

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210368

用于铝电解电流精确测量的手持式 光纤电流传感器研究*

李建光^{1,2}, 肖浩³, 刘东伟³, 李芳^{1,2}, 刘育梁^{1,2}

(1. 中国科学院大学材料与光电研究中心 北京 100049; 2. 中国科学院半导体研究所 北京 100083;
3. 北京世维通光智能科技有限公司 北京 100085)

摘要: 电流强度是电解铝工艺的基本参数, 精确测量电解槽分布电流可提高铝电解生产效率和稳定性。本文分析了光纤电流传感器相比于传统电流测量技术在电解槽电流测量中的原理性优势, 针对目前光纤电流传感器在现场应用中存在的重复拆装和大电流条件下温度误差问题, 创新提出了基于柔性封装的传感光纤插接方案和温度误差与非线性误差二维补偿技术, 首次设计研制了手持式光纤电流传感器, 测试结果表明: 传感器的重复拆装误差小于 0.12%, 在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 温度范围内测量 0.5~30 kA 电流时的误差小于 0.2%, 在某电解槽现场测量立柱母线电流时与控制室显示值的误差小于 0.4%, 并通过对阴极钢棒分布电流的连续监测和分析, 实现了电解槽破损的提前预警。

关键词: 铝电解; 电流测量; 手持式; 光纤电流传感器; 柔性插接; 二维补偿

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on the handheld fiber-optic current sensor for aluminum electrolysis current measurement

Li Jianguang^{1,2}, Xiao Hao³, Liu Dongwei³, Li Fang^{1,2}, Liu Yuliang^{1,2}

(1. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
3. Beijing SIO Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Current intensity is the basic parameter of the electrolytic aluminum process. The accurate measurement of electrolytic cell current is beneficial to improve the production efficiency and work stability. This article analyzes in principle about the reason why the fiber-optic current sensor has high accuracy in electrolytic aluminum current measurement compared with the traditional current measurement technology. To reduce the repeated disassembly and assembly error and high current temperature error of fiber-optic current sensor in field applications, innovatively proposed key technologies such as the sensing optical fiber plug-in scheme based on flexible packaging, two-dimensional compensation of temperature error and nonlinear error, etc. The handheld fiber-optic current sensor is designed and developed for the first time. The test results show that the error of the sensor under repeated disassembly and assembly is less than 0.12%, the error when measuring 0.5~30 kA current in the temperature range of $-40^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ is less than 0.2%. When measuring the column bus current in an electrolytic cell, the error with the displayed value in the control room is less than 0.4%. Through the continuous monitoring and analysis of the distributed current of the cathode soft discharge, the early warning of the damage of the electrolytic cell is realized.

Keywords: aluminum electrolysis; current measurement; handheld; fiber-optic current sensor; flexible plug; 2D compensation

0 引言

电解铝工业在国民经济中占有重要战略地位,其过程控制技术更是高效节能运行的关键^[1]。铝电解槽的电流传导部分通常包含阳极大母线、阳极导杆、阴极钢棒和铝液,母线电流通过阳极大母线上压接的多个阳极导杆将电流传输至阳极炭块,再通过电解质、铝液、阴极炭块、阴极钢棒等材料到阴极,电解槽运行时的母线电流、阳极和阴极分布电流均会影响其系统稳定性^[2]。其中,阳极和阴极的极间短路电流是电解槽安全运行的主要生产管理参数之一^[3-4],阳极电流分布状况是预测阳极效应的关键参量^[5],也是衡量换极质量最重要的指标^[6],阳极电流被认为是最有价值也最有可能被测量的信号之一^[7],阴极电流是判断电解槽破损情况的重要辅助判据之一^[8],因此对电解槽的母线电流和分布电流进行在线监测是铝电解工艺中非常重要的环节,也是实现铝电解工艺走向智能化生产的支撑要素^[9]。

1 理论分析

铝电解槽电流的测量方法分为接触式和非接触式两类,其中接触式检测方法普遍基于等距压降原理而设计,非接触式测量则可采用霍尔传感器阵列或光纤传感器方案,以下结合三种电流测量方法的原理对比分析其测量精度。

1.1 等距压降法

等距压降法的测量原理基于欧姆定律,以图1(a)所示的阳极导杆电流测量模型为例,通过电压采集直接获取特定长度导杆上的电压降,结合导杆电阻即可计算出流过导杆的阳极电流值^[10],图1(a)中导杆电流 I_a 的计算式如下:

$$I_a = \frac{V_1 - V_2}{R_a} = \frac{V_1 - V_2}{\rho L / S} \quad (1)$$

式中: V_1 和 V_2 分别为被测导体两端的测量电压值, R_a 为被测导体段的计算电阻, ρ 为铝导杆的电阻率, L 为所测部分的导杆长度, S 为铝导杆的横截面积。

等距压降法能够测量准确的前提是导杆上测点所对应的截面电流分布均匀且测量器具与导杆表面接触良好,实际应用时由于导杆表面氧化、接触不良、接线松动、测量位置受限、表面电流分布不均等因素影响,其测量精度仅能达到10%^[10],只能反映电流变化的大致趋势。

1.2 霍尔传感器阵列

霍尔传感器的测量原理基于毕奥-萨伐尔定律,在获知导体外形尺寸和传感器安装位置等参数后,结合霍尔传感器的磁感应强度测量值,可以计算出被测导体电

流^[11]。图1(b)为采用3个霍尔元件组成的传感器阵列测量阳极导杆电流时的示意图,当霍尔传感器的安装位置垂直于 x 轴时,阳极导杆电流 I_h 的计算式为^[12]:

$$I_h = \frac{2\pi(B_1 - 2B_2 + B_3)}{\mu_0(al_m^2 - cl_n^2)} \quad (2)$$

式中: B_1 、 B_2 、 B_3 分别为3个霍尔元件测得的空间磁感应强度值, μ_0 为真空磁导率, a 和 c 为电解槽模型的拟合系数, l_m 和 l_n 分别为相邻两传感器在 x 轴方向和 y 轴方向上的距离。

