

预紧封装光纤光栅温度传感器传感特性研究*

闫光^{1,2,3}, 辛璟涛^{1,2,3}, 陈昊^{1,2,3}, 骆飞^{1,2,3}, 祝连庆^{1,2,3}

(1. 北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心 北京, 100192)

(2. 北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室 北京, 100192)

(3. 北京信息科技大学生物医学检测技术及仪器北京实验室 北京, 100192)

摘要 为了获得稳定测量温度变化的光纤光栅温度传感器, 笔者研究带预紧力的光纤光栅温度传感器的封装技术及其传感特性。通过温度传感理论分析, 在避免光纤光栅对温度和应变的交叉敏感情况下, 对光纤光栅温度传感器进行有限元 Ansys 应力分布进行模拟, 可知本封装具有一定的减敏作用, 温度测量量程增大, 满足更多实际工程中的应用。环氧树脂 DP420 将带有预紧力光纤光栅封装在镀青铜材料的圆柱体内, 在恒温鼓风干燥箱对光纤光栅温度传感器进行传感特性研究, 40~120 °C 的范围内, 每次升温 5 °C。所得结果, 此光纤光栅温度传感器的温度灵敏度系数为 23.81 pm/°C, 是裸光纤光栅传感器的 2 倍, 且线性度达 0.999 以上。该文对光纤光栅工程化具有较大的应用价值。

关键词 预紧力; 光纤光栅温度传感器; 有限元; 线性度

中图分类号 TP212.1; TH823

引言

光纤光栅(fiber Bragg grating, 简称 FBG)是 20 世纪 90 年代国际上兴起的一种在光纤通信、光纤传感等光电子领域的基础性光纤器件^[1-2]。1989 年, Morey^[3] 提出将光纤光栅用于传感元件, 使得光纤光栅在光纤传感领域备受关注。光纤光栅温度传感器以其抗电磁干扰、体积小、质量轻等特点, 被广泛应用于航空航天、石油管道等领域^[4-7]。光纤光栅传感器具有许多独特的优点, 在工程中被广泛应用。但裸光纤光栅细小质脆容易损伤, 使用中必须对其进行有效保护, 因此有必要对光纤光栅温度传感器进行封装, 这样既保护光栅, 又可以实现其他功能^[8]。国内相关领域的专家学者对光纤光栅温度传感器也进行了许多研究工作。徐元哲等^[9] 使用特殊的工艺将光纤光栅封装在涂覆有聚酰亚胺胶的凹槽基底材料上, 基底材料也采用聚酰亚胺材料, 该方法提高了传感器的灵敏度和可靠性。刘春桐等^[10] 针对表面粘贴式光纤光栅(FBG)传感器存在的封装体积过大、粘接不便的问题, 提出一种光纤光栅的铝合金箔片

封装工艺, 温度灵敏度比裸封装提高了 3.02 倍, 达到 29 pm/°C。郭明金等^[12] 设计了两种光纤光栅温度传感器封装, 并对它们的低温特性进行了实验研究, 温度灵敏度系数分别为 28.2 和 21.3 pm/°C。张燕君等^[13] 研制了一种分布式光纤光栅电缆温度传感器, 在 20~100 °C 范围内线性度良好, 达 99.8%。马晓川等^[14] 对高灵敏度稳定光纤光栅温度传感器进行了研究, 测得其灵敏度系数达 345.9 pm/°C。张荫民^[15] 等对管式封装的光纤光栅温度传感器进行了研究, 增敏性封装温度灵敏度系数达 29.97 pm/°C。Torres^[16] 用三维有限元数学模型分析传感器封装与试验件粘贴后传感器的精度。Bernasconi 等^[17-18] 用有限元分析法分析了试验件上被选点的应力分布情况。

