

新型自温补 FBG 锚杆测力计研制优化及应用

隋青美^{1,2}, 叶青霖¹, 蒋善超¹, 王静¹, 曹玉强¹

1. 山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061

2. 山东大学苏州研究院, 苏州 215123

摘要 针对现有锚杆端部载荷监测仪器无法满足岩土工程长期监测及数据远距离传输的现状, 基于光纤光栅轴向应变特性, 提出一种结构简单、自带温补并适用于工程测量的新型 FBG 锚杆测力计。通过 SolidWorks 2012 有限元仿真软件, 分析锚杆测力计在外界压力下的轴向应变分布, 进一步优化设计传感器内部结构, 提高传感器的应变传递系数。理论计算得该锚杆测力计压力敏感光栅中心波长的变化量 $\Delta\lambda_B$ 与外界压力 F 之间的对应关系为 $\Delta\lambda_B=9.4735 \cdot F$ 。性能实验数据表明该传感器线性度大于 0.99, 压力测量分辨率为 0.093 kN, 压力敏感系数 K 为 10.7 pm/kN。将该 FBG 锚杆测力计应用于某煤矿巷道, 现场测试数据证实该传感器可以实时的监测围岩压力变化, 满足井下复杂测量环境的需求, 实用性较强。

关键词 光纤光栅; 锚杆测力计; 温度补偿; 煤矿巷道实验

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.13.012

Optimization design of a novel FBG anchor dynamometer with temperature self-compensation and its application

SUI Qingmei^{1,2}, YE Qinglin¹, JIANG Shanchao¹, WANG Jing¹, CAO Yuqiang¹

1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China

2. Shandong University Suzhou Graduate School, Suzhou 215123, China

Abstract Because existing anchor end load testing instruments can not achieve long-term geotechnical engineering monitoring and long-distance data transmission, a novel FBG anchor dynamometer with simple mechanical structure and temperature self-compensation suitable for engineering monitoring is proposed based on the axial strain characteristic of fiber Bragg grating. In order to improve strain transfer coefficient of this novel FBG sensor, its internal structure is analyzed by Solidworks 2012 finite element simulation software and further optimized based on axial strain distributions of this FBG anchor dynamometer. The relationship between center wavelength shift $\Delta\lambda_B$ of pressure sensitivity FBG and external load F is calculated to be $\Delta\lambda_B=9.4735 \cdot F$ theoretically. It is shown by performance experiment data that linearity of this sensor is larger than 0.99, its pressure measurement resolution is 0.093 kN and sensitivity coefficient K is 10.7 pm/kN. Coal mine tunnel pre-stressed anchor experiment data confirm that this sensor can achieve real-time surrounding rock pressure measurement, and that it well matches the measurement requirements under complex situation and has certain practical value.

Keywords fiber Bragg grating; anchor dynamometer; temperature self-compensation; mine tunnel experiment

收稿日期: 2015-01-06; 修回日期: 2015-04-27

基金项目: 苏州市科技计划项目(SYG201306)

作者简介: 隋青美, 教授, 研究方向为检测理论与应用、光纤传感技术等, 电子信箱: qmsui@sdu.edu.cn; 叶青霖, 硕士研究生(共同第一作者), 研究方向为新型光纤传感器的研制与应用, 电子信箱: sd340304626@163.com

引用格式: 隋青美, 叶青霖, 蒋善超, 等. 新型自温补 FBG 锚杆测力计研制优化及应用[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 71-75.

锚杆作为地下隧道重要的支护手段之一,其支护质量的好坏决定着巷道的使用安全及围岩的稳定性^[1]。锚杆端部载荷监测仪作为检测锚杆受力状态的有效工具之一。现有锚杆端部载荷的监测仪器主要分为电阻应变式、钢弦式、液压枕式3大类。由于受监测区域地质的复杂性及井下特殊环境的限制,上述锚杆端部载荷监测仪较难实现锚杆端部载荷的长期有效监测,而且其监测信号不易实现数据远距离的传输及数据的自动采集与处理,难以满足隧道健康监测实时监测的要求。

