doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2025.01.011

双原子磁强计组合避免死区方法研究

张可心^{1,2},田 原¹,陈杰华¹,王远超¹

(1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院原子频标重点实验室,武汉 430071;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:工作于地磁背景下的原子磁强计搭载于移动平台进行磁场测量时,在其探头方向与磁场 方向间的某些夹角区域内,原子磁强计无法正常工作,即存在测量死区。通过理论分析测量死区 的产生机理,提出了一种在实际应用中避免死区的双原子磁强计组合的通用方法。该方法将2台 原子磁强计组合放置在实际测量位置处,即使安装平台姿态角在一定范围内变化,也至少有1台原 子磁强计处于正常工作状态,从而有效地避免死区。通过建立双原子磁强计组合数学模型,根据 实际地磁场方向和安装平台姿态角变化条件进行仿真实验研究,获得了最优组合方案,并在测试 平台上进行了实验验证。在平台姿态角旋转变化为 $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$ 、俯仰角变化为 $\beta \in [-40^\circ, 40^\circ]$ 的条件下,实现了有效避免测量死区,结果表明该方法具有实用价值。

关键词:地磁场;原子磁强计;测量死区;电子顺磁共振 **中图分类号:**P716+.82 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2025)01-0118-11

Research on the dead zone avoidance method for the combination of dual atomic magnetometers

ZHANG Kexin^{1,2}, TIAN Yuan¹, CHEN Jiehua¹, WANG Yuanchao¹

 Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: When an atomic magnetometer operating in the geomagnetic background is mounted on a mobile magnetic field measurement platform, within certain angular ranges between the probe direction and the magnetic field direction, the atomic magnetometer cannot operate properly. These areas are known as dead zones. Through theoretical analysis of the dead zone generation mechanism, a generalized method is proposed to avoid dead zones in a combination of two atomic magnetometers in practical applications. This method places two atomic magnetometers combinatorially at the actual measurement position, which makes at least one of the two atomic magnetometers is in the normal operating state within a certain range of changes in the attitude angle of the atomic magnetometer mounting platform, and thus effectively avoids the dead zone. By establishing the mathematical model of the dual atomic magnetometer, a simulation experimental research is carried out according to the actual geomagnetic field direction and the conditions of the attitude angle change of the mounting platform. The optimal combination scheme is obtained and the experi-

作者简介:张可心(1999一),女,硕士研究生,主要从事原子磁强计方面的研究。

收稿日期: 2024-05-13;修订日期: 2024-11-06

通信作者:陈杰华(1980一),男,博士,正高级工程师,博士生导师,主要从事原子分子光物理和原子传感器的研制与应用 等方面的研究。

ment is carried out on the test platform. Finally, the effective avoidance of dead zone is realized when the platform attitude angle rotation is varied as $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$ and pitch angle is varied as $\beta \in [-40^\circ, 40^\circ]$. The result shows that the method has practical value.

Key words: Geomagnetic field; Atomic magnetometer; Dead zone; Electron paramagnetic resonance

0 引言

原子磁强计是一种利用原子测量磁场的量子 传感器,因其小体积、低功耗及高灵敏度的特点,已 广泛应用于地球物理与空间探测^[1-3]、军事反潜^[4-5]、 矿产勘探^[6-7]及生物医学诊断^[8-9]等领域。当前原子 磁强计产品种类丰富,国外如美国的QuSpin公 司^[10]、Geometrics公司^[11]及Twinleaf公司^[12]等已 成功研发并推出了小型原子磁强计产品;而国内如 中国船舶集团有限公司第七一五研究所^[13]、北京大 学^[14]、中国科学院空天信息研究院^[15]及中国科学 院精密测量科学与技术创新研究院等也成功研制 出了原子磁强计样机。工作于地磁背景下的原子 磁强计产品能够应用于航空、地面及海洋等不同场 景,但其在实际应用中存在测量死区的问题,需要 寻找并实施有效的解决方案。

原子磁强计产品搭载于移动平台上进行磁场 测量时,其探头方向与地磁方向间的夹角会发生变 化,在某些夹角区域内,电子顺磁共振信号的幅度 会变得非常微弱,导致原子磁强计的灵敏度骤降, 甚至出现无法正常工作的情况,该夹角区域被称为 测量死区(dead zone)^[16]。对于 Mz 原子磁强计而 言,当光沿磁场方向入射并与原子相互作用时,原 子被极化,再施加垂直于光传播方向的射频磁场, 可发生电子顺磁共振;而当光方向与磁场方向垂直 时,原子不能被极化,无法发生共振,即进入测量 死区^[17-18]。

