

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2025.02.008

基于矢量磁传感器模型的扩充 T-L 航磁补偿方法

王劲楠, 张晓明, 刘俊, 张鸽, 赵晨阳

(中北大学仪器与电子学院, 太原 030051)

摘要:传统的 Tolles-Lawson(T-L)磁补偿模型基于磁通门能够进行精确测量的假设。然而,该模型忽略了三轴磁通门的测量误差和非线性干扰,导致 T-L 补偿模型存在原理性误差。针对上述问题,在传统的 T-L 磁补偿模型的基础上,引入因磁滞效应引起的磁通门输出信号和灵敏度的非线性变化因素。通过量化磁滞效应及灵敏度变化引起的非线性,进一步完善了磁补偿模型。仿真实验结果表明,基于矢量磁传感器模型的扩充 T-L 航磁补偿方法相较于传统 T-L 模型,精度提升了 58%;在无人机机载实验中,精度提升了 49%。这一结果验证了扩充 T-L 磁补偿方法在抑制磁通门非线性干扰方面的有效性,将有助于提高航磁补偿性能,从而实现地磁场信息的准确获取。

关键词:航磁补偿;扩充 T-L 航磁补偿方法;非线性;磁滞;灵敏度

中图分类号:V249.3

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2025)02-0078-08

An extended T-L aeromagnetic compensation method based on vector magnetic sensor model

WANG Jinnan, ZHANG Xiaoming, LIU Jun, ZHANG Ge, ZHAO Chenyang

(School of Instrumentation and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The conventional Tolles-Lawson (T-L) magnetic compensation model is based on the assumption that fluxgates are capable of making accurate measurements. However, the model ignores the measurement errors and nonlinear disturbances of the three-axis fluxgate, which leads to a principle error in the T-L compensation model. To solve the above problems, the nonlinear variation factors of the fluxgate output signal and the sensitivity due to hysteresis effect are introduced based on the conventional T-L magnetic compensation model. The magnetic compensation model is further improved by quantifying the nonlinearity caused by the hysteresis effect and sensitivity change. The results of the simulation experiments show that the accuracy of the extended T-L aeromagnetic compensation method based on the vector magnetic sensor model is improved by 58% compared with the conventional T-L model, and the accuracy is improved by 49% in the unmanned aircraft flight experiments. This result verifies the effectiveness of the extended T-L magnetic compensation method in suppressing the fluxgate nonlinear interference, which will help to improve the aeromagnetic compensation performance and thus realize the accurate acquisition of geomagnetic field information.

Key words: Aeromagnetic compensation; Expansion of T-L aeromagnetic compensation method; Nonlinear; Hysteresis; Sensitivity

收稿日期:2024-10-19;修订日期:2024-12-28

基金项目:国家自然科学基金(61873247);航空科学基金(202000010U0004)

作者简介:王劲楠(1997—),女,硕士研究生,主要从事地磁导航中磁干扰补偿方面的研究。

通信作者:张晓明(1976—),男,教授,主要从事先进导航技术、弱磁场传感与应用方面的研究。

0 引言

地磁场作为地球本身固有的物理矢量场,被广泛应用于导航定位、磁探测等领域。相较于其他导航方式,地磁导航具有不受气候环境影响、自主导航能力强以及无累积误差等优点,已成为导航领域的重要研究方向^[1-3]。航空磁探因其识别能力强、可以连续搜索及隐蔽性好等优点,在矿产资源勘探、基础地质研究、军事与国防建设等领域中发挥重要作用^[4-5]。实现地磁信息应用于实际的前提是获取准确有效的地磁场。然而,在实际应用中,通过标量磁传感器采集的地磁场信息包含各种磁干扰。这些干扰主要包括载体运动造成的机动干扰、载体本身磁性材料被磁化产生的磁场、所携带的电器设备产生的电磁干扰^[6-7]及环境磁干扰^[8-9],消除磁干扰是获取准确的地磁场信息的关键步骤。

目前,消除磁干扰主要采用的是 Tolles-Lawson (T-L)磁补偿模型。对于求解模型参数,一些学者采用了遗传算法、截断奇异值分解等线性回归方法。此外,为了进一步提升补偿效果,研究者在传统线性回归方法的基础上,提出了多种创新方法,包括对异常数据的抑制技术^[10]、正则化参数的优化方法^[11]及针对特定应用场景设计的航行轨迹方案^[12],从而提高磁补偿技术的鲁棒性。针对传统磁补偿模型在解决非线性问题时的局限性,学者开始利用神经网络的非线性映射提升补偿性能。通过一维卷积神经网络对 T-L 模型补偿后的数据进行二次补偿,以消除尾臂摆动造成的磁干扰,从而有效减小非线性干扰的影响^[13]。针对神经网络求解过程中存在梯度消失的问题,通过残差连接神经网络,实现了梯度的跨层传播,提高了网络的拟合能力^[14]。