光纤因其抗电磁干扰、信息容量大、适宜远距离传输等特性广泛应用于公路、隧道、大坝等地质工程安全监测中^[2-5]。光纤传感在锚杆受力状态的相关研究中,国内外学者进行了大量的研究工作并取得一定的研究进展。Kerrouche等^[6]通过将多根FBG埋入碳纤维预加固棒实现碳纤维棒受外力影响下轴向应力分布的准分布式测量;隋海波等^[7]通过光纤BOTDR测量技术实现锚杆通体应力、应变的轴向测量;柴敬等^[8]通过光纤光栅测量锚杆拉拔状态下的受力状态,得到锚杆与光栅的应变传递系数为0.879;李毅等^[9]基于光纤光栅设计油缸传递式的FBG锚杆测力计,实现3~15 MPa锚杆压力的测量。然而,准分布式锚杆应力检测不利于现场安装及布线。通过油缸传递的FBG锚杆测力计结构略显复杂难以加工,且通过绝缘油传递应变降低了外界应变与光纤光栅应变之间的应变传递效率。

本研究依据光纤光栅轴向受力特性变化,并充分考虑传感器现场安装及引线,提出一种结构形式简单、量程动态范围大、具有温补特性的光纤光栅锚杆测力计。为实现外界压力与光纤光栅波长之间的有效传递,基于SolidWorks 2012有限元软件仿真并分析锚杆测力计轴向受力的应变分布,进一步优化传感器的内部结构。将该FBG锚杆测力计安装于井下巷道锚杆端部并通过光纤光栅数据采集仪采集现场实验数据。

1 传感器结构设计及其优化

1.1 结构设计

图1为自温补FBG锚杆测力计的剖面图。该锚杆测力计的主体材料为304不锈钢材料,主要包括温补光栅FBG1、压力敏感光栅FBG2、承压元件、防护元件及尾纤引出孔。压力敏感光栅FBG2通过 α -氰基丙烯酸乙酯实现与承压元件的粘接。承压元件两端的凸起台阶确保了传感器受外界压力时集中作用于有效基体,即与传感器内部敏感柱体的截面积与外部受力截面积相同,避免了压力的分散,实现了锚杆所受外界压力的精确测量。

1.2 传感原理

由图1可得锚杆测力计有效截面积 S_{eff} 为

$$S_{eff} = \pi R^2 - \pi r^2 \quad (1)$$

式中, r 、 R 分别为内圆管凸起台阶的内半径及外半径,mm。

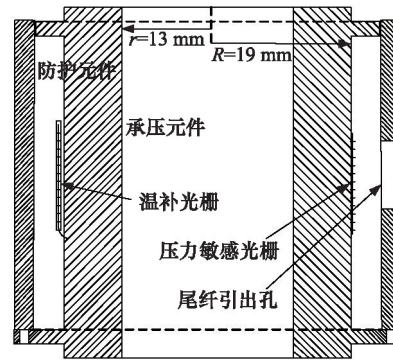


图1 FBG锚杆测力计剖视图

Fig. 1 Sectional view of FBG anchor dynamometer

当外界压力 F 数值范围处于内圆管相应参数线性作用区间, F 作用于锚杆压力计时,其产生应变 $\varepsilon^{[10]}$ 为

$$\varepsilon = F / (E \cdot S_{eff}) \quad (2)$$

式中, E 为304不锈钢的弹性模量, GPa。

根据光纤光栅传感原理^[11],由外界温度 θ 与应变 ε 引起的光纤光栅中心波长偏移为

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \varepsilon + (\xi + \alpha)\theta = K_\varepsilon \varepsilon + K_\theta (\xi + \alpha)\theta \quad (3)$$

式中, $\Delta\lambda_B$ 为布拉格波长变化量, K_ε 为光栅应变的灵敏度, ξ 为光纤光栅热光系数, α 为光纤的热膨胀系数, K_θ 为光纤光栅温度灵敏度。

该锚杆测力计安装于被测点时,FBG1与FBG2处于同一温度场。由温度及应变同时作用引起压力敏感光栅FBG2中心波长的漂移 $\Delta\lambda_{B2}$ 为

$$\Delta\lambda_{B2} = K_\varepsilon \varepsilon + (\xi + \alpha)\theta \quad (4)$$