光纤光栅作为光纤无源器件, 对物理量的探测主要由光栅周期的变化和有效折射率的变化引起, 带有预紧力的封装形式对物理量有效的测量具有重要意义。针对光纤光栅温度传感器的预紧封装技术及传感特性问题, 笔者制作了带有预紧力的光纤光栅温度传感器, 采用 Ansys 建模和实验分析对其传感特性进行研究。研究内容有助于光纤光栅应变传

* 教育部“长江学者和创新团队”发展计划资助项目(IRT1212); 北京市科技计划资助项目(Z151100003615010); 北京市教育委员会科技计划资助项目(KM201611232005)
收稿日期: 2015-06-23; 修回日期: 2015-08-23

传感器的优化和性能的进一步提升,以改善光纤光栅温度传感性能。

1 温度传感理论分析

外界温度变化会引起光纤光栅中心波长的漂移,主要是由于温度变化使得光纤发生热膨胀效应、热光效应以及光纤内部热应力引起的弹光效应。根据以下公式^[19]

$$\lambda_B = 2\Delta\eta_{\text{eff}} \quad (1)$$

由式(1)可见,光纤光栅的反射波长主要取决于光栅周期 Δ 和有效折射率 n_{eff} ,当外部温度改变时,可得

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta\Delta\eta_{\text{eff}} + 2\Delta\Delta\eta_{\text{eff}} \quad (2)$$

将其展开变形可得

$$\Delta\lambda_{Br} = 2 \left[\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \Delta T + (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a} \Delta a \right] \Delta + 2n_{\text{eff}} \frac{\partial \Delta}{\partial T} \Delta T \quad (3)$$

光纤光栅感受到外界环境温度发生变化 ΔT 时,不仅会引起光栅周期的变化,而且还会引起有效折射率 $(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}$ 变化,从而引起反射光波长的偏移。光纤光栅传感的基本原理式中: $\partial n_{\text{eff}}/\partial T$ 为折射率温度系数,可用 ξ 表示; $(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}$ 表示热膨胀引起的弹光效应; $\partial n_{\text{eff}}/\partial a$ 表示由于膨胀导致光纤纤芯直径发生变化而产生的波导效应; $\partial \Delta/\partial T$ 表示光纤的线性热膨胀系数,可用 α 表示。

可将式(3)改写为

$$\frac{\Delta\lambda_{Br}}{\lambda_B \Delta T} = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \left[\xi + \frac{(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}}{\Delta T} \Delta T + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a} \frac{\Delta a}{\Delta T} \right] + \alpha \quad (4)$$

根据各向同性胡可定律一般形式可知,光纤光栅各方向应变为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu \frac{P}{E} \\ \nu \frac{P}{E} \\ -\frac{P}{E} \end{bmatrix} \quad (5)$$

可知由温度引起的应变状态为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a\Delta T \\ a\Delta T \\ a\Delta T \end{bmatrix} \quad (6)$$

得到光纤光栅温度灵敏度系数表达式为

$$\frac{\Delta\lambda_{Br}}{\lambda_B \Delta T} = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \left[\xi - \frac{n_{\text{eff}}^3}{2} (P_{11} + 2P_{12}) a + k_{\text{wg}} a \right] + \alpha \quad (7)$$

其中: $k_{\text{wg}} = \partial n_{\text{eff}}/\partial a$, 为波导效应引起的布拉格波长

漂移系数。

根据分析可知,光纤光栅的温度灵敏系数是一个与光纤本身材料相关的定值,因此光纤光栅在作为温度传感器件使用时会有较好的线性度输出。综上所述,在不考虑外界环境的影响下,由普通石英光纤刻写而成的光纤光栅温度灵敏度系数取决于光纤材料的折射率,弹光效应和波导效应,将不会对温度测试下的光纤光栅中心波长产生影响。

2 有限元分析与传感器封装

考虑到铍青铜对温度传感性能要高于铝合金的特点,故选用铍青铜作为温度传感器封装材料,光纤光栅温度传感器封装形式如图1所示。封装铜管全长为50 mm,截面半径 $R=2$ mm 在管中开1 mm 宽和1 mm深的深槽,用于封装光纤光栅。

