

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2025.02.009

# 新型抗地磁梯度的航磁干扰补偿模型及补偿评价方法

田浩楠<sup>1</sup>, 韩大鹏<sup>2</sup>, 张登伟<sup>1</sup>, 张智航<sup>1</sup>, 苏宝玉<sup>3</sup>, 廖有幸<sup>3</sup>

(1. 浙江大学光电科学与工程学院, 杭州 310000;

2. 浙江大学先进技术研究院, 杭州 310000;

3. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450000)

**摘要:** Tolles-Lawson (T-L) 补偿模型广泛应用于航磁干扰补偿。该模型假设地磁场恒定, 不考虑地磁梯度, 导致磁补偿精度低, 且传统磁补偿评价方法仅分析磁补偿后的残差, 缺乏对航向误差磁补偿精度的评价。针对这一问题, 基于实飞数据分析了地磁梯度对校准飞行航磁补偿的影响, 推导了地磁梯度与磁探系统中经纬高的数学解析式, 建立了一种新型抗地磁梯度的 T-L (AGG T-L) 模型, 并提出了航向误差补偿的评价方法, 即统计不同航向航线重叠点的磁场误差 RMS。实测结果表明, 补偿后航向误差 RMS 从 3.542 6 nT 降为 0.935 8 nT, 证明改进的模型对航向误差具有较好的补偿效果。

**关键词:** 磁干扰补偿; T-L 模型; 地磁梯度; 航向误差

**中图分类号:** TB972; V248.1; V249.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2025)02-0086-07

## Novel anti-geomagnetic gradient aeromagnetic interference compensation model and evaluation method

TIAN Haonan<sup>1</sup>, HAN Dapeng<sup>2</sup>, ZHANG Dengwei<sup>1</sup>, ZHANG Zhihang<sup>1</sup>,  
SU Baoyu<sup>3</sup>, LIAO Youxing<sup>3</sup>

(1. College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China;

2. Institute of Advanced Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China;

3. The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The Tolles-Lawson (T-L) compensation model is widely used for magnetic interference compensation in airborne magnetic surveys. This model assumes a constant geomagnetic field and does not consider geomagnetic gradient effects, which leads to low magnetic compensation accuracy. In addition, traditional magnetic compensation evaluation methods only analyze the residuals after compensation, lacking an assessment of the magnetic compensation accuracy regarding heading errors. To address this problem, the effect of geomagnetic gradients on the calibration of airborne magnetic compensation during calibration flights is analyzed based on actual flight data. And the mathematical analysis expressions relating geomagnetic gradients to the geographical coordinates (latitude and longitude) and altitude in the magnetic exploration system are derived. A novel anti-geomagnetic gradient T-L (AGG T-L) model is established, and an evaluation method for heading error compensation is proposed, which involves statistical analysis of the root mean square

**收稿日期:** 2024-10-16; **修订日期:** 2024-12-27

**基金项目:** 基础科研项目 (JCKY2022110C165)

**作者简介:** 田浩楠 (2000—), 男, 博士, 主要从事地磁导航、磁干扰补偿方面的研究。

**通信作者:** 张智航 (1996—), 男, 博士后, 主要从事磁干扰补偿、地磁基准图测绘方面的研究。

(RMS) of magnetic field errors at overlapping points along different flight paths. The results show that the RMS of the heading error decreases from 3.542 6 nT to 0.935 8 nT after compensation, indicating that the improved model provides effective heading error compensation.

**Key words:** Magnetic interference compensation; Tolles-Lawson(T-L) model; Geomagnetic gradient; Heading error

## 0 引言

卫星导航技术因其高精度和无累积误差而广泛应用于航空平台。然而,国际局势不稳定,特别是军事冲突,可能导致全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)受到干扰,使航空平台失去自主导航能力。因此,发展不依赖于 GNSS 的导航技术至关重要。惯性导航是主要替代手段,但由于其累积误差,无法满足航空平台大范围、长航时条件下的使用需求<sup>[1]</sup>。地磁场作为地球的固有物理场,其地理坐标与地磁信息之间存在稳定映射关系。地磁导航利用地磁图数据库和路径磁测数据进行匹配导航<sup>[2]</sup>,受气候和环境的影响小,有利于提升自主导航性能。当前,各国对该技术的研究和应用日益深入。

