

# 基于网络中心的航空地磁观测的几个技术问题\*

## Technical Issues on Network-Centered Aeromagnetic Survey

龚诚 金晓南 陈敬松 陈芳 / 中航工业无线电电子研究所航空电子系统综合技术重点实验室

**摘要:** 地磁场是深入研究最多的地球物理场之一, 携带着诸多地球物理学信息, 目前地磁观测在防震减灾、资源勘探、地磁导航、水下目标探测等领域有着广泛应用。与卫星磁测相比, 飞机、浮空器等航空平台具有航路可规划、观测高度低、受外太空磁干扰小等优点。但是, 发展网络环境下的空基地磁观测, 遇到了新的技术问题, 本文从航电综合的角度, 给出了解决这些技术难点的可行途径。

**关键词:** 航空地磁; 网络中心; 航空电子

**Keywords:** areomagnetics; network-centered; avionics

### 0 引言

地磁场是地球重要的物理场之一, 地球内部和外部环境变化都能引起地磁场或强或弱的波动。根据各自不同的形成机理, 地磁观测在震前预报、矿产资源勘探、地磁导航背景数据库建立、水下目标探测等诸多领域都有着广泛应用。现代地磁现象物理学表明, 地磁场有着及其复杂的空间结构和时间演化结构。

地磁场由两部分构成<sup>[2]</sup>, 一部分是由地质构造产生的, 另一部分是地核外核中高温 (>4000℃)、高压 (>138GPa) 铁质液体的传导和对流产生的, 这部分也是地磁的主磁场。目前主地磁场发生机理已由磁流体力学的地球发电机理论给出了较为令人信服的解释。对这部分地磁场的描述已经有了各种模型, 包括国际参考地磁场 (IGRF) 模型<sup>[2, 6]</sup>、中国地磁场 (CHINARF) 模型<sup>[2]</sup>等。

从全球磁场中减去地核主磁场后, 得到许多大小不同、方向各异的残余磁场<sup>[2]</sup>, 这部分磁场称作地磁场异常。地磁场异常主要反映了地壳的运动、太阳耀斑对地磁场的影响。通常, 地磁场异常是非常稳定的, 然而在剧烈的地壳活动期间, 局部地区的地磁场会发生快速变化。例如, 在火山活动时, 由于热退磁效应, 火山附近的磁场会发生快速变化, 在地震发生前期, 由于压磁效应等原因, 震源及周边地区磁场也会发生快速变化。

据国内外相关文献报道, 这些磁异变化除了在宏观大尺度上表现为地磁场日变化规律异常、地磁低点位异常, 在小尺度上还影响地磁脉动规律。典型脉动事件是周期300~0.01s的准正弦变化, 磁脉动可分为两个频段, 一个频段的周期300~10s, 幅度范围0.1nT至数nT; 另一个频段周期10~0.1s, 幅度范围0.001~0.1nT。通

过高精度磁传感器检测地壳活动引起的地磁脉动异常, 可逐步发展成为一种地震短临监测预报的新方法<sup>[3, 4]</sup>。

自从第二次世界大战之后, 航空磁测已经成为物探和探潜的主要技术手段, 但传统的航空磁测本质上是以平台为中心的, 以网络体系为中心的地磁观测对航空磁测提出了新的技术挑战。首先, 航空平台上的地磁观测向量需要变换到体系系统定义的坐标系中, 并且需要较好的时间同步精度以补偿由于外空间辐射导致的地磁日变。其次, 现有的载机磁环境的补偿算法是50年前提出来的<sup>[5]</sup>, 没有航空电子系统综合技术的支持, 该算法实际上存在着严重的逻辑悖论, 不能支持向量测量的补偿, 对总量的补偿效果不能适应高精度、高分辨率磁力仪的机载应用。

在航空电子系统综合技术取得长足进步的背景下, 本文探讨了在空、天、地立体面向防灾减灾对地观测网络中, 进行航空地磁观测需要解决的若干关键技术问题。

\* 基金项目: 中航工业集团公司技术创新基金(2010F61527)项目资助。

## 1 地磁观测使用的传感器和航空电子系统综合技术

根据探测原理的不同，磁传感器可分为十余种，如图1所示。根据探测精度分类，现在已经发展到测量精度为数pT的第三代磁传感器，如图2所示。

目前的先进技术主要集中在对第二代传感器的升级改进，提升其测量精度。如加拿大Scintrex公司的CSL钽光泵磁力仪，标称精度达到了0.01nT；美国Polatomic公司新近开发的激光氦光泵磁力仪，灵敏度是现役AN/ASQ-208光泵磁力仪的十倍。此外SQUID磁力仪等新型敏感器件研发日渐成熟，可望达到pT级的探测精度。SQUID是建立在高温超导和

