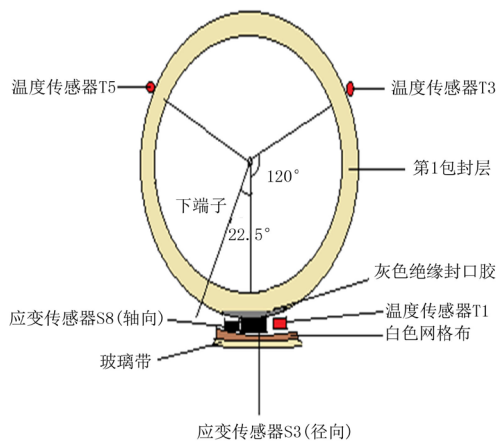


Figure 6. The first layer coating sensor installation overlooking the schematic diagram  
图 6. 第 1 层包封传感器安装俯视示意图

**Table 1.** The initial wave of the transducer  
**表 1.** 传感器的初始波长

传感器类型	S3	S8	S1	S12	S9	S10
应变传感器初始波长(nm)	1553.5	1561	1528.5	1551	1553.5	1548.5
	T1	T3	T5	T21	T19	T12
温度传感器初始波长(nm)	1526	1531	1536	1536	1531	1553.5
	T4	T16	T9	T13	T14	T17
	1533.5	1563.5	1546	1556	1558.5	1526

**Table 2.** Embedded coating layer sensor selection form  
**表 2.** 预埋包封层传感器的选择形式

干式空心电抗器的层数	传感器的选择方式
第 1 层	温度: T1、T3、T5 应变: S3、S8
第 5 层	温度: T21、T19、T12 应变: S1、S12
第 7 层	温度: T4、T16、T9
第 11 层	温度: T13、T14、T17 应变: S9、S10

## 4. 实验分析

### 4.1. 传感器初始波长的选择

为了正确测量干式空心电抗器在固化温升过程中，包封层的温度和应变，传感器的中心波长应尽量相差大一些，以防在实际测量过程中，中心波长波动幅度太大，发生波长重叠现象，导致测量精度的不准确。如表 1、表 2 所示，为所选传感器的初始波长，及预埋包封层中传感器的选择形式。

### 4.2. 测量数据波形分析

20,000 Kvar/35 kV 干式空心并联电抗器，总共 11 个包封层。在其第 1，5，7，11 层预埋温度传感器及应变传感器，其温度测量结果如下：

图 7(a)~图 7(d)分别代表在固化温升阶段，第 1、5、7、11 包封层的温度曲线图。从图中可以看出在升温阶段，随着干燥室室温的上升，各包封层测量的温度也呈上升趋势；随着室温的下降，各包封层测量的温度也呈上升趋势；并且由于干式空心电抗器自身结构特点的影响，最外层包封由于受热最大，而最里层(第 1 层)受热面积小，在升温过程中，T11a 升温最快，T1a 升温最慢；在降温过程中，T11a 降温变化最快，T1a 降温最慢。

应变测量如下(1  $\mu\epsilon$  对应 4.04 N)：

由图 8(a)可以看出，在升温过程中，径向微应变比轴向微应变变化的速度快，即在升温过程中，电抗器膨胀的速度要比长高的速度要快；等升温到一定程度，径向微应变变化速度越来越慢，而此时轴向微应变依然挺快，但增加幅度并不太大。在降温过程中，轴向微应变减小速度比径向减小速度要快，即在降温阶段，电抗器变矮的速率要比缩小的速率要快。从图 7(b)可以看出，在整个固化温升的过程中，径向所受的微应变要比轴向所受的微应变要大。

