

文章编号: 0258-7025(2010)11-2891-05

基于闪耀光纤光栅透射特性的分布式 光纤布拉格光栅传感器解调方法

应朝福 彭保进 任志君 万旭 朱银燕 庞辉

(浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘要 建立了一种基于闪耀光纤光栅(BFBG)透射特性的分布式光纤布拉格光栅(FBG)传感器的解调系统。由两个中心波长相近、光栅长度不同的 FBG 并联组成一个传感探头(FBG1 用于参考, FBG2 用于传感), 以消除温度对应变测量的影响。将 BFBG 两端与加有 10 Hz 锯齿扫描电压的压电陶瓷(PZT)相固定, 使 BFBG 的主模和边模发生周期性的同向偏移, 对传感探头的光谱信号进行解调。从 BFBG 出来的透射光经光电管将光强变化转化为电信号, 用计算机对待测应变变量进行实时分析显示。实验表明, 用 BFBG 进行光谱解调是可行的(微应变测量的分辨率为 $5 \mu\epsilon$), 并且成功地解决了温度和应变交叉敏感的问题, 所建立的实验系统稳定可靠, 成本低。

关键词 光纤光学; 光纤光栅传感; 应变测量; 闪耀光纤光栅; 解调器

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2891

Demodulation Method of Distributed Fiber Bragg Grating Sensor Using Blazed Fiber Bragg Grating

Ying Chaofu Peng Baojin Ren Zhijun Wan Xu Zhu Yinyan Pang Hui

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract A new system on demodulation of distributed fiber Bragg grating (FBG) sensor is built using blazed fiber Bragg grating (BFBG). In order to eliminate the temperature effect on strain measurement, two adjacent FBGs (one for sensing, the other for reference) with similar central wavelength and different lengths as a probe by parallel connection are utilized. Both ends of the BFBG are connected to a piezoelectric (PZT). A saw-tooth function voltage with 10 Hz signal is supplied to the PZT. The spectrum signal from the probe can be demodulated by the main mode and the side mode of BFBG periodically offset in the same direction. The transmitted light intensity is converted to electric current by a photodiode which is processed by a computer to display the detected strain in real time. Experimental results show that it is feasible to demodulate action spectrum by BFBG with the resolution of micro-strain detection of $5 \mu\epsilon$. The cross of FBG for temperature and strain is solved. It is testified that the system is stable, reliable, and less-expensive.

Key words fiber optics; fiber grating sensing; strain measurement; blazed fiber Bragg grating; demodulator

1 引 言

光纤传感技术是目前国内外研究的一个热点, 在许多领域尤其是大型土木建筑结构和航空航天飞行器的设计施工过程和安全状态健康监测中都有重要的研究和应用前景, 特别是分布式光纤传感器在大型结构监测领域倍受重视^[1~6]。然而目前分布式

光纤光栅(FBG)传感器信号的解调技术和装置还存在许多不足, 包括性能指标不够优越、成本过高等。目前市场上用得比较多的是基于法布里-珀罗(F-P)滤波器的解调设备, 但价格昂贵。所有这些严重制约了光纤光栅传感器技术的深入研究和推广应用。

闪耀光纤光栅(BFBG)是一种较为特殊的光纤

收稿日期: 2010-03-12; 收到修改稿日期: 2010-05-18

基金项目: 浙江省自然科学基金重点资助项目(Z1080030)和浙江省金华市科技计划项目(2009-1-092)资助课题。

作者简介: 应朝福(1964—), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事全息技术、光电检测、衍射元件设计等方面的研究。

E-mail: ying@zjnu.cn

光栅,光栅轴向与光纤轴向存在夹角 θ ,使得光栅中光的传输模式之间的耦合发生改变,导致不同的倾斜角度对应于光纤光栅不同的光学特性(包括其反射特性、透射特性及辐射特性)^[7~10],从而使其满足不同的环境要求,因而在近几年受到了广泛关注。