然而,实际飞行时磁传感器的测量结果会受到飞机产生的磁场干扰,且随着飞行航向和姿态的变化,这种磁干扰会影响地磁图的构建误差和飞行磁测误差,从而降低匹配导航精度。1950年,Tolles和Lawson确定了与飞机及其机动有关的磁干扰来源,建立了托尔斯-劳森(Tolles-Lawson,T-L)补偿模型,该模型将磁干扰表示为飞机航向和姿态相对于地磁场的函数<sup>[3]</sup>。已有研究提出了许多方法求解 T-L 模型磁补偿系数,并提高其求解精度,例如递推最小二乘<sup>[4]</sup>、神经网络<sup>[5]</sup>及支持向量机<sup>[6]</sup>等优化拟合方法。在模型解算过程中,为简化计算往往假设地磁场是恒定的,用常量代替真实的地磁场值。但在实际校准飞行时,地磁场存在梯度,这会降低磁干扰补偿系数的求解准确度,影响磁干扰补偿精度。相关学者针对该问题进行了深入的研究,2011年,谭斌等<sup>[7]</sup>采用计算机数字仿真的手段验证得出,地磁梯度影响着航磁补偿的精度,但该方法存在一定适用局限性,因为地磁梯度并非都满足线性变化的要求。2014年,韩磊<sup>[8]</sup>提出了基于预测的补偿方法,利用卡尔曼滤波预测地磁梯度并进行补偿,可获得较为精确的补偿结果,但提高滤波方法获取的地磁场也存在一定偏差,受滤波器的参数影响。2020年,潘雪等<sup>[9]</sup>推导得到非恒定地磁场的参数估计和补偿公式,并对 T-L 模型进行了

修正,但该方法需要校准并去除飞行器在相同轨迹上往返飞行时的地磁梯度影响,增加了实际操作的难度。然而,上述方法没有从地磁梯度对磁干扰补偿精度影响的原理层面出发解决问题,提出的补偿模型复杂且计算量大。同时,这些方法只评价补偿后的磁场残差,并没有对航向误差补偿结果进行评价,且缺乏实测飞行结果。

本文分析了地磁梯度对校准飞行磁测数据影响的原理,发现无人机机动动作使得磁场传感器的位置发生变化,进而导致测得的地磁场强度发生变化,会引入伴随机动干扰的寄生地磁梯度干扰。为了解决这个问题,提出了一种新型抗地磁梯度的 T-L(anti-geomagnetic gradient T-L,AGG T-L)模型。该模型将寄生地磁梯度干扰建模成飞机经度、纬度及高度数据的多项式组合函数,与传统 T-L 模型线性结合,拓展了磁补偿模型方程,并提出了航向误差补偿评价方法,即统计不同航向航线重叠点的磁场误差均方根(root mean square,RMS)。实测飞行结果表明,该方法能有效补偿并抑制航向误差。

## 1 新型磁干扰补偿模型

### 1.1 校准飞行时地磁梯度对磁干扰补偿的影响

根据 T-L 模型的磁补偿理论,以机载磁场传感器作为坐标原点  $O$ ,构建无人机飞行器坐标系如图 1 所示。 $T$  轴平行于无人机机身纵轴方向,且假设  $T$  轴始终平行于无人机速度方向,方向向前为正, $L$  轴平行于无人机机身横轴方向,方向向右为正, $V$  轴垂直于  $T$  轴和  $L$  轴构成的水平面,方向向下为正。 $N$  指向地磁北极, $\mathbf{B}_0$  为  $O$  点处的地磁场矢量, $\alpha, \beta, \gamma$  分别表示  $\mathbf{B}_0$  与  $L$  轴、 $T$  轴及  $V$  轴的夹角, $X, Y, Z$  分别表示俯仰角、横滚角和偏航角。

典型的磁补偿校准飞行沿东、南、西及北 4 个航向进行四边形飞行<sup>[10]</sup>。在每个航向上,依次进行横滚、俯仰和偏航的机动动作。为了确保求解补偿系数时方程的非奇异性及结果的准确性,横滚动作的角度范围设定为  $[-10^\circ, +10^\circ]$ ,俯仰和偏航动作的角度范围设定为  $[-5^\circ, +5^\circ]$ 。