由于铝电解槽特殊的导体结构所产生的复杂背景磁场,测量值 B_1 、 B_2 、 B_3 会同时受到阳极导杆电流产生的磁场 B_c 和背景干扰磁场 B_i 的影响^[13],即使通过磁屏蔽方法对干扰磁场 B_i 进行抑制,霍尔传感器也难以实现电流的高精度测量,其误差仍在3%以上^[12]。

1.3 光纤电流传感器

光纤电流传感器的敏感单元是光纤传感环,由光纤波片、传感光纤和反射镜组成,其结构如图1(c)所示,被测导体从光纤传感环内穿过,被测导体产生的磁场强度为 H_1 ,当光纤传感环外部也存在一个干扰源导体时,其磁场强度用 H_2 表示。传感光路的闭合点由光纤波片和反射镜组成,当光纤波片与反射镜在空间位置上重叠时即满足光路闭合条件(传感光纤在被测导体外部形成一个闭合的环形光路)。通过微元法将传感光纤分成 M 等分, $d\mathbf{l}$ 为传感光纤的单位长度矢量,根据法拉第磁光效应和安培环路定律,传感光纤中产生的法拉第相移角如式(3)所示。其中的第一项由磁场 H_1 引入,第二项由磁场 H_2 引入,由于磁场 H_2 在光纤传感环内的磁通量为0,所以第二项的计算值为0,因此在理想闭合条件下,光纤传感环不会受到外部干扰磁场的影响。

$$\varphi_F = 4V \oint H_1 d\mathbf{l} + 4V \oint H_2 d\mathbf{l} =$$

$$4VNI + 4Vd\mathbf{l} \times \sum_{i=1}^M H_{2i} = 4VNI + 4Vd\mathbf{l} \times 0 = 4VNI \quad (3)$$

式中: φ_F 为传感光纤中产生的法拉第相移角, V 为传感光纤的维尔德常数, N 为光纤匝数, I 为被测导体电流值, H_{2i} 为外部导体在传感光纤第 i 个长度微元上产生的磁场强度值。

在实际制作工艺中,当光纤波片与反射镜在空间位置上不完全重叠时,式(3)的第二项不为0,此时产生的计算误差称为闭合误差^[14],通过减小光纤波片与反射镜之间的空间距离、增加传感光纤圈数以及增加磁屏蔽结构^[15]等方法,可以将闭合误差控制在0.2%以内。

由于具有良好的抗外部磁场干扰能力,光纤电流传感器的测量精度通常满足0.5级^[16],且传感光纤安装灵活轻便、节省空间,已成为铝电解电流测量应用领域的优选方案^[17-18]。

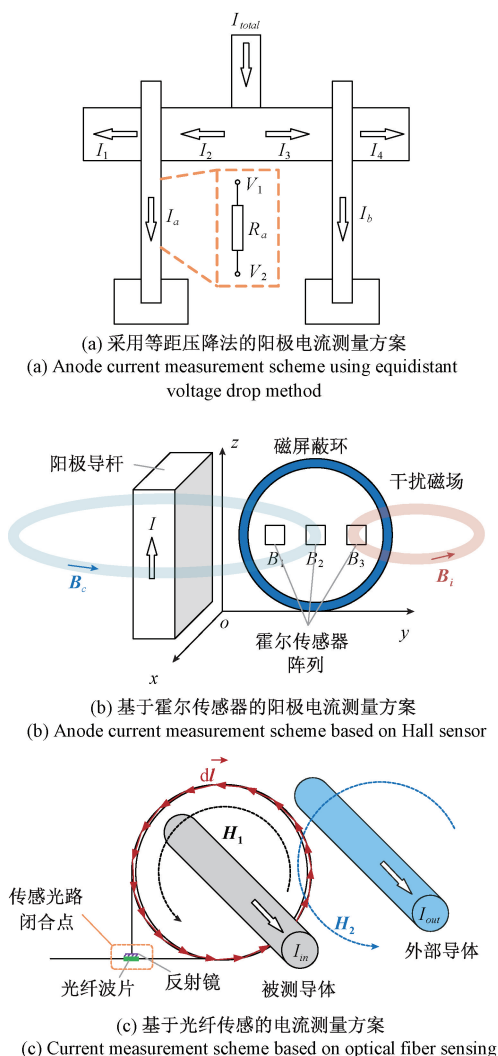


图 1 3 种电流测量方法的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of three current measurement methods

然而,目前光纤电流传感器在电解铝行业中的应用仍存在问题:

1) 现有的光纤电流传感器主要用于汇流母排大电流实时监测,通常采用骨架安装在固定位置进行测量,而阳极导杆需要定期做换极操作,要求传感器拆装方便,阴极软带测量空间非常狭窄且测点多,要求传感器体积小且便于携带,目前市场上还没有专用于进电立柱母线、阳极导杆以及阴极软带等大电流测量的移动式光纤电流测量设备^[19];

2) 铝电解电流的测量环境恶劣,高温测点多,被测电流值通常高达几十 kA 到几百 kA,而现有对光纤电流传感器温度误差补偿的研究只是在较小测量电流下进行,没有考虑到温度误差模型会随着被测电流的变化而变化^[20-21]。同时,大电流光纤电流传感器的标定通常只在室内进行,其非线性误差的修正方案中没有考虑温度

变化的影响^[22]。因此,在需要同时考虑温度误差和大电流非线性误差时,原有的标定和补偿方法不完全适用,需要研究基于温度和被测电流值的二维误差修正方法。

本文通过柔性封装的传感光纤插接方案,结合集成光路封装工艺,提出基于温度和被测电流值的二维误差补偿技术,首次实现了手持式光纤电流传感器的开发设计。该款光纤电流传感器可实现 0.2% 的测量精度,且其传感环部分具备柔性安装和插拔式拆卸功能,可为铝电解电流测量提供精准、稳定、可靠、灵活的解决方案。

2 关键技术

2.1 基于柔性封装的传感光纤插接方案

光纤电流传感器的光纤传感环通常采用固定式骨架封装保护,安装时需要断开导流母排,在铝电解电流测量场合无法直接应用,因此需要将光纤传感环设计成柔性安装方式,通过耐高温防护材料将光纤封装在柔性保护套管中,同时使用光学胶将光纤波片和反射镜的位置固定,以保证传感光纤能够在应用现场缠绕导体并完成光路闭合操作,目前已有不少研究成果^[23-24],但柔性安装通常会伴随着以下两个问题:

1) 光纤波片与反射镜位置在多次重复拆装的作用力下可能会发生相对位移,导致传感光路出现闭合误差;

2) 为实现光纤传感环的现场复用和运维替换,以进一步降低传感器使用成本,需要熔接采集模块与光纤传感环之间的保偏光纤,但铝电解电流测量现场通常是高温、高尘土的操作环境,光纤熔接操作难度大,为能简化电流测量操作、提高电流测量效率,可以通过插拔方式来实现光路连接。目前常规的方案是将采集模块与光纤传感环之间的保偏光纤改为跳线对接,但由于保偏光纤跳线的偏振串音很难做到小于 -25 dB,并且传感器对保偏光纤跳线的对轴角度误差非常敏感,式(4)为保偏光纤对轴误差角 θ 与传感器输出误差 RE 的关系式^[25],式(5)为保偏光纤对轴误差角 θ 所形成的偏振串音 CT 的计算式,图 2 为保偏光纤对轴误差角 θ 与传感器误差 RE 以及保偏光纤偏振串音 CT 的仿真关系模型,其中被测电流为 100 kA,传感光纤为 1 圈,从仿真结果可以看出,当对轴误差角超过 2.4° (也即偏振串音高于 -27 dB) 时,传感器误差就已超出了 0.2%,且当被测电流更小时,传感器误差还会更大,而即便通过复杂的光路结构来降低保偏光纤跳线对轴角误差对传感器精度的影响,也会大幅提升光路成本^[26]。

$$RE = \frac{\arctan\left(\frac{\tan 2\varphi_F}{\cos 2\theta}\right)}{2\varphi_F} - 1 \quad (4)$$

$$CT = 20 \times \lg(\tan \theta) \quad (5)$$

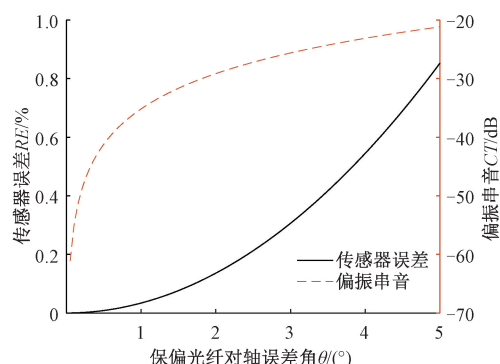


图2 保偏光纤对轴误差角与传感器误差以及保偏光纤偏振串音的仿真关系模型

Fig. 2 Simulation model of polarization-maintaining fiber on-axis error angle, sensor error and polarization-maintaining fiber polarization crosstalk

为此,本研究团队提出一套基于柔性封装的传感光纤可插接式光路设计方案^[27],如图3所示。将 $\lambda/4$ 波片与反射镜的光路闭合点固定在采集模块内部,将传感光纤制作成光纤跳线0°端面对轴的对接形式,光纤跳线头和传感光纤均使用柔性套管进行保护封装,反射镜固定在柔性套管的另一端,被设计成可插拔的机械结构,必要时可从采集模块中取出。这种方案的 $\lambda/4$ 波片和反射镜不会随着重复拆装操作而发生相对位移,因此在重复拆装光纤传感环的过程中不会产生附加的闭合误差,同时光纤传感环也可以完全脱离采集模块,当光纤传感环发生故障时,可在应用现场直接更换且无需熔接操作。

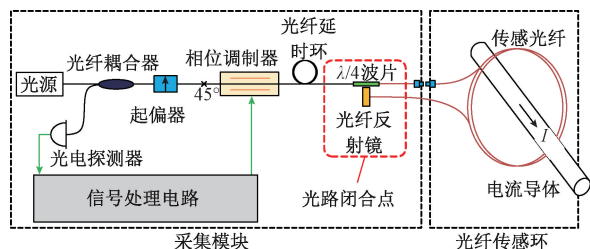


图3 传感光纤柔性封装与对接技术方案

Fig. 3 Technical solution for flexible packaging and docking of spun fibers

当采用低双折射光纤作为传感光纤时,两段传感光纤可以以任意角度对接。高双折射旋转光纤的主轴在传播方向上保持旋转,在一个完整的圆拍长内总会存在相互正交的两个光纤主轴使得椭圆偏振态在传输过程中产生的线性双折射得到补偿,而高双折射旋转光纤本身具有较大的圆双折射,可以对光纤中的残余线性双折射产生抑制作用,因而能够保持光信号的椭圆偏振态,因此如果采用高双折射旋转光纤作为传感光纤,当两段传感光纤存在对轴误差角时,等价于在这个圆拍长内缺失或是

多出了一段无法对其产生的线性双折射进行补偿的光纤段,但在较大圆双折射的抑制下,不会对传感器的测量精度产生较大影响,因此传感光纤对于对轴角精确度的要求相对较低。将传感光纤制作成光纤跳线来实现插接方案可以降低光路工艺难度、保证传感器测量精度,同时也可实现光纤传感环的便捷替换。

2.2 温度误差与大电流非线性误差的二维补偿技术

光纤电流传感器的温度误差主要来源于光纤传感环,由传感光纤中维尔德常数的温漂引起,维尔德常数的典型温漂系数是 $(1/V) \cdot dV/dT = 0.7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[28],因此在接近125℃的温差($-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$)范围内,传感器的误差变化达到0.875%。早期常采用低双折射光纤作为传感光纤,但低双折射光纤存在较大的弯曲致线性双折射,并且抗机械应力干扰的能力较差,光信号偏振态很容易受光纤封装工艺的影响,为此不得不利用复杂的工艺来降低光纤的线性双折射,比如去除涂覆层、对光纤做退火处理,以及利用石英毛细管和硅油填充物来保护光纤等^[28],可以最大程度上减少线性双折射对传感环温度误差的贡献。