本文充分利用 BFBG 的透射特性,设计了一种以压电陶瓷(PZT)调谐闪耀光纤布拉格光栅为基础的新型解调系统。该装置具有测量准确、灵敏度高、简单易行、可远程操作等优点。

2 实验装置和原理分析

实验装置如图 1 所示,宽带光源发出的光经过一个 3 dB 耦合器后接到 $1 \times n$ 多通道光开关分成 n 路,分别连接到 n 个传感头上。每个传感头由一个耦合器和两个 FBG 组成,其中耦合器用于 FBG 的并联,两个 FBG 位置邻近、中心波长相近但光栅长度不同(FBG1 的长度 L_1 大于 FBG2 的长度 L_2)。计算机自动控制光开关,使其在每一时刻只能通一路。被测温度或压力施加于光纤光栅上,由光纤光栅反射回的光信号被闪耀光纤光栅和压电陶瓷、信号发生器组成的解调器解调。然后通过光探测器进行光电转换^[11],由放大电路将该电压信号放大后,送到计算机进行分析、储存,按用户规定的格式在计算机上显示出被测量的大小。当被测量的应变变量超过警戒值时,立刻发出报警信号。

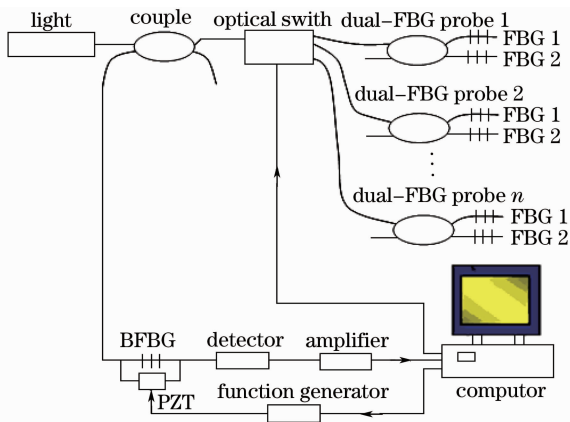


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

2.1 用双 FBG 传感探头分离温度影响

为了分离温度对应变测量的影响,由 2 个相互邻近的中心波长相近但光栅长度不同的 FBG 并联组成一个传感探头。FBG2 用于传感,粘贴在待测物体(如桥梁)上,同时受外界温度和应变的影响;而 FBG1 用于参考,装在一个玻璃管内,两端与玻璃管

固定,使其只受外界温度影响。由于光纤和玻璃管具有相同的热胀系数,因此 FBG1 和 FBG2 的温度敏感系数相同,由温度改变引起的中心波长漂移恰好抵消,从而有效地消除温度对应变测量的影响。因此,当传感探头未受应变影响时两个 FBG 中心波长偏移相同,只产生 1 个反射信号;当探头处有应变时两个 FBG 中心波长偏移不同,产生两个反射信号。由于两个 FBG 的长度不同,因而反射率不同,即两信号的峰值强度不同,FBG1 的反射信号峰值大于 FBG2 的反射信号峰值。两个光栅的中心波长偏移分别表示为^[12]

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = K_2\Delta T, \\ \Delta\lambda_2 = K_2\Delta T + K_1\epsilon, \end{cases} \quad (1)$$

式中 K_1 为 FBG2 的应变敏感系数, K_2 为双 FBG 的温度敏感系数, ΔT 为温度变化量, ϵ 为轴向应变。显然,这两个光栅反射波长的差值是 FBG2 所受应变的线性函数^[13,14],即