尽管上述研究提高了磁补偿模型的补偿能力,但是标量补偿需要地磁矢量信息,对于采集磁场数据的地磁磁通门精度本身引入的误差及其对补偿效果的影响,目前没有进行深入研究。已有学者在研究航磁补偿时,考虑了三轴磁通门的三轴不正交性和零偏对补偿精度的影响^[15-16]。为了进一步提高补偿精度,增加了非线性因子对磁场数据的影响^[17-18],但是考虑仍不全面。由于磁通门存在磁滞现象,磁导率作为磁场的函数在磁场饱和和区域附近表现出显著的非线性,导致磁通门的输出和灵敏度也表现出非线性^[19]。

本文在传统 T-L 磁补偿模型研究方法的基础上,全面考虑了三轴磁通门存在的磁滞和灵敏度的非线性问题。通过重新构建磁补偿模型,补偿由于磁传感器误差模型导致的间接干扰,从而进一步提升了磁补偿模型的补偿精度。

1 传统 T-L 磁补偿模型

传统 T-L 航磁补偿模型采用磁通门测量数据作为模型输入,通过模型计算校准标量磁传感器。航磁测量中,磁通门测量的磁场数据 \mathbf{B}_T 可表示为

$$\mathbf{B}_T = \mathbf{B}_E + \mathbf{B}_N \quad (1)$$

其中: \mathbf{B}_E 表示地磁场; \mathbf{B}_N 表示由载体机动过程产生的磁干扰。T-L 磁补偿模型根据产生磁干扰的原理将载体干扰分为 3 类,其中包括固定磁场 \mathbf{B}_{per} 、感应磁场 \mathbf{B}_{inc} 和涡流磁场 \mathbf{B}_{eddy} 。

固定磁场是载体硬磁材料被磁化后产生的干扰磁场,形成的磁场矢量相对于磁通门的大小和方向均固定不变。

$$\mathbf{B}_{per} = \mathbf{p} = [p_1 \quad p_2 \quad p_3]^T \quad (2)$$

式中, \mathbf{p} 表示恒定磁场矩阵。

感应磁场是由于软铁材料被地球磁场磁化而产生的磁场,它在各个轴上的分量与地磁场在各轴上的投影成正比,如式(3)所示。

$$\mathbf{B}_{inc} = \mathbf{A}\mathbf{B}_T = |\mathbf{B}_T| \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \hat{\mathbf{B}}_T \quad (3)$$

其中: a_{ij} 表示感应磁场系数; $\hat{\mathbf{B}}_T$ 是 \mathbf{B}_T 的方向余弦。

涡流磁场是由于飞机平台姿态变化导致磁通量的变化而产生的,在飞机平台的金属性材料中形成涡流效应。它在各个轴上的分量与地磁场在各轴上的磁场变化率成正比,如式(4)所示。

$$\mathbf{B}_{eddy} = \mathbf{C}\dot{\mathbf{B}}_T = |\dot{\mathbf{B}}_T| \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \hat{\dot{\mathbf{B}}}_T \quad (4)$$

其中, c_{ij} 表示感应磁场系数。

故地磁场强度可表示为

$$\begin{aligned} |\mathbf{B}_E| &= |\mathbf{B}_T| - \mathbf{B}_N \hat{\mathbf{B}}_T \\ &= |\mathbf{B}_T| - (\mathbf{p} + \mathbf{A}\mathbf{B}_T + \mathbf{C}\dot{\mathbf{B}}_T) \cdot \hat{\mathbf{B}}_T \end{aligned} \quad (5)$$

由于制造工艺和安装等因素,三轴磁通门磁传感器测得的数据会引入误差,包括零位偏移、比例因子不一致、轴间耦合及安装误差等问题,会导致测量过程中出现空间转向误差。因此,研究人员通常会磁传感器进行标定测试,以获取磁传感器的