当光纤波片的相位延迟角存在一个偏离 90° 的误差角 ε 时,光纤波片会产生温度误差,通过选择合适的 ε 值可以使得光纤波片的温度误差与维尔德常数引起的温度误差形成一定的自补偿效果,这就是目前常用的温度误差自补偿方案^[29]。

对低双折射光纤的处理工艺仅仅适用于固定式骨架的传感环,柔性封装的传感环较难采用。相比于低双折射光纤,高双折射旋转光纤对涂覆层或封装引起的机械应力和弯曲致线性双折射更为不敏感,因此适合于用做柔性封装的传感光纤材料,然而高双折射光纤中的残余线性双折射无法通过工艺处理方法去除,并且会随着温度变化,使得传感环对温度变化的敏感性提升。当采用光纤波片进行温度误差自补偿时,往往需要更大的误差角 ε ,而光纤波片的误差角 ε 也是引入大电流非线性误差的主要原因之一^[30]。当线偏振光以 45° 对轴角度进入非理想光纤波片后,其输出光波可以分解为相互正交的两个圆偏振态子波列,其中一个圆偏振态是主光波列,另一个是次光波列,两种光波列均可以形成法拉第相移角,而次光波列产生的法拉第相移角不仅与电流有关,还与光纤波片的误差角 ε 有关,这就是非理想光纤波片在光纤传感环中引入非线性误差的物理机理。

因此在设计光纤波片时需要同时考虑传感环的温度误差和非线性误差,可以通过对传感环的温度误差和非线性误差进行二维建模来实现光纤传感环误差的精确补偿。

由于光纤传感环的温度误差与光纤波片相位延迟角符合二次曲线关系^[28],光纤传感环的非线性误差与被测

电流值也可用二次函数近似^[31],我们提出了基于二次曲面拟合方法对光纤传感环进行最简化的误差建模,设定其模型如下:

$$RE = f_{RE}(T, I) = a + bT + cI + dT^2 + eTI + fI^2 \quad (6)$$

式中: T 为环境温度,可由集成在光纤传感环中的温度传感器探测获得, I 为原始测量电流值, RE 为光纤传感环误差, $f_{RE}(T, I)$ 为光纤传感环误差关于温度和电流的二元函数, a, b, c, d, e, f 分别为模型系数,对于已经测得的 m ($m \geq 6$) 组 $T(i)$ 、 $I(i)$ 和 $RE(i)$ 数据序列,其中 $i = 1, 2, \dots, m$,构造误差函数序列 $e_r(i)$,其表达式为:

$$e_r(i) = a + bT(i) + cI(i) + dT^2(i) + eT(i)I(i) + fI^2(i) - RE(i) \quad (7)$$

则误差函数序列 $e_r(i)$ 的平方和为:

$$E = \sum_{i=1}^m e_r^2(i) \quad (8)$$

令 E 对各模型系数的一阶偏导等于 0,则有:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{m(m+1)}{2} & \sum_{i=1}^m T(i) & \sum_{i=1}^m I(i) & \sum_{i=1}^m T^2(i) & \sum_{i=1}^m T(i)I(i) & \sum_{i=1}^m I^2(i) \\ \sum_{i=1}^m T(i) & \sum_{i=1}^m T^2(i) & \sum_{i=1}^m T(i)I(i) & \sum_{i=1}^m T^3(i) & \sum_{i=1}^m T^2(i)I(i) & \sum_{i=1}^m T(i)I^2(i) \\ \sum_{i=1}^m I(i) & \sum_{i=1}^m T(i)I(i) & \sum_{i=1}^m I^2(i) & \sum_{i=1}^m T^2(i)I(i) & \sum_{i=1}^m T(i)I^2(i) & \sum_{i=1}^m I^3(i) \\ \sum_{i=1}^m T^2(i) & \sum_{i=1}^m T^3(i) & \sum_{i=1}^m T^2(i)I(i) & \sum_{i=1}^m T^4(i) & \sum_{i=1}^m T^3(i)I(i) & \sum_{i=1}^m T^2(i)I^2(i) \\ \sum_{i=1}^m T(i)I(i) & \sum_{i=1}^m T^2(i)I(i) & \sum_{i=1}^m T(i)I^2(i) & \sum_{i=1}^m T^3(i)I(i) & \sum_{i=1}^m T^2(i)I^2(i) & \sum_{i=1}^m T(i)I^3(i) \\ \sum_{i=1}^m I^2(i) & \sum_{i=1}^m T(i)I^2(i) & \sum_{i=1}^m I^3(i) & \sum_{i=1}^m T^2(i)I^2(i) & \sum_{i=1}^m T(i)I^3(i) & \sum_{i=1}^m I^4(i) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$X = [a, b, c, d, e, f]^T \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m RE(i) \\ \sum_{i=1}^m RE(i)T(i) \\ \sum_{i=1}^m RE(i)I(i) \\ \sum_{i=1}^m RE(i)T^2(i) \\ \sum_{i=1}^m RE(i)T(i)I(i) \\ \sum_{i=1}^m RE(i)I^2(i) \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据式 (10) ~ (13), 可以求出模型系数参数:

$$X = A^{-1}B \quad (14)$$

结合式 (6)、(12) 和 (14), 得到 $f_{RE}(T, I)$, 根据国标 GB/T 20840.8—2007 中的幅值误差定义:

$$RE = \frac{\text{测量电流} - \text{基准电流}}{\text{基准电流}} \times 100\% \quad (15)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m e_r(i) \frac{\partial e_r(i)}{\partial a} = \sum_{i=1}^m e_r(i) = 0 \\ \sum_{i=1}^m e_r(i) \frac{\partial e_r(i)}{\partial b} = \sum_{i=1}^m e_r(i) T(i) = 0 \\ \sum_{i=1}^m e_r(i) \frac{\partial e_r(i)}{\partial c} = \sum_{i=1}^m e_r(i) I(i) = 0 \\ \sum_{i=1}^m e_r(i) \frac{\partial e_r(i)}{\partial d} = \sum_{i=1}^m e_r(i) T^2(i) = 0 \\ \sum_{i=1}^m e_r(i) \frac{\partial e_r(i)}{\partial e} = \sum_{i=1}^m e_r(i) T(i) I(i) = 0 \\ \sum_{i=1}^m e_r(i) \frac{\partial e_r(i)}{\partial f} = \sum_{i=1}^m e_r(i) I^2(i) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

