

# Research on Temperature Mutation Location Method of Optical Cable Line Based on Optical Fiber Network

Shudong Li<sup>1</sup>, Hongjie Zhu<sup>1</sup>, He Gong<sup>1</sup>, Xueyun Xu<sup>1</sup>, Xiaowei Zhu<sup>1</sup>, Sheng Yang<sup>1</sup>, Jiang Zhu<sup>1</sup>, Xiaotao Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Baoshan Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Corporation of China Southern Power Grid, Baoshan Yunnan

<sup>2</sup>Kunming Chuangxuntong Communication Co., Ltd., Kunming Yunnan  
Email: 248400248@qq.com

Received: Jul. 21<sup>st</sup>, 2018; accepted: Aug. 4<sup>th</sup>, 2018; published: Aug. 16<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The normal operation of optical fiber cable is an important condition to ensure the safe and stable operation of power system. It is important to grasp the real-time operating status of the optical fiber line in time. The Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) is a technique for studying the quality of optical fibers. It mainly measures the power loss and reflection characteristics of optical fibers. If there are fiber faults (fiber breaks, bends, connectors, and connectors), these numbers can be greatly affected. Therefore, OTDR equipment can be used to locate fiber faults. At the same time, this paper also introduces the principle of wavelet transform to detect the noise and singularity of the signal collected by OTDR. Based on the above principles, an optical fiber fault location system is designed, which can be divided into three levels: a front-end hardware detection device, an intermediate data processing center, and an intelligent terminal installed with an optical cable fault location system.

## Keywords

Optical Fiber Network, Optical Fiber Cable, Mutation, Temperature Location

---

# 基于光纤网的光缆线路温度突变定位方法研究

李树东<sup>1</sup>, 朱红杰<sup>1</sup>, 宫贺<sup>1</sup>, 许学云<sup>1</sup>, 朱晓伟<sup>1</sup>, 杨胜<sup>1</sup>, 朱江<sup>1</sup>, 陈晓涛<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国南方电网云南电网公司保山供电局, 云南 保山

<sup>2</sup>昆明创讯通通信有限公司, 云南 昆明  
Email: 248400248@qq.com

## 摘要

光缆线路的正常运行是保障电力系统安全稳定运行的重要条件，及时掌握光缆线路的温度状态，是保证电缆安全温度的基本前提。光时域反射原理(OTDR)主要测量光纤的功率损耗，如果光缆温度存在很大波动，则这些数量会受到很大影响。因此本文首先构建了基于光纤传感网的光缆线路温度监测系统架构，接着研究了光纤传感温度检测技术，并建立了包含传感子系统、数据采集处理子系统以及智能终端子系统的光缆线路温度定位系统，最后本文基于小波突变检测算法，结合研究的光缆线路温度突变监测系统对云南省某变电站进行仿真分析，为实现对光缆安全评定管理奠定基础。

## 关键词

光纤网，光缆线路，突变，温度定位

Copyright © 2018 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

## 1. 引言

随着中国光纤通信线路建设规模的扩大和时间的推移，光纤线路出现故障的可能性将不断增大。据统计，光通信系统中部分线路故障占 74.8%，光缆中断每年造成直接经济损失约 7~8 亿元，对国民经济和国防通信造成的损失是惊人的[1] [2] [3]。光纤通常用于地下管道中，由于现有的光缆维护方法存在缺陷，并且没有准确测量地面位置的仪器，因此，寻找一种快速准确的光缆线路快速定位故障点和修复的新方法正在成为迫切的问题[4] [5] [6]。