仅由温度变化导致温补光栅FBG1中心波长的漂移量 $\Delta\lambda_{B1}$ 为

$$\Delta\lambda_{B1} = (\xi + \alpha)\theta \quad (5)$$

由式(1)~(5)得传感器所受外界压力 F 与布拉格光栅波长变化 $\Delta\lambda_B$ 对应的关系为

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_{B2} - \Delta\lambda_{B1} = KF \quad (6)$$

式中, K 为测力计压力敏感系数,pm/kN,其表达式为

$$K = K_\varepsilon / (ES_{eff}) = K_\varepsilon / [E(\pi R^2 - \pi r^2)] \quad (7)$$

当光纤光栅参数确定后, K_ε 为常数(理论值为1.2 pm/ $\mu\varepsilon$)。由式(7)可以看出,通过改变锚杆压力计内圆管凸起台阶内、外半径的数值可得到不同敏感系数及量程范围的FBG锚杆测力计,且光栅中心波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 与外界压力 F 之间成线性对应关系。

当锚杆压力计内圆管凸起台阶内、外半径为13、19 mm,304不锈钢弹性模量为210 GPa,理论计算可得该锚杆测力计压力敏感系数 K 理论值为9.4735 pm/kN。

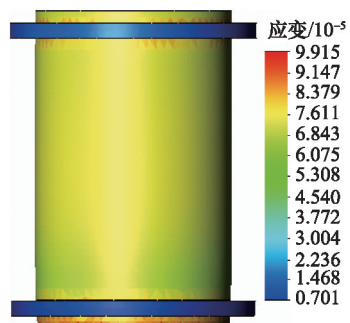
1.3 传感器优化设计

为使外界压力与压力敏感光栅之间的应变传递效率最

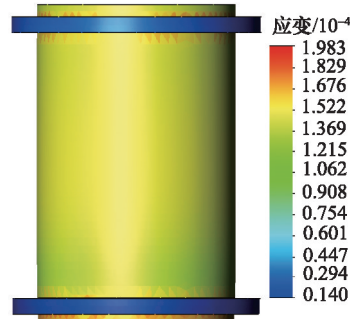
大,通过SolidWorks 2012有限元分析软件分析锚杆测力计轴向应变随外界轴向压力变化的变化情况。有限元仿真实验中锚杆测力计的凸起台阶外半径19 mm,凸起台阶内半径13 mm,304不锈钢弹性模量210 GPa。

图2为该锚杆测力计轴向受外界压力为10、20及40 kN时轴向应变的分布。

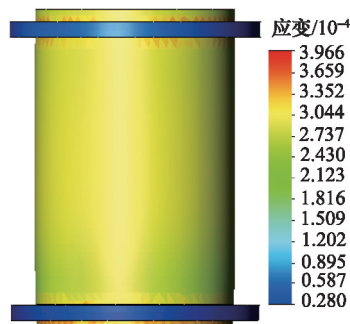
分析图2可得,在外界压力作用下,该FBG锚杆测力计的轴向最大应变主要分布在轴向中心区域。在制作传感器过程中为获得最大的应变传递效率及避免应变不均引起光栅啁啾,压力敏感光栅轴向走向需保证平行于锚杆测力计轴向走向且中心位置与测力计轴向中心位置重合。敏感光栅选择该区域进行粘接可有效提高该传感器的压力检测灵敏度。



