

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108220

Prewitt 霍尔磁梯度张量系统结构设计*

张云洲, 吴峻

(国防科技大学智能科学学院 长沙 410073)

摘要:为实现高速磁浮轨道长定子行波主漏磁场小空间、mT量级磁梯度张量的准确测量,将图像边缘检测领域的Prewitt梯度算子进行实例化,设计了一种由8只霍尔磁敏传感器构成的小体积、低成本的磁梯度张量测量结构。通过空间冗余的手段,克服了霍尔磁敏传感器零点偏移大,灵敏度一致性差的特点,也为传统磁梯度张量测量系统传感器的空间布局提供了一种新的思路。实验结果表明,相对传统十字形、正方形结构,Prewitt结构可将多传感器上述两种参数不一致导致的测量误差分别减小至原来的-10.4%和58.1%,有效降低了测量系统对传感器参数一致性的要求,避免了复杂高成本的三轴传感器标定与误差校正环节。

关键词: 高速磁浮轨道;行波主漏磁场;磁梯度张量;霍尔传感器;Prewitt梯度算子

中图分类号: TH89 TP212.9 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.10

Structure design of Prewitt hall magnetic gradient tensor system

Zhang Yunzhou, Wu Jun

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To realize the accurate measurement of mT magnitude magnetic gradient tensor in small space for traveling wave main magnetic flux leakage of high-speed maglev track stator, the Prewitt gradient operator of image edge detection is instantiated. A small volume and low-cost Hall magnetic gradient tensor measurement structure including 8 Hall magnetic sensors is designed. It overcomes the characteristics of large zero drift and poor sensitivity consistency of the Hall magnetic sensor by spatial redundancy, which provides a new way for sensors spatial layout design of the magnetic gradient tensor system. Compared with the traditional cross and square structure, experimental results show that the Prewitt structure can reduce the measurement error caused by the inconsistency of the above two parameters of multi-sensors to -10.4% and 58.1%. The requirements of the measurement system for the consistency of sensor parameters is effectively reduced, and the complex and high-cost calibration of the three-axis sensor and error correction are avoided.

Keywords: high speed maglev track; traveling wave main magnetic flux leakage; magnetic gradient tensor; Hall magnetic sensor; Prewitt gradient operator

0 引言

与轮轨交通中单纯承载车辆的“轨道”不同,常导高速磁浮轨道实际上是一种同步直线电机的初级,更是悬浮系统、牵引系统和运控系统的重要电气组成部件^[1]。但是受车轨磕碰及环境腐蚀的影响,表面环氧树脂层破损的定子铁心容易进一步腐蚀、短路,导致牵引磁场异常,影响车辆运行的舒适性、稳定性及安全性。为实现动

态、快速、高效的长定子状态监测,采用搭载式的磁敏阵列采集长定子产生的与空气闭合的行波主漏磁场。该磁场幅值约30 mT,易受悬浮磁场、列车姿态变化变化及外部噪声的干扰^[2]。

行波主漏磁场背景下的长定子铁心异常检测与地磁场背景下的矿藏勘探、潜艇侦查等磁异常^[3-5]检测极为相似,都存在严重的共模干扰。文献[6]针对异常目标定位精度易受运动载体平台晃动影响的问题,提出了一种基于十字形磁梯度张量系统结构的磁梯度张量特征值不

收稿日期:2021-07-09 Received Date: 2021-07-09

* 基金项目:十三五国家重点研发计划(2016YFB1200602-40)项目资助

变量定位方法,实验结果表明该方法可允许载体平台 10° 内的晃动角度。文献[7]也证实了采用磁梯度张量测量的方式,结合相应的信号处理算法,可以抑制强背景噪声及测量系统本体姿态变化导致的共模干扰,提高对异常磁场的辨识能力。因此,考虑将磁梯度测量的方法引入行波主漏磁场背景下铁心异常的检测,减小复杂电磁干扰对铁心异常目标检测的影响。

文献[8]指出,由于地磁背景下的磁异常信号极其微弱,国内外研究团队综合考虑磁传感器灵敏度与其余参数后多采用高精度的磁通门传感器与超导量子干涉仪构建磁梯度张量测量系统,其测量量级在 $1\text{ pT}\sim 1\text{ mT}$ 之间。然而,与地磁场的异常检测不同,行波主漏磁场的检测存在量级大(mT级)、安装空间小(mm级)的问题,传统超导量子干涉仪和磁通门传感器构成的磁梯度张量测量系统的体积均在m级,最小尺寸也在200 mm以上,无法直接使用。因此,需采用测量范围广($10^{-7}\sim 10\text{ T}$),集成尺寸小^[9]($1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$)的霍尔传感器构建小体积、mT量级的磁梯度张量测量系统。

但是相比磁通门与超导量级干涉仪,霍尔传感器的精度更低,制造工艺也相对较差,它存在较大的不等位电压偏差、温漂、时漂等,导致存在较大的零点偏移与三轴灵敏度漂移^[10]。当使用多个传感器进行磁场梯度张量测量时,不可避免地存在多传感器性能参数不一致的情况,进而引入更大误差^[11]。