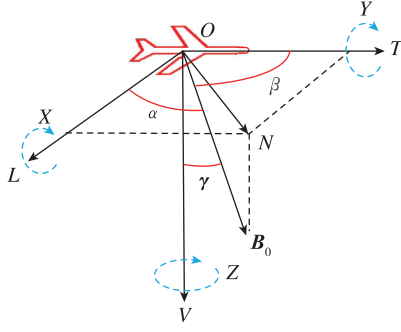


图1 无人机机动模型坐标系

Fig. 1 UAV maneuvering model coordinate system

为方便起见且不失一般性,仅分析一个航向下无人机机动与测得磁场的关系。假设无人机初始位置在原点,机身纵、横轴分别与  $T, L$  轴对齐,沿  $T$  轴方向飞行。校准飞行需要在海拔  $1\ 000\sim 2\ 000\text{ m}$  的高空飞行,地磁场的梯度可以假设为恒定,定义地磁梯度矢量为  $(D_L, D_T, D_V)$ 。定义  $(S_L, S_T, S_V)$  为磁传感器在参考系下的坐标,  $t$  时刻磁传感器位于  $(S'_L, S'_T, S'_V)$ , 则无人机飞行过程中地磁场相对于原点的三轴变化为

$$\mathbf{N} = (D_L S'_L, D_T S'_T, D_V S'_V) \quad (1)$$

标量磁传感器测得的地磁场强度  $\mathbf{B}_{em}$  为

$$\mathbf{B}_{em} = \mathbf{B}_{e_0} + \mathbf{N}\mathbf{H}^T \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{H} = (\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$  为地磁场的方向余弦,航向不变时可认为恒定<sup>[11]</sup>。 $\mathbf{B}_{e_0}$  是原点  $O$  处的地磁场强度。无人机机动动作导致磁场传感器的位置发生变化,进而导致测得的地磁场强度发生变化,从而引入伴随机动干扰的寄生地磁梯度干扰。由于校准飞行时俯仰、横滚及偏航三轴机动动作是相互独立的,对于横滚动作时,可以设定俯仰角和偏航角为  $0^\circ$ ,俯仰和偏航动作时同理。当无人机进行俯仰、横滚及偏航动作时,  $t$  时刻地磁场相对于  $O$  点的变化分别为

$$\Delta B_X = \cos\beta \int_0^t \cos X_t \cdot v D_T d\tau + \cos\gamma \int_0^t \sin X_t \cdot v D_V d\tau \quad (3)$$

$$\Delta B_Y = \cos\beta \int_0^t v D_T d\tau \quad (4)$$

$$\Delta B_Z = -\cos\alpha \int_0^t \sin Z_t \cdot v D_L d\tau + \cos\beta \int_0^t \cos Z_t \cdot v D_T d\tau \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{v}$  为无人机速度矢量。校准飞行时测得的磁场数据,通常使用带通滤波器分离出总磁场强度中的机动磁干扰<sup>[12]</sup>。然而,从上面计算结果可知,无人机在做俯仰和偏航动作时,角度范围为  $[-5^\circ, +5^\circ]$ ,以正弦形式出现的机动角度使得寄生地磁梯度干扰在  $0$  附近波动,频率范围可能与滤波器的通带重叠。即无人机在做机动动作时,带通滤波器滤出的机动干扰耦合着寄生地磁梯度干扰,降低了 T-L 模型磁干扰补偿系数的求解精度。

## 1.2 抗地磁梯度的改进 T-L 模型

传统 T-L 补偿模型为

$$\mathbf{B}_d = \sum_{i=1}^3 p_i u_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} u_i u_j + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} u_i u'_j \quad (6)$$

其中:  $\mathbf{B}_d$  为机动干扰磁场;  $p_i, a_{ij}, b_{ij}$  分别为磁干扰补偿系数;  $u_1, u_2, u_3$  为地磁场的余弦值,由矢量磁传感器磁测量值  $B_x, B_y, B_z$  的余弦值代替<sup>[13]</sup>;  $u'_j$  为  $u_j$  的导数,  $u_i$  可以通过式(7)计算得到

$$\begin{cases} u_1 = B_x / \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \\ u_2 = B_y / \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \\ u_3 = B_z / \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \end{cases} \quad (7)$$