(a) 10 kN



(b) 20 kN



(c) 40 kN

图2 FBG锚杆测力计在外界压力下的轴向应变分布

Fig. 2 Axial strain distribution of FBG anchor dynamometer under external stress

2 性能标定实验

2.1 压力性能实验

室温条件下,采用1000 kN万能材料压力机对该锚杆测力计进行压力性能标定实验,压力性能实验框架如图3所示。

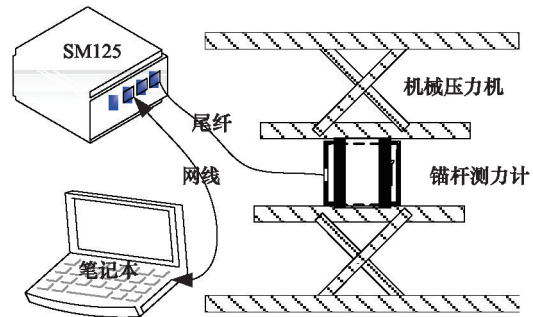


图3 压力性能实验框架

Fig. 3 Frame diagram of the FBG sensor's pressure performance experiment

实验开始前,通过万能材料压力机在锚索测力计上施加5 kN的预压力,每步增加压力5 kN,直至40 kN。该压力测试实验重复3次。实验过程中,采用高精度光纤光栅解调仪(SM125,解调范围1510~1590 nm,解调精度1 pm)采集并记录传感器压力敏感光栅及温补光栅中心波长的数据变化。当锚杆测力计处于自由状态时,FBG1与FBG2中心波长分别为1555.2134和1537.9404 nm,压力性能实验中压力敏感光栅FBG2实验数据如图4所示。

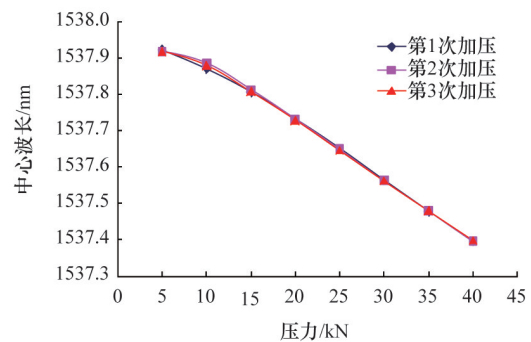


图4 敏感光栅FBG2压力性能实验数据

Fig. 4 Pressure performance experiment data of sensitive grating FBG2

由图4可得,敏感光栅FBG2中心波长在整个实验过程中与外界压力之间表现为较好的线性关系。当外界压力同为10 kN时,敏感光栅中心波长3次测得中心波长存在一定的差异。其主要原因在于万能材料压力机在5~10 kN所消耗时间不同即存在着不同的加压速度,这对于该FBG锚杆测力计存在一定程度的冲击作用,因此相同外界压力状态下中心波长的上下波动存在差异,从而出现压力敏感光栅中心波长存在

较大差异的实验结果。

通过线性拟合图4实验数据可得整个压力性能实验中压力敏感光纤光栅中心波长 $\Delta\lambda_{B1}$ 与外界压力 F 的拟合公式为

$$\Delta\lambda_{B1} = -0.0106F + 1538 \quad R^2 = 0.9993$$

$$\Delta\lambda_{B2} = -0.0105F + 1538 \quad R^2 = 0.9975$$

$$\Delta\lambda_{B3} = -0.0110F + 1538 \quad R^2 = 0.9981$$

综上所述,该锚杆测力计在压力性能实验中温补光栅FBG1波长变化范围不超过10 pm,即温补光栅不受外界应力变化的影响,可起到良好的温补效果。外界压力值变化1 kN时,敏感光纤光栅中心波长变化10.5~11.0 pm,传感器线性度良好,取3次压力性能实验压力敏感系数平均值作为该锚杆测力计的压力敏感系数 K ,其值为10.7 pm/kN,因此可得该测力计的压力测量精度为0.093 kN。压力敏感系数较高于理论计算值,其主要原因在于传感器主体材料的弹性模量存在着一定的取值范围而并非单一具体的理论数值。

2.2 温度敏感性实验

将处于自由不受外界压力状态下的FBG锚杆测力计放入恒温箱中,通过调节恒温箱温度以改变传感器所处外部环境的温度,实现该传感器在10~60℃范围内的温度敏感性实验。图5为温补光栅FBG1及压力敏感光栅FBG2在温度敏感性实验中 $\Delta\lambda_B$ 与温度 θ 的拟合曲线。

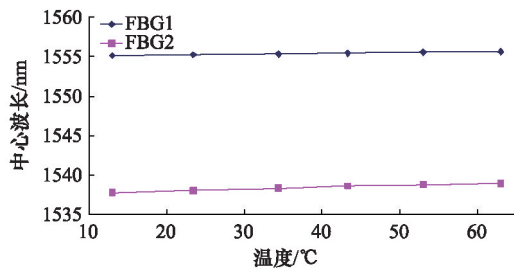


图5 温度敏感性实验中光栅中心波长与温度的拟合曲线

Fig. 5 Curves fitting between FBG center wavelength and temperature in the temperature sensitivity experiment