结合式 (7) 与 (9), 可以得到基于模型系数的矩阵方程, 其形式为:

$$AX = B \quad (10)$$

其中,

将测量电流与基准电流的比值 K 定义为传感器的变比系数, 则:

$$K = \frac{RE}{100\%} + 1 = \frac{f_{RE}(T, I)}{100\%} + 1 \quad (16)$$

根据式 (16) 可以求得不同温度和测量电流下的变比系数 K , 利用变比系数 K 即可完成对测量电流的误差补偿, 其计算过程为:

$$I_{fx} = \frac{I}{K} = \frac{I}{\frac{f_{RE}(T, I)}{100\%} + 1} \quad (17)$$

式中: I_{fx} 为补偿后的输出电流值。

3 样机研制

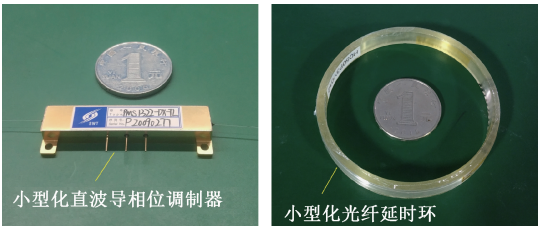
3.1 集成化光路封装设计

常规的光纤电流传感器光路受限于光学器件尺寸, 无法满足手持式应用需求, 因此需要采用小型化光学元件, 并对光路封装结构进行优化设计, 从而使光路模块具

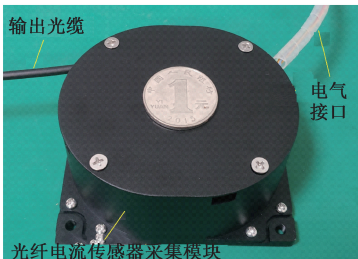
有较小的体积。光路结构中尺寸最大的器件分别是相位调制器和保偏光纤延时环。

1) 相位调制器的小型化设计

通常 Y 波导相位调制器的尺寸较小,但在手持式应用场景中,光路模块不可避免存在旋转运动,而 Y 波导输出端与保偏耦合器或偏振合束器之间的环形光路会产生非互易 Sagnac 光学相位差,该方案对振动冲击和旋转运动的抗干扰能力较弱,另外 PZT 相位调制器则由于调制频率偏低、长期温度性能不稳定以及抗振效果差等因素不予考虑,因此本文采用具有理想空间互易性光路结构的直波导相位调制器,该相位调制器的典型尺寸为 55 mm(长)×9 mm(宽)×5 mm(高),并且器件两端的光纤分别由一段长度为 9 mm 的尾椎套管保护,真实的封装长度超过 73 mm,这为光路结构的小型化设计带来了难度。本研究团队定制开发了一款小型化直波导相位调制器,如图 4(a)所示,这款调制器的尺寸仅为 45 mm(长)×9 mm(宽)×5 mm(高),并且器件两端的出纤位置处无尾椎套管,极大节省了封装空间,这款小型化直波导相位调制器采用了较短的光波导芯片,在相同调制效率下具有相对较大的半波电压值,但插入损耗更小,偏振串音更低,其他技术指标与大尺寸器件相比处于同一性能水平。



(a) 小型化直波导相位调制器
(a) Miniaturized waveguide phase modulator
(b) 小型化光纤延时环
(b) Miniaturized fiber delay loop



(c) 光纤电流传感器采集模块
(c) Acquisition module of optical fiber current sensor

图 4 光路模块的小型化设计

Fig. 4 Miniaturized design of optical module

2) 光纤延时环的小型化设计

保偏光纤环在光纤陀螺中的制作工艺已非常成熟,因此本方案借鉴了光纤陀螺中的多极对称绕环和脱骨架绕环技术,同时通过算法优化将光纤环长度缩小到 50 m

以内,在保证测量精度的前提下实现了更小尺寸的光纤环结构,图 4(b)为本研究团队绕制的外径 65 mm 的脱骨架光纤环。

基于以上关键光路元件的小型化设计,对光路进行集成化封装,光纤电流传感器采集模块的外壳尺寸仅为 80 mm(长)×68.5 mm(宽)×35 mm(高),如图 4(c)所示。

3.2 手持式光纤电流传感器

基于集成化光路封装和柔性可插接式光纤传感环设计,开发了手持式光纤电流传感器,如图 5 所示。该传感器总体配重为 1.56 kg,其中手持式采集模块配重仅为 945 g。传感光纤采用直径 7 mm 的柔性保护套管封装,可在被测导体周围灵活缠绕,以实现重复拆装,光纤传感环在采集模块内部闭合,保证了重复拆装后的测量精度。



图 5 手持式光纤电流传感器

Fig. 5 Handheld fiber-optic current sensor

4 实验测试

4.1 光纤传感环重复拆装误差测试

为验证传感器在实用过程中的重复拆装精度,在实验室设计了重复拆装实验,将柔性光纤传感环在被测导体上重复安装和拆卸,测试传感器的电流测量精度变化。图 6 为手持式光纤电流传感器样机在 300 A 工作电流下重复拆装 10 次所测得的常温误差棒曲线。从测试结果可以看出,10 次测量所产生的误差变化<0.12%。

4.2 全温非线性误差测试

为了验证传感器在极限温度下的非线性误差补偿效果,在实验室内进行了 30 kA 以内的-40℃~70℃全温误差实验,测试结果如表 1 所示。

对测试数据进行二维建模,得到模型解析式如式(18)所示,二维建模如图 7 所示。

$$f_{RE}(T, I) = 0.396 - 0.013T - 0.019I - 3.298 \times 10^{-5} T^2 + 6.449 \times 10^{-4} TI - 4.106 \times 10^{-5} I^2 \quad (18)$$