根据 T-L 模型的相关理论可得  $a_{ij} = a_{ji}, a_{33} = 0, b_{33} = 0$ , 并根据方向余弦的性质可得到简化后的 T-L 模型矩阵表达式

$$\mathbf{B}_d = \boldsymbol{\theta}\mathbf{K}^T \quad (8)$$

其中: 机动干扰  $\mathbf{B}_d$  为  $1 \times n$  的行向量; 磁干扰补偿系数  $\boldsymbol{\theta}$  为  $1 \times 16$  的行向量;  $\mathbf{K}$  为  $n \times 16$  矩阵,是由磁场方向余弦及其导数线性组合而成的磁场方向余弦矩阵,  $n$  为校准飞行测得的数据样本数。在实际校准飞行中,磁场传感器测得的总场数据  $\mathbf{B}_m$  包含地磁场和机动干扰,如式(9)所示。

$$\mathbf{B}_m = \mathbf{B}_{em} + \mathbf{B}_d = \mathbf{B}_{em} + \boldsymbol{\theta}\mathbf{K}^T \quad (9)$$

为了解算磁干扰补偿系数  $\boldsymbol{\theta}$  需要分离出机动磁干扰,考虑到机动动作的频率范围,可设计带通滤波器对  $\mathbf{B}_m$  进行滤波。

$$\text{bpf}(\mathbf{B}_m) = \text{bpf}(\mathbf{B}_{em}) + \boldsymbol{\theta}\mathbf{K}^T \quad (10)$$

寄生地磁梯度干扰的存在导致  $\text{bpf}(\mathbf{B}_{em})$  不为  $0$ ,且残差无法忽略不计。因此,需要减小  $\text{bpf}(\mathbf{B}_{em})$  的影响。下面具体分析  $\text{bpf}(\mathbf{B}_{em})$  残差,根据式(2)可建立如下等式

$$\begin{aligned} \text{bpf}(\mathbf{B}_{em}) &= \text{bpf}(\mathbf{B}_{e0}) + \text{bpf}(\mathbf{N})\mathbf{H}^T \\ &= D_L \text{bpf}(\cos\alpha \cdot S_L) + D_T \text{bpf}(\cos\beta \cdot \\ &\quad S_T) + D_V \cos\gamma \cdot \text{bpf}(S_V) \end{aligned} \quad (11)$$

校准飞行过程中航向发生改变时,  $\cos\alpha$  和  $\cos\beta$  不再是常数。但是地磁倾角可假设为恒定<sup>[14]</sup>, 因此,  $\cos\gamma$  是常数。因此,  $\text{bpf}(\mathbf{B}_{em})$  残差可表示为

$$\text{bpf}(\mathbf{B}_{em}) = D_L \text{bpf}(\cos\alpha \cdot S_L) + D_T \text{bpf}(\cos\beta \cdot S_T) + d \cdot \text{bpf}(P_{alt}) \quad (12)$$

其中:  $P_{alt}$  定义为飞机高度;  $d$  为表示垂直地磁梯度的待定系数。根据地磁场模型, 区域有限且相同高度的校准飞行区域内, 地磁场强度  $\mathbf{B}_E$  可表示为纬度  $P_{lat}$  和经度  $P_{lon}$  的泰勒级数多项式<sup>[15]</sup>

$$\mathbf{B}_E = \sum_{i=0}^{\omega} \sum_{j=0}^i c_{ij} (P_{lat} - P'_{lat})^{i-j} (P_{lon} - P'_{lon})^j \quad (13)$$

其中,  $P'_{lat}$  和  $P'_{lon}$  分别表示原点处的纬度和经度。设展开级数  $\omega = 2$ , 并对地磁场强度  $\mathbf{B}_E$  带通滤波可得

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_E &= c_{00} + c_{10}(P_{lat} - P'_{lat}) + c_{11}(P_{lon} - P'_{lon}) + \\ &\quad c_{20}(P_{lat} - P'_{lat})^2 + c_{21}(P_{lat} - P'_{lat})(P_{lon} - \\ &\quad P'_{lon}) + c_{22}(P_{lon} - P'_{lon})^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{bpf}(\mathbf{B}_E) &= c_{10} \text{bpf}(P_{lat}) + c_{11} \text{bpf}(P_{lon}) + \\ &\quad c_{20} \text{bpf}(P_{lat}^2) + c_{21} \text{bpf}(P_{lat}P_{lon}) + \\ &\quad c_{22} \text{bpf}(P_{lon}^2) \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $c_{10}, c_{11}, c_{20}, c_{21}, c_{22}$  为表示水平地磁梯度的待定系数。根据式(12)、式(15)可得

$$\begin{aligned} \text{bpf}(\mathbf{B}_{em}) &= c_{10} \text{bpf}(P_{lat}) + c_{11} \text{bpf}(P_{lon}) + \\ &\quad c_{20} \text{bpf}(P_{lat}^2) + c_{21} \text{bpf}(P_{lat}P_{lon}) + \\ &\quad c_{22} \text{bpf}(P_{lon}^2) + d \text{bpf}(P_{alt}) \end{aligned} \quad (16)$$