不正交角、灵敏度和零偏置量,从而保证测量数据的有效性。然而,磁滞现象会导致磁通门的输出和灵敏度发生非线性变化,进而影响补偿精度。在磁性材料被磁化的过程中,其磁化强度与外加磁场的关系具有滞后特性。式(6)为磁滞模型。

$$\mathbf{M}(\mathbf{H}) = 2 \frac{\mathbf{M}_s}{\pi} \arctan\left(\frac{\mathbf{H} \pm \mathbf{H}_c}{\mathbf{H}_M}\right) \quad (6)$$

其中: $\mathbf{M}(\mathbf{H})$ 为磁通密度,作为外部磁场的函数; \mathbf{M}_s 为饱和磁通密度; \mathbf{H} 是外部磁场; \mathbf{H}_c 是矫顽场; \mathbf{H}_M 是阈值场。

磁滞现象导致的非线性变化意味着磁通门磁力仪的输出信号和灵敏度不能简单地用线性关系来描述,需要考虑磁滞回线的复杂非线性特性。磁滞方度是剩余磁通密度与饱和磁通密度的比值,用于衡量磁滞非线性的指标。磁滞方度较高意味着磁滞回线更接近正方形,导致磁导率在外部磁场变化时的变化更加显著,从而影响磁力仪的输出和灵敏度。

2 扩充 T-L 航磁补偿方法

根据磁通门磁滞导致非线性的原理,建立磁通门影响因子与磁场的非线性表达式,并将该式引入传统 T-L 磁补偿模型,对补偿模型进行重新推导。在推导过程中,考虑误差源的数学模型,建立更加准确的扩充 T-L 航磁补偿方法。将磁滞和灵敏度带来的非线性因素以 \mathbf{k}_{flu} 表示。将 \mathbf{k}_{flu} 对测量数据 \mathbf{B}_T 的非线性变化表示为线性化模型,如式(7)所示。

$$\mathbf{k}_{\text{flu}}(\mathbf{B}_T) = \mathbf{k}_{\text{flu}}^{(0)} + \mathbf{k}_{\text{flu}}^{(1)} \mathbf{B}_T + \frac{1}{2} \mathbf{B}_T^T \mathbf{k}_{\text{flu}}^{(2)} \mathbf{B}_T + \dots \quad (7)$$

$$\mathbf{B}_{\text{flu}} = \mathbf{k}_{\text{flu}} [\mathbf{B}_T + \mathbf{k}_0 + \mathbf{k}_n] = \mathbf{k}_{\text{flu}} [\mathbf{B}_T + \mathbf{k}_1] \quad (8)$$

三轴磁通门各轴存在零偏 \mathbf{k}_0 和量测噪声 \mathbf{k}_n , 建立该传感器的测量数据模型即式(8)。 \mathbf{k}_{flu} 的零阶和一阶项足以清晰描述该函数的变化情况。同时,为了减少计算复杂度,建立相对简洁的模型,本文在后续推导过程中考虑 \mathbf{k}_{flu} 的零阶和一阶项,如式(9)所示。

$$\hat{\mathbf{B}}'_T \approx \frac{\mathbf{B}_{\text{flu}}}{B_{\text{opm}}} \quad (9)$$

其中, \mathbf{B}_{flu} 只考虑磁通门误差模型中零阶时的磁场值。由于 T-L 磁补偿模型准确解算地磁场值的前提是机动干扰远小于地磁场值,且标量磁传感器的精度要高于磁通门的精度。因此,这里使用标量磁传感器测量数据 B_{opm} 代替地磁场值,以减少误差。同时,为了便于后续公式推导,定义如式(10)所示。

$$h_i = \frac{\mathbf{B}_T}{|\mathbf{B}_T|} \quad (10)$$

根据式(5)机动干扰的表达式,将磁通门误差纳入 T-L 磁补偿模型。结合式(8)描述的传感器非线性误差,推导出一个扩充的 T-L 模型,过程如式(11)~式(13)所示。