Josephson结效应基础之上的，利用环境磁场对Josephson结中两个超导体的电子波函数位相的调制作用，实现对环境磁场的测量。

针对不同的应用，所选用的磁传感器是不同的，不能简单认为精度越高越好。例如，水下目标探测和矿产资源勘探关注的是地磁场异常的部分，常常使用光泵等总量磁力仪，针对这类应用只需在单平台上保证地磁总场强度测量的相对精度，能够检测出某一微小量级的磁场强度变化，即可达到检测目的。因此，地磁观测对传感器的分辨率有较高的要求，对磁场测量的绝对精度要求不高。又如，地震预报和地磁导航基础数据采集等应用关注的是地磁场的

向量值，而且是地磁场的绝对真实值，因此需要支持向量测量的磁力仪，如SQUID磁力仪和三轴磁通门磁力仪，前者的测量精度可以达到pT量级，而后者可以达到0.2nT的量级。

航空电子系统综合首先是应用的综合，其次才是技术的综合。航空电子系统应用综合的基本意义在于，由于飞行器存在相对地面的质心运动和姿态运动，任何机载传感器都必须考虑载机的运动才能发挥效能。例如，光泵磁力仪在特定的经纬度和飞机的航向，存在测量死区，因此航空测量的航路规划，需要精心规划，以便在一次观测作业中，尽可能获得有效的数据。再如，当我们在体系下进行地磁向量监测时，在平台机体坐标系中观测到的地磁场向量，必须借助综合化的航空电子系统提供的载机姿态信息，变换到统一定义的坐标系中。

## 2 地磁观测的时间和空间对准问题

从本质上来说，传统水下目标探测或者资源勘探等领域的航空磁测，是以平台为中心的。而面对防灾减灾空、天、地立体对地观测体系的需求，航空地磁观测必须确保各个平台在本机坐标系中获得的地磁场向量，转换到一个统一的地理坐标系中，并需要通过外推、内差等运算实现时间同步，供应用方进行数值分析和研判。其中，面对地震孕震期间的地磁场异常的观测，地磁场的垂直分量具有特殊的意义。

这在理论上可以通过一个坐标变换得到，但机载姿态传感器（如惯性/卫星组合导航系统）给出的姿态测量值总是有误差的。假定在机体坐标系中，方位角测量精度为 $0.05^\circ$ ，俯仰角和横滚角的测量精度为 $0.008^\circ$ ，安装在机体坐标系中的地磁向量传感器的测量精度为0.1nT，载机在水平面上给定航向作直线飞行，进行10万次蒙特卡罗仿真结果表明，对于典型的中纬度地区，当变换到地理坐标系后，可以导致数十nT的误差，其中铅垂方

磁传感器类型	可测量场强
1. 感应线圈磁力仪	—
2. 磁通门磁力仪	—
3. 光泵磁力仪	—
4. 质子磁力仪	—
5. SQUID磁力仪	—
6. 霍尔效应磁力仪	—
7. 核旋进磁力仪	—
8. 磁敏二极管	—
9. 磁敏晶体管	—
10. 光纤磁力仪	—
11. 磁光传感器	—
12. 巨磁效应磁力仪	—

