

Error Analysis of Measured Strain of Fiber Bragg Grating Strain Sensor

Dianliang Sun¹, Rujun Wu², Xiaofeng Zhang², Tian Chen², Xuefen Ma²

¹ShanDong Post and Telecom Engineering CO. LTD., Ji'nan Shandong

²School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai

Email: wurujunwurun@163.com

Received: Feb. 25th, 2019; accepted: Mar. 13th, 2019; published: Mar. 21st, 2019

Abstract

The strain measured by FBG (Fiber Bragg Grating) sensors is not equal to the true strain. To improve the measurement accuracy, the relationship between the measured strain and the real strain needs to be studied. Based on the theoretical analysis, the strain measurement error caused by the lateral effect is obtained. For the complex plane strain problem, the calculation formula of the measured strain was revised, and the effects of the installation angle, installation deviation angle on the measurement accuracy were analyzed. The analysis shows that the relative error of strain measurement is approximately sinusoidal to the installation angle. The relative error of strain measurement gradually decreases with the increase of the principal strain ratio. This theory has a high accuracy, and provides theoretical guidance for the application of fiber gratings.

Keywords

Lateral Effect, Strain, Installation Deviation, Measurement Accuracy

光纤光栅应变传感器测量应变误差分析

孙佃亮¹, 吴入军^{2*}, 张晓峰², 陈田², 马雪芬²

¹山东省邮电工程有限公司, 山东 济南

²上海电机学院, 机械学院, 上海

Email: wurujunwurun@163.com

收稿日期: 2019年2月25日; 录用日期: 2019年3月13日; 发布日期: 2019年3月21日

摘要

光纤光栅应变传感器测量应变与实际应变并不相同, 为了提高测量精度, 需要研究测量应变与实际应变
*通讯作者。

之间的关系。通过理论分析,得到了横向效应所引起的测量误差,针对复杂平面应变问题,修正了测量应变的计算公式,分析了安装角度、安装角度偏差等因素对测量精度的影响,得出:测量误差与安装角度成近似正弦变化,随着主应变比增大,应变测量误差逐渐减小。该理论为光纤光栅在实际中的应用提供了理论指导。

关键词

横向效应, 应变, 安装偏差, 测量精度

Copyright © 2019 by author(s) 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

光纤光栅应变传感器是随着通信技术的发展而发展起来的,由于光纤光栅应变传感器同传统的机械、电子类传感器相比,具有体积小、质量轻、抗电磁干扰等诸多优点,其在航空航天、医疗器械、土木工程等诸多领域都得到了广泛的应用[1][2]。

在光纤光栅应变传感器的实际应变测量时,主要利用了光纤光栅的轴向应变的灵敏性,没有考虑光纤光栅横向效应对光纤光栅反射波长的影响,即认为光纤光栅受到的横向应变对反射波长无影响。通过资料调研[3][4],光纤光栅在承受横向应变时,也会造成光纤光栅反射波长的改变,因此,如果不考虑横向效应的影响,将会对光纤光栅测量结构造成一定的误差[5][6]。苏晨辉[7]等人对表面粘贴式光纤光栅传感器的应变传递机理进行了研究,张俊康[8]、梅钰洁[9]研究了光纤光栅传感器在螺旋管和蒙皮中的测试技术,孙媛凯[10]等人对光纤光栅传感器进行了实验标定,实验证明具有良好的线性度和精度。

本文首次综合考虑了光纤光栅应变传感器横向效应、安装角度、安装角度偏差等因素对测量应变的影响,并得到了安装角度和安装角度偏差对测量应变的关系表达式,对光纤光栅应变传感器的实际应用具有很好的指导意义。