因此, 得到扩展后的抗地磁梯度的 T-L 模型为

$$\mathbf{B}_d = \boldsymbol{\theta}_B \mathbf{K}_B^T \quad (17)$$

其中:  $\boldsymbol{\theta}_B = (\boldsymbol{\theta}, c_{10}, c_{11}, c_{20}, c_{21}, c_{22}, d)$ ;  $\mathbf{K}_B = (\mathbf{K}, P_{lat}, P_{lon}, P_{lat}^2, P_{lat}P_{lon}, P_{lon}^2, P_{alt})$ ; 纬度  $P_{lat}$ 、经度  $P_{lon}$  和高度  $P_{alt}$  可由全球定位系统(global positioning system, GPS)传感器得到。

## 2 模型参数求解

由于模型解算方程可能是奇异的, 采用基于  $L$  曲线的岭回归估计<sup>[16]</sup> 求解扩展后的系数  $\boldsymbol{\theta}_B$ , 如式(18)所示。

$$\boldsymbol{\theta}_B(k) = (\mathbf{K}_B \cdot \mathbf{K}_B^T + k\mathbf{I})^{-1} \mathbf{K}_B \cdot \mathbf{B}_d \quad (18)$$

其中, 系数  $\boldsymbol{\theta}_B(k)$  是关于岭参数  $k$  的函数, 采用  $L$  曲线法获取最优岭参数。  $\|\boldsymbol{\theta}_B(k)\mathbf{K}_B - \mathbf{B}_d\|$  和  $\|\boldsymbol{\theta}_B(k)\|$  是岭参数  $k$  的函数, 以  $\|\boldsymbol{\theta}_B(k)\mathbf{K}_B - \mathbf{B}_d\|$  为横坐标,

$\|\boldsymbol{\theta}_B(k)\|$  为纵坐标, 将不同  $k$  值计算得到的坐标点拟合成一条曲线, 即为  $L$  曲线。求解出曲线上曲率最大的点, 对应的岭参数值为最优岭参数。具体求解步骤如下, 分别对  $\|\boldsymbol{\theta}_B(k)\mathbf{K}_B - \mathbf{B}_d\|$  和  $\|\boldsymbol{\theta}_B(k)\|$  取对数可得

$$\varepsilon = \|\boldsymbol{\theta}_B(k)\|^{-2}, \rho = \|\boldsymbol{\theta}_B(k)\mathbf{K}_B - \mathbf{B}_d\|^{-2} \quad (19)$$

$$\hat{\varepsilon} = \lg \varepsilon = 2 \lg \|\boldsymbol{\theta}_B(k)\|,$$

$$\hat{\rho} = \lg \rho = 2 \lg \|\boldsymbol{\theta}_B(k)\mathbf{K}_B - \mathbf{B}_d\| \quad (20)$$

则  $L$  曲线上的点由  $(\hat{\varepsilon}/2, \hat{\rho}/2)$  组成,  $\hat{\varepsilon}', \hat{\rho}', \hat{\varepsilon}'', \hat{\rho}''$  分别为  $\hat{\varepsilon}, \hat{\rho}$  的一阶导数和二阶导数, 曲线上的任意点的曲率可以表示为

$$\eta = 2 \frac{\hat{\rho}'\hat{\varepsilon}'' - \hat{\rho}''\hat{\varepsilon}'}{((\hat{\varepsilon}')^2 + (\hat{\rho}')^2)^{3/2}} \quad (21)$$

求解出  $\eta$  的最大值, 确定  $L$  曲线上曲率最大的点, 得到最优岭参数  $k$ , 从而获取系数  $\boldsymbol{\theta}_B$  的最优近似解, 并从中提取前 16 项系数  $\boldsymbol{\theta}$  作为磁干扰补偿系数, 用于后续机动磁干扰补偿。