目前,上述问题多采用针对单传感器的校正方法与针对多传感器测量系统的对准方法^[12],这两种方法不但对校正环境与设备有较高要求^[13],其校正策略与算法也较为复杂,同时也只是针对现有的十字形、正方形等测量结构,未从多传感空间结构设计的角度来减小系统测量误差。文献[14-15]针对六面体、正方体、正三角形、直角四面体、正四面体、十字形、正方形、一字形、平面菱形等不同结构形式的磁梯度张量测量结构,在地磁异常检测背景下进行了测量误差评定与仿真分析,明确提出了十字形结构测量误差最小,正方形结构次之的结论。但该结论所指的结构误差定义为真实梯度张量值与实测梯度张量值之差,并未考虑传感器本体误差,因此,该结论无法直接应用于零点偏移大、灵敏度漂移范围广的霍尔磁梯度张量系统。文献[16]采用双十字形结构,结合粒子群算法解决了地磁场和其他恒定磁场对磁信标定位影响过大的问题。该方法虽然在测量结构上有所创新,但同样未考虑传感器本体误差。综上所述,霍尔磁梯度张量系统与传统测量系统不同,其多传感器一致性差的问题更加严峻,针对磁通门传感器的校正与对准方法实现难度大,成本高,为方便起见,需从结构设计角度,采用冗余或其他方法,减小测量系统对多霍尔传感器一致性的要求。

本文采用价格低廉、体积小的霍尔传感器替代传统超导量子干涉仪、磁通门传感器构建了mT量级的磁梯度张量系统;从结构设计角度出发,将图像处理算法中的Prewitt梯度算子^[17]进行实例化,设计了将十字形与正方形结合的Prewitt结构;在高速磁浮轨道行波主漏磁场异常检测的背景下,综合考虑所选霍尔传感器的各项性能指标,分别从理论和仿真的角度证明了Prewitt结构可以降低磁梯度张量系统对多传感器性能指标一致性的要求,同时也为传统磁梯度张量系统的结构设计提供了一种新的思路;最后,通过直线电机行波主漏磁场测量实验,证明了提出的Prewitt结构的测量误差更小,对传感器参数一致性的要求也更低。

1 霍尔磁梯度张量测量系统误差分析

如图1所示,磁敏阵列以搭载的形式获取定子面行波主漏磁场信息,磁敏传感器为TLV493D-A1B6型霍尔传感器,具体参数如表1所示。在高速磁浮长定子铁心异常检测背景下,磁梯度张量系统的测量误差来源可归为表2所示的7类。

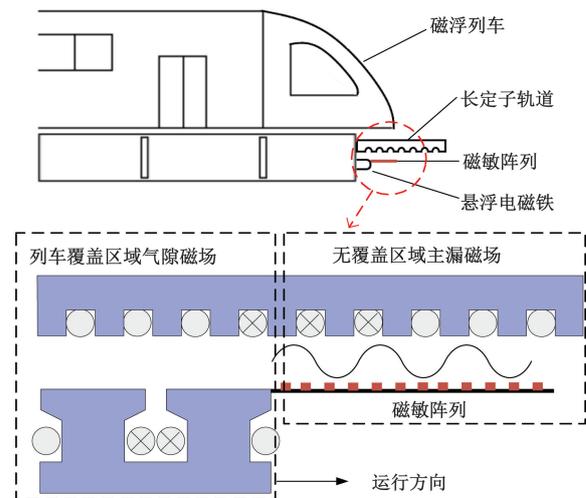


图1 搭载式磁场检测方法

Fig. 1 The onboard magnetic field detection method

表1 TLV493D-A1B6形霍尔传感器参数

Table 1 TLV493D-A1B6 Hall magnetic sensor parameters

名称	参数	名称	参数
量程/mT	± 130	分辨率/mT	0.098
频率/kHz	3.3	零点偏移/mT	± 1
初始灵敏度/%	1 ± 0.1	灵敏度漂移/%	± 20
x-y轴间灵敏度匹配因子/%	4.8	x-z轴间灵敏度匹配因子	18.2
器件/mm	$3.0\times 2.1\times 1.1$	封装/mm	5.3×3.4

以 OX 方向为基准, 灵敏度用 k_x, k_y, k_z 表示, 定义 $K_y = |k_y - k_x|/k_x \times 100\%$, $K_z = |k_z - k_x|/k_x \times 100\%$ 为 $x - y, x - z$ 轴间灵敏度匹配因子。

表 2 霍尔磁梯度张量测量系统的误差来源

Table 2 Error sources of the hall magnetic gradient tensor measurement system

误差类型	误差来源
安装误差	传感器沿安装中心发生旋转 ($<0.25^\circ$) 或平移 ($<0.1 \text{ mm}$)
三轴非正交误差	工艺原因无法保证 x, y, z 两两绝对垂直 ($<0.1^\circ$)
零点偏移不一致	各霍尔元件不等位输出电压不同 ($<\pm 1 \text{ mT}$)
灵敏度不一致	各传感器 x, y, z 灵敏度随时间、温度的漂移情况不同 ($<\pm 20\%$)
外部干扰	检测距离波动、悬浮磁场、环境磁场、自然噪声等, 幅值未知

