

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.06.032

# TMR 传感器阵列测量电流的新型拓扑研究

周 秀<sup>1</sup>, 吴旭涛<sup>1</sup>, 周童浩<sup>2</sup>, 罗 艳<sup>1</sup>, 田 天<sup>1</sup>, 李秀广<sup>1</sup>, 汲胜昌<sup>2</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750001; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

**摘要:** 通过传感器阵列和相应的算法减小乃至消除外部干扰电流产生的串扰误差是磁传感器电流测量技术研究中的一个重要问题。文中在对比了现有拓扑结构后,提出了一种双层环形传感器阵列拓扑结构,并对其测量误差进行了仿真计算与实验测量。仿真计算中对比了干扰电流的大小、相位、距离,以及被测导体偏离阵列中心等因素对测量误差的影响。利用8个高灵敏度的隧道磁阻(tunnel magnetoresistance, TMR)元件制作了电流传感器,并在单导体干扰和多导体干扰下进行了测试,实验结果表明其平均误差为1.79%,相对于单层四传感器的方法减小了约7%的误差。相比于其他拓扑结构,文中提出的结构抗干扰能力强,且无需复杂的算法,仅需基本的运算电路即可实现功能,具有较强的实用价值。

**关键词:** 电流测量;串扰误差;传感器阵列拓扑;干扰抑制;隧道磁阻传感器

## New Topological Study of Current Measurement by TMR Sensor Array

ZHOU Xiu<sup>1</sup>, WU Xutao<sup>1</sup>, ZHOU Tonghao<sup>2</sup>, LUO Yan<sup>1</sup>, TIAN Tian<sup>1</sup>, LI Xiuguang<sup>1</sup>, JI Shengchang<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Company Limited, Yinchuan 750001, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Reduction and even elimination of crosstalk error due to external interference current by the sensor array and corresponding algorithms is an important issue of current measurement technology of in the research of magnetic sensor. In this paper, a kind of double-layer annular sensor array topology is proposed after comparing the existing typologies, and the measurement error is performed by simulation calculation and experimental measurement. In the simulation and calculation, the influence of such factor as amplitude, phase, distance of the interference current and the deviation of the measured conductor on the measurement error is compared. The current sensor is fabricated by using eight high-sensitivity TMR elements and tested under single and multi-conductor interference. The experimental results show that the average error of the current sensor is about 1.79%, which reduces by about 7% compared with the single-layer four sensors method. The topology proposed in this paper, compared with other typologies, has strong anti-interference ability. The function can be achieved not by complicated algorithm but basic calculation circuit. Therefore, it has strong practical value.

**Key words:** current measurement; crosstalk error; sensor array topology; interference-rejecting; tunnel magnetoresistance sensor

## 0 引言

随着智能电网的不断发展,大规模分布式新能源电力通过逆变器接入电网,给电力系统中带入了

大量谐波<sup>[1-7]</sup>。电网在运行过程中,会发生单相和相间短路等故障<sup>[8-11]</sup>,输电线路会发生雷击,产生冲击电流。为监测电网中的谐波和故障信号,提升电网的稳定性,需对电网中的电流信息进行准确的测

收稿日期:2022-01-25; 修回日期:2022-03-27

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划(2020BDE13033);国网宁夏电力有限公司科技项目(5229DK190051)。

Project Supported by Key R & D Program of Ningxia Hui Autonomous Region (2020BDE13033), State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. Technology Project (5229DK190051).

量<sup>[12-19]</sup>。同时,电力设备的可靠运行也是保证电网稳定可靠运行的重要一环,对电流的精确有效测量是监测变压器、电容器等设备状态的重要内容<sup>[20-21]</sup>。传统的电流测量设备,如电流互感器、罗氏线圈、分流器以及霍尔传感器等存在体积大、铁心饱和、暂态响应特性差和无法测量直流电流等问题,在使用时具有较大的局限性<sup>[22-24]</sup>。相比之下,基于磁阻效应的新型磁敏元件尤其是TMR元件集巨磁阻元件的宽动态范围和各项异性磁阻元件的高灵敏度于一体<sup>[25-34]</sup>,可以直接测量载流导体产生的磁场进而反推被测电流。因此,基于TMR元件制作的电流传感器可以去除聚磁环结构,具有体积小、高可集成度、低成本和能够对直流电流进行测量的优点,是电力系统电流测量的新方法,得到了大量的研究与应用。但去除了聚磁环,干扰电流产生的磁场便会直接叠加在被测电流产生的磁场上,使测量结果产生误差<sup>[35-36]</sup>。因此通过传感器阵列和相应的算法减小乃至消除外部电流产生的串扰误差是基于磁阻传感器的电流测量技术研究中的一个重要问题<sup>[37-41]</sup>。

针对此问题,文[42]通过在被测电流周围的环形区域上均匀布置4个敏感方向相同的单轴TMR元件,利用每个元件处的磁场构建超越方程,可以解算出被测电流与干扰电流,最大误差为4.14%。但文中仅对同导体回流干扰的情况进行了验证,此外,其算法的适用范围较窄,仅对单导体干扰有效,而且可能出现方程无解的情况;文[43]采用类似于文[42]的结构,提出了偏心矫正算法,利用4个三轴TMR元件,可以求得被测导体上的电流大小,导体的位置和倾角,电流测量的误差在2%左右。但其需要4个三轴TMR传感器,并同时12路信号采样处理后求解非线性方程,采样与数据处理系统非常复杂;文[44]针对三相电流的测量,提出了在每相电流的附近同一角度但不同距离处,布置两个敏感方向相反的磁敏元件,当两个磁敏元件距离较近时,可以认为其他两相电流在两个传感器处产生的干扰磁场大小相等、方向相同。相比于文[42-43]中的方法,该方法通过对时域信号进行计算,可在被测电流和干扰电流之间相位差任意的情况下进行测量。但此测量方法要求传感器阵列与被测电流的位置极为准确,但在实际应用过程中总会存在安装偏差,进而在测量结果中引入误差。