目前,针对原子磁强计产品测量死区问题的研 究相对较少,更多集中在实验平台上。例如,Ben-Kish等^[17]提出了通过改变偏振调制方案,同时激 发 CPT 信号和 Bell-Bloom 信号以减少测量死区; Schultze等^[19]提出了使用 2 个原子气室,分别用两 束相互垂直的光进行探测以消除测量死区;Gong 等^[20]设计了一种具有 3 个正交原子气室的多光束 原子传感器,用以消除测量死区。本文针对 Mz 原 子磁强计,提出了一种能够在实际应用中避免死区 的双原子磁强计组合方法。单一原子磁强计无法 避免进入死区,而通过将2台原子磁强计组合放置 在实际测量位置处,即使安装平台姿态角在一定范 围内变化,也至少有1台原子磁强计处于正常工作 状态,从而有效地避免死区的出现。该方法无需改 变原子磁强计的现有物理结构,只需要搭建相应的 测试平台即可。同时,针对不同测量地点及不同平 台姿态变化,可以根据实际应用需求灵活改变组合 方案,最大限度地避免测量死区。

1 理论分析

1.1 测量死区产生机理

在测量地磁场时,搭载于移动平台上的原子磁 强计探头方向(光方向)相对于地磁方向间的某些 夹角区域内,原子磁强计无法正常工作,该夹角区 域为测量死区。Mz原子磁强计的工作原理如图1 所示,原子磁强计的探头摆放在 xoy 平面,碱金属 原子在外界磁场作用下发生塞曼分裂,形成多个塞 曼子能级。当一束圆偏振光沿磁场方向入射并与 原子作用时,会在基态塞曼子能级上造成原子的极 化,图1中沿 x 轴的 B。即为外界磁场方向,AB 为光 方向。用和光场传播方向垂直的射频磁场,即沿 y 轴的 B_{rt},与原子塞曼子能级发生电子顺磁共振效 应。利用光电探测器探测透射后的圆偏振光可以 得到电子顺磁共振信号,通过信号最低点对应的射





频频率即可得到外界磁场的大小^[16]。当原子磁强 计的光方向,即探头方向与待测磁场方向(或反方 向)一致时,电子顺磁共振信号幅度最大;当光方向 与待测磁场方向间的夹角逐渐增大时,信号幅度随 之减小;当光在 *xoy* 面旋转至与磁场方向垂直时, 原子极化程度为0,信号幅度也减小至0。然而,在 夹角接近于 90°的某些区域内,电子顺磁共振信号 幅度会变得非常微弱,导致原子磁强计无法正常工 作,该夹角区域即为测量死区,可表示为[90°- ϵ , 90°+ ϵ], ϵ 为小于 90°的某一角度。

对于激光抽运的 Mz 原子磁强计,电子顺磁共 振信号幅度与光方向和待测磁场方向夹角、射频磁 场方向和待测磁场方向夹角均相关,前者影响原子 的极化程度,后者影响基态塞曼能级间的跃迁强 度。假设原子磁强计的光方向与待测磁场 B_0 间的 夹角为 φ ,电子顺磁共振信号的幅值 A_{φ} 与夹角 φ 的 关系存在这样 3 种情况:如图 1 所示,射频磁场 $B_{\rm ff}$ 的方向沿 y 轴,探头在 xoy 平面内旋转, $B_{\rm ff}$ 与磁场 B_0 之间的夹角会发生变化,此时 $A_{\varphi} = A_0 \cos^4 \varphi$,其 中 A_0 表示光沿磁场方向时电子顺磁共振信号的幅 值;假设射频磁场 $B_{\rm ff}$ 的方向沿 z 轴,探头在 xoy 平 面内旋转, $B_{\rm ff}$ 与磁场 B_0 方向始终垂直,此时 $A_{\varphi} =$ $A_0 \cos^2 \varphi;$ 而当射频磁场 $B_{\rm ff}$ 的方向为其他方向时, 电子顺磁共振信号的幅值 A_{φ} 与夹角 φ 间的关系处 于 $A_0 \cos^4 \varphi \sim A_0 \cos^2 \varphi$ 之间。

1.2 模型建立

原子磁强计放置于移动平台上,在某一地理位置 地磁场的方向由磁倾角与磁偏角决定^[21]。平台姿态 角的变化会导致原子磁强计探头方向发生变化,进而 导致原子磁强计探头方向与地磁方向间的夹角变化, 单一原子磁强计会不可避免地进入测量死区。因此, 提出了双原子磁强计组合方法,将2台原子磁强计组 合放置于同一平台上,使原子磁强计在实际测量位置 处,即使姿态角在一定范围内变化,也至少有1台原子 磁强计处于正常工作状态,从而有效避免测量死区。

设测量坐标系为空间直角坐标系 oxyz, 假设 单一原子磁强计放置于移动平台上,考虑平台上下 俯仰角及水平旋转角的变化,如图 2(a)所示。平台 初始位置与 z 轴夹角为 γ ,相对水平面朝下,原子磁 强计探头方向(光方向)初始位置由 C_1D_1 表示。平 台开始移动,姿态发生变化,经水平旋转 α 及上仰 β 后, C_2D_3 即可表示经平台姿态变化后原子磁强计的 当前位置,BA 表示测量位置处的地磁方向,位于 ozy 面。假设在北半球进行测量,地磁方向相对水 平面朝下,与 z 轴间夹角 θ 为实际地理位置处磁倾 角的余角。