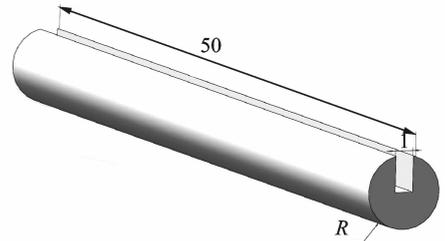


图1 光纤光栅温度传感器封装设计图

Fig. 1 Packaging design of optical fiber grating temperature sensor

由温度传感模型的分析可知,光纤光栅对温度的敏感是根据被测件热胀冷缩产生微形变,导致光纤光栅周期和有效折射率变化,最终导致光纤光栅中心波长发生漂移,所以在对光纤光栅温度传感器进行 Ansys 有限元模拟分析时,施加约束及边界条件均为固定约束和拉伸应力。根据图1所设计的光纤光栅应变传感器封装形式,利用 Ansys 软件,选取 solid 实体单元模型,根据基片材质铍青铜及实际尺寸进行建模。由于要避免光纤光栅对温度和应变的交叉敏感,故不对光纤光栅温度传感器施加三向约束,只对左右两侧施加等量的拉伸应力。实际工程应用中,光纤光栅温度传感器置于测试点,并不对其本身与被测件之间加以固定,Ansys 有限元模型基本符合实际工程,故方案基本可行。

光纤光栅温度传感器封装结构 Ansys 模拟分析出的失稳波如图2所示。从 Ansys 应变分布图来看,光纤光栅温度传感器封装结构,在拉伸应力下产生的变形是:应变呈阶梯状由底端向顶端逐渐递减的。中央的填充胶层并未在较大程度上改变封装

结构的应力分布,封装整体受力分布均匀。光纤光栅所处部位应为圆柱中心轴附近,由 Ansys 分析的应变图可知,此处所感受应变为底层最大应变处的一半,以此保证了光纤光栅在封装之后对温度依旧有良好的传感性能,并且从某种角度来说此封装具有一定的减敏作用,使得封装成型后的光纤光栅温度传感器的收到应力变化的影响减小,以提高实际工程使用中温度测量的精度。

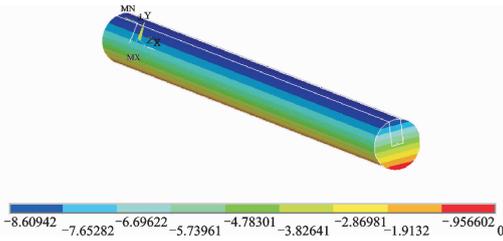


图 2 光纤光栅温度传感器 Ansys 模拟应力分布图

Fig. 2 The stress distribution about simulating fiber Bragg grating temperature sensor through Ansys

2.1 温度传感器封装

由于铍青铜材料对于温度敏感度要高于铝合金 7075-T6,所以选择铍青铜材料为光纤光栅温度传感器封装材料。将铍青铜材料加工成如图 1 所示柱状结构,选取裸光纤光栅,两端用调整架固定并施加一定的预紧力,将栅区置于封装结构深槽中央,待中心波长值稳定后,使用环氧树脂 DP420 对光纤光栅进行封装,并固化 24 h。完成固化后,已封装好的温度传感器中心波长 $\lambda=1\ 544.940\ \text{nm}$ 。光纤光栅温度传感器封装完成后如图 3 所示。



图 3 光纤光栅温度传感器

Fig. 3 FBG temperature sensor

2.2 光纤光栅温度传感器标定实验系统及分析

固化完成的光纤光栅温度传感器需要进行温度标定实验。光纤光栅温度传感器标定实验装置如图 4 所示。

实验采用型号为 DHG-9503A 的电热恒温鼓风干燥箱。其温度测量精度为 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ 。光源使用自制 ASE 宽带光源,带宽范围为 $1\ 525\sim 1\ 600\ \text{nm}$,平坦度 $< 2\ \text{dB}$,输出功率为 $13\ \text{dBm}$ 。反射波长使用自