定义等效测量误差为发生异常情况时测量值与真实值的偏差。被测对象各向磁场强度为 30 mT , 检测距离为 10 mm , 则安装误差与三轴非正交导致的等效测量误差分别 $<0.13 \text{ mT}, <0.01 \text{ mT}, <0.05 \text{ mT}$, 可以直接忽略; 外部干扰难以估计, 只能归入测量误差处理; 多传感器间的零点偏移与灵敏度不一致造成的等效测量误差分别 $<1 \text{ mT}, <6 \text{ mT}$, 超过了磁浮轨道铁心磁异常检测要求的 0.5 mT 的精度要求, 需重点考虑。

理想的三轴霍尔传感器在无磁环境中应满足 $B_x = B_y = B_z = 0$, 重点考虑传感器零点偏移与灵敏度不一致, 以 $O-XYZ$ 为标准参考坐标系, 则实测量 $\mathbf{B}' = [B_x \ B_y \ B_z]^T$ 可表示为:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & & \\ & k_y & \\ & & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{o} 表示传感器零点偏移矩阵; \mathbf{k} 表示灵敏度矩阵, 简记: $\mathbf{B}' = \mathbf{k} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{o}$ 。认为一批传感器的零点偏移 \mathbf{o} 服从正态分布^[18] $N(0, \delta_o^2)$, 灵敏度 \mathbf{k} 服从正态分布 $N(0, \delta_k^2)$, 则实测量 \mathbf{B}' :

$$\begin{aligned} \mathbf{B}' &\sim N(\mathbf{B} + \mathbf{B} \cdot E(\mathbf{k}) + E(\mathbf{o}), \mathbf{B}^2 D(\mathbf{k}) + D(\mathbf{o})) \\ &\Downarrow \\ \mathbf{B}' &\sim N(\mathbf{B}, (\mathbf{B} \delta_k)^2 + \delta_o^2) \end{aligned} \quad (2)$$

考虑磁场在 x, y, z 三个方向的空间变化率, 磁梯度张量矩阵 \mathbf{G} (magnetic gradient tensor) 表示如下, 无源空间中磁场的散度与旋度均为 0 ^[19], 因此 \mathbf{G} 只有 5 个独立元素。

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{xy} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{xz} & B_{yz} & -B_{xx} - B_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

如图 2 所示为常见的十字形与正方形磁梯度张量测量结构, 对应 \mathbf{G} 各元素计算公式为式 (4)、(5), 各元素 B'_{ij} 同样服从正态分布:

$$B'_{ij} \sim N\left[B_{ij}, \frac{2}{nd^2}((\mathbf{B} \delta_{k_i})^2 + \delta_{o_i}^2)\right], \quad i, j = x, y, z \quad (4)$$

矩阵各元素测量误差 $e(B'_{ij})$:

$$e(B'_{ij}) \sim N\left[0, \frac{2}{nd^2}((\mathbf{B} \delta_{k_i})^2 + \delta_{o_i}^2)\right] \quad (5)$$

式中: $n=1$ 对应十字形结构, $n=2$ 对应正方形结构。以 3δ 为原则定义各元素的测量误差, 理论上讲, 正方形结构的测量误差为十字形结构的 $1/\sqrt{2}$, 即: 通过合理布局, 增加参与各元素计算的传感器数量可以进一步减小由多传感器间零点偏移与灵敏度不一致带来的测量误差。