由图 2(a)可得原子磁强计的当前位置 $C_2 D_3$ 与 地磁方向 BA

$$B = (0 \quad 0 \quad \cos\theta)$$
$$A = (0 \quad \sin\theta \quad 0)$$
$$BA = (0 \quad \sin\theta \quad -\cos\theta)$$

 $C_{2} = (-\sin\beta\cos\gamma\cos\alpha - \sin\beta\cos\gamma\sin\alpha \cos\beta\cos\gamma)$ $D_{3} = (\cos\alpha\cos\beta\sin\gamma \sin\alpha\cos\beta\sin\gamma \sin\beta\sin\gamma)$

$$C_{2}D_{3} = (\cos\alpha\cos\beta\sin\gamma + \sin\beta\cos\gamma\cos\alpha)$$

$$\sin\alpha\cos\beta\sin\gamma + \sin\beta\cos\gamma\sin\alpha$$

$$\sin\beta\sin\gamma - \cos\beta\cos\gamma$$
(1)

通过判断原子磁强计探头方向与地磁方向间 的夹角 *φ*,判断原子磁强计是否进入测量死区。

$\varphi = \arccos \left(\left(-\frac{1}{2} \right) \right) \right)$	$\frac{\boldsymbol{B}\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{C}_2 \boldsymbol{D}_3}{ \boldsymbol{B}\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{C}_2 \boldsymbol{D}_3 } \bigg)$
	$\sin\theta (\sin\alpha \cos\beta \sin\gamma + \sin\beta \cos\gamma \sin\alpha) - \cos\theta (\sin\beta \sin\gamma - \cos\beta \cos\gamma)$
= arccos	$\sqrt{(\cos\alpha\cos\beta\sin\gamma+\sin\beta\cos\gamma\cos\alpha)^2+(\sin\alpha\cos\beta\sin\gamma+\sin\beta\cos\gamma\sin\alpha)^2+(\sin\beta\sin\gamma-\cos\beta\cos\gamma)^2}$
	(2)

引入双原子磁强计组合模型,如图 2(b)所示。 将 2 台原子磁强计以不同姿态放置于同一平台上, C_1D_1 和 C_2D_2 分别表示 2 台原子磁强计的初始位 置,两者之间的夹角为 σ , σ 可变。

运用式(2)模拟实际测量情况,开展仿真实验研究。参照湖北省武汉市的磁倾角 47.29°,令 θ = 43°,假设单一原子磁强计初始放置位置与z轴夹角 γ =65°,根据实际应用场景的需求设置平台姿态的

不同变化范围,此处选择设置平台水平旋转角的变 化范围为 $\alpha \in [0^{\circ}, 180^{\circ}]$,上下俯仰角的变化范围为 $\beta \in [-40^{\circ}, 40^{\circ}]$,也可选择其他角度进行计算。由 前述测量死区夹角区域可表示为 $[90^{\circ}-\epsilon, 90^{\circ}+\epsilon]$, 得到如图 3(a)所示单一原子磁强计探头方向与地 磁方向间的夹角 φ 随平台姿态变化而变化的示意 图,横轴为水平旋转角 α 的变化,纵轴为上下俯仰角 β 的变化,图中不同颜色表示不同夹角 φ ,右侧标识

40

180



40 20

90 120 150 180

旋转角α/(°)

(a) 单一原子磁强计探头方向与地磁方向间的夹角 ϕ

随平台姿态角变化的示意图

-20

-40

30 60





柱表示夹角 φ 的数值变化与颜色的对应关系,可以 看到 2 条等值线间的橙黄色区域为测量死区。添加 另一台原子磁强计,假设 $\sigma = 70^\circ$,得到如图 3(b)所 示的组合效果示意图,对比图 3(a),对应测量死区 的橙黄色区域大幅减少,有效避免了测量死区。

2 实验装置

我们团队当前研制的 Mz 原子磁强计,工作原 子选择⁸⁷ Rb,光源选择垂直腔面发射半导体激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL), 样机如图 4 所示。由物理探头与电路系统两部分组 成,两者通过线缆连接,整机功耗约 2.5 W@25 °C, 整机体积约 270 cm³,灵敏度约 1 pT/Hz^{1/2}@1 Hz, 磁场测量范围为 10~100 μ T。所研制的 Mz 原子 磁强计灵敏度在第三方检测机构提供的 50 μ T 低 噪声均匀磁场内进行了测试,结果如图 5 所示。