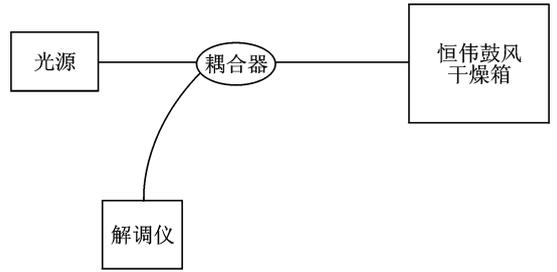


图 4 光纤光栅温度传感器标定示意图

Fig. 4 Optical fiber grating temperature sensor calibration

制光纤光栅解调仪进行监测。波长范围为 $1\ 525\sim 1\ 568\ \text{nm}$,波长分辨率为 $1\ \text{pm}$ 。

宽带光源发出的光经过 1X2 耦合器到达放置在电热恒温鼓风干燥箱内的待标定光纤光栅温度传感器,反射光再经过 1X2 耦合器,通过光纤端头熔接的 FC/APC 接头与光纤光栅解调仪相连接,由光纤光栅解调仪进行信号处理,解调仪与上位计算机连接通过 USB 接口,解调仪计算出的中心波长通过 USB 协议传输至上位计算机软件中并显示出来。

温度标定实验采用温度循环测量的方法。先将温度提升至 $40\ ^\circ\text{C}$,保持稳定一段时间,再将温度逐步提升,每次以 $5\ ^\circ\text{C}$ 为一个步进。温度提升后,等待一段时间,使得由电热恒温鼓风干燥箱读出的箱内当前温度示值稳定后,记录光纤光栅解调仪算出并显示当前温度点对应的光纤光栅反射中心波长数值,直至温度提升到 $120\ ^\circ\text{C}$ 。

随后,按照相同步骤将温度从 $120\ ^\circ\text{C}$ 以 $5\ ^\circ\text{C}$ 为一个步进降低回 $40\ ^\circ\text{C}$,同样地,将对应温度点的光纤光栅反射中心波长记录下来。完成了一次温度循环。如此,共进行 5 次温度循环。

根据温度传感器标定实验中所得到的数据进行处理,各次温度循环中光纤光栅传感器的温度/波长变化基本均在一直线上,即可明显看出光纤光栅温度传感器中心波长与温度变化呈明显的线性关系,如图 5 所示。

根据实验测得光纤光栅温度传感器中心波长与温度变化关系数据,利用最小二乘法拟合可得

$$y = 0.023\ 81x + 1\ 544.590\ 45 \quad (8)$$

式(8)为光纤光栅温度传感器与温度关系拟合结果。拟合结果中,拟合系数为 $0.023\ 81$,拟合线性度达 0.999 以上。没有出现温度突变现象,一般来说,光纤布拉格光栅封装后,由于光纤布拉格光栅的热光系数没有变化,在超出光纤光栅传感器适用范围的温度时,其封装材料以及粘贴树脂由于制作工艺缺陷、自身物理或化学性质等原因,会导致光纤

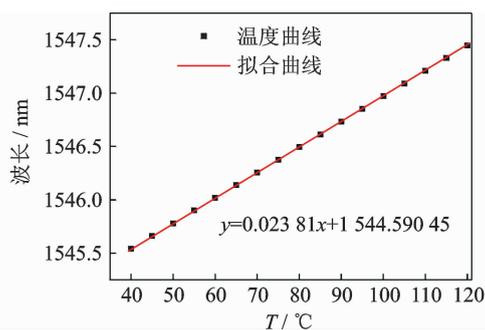


图5 光纤光栅温度传感器中心波长与温度关系曲线

Fig. 5 Center wavelength of FBG temperature sensor with temperature curve

布拉格光栅在此时的温度传感特性发生突变,从而使得读出温度发生突变。说明封装的光纤光栅温度传感器在40~120℃范围内能正常工作并准确反映温度变化。

根据拟合结果,拟合系数为0.02381可知,此光纤光栅温度传感器的温度灵敏度系数为 $k_a = 23.81 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,是普通裸光纤光栅约 $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 的温度灵敏度系数的两倍以上,说明此传感器材料选取、结构设计和封装工艺综合作用下实现了传感器的温度增敏特性。