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1 = B\epsilon, \quad (2)$$

式中 B 为线性因子。由(2)式可见,只要测定了 $\Delta\lambda$,即可分离温度对 FBG 波长偏移的影响,从而确定传感探头处的应变。

2.2 解调器

为了确定波长偏移量 $\Delta\lambda$,这里使用闪耀光纤光栅、压电陶瓷和信号发生器结合作为解调器。

2.2.1 压电陶瓷及其作用

压电陶瓷是一种能够将机械能和电能互相转换的功能陶瓷材料。该实验使用的是具有逆压电效应的压电陶瓷,在电场作用下会产生微小形变(形变量很小,最多不超过本身尺寸的千万分之一),其应变与其两端所加电压成正比。一般地,单层压电陶瓷片的电致伸缩特性很微弱,目前已广泛采用压电叠堆来提高压电陶瓷形变量,这种陶瓷是用很多压电陶瓷薄片叠合而成的,其形变量为各压电陶瓷薄片的形变量的总和^[15]。

实验中,为了充分利用压电陶瓷的应变,在压电陶瓷的两端各粘贴有机玻璃,将 BFBG 粘贴在两块有机玻璃上端,如图 2 所示。可以认为 BFBG 的应变与压电陶瓷的应变是一致的^[15]。

由于压电陶瓷本身具有良好的温度特性,因此不会对测量过程产生很大的影响。在实验过程中,用信号发生器对压电陶瓷进行控制,周期性改变电压值使其发生形变,进而使 BFBG 发生周期性应变,对传感探头测出的光信号进行解调。通过光探测器进行光电转换,并在计算机上直接监测电压的

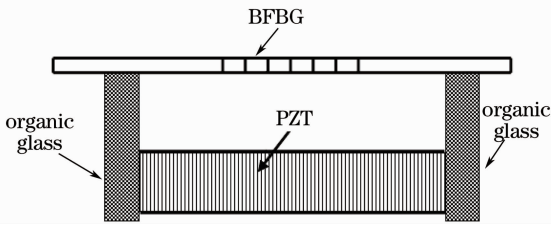


图 2 传感探头结构示意图

Fig. 2 Structure of probe

变化情况,及时转换成波长的应变变量。

2.2.2 BFBG 的光学特性及在该装置中的作用

当一个 BFBG 的光栅轴向与其光纤轴向夹角为 1.5° 左右时,其透射谱有两条较明显的凹陷,对应两条谱线,分别称为主模(Main mode)和边模(Side mode),其波长用 λ_{RM} 和 λ_{RS} 表示,如图 3 所示。

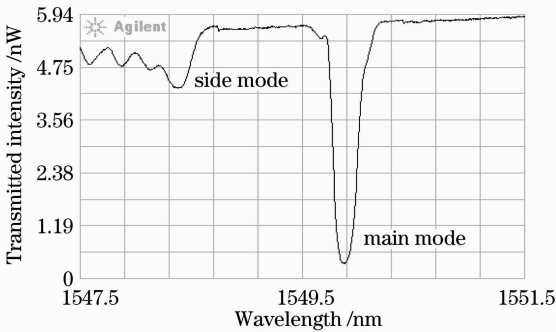


图 3 BFBG 的透射谱

Fig. 3 Transmitted spectrum of BFBG

BFBG 的一个重要特性是主模和边模波长受温度和应变影响,但其波长差 $\Delta\lambda = \lambda_{RM} - \lambda_{RS}$ 不受温度和应变影响^[7,8]。根据这个特性,用 BFBG 作为解调元件组成检测装置。

BFBG 两端与一个压电陶瓷伸张器相固定,PZT 两端加有 0.5 Hz 的锯齿型扫描电压,从而使 BFBG 的主模和边模可发生周期性的同向偏移。在锯齿型扫描信号的一个周期内,探测器(PD)的输出信号如图 4 所示。

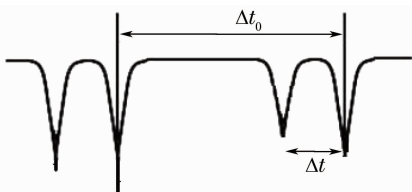


图 4 PD 的输出信号曲线示意图

Fig. 4 Detected signal of PD with strain

传感探头产生对应 FBG1 和 FBG2 两个波长的反射信号。它们经过 BFBG 透射后被 PD 接收,由图 3 所示的 BFBG 透射谱特性可知,PD 的输出信