$$\hat{\mathbf{B}}'_T \cdot \mathbf{p} = \frac{\mathbf{B}_{\text{flu}}}{B_{\text{opm}}} \cdot \mathbf{p} = \frac{|\mathbf{B}_T|}{B_{\text{opm}}} \sum_{i=1}^3 c_i h_i \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{B}}'_T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}_{\text{flu}} &= \frac{\mathbf{B}_{\text{flu}}}{B_{\text{opm}}} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{k}_{\text{flu}} [\mathbf{B}_{\text{flu}} + \mathbf{k}_1] \\ &= \frac{\mathbf{B}_{\text{flu}}}{B_{\text{opm}}} \cdot \mathbf{A} \cdot [\mathbf{k}_{\text{flu}}^{(0)} \mathbf{B}_{\text{flu}} + \mathbf{k}_{\text{flu}}^{(1)}] [\mathbf{B}_{\text{flu}} + \mathbf{k}_1] \\ &= \frac{|\mathbf{B}_T|}{B_{\text{opm}}} \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} h_i h_j + \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i}^3 \sum_{k=j}^3 b_{ijk} h_i h_j h_k + \sum_{i=1}^3 b_i h_i \right] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{B}}'_T \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{B}}_{\text{flu}} &= \frac{\mathbf{B}_{\text{flu}}}{B_{\text{opm}}} \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{k}}_{\text{flu}} [\dot{\mathbf{B}}_{\text{flu}} + \dot{\mathbf{k}}_1] \\ &= \frac{\mathbf{B}_{\text{flu}}}{B_{\text{opm}}} \cdot \mathbf{C} [\mathbf{k}_{\text{flu}}^{(0)} \dot{\mathbf{B}}_{\text{flu}} + 2\mathbf{k}_{\text{flu}}^{(1)} \mathbf{B}_{\text{flu}} \dot{\mathbf{B}}_{\text{flu}} + \\ &\quad \mathbf{k}_{\text{flu}}^{(1)} \dot{\mathbf{B}}_{\text{flu}}] \\ &= \frac{|\mathbf{B}_T|}{B_{\text{opm}}} \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{ij} h_i \dot{h}_j + \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i}^3 \sum_{k=j}^3 c_{ijk} h_i h_j \dot{h}_k \right] \end{aligned} \quad (13)$$

将式(11)、式(12)和式(13)进行重新简化组合,合并同类项得到磁干扰表达式(14)。

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_N \hat{\mathbf{B}}'_T &= \frac{|\mathbf{B}_T|}{B_{\text{opm}}} \left[\sum_{i=1}^3 c_i h_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} h_i h_j + \right. \\ &\quad \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_{ij} h_i \dot{h}_j + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i}^3 \sum_{k=j}^3 b_{ijk} h_i h_j h_k + \\ &\quad \left. \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i}^3 \sum_{k=j}^3 c_{ijk} h_i h_j \dot{h}_k \right] \end{aligned} \quad (14)$$

根据式(14)可知,在磁通门的测量磁场中引入非线性,并在 T-L 模型的基础上进行推导,得到了较为完善的磁补偿模型,量化了非线性误差。

3 实验验证

本章对磁通门的影响因素进行分析,以表征其对 T-L 磁补偿的影响。通过模拟无人机机动磁场数据和实际测量的航磁数据两种方式,对扩充 T-L 航磁补偿方法和传统的 T-L 补偿模型的补偿精度进行了分析验证。根据补偿后的标准差和改善比判定补偿精度,实验结果表明,扩充 T-L 航磁补偿

方法相较于传统 T-L 模型的补偿精度更高。

3.1 磁通门误差对补偿结果的影响分析

在模拟无人机机动磁场数据的基础上,设置磁通门的误差参数,逐一分析由零偏、灵敏度、不正交角、安装误差角及噪声对补偿效果的影响。参数设置如表 1 所示。

由图 1 和表 2 可知,基于无磁通门误差数据,逐一增加误差均会对 T-L 磁补偿效果产生影响。增加磁传感器灵敏度和噪声对补偿效果的影响较大,其补偿后的标准差相较于无磁通门误差数据的补

表 1 磁通门参数设置

Tab. 1 Fluxgate parameter settings

项目	零偏/nT	灵敏度	不正交角/(°)	安装误差角/(°)	噪声标准差/nT
<i>x</i>	100	1.01	0.2	1	0.1
<i>y</i>	-110	1.00	0.15	2	0.1
<i>z</i>	90	0.99	0.16	-3	0.1