2. 考虑横向效应的应变测量

2.1. 光纤光栅的横向效应

在光纤光栅应变传感器的实际应变测量中,主要利用的是其轴向应变对波长的敏感性,光纤光栅的轴向应变灵敏系数为:光纤承受轴向应变时,其波长的相对变化量与轴向应变的比值,通常记为 K ,即:

$$K\varepsilon_x = \Delta\lambda/\lambda \quad (1)$$

由公式(1)可知:轴向应变与波长相对变化量成正比关系。然而,光纤光栅在实际测量时,不仅受到轴向力还承受横向力,由于横向效应的存在,可能导致一定的测量误差。

如图1所示,在 x 方向存在单向应变 ε_x 的应变场中,对于光纤 F_2 ,其承受横向作用,设 $\Delta\lambda/\lambda = K_B\varepsilon_x$,其中 K_B 为光栅的横向灵敏系数,对于光纤光栅 F_1 ,存在: $\Delta\lambda_L = \lambda K_L\varepsilon_x$,其中 K_L 为光栅的轴向灵敏系数。假设 H 为横向灵敏系数与轴向灵敏系数之比,则存在公式(2):

$$H = K_B/K_L \quad (2)$$

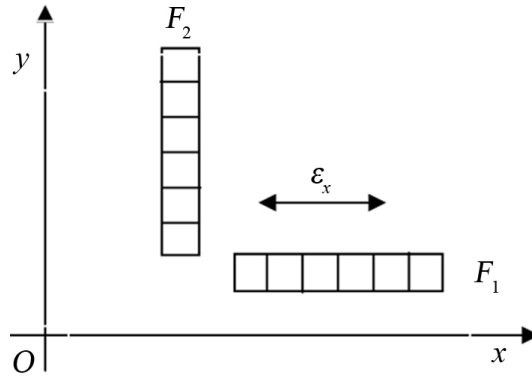


Figure 1. Measurement of transverse coefficients
图 1. 横向系数的测定

2.2. 平面应变场的应变测量分析

在基体表面的复杂应变场中，要确定应变情况，一般需要三根光纤光栅组成一个应变花来测量，理论计算如公式(3)所示[11][12]：

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = l_1^2 \varepsilon_x + m_1^2 \varepsilon_y + l_1 m_1 \gamma_{xy} \\ \varepsilon_2 = l_2^2 \varepsilon_x + m_2^2 \varepsilon_y + l_2 m_2 \gamma_{xy} \\ \varepsilon_3 = l_3^2 \varepsilon_x + m_3^2 \varepsilon_y + l_3 m_3 \gamma_{xy} \end{cases} \quad (3)$$

其中，假设一点三个方向的线应变分别为： ε_1 、 ε_2 、 ε_3 ，三个方向的方向余弦为： l_1 、 m_1 ； l_2 、 m_2 ； l_3 、 m_3 ，根据公式(3)可以求解出 ε_x 、 ε_y 和 γ_{xy} 。

在实验中，经常用量测的办法得出x轴方向、y方向以及与该两轴成45°方向的线应变。这时， $l_1 = 1$ 、 $m_1 = 0$ ； $l_2 = 0$ 、 $m_2 = 1$ ； $l_3 = 1/\sqrt{2}$ 、 $m_3 = 1/\sqrt{2}$ 。

代入上式即可得到：

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_1 \\ \varepsilon_y = \varepsilon_2 \\ \gamma_{xy} = 2\varepsilon_3 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \end{cases} \quad (4)$$

在利用光纤光栅进行应变测量时，特别是在高精度测量时，必须考虑横向效应的影响。在一个复杂平面应变场，我们不能够事先知道正应变方向，假设光纤光栅的轴向和横向均受到应变的作用，沿其轴向的应变记为 ε_L ，沿其横向的应变记为 ε_B ，其波长的变化可表示为：

$$\Delta\lambda = \lambda K_L \left(1 + \frac{H\varepsilon_B}{\varepsilon_L} \right) \cdot \varepsilon_L = \lambda K_L (1 + \alpha H) \cdot \varepsilon_L \quad (5)$$