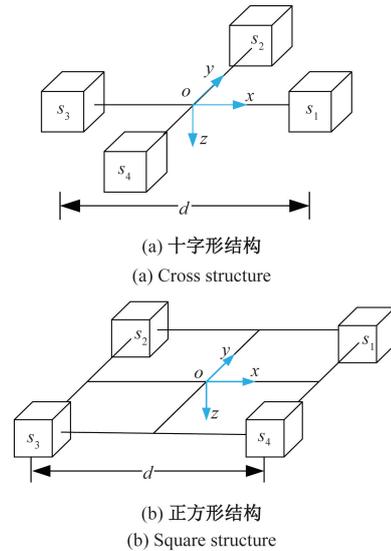


图 2 十字形与正方形测量结构

Fig. 2 Cross and square measurement structure

$$\text{十字形} \begin{cases} B_{xx} = \frac{1}{d}(B_{x1} - B_{x3}) & B_{yy} = \frac{1}{d}(B_{y2} - B_{y4}) \\ B_{xz} = \frac{1}{d}(B_{z1} - B_{z3}) & B_{yy} = \frac{1}{d}(B_{y2} - B_{y4}) \\ B_{yz} = \frac{1}{d}(B_{z2} - B_{z4}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{正方形} \begin{cases} B_{xx} = \frac{1}{2d}(B_{x1} + B_{x4} - B_{x2} - B_{x3}) \\ B_{yy} = \frac{1}{2d}(B_{y1} + B_{y2} - B_{y3} - B_{y4}) \\ B_{zz} = \frac{1}{2d}(B_{z1} + B_{z2} - B_{z3} - B_{z4}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} B_{xx} = \frac{1}{nd}(B_{x1} + (n-2)B_{x2} + B_{x3} - B_{x5} - (n-2)B_{x6} - B_{x7}) \\ B_{yy} = \frac{1}{nd}(B_{y1} + (n-2)B_{y8} + B_{y7} - B_{y3} - (n-2)B_{y4} - B_{y5}) \\ B_{zz} = \frac{1}{nd}(B_{z1} + (n-2)B_{z2} + B_{z3} - B_{z5} - (n-2)B_{z6} - B_{z7}) \\ B_{yy} = \frac{1}{nd}(B_{y1} + (n-2)B_{y8} + B_{y7} - B_{y3} - (n-2)B_{y4} - B_{y5}) \\ B_{yz} = \frac{1}{nd}(B_{z1} + (n-2)B_{z8} + B_{z7} - B_{z3} - (n-2)B_{z4} - B_{z5}) \end{cases} \quad (8)$$

2 Prewitt 磁梯度张量测量结构设计

2.1 Prewitt 磁梯度张量测量结构

梯度计算在图像处理的边缘检测领域有着广泛的应用,常见的梯度检测算子为 Soble、Prewitt 算子。如图 3 所示,从结构上看,Soble 对应的空间结构是十字形与正方形结构的 2:1 的结合,Prewitt 则是 1:1。这种复合空间结构很好地保留了十字形与正方形的正交特性^[20],在计算 G 各元素时能够引入更多的传感器参与,平均测量误差,同时,也并未大大提升硬件电路设计及元器件布局难度,如图 4 所示。

-1	0	1	1	2	1	-1	0	1	1	1	1
-2	0	2	0	0	0	-1	0	1	0	0	0
-1	0	1	-1	-2	-1	-1	0	1	-1	-1	-1
G_x			G_y			G_x			G_y		
(a) Soble 算子						(b) Prewitt 算子					
(a) Soble operator						(b) Prewitt operator					

图 3 梯度检测算子

Fig. 3 Operator of gradient detection

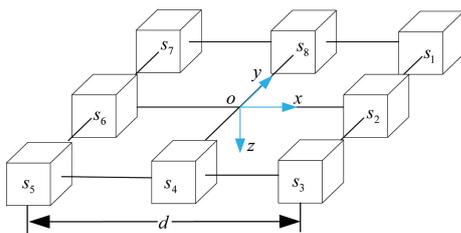


图 4 复合磁梯度张量结构

Fig. 4 Composite magnetic gradient tensor structure

根据式(4)、(8)可得,Soble 与 Prewitt 对应空间结构的理论误差分别为十字形结构的 $\sqrt{3}/2\sqrt{2}$ 与 $1/\sqrt{3}$,本文选择测量误差相对更小的 Prewitt 结构构成磁梯度张量测量阵列,完成高速磁浮轨道行波主漏磁场的测量。

另外,在不考虑磁通门与超导量子干涉仪安装难度的前提下,采用 Prewitt 结构可以细分测量空间后进行平均,获得相对平稳变化的真实磁场信息。

式中; $n=3$ 对应 Prewitt 算子, $n=4$ 对应 Soble 算子。

2.2 仿真分析

传统磁异常检测方法常采用磁梯度张量解析信号 A_x, A_y, A_z 极大值定位法^[4],因此以 A_x 为例,计算十字形、正方形、Prewitt 测量结构在多个传感器零点偏移与灵敏度不一致的情况下磁梯度张量解析信号测量误差的分布,根据式(4)、(9),可知 A_x 服从 χ^2 分布,以上侧 α 分位数 c 表示 A_x 的测量误差,取 $\alpha=0.0001$ 。

$$A_x = \sqrt{B_{xx}^2 + B_{yy}^2 + B_{zz}^2} \quad (9)$$

利用 MATLAB 按照图 5 流程进行数值仿真,仿真参数如下:测量对象为均匀磁场 $B_x = B_y = B_z = 30$ mT,磁梯度张量系统基线距离 6 mm;自然噪声 ± 0.5 mT,霍尔传感器零点偏移 o 为 ± 1 mT,灵敏度 k 为 1 ± 0.2 。单传感器三轴灵敏度约束条件: $K_y < 4.8\%$, $K_z < 18.2\%$,单组仿真次数 1 000。

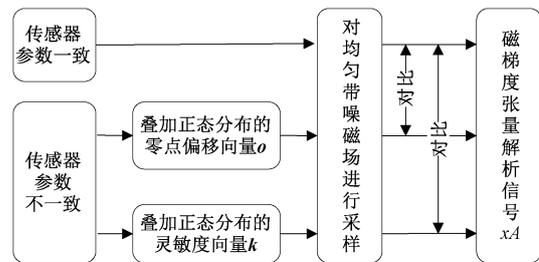


图 5 仿真流程

Fig. 5 Simulation process

当磁梯度张量系统各组成传感器的参数一致时,其测量结果只受自然噪声的影响,对比参数不一致情况下测量结果的误差分布情况,便可知不同测量结构的优劣。

仿真结果如图 6、7 所示,图中纵坐标 $g_n(A_x)$ 表示概率,实线为十字形结构在多个传感器不存在零点偏移及灵敏度漂移条件下的误差分布, n 表示 0.0001 对应的上侧分位数,代表 99.99% 的测量数据落在 $[0, n]$ 区间内。