偿结果分别增加了 0.123 67 nT 和 0.096 35 nT。而增加安装误差对补偿效果的影响较小。

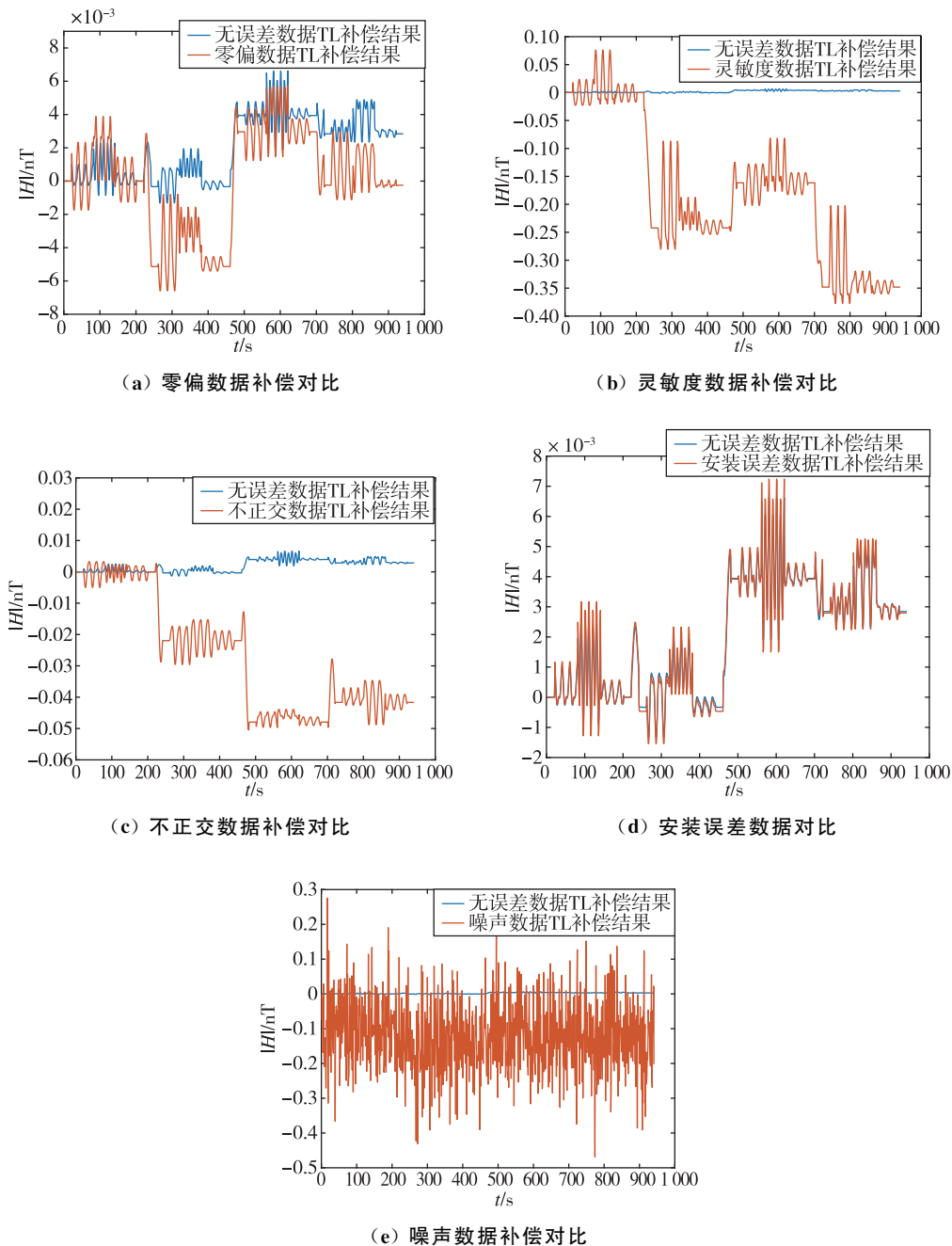


图 1 磁通门误差磁场数据补偿结果

Fig. 1 Fluxgate error magnetic field data compensation results

表 2 评价指标

Tab. 2 Evaluation indicators

项目	无误差数据	零偏	灵敏度	不正交角	安装误差	噪声
补偿前标准差/nT	35.192	78.299	81.387	48.947	35.192	35.193
补偿后标准差/nT	0.001 86	0.002 91	0.125 53	0.018 32	0.001 94	0.098 21

3.2 仿真数据验证

本次仿真实验是根据实际测量数据的分析结果,设置合适的机动干扰参数和磁通门参数,并利用开发的磁场数据仿真系统生成数据。其中,在东、南、西及北 4 个航向上分别做俯仰 $\pm 5^\circ$ 、横滚 $\pm 10^\circ$ 和偏航 $\pm 5^\circ$ 的正弦运动,并在理想的地磁场上增加固定磁场、感应磁场和涡流磁场。考虑实际测量过程中磁通门的测量精度,增加了如表 3 所示的磁传感器参数,生成包含磁测误差的磁干扰数据。