图 4 Mz 原子磁强计样机 Fig. 4 Mz atomic magnetometer prototype





使用定制的磁屏蔽桶在实验室内对原子磁强 计测量死区的精确夹角区域进行测量,实验装置如 图6所示。磁屏蔽桶可屏蔽地磁和外界电磁的干 扰,桶内放置亥姆霍兹线圈,使用 Keithley 6221 精 密电流源产生直流信号并通入线圈,可产生低噪声 的恒定磁场。将原子磁强计的探头放入磁屏蔽桶 内,设置电流源输出50 mA电流至线圈以模拟地磁 场的实际值。通过旋转圆盘平台标定原子磁强计 探头方向与桶内待测磁场方向间的夹角,并在不同 夹角记录电子顺磁共振信号与磁场测量值。



(a)磁屏蔽桶 (b)桶内亥姆霍兹线圈 (c)旋转圆盘平台 图 6 测量死区夹角区域实验装置

Fig. 6 Experimental device for measuring dead zone angle area

为进行实验验证,设计如图 7 所示的手动测试 平台。该平台主体由 1 个长板、左右 2 个可旋转三 角架及 1 个中心角度圆盘组成。考虑金属磁性材料 对地磁场的影响,选用塑料作为加工材料,且使用 塑料螺丝连接平台的各部件。长板长度为 1 m, 2 台原子磁强计分别放置于左右三角架上,以消除 相互磁场波动干扰。三角架底部打孔,长板对应位 置处有突起小圆柱,使三角架能够在长板上以任意 角度旋转,实现 2 台原子磁强计相对位置的任意调 整。角度圆盘圆心与长板中心点在竖直方向共线, 并通过一根短轴连接固定。以长板一侧边为参考, 从 0°开始以每 5°为变化绕圆盘圆心旋转长板至 360°,并在圆盘上画出对应参考线进行角度标定,从 而实现长板任意水平旋转角变化。通过手动上下 调整长板的位置,并用倾角仪进行角度标定,还可 实现长板任意上下俯仰角变化。



图 7 手动测试平台 Fig. 7 Manual test platform

3 实验结果与讨论

3.1 测量死区的精确夹角区域

将原子磁强计的探头平放入磁屏蔽桶内,设置电 流源输出 50 mA 电流至线圈,以模拟地磁场的实际 值。在摆放探头时,使探头内射频磁场方向始终与探 头内光方向垂直,且同时与待测磁场方向垂直。根据 原子磁强计的探头敏感方向,从探头方向与桶内待测 磁场方向间的夹角 $\varphi=0^{\circ}$ 开始,每增加 5°直至 180°,由 于微分信号的信噪比更高,选择记录上位机输出的电 子顺磁共振信号的微分信号与磁场测量值。各角度 记录 400 组数据,共进行 3 次重复实验。

电子顺磁共振信号在 $\varphi \in [0^{\circ}, 90^{\circ}] = \varphi \in [90^{\circ}, 180^{\circ}]$ 是对称的,以每 10°为变化,计算 3 次重复实验 所得均值,进行归一化,绘制 $\varphi \in [0^{\circ}, 180^{\circ}]$ 电子顺磁 共振信号微分信号的峰峰值随探头方向与磁场方向 间的夹角 φ 的变化,并计算相应的误差棒,如图 8 中 红色线条所示,可以看出误差棒均在较小水平,且与 探头方向和磁场方向间夹角 φ 无明显相关性。同时 还可得 $\varphi \in [0^{\circ}, 90^{\circ}]$ 内电子顺磁共振信号的微分信号 幅值在 $\varphi = 0^{\circ}$ 时最大,信号幅值随夹角 φ 增大而减 小,在接近 70°时,信号幅值已趋于 0, $\varphi \in [90^{\circ}, 180^{\circ}]$ 与之对称;令 $\varphi = 0^{\circ}$ 时的峰峰值为 A_{\circ} ,依角度变化计 算对应的理论值,如图 8 中蓝色虚线所示,可得 2 条 曲线呈现高度吻合,印证了前述理论推导的合理性。

上述实验结果表明,在探头方向与待测磁场方 向间的夹角 $\varphi \in [0^{\circ}, 90^{\circ}], \exists \varphi \in [70^{\circ}, 90^{\circ}]$ 时,电子 顺磁共振信号的微分信号幅度非常微弱,无法得到





正确的磁场测量值,该夹角区域为测量死区, $\varphi \in$ [90°,180°]同理。因此,该原子磁强计测量死区的精确夹角区域为 $\varphi \in$ [70°,110°],正常工作夹角区域为 $\varphi \in$ [0°,70°]U[110°,180°],其中 $\varphi \in$ [0°,40°]U[140°,180°]内电子顺磁共振信号的微分信号幅度衰减较小,将其定义为理想工作夹角区域,后续将依照该指标进行实验。