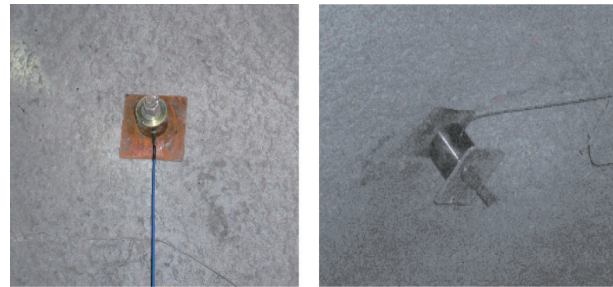
由图5可知,压力敏感光栅FBG2的温度特性呈线性变化趋势,但受黏接剂的影响其温度敏感系数高于裸光栅FBG1。对温度敏感性实验中光纤光栅中心波长与温度进行拟合分析得 $\lambda_{B1} = 0.010\theta + 1555$, $R^2 = 0.999$ (温补光栅); $\lambda_{B2} = 0.024\theta + 1537.5$, $R^2 = 0.984$ (压力敏感光栅)。即温补光栅FBG1对压力敏感光栅FBG2的温度补偿效能系数(K_{T1}/K_{T2})为0.417。

3 工程应用及实用性能分析

3.1 工程简介及传感器安装

某煤矿西翼行人下山在断层破碎带及断层影响带中掘进巷道时,围岩松软破碎、地应力大,巷道成型后都发生了不同程度的变形破坏,巷道拱部、帮部喷层开裂、底鼓严重。借鉴Dong等^[12]在模型实验中传感器的布设方式将该FBG锚杆

测力计安装于锚杆顶端螺母与垫板之间实现了不同位置的锚杆纵向顶端压力测量。图6为标号为1#、2#的该类型FBG锚杆测力计现场安装效果。



(a) 1#

(b) 2#

图6 现场安装效果

Fig. 6 Working sketches of site installation

3.2 实用性能分析

对比同一地点安装之后不同时间FBG锚杆测力计的测量数据确定FBG锚杆测力计的现场使用性能。表1为压力敏感光栅中心波长分别为1544.315及1553.02 nm工程FBG锚杆测力计(1#、2#)在现场应用的测试数据。如表1所示,安装前后(2013-04-01)监测到的应力敏感光栅中心波长的变化有效的显示了将该FBG锚杆测力计安装于锚杆顶部托盘及螺母间外界施加于锚杆顶部的预紧力。对比2013-05-15和2013-04-01的实验数据得该FBG锚杆测力计置于隧道一个多月之后工作状态良好,且测量精度为0.1 kN,能够以具体数值的形式较直观地反映出该监测点在1个月时间内2次压力场形成过程中围岩压力的变化状况。现场测试数据证实了该传感器的实用性及测量精度。目前存在的不足之处在于尚不能提供比较可靠的参照以确定该类传感器现场测量数据的精确度。

表1 FBG锚杆测力计现场测试数据

Table 1 Site test data of FBG anchor dynamometer

传感器编号	时间	传感器状态	中心波长/nm	压力/kN
1#	2013-04-01	未安装	1544.315	0
	2013-04-01	预加应力安装	1544.430	-8.5
	2013-05-15	运行	1544.426	-4.1
2#	2013-04-01	未安装	1553.020	0
	2013-04-01	预加应力安装	1553.124	85.6
	2013-05-15	运行	1553.086	34.7

4 结论

1) 为解决因岩土工程的复杂性及井下环境的特殊性给现有锚杆测力计带来的不便及其数据传输问题,以光纤检测作为基本检测原理提出一种结构简单,带有温度补偿的工程

FBG 锚杆测力计。理论计算得该 FBG 锚杆测力计的压力敏感系数为 9.4735 pm/kN。为有效地提高外界压力与应力敏感光栅中心波长之间的传递效率,基于 SolidWorks 2012 有限元仿真软件分析确定该类型 FBG 锚杆测力计最优化的封装方式。