根据温度分辨率与波长分辨率的关系

$$\Delta t = k_a \Delta \lambda \quad (9)$$

其中: $\Delta \lambda$ 为波长分辨率; Δt 为温度分辨率。

由于实验中光纤光栅解调仪波长分辨率为 1 pm ,可算出该光纤光栅传感器的温度分辨率为 $0.042 \text{ }^\circ\text{C}$ 。而在实际使用中,实际的温度分辨率还取决于实际测量时使用的解调仪波长分辨率,以及应力串扰程度。但是由于传感器封装结构是对于应变减敏的,光纤位置受到的应变比加载到传感器上的应变要小50%,因此应变影响会比一般的结构更小。综上,若实际使用的解调仪波长分辨率为 5 pm ,可以认为该种光纤光栅温度传感器的温度分辨率可达到约 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

3 结束语

采用铍青铜作为封装基片,设计了一种封装结构环氧树脂DP420作为封装黏合剂,使用预紧封装工艺,研制了预紧封装基片式光纤光栅温度传感器,并对其温度传感特性进行了有限元分析。根据分析结果,此种封装具有一定的应变减敏作用,使得封装成型后的光纤光栅温度传感器受到应变的影响减小,可提高实际工程使用中温度测量的精度。根据

温度标定实验,结果表明预紧封装光纤光栅温度传感器线性度良好,具有较高灵敏度,灵敏度系数为 $23.81 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,是普通裸光纤光栅传感器的2倍,且线性度达0.999以上。若实际使用的光栅解调仪波长分辨率为 5 pm ,可认为该传感器能分辨约 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度变化。本研究对光纤光栅的工程化封装技术具有指导性意义。

参 考 文 献

- [1] 周建华,张东生,付荣. 低温环境下光纤光栅啁啾异常现象研究[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2010,32(5):733-737.
Zhou Jianhua, Zhang Dongsheng, Fu Rong. Abnormality of fiber Bragg grating spectrum at cryogenic temperatures [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2010, 32(5):733-737. (in Chinese)
- [2] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57-79.
- [3] Udd E. Fiber optic Bragg grating sensors[J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 1990, 1169(96):98-107.
- [4] Bettini P, Guerreschi E, Sala G. Development and experimental validation of a numerical tool for structural health and usage monitoring systems based on chirped grating sensors[J]. Sensors, 2015, 15(1):1321-1341.
- [5] 王宏亮,宋娟,冯德全,等. 应用于特殊环境的光纤光栅温度压力传感器[J]. 光学精密工程,2011,19(3): 545-551.
Wang Hongliang, Song Juan, Feng Dequan, et al. High temperature-pressure FBG sensor applied to special environments [J] Optics and Precision Engineering, 2011, 19(3): 545-551. (in Chinese)
- [6] 杨秀峰,张春雨,童峥嵘,等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. 中国激光,2011(4):141-144.
Yang Xiufeng Zhang Chunyu, Tong Zhengrong, et al. Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011(4):141-144. (in Chinese)
- [7] 周宜红,黄耀英,严寒柏,等. 闸墩水管冷却的光纤光栅温度监测及反馈分析[J]. 水利水电工程学报,2011,2011(1):49-54.
Zhou Yihong, Huang Yaoying, Yan Hanbo, et al. FBG temperature monitoring and feedback analysis of water-pipe cooling in sluice pier [J]. Hydro-Science