文中针对磁阻传感器阵列在测量电流时易受外部磁场干扰的情况,在对比了现有拓扑结构后,提出了一种双层环形传感器拓扑结构,并对该结构的测量误差进行了仿真计算与实验测量。仿真计

算中研究了被测导体居中与偏心情况下,外部干扰电流的大小、相位、距离等因素对测量误差的影响。最后制作了电流传感器样机并验证了算法的可靠性。

## 1 传感器的原理与设计

### 1.1 磁阻传感器测量电流的原理

基于磁阻效应的传感器通过测量载流导体中电流产生的磁场间接实现对电流的测量。根据安培环路定理,导体周围的磁感应强度与其中流过的电流大小成比例。无限长直导线周围的磁感应强度可以表示为

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (1)$$

式(1)中: $B$ 为磁感应强度,T; $\mu$ 为真空中的磁导率,H/m; $I$ 为导体中电流的幅值,A; $r$ 为参考点与导线中心的距离,m。

在实际应用中,若被测导线长度远大于传感器到导线中心的距离,可以将导线当作无限长考虑。因此,只要确定磁阻传感器与导线间的距离,即可通过传感器处的磁场反推导线中的电流。但是由于磁场的可叠加性,外部干扰电流产生的磁场同样会叠加在磁阻传感器上,而磁阻传感器本身无法分辨待测电流与干扰电流产生的磁场,因此减小外部磁场的干扰是提高传感器精度的关键。

### 1.2 双层环形传感器阵列拓扑

首先介绍双磁阻传感器减小干扰的方法,见图1。

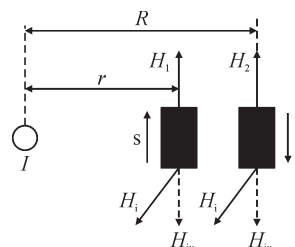


图1 双磁阻传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dual magnetoresistance sensor

图1中: $s$ 为磁阻传感器的磁敏轴,内、外侧磁阻传感器处沿敏感方向的磁场强度分别为:

$$H_{in} = H_1 - H_{ix} = \frac{I}{2\pi r} - H_{ix} \quad (2)$$

$$H_{out} = -H_2 + H_{ix} = -\frac{I}{2\pi R} + H_{ix} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: $H_1$ 、 $H_2$ 为电流 $I$ 在内外层磁阻传感器处产生的磁场强度, $A \cdot m^{-1}$ ;  $H_{ix}$ 为干扰磁场在传感器敏感方向上的分量, $A \cdot m^{-1}$ ;  $r$ 、 $R$ 为电流 $I$ 与内外侧传感器之间的距离,m。

当两个相近的单轴磁阻传感器反向布置在被测电流附近,而外界磁场干扰源距离被测电流较远时,可近似认为干扰磁场在两个磁阻传感器处产生的磁场强度相同,而被测电流在磁阻传感器处产生的磁场强度不同。由于内外层传感器的敏感方向相反,两个传感器受干扰磁场影响产生输出结果相反,通过将两个传感器的输出结果相加,可近似消除干扰磁场影响。将式(2)、(3)相加、化简可得

$$I = \frac{2\pi(H_{in} + H_{out})}{\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right)} \quad (4)$$

双传感器法只有在外界干扰源距离较远时,即外部干扰在内外传感器处的磁场近似相同时,计算所得电流接近真实值,当干扰源距离传感器较近时,该方法的测量误差显著增大,且磁阻传感器对距离十分敏感,所以该方法要求传感器与被测电流之间的位置关系确定,而在实际中,由于安装的工艺问题,会造成距离偏差,进而造成一定的测量误差。

由安培环路定理可知,磁场强度沿闭合路径的积分为该闭合路径所包围电流的代数和。因此,在被测导体周围的环形区域布置数个磁敏传感器,通过测量闭合回路上的磁场强度,根据安培环路定理便可得到被测电流的大小。且随着传感器数目的增多,传感器微元求和所得的结果越接近环路积分结果,测量准确度越高。因此,文中提出了一种双层环形传感器阵列拓扑,其结构图见图2。

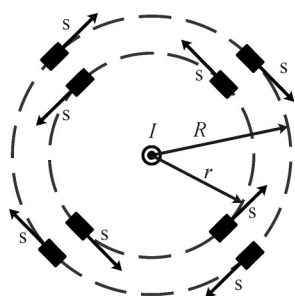


图2 双层环形传感器阵列拓扑图

Fig. 2 Topology of double-layer annular sensor array topology

单轴磁阻传感器布置在导线周围的圆形区域上,分为内外两层,敏感方向相反,每层各4个传感器均匀分布。首先对同一角度下内外两层传感器所测磁场相加,后将4个角度下所测得的电流值取平均,计算得到最终的被测电流。

## 2 新型拓扑的仿真计算

针对被测导体位于环形传感器阵列中心与偏离中心两种情况,分别仿真计算了干扰电流的大

小、相位、距离和位置对测量误差的影响。

### 2.1 导体位于传感器中心时的串扰误差仿真计算

对被测电流和干扰电流都为50 Hz交流信号的情况进行误差计算,使用双层环形传感器阵列,被测电流 $I_1$ 位于传感器阵列中心,外界磁场干扰为单一平行电流 $I_2$ 产生,见图3。距离 $D$ 为0.4 m,内层传感器半径 $r$ 为4 cm,外层传感器半径 $R$ 为5 cm。 $\alpha_1$ 为传感器1与 $I_1$ 、 $I_2$ 连线之间的夹角。利用MATLAB对磁场强度进行仿真计算。

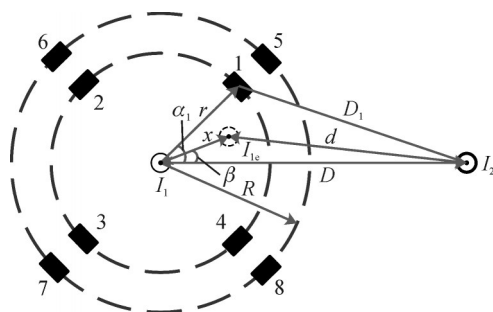


图3 串扰仿真计算示意图

Fig. 3 Crosstalk simulation calculation diagram.