2) 基于万能材料压力计及高精度光纤光栅解调仪构建 FBG 锚杆测力计特性研究平台。性能标定实验数据表明该 FBG 锚杆测力计压力敏感系数为 10.7 pm/kN,较大于压力敏感系数的理论值。其主要原因在于该 FBG 锚杆测力计的主体材料 304 不锈钢的弹性模量并非理想状态下的 210 GPa。将该 FBG 锚杆测力计安装于某煤矿隧道,现场测试数据证实该类传感器能满足井下工作环境需求,工作状态良好。

参考文献 (References)

- [1] 赵一鸣. 煤矿巷道树脂锚固体力学行为及锚杆杆体承载特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
Zhao Yiming. Study on mechanical behavior of epoxy bonded bolt system and bolt bearing characteristic in coal mine roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [2] 黎剑华, 张鸿, 刘优平, 等. 光纤 Bragg 光栅在公路软基沉降监测中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(5): 1442-1446.
Li Jianhua, Zhang Hong, Liu Youping, et al. Fiber Bragg grating monitoring technology applied in soft ground settlement of high way[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(5): 1442-1446.
- [3] 刘胜春, 张顶立, 黄俊, 等. 大型盾构隧道结构健康监测系统设计研究[J]. 地下空间与工程学报. 2011, 7(4): 741-748.
Liu Shengchun, Zhang Dingli, Huang Jun, et al. Research and design on structural health monitoring system for large-scale shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 741-748.
- [4] 段杭, 任大春, 王宗魁, 等. 光纤 Bragg 光栅温度传感器在三峡大坝坝前水温监测中的应用[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(9): 25-28.
Duan Hang, Ren Dachun, Wang Zongkui, et al. Application of FBG temperature sensors in water temperature monitoring for three gorges dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(9): 25-28.
- [5] Zhang X S, Ning C X. Application of fiber Bragg grating sensors on monitoring of cables' tension[C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments. ICEMI, 2007: 4-232-4-235.
- [6] Kerrouche A, Boyle W J O, Sun T, et al. Strain measurement using embedded fiber Bragg grating sensors inside an anchored carbon fiber polymer reinforcement prestressing rod for structural monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(11): 1456-1450.
- [7] 隋海波, 施斌, 张丹. 基于 BOTDR 的锚杆拉拔试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 755-759.
Sui Haibo, Shi Bin, Zhang Dan. BOTDR-based pull-out tests on anchor bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 755-759.
- [8] 柴敬, 赵文华, 李毅, 等. 光纤光栅检测的锚杆拉拔实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(5): 719-723.
Chai Jing, Zhao Wenhua, Li Yi, et al. Pull out tests of fiber Bragg grating sensor fitted bolts[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(5): 719-723.
- [9] 李毅, 柴敬, 邱标. 带有温度补偿的光纤光栅锚杆测力计设计[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(2): 90-93.
Li Yi, Chai Jing, Qiu Biao. Design on optical fiber and optical grating bolt dynamometer with temperature compensation[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(2): 90-93.
- [10] 裘祖荣. 精密机械设计基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
Qiu Zurong. Elementary precision machinery design[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [11] 廖延彪. 光纤光学——原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
Liao Yanbiao. Fiber optics: Principles and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [12] Dong X, Wu C Y. Study on the application of FBG monitoring on roof falling of mine based on model experiment[C]. Management and Service Science 2010 International Conference, Wuhan, August 24-26, 2010.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



中国科学技术协会

中国科协与福建省签署 实施创新驱动助力工程合作协议

2015年6月17日,中国科协与福建省人民政府签署“实施创新驱动助力工程合作协议”。中国科协党组书记、常务副主席、书记处第一书记尚勇,福建省委书记尤权、省长苏树林出席签约仪式。尚勇、苏树林代表双方签署合作协议。

根据协议,中国科协与福建省人民政府将在重大决策咨询、产业创新发展、学术交流与合作、利用海外人才智力、推动创新驱动示范城市建设等方面进一步加强合作。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/16470281.html>。