3.2 实验验证

设置原子磁强计放置平台的初始位置可变,即 γ 可变,参照湖北省武汉市的磁倾角 47.29°,取 $\gamma = 0^\circ$, 13°,23°,33°,43°,53°,63°,73°,83°,90°,同样设置平台 姿态的变化范围为水平旋转角 α∈ [0°,180°],上下俯 死区,以 *φ*∈[0°,40°] U[140°,180°] 判断在理想工作 夹角区域,代入1.2节的模型计算。图9所示为不同 γ 下单一原子磁强计探头方向与地磁方向间的夹角 φ 随平台姿态变化的情况,横坐标为平台初始放置角 γ, 蓝色线段表示测量死区夹角区域占总夹角变化组 成区域的占比,红色线段表示理想工作夹角区域的占 比。可得平台放置角 γ=23°时,测量死区夹角区域占 比最小,但其理想工作夹角区域占比不及 γ=33°和 γ $=43^{\circ}$;而当平台初始放置角 $\gamma = 43^{\circ}$ 时,虽不及 $\gamma = 13^{\circ}$ 和 γ=23°时可正常工作夹角区域大,仍存在 3.19% 的测量死区,但理想工作夹角区域最大,对应实际应 用时可正常工作的角度区域最大。因此,当设置平台 初始放置角γ等于当前测量所处的地理位置处磁倾 角的余角,即 $\gamma = \theta$ 时,能够达到最优效果。

经上述讨论,设置平台初始放置角 $\gamma = 43^{\circ}$,使单



Fig. 9 Operating conditions of a single atomic magnetometer when placed on platforms at different angles

一原子磁强计理论上处于最佳工作状态。图 10 所示 为 $\gamma = 43$ °时单一原子磁强计探头与地磁方向间夹角 φ 随平台姿态角变化的示意图,添加等值线便于观 察,分别对应测量死区的 $\varphi = 70^\circ$,110°和理想工作的 $\varphi = 40^\circ$,140°,将其命名为1号原子磁强计。



为得到最优组合方案,添加 2 号原子磁强计,取 2 台原子磁强计初始放置位置间的夹角 $\sigma \in [0^\circ,$ 180°],以每 20°变化,以前述相同的夹角区域作为判 断条件,得到如表 1 所示的结果。表 1 中,*E* 表示 2 号原子磁强计独立测量时测量死区夹角区域的占 比,*F* 表示 2 号原子磁强计独立测量时理想工作夹 角区域的占比,*M* 表示 2 台原子磁强计组合后理想 工作夹角区域的占比,*N* 表示组合后测量死区的夹 角区域占比。 表 1 双原子磁强计不同组合方案的效果

Tab. 1 The effect of different combination schemes of two atomic magnetometers										
参数	量值									
$\sigma/(^{\circ})$	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
E/%	5.71	11.65	17.86	23.57	26.36	29.13	34.86	41.08	47.00	49.52
$F/\frac{0}{0}$	59.04	54.23	45.58	35.10	29.58	24.05	13.56	4.88	0.002	0
$M/rac{9}{10}$	68.78	75.71	77.46	76.87	74.28	72.32	68.57	62.85	59.06	59.06
$N/\frac{9}{10}$	1.59	1.59	0.81	0.23	0.18	0.20	0.42	0.93	2.38	3.19

由表 1 初步判断 $\sigma = 60^{\circ}$ 时,组合后理想工作夹 角区域占比最大,次之为 $\sigma = 80^{\circ}$,同时 $\sigma = 90^{\circ}$ 时组 合后测量死区夹角区域占比最小。为便于观察,画 出 $\sigma = 60^{\circ}$,80°,90°时组合效果示意图,分别如图 11 (a)(b)(c)所示,可得 $\sigma = 60^{\circ}$ 时 1 号原子磁强计左上 死区部分未被 2 号原子磁强计理想工作夹角区域覆 盖,且组合后测量死区占比相较 $\sigma = 80^{\circ}$,90°时大,故 舍弃该方案; $\sigma = 80^{\circ}$ 时虽组合后测量死区占比相较 $\sigma = 90^{\circ}$ 时多 0.05%,但组合后 1 号原子磁强计左上 死区部分被 2 号原子磁强计理想工作夹角区域全覆 盖,能够在实际应用中达到最优补偿效果,综合考 虑后选取 $\sigma = 80^{\circ}$ 作为组合方案。







上述组合方案仍有可能在极少数情况下进入 测量死区,若要完全避免测量死区,忽略理想工作 夹角区域的考虑因素,可设置1号原子磁强计初始 放置角 $\gamma_1 = 13^\circ$,2 号原子磁强计初始放置角 $\gamma_2 =$ 43°,两者初始位置间的夹角 $\sigma = 20^\circ$,得到如图 12 所 示组合效果示意图。测量死区的夹角区域被可正 常工作区域全覆盖,通过该种组合方案能够在平台 姿态角旋转变化为 $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$,俯仰变化为 $\beta \in$