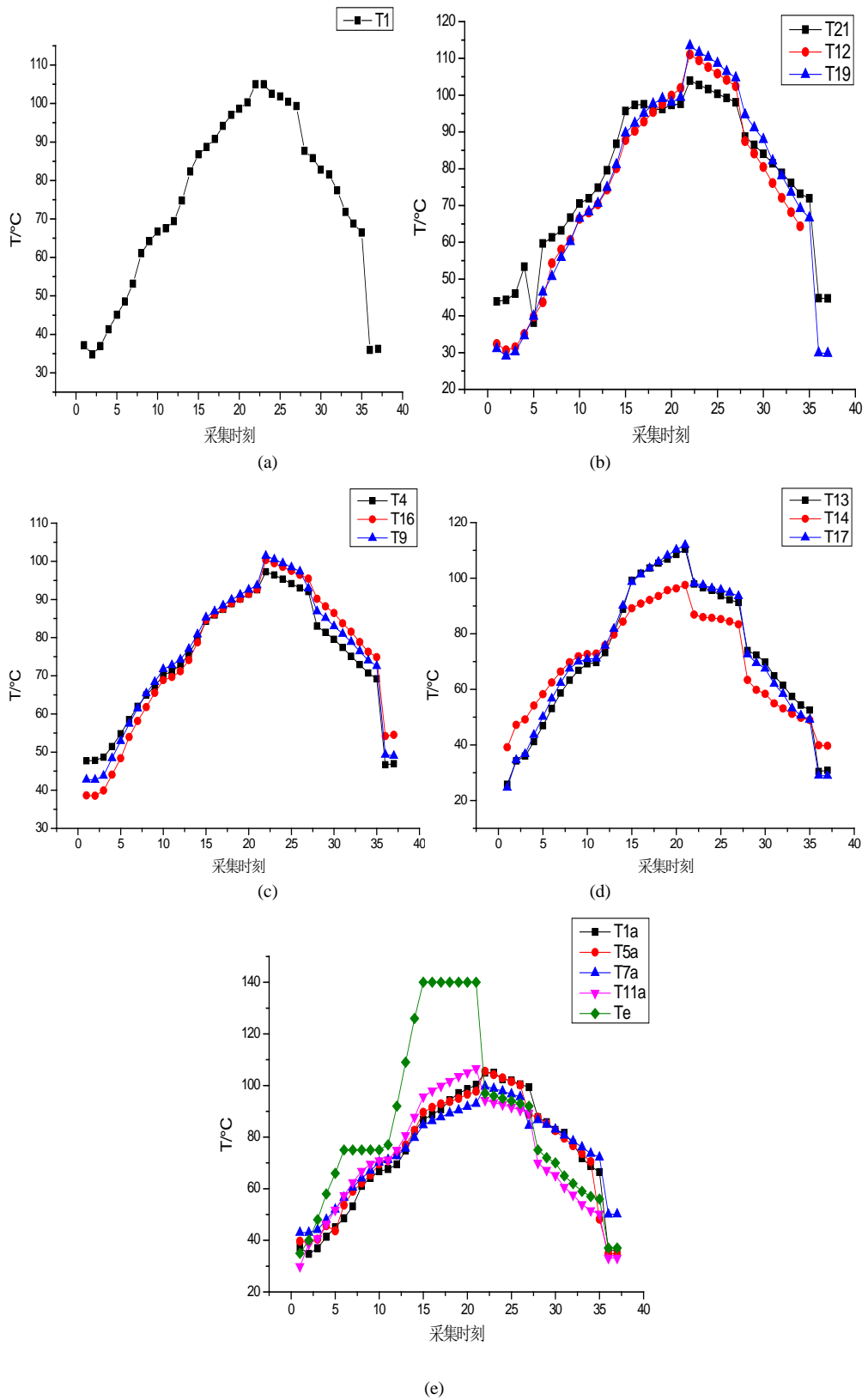


Figure 7. Embedded coating layer temperature measurement curve  
图 7. 预埋包封层温度测量曲线