以矢量传感器的仿真数据为补偿对象进行补

偿算法的验证。通过 T-L 模型和扩充 T-L 航磁补偿方法对传感器仿真数据进行补偿,将补偿前后的地磁分量进行对比分析,结果如图 2 所示。

表 3 磁通门参数设置

Tab. 3 Fluxgate parameter settings

项目	零偏/nT	灵敏度	不正交角/($^\circ$)	噪声标准差/nT	安装误差角/($^\circ$)
x	1	1.01	100	0.1	30
y	-1	1.00	350	0.1	30
z	2	0.99	40	0.1	30

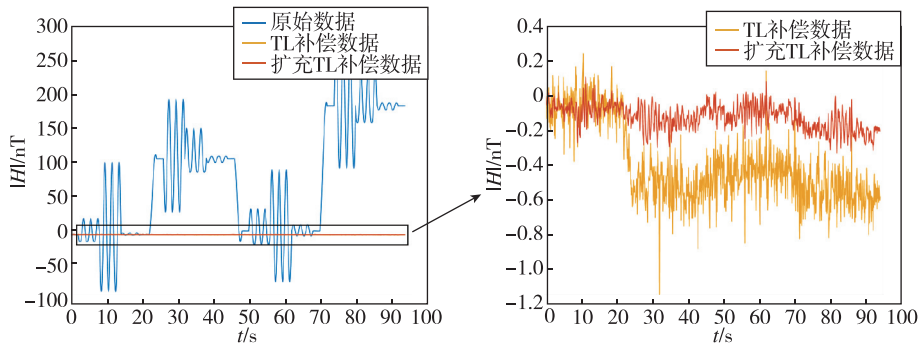


图 2 磁场数据补偿结果

Fig. 2 Magnetic field data compensation result

图 2 和表 4 的数据表明,考虑了磁通门误差模型的扩充 T-L 航磁补偿方法,其补偿后的磁场数据相较于 T-L 补偿模型,标准差由 0.22 nT 降低为 0.098 nT,补偿精度显著提高。

表 4 评价指标

Tab. 4 Evaluation indicators

项目	T-L 模型	扩充 T-L 航磁补偿方法
补偿前标准差/nT	83.52	83.52
补偿后标准差/nT	0.22	0.098
改善比	380	852

为了适应各种场景的使用需求,需要采用不同类型的磁传感器,其精度也各不相同。为了进一步验证该方法的有效性,本文通过设置磁通门的各项参数,如表 5 所示,以降低精度,从而生成测量误差较大的磁场数据,并利用这些数据对两种模型进行对

比分析。

表 5 磁通门参数设置

Tab. 5 Fluxgate parameter settings

项目	零偏/nT	灵敏度	不正交角/($^\circ$)	噪声标准差/nT	安装误差角/($^\circ$)
x	600	1.01	0.1	0.8	30
y	-590	1.00	0.15	0.8	30
z	600	0.99	0.08	0.8	30

补偿结果如图 3 和表 6 所示。当精度下降导致测量误差增大时,T-L 模型的补偿结果超过 1 nT,表明该模型在实际场景中进行补偿时,补偿能力不足。而扩充 T-L 航磁补偿方法在补偿后的标准差仍然小于 1 nT,表明其在处理低精度数据时依然能够保持较高的补偿效果。

3.3 实测数据验证

为了进一步验证在实际地磁导航应用中改进

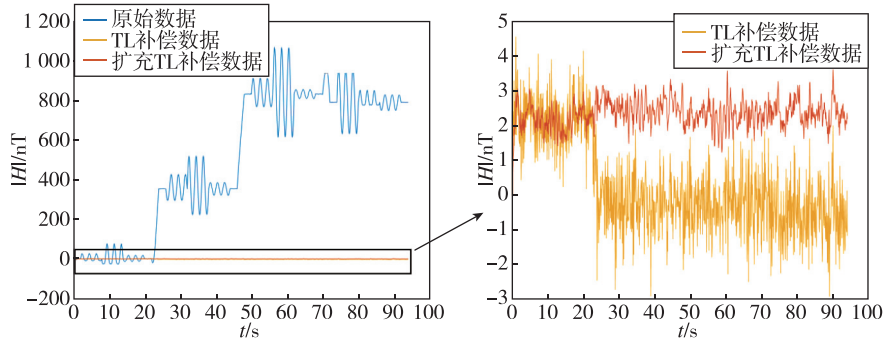


图 3 磁场数据补偿结果

Fig. 3 Magnetic field data compensation result

表 6 评价指标

Tab. 6 Evaluation indicators

项目	T-L 模型	扩充 T-L 航磁补偿方法
补偿前标准差/nT	345.52	345.52
补偿后标准差/nT	1.35	0.56
改善比	256	617

T-L 补偿模型的可行性,在野外进行了真实的飞行测试。为了减少外界环境的磁干扰,实验地点选择在靠近河流附近。选用图 4 所示的无人机装置,其携带一个磁通门和一个标量磁传感器。利用标量