图 12 完全避免测量死区组合效果示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the effect of a combination that completely avoids measuring dead zones

[-40°,40°]的条件下完全避免出现测量死区。

本文实验场所选择在中船第七一零研究所弱 磁计量站,该场地空旷,远离道路、电线及建筑等可 能会使磁场产生剧烈波动的干扰源,可认为在测试 过程中,原子磁强计所处位置的磁场是恒定的。依 照拟定的2种组合方案,分别开展实验验证,装置实 物图如图13所示。设置2台原子磁强计放置平台 的初始放置角,即三角架的顶角为43°,并设置其二 初始位置间的夹角为80°。参照图2(b)的数学模 型,调整长板使1号原子磁强计初始位置与地磁方 向在水平面呈垂直状态,以此为平台开始姿态变化 的坐标起点。通过角度圆盘记录长板水平旋转角 的变化,通过倾角仪记录长板上下俯仰角的变化。

从上下俯仰角 β =0°开始,设置水平旋转角 α = 0°,30°,60°,90°,120°,150°,180°,然后改变上下俯仰角 β ,分别设置为-40°,-20°,0,20°,40°,对应各上下俯 仰角,同理设置水平旋转角 α =0°,30°,60°,90°,120°, 150°,180°,记录共计35组数据,每组数据代表平台的



图 13 实验装置实物图 Fig. 13 Physical picture of experimental device

一种姿态。在上位机分别记录各平台姿态下2台原 子磁强计磁场测量值的输出值,各平台姿态记录 2000个数据,共35组各70000个数据点,绘制出如 图14所示的双原子磁强计组合磁场测量值示意图。

各数据点区间对应不同的平台姿态,为便于观察,给出如表2所示的具体数据点区间和平台姿态 之间的对应情况。



图 14 双原子磁强计组合磁场测量值示意图

Fig. 14 Schematic diagram of magnetic field measurements from a combination of dual atomic magnetometers

表 2 数据点区间与平台姿态的对应情况

β/(°) -	数据点区间								
	$\alpha = 0^{\circ}$	$\alpha = 30^{\circ}$	$\alpha = 60^{\circ}$	$\alpha = 90^{\circ}$	$\alpha = 120^{\circ}$	$\alpha = 150^{\circ}$	$\alpha = 180^{\circ}$		
-40	$[0,2\times10^3]$	$(2 \times 10^3, 4 \times 10^3]$	$(4 \times 10^3, 6 \times 10^3]$	$(6 \times 10^3, 8 \times 10^3]$	$(8 \times 10^3, 10 \times 10^3]$	$(10 \times 10^3, 12 \times 10^3]$	$(12 \times 10^3, 14 \times 10^3]$		
-20	$(14 \times 10^3, 16 \times 10^3]$	$(16 \times 10^3, 18 \times 10^3]$	$(18 \times 10^3, 20 \times 10^3]$	$(20 \times 10^3, 22 \times 10^3]$	$(22 \times 10^3, 24 \times 10^3]$	$(24 \times 10^3, 26 \times 10^3]$	$(26 \times 10^3, 28 \times 10^3]$		
0	$(28 \times 10^3, 30 \times 10^3]$	$(30 \times 10^3, 32 \times 10^3]$	$(32 \times 10^3, 34 \times 10^3]$	$(34 \times 10^3, 36 \times 10^3]$	$(36 \times 10^3, 38 \times 10^3]$	$(38 \times 10^3, 40 \times 10^3]$	$(40 \times 10^3, 42 \times 10^3]$		
20	$(42 \times 10^3, 44 \times 10^3]$	$(44 \times 10^3, 46 \times 10^3]$	$(46 \times 10^3, 48 \times 10^3]$	$(48 \times 10^3, 50 \times 10^3]$	$(50 \times 10^3, 52 \times 10^3]$	$(52 \times 10^3, 54 \times 10^3]$	$(54 \times 10^3, 56 \times 10^3]$		
40	$(56 \times 10^3, 58 \times 10^3]$	$(58 \times 10^3, 60 \times 10^3]$	$(60 \times 10^3, 62 \times 10^3]$	$(62 \times 10^3, 64 \times 10^3]$	$(64 \times 10^3, 66 \times 10^3]$	$(66 \times 10^3, 68 \times 10^3]$	$(68 \times 10^3, 70 \times 10^3]$		