通常使用光时域反射仪(OTDR)来识别光缆故障[5] [7] [8]。通过 OTDR，可以获得沿着光缆内的光纤从故障点到测量点的距离。在大多数类型的光缆中，光纤通常放置在管中，并且与管的长度相比铺设超长的光纤，以保护敏感的光纤免受外部机械和化学因素的影响。因此，在这种光缆中，光纤的长度不等于光缆的长度。因此使用 OTDR 设备不能直接获得光缆故障的空间位置。为了定位光缆故障的空间位置，需要电缆线路的属性表和电缆连接图等相关的项目文档，并根据每个电缆路线图上的规模进行复杂的计算。一般情况下，虽然 OTDR 可以提供厘米级或甚至毫米级的空间分辨率，但地下光缆的故障定位精度分别为 40~50 米和数百米。为了提高故障定位的准确性和效率，本文提出了一种简单直接的光缆故障定位系统。首先将小波变换方法引入到 OTDR 曲线信号的分析中。对实际电力光纤上产生的 OTDR 曲线信号进行降噪和奇异点定位仿真，确定使用提升小波变换对 OTDR 曲线进行降噪，通过不同小波基下小波变换效果的比对和工程应用的实际情况[9] [10]。

在系统中寻找故障周围环境的现场，识别故障点的具体位置，以便进行紧急维修。可以快速，准确地对通信电缆进行故障定位，减少故障发生带来的损失。

## 2. OTDR 技术研究

由于光纤本身的缺陷和掺杂元件的均匀性，OTDR 是检测光纤性能和故障的必要方法。当射入待测光纤的

光脉冲到达光纤连接处、断裂、缺陷或末端时，光就发生反射返回输入端并被相应仪器接收。如果光纤中断，也就是光纤点的后向散射光功率将减小到零。光纤的断点位置和光纤长度根据来自反向传输的散射光来确定。

光纤在传播过程中，碰到其自身的几何缺陷或断裂面时，光纤对光的折射率发生了强烈的突变点位。这个边界反射可以在光纤断裂或破裂处，任意接缝、严重几何扭曲或未终止的光纤末端处发生。OTDR原理图如图1所示。

一个功率为  $P(0)$ ，脉冲宽度为  $T_0$  的光脉冲射入光纤，经过距离  $x$  后，光功率  $P(x)$  为：

$$P(x) = P(0) \times 10^{-(\alpha x/10)}$$

其中  $\alpha$  为光纤的衰减系数。

光脉冲经过光纤传输，发生瑞利散射，在  $x$  点有一部分光反射回到光纤输入端，该反射光功率即  $x$  处的背向散射光功率为：

$$P_{bs}(x) = P(x)\gamma(x)10^{-(\alpha x/10)} = P(0)\gamma(x) \times 10^{-2(\alpha x/10)} \quad (1)$$

其中  $\gamma(x)$  表示  $x$  处的背向瑞利散射系数。定义  $\gamma(x)$  为

$$\gamma(x) = (VT/2)\alpha_R \cdot S \quad (2)$$

$V$  表示光在纤芯中的群速率， $\alpha_R$  表示瑞利散射系数， $S$  表示背向散射功率与瑞利散射总功率之比。

设  $x$  处的背向散射系数光功率为

$$P_{bs}(0) = P(0)\gamma(0) \quad (3)$$

可以得到  $0 \sim x$  之间的平均衰减系数为

$$\alpha = \frac{5}{x} \left[ \log \frac{P_{bs}(0)}{P_{bs}(x)} - \log \frac{\gamma(0)}{\gamma(x)} \right] \quad (4)$$

假设光纤是均匀的， $\gamma(0) = \gamma(x)$ ，则  $0 \sim x$  之间的平均衰减系数为

$$\alpha = \frac{5}{x} \left[ \log \frac{P_{bs}(0)}{P_{bs}(x)} \right] \quad (5)$$

这时可以从背向散射曲线得到实际平均衰减系数。菲涅尔散射光功率为：

$$P_f(x) = P(x)\lambda(x)10^{-(\alpha x/10)} = P(0)\lambda(x) \times 10^{-2(\alpha x/10)} \quad (6)$$