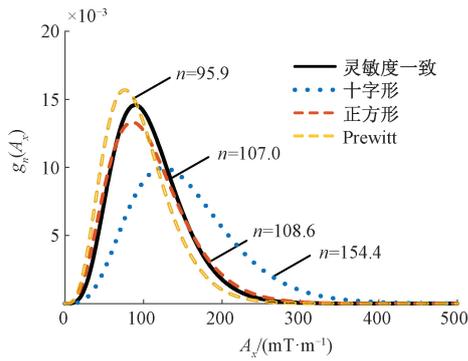


图 6 零点偏移不一致对 A_x 的影响

Fig. 6 Influence of zero drift inconsistency on A_x

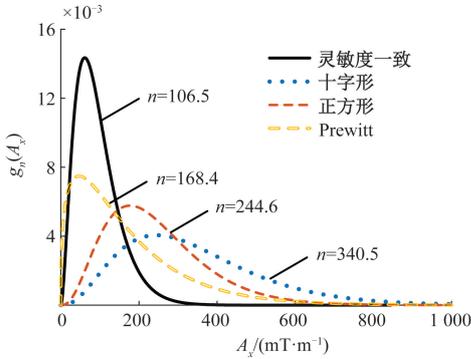


图 7 灵敏度不一致对 A_x 的影响

Fig. 7 Influence of sensitivity inconsistency on A_x

结果表明,当多传感器存在 1 mT 范围内的零点偏移不一致时,Prewitt 结构的测量误差小于参数一致情况,性能明显优于传统十字形、正方形结构,即 Prewitt 测量结构可完全消除传感器零点偏移带来的测量误差,这一点得益于 Prewitt 的冗余结构。当多传感器存在 20% 范围内的灵敏度不一致时,Prewitt 结构的测量误差虽大于参数一致情况,但相对传统结构,其测量误差 n 可从 340.5 降低至 168.4,约为理想状态的 58%,测量结构引起的误差明显降低。

将不同结构相对实线的误差变化率定义为相对误差 e ,统计结果如表 3 所示。并计算了不同灵敏度漂移范围内,不同测量结构的相对误差,如图 8 所示。

如图 8 所示,Prewitt 磁梯度张量测量结构理论上可允许系统内各传感器存在 13% 以内不同程度的灵敏度漂移,该指标覆盖了约 95% 的传感器。通过对测得信号进一步的滤波处理,可完全消除由传感器小概率参数漂移过大带来的影响,避免对复杂高成本的传感器标定筛选环节。

表 3 不同测量结构误差

Table 3 Error of different measuring structures

误差来源	零点偏移不一致	灵敏度不一致	
理想情况	c	107.0	106.5
	e	-	-
十字形	c	154.4	340.5
	e	44.3%	219.7%
正方形	c	108.6	244.6
	e	1.5%	129.7%
Prewitt	c	95.9	168.4
	e	-10.4%	58.1%

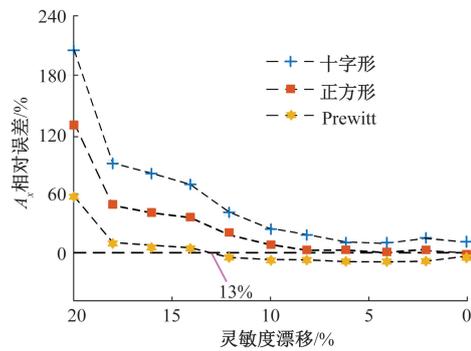


图 8 灵敏度漂移范围与 A_x 相对测量误差的关系

Fig. 8 Relationship between sensitivity drift range and A_x relative measurement error

3 实验验证

3.1 霍尔传感器参数确定

为验证 Prewitt 结构相对十字形、正方形结构对传感器参数不一致不敏感的优势,采用如图 9 所示的标准磁源对霍尔传感器的零点偏移与灵敏度进行标定,筛选出各项参数相对集中的 A 组与参数相对分散的 B 组,分组构建 Prewitt 测量结构,进行对比实验。共标定传感器