针对不同的传感器角度 $\alpha_1$ ,设置电流 $I_1$ 有效值为200 A,初相为 $0^\circ$ , $I_2$ 有效值为200 A,初相为 $180^\circ$ 。改变传感器角度,得到电流测量值的相对误差随传感器角度变化呈周期变化的变化情况,见图4。

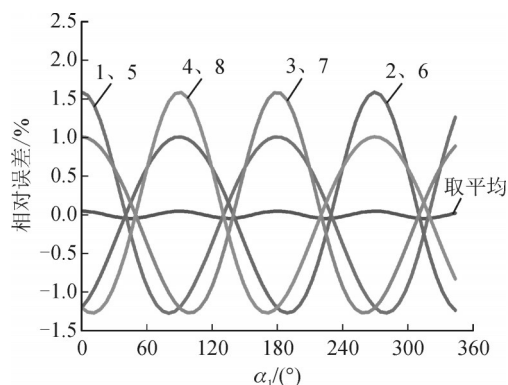


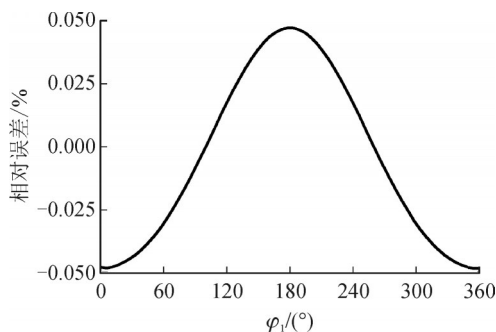
图4 导体居中时传感器不同角度下测量相对误差

Fig. 4 The relative error of the sensor at different angles when the conductor is in the middle

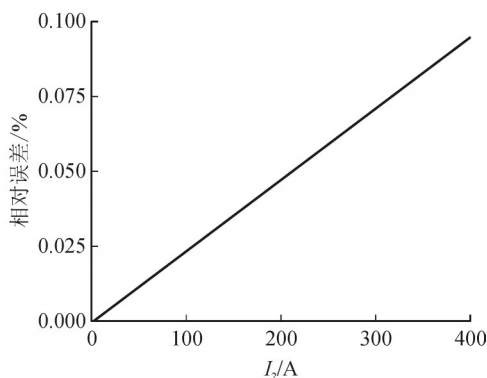
从图4可以看出,使用双层环形传感器阵列测量的相对误差随角度 $\alpha_1$ 成周期性变化。由同一角度下内外两层的两个传感器处磁场所得的被测电流误差最大为1.6%,不同角度下计算所得到的电流大小不同,对4个角度下所测电流取平均后,误差明显减小,最大误差为0.05%。

对于干扰电流幅值不同的情况,设置电流 $I_1$ 有效值为200 A,初相为 $0^\circ$ , $I_2$ 有效值为200 A,传感器角度 $\alpha_1=0^\circ$ 。改变电流 $I_2$ 相位,得到电流测量的相对误差随 $I_2$ 相位变化的情况见图5(a)。从图5(a)可以看

出,改变干扰电流和被测电流之间的相位差对测量结果的影响很小,电流 $I_2$ 的相位为 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 时,误差最大,相位为 $90^\circ$ 和 $270^\circ$ 时,误差最小。最大误差为0.05%,最小误差为0。针对干扰电流有效值变化,设置电流 $I_1$ 有效值为200 A,初相为 $0^\circ$ , $I_2$ 初相为 $180^\circ$ ,改变电流 $I_2$ 的有效值,得到电流测量的相对误差随 $I_2$ 有效值变化的情况见图5(b)。从图5(b)可以看出,误差与电流 $I_2$ 的有效值成正比,但在距离为40 cm时,整体测量误差都比较小,当 $I_2$ 有效值为 $I_1$ 有效值两倍时,测量误差仍小于0.1%。



(a) 干扰电流相位对测量误差的影响



(b) 干扰电流幅值对测量误差的影响

图5 干扰电流幅值相位对测量误差的影响

Fig. 5 Influence of amplitude and phase of interference current on measurement error

针对被测电流与干扰电流之间的距离,设置电流 $I_1$ 有效值为200 A,初相为 $0^\circ$ , $I_2$ 有效值为200 A,初相为 $180^\circ$ ,传感器角度 $\alpha_1=0^\circ$ 。改变电流 $I_1$ 、 $I_2$ 之间的距离 $D$ ,得到电流测量的相对误差随 $D$ 变化情况见图6。从图6可以看出,被测电流与干扰电流有效值相等时,在0 cm到20 cm的距离下,随 $D$ 增大,双层环形传感器阵列所测得的电流误差显著减小, $D$ 为20 cm时,误差已降低到1%以下。

为探究内外层传感器与中心导体之间距离对测量误差的影响,设置电流 $I_1$ 有效值为200 A,初相为 $0^\circ$ , $I_2$ 有效值为200 A,初相为 $180^\circ$ , $\alpha_1=0^\circ$ 。改变内、外层传感器与中心导体之间的距离,得到电流测量的相对误差变化情况见图7。当内层传感器半