号有 4 个极小值(如图 4 所示),分为左右两组,每一组极小值中下陷程度较大部分对应 FBG1 的反射信号,下陷程度较小部分对应 FBG2 的反射信号。第一组对应 FBG1 的极小值位置与第二组对应 FBG1 的极小值位置时间间隔为 Δt_0 ,对应于 BFBG 两条透射谱线的波长差 $\Delta\lambda_0$;每组极小值时间间隔为 Δt (此处设传感探头未受应变时为 Δt_1 ,受应变时为 Δt_2),这个时间间隔对应着传感探头 FBG1 和 FBG2 反射信号的波长差 $\Delta\lambda$ 。因此,传感器受应变影响而引起的反射波长偏移可表示为

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_0 \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta t_0} \tag{3}$$

由(3)式即可把 $\Delta\lambda$ 确定下来,从而可推知传感器所受应变的大小。由 FBG1 和 FBG2 反射信号的相对位置还可以判断传感探头处 FBG2 所发生的应变是伸长了还是收缩了。若 FBG2 的信号在 FBG1 的信号右边时, $\lambda_2 > \lambda_1$,则 FBG2 伸长了;反之则 FBG2 收缩了。

2.3 计算机控制方法

2.3.1 光开关的控制

该装置采用 1×8 路光开关(利用电光效应材料的开关),用 PC 机并行口的 2 至 9 脚(对应数据位 DATA0 至 DATA7)中的任何 3 脚可方便地控制各路 的开与关。设定用 DATA0 至 DATA2 的组合控制光开关的第 1 至 8 路。以 VB 编写为例(需动态链接文件 VBIO.DLL 支持),先在标准模块中声明如下:

```
Declare Sub vbOut Lib "VBIO.DLL" (ByVal nPort As Integer,ByVal nData As Integer)
```

```
Declare Function vbInp Lib "VBIO.DLL" (ByVal nPort As Integer)As Integer
```

然后用以下语句控制光开关:

```
vbOut &H378,0'作用:8 个数据位全为低电平
```

```
vbOut &H378,2^{(i+1)}'作用:使第 i 路数据位为高电平
```

```
vbOut &H378,i'作用:应用了数据位的低三位,使第 i 路光开关选通
```

以上假设并口基地址为 378 H,当然也可用函数 GetLptBaseAddr 获取并口基地址。

2.3.2 信号发生器的控制

该装置采用 Agilent 33250A 信号发生器。该信号发生器提供了功能强大的动态链接文件,利用其 output 等语句可让 PC 机很方便地与其进行串行通信,发出各种命令。

2.3.3 数据采集

图 1 中,从 BFBG 出来的透射光经光电管将光强的变化转化为电流或电压的变化,再经放大电路放大至 0~5 V 变化的电压后送往 PC 机的 A/D 卡进行数据采集,实时地分析处理数据并显示待测的应变变量。该 A/D 卡为具有 16 个通道的 10 位卡。向 210 H 写一通道号可选中相应的通道;向 212 H 写入任何一个 8 位数字启动 A/D 转换;当 210 H 的最低位 D0 为 0 时,转换完成;采集结果可从 212 H (放高 8 位)和 213 H (放低 2 位)读出。

图 1 所示的整个装置中,由计算机自动控制信号发生器、光开关及放大电路输出信号采集的同步进行和合理的配合,准确报告出各路探头的应变情况。由 VB 与 VC 编写了整个软件。

3 实验结果

不失一般性,以 8 个探头为例进行实验。采用的宽带光源为 AST_CL,波长范围 1500~1620 nm,光栅中心波长为 1550 nm,应变范围为 0~200 $\mu\epsilon$ (将传感光栅贴在压电陶瓷上进行模拟)。按图 1 所示的原理图将计算机与信号发生器、光开关及放大电路等连接起来,运行软件后,从显示界面上可直观地看到自动轮流监控每通道的情况。一旦发现某通道的应变变量超过警戒值,计算机立即报警。在信号发生器频率为 0.5 Hz 的情况下,监控每通道的时间间隔最小值为 2 s,所以在 16 s 内可将 8 个通道全部扫描一遍(称系统周期为 16 s)。当然加大信号发生器的频率可减少监控每通道的时间间隔,缩短系统周期。