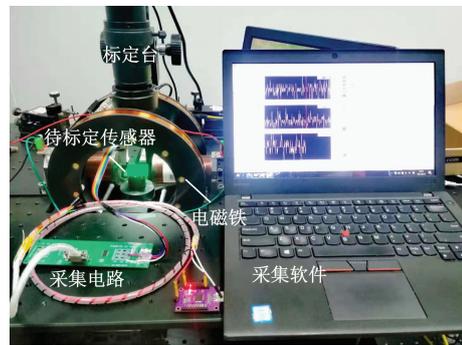


图 9 传感器参数标定装置

Fig. 9 Sensor parameter calibration device

32只,A、B两组传感器参数分别如表4、5所示。A、B两组各8只,根据式(3)可实现磁梯度张量各元素的测量,

同时可获得基线距离相同的十字形、正方形结构对应测量结果,与Prewitt进行对比。

表4 A组传感器参数

Table 4 Sensor parameters of group A

编号		2	10	12	13	17	20	24	25
零点偏移/mT	x	0.098	0.098	0.098	0	0.098	-0.098	-0.098	-0.098
	y	0	0.196	-0.098	0.196	0.196	-0.098	0.098	0
	z	0	0	-0.098	0	0.098	-0.098	0.098	0
灵敏度	x	1.139	1.133	1.139	1.121	1.115	1.119	1.107	1.119
	y	1.136	1.135	1.118	1.129	1.109	1.126	1.103	1.121
	z	1.123	1.136	1.128	1.101	1.098	1.117	1.101	1.101
灵敏度匹配因子/%	$x-y$	-0.26	0.18	-1.84	0.71	0.54	0.62	-0.36	0.18
	$x-z$	1.40	0.26	0.97	-1.78	-1.52	-0.18	-0.54	-1.60

表5 B组传感器参数

Table 5 Sensor parameters of group B

编号		1	3	4	8	14	16	31	32
零点偏移/mT	x	-0.980	0.294	0.490	0.294	-0.882	0	0.294	-0.784
	y	0.294	-0.098	-0.098	0.196	-0.068	0	0.196	-1.002
	z	0.196	0.196	-0.098	0	0	0	-0.882	-0.294
灵敏度	x	1.225	1.274	1.188	1.232	1.211	1.172	1.011	1.019
	y	1.201	1.313	1.225	1.162	1.248	1.209	1.230	1.059
	z	1.145	1.214	1.220	1.257	1.179	1.357	1.189	1.067
灵敏度匹配因子/%	$x-y$	-2.04	3.06	3.11	-5.68	3.06	3.16	2.77	3.92
	$x-z$	-6.53	-4.71	2.69	2.03	-2.64	15.79	-0.69	4.71

3.2 直线电机行波主漏磁场测量实验

如图10所示,利用变频器激励无转子的直线电机初级模拟高速磁浮轨道长定子产生的行波主漏磁场,通过垂向移动模组控制磁梯度测量阵列与定子面的检测距离,驱动水平移动模组对直线电机定子面进行低速扫描,

通过对交变磁场的进一步采样,获得搭载同步测量情况下行波主漏磁场对应的磁梯度张量解析信号 A_x ,A、B两组不同测量结构测得 A_x 如图11所示。具体实验参数如表6所示。

表6 实验参数

Table 6 Experiment parameters

类别	参数
激励参数	变频器:台达VFD-M,0.4 kW; 电流:0.9 A;频率:15 Hz。
电机参数	尺寸:312 mm×100 mm×30 mm; 齿槽比:12 mm;3mm;绕组匝数130
测量参数	检测距离:10 mm;采样频率:400 Hz; 扫描速度:0.05 m/s