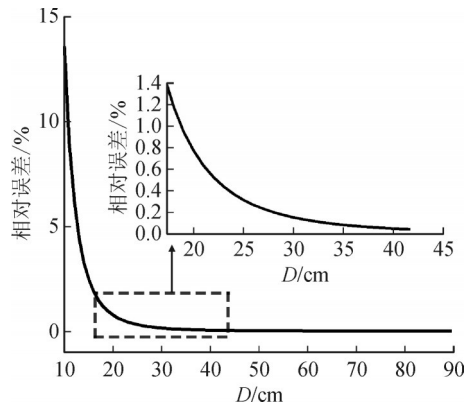


图6 干扰电流的距离对测量误差的影响

Fig. 6 Influence of distance of interference current on measurement error

径小于2 cm时,所得到的误差基本小于0.2%。当内层传感器半径固定时,减小内外层传感器之间的距离可以减小测量误差。但磁敏元件在较大的磁场下会饱和,此外,若传感器元件距离母线过近,也会产生绝缘问题。因此,应首先根据被测电流的大小和母线电压计算空间磁场和绝缘距离,在磁敏元件不会发生饱和现象、无绝缘问题且元器件布局允许的情况下,使传感器内外层半径尽可能的小。

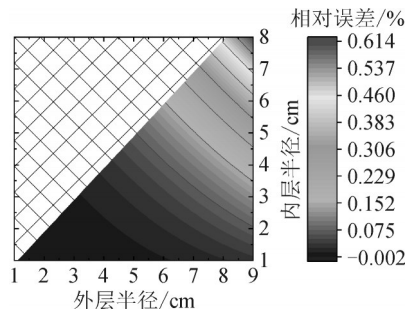


图7 测量误差随内外侧传感器半径变化的影响

Fig. 7 Influence of inner and outer radius change on measurement error

## 2.2 导体偏离传感器中心时的串扰误差仿真计算

上节计算认为被测电流位于环形传感器阵列中心,考虑到实际安装情况,被测电流会偏离环形传感器阵列的中心。本节对被测电流偏离环形传感器阵列中心时的情况进行讨论,如图3所示,被测载流导体的位置从 $I_1$ 偏移至 $I_c$ ,被测电流偏离传感器中心的距离为 $x$ ,角度为 $\beta$ 。

针对不同的传感器角度 $\alpha_1$ ,设置电流 $I_c$ 有效值为200 A,初相为 $0^\circ$ , $I_2$ 有效值为200 A,初相为 $180^\circ$ 。改变传感器角度,得到电流测量值的相对误差随传感器角度变化呈周期变化的变化情况,见图8。此时计算所得的误差也成周期性变化,在导体仅偏心0.2 cm时,仅使用同一角度下的两个传感器计算得到的电流误差最大达到了10%,但不同角度下所得电流值的大小不同,因此对4个角度下的

计算值取平均之后的误差最大仅为0.55%。可以看出,通过环形阵列可以有效减小由于安装偏差所带来的测量误差。

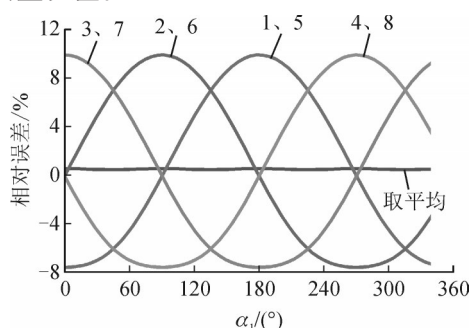


图8 导体偏心时传感器不同角度下测量相对误差

Fig. 8 The relative error of the sensor at different angles when the conductor is eccentric

针对偏心距离和偏心角度改变对测量误差的影响,设置电流 $I_1$ 有效值为200 A,初相为 $0^\circ$ , $I_2$ 有效值为200 A,初相为 $180^\circ$ ,传感器角度 $\alpha_i=0^\circ$ 。电流 $I_1$ 距环形阵列中心0.2 cm和1 cm时,电流的测量误差随 $\beta$ 的变化情况见图9。从图9可以看出,导体偏心距离一定时,测量误差随偏心角度 $\beta$ 周期性变化,当被测电流偏离环形传感器阵列中心0.2 cm时,此时误差较小,随偏心改变,测量误差大约在-0.5%到0.5%之间变化。当被测电流偏离环形传感器阵列中心1 cm时,误差增大,最大误差可达4%。和上节计算结果对比可知,载流导体偏离传感器阵列中心会对测量结果造成较大误差,一般情况下,导体偏心造成的误差相比于外部干扰磁场造成的误差会更加明显。

### 3 传感器的制作与实验测量

#### 3.1 传感器制作

因实验室中的设备能够产生的电流较小,仅为几十安培,因此选用了由江苏多维科技生产的高灵敏度的TMR2001芯片,其灵敏度为8 mV/V/Oe,线性区间为 $\pm 5$  Oe。所设计的电流传感器内、外层传感器阵列的半径分别为4 cm与5 cm,可满足对100 A以内电流的测量而不发生饱和。

由于TMR传感器的输出为差分信号,因此采用仪表放大器将差分信号转为单端信号。同时由于采用单极性电源供电,需对输出的单端信号进行电平抬升,以保证信号的完整性。最终所选仪表放大器型号为INA128,该仪表放大器供电范围为 $\pm 2.25$  V至 $\pm 18$  V,可使用5 V单极性电源供电,失调电压最大值为50  $\mu$ V,温度漂移最大为0.5  $\mu$ V/ $^\circ$ C,增益带宽积达1 MHz,满足设计要求。选择