实验装置中每个传感探头的 FBG1 与 FBG2 中心波长的选取非常重要,否则会导致系统检测失效。将 FBG2 贴在已知应变响应特性的标准压电陶瓷(应变范围为 0~500 $\mu\epsilon$,如此 FBG2 中心波长最大偏移量为 0.6 nm)上进行实验。此情况下的选取方法是:在无应变情况下,FBG1 与 FBG2 的中心波长相近且均比图 3 所示的主模波长大 0.6 nm 左右。目的是保证在锯齿型扫描的一个周期内 BFBG 的主模和边模向长波方向移动过程中能与传感信号的波长重合。实验中 BFBG 主模和边模的波长差为 1.56 nm,最大偏移量为 2.5 nm,如此保证了每个扫描周期内均得到如图 4 所示的信号。当然在一个确定系统中,如果事先已测出与 $\Delta\lambda_0$ 对应的 Δt_0 ,则只要保证每个扫描周期内主模向长波方向偏移过程中能与传感信号重合即可,这样可以扩大应变测量

范围。

图 5 为系统采集第 2 通道信号时其中某一周期的实际信号输出图。图中输出信号的 4 个极小值对应图 4 所示的 4 个极小值。

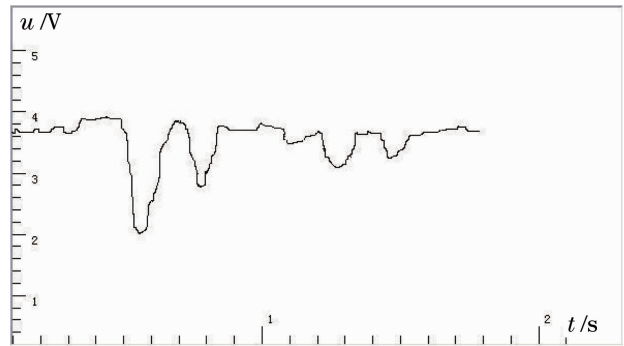


图 5 第 2 通道某周期 PD 的实时输出信号
Fig. 5 Real time output of photodiode on channel 2 during one scanning

通过对已知应变响应的标准压电陶瓷的测试,该实验装置微应变测量的分辨率为 5 $\mu\epsilon$,测量范围为 0~500 $\mu\epsilon$,误差不超过 1%。

4 结 论

实验结果表明,利用 BFBG 进行分布式光纤布拉格光栅解调是可行的,并且方便地解决了温度和应变交叉敏感的问题。所建立的实验系统稳定可靠,自动化程度高,成本低(相比其他的方法^[16],省去昂贵的可调谐 F-P 腔,红外 CCD 等)。另外,由于利用计算机现成的并口数据位(共 8 位)对光开关进行控制,所以硬件控制方便简单,并且可以扩充到 256(2⁸)路传感探头的自动监控。

值得一提的是,由于该装置采用空分复用(SDM)的技术进行解调,所以就实时性而言是准实时的,同一时刻只能看到其中一个通道的实时情况,系统周期为 n/f s(n 为通道数, f 为信号发生器输出的锯齿波频率),比较适用于需多点检测但实时性要求不是很高的场合,特别适用于那些大型建筑物(包括煤矿)的健康监测。

参 考 文 献

- 1 Liao Yanbiao. Fiber Optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 165~212
- 2 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000. 165~212
- 3 Cao Bin, Ou Pan, Jia Ming *et al.*. An innovative temperature-compensate package for fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1959~1961
- 4 曹彬,欧攀,贾明等. 一种新型光纤光栅温度补偿装置[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1959~1961
- 5 Shinji Komatsuzaki, Seiji Kojima, Akihito Hongo *et al.*