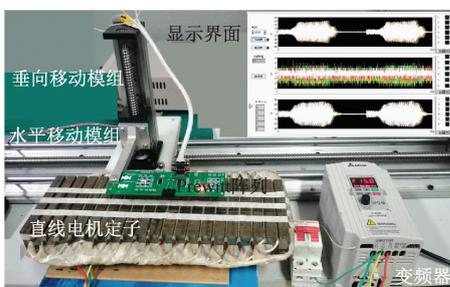


图10 直线电机行波主漏磁场测量实验平台

Fig. 10 Experiment platform of traveling wave MLF detection for linear motor

如图11(a)所示,参数较为集中的A组传感器构成不同结构进行磁梯度张量测量时,Prewitt结构测量结果从趋势上看为十字形与正方形结构结果的均值,

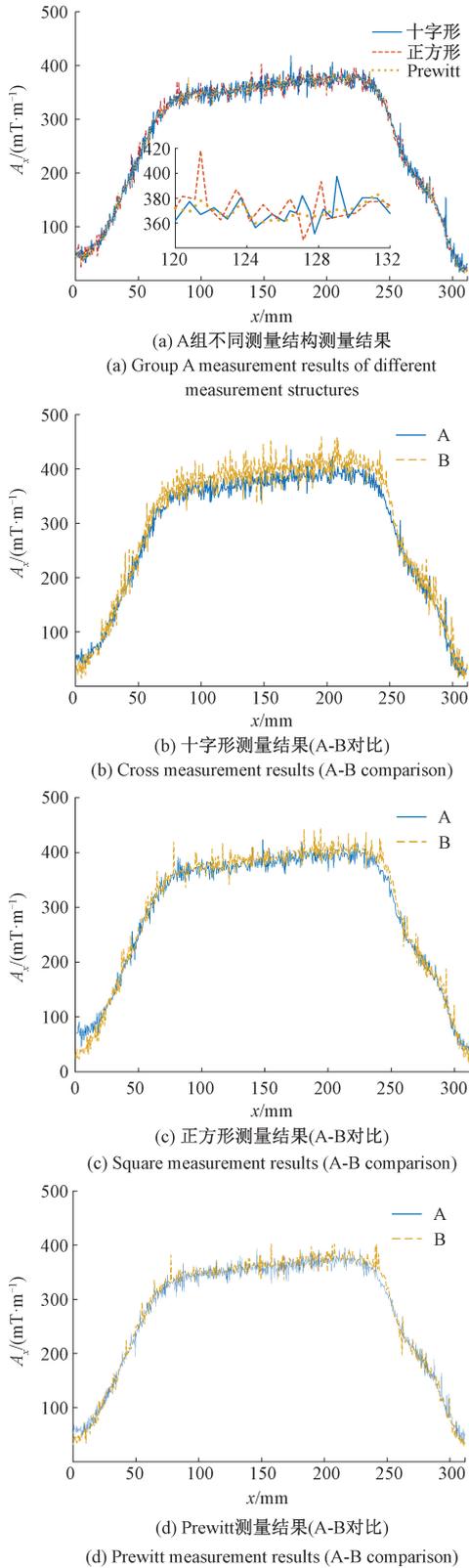


图 11 Prewitt 与十字形、正方形结构的对比
Fig. 11 Comparison of Prewitt with cross and square structures

这验证了 2.1 节 Prewitt 结构是十字形与正方形 1:1 结合的结论。图 11(b)~(d) 分别是不同结构 A, B 两组测量结果对比, 其中十字形与正方形 B 组的测量误差明显增大, 十字形最明显, 而 Prewitt 结构 A, B 两组测量误差接近。

如图 12 所示, 分别计算 A, B 两组不同结构的测量误差与信噪比, 并计算其变化率, 如表 7 所示。结果表明, 在磁梯度张量系统各传感器参数分散的情况下, Prewitt 结构的测量误差与信噪比(SNR)明显优于十字形与正方形结构, 且与参数集中情况下接近。这说明了 Prewitt 结构对霍尔传感器零点偏移大, 灵敏度易漂移的特点不敏感, 传感器可直接使用, 不必进行筛选与误差校正。

表 7 参数不一致对 A_x 测量误差及信噪比的影响

Table 7 Influence of parameter inconsistency on

A_x measurement error and SNR		%		
	十字形	正方形	Prewitt	
测量误差变化率	63.2	60.1	16.9	
信噪比变化率	-7.0	-5.4	-1.7	

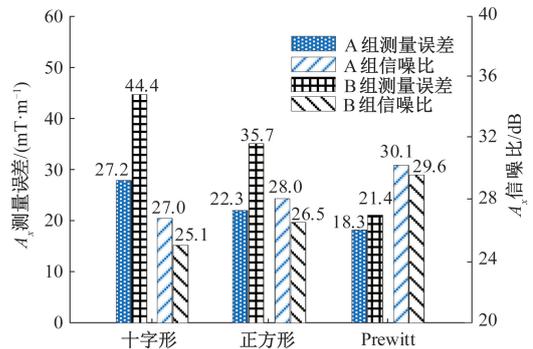


图 12 A, B 两组测量误差及信噪比
Fig. 12 Measurement error and SNR of A and B groups

4 结 论

针对高速磁浮轨道行波主漏磁场小空间、mT 量级磁梯度张量的测量问题, 利用霍尔传感器构建了一种小体积、大量程、低成本的 Prewitt 磁梯度张量测量结构, 具体结论如下。

1) 针对多个霍尔传感器的零点偏移与灵敏度不一致问题, 相比传统结构, Prewitt 结构的理论误差分别降低至 -10.4%、58.1%, 降低了磁梯度张量测量系统对多传感器一致性的要求;