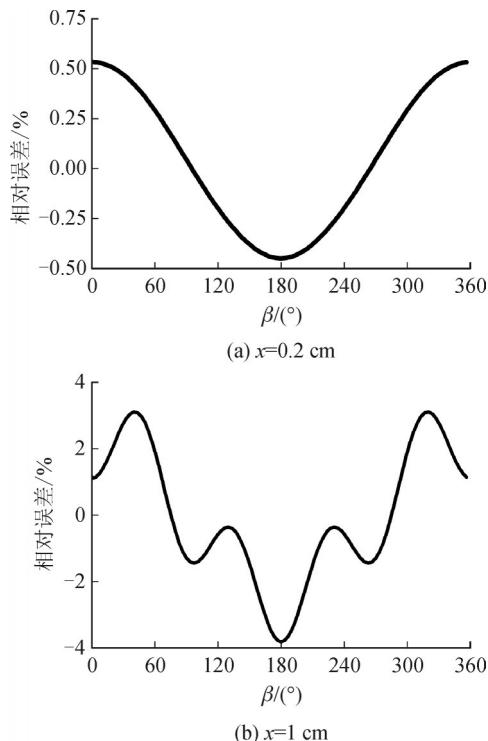


图9 相对误差随导体偏心距离和角度的变化关系

Fig. 9 Relationship between relative error and conductor eccentricity and angle

REF5025作为仪表放大器INA128的2.5 V基准源,即将仪表放大器的默认输出抬升至2.5 V,以满足单电源供电下对正弦信号的测量需求。最终设计完成的电流传感器的PCB参考图见图10。

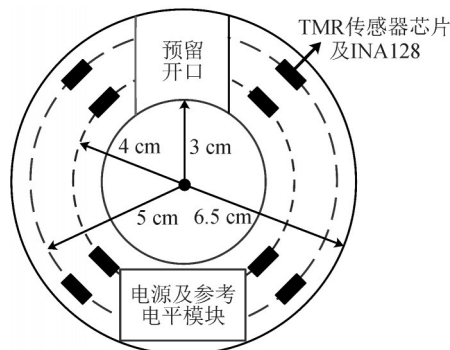


图10 PCB参考图

Fig. 10 PCB reference drawing

#### 3.2 实验测量与分析

实验主要对单、多导体电流产生的磁场干扰下,电流传感器的抗干扰能力进行了测试,实验平台示意图见图11。被测电流 $I_1$ 、干扰电流 $I_3$ 由调压器产生,波形不畸变情况下的最大输出电流有效值为15 A,干扰电流 $I_2$ 由大电流发生器产生,使用的导线最大耐受电流为60 A。使用Fluke i400s电流钳对被测电流和干扰电流进行测量,并用示波器读取和记录两个电流的有效值和波形。使用TMR电流传感器测量电流 $I_1$ ,传感器1与干扰电流之间的夹

角 $\alpha_1$ 为 $45^\circ$ ,通过八通道同步数据采集卡对TMR传感器阵列的输出进行采样储存。将被测载流导体尽可能地固定在传感器阵列中心。

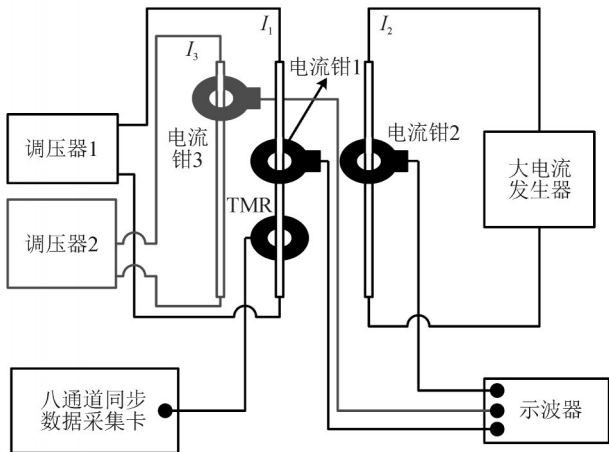


图 11 实验平台示意图

Fig. 11 Schematic diagram of experimental platform

首先对于单导体干扰的情况进行试验分析,此时 $I_3$ 所在支路不通电。当干扰电流 $I_2$ 为20 A,被测电流 $I_1$ 为9.47 A,间距 $D$ 为30 cm时,使用MATLAB对数据进行处理,TMR传感器和电流钳所得到的电流波形见图12。相比于使用内层4个传感器测量的数据取平均值的方法(方法2)得到的波形,双层环形阵列拓扑(方法1)的结果更接近电流钳所测得的参考波形。

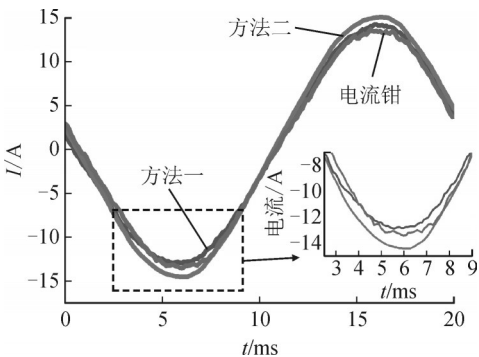


图 12 电流钳与两种阵列拓扑测量结果对比图

Fig. 12 Comparison of current clamp and two array topologies

干扰电流和被测电流距离为15 cm和30 cm时的测量结果见表1。

而在被测电流与干扰电流距离为20 cm时,保持被测电流大小基本不变,显著改变干扰电流大小所测得的结果见表2。对单导体电流干扰的实验结果表明,相比于内层环形阵列拓扑,文中提出的双层环形阵列拓扑能够有效减小干扰对测量误差的影响,但所实验测量得到的误差明显大于理论计算误差,这可能是由于被测导体没有完全位于导线中