其中  $\lambda(x)$  表示  $x$  处的菲涅尔反射系数。

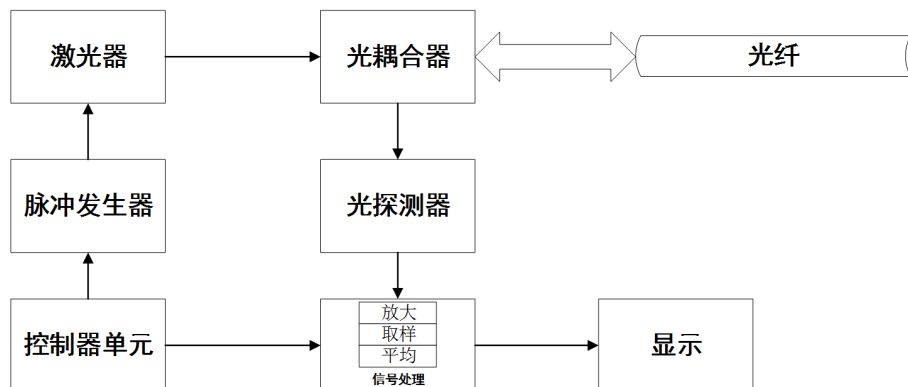


Figure 1. OTDR principle  
图 1. OTDR 原理

则 OTDR 接收到的反射光功率为:

$$\begin{aligned} P_r(x) &= P_{bs}(x) + P_f(x) \\ &= P(0)\gamma(x) \times 10^{-2(\alpha x/10)} + P(0)\lambda(x) \times 10^{-2(\alpha x/10)} \\ &= P(0)(\gamma(x) + \lambda(x)) \times 10^{-2(\alpha x/10)} \end{aligned} \quad (7)$$

假设待测光纤的长度为  $L$ , OTDR 发出的光脉冲传播到光纤终端, 光脉冲产生的瑞利背向散射光以及菲涅尔反射光从终端传回到入射端所需要的时间为  $t$ , 计算公式如下所示。

$$t = 2Ln_1/c \quad (8)$$

其中,  $n_1$  是光纤介质的折射率,  $c$  是真空中光速。

下一节引入小波分析方法对信号突变点进行检测识别。

### 3. 系统研究与设计

#### 3.1. 光纤网架构

本文提出了由管理层、监视层、测试层构成的 3 层体系架构。底层为测试层, 由软件系统控制远程分布的光开关, 形成以 OTDR 为根节点的树状测试链路, 通过若干树状测试链路形成对待测范围内光缆网络的覆盖; 中间层为监视层, 利用通信设备本身的光信号故障检测功能感知光缆故障, 使通信网络故障直接映射到光缆监测系统, 进行与光缆关联的业务影响分析, 并可支持使用传统的/光源 + 光功率计的光缆故障监视方式; 顶层为管理层, 对光缆线路温度异常突变进行管理, 等。

#### 3.2. 传感子系统

传感子系统基于光纤传感技术。是利用光纤和光栅信息材料构成的传感器, 具有成本低, 抗干扰能力强的优点。传感子系统通过一定数量的 Bragg 光栅将待测的信息进行传感。传感子系统如图 2 所示。

#### 3.3. 光缆线路温度定位系统

根据以上的光缆故障定位的基本原理, 本文提出了基于 OTDR 原理与小波变换相结合的光缆故障定位系统。包含传感子系统, 数据采集处理子系统等组成。

光缆故障定位系统如图 4 所示, 可以划分为三个层次, 也即前端的硬件检测装置, 中间的数据处理中心和安装光缆故障定位系统的智能终端。硬件检测装置常用的是 OTDR 支持 SNMP 协议的硬件检测装置通过网络与后台服务器连接并上传测量信号。数据处理中心包括光缆线路信息、后台数据库、后台服务器程序。数据处理中心可以完成 OTDR 数据储存、数据分析、故障告警分析、故障告警消息分发、报表派单等工作。系统组成及连接如图 3 所示。