- Development of high-speed optical wavelength interrogation system for damage detection in composite materials [C]. *SPIE*, 2005, **5758**: 54~61
- 4 Zhang Dongsheng, Kai Guiyun, Cao Ye *et al.*. A novel fiber grating sensing and demodulating system with temperature compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 307~311
张东生, 开桂云, 曹 晔等. 具有温度补偿功能的光纤光栅传感解调系统[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 307~311
- 5 Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing *et al.*. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 83~86
詹亚歌, 蔡海文, 向世清等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 83~86
- 6 Huang Jingtang, Huang Xuguang, Zhao Huawei. Quasi-distributed fiber Bragg grating sensor using the interrogation of arrayed waveguide grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2067~2071
黄景堂, 黄旭光, 赵华伟. 阵列波导光栅解调的准分布式光纤光栅传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2067~2071
- 7 Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 232~235
黄 锐, 蔡海文, 瞿荣辉等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 232~235
- 8 Liu Hanping, Wang Jiangang, Yang Tianlin *et al.*. Method to measure strain by separating temperature effect with fiber Bragg grating[J]. *J. Applied Optics*, 2006, **27**(3): 235~238
刘汉平, 王健刚, 杨田林等. 可分离温度影响的FBG应变测量方法[J]. *应用光学*, 2006, **27**(3): 235~238
- 9 Teng Fengcheng, Yin Wenwen, Wu Fei *et al.*. Analysis of tilted fiber grating's strain characteristics[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, **27**(s2): 1056~1057, 1064
滕峰成, 尹闻闻, 吴 飞等. 闪耀光纤光栅的应变特性分析[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(s2): 1056~1057, 1064
- 10 Zhou Ciming, Chen Liuyong. Theoretical and experimental research on reflection spectrum characteristic of tilted fiber Bragg grating[J]. *J. Applied Optics*, 2006, **27**(6): 576~580
周次明, 陈留勇. 倾斜 Bragg 光纤光栅反射谱特性理论和实验研究[J]. *应用光学*, 2006, **27**(6): 576~580
- 11 Shang Liping, Zhang Shuqing, Shi Jinshan. The development and status quo of fiber grating sensor[J]. *J. Yanshan University*, 2001, **25**(2): 141~142
尚丽平, 张淑清, 史锦珊. 光纤光栅传感器的现状与发展[J]. *燕山大学学报*, 2001, **25**(2): 141~142
- 12 S. C. Kang, S. Y. Kim, S. B. Lee *et al.*. Temperature-independent strain sensor system using a tilted fiber Bragg grating demodulator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(10): 1461~1463
- 13 Peng Baojin, Zhang Min, Liao Yanbiao *et al.*. Measurement of the 3-D thermal expansion coefficients of material used by an FBG during the large-scale temperature between negative 50 °C and positive 150 °C [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1501~1505
彭保进, 张 敏, 廖延彪等. 在-50 °C~+150 °C大温度范围下用FBG测材料的三维热膨胀系数[J]. *光子学报*, 2005, **34**(10): 1501~1505
- 14 Yong Zhao, Yan Zhao, Mingguo Zhao. Novel force sensor based on a couple of fiber Bragg gratings[J]. *Measurement*, 2005, **38**(1): 30~33
- 15 Zhong Lina, Sun Honglei. High sensitivity fiber Bragg grating sensor for voltage measurement based on piezoelectric ceramic [J]. *J. Chongqing Institute of Technology*, 2008, **22**(1): 107~108
钟丽娜, 孙洪雷. 基于压电陶瓷的高灵敏度光纤光栅电压传感器[J]. *重庆工学院学报(自然科学版)*, 2008, **22**(1): 107~108
- 16 Liu Jianxia, Feng Jinmei. Demodulation for fiber optic grating sensing signals[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2009, (2): 4~6
刘建霞, 冯进玫. 光纤光栅传感信号解调方法的研究[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2009, (2): 4~6