表 1 单导体干扰距离15 cm和30 cm时的测量结果

Table 1 Measurement results of single conductor interference distance at 15 cm and 30 cm

| 距离/cm | $I_1$ /A | $I_2$ /A | 方法 1/A | 误差/% | 方法 2/A | 误差/% |
|-------|----------|----------|--------|------|--------|------|
| 15    | 9.93     | 7.01     | 10.02  | 0.92 | 10.82  | 9.04 |
|       | 9.96     | 9.19     | 10.02  | 0.64 | 10.75  | 7.92 |
|       | 9.92     | 19.10    | 10.01  | 0.86 | 10.79  | 8.80 |
| 30    | 10.24    | 6.63     | 20.25  | 0.14 | 11.18  | 9.20 |
|       | 10.24    | 10.10    | 9.98   | 2.53 | 11.02  | 7.53 |
|       | 10.24    | 16.80    | 10.13  | 1.09 | 11.15  | 8.88 |

心、被测导体无法视为无限长以及传感器本身在制作与安装上存在一定的误差所致。

表 2 单导体干扰距离20 cm时的测量结果

Table 2 Measurement results of single conductor interference distance at 20 cm

| $I_1$ /A | $I_2$ /A | 方法 1/A | 误差/% | 方法 2/A | 误差/% |
|----------|----------|--------|------|--------|------|
| 9.43     | 20       | 9.56   | 1.42 | 10.34  | 9.71 |
| 9.47     | 30       | 9.41   | 0.64 | 10.34  | 9.25 |
| 9.40     | 40       | 9.37   | 0.30 | 10.21  | 8.61 |
| 9.14     | 60       | 9.06   | 0.93 | 9.87   | 7.90 |

针对多导体干扰的情况,在单导体干扰的实验基础上增加一组干扰电流 $I_3$ ,干扰电流 $I_3$ 使用调压器产生,放置在被测电流左侧。保持干扰电流 $I_3$ 的大小和与被测电流 $I_1$ 之间的距离不变,分别改变干扰电流 $I_2$ 的大小和与被测电流 $I_1$ 的距离。当干扰电流 $I_3$ 有效值为14 A,与被测电流距离为20 cm,干扰电流 $I_2$ 与被测电流 $I_1$ 距离为20 cm和40 cm时,测量结果见表3。

表 3 多导体干扰距离20 cm和40 cm时的测量结果

Table 3 Measurement results of multi conductor interference distance at 20 cm and 40 cm

| 距离/cm | $I_1$ /A | $I_2$ /A | 方法 1/A | 误差/% | 方法 2/A | 误差/% |
|-------|----------|----------|--------|------|--------|------|
| 20    | 9.08     | 20       | 9.19   | 1.13 | 9.79   | 7.80 |
|       | 9.09     | 40       | 8.83   | 2.95 | 9.79   | 7.68 |
|       | 9.11     | 60       | 8.86   | 2.71 | 9.97   | 9.46 |
| 40    | 9.08     | 20       | 9.15   | 0.77 | 9.94   | 9.50 |
|       | 9.11     | 40       | 9.02   | 0.96 | 9.91   | 8.86 |
|       | 9.11     | 60       | 8.75   | 3.96 | 9.77   | 7.27 |

从表3中可以看出,当干扰电流 $I_2$ 距离为40 cm时的测量误差总体要小于距离为20 cm时的测量误差,由于干扰电流 $I_3$ 保持不变,在多导体干扰下测得结果的误差要大于单导体干扰下的误差。而在对所有的实验数据进行计算后,发现双层环形阵列拓扑的平均测量误差为1.79%,相对于采用内层4个传感器取平均值的方法减小了约7%的误差。

## 4 结论

针对利用磁阻传感器阵列测量电流时容易受外部磁场干扰的问题,文中提出了一种新型传感器阵列拓扑结构。并对其进行了仿真与实验研究,得到的主要结论如下:

1)外部干扰电流的相位变化以及传感器阵列与干扰电流之间角度的变化会导致测量误差产生周期性的变化。被测导体偏离传感器阵列中心以及被测导体与干扰电流之间的距离是影响测量误差的最主要因素。因此,为了获得尽可能准确的测量结果,要尽量保证被测导体位于阵列中心,干扰电流与被测电流距离不能过近。

2)实验测量结果表明,本拓扑能够有效减小干扰下的测量误差,在多种情况下的平均测量误差为1.79%,相对于采用内层4个传感器取平均值的方法减小了约7%的误差。但实验测量得到的误差明显大于理论计算误差,可能是传感器阵列的尺寸误差以及实验环境与理想情况不同所致。