图1 不同磁传感器类型<sup>[6]</sup>

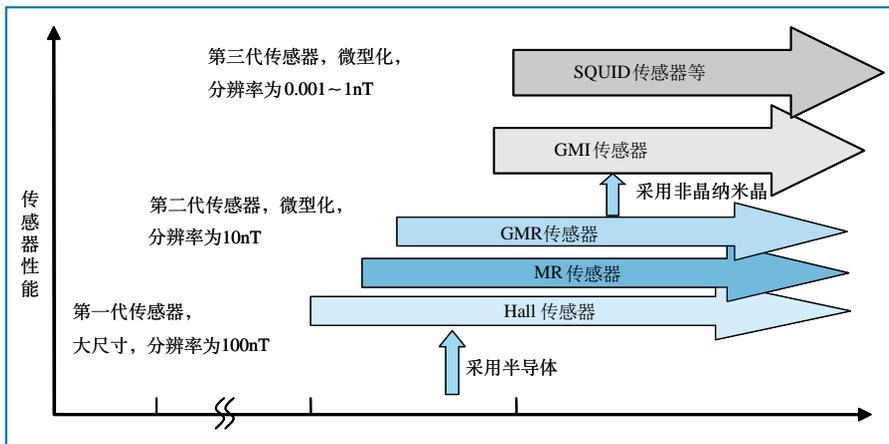


图2 三代磁传感器精度

表1 坐标变换引起的地磁场向量观测误差<sup>[9]</sup>

载机姿态角	$\sigma_{B_x}$ (nT)	$\sigma_{B_y}$ (nT)	$\sigma_{B_z}$ (nT)	$\sigma_B$ (nT)
$(\varphi_0, \theta_0, \gamma_0) = (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$	1.40	30.60	4.88	0.173
$(\varphi_0, \theta_0, \gamma_0) = (45^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$	30.61	1.40	4.89	0.173
$(\varphi_0, \theta_0, \gamma_0) = (90^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$	1.39	30.58	4.88	0.173
$(\varphi_0, \theta_0, \gamma_0) = (135^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$	30.62	1.40	4.90	0.173
$(\varphi_0, \theta_0, \gamma_0) = (0^\circ, 5^\circ, 0^\circ)$	1.5933	30.76	4.87	0.173
$(\varphi_0, \theta_0, \gamma_0) = (0^\circ, -5^\circ, 0^\circ)$	1.59	30.57	4.87	0.173
$(\varphi_0, \theta_0, \gamma_0) = (30^\circ, 0^\circ, 25^\circ)$	22.04	18.07	4.16	0.173

注:上表中 $\varphi_0$ 为航向角,  $\theta_0$ 为俯仰角,  $\gamma_0$ 为横滚角

向分量的误差接近5nT, 如表1所示。

因此, 为了使机载地磁场向量观测有意义, 问题的关键在于如何提高机体姿态角的测量精度, 比现有的定姿系统提高一个数量级。一种方法是, 在现有测量精度的基础上, 机载惯导/卫导组合系统将数据刷新率从10Hz提高到100Hz以上, 借助于数字滤波技术, 使得在低数据刷新率应用中, 得到较高精度的姿态估计。借鉴航空电子系统综合实践中常用的目标跟踪基本思路, 建立了一种适用于航空地磁观测的地磁场动态模型, 并设计了扩展卡尔曼滤波器<sup>[9]</sup>, 可以将地磁场铅垂分量的估计精度提高1/3左右, 即铅垂分量的误差减少至1.5nT。

由以上分析可知, 通过综合航空电子系统, 将飞机的导航定位、测姿系统与磁场传感器有机结合在一起共同组成观测系统, 可发挥出最佳的系统效能。

### 3 航空平台磁环境补偿问题

载机磁环境补偿问题, 一直是航空反潜专业的重要研究课题。一方面, 载机上固有的磁铁和磁化铁磁材料, 会导致磁传感器产生偏差, 另一方面, 飞机上的电流环路, 会在周边产生出感应的交变磁场。因此, 为了获得真实的地磁场数据, 必须进行载机磁补偿。

迄今为止, 对载机磁环境如何补偿还没有公开的解决方法。事实上, 最早的工作是1950年Leliak提出的18项补偿模型<sup>[5]</sup>, 加拿大PetRos EiKon 公司贾睿中的改进飞机磁补偿项目总结报告中描述了该模型<sup>[5]</sup>, 具体如下。

$$\begin{aligned}
 B_T = & c_1 \cos X + c_2 \cos Y + c_3 \cos Z + B_g (c_4 \cos^2 X + c_5 \cos X \cos Y \\
 & + c_6 \cos X \cos Z + c_7 \cos^2 Y + c_8 \cos Y \cos Z + c_9 \cos^2 Z) \\
 & + B_g (c_{10} \cos X (\cos X)' + c_{11} \cos X (\cos Y)' + c_{12} \cos X (\cos Z)' \\
 & + c_{13} \cos Y (\cos X)' + c_{14} \cos Y (\cos Y)' + c_{15} \cos Y (\cos Z)' + \\
 & c_{16} \cos Z (\cos X)' + c_{17} \cos Z (\cos Y)' + c_{18} \cos Z (\cos Z)') \quad (1)
 \end{aligned}$$