图 4 无人机装置安装位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the installation location of the UAV device

磁传感器测得该区域的磁场总场值作为测量总磁场值,其中一端增加磁通门测量矢量磁场数据,磁通门的参数如表 7 所示。将无人机设定为匀速直线飞行,速度为 10 m/s,采样率为 10 Hz,飞行时间为 285 s,共采集到 2 850 组数据。由于实际环境中存在如风速等外在影响因素,实际航行速度会有所偏差。

表 7 磁通门参数

Tab. 7 Fluxgate parameter

性能指标	参数
零偏	在 25 °C 环境, ±300 nT
正交误差	< 0.5°
本底噪声	在 25 °C 1H 环境, 10 to ≤20 pTrms/√Hz
测量范围	±90 μT ±90 μT ±90 μT
标度	89 mV/μT 32 mV/μT 16 mV/μT

采用本文提出的增加磁传感器误差模型的扩充 T-L 航磁补偿方法,对原始测量数据进行了处理。如图 5 和表 8 所示,补偿结果说明本文提出的方法在实际应用中具有较好的补偿效果。原始数据的标准差为 8.41 nT,而采用本文提出的方法,其标准差可降低到 0.48 nT,相较于传统的 T-L 补偿模型,补偿精度更高。

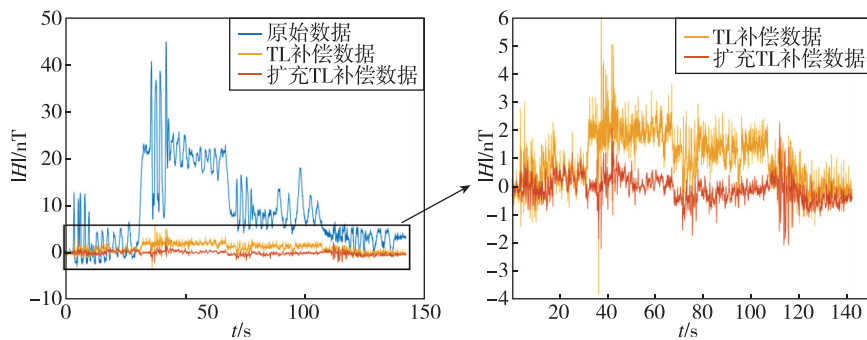


图 5 磁场数据补偿结果

Fig. 5 Magnetic field data compensation result

表8 评价指标

Tab. 8 Evaluation indicators

项目	T-L 模型	扩充 T-L 航磁补偿方法
补偿前标准差/nT	8.41	8.41
补偿后标准差/nT	0.94	0.48
改善比	8.95	17.52

4 结论

针对磁通门测量误差引起的间接磁干扰,本文提出了较为完善的航磁补偿方法。经实验验证,得出如下结论。

1)在传统 T-L 航磁补偿模型的基础上,引入磁通门测量非线性误差模型,扩展了模型补偿项,从而更适用于航磁补偿中对磁干扰的计算。

2)利用扩充 T-L 航磁补偿方法与传统磁补偿模型对同一组仿真数据进行处理,本文提出方法的补偿精度较传统方法提升了 58%,验证了本文方法的准确性和可行性。

3)在无人机机动实验中,扩充 T-L 航磁补偿方法相较于传统方法补偿精度仍提高了 49%,与仿真结果高度一致。这表明扩充 T-L 航磁补偿方法在抑制磁通门非线性干扰方面的有效性,提高了补偿效率和精度,从而实现地磁场信息的准确获取,为补偿磁干扰提供了一种切实可行的解决方案。