## 3 应用实例

### 3.1 无人飞行平台系统及测试场地

无人飞行平台系统如图 2 所示, 试验飞行平台采用六旋翼无人机。平台搭载高精度相干布居囚禁(coherent population trapping, CPT)原子磁传感器和巨磁阻抗效应(giant magneto-impedance, GMI)三轴矢量磁传感器。原子磁传感器测量范围为 10 000~90 000 nT, GMI 磁传感器经过误差校准后非正交角误差小于 0.01°。同时, 搭载 GPS 模块, 同步采集系统的采样率为 10 Hz。磁场传感器采用水平碳杆挂载方式。



图 2 无人机飞行平台系统

Fig. 2 UAV flight platform system

依托前期在江苏某试验场地开展的航磁系统性能测试, 该试验场地包括湖水和陆地两种地磁环境, 地磁特征较为明显, 有利于后续开展磁图采集及补偿验证飞行试验。实际校准飞行区域的地磁

梯度约为  $0.45 \text{ nT/m}$ ，校准飞行区域存在的地磁梯度会影响磁干扰补偿模型方程的准确求解，增大后续磁干扰补偿的误差。而 AGG T-L 模型能从原理上有效去除地磁梯度对磁干扰补偿的影响。

### 3.2 航向误差评价方法

航向误差是指无人机沿不同航向飞行时，引入磁测数据中跟航向角相关的直流偏置误差，也称方向性误差，属于机动干扰的一部分。航向误差的存在严重影响地磁导航中地磁图的重复性、可使用性以及实际导航飞行时的定位精度。因此，去除航磁飞行中的航向误差至关重要。本文提出了一种新型航向误差评价方法，如图 3 所示，即在磁图区域内进行“X”验证飞行，统计相同位置（直线距离小于  $0.5 \text{ m}$ ）的磁图磁场值  $B_{\text{map}}$  和验证飞行磁场值  $B_{\text{test}}$  的差值  $B_{\text{error}}$ 。若不考虑磁日变等因素的影响，差值应为 0。根据实测结果，当采用 CPT 磁场传感器且航向改变  $360^\circ$  时，航向误差约为  $10 \text{ nT}$ 。磁场传感器航向误差的存在会降低补偿结果的精度。航向误差越大，补偿后的磁场直流偏置误差就越大，直接影响地磁图的精准构建和地磁匹配磁测数据的准确度。而 AGG T-L 模型能有效地补偿航向误差，实现精准的航磁测量。

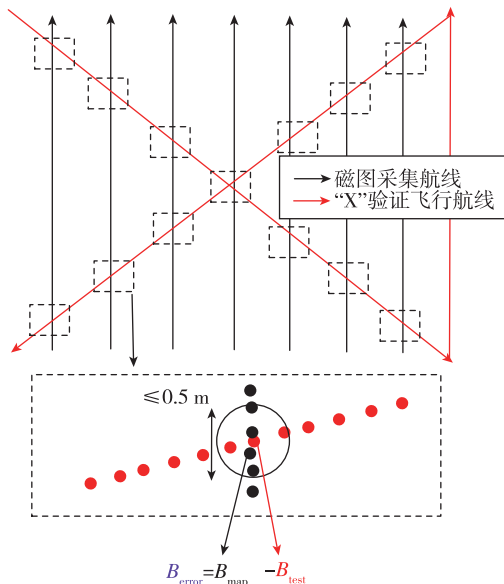


图 3 航向误差补偿评价方法示意

Fig. 3 Schematic of heading error compensation evaluation method

本文采用“弓”字形的测绘航线，构建了东西方向  $700 \text{ m}$ ，南北方向  $2000 \text{ m}$ ，高度  $100 \text{ m}$ ，航线间距  $50 \text{ m}$  的地磁图。采用本文提出的 AGG T-L 模型