利用式(17)和(18)对传感器的测量电流进行误差修正,代入式(15)中即可计算出修正后的传感器误差。

表 1 全温非线性测试数据

Table 1 Nonlinear test data of fiber-optic current sensor in full temperature

电流 /kA	-40℃ 误 差/%	-20℃ 误 差/%	0℃ 误差 /%	20℃ 误 差/%	40℃ 误 差/%	70℃ 误 差/%
0.5	0.85	0.58	0.37	0.11	-0.22	-0.59
1.0	0.87	0.61	0.38	0.12	-0.19	-0.65
2.5	0.84	0.58	0.35	0.12	-0.22	-0.57
4.0	0.83	0.56	0.35	0.12	-0.23	-0.55
5.0	0.81	0.55	0.34	0.12	-0.23	-0.53
15.0	0.31	0.15	0.09	-0.03	-0.20	-0.31
30.0	-0.51	-0.47	-0.33	-0.20	-0.05	0.24

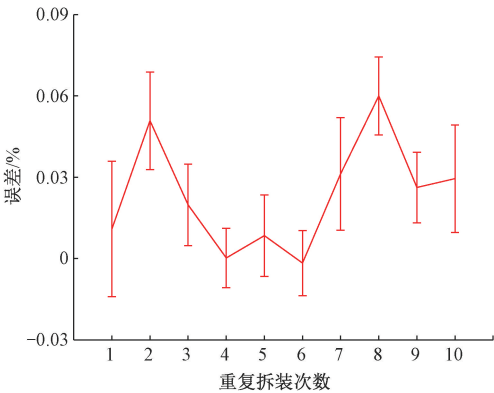


图 6 手持式光纤电流传感器的重复拆装误差测试结果

Fig. 6 Error test results with repeated disassembly of handheld fiber optic current sensor

表 2 为二维误差补偿后的传感器全温误差测试结果,当环境温度从-40℃变化至 70℃时,传感器在 0.5~30 kA 电流范围内的测量误差小于 0.2%。

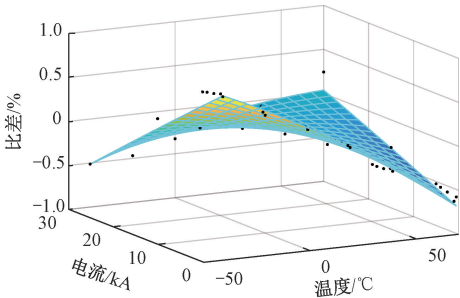


图 7 光纤电流传感器全温非线性误差测试数据及二维建模模型

Fig. 7 Nonlinear error test data in full temperature and 2D modeling model of fiber optic current sensor

表 2 二维误差补偿后的全温误差测试结果

Table 2 Full temperature error test results after 2D error compensation

电流 /kA	-40℃ 误 差/%	-20℃ 误 差/%	0℃ 误差 /%	20℃ 误 差/%	40℃ 误 差/%	70℃ 误 差/%
0.5	-0.02	-0.04	0.00	-0.02	-0.01	0.09
1.0	0.04	-0.00	-0.01	0.01	-0.00	-0.01
2.5	0.12	0.04	-0.01	0.03	-0.01	0.03
4.0	0.12	0.03	0.01	0.08	-0.11	0.05
5.0	0.14	0.09	0.02	0.07	-0.11	0.01
15.0	0.11	0.03	-0.02	-0.02	-0.07	0.01
30.0	0.02	-0.12	-0.13	-0.08	-0.06	0.20

4.3 铝电解槽立柱母线电流测量

如图 8 所示,将传感器样机拿到电解铝应用现场对立柱母线电流进行测试,表 3 为手持式光纤电流传感器样机在某槽型电解槽中测量立柱母线电流的结果,每个电解槽共包含 4 个立柱母线,将 4 个立柱母线的电流总加后得到该电解槽的系列电流,并与主控室的显示值进行对比计算,求得光纤电流传感器的测量值与主控室电流显示值的误差小于 0.4%。

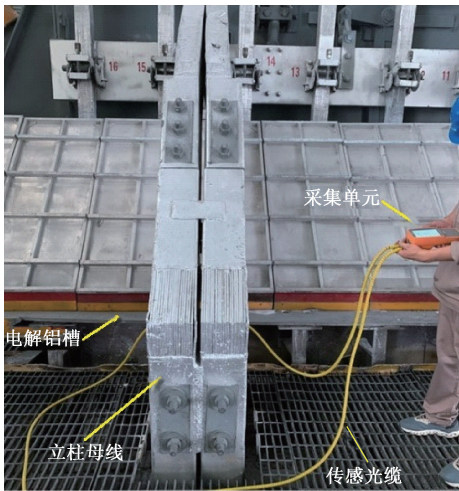


图 8 立柱母线电流测量

Fig. 8 Current measurement of column bus

表 3 某电解槽立柱母线电流测量结果

Table 3 Measurement results of the column bus current of an electrolytic cell

槽号	立柱母线电流/kA				总加电 流/kA	主控室显 示电流/kA	误差 /%
	1 号	2 号	3 号	4 号			
1001	61.58	65	64.8	61.22	252.6	251.7	0.36
4001	62.8	63.47	62.96	63.52	252.75	252.4	0.14
5001	60.58	64.09	64.74	60.93	250.34	250.9	-0.22

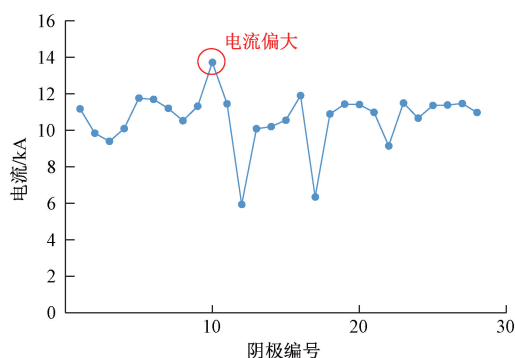
4.4 铝电解槽阴极钢棒分布电流测量

动态测量阴极电流分布可以及时反映阴极钢棒的工作状态,使用手持式光纤电流传感器对某电解槽的阴极钢棒分布电流进行监测,图9(a)为测试阴极钢棒电流的现场场景,图9(b)为阴极钢棒分布电流的监测曲线,从图中可以看出,10号阴极钢棒电流过大,经排查分析该处存在破损隐患,需要及时修复,通过对阴极钢棒电流的连续监测有效提前预警了电解槽的破损情况。