2) 传感器参数集中组与参数分散组对比实验结果证明了 Prewitt 结构测量结果对传感器参数变化不敏感, 可

避免霍尔传感器的标定校准环节。

3)传统磁梯度张量测量系统也可以采用 Prewitt 结构来减小结构误差,提升测量精度。

参考文献

- [1] 罗茹丹,吴峻,王智仁. 高速磁浮列车长定子轨道几种故障情况的分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(11): 2658-2667.
LUO R D, WU J, WANG ZH R. Analysis and research on several faults of high speed Maglev train long stator track [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(11): 2658-2667.
- [2] 罗茹丹,吴峻,张云洲. 高速磁浮轨道长定子铁心片间短路故障的研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(4): 853-860.
LUO R D, WU J, ZHANG Y Z. Research on short circuit fault between long stator core pieces of high-speed maglev track [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 853-860.
- [3] WANG S, ZHANG M, ZHANG N, et al. Calculation and correction of magnetic object positioning error caused by magnetic field gradient tensor measurement [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(3):16-21.
- [4] 万成彪,潘孟春,张琦,等. 基于张量特征值和特征向量的磁性目标定位[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(2):324-329.
WAN CH B, PAN M CH, ZHANG Q, et al. Magnetic object localization with eigenvalue and eigenvector of tensor [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(2):324-329.
- [5] SHANG Y Q, JIAN S Y, ZOU J. A localization method for submarines based on array probes magnetic measurement at two positions to overcome the influence of background field [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, 55 (2): 205-212.
- [6] 马剑飞,丁凯,颜冰,等. 基于 AUV 晃动平台的水下磁性目标定位[J]. 电子学报, 2021, 49(6): 1088-1093.
MA J F, DING K, YAN B, et al. Underwater magnetic target localization based on swaying AUV platform [J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(6): 1088-1093.
- [7] 李荣浩,王毅,王琦,等. 基于被动探测的目标磁扰动信号检测与定位[J]. 航天电子对抗, 2021, 37(1): 38-42.
LI R H, WANG Y, WANG Q, et al. Magnetic turbulence detection of targets based on passive probing system[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021, 37(1): 38-42.
- [8] 李青竹,李志宁,张英堂,等. 磁梯度张量系统发展及其误差校正研究现状[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(6):72-81.
LI Q ZH, LI ZH N, ZHANG Y T, et al. Research progress of magnetic gradient tensor system and its error calibration [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2017, 31(6):72-81.
- [9] CHAO Q, XU ZH. Detection technology of multi-magnetic source in spacecraft based on magnetic field gradient tensor[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 237(3):32021-32029.
- [10] 张卫民,杨旭,王珏,等. 基于霍尔元件阵列的缺陷漏磁检测技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(6): 647-651.
ZHANG W M, YANG X, WANG Y, et al. Multichannel array magnetic flux leakage testing system using hall devices [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(6):647-651.
- [11] 陈棣湘,潘孟春,罗飞路. 三维磁敏传感器的设计及误差分析[J]. 传感技术学报, 2006(3):642-644.
CHEN L X, PAN M CH, LUO F L. Design and error analyses of 3D magnetic Sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006(3):642-644.
- [12] 尹刚,张林,谢艳,等. 磁梯度张量系统的非线性校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4):35-43.
YIN G, ZHANG L, XEI Y, et al. Nonlinear calibration method of magnetic gradient tensor system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4):35-43.
- [13] QING ZH L, ZHIN N L, YING T Z, et al. Artificial vector calibration method for differencing magnetic gradient tensor systems [J]. Sensors, 2018, 18 (2): 2232-2245.
- [14] 刘丽敏. 磁通门张量的结构设计,误差分析及水下目标探测[D]. 长春:吉林大学, 2012.
LIU L M. Configuration design, error analysis and underwater target detection of fluxgate tensor magnetometer [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [15] 迟铖,吕俊伟. 磁梯度张量系统结构的比较分析[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(1):46-49.
CHI CH, LYU J W. Comparative analysis of magnetic gradient tensor system structure [J]. Command Control & Simulation, 2019, 41(1):46-49.
- [16] 赵震,杨宾峰,王润,等. 基于双十字形测量结构的磁信标定位方法[J]. 传感技术学报, 2021, 34(1): 70-74.
ZHAO ZH, YANG B F, WANG R, et al. Magnetic beacon positioning method based on double cross-shaped measuring structure [J]. Chinese Journal of Sensors and

- Actuators, 2021, 34(1):70-74.
- [17] 许四祥,李天甲,翟健健,等. 基于 Prewitt 算子的自适应弱小目标检测[J]. 红外技术, 2019, 41(2): 189-193.
XU S X, LI T J, ZHAI J J, et al. Adaptive dim small target detection based on prewitt operator [J]. Infrared Technology, 2019, 41(2):189-193.
- [18] 卢莉萍, 张晓倩. 复杂环境下多传感器目标识别的数据融合方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2020, 47(4): 31-38.
LU L P, ZHANG X Q. Datafusion method of multi-sensor target recognition in complex environment [J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2020, 47(4): 31-38.
- [19] 张艺腾, 李磊, 周斌, 等. 磁场梯度张量测量法消除卫星磁干扰[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(5):920-926.
ZHANG Y T, LI L, ZHOU B, et al. Eliminating magnetic disturbance of satellites by method of magnetic field gradient tensor measurement [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(5):920-926.
- [20] WANG X, LIU H, WANG H, et al. Quantitative analysis of the measurable areas of differential magnetic gradient tensor systems for unexploded ordnance

detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(5): 5952-5960.

作者简介



张云洲,2019年于东北大学获得学士学位,现为国防科技大学智能科学学院硕士研究生,主要研究方向为电磁悬浮与推进技术。

E-mail: zyz_ss1210@163.com

Zhang Yunzhou received his B. Sc. degree from Northeastern University in 2019. He is currently a master student in the College of Intelligence Science and Technology at National University of Defense Technology. His main research interests include electromagnetic levitation and propulsion technology.



吴峻(通信作者),2000年于国防科技大学获得博士学位,现为国防科技大学智能科学学院研究员,博士生导师,主要研究方向为电磁悬浮与推进技术。

E-mail: wujun2008@nudt.edu.cn

Wu Jun (Corresponding author) received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2000. He is currently a professor and a Ph. D. advisor in the College of Intelligence Science and Technology at National University of Defense Technology. His main research interests include electromagnetic levitation and propulsion technology.