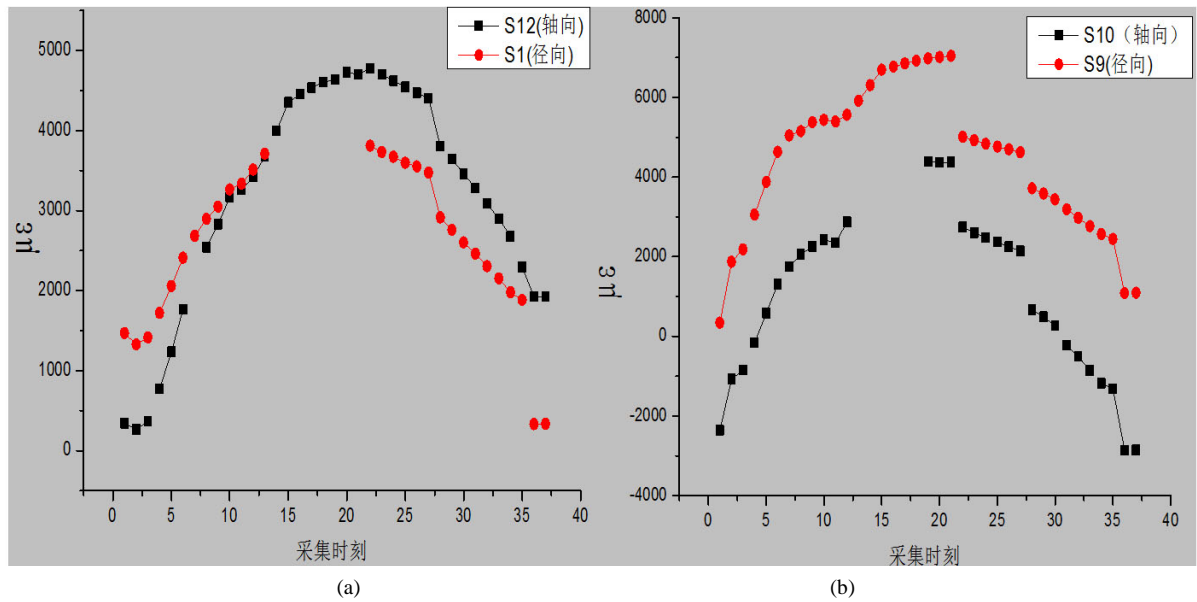


Figure 8. Embedded coating layer temperature measurement curve  
图 8. 预埋包封层温度测量曲线

## 5. 结论

本文通过对干式空心电抗器固化温升实验的温度，应变在线监测分析研究，得出以下结论：

- 1) 利用 Bragg 光纤光栅测量干式空心电抗器包封的应变和温度的方法是可行的；
- 2) 电抗器周围温度升高或者降低时，理论上的变化规律和实际测量数据分析出来的结果是一致的；
- 3) 干式空心电抗器第 1 包封层预埋传感器的方式可能需要改进，也许是由于在绕制电抗器时，第 1 层包封内径过小，绕制玻璃丝带的拉力不变，导致绝大部分传感器损坏。

## 参考文献 (References)

- [1] 夏长根 (2009) 一起 35 kV 干式并联空心电抗器故障分析. *电力电容器与无功补偿*, **5**, 43-45.
- [2] 刘海莹, 魏宾 (2004) 干式空心电抗器的运行分析及故障处理. *高压电器*, **3**.
- [3] 何东平, 孙白 (2004) 35 kV 干式空芯并联电抗器运行情况故障电抗器的解剖分析. *电力设备*, **2**, 48-51.
- [4] 魏鹏, 李丽君, 郭俊强 (2008) 光纤 Bragg 光栅应力传感中温度交叉敏感问题研究. *应用光学*, **1**, 105-109.
- [5] 李爱群, 周广东 (2009) 光纤 Bragg 光纤传感器测试技术研究进展与展望(I). *东南大学学报(自然科学版)*, **6**, 1298-1306.