## 参考文献:

- [1] 徐 潜,唐凌云,李 西. 新能源发电并网对电网电能质量的影响[J]. 集成电路应用, 2020, 37(9): 138-139.  
XU Qian, TANG Lingyun, LI Xi. Influence of new energy power generation on power quality of grid[J]. Applications of IC, 2020, 37(9): 138-139.
- [2] 王红星,刘军成,李 军,等. 配电网电能质量监测数据简约方法探讨[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 8-12.  
WANG Hongxing, LIU Juncheng, LI Jun, et al. Discussion of power quality data aggregation method used in distribution power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6): 8-12.
- [3] 许立武,李开成,肖贤贵,等. 基千深度前馈网络的电能质量复合扰动识别[J]. 电测与仪表, 2020, 57(1): 62-69.  
XU Liwu, LI Kaicheng, XIAO Xiangui, et al. Recognition of power quality complex disturbances based on deep feedforward network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(1): 62-69.
- [4] 谢林枫,王红星,刘军成,等. 基于电能质量约束的智能配电网分布式电源消纳能力研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4): 41-47.  
XIE Linfeng, WANG Hongxing, LIU Juncheng, et al. A study on the distributed generation accommodation capacity of the smart distribution network based on power quality constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 41-47.
- [5] 甄 超,张 健,季 坤,等. 电能质量治理设备运行状态识别及其治理效果评价[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 60-65.  
ZHEN Chao, ZHANG Jian, JI Kun, et al. Operation status identification of power quality compensation equipment and its effect evaluation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3): 60-65.
- [6] 谢善益,肖 斐,艾 芊,等. 多域分布式数据库的电能质量扰动事件记录关联规则挖掘[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5): 35-41.  
XIE Shanyi, XIAO Fei, AI Qian, et al. Association rule mining of power quality disturbance event record in multi-domain distributed database[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(5): 35-41.
- [7] 谢秉鑫,王 宗,范士林. 分布式电源对于配电网谐波特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 116-119.  
XIE Bingxin, WANG Zong, FAN Shilin. Influence on harmonic characteristics of distributed network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 116-119.
- [8] 张晓宇,郑 超,莫品豪,等. 换流变压器阀侧接地故障分析及保护优化[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 172-178.  
ZHANG Xiaoyu, ZHENG Chao, MO Pinhao, et al. Analysis and protection optimization of grounded fault in valve side of converter transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 116-119.
- [9] 孔德钱,张新燕,童 涛,等. 基于差分进化算法与BP神经网络的变压器故障诊断[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 57-61.  
KONG Deqian, ZHANG Xinyan, TONG Tao, et al. Transformer fault diagnosis based on differential evolution algorithm and BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 57-61.
- [10] 武立平,马维青,程胤璋,等. 基于振动信号指标能量的变压器机械故障检测[J]. 电测与仪表, 2020, 57(6): 126-131.  
WU Liping, MA Weiqing, CHENG Yinzhang, et al. Transformer mechanical fault diagnosis based on index energy of vibration signal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6): 126-131.
- [11] 王 阳,乐 健,周 谦,等. 基于小波包分析与神经网络的变压器区内外故障判断方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 1-7.  
WANG Yang, LE Jian, ZHOU Qian, et al. Inner and outer zone fault diagnosis method of transformer based on wavelet packet analysis and neural network Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 1-7.
- [12] 何正友. 分布式新能源接入电网的谐波热点问题探讨[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 47-52.  
HE Zhengyou. Discussion on harmonic hot issues of distributed new energy connected to power grid[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 47-52.
- [13] 贺冬珊,文 俊,耿晓红,等. 含多电源的送端电网谐波综合特性研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 1-8.  
HE Dongshan, WEN Jun, GENG Xiaohong, et al. Research

- on comprehensive harmonic characteristics of sending-end power grid with mul-tiple power sources[J]. Smart Power, 2020, 48(2):1-8.
- [14] 李振华, 胡廷和, 杜亚伟, 等. 一种优化窗函数及其在电网谐波检测中的应用分析[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 239-246.
- LI Zhenhua, HU Tinghe, DU Yawei, et al. Optimal window function and its application in harmonic detection of power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 239-246.
- [15] 连鸿松, 张少涵, 张逸. 基于自适应容积卡尔曼滤波算法的电力系统动态谐波状态估计[J]. 智慧电力, 2020, 48(6):14-19.
- LIAN Hongsong, ZHANG Shaohan, ZHANG Yi. Dynamic harmonic state estimation of power system based on adaptive volumetric kalman filter[J]. Smart Power, 2020, 48(6):14-19.
- [16] 杨志强, 陈卫. 电流互感器铁心剩磁测量方法研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 38-42.
- YANG Zhiqiang, CHEN Wei. Research on the method of measuring residual flux in the core of current transformer [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 38-42.
- [17] 许灵洁, 陈骁, 刘勇, 等. 异频测量法在电流互感器现场检测中的应用[J]. 变压器, 2021, 58(3): 70-75.
- XU Lingjie, CHEN Xiao, LIU Yong, et al. Application of different frequency measurement method in field measurement of current transformer[J]. Transformer, 2021, 58(3): 70-75.
- [18] 成林, 高坤, 闫山, 等. VFTO对GIS中电子式互感器的电磁干扰研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(12):37-44.
- CHENG Lin, GAO Kun, YIN Shan, et al. Electromagnetic interference of electronic transformer in GIS by VFTO[J]. Smart Power, 2021, 49(12):37-44.
- [19] 马德军, 刘晓焜, 董智颖. 电流互感器检定装置不确定度分析与研究[J]. 变压器, 2020, 57(3):32-34.
- MA Dejun, LIU Xiaokun, DONG Zhiying. Study on uncertainty of current transformer calibrating apparatus[J]. Transformer, 2020, 57(3):32-34.
- [20] 张建军, 孙红华. 高压并联电容器在线监测系统研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(2): 22-27.
- ZHANG Jianjun, SUN Honghua. Research of on-line monitoring system for high voltage shunt capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(2): 22-27.
- [21] 李成祥, 朱天宇, 姚陈果, 等. 基于变压器电压电流图形特性的绕组变形在线监测方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3532-3539.
- LI Chengxiang, ZHU Tianyu, YAO Chenguo, et al. Online diagnosis method for transformer winding deformation based on characteristic of figure constructed by voltage and current[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3532-3539.
- [22] 吕飞. 单芯片CMOS三维微型霍尔磁传感器研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- LYU Fei. Research on single-chip integrated CMOS 3D micro hall magnetic sensor[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [23] 马坦. 罗氏线圈传感器及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- MA Tan. The research of Rogowski coil and its applications [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [24] 李文婷, 龙兆芝, 范佳威, 等. 基于多层PCB罗氏线圈的精密冲击电流测量装置[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 138-144.
- LI Wenting, LONG Zhaozhi, FAN Jiawei, et al. Precision impulse current measuring device based on multi-layer PCB rogowski coil[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 138-144.
- [25] RIPKA P. Electric current sensors: A review[J]. Measurement Science and Technology, IOP Publishing, 2010, 21(11): 112001.
- [26] XIAO C, ZHAO L, ASADA T, et al. An overview of integratable current sensor technologies[C]//38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference. [S.l.]: [s.n.], 2003: 1251-1258.
- [27] 胡琛, 张竹, 杨爱超, 等. 电子式电流互感器误差模型及误差状态预测方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 187-193.
- HU Chen, ZHANG Zhu, YANG Aichao, et al. Error model and forecasting method for electronic current transformers [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 187-193.
- [28] 余达, 王红星, 卢启付, 等. 直流电子式电流互感器高频特性测试方案设计与验证[J]. 广东电力, 2020, 30(3): 72-78.
- YU Da, WANG Hongxing, LU Qifu, et al. Test and analysis of high frequency characteristics of DC ECT[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 30(3): 72-78.
- [29] 杨庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 349-367.
- YANG Qing, SUN Shangpeng, SIMA Wenxia, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367.
- [30] 谭煌, 李媛, 马刚, 等. 智能电网低压台区运行状态模糊综合评价方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 110-115.
- TAN Huang, LI Yuan, MA Gang, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of smart grid low-voltage station operating state[J]. Smart Power, 2020, 48(8): 110-115.
- [31] 胡军, 赵帅, 欧阳勇, 等. 基于巨磁阻效应的高性能