观察表 2 及图 14 可得,2 台原子磁强计在不同 平台姿态时的工作情况各异,如当数据点区间在 $[2\ 000,4\ 000]$ 内,对应旋转角 $\alpha = 30^{\circ}$ 、俯仰角 $\beta =$ -40°的平台姿态时,2台原子磁强计均处于正常工 作状态,分别输出的磁场测量值见图 12 的局部放大 图;如当数据点区间在[2 600,2 800]内,对应旋转 fallaa = 180°、俯仰角 $\beta = -20°$ 的平台姿态时,1 号原 子磁强计处于正常工作状态,输出正确磁场测量 值;2号原子磁强计输出结果呈现锯齿状,无法输出 正确磁场测量值,因为此时该原子磁强计已进入测 量死区,无法将射频频率锁定于拉莫尔进动频率 处,即出现失锁,在尝试重新扫描。当平台在该种 姿态下,双原子磁强计的组合使得至少有1台原子 磁强计能够正常工作,有效避免了测量死区,其他 区间也同理。同时1号原子磁强计实际测量的测量 死区夹角区域与前述仿真实验的图 11 完全吻合,这 也很好地印证了前述方案拟定的合理性及准确性。

由图 11(b)仿真组合效果显示,仍存在极少数测量 死区,在实验中也观察到了对应情况,如图 14 所示 数据点区间[5 400,5 600]内,对应旋转角 α =180°、 俯仰角 β =20°的平台姿态时,2 台原子磁强计都进 入测量死区,无法得到正确的磁场测量值。

为进一步验证组合方法的可行性,改变组合方 案为对应图 12 的可完全避免死区方案,设置1号原 子磁强计三角架顶角为 13°,2 号原子磁强计三角架 顶角为 43°,其二初始位置间的夹角为 20°。与上述 实验过程相同,改变平台姿态角,分别记录各平台 姿态下 2 台原子磁强计磁场测量值的输出值,绘制 出如图 15 所示完全避免测量死区磁场测量值示意 图。观察可得,在任意平台姿态下,都至少有1台原 子磁强计处于正常工作状态,输出正确磁场测量 值,该实验结果与图 12 相符,表明该组合方案能够 在实际测量过程中完全避免测量死区。





3.3 讨论

根据测量死区的产生机理推导了电子顺磁共 振信号和原子磁强计探头方向与待测磁场方向间 的夹角的数学关系,通过实验测量电子顺磁共振信 号随夹角的变化情况,得到的实验结果与理论值相 吻合,同时获得了测量死区的精确夹角区域。

经实验验证,双原子磁强计组合避免测量死区的 方法具有可行性。通过提出的数学模型开展仿真研 究,在平台姿态角旋转变化为 $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$,俯仰变 化为 $\beta \in [-40^\circ, 40^\circ]$ 的条件下,根据 2 个不同的判断 标准,一是测量死区夹角区域最小,二是理想工作夹 角区域最大,进行具体组合方案的拟定,在实际测量 过程中能够得到与仿真相符的实验结果。 此外,提出的数学模型及组合方法具有通用 性,可根据实际应用需求及测量环境的不同,灵活 设置平台姿态的其他变化范围及仿真参数,获得对 应的最优组合方案。

同时,进一步分析了双原子磁强计探头切换时 可能会引起的磁测量差异,主要由3方面构成:探头 之间的不一致性、搭载平台磁场梯度及待测磁场梯 度。我们研制的原子磁强计探头采用无磁处理,不 同探头之间的测量不一致性小于0.2 nT,因此带来 的影响较小。搭载平台磁场梯度带来的影响,可以 根据探头的实际安装位置进行算法补偿。而待测 磁场梯度,即实际地磁场测试环境下带来的影响则 无法避免。在实际使用中,当一个探头进入死区, 切换至另一个探头所需时间在微秒量级,远高于探 测带宽,属于高频成分时,可以用信号处理方法 消除。

4 结论

针对所研制的 Mz 原子磁强计,在探头方向与 待测磁场方向间的夹角为[70°,110°]或者[250°, 290°同时,无法测量磁场,即存在测量死区的问题。 因此,提出了一种双原子磁强计组合避免死区的通 用计算方法。该方法以 Mz 原子磁强计测量死区为 计算前提,通过使用实际不同地理位置的地磁场方 向,并设置 Mz 原子磁强计搭载平台姿态角的变化 范围,准确获得了双原子磁强计组合后的磁场测量 范围。通过实验验证,搭载平台姿态角旋转变化为 $\alpha \in [0^{\circ}, 180^{\circ}]$ 、俯仰变化为 $\beta \in [-40^{\circ}, 40^{\circ}]$ 的条件 下,利用该方法可以实现双原子磁强计组合有效避 免测量死区,这将促进研制的 Mz 原子磁强计在实 际地磁环境下移动平台上的搭载应用。未来,将进 一步开展 Mz 原子磁强计测量死区物理机理和实验 研究,为实现无测量死区的单 Mz 原子磁强计奠定 基础。