式(1)中,  $B_T$ 为载机电磁干扰,  $(\cos X, \cos Y, \cos Z)$ 为地

磁场向量相对机体水平轴、纵轴和垂直轴的方向余弦,  $()'$ 为对自变量的导数。通过该模型便可描述载机的磁场环境。在式(1)右端中, 头三项表示了载机的永磁和顺磁材料引起的干扰, 随后六项则表示了飞机上感应磁场的干扰, 最后的九项则代表了飞机上涡流导致的磁场干扰。

考虑到

$$\cos^2 X + \cos^2 Y + \cos^2 Z = 1 \quad (2)$$

$$\cos X (\cos X)' + \cos Y (\cos Y)' + \cos Z (\cos Z)' = 0 \quad (3)$$

从式(1)可以看出, 现有的磁环境补偿技术, 完全只是针对地磁场总量而言的。

根据是否使用单独的补偿设备, 载机的磁补偿方法分为硬补偿和软补偿两类。早期的机载反潜系统大多采用硬补偿方法, 即主动补偿技术和被动补偿技术。所谓的主动补偿技术是利用Leliak补偿公式构造一个补偿电路, 这是上世纪60年代航空磁测系统普遍使用的方法; 被动补偿技术是通过在磁力仪周围安装铁块和通电线圈, 其中铁条的尺寸和通电线圈的电流等是通过一系列的实验确定的。

现代的载机磁补偿方法采用纯软件的方法实现, 利用数学公式和数字滤波技术, 抵消载机磁环境导致的偏差, 这种方法充分地体现了航空电子系统综合的优势。

尽管式(1)中地磁场的总量 $B_g$ 无法在补偿前获得, 但可使用IGRF模型<sup>[6]</sup>计算获得的理论值替代。

利用采集到的数据样本(样本数大于18), 容易构造出一个正规方程  $A c = y$  (4)

其中

$$A = \begin{bmatrix} a_1(1) & a_2(1) & \cdots & \cdots & a_{18}(1) \\ a_1(2) & a_2(2) & \cdots & \cdots & a_{18}(2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_1(N) & a_2(N) & \cdots & \cdots & a_{18}(N) \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \cdots \\ c_{18} \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} B_T(1) \\ B_T(2) \\ \cdots \\ B_T(N) \end{bmatrix}$$

分别为方向余弦数据矩阵、系数向量和测量向量。测量向量是通过载机上实测的地磁场总量跟IGRF模型计算出来的地磁场总量之差排列而成。

在实际的机载环境中, 还存在许多背景噪声, 如总场梯度噪声、微脉冲、地理噪声等, 因此这些数据在进行最小二乘法拟合之前, 需要进行预先滤波, 将这些数据的带宽限制在飞机机动导致的基本频率模态附近, 提高信噪比。为此, Leliak建议<sup>[5]</sup>,  $A$ 的每一列和  $y$ 都用同一个滤波器来进行预处理。贾睿中的报告认为这是不必要的<sup>[5]</sup>, 可以先对磁通门得到的三个分量和光泵得到的总量进行高斯滤波。由于高斯滤波会将直流分量滤除, 因此在滤波后的数据中在将直流分量加上。

以上为现有的载机磁环境补偿方法。需要指出的是, Leliak的18项模型, 或许在工程上是一个实用的模型, 然而却存在着严重的逻辑谬误。首先, 该模型只适用于总量补偿; 其次, 载机的感应磁场来源于载机上电力系统中的交变电流、继电器和航空电子系统中的交变电流等感应源。客观上, 这些感应源与飞机在地球磁场中什么位置和指向是无关的; 再次, 涡流感应的磁场指的是在磁场中形成环路的电路感应的磁场, 由于这些回路在飞机上的布线是固定的, 原则上也只跟飞机的姿态有关。因此, Leliak补偿模型中, 表征载机永磁环境的头三项跟飞机的姿态有关。而被称为杂散磁场的感应磁场和涡流磁场, 与姿态和姿态变化率有关。