其中， $\alpha = \varepsilon_B / \varepsilon_L$ 为主应变比，横向应变与轴向应变之比，它与测点的应变场特征和光纤安装方位有关。公式(5)表明：光纤光栅的灵敏度系数不仅与光纤光栅本身有关，还与光纤光栅所在的应变场、光纤光栅的安装角度有关。

如果使用条件满足应变第一主应变方向与光纤轴向重合，且为单向平面应变状态时，则有 $\varepsilon_B / \varepsilon_L = -\mu$ ， μ 为材料的泊松比。于是公式(5)变为：

$$\Delta\lambda = \lambda K_L (1 - H\mu) \cdot \varepsilon_L \quad (6)$$

在实际测量中，我们真正想测量的是 ε_L ，而实际的测量应变 ε_m 是由 ε_L 、 ε_B 共同其作用。光纤光栅的

灵敏度系数为: $K = K_L(1 + \alpha H)$

所以有:

$$\Delta\lambda = \lambda K_L(1 + \alpha H) \cdot \varepsilon_L = \lambda K_L \cdot \varepsilon_m \quad (7)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_L(1 + \alpha H) \quad (8)$$

相对误差为:

$$e = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_L}{\varepsilon_m} = \frac{\alpha H}{1 + \alpha H} \quad (9)$$

由公式(9)可知, H 会造成一定的测量误差, ε_m 是有 ε_L 、 ε_B 共同决定的。

在实际光纤光栅安装过程中, 相互垂直安装两根光栅, 与两光纤光栅成 45° 角方向安装第三根光栅存在:

对光纤光栅1, $\varepsilon_L = \varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_B = \varepsilon_2$;

对光纤光栅2, $\varepsilon_L = \varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_B = \varepsilon_1$;

对光纤光栅3:

轴向应变: $\varepsilon_L = \varepsilon_3 = \frac{1}{2}\varepsilon_1 + \frac{1}{2}\varepsilon_2 + \frac{1}{2}\gamma_{xy}$

横向应变: $\varepsilon_B = \varepsilon_4 = \frac{1}{2}\varepsilon_1 + \frac{1}{2}\varepsilon_2 - \frac{1}{2}\gamma_{xy}$

将光纤光栅1、2、3的应变代入公式(5)中, 得到:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = \lambda K_L \left(1 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} H \right) \cdot \varepsilon_1 \\ \Delta\lambda_2 = \lambda K_L \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} H \right) \cdot \varepsilon_2 \\ \Delta\lambda_3 = \lambda K_L \left(1 + \frac{\varepsilon_4}{\varepsilon_3} H \right) \cdot \varepsilon_3 \end{cases} \quad (10)$$

上式即为修正后的, 考虑横向效应在内的, 光纤光栅应变测量公式, 进一步计算得到平面内应变为:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_1 = \frac{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 H}{\lambda K_L (1 - H^2)} \\ \varepsilon_y = \varepsilon_2 = \frac{\Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1 H}{\lambda K_L (1 - H^2)} \\ \gamma_{xy} = \frac{2\Delta\lambda_3 - \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}{\lambda K_L (1 - H)} \end{cases} \quad (11)$$

3. 安装偏差对测量应变的影响

光纤光栅应变传感器的安装很难保证传感器的轴向与预定方向一致, 从而产生安装角度偏差, 该偏差将会产生传感器测量误差。

设基准方向与第一主应变 ε_1 方向夹角为 φ , 安装偏差为 $\Delta\varphi$ 。

基准应变为:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\varphi \quad (12)$$

实际测量应变为:

$$\varepsilon_{\text{测}} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2(\varphi + \Delta\varphi) \quad (13)$$

测量误差为:

$$\Delta\varepsilon_{\varphi} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \sin(2\varphi + \Delta\varphi) \sin \Delta\varphi \quad (14)$$