参考文献

- [1] KORTH H, STROHBEHN K, TEJADA F, et al. Miniature atomic scalar magnetometer for space based on the rubidium isotope ⁸⁷ Rb[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2016, 121(8): 7870-7880.
- [2] NABIGHIAN M N, GRAUCH V J S, HANSEN R O, et al. The historical development of the magnetic method in exploration[J]. Geophysics, 2005, 70(6): 33-61.
- [3] OLSEN N, MANDEA M. Rapidly changing flows in the Earth's core [J]. Nature Geosciences, 2008, 1 (6): 390-394.
- [4] 蔡兆云,魏海平,任治新.水下地磁导航技术研究综述[J].国防科技,2007(3):28-29.
 CAI Zhaoyun, WEI Haiping, REN Zhixin. Review of research on underwater geomagnetic navigation technology[J]. National Defense Technology, 2007(3): 28-29(in Chinese).
- [5] 张朝阳,刘济民,杨林.磁探潜关键技术现状及发展 趋势[J].科学技术与工程,2022,22(1):18-27.
 ZHANG Zhaoyang, LIU Jimin, YANG Lin. Situation and development trend of the key technology of magnetic

submarine exploration[J]. Science, Technology and Engineering, 2022, 22(1): 18-27(in Chinese).

 [6] 张春灌,王菲菲,白玉彬,等.磁测找油方法及其在 陕北油气勘探中的应用[J].地球物理学进展,2012, 27(4):1655-1664.

> ZHANG Chunguan, WANG Feifei, BAI Yubin, et al. Studies of magnetic method for hydrocarbon reservoir and its application in northern Shaanxi, China [J]. Progress in Geophys, 2012, 27(4): 1655-1664 (in Chinese).

[7] 柳建新,郭振威,童孝忠,等.地面高精度磁法在新 疆哈密地区磁铁矿勘查中的应用[J].地质与勘探, 2011,47(3):432-438.

LIU Jianxin, GUO Zhenwei, TONG Xiaozhong, et al. Application of the ground high-precision magnetic method to magnetite survey in the Hami area, Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(3): 432-438(in Chinese).

- [8] WYLLIE R, KAUER M, WAKAI R T, et al. Optical magnetometer array for fetal magnetocardiography[J]. Optics Letters, 2012, 37(12): 2247-2249.
- [9] BROOKES M J, LEGGETT J, REA M, et al. Magnetoencephalography with optically pumped magnetometers (OPM-MEG): the next generation of functional neuroimaging [J]. Trends in Neurosciences, 2022, 45(8): 621-634.
- [10] QTFM Gen-2-QuSpin[EB/OL]. [2024-04-22]. https://quspin.com/qtfm-gen-2/.
- [11] Magnetometers[EB/OL]. [2024-04-22]. https://
 www.geometrics.com/magnetometers/.
- [12] Twinleaf-VMR[EB/OL]. [2024-04-22]. https:// twinleaf.com/vector/VMR/.
- [13] 吴文福,袁皓.氦光泵磁力仪的应用与发展研究综述[J].声学与电子工程,2016(4):1-5+9.
 WU Wenfu, YUAN Hao. A review of research on the application and development of helium pump magnetometers [J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2016(4):1-5+9(in Chinese).
- [14] 彭翔,郭弘.光泵原子磁力仪技术[J].导航与控制, 2022,21(Z2):101-121+198.
 PENG Xiang, GUO Hong. Techniques in opticallypumped atomic magnetometer [J]. Navigation and Control, 2022, 21(Z2):101-121+198(in Chinese).
- [15] 卢远添,刘雷松,朱万华,等.一种宽工作温度范围 的高灵敏度铯原子磁传感器[J].仪器仪表学报, 2023,44(9):121-128.

LU Yuantian, LIU Leisong, ZHU Wanhua, et al. A high sensitivity cesium atom magnetometer with a wide

operating temperature range [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2023, 44(9): 121-128(in Chinese).

- [16] BUDKER D, KIMBALL D F J. Optical magnetometry [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 60-70+395.
- [17] BEN-KISH A, ROMALIS M V. Dead-zone-free atomic magnetometry with simultaneous excitation of orientation and alignment resonances [J]. Physical Review Letters, 2010, 105(19): 193601.
- [18] WANG H, WU T, XIAO W, et al. Dual-mode deadzone-free double-resonance alignment-based magnetometer[J]. Physical Review Applied, 2021, 15(2): 024033.
- [19] SCHULTZE V, SCHOLTES T, OELSNER G, et al. An optically pumped magnetometer with omnidirectional magnetic field sensitivity[J]. Sensors, 2023, 23(15): 6866.
- [20] GONG W, WANG H, WU T, et al. Dead-zone free multi-beam atomic sensor for ⁴He magnetometer [C]// Proceedings of 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS). New Orleans: IEEE, 2016: 1-4.
- [21] 孟令顺,杜晓娟.勘探重力学与地磁学[M].北京: 地质出版社,2008:86-89.
 MENG Lingshun, DU Xiaojuan. Exploration gravity and geomagnetism[M]. Beijing: Geology Press, 2008:86-89(in Chinese).

(编辑:黄利华)