- 电流传感器及其在智能电网的量测应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2278-2286.
- HU Jun, ZHAO Shuai, OUYANNG Yong, et al. High performance current sensors based on giant magnetoresistance effect and practical applications in smart grids[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2278-2286.
- [32] 李 鹏, 袁智勇, 田 兵, 等. 基于隧道磁电阻的微型电流测量技术[J]. 南方电网技术, 2019, 13(4): 2-10.
- LI Peng, YUAN Zhiyong, TIAN Bing, et al. Micro current measurement technology based on tunnel magnetoresistance [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(4): 2-10.
- [33] 程立丰, 张伟超, 赵 洪, 等. 固体介质声耦合光纤法-珀传感器局部放电检测方法[J]. 广东电力, 2020, 33(9): 11-17.
- CHENG Lifeng, ZHANG Weichao, ZHAO Hong, et al. Fabry perot sensor with solid dielectric acoustic coupling for partial discharge detection[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 33(9): 11-17.
- [34] 吕 华, 刘明峰, 曹江伟, 等. 隧道磁电阻(TMR)磁传感器的特性与应用[J]. 磁性材料及器件, 2012, 43(3): 1-4.
- LYU Hua, LIU Mengfeng, CAO Jiangwei, et al. Performance and applications of magnetic sensors based on TMR effect[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2012, 43(3): 1-4.
- [35] 章敏俊, 张 豪, 符一凡, 等. 基于隧道磁阻磁场传感器的断路器弧后电流测量[J]. 广东电力, 2021, 34(12): 48-54.
- ZHANG Minjun, ZHANG Hao, FU Yifan, et al. Post arc current measurement based on TMR magnetic field sensor [J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(12): 48-54.
- [36] GUO C, ZHANG H, GUO H, et al. Crosstalk analysis and current measurement correction in circular 3D magnetic sensors arrays[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(3): 3121-3133.
- [37] 陈亚锋. 基于TMR传感器的大电流测量技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- CHEN Yafeng. Research on TMR sensor based large current measurement technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [38] 田 兵, 李 鹏, 袁智勇, 等. 基于磁电阻传感器的配电柜铜排电流测量方法[J]. 南方电网技术, 2019, 13(7): 77-83.
- TIAN Bing, LI Peng, YUAN Zhiyong, et al. Current measurement method of copper bar in distribution cabinet based on magnetoresistance sensor[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(7): 77-83.
- [39] 周春阳, 李亚锦, 刘英男, 等. 基于贝叶斯推理和多传感器信息融合的换流变缺陷分类算法研究[J]. 变压器, 2020, 57(11): 15-20.
- ZHOU Chunyang, LI Yajin, LIU Yingnan, et al. Transformer fault diagnosis method based on Bayesian interference and multi-dimensional information fusion[J]. Transformer, 2020, 57(11): 15-20.
- [40] BAZZOCCHI R, DI RIENZO L. Interference rejection algorithm for current measurement using magnetic sensor arrays [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 85(1): 38-41.
- [41] DI RIENZO L, BAZZOCCHI R, MANARA A. Circular arrays of magnetic sensors for current measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(5): 1093-1096.
- [42] CHEN Y, HUANG Q, KHAWAJA A H. Interference-rejecting current measurement method with tunnel magnetoresistive magnetic sensor array[J]. IET Science, Measurement Technology, 2018, 12(6): 733-738.
- [43] ZHANG H, LI F, GUO H, et al. Current measurement with 3-D coreless TMR sensor array for inclined conductor[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(16): 6684-6690.
- [44] BERNIERI A, FERRIGNO L, LARACCA M, et al. An AMR-based three-phase current sensor for smart grid applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7704-7712.
- 周 秀(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力设备状态检测及高压试验工作(E-mail: zhouxiu007@163.com)。
- 汲胜昌(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力设备在线监测及故障诊断等(通信作者)(E-mail: jsc@xjtu.edu.cn)。

(上接第227页)

- 方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 95.
- WANG Ling, FENG Yu, YANG Liu, et al. Study on harmonic measurement method of capacitor voltage transformer [J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 95.
- [29] 王 欢, 周 峰, 冯 凌, 等. 电场对电容式电压互感器误差影响机理分析及验证研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 88-94.
- WANG Huan, ZHOU Feng, FENG Ling, et al. Analysis and verification study on influence of electrical field on CVT's error[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 88-94.
- 张有锋(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向高压测量与智能检测(E-mail: 420597703@qq.com)。
- 郑运鸿(1971—), 男, 硕士生导师, 高级工程师, 主要研究方向为嵌入式系统与智能控制。