可见测量误差不仅与安装偏差 $\Delta\varphi$ 有关, 还于基准方向、主应变有关。

测量应变的相对误差为:

$$e = \frac{\Delta\varepsilon_{\varphi}}{\varepsilon_{\varphi}} = \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \sin(2\varphi + \Delta\varphi) \sin \Delta\varphi}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_2 \cos 2\varphi} \quad (15)$$

设, $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2$ 令 $\alpha = \varepsilon_2/\varepsilon_1$

则: 测量应变的相对误差为:

$$e = \frac{2(1-\alpha) \sin(2\varphi + \Delta\varphi) \sin \Delta\varphi}{2 + \alpha - \alpha \cos 2\varphi} \quad (16)$$

安装角度 φ 为 0° 、 45° 、 90° 时, 主应变比 $\alpha = \varepsilon_2/\varepsilon_1$ 为 -0.5 、 -0.3 、 0 、 0.3 和 0.5 时, 应变测量相对误差随安装角度偏差 $\Delta\varphi$ 变化曲线, 如图2、图3和图4所示。

应变比 α 越大, 应变测量相对误差越小; 随着安装偏差角度的增大, 相对误差逐渐变大; 在安装角度 $\varphi = 90^\circ$ 时, 相对误差与安装偏差角度成线性关系; $\varphi = 0^\circ$ 、 $\varphi = 45^\circ$ 时相对误差随安装偏差角度的变化速率逐渐变大。以相对误差为 5% 为基准, 安装角度 $\varphi = 0^\circ$, 各主应变比对应的临界安装偏差角度依次为: 3.27° 、 3.6° 、 3.9° 、 4.85° 和 5.9° ; 安装角度 $\varphi = 45^\circ$ 时, 各主应变比对应的临界偏差角度依次为: 1.49° 、 1.9° 、 2.9° 、 4.8° 和 7.2° 。安装角度 $\varphi = 90^\circ$ 时, 各主应变比对应的临界偏差角度依次为: 1.5° 、 3° 、 4.1° 、 5.6° 和 7.1° 。

单向应变状态下存在, $\varepsilon_2/\varepsilon_1 = -\mu$, 则测量应变相对误差为:

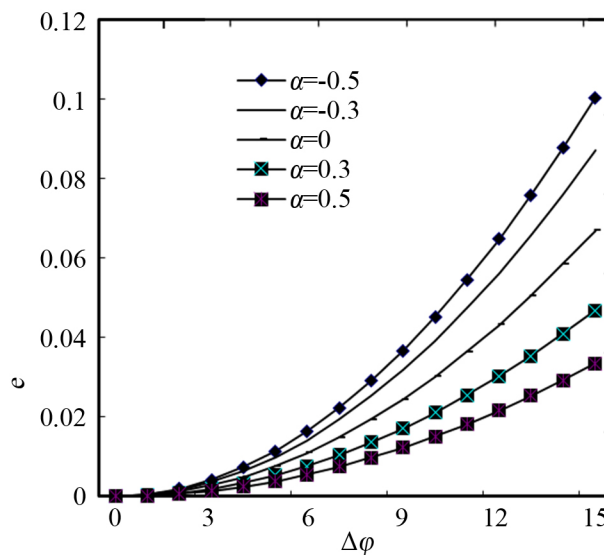


Figure 2. The relationship between installation angle deviation and relative error of measured strain with $\varphi = 0^\circ$