(a) 某电解槽阴极钢棒电流测试场景

(a) Current test scene of the cathode steel rod of an electrolytic cell



(b) 某电解槽阴极钢棒分布电流测量结果

(b) Measurement results of distributed current of cathode steel bars in an electrolytic cell

图9 阴极钢棒电流测量

Fig.9 Current measurement of cathode steel rod

5 结 论

本文针对现有光纤电流传感器在柔性安装和大电流且温度变化条件下的误差补偿方法不完全适用等现状,提出了光纤传感环的柔性可插接式设计、温度误差和非线性误差的二维补偿等关键技术,结合集成化光路封装与手持式产品设计,首次研制了手持式光纤电流传感器,解决了传统光纤电流传感器在铝电解电流测量领域应用时存在的无法移动、测量精度随温度变化较大的问题。

手持式光纤电流传感器具有体积小、重量轻、操作便捷、测量精度高等优点,将其用于铝电解电流测量,可对

电解槽的安全生产和工艺改进有以下提升:

1) 延长电解槽使用寿命

通过准确测量电解槽阴极电流值的分布,正常运行时建立单槽档案,异常时再次测量进行对比,可以协助寻找电解槽阴极破损位置,通过在线修补,延长电解槽寿命。

2) 提高电解槽生产效率

通过准确测量电解槽阳极电流值的分布,找到电流值偏离正常均值的阳极,结合阳极导杆和水平母线的接触情况以及电解槽的工艺参数、炉底情况进行处理,可以快速处理因阳极电流分布不均引起的电压波摆,提高电解槽生产效率。

3) 提高电解槽稳定性

通过准确测量电解槽立柱进电电流,可以为铝电解工艺控制提供立柱电流分布理论依据,建立单槽档案,异常时可对电解槽整体电流分布进行局部调整,提高电解槽稳定性。

4) 大电流测量设备原位校准

动力车间的汇流母排、分线母排需要使用大电流测量设备进行长期电流监测,由于设备体积庞大、拆卸困难,无法送到计量机构进行校准,可以使用手持光纤电流测量仪在不影响正常生产的情况下实现原位校准,保证测量精度。

参考文献

- [1] 李太福,姚立忠,易军,等. 强跟踪平方根 UKFNN 的铝电解槽工耗动态演化模型[J]. 自动化学报, 2014, 40(3): 522-530.
LI T F, YAO L ZH, YI J, et al. An improved UKFNN based on squareroot filter and strong tracking filter for dynamic evolutionary modeling of aluminum reduction cell[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(3): 522-530.
- [2] 李清,盛树军,崔旭东. 铝电解阳极电流分布在线无线监控系统的开发应用[J]. 轻金属, 2021(4): 32-36.
LI Q, SHENG SH J, GUI X D. Development and application of online wireless monitoring system for aluminum electrolytic anode current distribution [J]. Light Metals, 2021(4): 32-36.
- [3] 张水华,李纯,蒙毅,等. 电解电极电流在线测量方法研究[J]. 湿法冶金, 2021, 40(5): 440-445.
ZHANG SH H, LI CH, MENG Y, et al. On-line Measurement Method of Electrode Current in Electrolysis Cell [J]. Hydrometallurgy of China, 2021, 40(5): 440-445.
- [4] 李平,赵仁涛,铁军,等. 金属水溶液电解电极电流在线测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6):

- 253-260.
- LI P, ZHAO R T, TIE J, et al. An on-line measurement method for electrode current of metal aqueous solution electrolysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 253-260.
- [5] 尹刚, 陈根, 何文, 等. 基于深度学习的 300 kA 铝电解槽阳极效应预测[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(1): 161-170.
- YIN G, CHEN G, HE W, et al. Anode effect prediction of 300 kA aluminium electrolysis cell based on deep learning[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(1): 161-170.
- [6] 王侠前. 换极对铝电解槽稳定性的影响及改进措施[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(6): 44-48.
- WANG X Q. Influence of anode changing on stability of aluminum electrolytic cell and improvement measures[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(6): 44-48.
- [7] YANG S, ZOU Z, LI J, et al. Online anode current signal in aluminum reduction cells: Measurements and prospects[J]. JOM, 2016, 68(2): 623-634.
- [8] 梁汉, 梁诗静. 铝电解槽阴极电流分布形象化[J]. 轻金属, 2020(9): 30-37.
- LIANG H, LIANG SH J. Visualization of cathode current distribution in aluminum pots [J]. Light Metals, 2020(9): 30-37.
- [9] 桂卫华, 岳伟超, 谢永芳, 等. 铝电解生产智能优化制造研究综述[J]. 自动化学报, 2018, 44(11): 1957-1970.
- GUI W H, YUE W CH, XIE Y F, et al. A review of intelligent optimal manufacturing for aluminum reduction production[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11): 1957-1970.
- [10] 杨帅, 邹忠, 李劼, 等. 基于横梁等距压降的铝电解槽阳极电流测量方法[J]. 有色金属工程, 2019, 9(12): 62-68.
- YANG SH, ZOU ZH, LI J, et al. Anode current measurement for aluminum reduction cell based on equidistant voltage drop at anode beam[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(12): 62-68.
- [11] 谢完成, 戴瑜兴. 一种新的基于霍尔传感器的电流测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(8): 705-710.
- XIE W CH, DAI Y X. New current measurement method based on hall sensors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012, 26(8): 705-710.
- [12] 张志芳, 张雨, 赵仁涛, 等. 基于磁屏蔽环的铝电解阳极电流磁场测量方法[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(10): 44-48.
- ZHANG ZH F, ZHANG Y, ZHAO R T, et al. Measurement of magnetic fields of individual anode current based on magnetic shielding ring in aluminum reduction [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(10): 44-48.
- [13] 赵仁涛, 紫京浩, 范涵奇, 等. 电解槽电流测量模型建模及测量位置的研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 496-503.
- ZHAO R T, ZI J H, FAN H Q, et al. Research on the modeling method of current measurement model and measuring position for electrolytic cell [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 496-503.
- [14] 王夏霄, 张宇宁, 于佳, 等. 传感头误差对便携式光纤电流互感器的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017(1): 65-70.
- WANG X X, ZHANG Y N, YU J, et al. Influence of sensing coil errors on portable fiber-optic current transformer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017(1): 65-70.
- [15] LI C, ZHANG S, MENG Y, et al. Research of magnetic shielding on the closing gap of optical fiber current sensor [J/OL]. Journal of Sensors, 2022, 2022: e3591818.
- [16] 王乐建, 胡军. 大直流光纤电流检测系统开发及应用[J]. 山东冶金, 2017, 39(1): 69-70.
- WANG L J, HU J. Development and application of large DC fiber optic current detection system [J]. Shandong Metallurgy, 2017, 39(1): 69-70.
- [17] 铁军, 赵仁涛, 张志芳. 铝电解阳极电流精确测量及其应用(待续)[J]. 冶金自动化, 2017, 41(6): 49-54, 81.
- TIE J, ZHAO R T, ZHANG ZH F. Accurate measurement and its application of anodic current in aluminium electrolysis (to be continued) [J]. Metallurgical Industry Automation, 2017, 41(6): 49-54, 81.
- [18] 铁军, 赵仁涛, 张志芳. 铝电解阳极电流精确测量及其应用(续完)[J]. 冶金自动化, 2018, 42(1): 49-53.
- TIE J, ZHAO R T, ZHANG ZH F. Accurate measurement and its application of anodic current in aluminium electrolysis(end) [J]. Metallurgical Industry Automation, 2018, 42(1): 49-53.
- [19] 易吉龙, 王红波, 龙昌红, 等. 光学电流测量仪在 400 kA 电解槽的应用探索[J]. 云南冶金, 2022, 51(2): 171-177.
- YI J L, WANG H B, LONG CH H, et al. Application exploration of optical current measuring instrument on