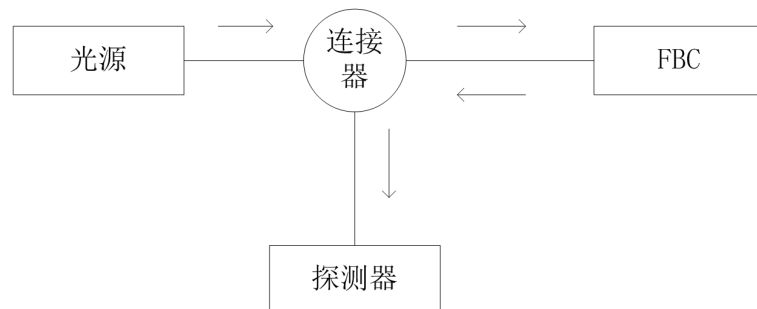


Figure 2. Sensor subsystem  
图 2. 传感子系统

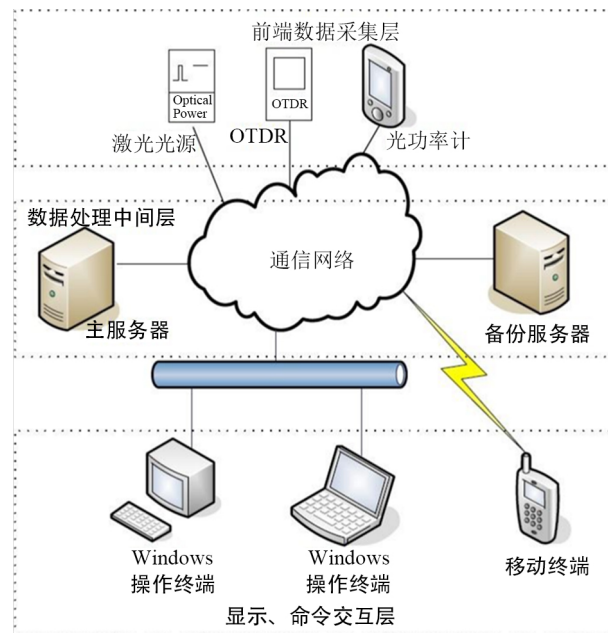


Figure 3. System components and connections  
图 3. 系统组成及连接

## 4. 光缆线路温度突变监测

### 4.1. 突变检测算法

小波变换是一种窗口形状可变的时频局部化分析方法，其高频部分的时间分辨率较高而频率分辨率较低，而低频部分的频率分辨率较高而时间分辨率较低，因此对信号具有良好的自适应性。小波变换又可分为连续小波变换和离散小波变换两种。

设函数  $\psi(x)$  满足： $\int_R \psi(x) dx = 0$  则  $\psi(x)$  为母小波。令  $\psi_s(x)$  表示为  $\psi(x)$  对尺度  $S$  的伸缩。

$$\psi_s(x) = \frac{1}{s} \psi\left(\frac{x}{s}\right) \quad (9)$$

此刻对  $L^2(R)$  的任意信号  $f(t)$  进行小波变换，将它定义为：

$$Wf(s, x) = f \cdot \psi_s(x) \quad (10)$$

信号通过小波变换得到的模极大值点与信号突变点的位置是一一对应的关系。由于小波变换对突变信号的敏感性，行波信号到达母线的时间可以被准确检测到，采用小波变换的输电线路故障定位具有很高的准确性

### 4.2. 小波去噪

一个带有噪声的信号可以通过以下形式进行表示：

$$s(i) = f(i) + \sigma \cdot e(i), i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (11)$$

其中， $e(i)$  为噪声， $\sigma$  为噪声信号标准差， $f(i)$  为有用信号。

去噪过程可以按以下方法进行处理：首先对带有噪声的原信号 SignalX 进行小波分解，原始信号经过小波变换后得到的小波系数分为高频部分 cD1 和低频部分 cA1，然后再将低频部分 cA1 进一步进行分

解，而高频部分保持不变。原始信号可以看作是由底层的低频部分和所有层的高频信号组成。经过小波变换之后，噪声信号通常表现为高频信号，而有用信号却表现为低频信号。

噪声信号一般存在于 cD1, cD2, cD3 中，因此可以通过阈值法对高频小波系数进行阈值去噪，然后对去噪后的小波系数进行重构便可以达到提取用信号，去除噪声的效果。

### 4.3. 系统工作流程

对光缆故障定位系统软件的工作流程进行分析，结果如图 4 所示。

系统首先对光缆进行周期性或者实时性的测试，检查是否存在光功率异常事件发生，假如光功率值变化超过设定的阈值，就会启动 OTDR 测量模块对发生异常情况的光纤进行在线测量，通过计算获得光缆线路上的故障信息。再通过对得到的 OTDR 测量曲线做数学分析，进而确定故障点距测试点的光缆长度。