图 2. $\varphi = 0^\circ$ 安装角度偏差与测量应变相对误差关系

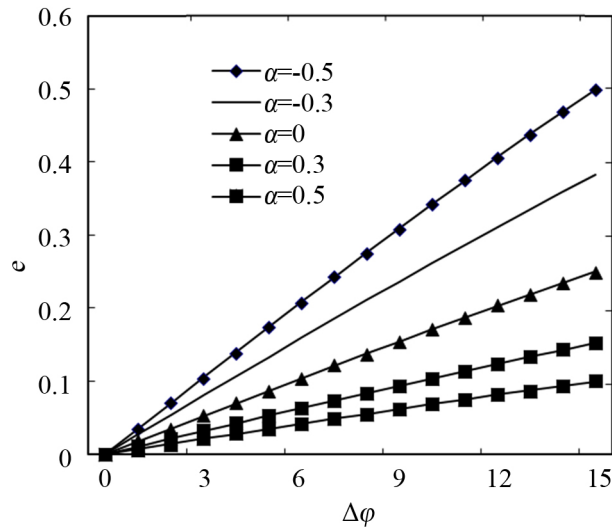


Figure 3. The relationship between installation angle deviation and relative error of measured strain with $\varphi = 45^\circ$

图 3. $\varphi = 45^\circ$ 安装角度偏差与测量应变相对误差关系

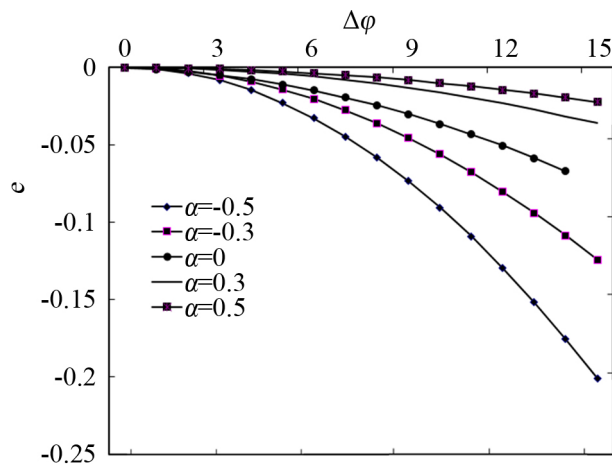


Figure 4. The relationship between installation angle deviation and relative error of measured strain with $\varphi = 90^\circ$

图 4. $\varphi = 90^\circ$ 安装角度误差与测量应变相对误差关系

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{\Delta \varepsilon_\varphi}{\varepsilon_\varphi} = \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \sin(2\varphi + \Delta\varphi) \sin \Delta\varphi}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_2 \cos 2\varphi} \\
 &= \frac{2\varepsilon_1(1 + \mu) \sin(2\varphi + \Delta\varphi) \sin \Delta\varphi}{2\varepsilon_1 - \mu\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_1 \cos 2\varphi} \\
 &= \frac{2(1 + \mu) \sin(2\varphi + \Delta\varphi) \sin \Delta\varphi}{2 - \mu + \mu \cos 2\varphi}
 \end{aligned}$$

取 $\mu = 0.3$ ，安装角度 φ 依次为 0° 、 30° 、 45° 和 90° 时，不同安装角度下的测量应变相对误差分布如图 5 所示，从图 5 中得出，测量应变相对误差随安装角度偏差角度的增大而变大，但是，在相同安装偏差角度下，安装角度在 $\varphi = 45^\circ$ 时的相对误差较大，在 $\varphi = 0^\circ, 90^\circ$ 时，相对误差比较小。以相对误差 5% 为基准，则安装偏差角度 φ 在 0° 、 30° 、 45° 和 90° 下的最大允许安装偏差角度依次为： 3.5° 、 3.9° 、 2.3° 、 1.9° 和 3° 。

取 $\mu = 0.3$ ，安装角度偏差 $\Delta\varphi$ 依次为 1° 、 3° 、 5° 和 7° 时，相对误差随安装角度的变化如图6所示。从图6可以得出：相对误差随着安装角度成类似于正弦函数变化，在安装角为 45° 附近最大，在 0° 、 90° 附近最小。所以在实际应变测量时，应该尽量是安装角度为 0° 或 90° 附近。