- and Engineering, 2011(1):49-54. (in Chinese)
- [8] 郭亮,张华,冯艳. 光纤 Bragg 光栅封装增敏技术研究现状[J]. 半导体光电, 2012, 33(4):463-466.
Guo Liang, Zhang Hua, Feng Yan. Research status of Fiber Bragg Grating encapsulation and sensitization [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33 (4): 463-466. (in Chinese)
- [9] 徐元哲,马淑婧,张颖,等. 新型封装的光纤光栅温度传感器的研究[J]. 东北电力大学学报, 2012, 32(4): 83-86.
Xu Yuanhe, Ma Shujing, Zhang Ying, et al. Study on new encapsulation technology of temperature sensor of FBG [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2012, 32(4):83-86. (in Chinese)
- [10] 刘春桐,李洪才,张志利,等. 铝合金箔片封装光纤光栅传感特性研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(7): 905-908.
Liu Chuntong, Li Hongcai, Zhang Zhili, et al. Study on the sensing characteristics of fiber Bragg grating packaged by aluminum alloyslice [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2008, 19(7):905-908. (in Chinese)
- [11] 梁丽丽,刘明生,李燕,等. 长周期光纤光栅温度传感器应变交叉敏感的研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3):1020-1023.
Liang Lili, Liu Mingsheng, Li Yan, et al. Solutions of strain and temperature cross-sensitivity of long period fiber grating temperature sensing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3):1020-1023. (in Chinese)
- [12] 郭明金,姜德生,袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 326-330.
Guo Mingjin, Jiang Desheng, Yuan Hongcai. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(3):326-330. (in Chinese)
- [13] 张燕君,康瑞雪,娄俊波,等. 一种分布式光纤光栅电缆温度传感器[J]. 激光与红外, 2010, 40(4):405-409.
Zhang Yanjun, Kang Ruixue, Lou Junbo, et al. Distributed temperature sensor based on fiber grating of cable[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(4):405-409. (in Chinese)
- [14] 马晓川,周振安,刘爱春,等. 高灵敏度稳定光纤光栅温度传感器的研究[J]. 光电子·激光, 2013, 24(7): 1245-1250.
Ma Xiaochuan, Zhou Zhenan, Liu Aichun, et al. A high-sensitivity and stable fiber Bragg grating temperature sensor [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2013, 24(7):1245-1250. (in Chinese)
- [15] 张荫民,张学智,刘锋,等. 管式光纤光栅温度传感器封装与传感特性研究[J]. 电子技术应用, 2014, 40 (10):89-92.
Zhang Yinmin, Zhang Xuezhi, Liu Feng, et al. Study on tubular fiber Bragg grating temperature sensor packaging and sensing characteristics [J]. Application of Electronic Technique, 2014, 40 (10): 89-92. (in Chinese)
- [16] Torres B, Payá-Zaforteza I, Calderón P A, et al. Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for structural health monitoring [J]. Engineering Structures, 2011, 33(2):539-548.
- [17] Bernasconi A, Carboni M, Comolli L. Monitoring of fatigue crack growth in composite adhesively bonded joints using Fiber Bragg Gratings [J]. Procedia Engineering, 2011, 10(7):207-212.
- [18] Panopoulou A, Loutas T, Roulias D, et al. Dynamic fiber Bragg gratings based health monitoring system of composite aerospace structures [J]. Acta Astronautica, 2011, 69(7-8):445-457.
- [19] Flockhart G M H, Maier R R J, Barton J S, et al. Quadratic behavior of fiber Bragg grating temperature coefficients [J]. Applied Optics, 2004, 43(13):2744-2751.



第一作者简介: 闫光,男,1979年8月生博士、讲师。主要研究方向为光纤传感技术及结构健康监测等。曾发表《含口盖复合材料圆柱壳轴压屈曲性能分析》(《吉林大学学报》2015年第45卷第1期)等论文。

E-mail: YanGuang79@bistu.edu.cn