### 4.4. OTDR 曲线分析模块的分析与设计

本文首先利用第二节提到的小波变换法对 OTDR 曲线信号进行奇异点检测和降噪处理。降噪的一般

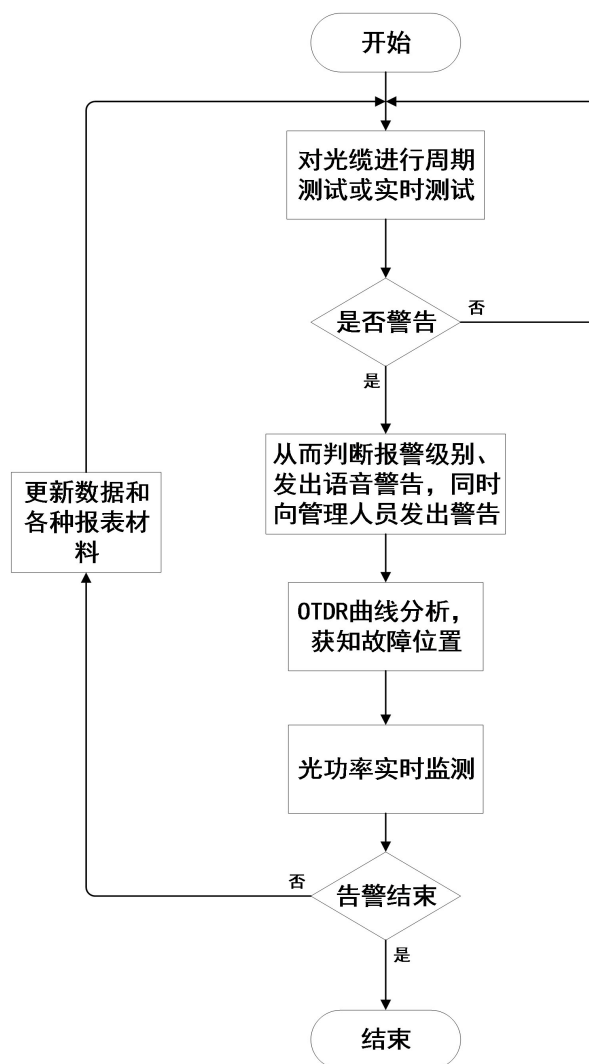


Figure 4. Optical cable fault location work flow chart  
图 4. 光缆故障定位工作流程图

过程是先将 OTDR 曲线信号进行小波分解,对分解得到的各层系数选择一个阈值并进行阈值处理,然后重建并恢复原始信号。通过以上降噪处理后,曲线信号中的噪声被充分抑制,同时事件信息被增强,这对于事件点的检测是很有帮助的。最后,通过事件检测算法准确地检测出事件点的位置,事件检测过程如图 5 所示。

## 5. 仿真分析

本文基于小波突变检测算法,结合研究的光缆线路温度突变监测系统对云南省某变电站进行仿真分析。结合小波平滑函数表达式:

$$\phi(t, a) = \frac{1}{a} e^{-\frac{t^2}{2a^2}} \quad (12)$$

其高斯小波及其导数仿真波形如图 6 所示。

结合输电线路情况,光缆线路 1 km。得到的仿真波形如图 7 所示。

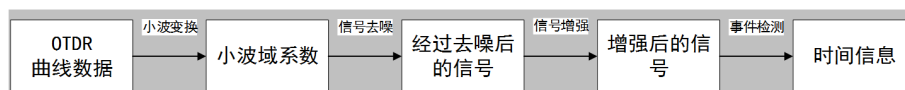


Figure 5. Event detection process

图 5. 事件检测过程

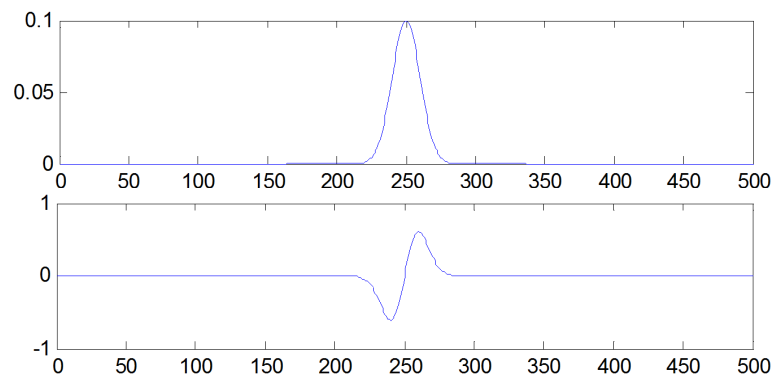


Figure 6. Wavelet simulation

图 6. 小波仿真图

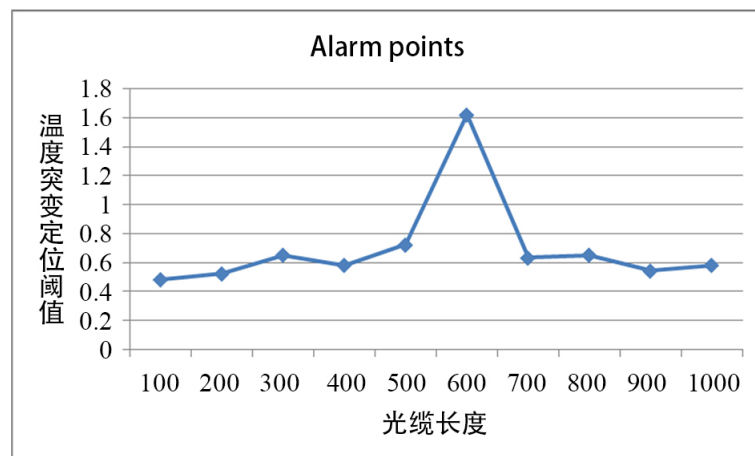


Figure 7. The temperature point of the fiber optic cable

图 7. 光纤光缆温度突变点仿真图

从图 7 光纤光缆温度突变点仿真图可见, 光缆线路 1 km, 在光缆至起始处约 600 m 处, 发生温度突变。

通过本文研究的光纤光缆温度突变点监测系统可以得到准确的温度突变数据, 然后根据对数据的处理得到相关信息, 最后可以得到光缆准确位置的温度故障。

## 6. 结论

本文首先分析了 OTDR 原理和光纤传感网架构, 同时, 为了加强数据的准确性, 引入了小波变换的原理, 用于温度突变点的检测。在以上原理的基础, 对光纤故障定位系统进行设计, 其主要包括前端的硬件检测装置, 中间的数据处理中心和安装光缆故障定位系统的智能终端。最后本文基于小波突变检测算法, 结合研究的光缆线路温度突变监测系统对云南省某变电站进行仿真分析。

本文研究对光缆线路的监测及其安全运行有一定的指导意义。

## 参考文献

- [1] 李伟. 结合小波变换与 GIS 地图的电力通信光缆故障定位及管理系统[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [2] 李波. 基于 GIS 的通信光缆故障定位技术[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [3] 张静. 电力光纤故障检测及抢修最优路径方法研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学(保定), 2013.
- [4] 涂超. 基于 Google Maps 的光缆故障定位方法的研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [5] 王洪亮, 曹敏, 周洁. 山地变电站气象信息光纤传感远程监测技术研究[J]. 电波科学学报, 2018, 33(2): 225-230.
- [6] 黎华. 基于 OTDR 和光功率测试的光纤故障监测应用方法[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(5): 1357-1359.
- [7] 卢乐书, 邓晓智. 基于改进型 OTDR 的光纤故障定位算法[J]. 光通信技术, 2017(11).
- [8] 尧昱, 张静, 张乐, 等. 基于 OTDR 的 PON 光纤故障定位方法[J]. 电信科学, 2012, 28(10): 143-148.
- [9] 潘青, 张引发, 邓大鹏, 等. 一种改进的 OFDR 技术在光纤故障定位中的应用[J]. 光通信技术, 2015, 39(7).
- [10] 曹贝贝. 基于 OTDR 的信息采集与处理技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2017.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)