进行补偿，补偿后的磁图如图 4 所示。

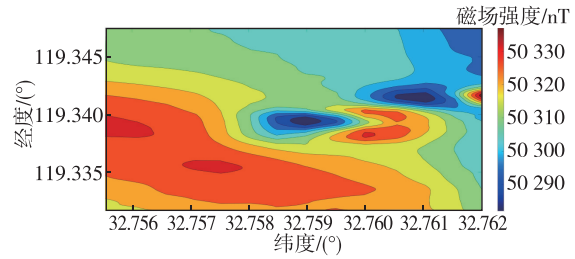
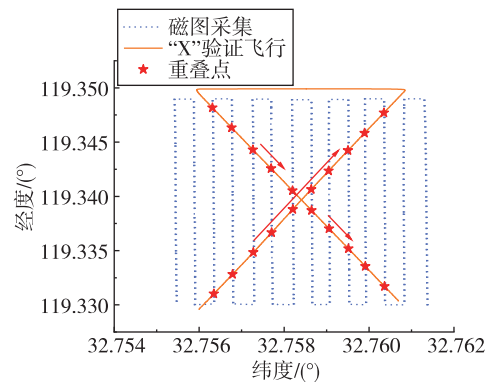


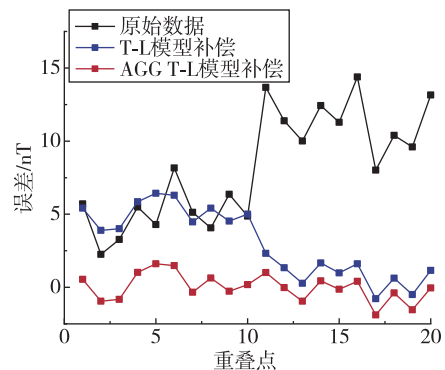
图 4 二维地磁图

Fig. 4 2D magnetic map

在磁图区域内进行“X”验证飞行，如图 5(a)所示，图中红色箭头表示验证飞行轨迹。根据 GPS 数据统计磁图采集航向与验证飞行航向重叠点（直线距离小于  $0.5 \text{ m}$ ）的磁场强度差值的 RMS 作为评价航向误差补偿效果的指标，航向误差统计结果如图 5(b)所示。原始数据航向误差 RMS 值为  $8.9814 \text{ nT}$ ；传统 T-L 模型补偿后的航向误差 RMS 值为  $3.7865 \text{ nT}$ ；AGG T-L 模型补偿后的航向误差 RMS 值为  $0.9153 \text{ nT}$ ，相较于传统 T-L 模型，航向误差补偿效果有明显提升。



(a) 飞行航线示意

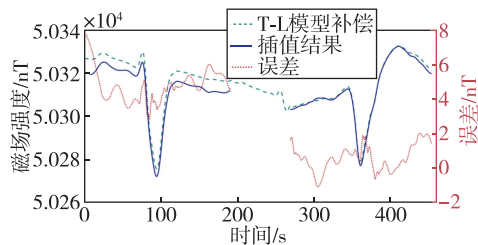


(b) 重叠点插值误差

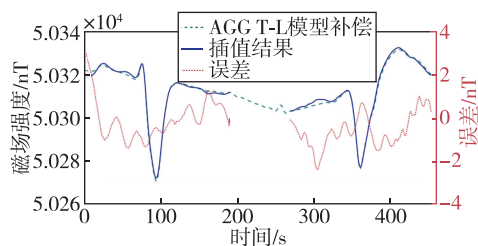
图 5 实际航线重叠点航向误差补偿结果

Fig. 5 Compensation results of heading error at actual route overlap points

由于磁图数据的航线间距为 50 m,可假设 50 m 内地磁场强度是线性变化的<sup>[17]</sup>。因此,根据磁图数据对“X”飞行航线经纬度进行磁场线性插值,得到“X”飞行在磁图区域内的每一采样点的插值磁场强度,并与补偿后的磁测数据做差,以验证磁图和验证飞行的一致性。进一步评价补偿后的航向误差,结果如图 6 所示。



(a) T-L 模型补偿后航向误差结果



(b) AGG T-L 模型补偿后航向误差结果

图 6 插值后“X”飞行重叠点航向误差补偿结果

Fig. 6 The compensation results for the heading error at the overlap points of “X” flight path after interpolation

图 6 中,蓝色实线表示根据磁图数据对“X”飞行航线轨迹进行线性插值得到的数据,中间中断是因为“X”飞行中间由北向南航线在磁图区域外,故不计入后续航向误差统计。由图 6 可知,传统 T-L 模型补偿后,“X”飞行的两条不同航向轨迹的磁场数据还存在约 4 nT 的航向误差,而 AGG T-L 模型补偿后的航向误差小于 1 nT。统计两种模型补偿后连续重叠点的航向误差的 RMS,传统 T-L 模型的 RMS 值为 3.542 6 nT,AGG T-L 模型的 RMS 值为 0.935 8 nT。