参考文献

- [1] 陆一,魏东岩,纪新春,等. 地磁定位方法综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 118-130.
LU Yi, WEI Dongyan, JI Xinchun, et al. Review of geomagnetic positioning method[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 118-130(in Chinese).
- [2] 陈棣湘,陈卓,张琦,等. 航空平台地磁矢量匹配导航算法研究进展[J]. 中国测试, 2024, 50(5): 1-10.
CHEN Dixiang, CHEN Zhuo, ZHANG Qi, et al. Research progress on geomagnetic vector matching navigation algorithms for aviation platforms [J]. China Measurement & Testing Technology, 2024, 50(5): 1-10(in Chinese).
- [3] 林沂,孙晶京,闫旭. 地磁导航定位技术原理与方法综述[J]. 全球定位系统, 2023, 48(6): 32-41.
LIN Yi, SUN Jingjing, YAN Xu. A review of the principles and methods of geomagnetic navigation and positioning technology[J]. GNSS World of China, 2023, 48(6): 32-41(in Chinese).
- [4] 陶荣华,王丹,迟毓. 国外航空磁探潜装备应用分析及发展趋势[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(4): 369-373.
TAO Ronghua, WANG Dan, CHI Cheng. Application analysis and development trend of foreign airborne magnetic anomaly detection equipment[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(4): 369-373(in Chinese).
- [5] 熊盛青. 航空地球物理勘查科技创新与应用[J]. 地质力学学报, 2020, 26(5): 791-818.
XIONG Shengqing. Innovation and application of airborne geophysical exploration technology[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 791-818(in Chinese).
- [6] WANG Y, HAN Q, ZHAN D, et al. A data-driven OBE magnetic interference compensation method[J]. Sensors, 2022, 22(20): 7732.
- [7] LI Y, HAN Q, PENG X, et al. A magnetic interference compensation method for airborne electronic equipment without current sensors[J]. Remote Sensing, 2022, 14(17): 41-51.
- [8] 刘宇欣,李雯,魏东岩,等. 一种顾及舱内 OBE 干扰的改进航磁补偿方法[J]. 导航定位与授时, 2024, 11(4): 38-46.
LIU Yuxin, LI Wen, WEI Dongyan, et al. A modified aeromagnetic compensation method robust to in-cabin OBE interferences [J]. Navigation Positioning and Timing, 2024, 11(4): 38-46(in Chinese).
- [9] 孙广,王兴涛,朱翔宇,等. 基于地磁导航的地磁通化方法精度分析[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 69-75.
SUN Guang, WANG Xingtao, ZHU Xiangyu, et al. Accuracy analysis of geomagnetic diurnal correction based on geomagnetic navigation[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(4): 69-75(in Chinese).
- [10] GE J, ZHANG X, DONG H, et al. Gray system-based identification and pre-culling of outliers applied to magnetic sensor in aeromagnetic compensation[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(3): 2783-2790.
- [11] GE J, LUO W, DONG H, et al. Cooperative suppression of negative effects associated with multicollinearity and abnormal data for aeromagnetic compensation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-9.
- [12] BI F, YU P, JIAO J, et al. An adaptive modeling-based aeromagnetic maneuver noise suppression method and its application in mine detection[J]. Remote Sensing, 2023, 15(18): 4590.
- [13] ZHANG D, LIU X, QU X, et al. Analysis of aeromagnetic swing noise and corresponding compensation

- method[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-10.
- [14] YU P, BI F, JIAO J, et al. An aeromagnetic compensation algorithm based on a residual neural network[J]. Applied Sciences, 2022, 12(21): 10759.
- [15] 乔中坤, 马国庆, 周文纳, 等. 多旋翼无人机航磁系统误差综合补偿研究[J]. 地球物理学报, 2020, 63(12): 4604-4612.
QIAO Zhongkun, MA Guoqing, ZHOU Wenna, et al. Research on the comprehensive compensation of aeromagnetic system error of multi-rotor UAV[J]. Earth and Planetary Physics, 2020, 63(12): 4604-4612(in Chinese).
- [16] CALOU P, MUNSCHY M. Airborne magnetic surveying with a drone and determination of the total magnetization of a dipole[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2020, 56(6): 1-9.
- [17] XIAO S. Three-axis fluxgate sensor error correction [J]. Academic Journal of Science and Technology, 2022, 1(1): 29-34.
- [18] YUAN Z F, LIU X G, KONG D H, et al. Enhanced aeromagnetic compensation models for magnetic anomaly target detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 1-13.
- [19] GEILER A L, HARRIS V G, VITTORIA C, et al. A quantitative model for the nonlinear response of fluxgate magnetometers[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99(8): 08B316.

(编辑:孟彬)