- 400 kA electrolytic cell[J]. Yunnan Metallurgy, 2022, 51(2): 171-177.
- [20] 肖浩, 刘博阳, 湾世伟, 等. 全光纤电流互感器的温度误差补偿技术[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 91-95.
- XIAO H, LIU B Y, WAN SH W, et al. Temperature error compensation technology of all-fiber optical current transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011(21): 91-95.
- [21] 李威. 全光纤电流互感器温度补偿算法探讨[J]. 供用电, 2015, 32(11): 66-69, 74.
- LI W. Study on temperature compensation method for fiber optical current transformer[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(11): 66-69, 74.
- [22] 李传生, 邵海明, 赵伟, 等. 超大电流量值传递用光纤电流传感技术[J]. 红外与激光工程, 2017(7): 122-128.
- LI CH SH, SHAO H M, ZHAO W, et al. Fiber-optic current sensing technique utilized for ultra-high current value transfer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017(7): 122-128.
- [23] ROSE A H, BLAKE J N. Free form factor optical current sensor for AC and DC commercial power applications[C]. Optical Fiber Sensors. Optica Publishing Group, 2006: FB5.
- [24] FERDOUS F, PARI M K, ROSE A H. Flexible form factor digital optical current sensor with triple redundancy[C]. 2021 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM), 2021: 1-5.
- [25] 王夏霄, 秦祎, 王野, 等. 光纤电流传感器的延迟光纤偏振串音误差[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2930-2936.
- WANG X X, QIN Y, WANG Y, et al. Errors of fiber delay line polarization crosstalk for all fiber optical current sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 2930-2936.
- [26] BOHNERT K, HSU C P, YANG L, et al. Fiber-optic current sensor tolerant to imperfections of polarization-maintaining fiber connectors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(11): 2161-2165.
- [27] 常晓月, 刘东伟, 李建光, 等. 一种光纤电流传感器: CN11393359B[P]. 2022-05-03.
- CHANG X Y, LIU D W, LI J G, et al. A type of fiber optic current sensor: CN11393359B[P]. 2022-05-03.
- [28] BOHNERT K, GABUS P, NEHRING J, et al. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 267-276.
- [29] BOHNERT K, MÜLLER G M, YANG L, et al. Intrinsic temperature compensation of interferometric and polarimetric fiber-optic current sensors[C]. CLEO: QELS_Fundamental Science, Optica Publishing Group, 2014: JT4A. 63.
- [30] MÜLLER G M, GU X, YANG L, et al. Inherent temperature compensation of fiber-optic current sensors employing spun highly birefringent fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 11164-11173.
- [31] 姚晓天, 姚鹏辉, 郝鹏. 基于光纤电流传感器的电流检测方法、装置和系统: CN112748387B[P]. 2022-06-14.
- YAO X T, YAO P H, HAO P. Current detection method, device and system based on fiber optic current sensor: CN112748387B[P]. 2022-06-14.

作者简介



李建光(通信作者), 2012 年于北京交通大学获得硕士学位, 现为中科院半导体所博士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术。
E-mail: lijanguang@semi.ac.cn

Li Jianguang (Corresponding author) received his M.Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2012. He is currently a Ph.D. candidate at Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences. His main research direction is optical fiber sensing technology.



肖浩, 2008 年于中科院半导体所获得博士学位, 现为北京世维通光智能科技有限公司总经理, 主要研究方向为智能光纤传感器。
E-mail: xhao11@126.com

Xiao Hao received his Ph.D. degree from Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences in 2008. He is currently the general manager at Beijing SWT Intelligent Optics Technology Co., Ltd. His main research direction is intelligent optical fiber sensors.



刘育梁, 分别于 1990 年、1993 年在西安交通大学获得硕士和博士学位, 现为中科院半导体所研究员, 主要研究方向为光电成像与机器视觉、传感器与人工智能系统、光传感和光通信器件与系统。
E-mail: ylliu@semi.ac.cn

Liu Yuliang received his M.Sc. degree and Ph.D. degree both from Xi'an Jiaotong University in 1990 and 1993, respectively. He is currently a research fellow at Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include photoelectric imaging and machine vision, sensors and artificial intelligence systems, optical sensing and optical communication devices and systems.