#### 4 结论

本文通过分析校准飞行中地磁梯度对磁干扰补偿的影响,提出了一种抗地磁梯度的改进型 T-L 补偿模型,即 AGG T-L 模型。采用经纬高数据和矢量磁传感器数据共同解算磁补偿方程,分离出地

磁梯度干扰分量,提高了磁干扰补偿精度。并提出了一种航向误差评价方法,统计不同航向轨迹重叠点的磁场差值的 RMS。通过实飞测试,传统模型磁补偿后航向误差 RMS 值为 3.542 6 nT,本文提出的 AGG T-L 模型磁补偿后航向误差 RMS 值为 0.935 8 nT,补偿效果得到明显提升。

#### 参考文献

- [1] QIN X, ZHANG R, WANG G, et al. Robust interactive multimodel INS/DVL integrated navigation system with adaptive model set[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(8): 8568-8580.
- [2] 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).
- [3] TOLLES W E, LAWSON J D. Magnetic compensation of MAD equipped aircraft[R]. New York: Airborne Instruments Lab. Inc., 1950: 201-211.
- [4] 吕辰, 张晓明, 檀杰, 等. 基于遗忘因子递推最小二乘的无人机在线磁干扰补偿技术研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(2): 218-222.  
LYU Chen, ZHANG Xiaoming, TAN Jie, et al. Research on online magnetic interference compensation technology for unmanned aerial vehicles based on recursive forgetting factor least squares[J]. Journal of Sensor Technology, 2018, 31(2): 218-222(in Chinese).
- [5] 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, 2021, 60: 1-10.
- [6] YU P, ZHAO X, JIAO J. An aeromagnetic compensation algorithm based on a deep autoencoder[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 19: 1-5.
- [7] 谭斌, 林春生. 地磁梯度对飞机磁场求解精度的影响分析[J]. 武汉大学学报: 地球科学版, 2011, 36(12): 1482-1485.  
TAN Bin, LIN Chunsheng. Analysis of the impact of geomagnetic gradient on the accuracy of magnetic field estimation for aircraft[J]. Journal of Wuhan University: Earth Sciences Edition, 2011, 36(12): 1482-1485 (in Chinese).
- [8] 韩磊. 航空磁异常探测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
HAN Lei. Research on key technologies for aviation

- magnetic anomaly detection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).
- [9] 潘雪, 张琦, 潘梦春, 等. 一种考虑地磁梯度变化的航磁补偿方法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(10): 5-7+10.
- PAN Xue, ZHANG Qi, PAN Mengchun, et al. A magnetic compensation method considering geomagnetic gradient variation[J]. Sensors and Microsystems, 2020, 39(10): 5-7+10(in Chinese).
- [10] 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).
- [11] JIAO J, YU P, ZHAO X, et al. Real-time aeromagnetic compensation with compressed and accelerated neural networks[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5.
- [12] MA M, CHENG D, CHALUP S, et al. Uncertainty estimation in the neural model for aeromagnetic compensation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(12): 1942-1946.
- [13] ZHOU S, YANG C, SU Z, et al. An aeromagnetic compensation algorithm based on radial basis function artificial neural network[J]. Applied Sciences, 2022, 13(1): 136.
- [14] WALTER C, BRAUN A, FOTOPOULOS G. Characterizing electromagnetic interference signals for unmanned aerial vehicle geophysical surveys UAV electromagnetic interference[J]. Geophysics: Journal of the Society of Exploration Geophysicists, 2021, 86(6): J21-J32.
- [15] AARON C. Magnetic navigation on an F-16 aircraft using online calibration[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(1): 420-434.
- [16] 张宁, 林春生. 基于改进岭估计的飞行器背景磁干扰的建模与补偿[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 887-891.
- ZHANG Ning, LIN Chunsheng. Modeling and compensation of background magnetic interference for aircraft based on improved ridge estimation[J]. System Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 887-891 (in Chinese).
- [17] NORIEGA G. Performance measures in aeromagnetic compensation[J]. Leading Edge, 2011, 30(10): 1122-1127.

(编辑:孟彬)