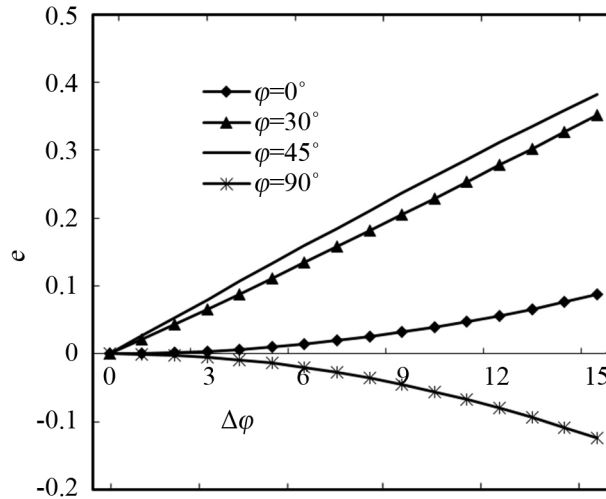


Figure 5. Effect of installation angle on relative error of measured strain

图 5. 安装角度对应变测量相对误差的影响

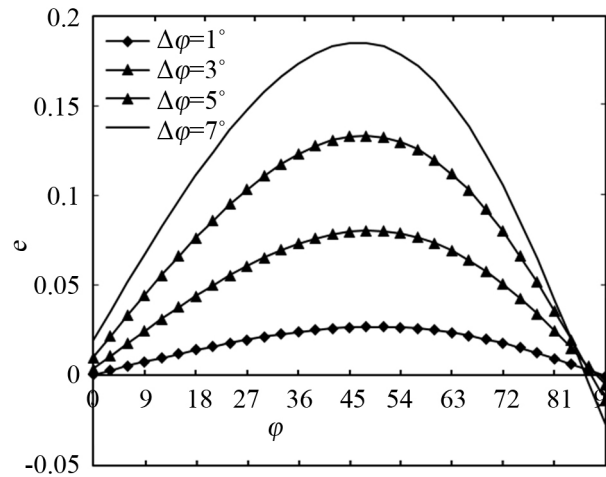


Figure 6. Effect of installation angle deviation on relative error of measured strain

图 6. 安装角度偏差对应变测量相对误差的影响

4. 结论

1) 详细推导了因横向效应而引起的应变测量误差，并进一步建立了考虑横向效应在内的复杂平面应变问题的应变测量修正公式。

2) 分析了由光纤光栅安装角度误差而产生测量误差的机理，并建立了角度误差与测量误差之间的关系表达式。

3) 在相同安装偏差角度下，应变相对误差与安装角度成近似正弦变化；安装偏差角度越大则相对误差越大；正应变比 α 越大，则测量误差越小。

参考文献

- [1] 长自佳. 光纤光栅理论基础与传感技术[J]. 北京: 科学技术出版社, 2009.
- [2] 周雪芳. 光纤布拉格光栅振动传感技术研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- [3] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感器技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 306-317.
- [4] Zhou, J., Zhou, Z. and Zhang, D. (2010) Study on Strain Transfer Characteristics of Fiber Bragg Grating Sensors. *Material Systems and Structures*, **21**, 1117-1122.
- [5] 朱四荣, 等. 光纤布拉格光栅的横向效应研究[M]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [6] 刘春桐, 陈平, 李洪才, 等. 光纤光栅横向效应在平面应变测量中的应用[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(6): 29-32.
- [7] 苏晨辉, 张雷, 隋青美, 等. 表面粘贴式光纤光栅传感器的应变传递机理分析与实验研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(4): 513-517.
- [8] 张俊康, 孙广开, 李红, 等. 变形机翼薄膜蒙皮形状监测光纤传感方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 66-72.
- [9] 梅钰洁, 余有龙, 耿淑伟. 基于光纤光栅的波纹管压弯扭测量技术[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 167-172.
- [10] 孙媛凯, 谢涛, 赵振刚, 等. 光纤 Bragg 光栅倾角传感器的标定与不确定度分析[J]. 光学技术, 2017, 43(3): 252-255.
- [11] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] 王守新. 材料力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2006.

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: 2332-6980, 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: iae@hanspub.org