由此可以看出, Leliak的18项模型是在没有航空电子系统综合的理论和实践的时代产物。未来, 需要对载机磁环境补偿问题给出新的理解和更好的补偿方法, 特别是对地磁场向量的补偿, 在体系观测环境下向航空电子系统综合技术提出了严峻的挑战。

#### 4 地磁日变的补偿问题, 空地一体的地磁观测

地磁场随时间的变化分为地磁日变(由于地球自转, 太阳耀斑活动)和地磁月变, 通常地磁月变属于极为缓慢的变化(在此忽略不计)。在平静地球日中地磁日变发生在4时到20时, 主要跟纬度和当地时间有关, 其变化幅度跟太阳活动11年周期有关, 频率大致为1次/16小时, 其幅度取决与观测地点的纬度<sup>[2]</sup>, 大约可达到数十mT。

一般, 可以通过地面站同步观测判别地磁日变的具体数值。但是, 由于不同地理位置的地磁日变是不同

的, 所以地面站距离飞机监视的区域, 一般在南北方向上不大于50km。当地面站距离飞机监视的区域距离, 在南北方向上超出50km时, 需要将地磁日变监视的误差计入。在现阶段, 由于缺乏足够的数据和足够准确的地磁日变模型, 尚未得出严格的精度分析。一种折中处理的办法是认为当飞机在南北方向上, 与地面站的垂直距离小于50km时, 地面站观测到的地磁日变就是飞机经历的地磁日变, 从而在事后处理时, 机载磁力仪的实际测量值需要跟地磁日变相减, 得到的数值即认为是实际观测的地磁场。

但是, 上述处理方法实质上只是一种近似的工程逼近。从物理根源上, 静磁日的地磁日变是由于太阳耀斑对地球大气上空的磁层和电离层的影响而引起的。所以可认为, 至少在静磁日, 即太阳磁暴的11.7年周期以外的时间段里, 在给定的经度、纬度和高度的测站处的地磁日变与太阳相对测站的视在和视线有关。目前这种说法正在验证阶段。

#### 5 结束语

本文从航空电子系统应用综合的角度, 论述了体系环境下航空磁测面临的几个关键技术问题, 给出了解决这些关键技术的初步思路。截至目前, 中航工业无线电电子研究所已经完成了机载地震数据监测系统技术方案的设计, 正在对该系统中相关的系统综合技术进行验证。预计未来它将为中航工业参与国家空天地立体防灾减灾体系, 提供充足的关键技术储备。

AST

#### 参考文献

[1]胡锦涛. 在科学院和工程院院士大会上的讲话[Z]. 北京: 人民日报,

2008-6-23.

[2]徐文耀. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2009.

[3]丁鉴海, 等. 地震电磁前兆研究进展[J]. 电波科学学报, 2006, 21(5): 791-801.

[4]中国地震局监测预报司. GPS、卫星遥感及地球变化磁场地震短期预报方法研究[R]. 北京: 地震出版社, 2006.

[5]Jia J. A new aircraft compensation system for magnetic terrains[R]. Final Report on Improved Aeromagnetic Compensation, PetRos EiKon Inc, 2004.

[6] IAGA Division 5, Working Group 8. The 9th generation international geomagnetic reference field[J]. Geophys. J. Int., 2003, 155(8): 1051-1056.

[7]Luyandyk A P J. Processing of airborne magnetic data [J]. AGSO Journal of Geology and Geophysics, 1997, 16 (2): 31-38.

[8]Mahdia A, Panina L, Lmapps D. Some new horizons in magnetic sensing: high-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials[J]. Sensors and Actuators A, 2003, 103: 281-285.

[9]龚诚, 等. Measuring the geomagnetic field on board air travel vehicles[C]. Brisbane, ICAS' 2012, 2012-9.

#### 作者简介

龚诚, 副总师, 教授, 主要从事无线电通信导航、航空电子系统综合化、磁场检测与信号处理研究工作。

金晓南, 工程师, 主要从事导航与控制、航空电子系统综合化研究工作。

陈敬松, 工程师, 主要从事航空电子系统综合化研究工作。

陈芳, 工程师, 主要从事航空电子系统综合化研究工作。