

doi: 10.11720/wtyht.2017.4.17

孟庆奎,周德文,高维,等.国内外航磁补偿技术历史与展望[J].物探与化探,2017,41(4):694-699.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.17

Meng Q K,Zhou D W,Gao W,et al.History and prospects of aeromagnetic compensation technologies used in China and abroad[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(4):694-699.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.17

国内外航磁补偿技术历史与展望

孟庆奎¹,周德文¹,高维¹,杨怡¹,陈浩¹,王晨阳¹,李健¹,朱彦珍²

(1.中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083; 2.河北省地震局 秦皇岛中心地震台,河北 秦皇岛 066100)

摘 要: 笔者从飞机干扰场构成、数学模型建立、模型系数求解 3 个方面概要介绍了航磁补偿技术的基本原理,回顾了国内外航磁补偿方法研究历程和航磁补偿仪器更新换代的历史,对比了两种航磁补偿质量评价方法,并在分析航磁补偿技术研究现状的基础上,对航磁补偿技术的发展趋势进行了分析与预测。

关键词: 航磁补偿;质量评价;研究历程;发展趋势

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)04-0694-06

0 引言

磁法勘探是通过观测和分析由岩石、矿石和其他探测对象磁性差异所引起的磁异常,进而研究地质构造和矿产资源或其他探测对象分布规律的一种地球物理方法。作为磁法勘探的空军力量,航空磁测借助其测量速度快、克服各种复杂地形等独特优势,在矿产、水文、地质灾害、军事地质等方面贡献突出。

航磁补偿技术是航磁测量技术的核心技术之一,从 20 世纪 60 年代加拿大研制出 AN/ASA-65(9)型半自动补偿器开始,随着软硬件技术的进步,航磁补偿实现了从“硬补偿”到“软补偿”的过渡。20 世纪 90 年代初,何敬礼厘清了国内外磁补偿及磁补偿仪器的历史、现状,提出了未来的发展趋势。近二十多年,航磁补偿技术取得了很多新的成果,笔者从航磁补偿技术的基本原理、国内外航磁补偿方法研究历程和航磁补偿仪器更新换代的历史、航磁补偿质量评价方法着手,进一步分析了航磁补偿技术研究现状,最后讨论了航磁补偿技术的发展方向。

1 航磁补偿方法研究历史与现状

1.1 航磁补偿基本原理

自 1936 年苏联科学家试制成功感应式航空磁力仪并使磁法工作进入一个新的阶段以来,近 80 年的实践和良好应用效果有力地证明了航空磁测是最为快速有效的找矿方法之一。航空磁测就是把灵敏的磁力仪装载在飞机上用于检测地下矿体和地质体的磁场变化。但是由于飞机内铁磁性物质、金属物质的存在,必然要产生附加的磁场作用于磁力仪传感器上,从而影响磁力仪性能的发挥和磁测质量。飞机上各种干扰远大于磁测仪器的固有噪声。飞机磁补偿的目的就是要消除或减少这种不必要的磁干扰,使磁力仪的性能得以充分的发挥^[1-3]。

1.1.1 飞机磁干扰场的构成

航磁补偿的目的是去除磁力计传感器所测得数据中由飞机在地磁场中飞行而产生的电磁干扰信号。这些由飞机产生的电磁干扰可分为 3 个部分^[4]:①飞机铁磁性部分产生的恒定磁场和通电导线中直流部分引起的磁场,该磁场的数值及方向无论飞机处于何种姿态,其相对于飞机都是不变的。该场主要源于安装在飞机上的仪器、仪表上的磁铁、

收稿日期:2016-04-13;修回日期:2016-09-06

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(121201203000169802、121201203000160006);国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2014AA06A610)

作者简介:孟庆奎(1987-),男,助理工程师,2013 年毕业于中国地质科学院,主要从事应用地球物理方法研究和数据处理解释工作。

发动机、起落架等产生的。②飞机的软铁或顺磁性部分在地磁场中产生的感应磁场,此磁场的大小及方向随飞机姿态和地磁场的变化而变化。感应磁场主要是由飞机发动机、起落架、钢梁以及由软磁性材料所组成的器件产生。③飞机电流传导路径中电流产生的涡流磁场,它与磁通量的变化率成正比,即量值、方向是与地磁场梯度以及飞机飞行时加速度的大小,飞机机动作随时间的变化率有关。

1.1.2 航磁补偿数学模型

1950 年,Tolles 和 Lawson 首先根据磁干扰产生的原因及性质将磁干扰分解为恒定磁场、感应磁场和涡流磁场,并用数学模型将它们表示出来,即 Tolles-Lawson 方程(简称 T-L 方程)。通常一个物理模型转化为数学模型的过程中均带有某种近似或假设,T-L 方程也是如此:①假定飞机上的磁性体为均匀磁化体,且各磁性体相互间呈刚性连接;②假设飞机机动补偿所在区域的地磁场恒定。虽然该方程以上述假设为条件,但此后的磁补偿技术研究基本都是依据此模型展开。1961 年,以 T-L 方程为依据,Leliak 设计了一种估计与飞机机动时相关的磁干扰补偿方法^[4],到目前还是磁干扰补偿的标准方法。但是其不足之处是没有给出较好的求解补偿系数的方法。

我国学者对 T-L 方程中地磁场恒定的假设条件进行了探讨。2011 年,谭斌、林春生等通过模拟仿真方法分析了地磁梯度对飞机干扰场求解精度的影响,仿真结果表明地磁梯度引起的补偿系数计算偏差最大可达 5.24,相应的磁干扰补偿改善率下降 35.3%^[5]。2014 年,韩磊、韩琦对航磁补偿技术进行了全面的误差分析,结果显示假设地磁场恒定是影响补偿精度的主要因素之一,并进一步改善了磁补偿算法中假定地磁场不变的假设,利用滤波方法预测总场中影响飞机磁干扰的外磁场,利用预测地磁场重新进行磁补偿计算,最终得到了更为精确的补偿结果^[6]。以上学者都是通过模拟仿真的方式说明其补偿效果的提升,与实测补偿数据结合不够深入,另外,补偿效果的判断标准也不统一,建议以《航空磁测技术规范》(DZ/T0142-2010)中相关指标为判断依据。

1.1.3 航磁补偿系数求解

数学模型系数求解是整个补偿方案中的一个重要环节,解算结果优劣会直接影响到补偿效果的好坏。本质上,飞机磁干扰方程是一个线性方程组,依据补偿数据求解补偿系数的过程实际上是求解超定方程组的过程,也可看做多元线性回归问题。

对补偿系数求解算法研究的报道较多,主元素回归估计、最小二乘法等是求解此类超定问题的基本方法。1979 年,根据 Leliak 的设计理念,Bickel 提出了一种小信号的求解方法,该方法较好地解决了磁补偿系数求解问题,是系数补偿的典范^[7],但是这种方法对补偿动作要求较为严格,要求飞行员具有较强的飞行操控能力。另外,1980 年 Leach 从线性回归的角度看待磁补偿问题,给出了一种新的求解算法^[8];1993 年 Peter 提出了一种基于神经网络的补偿系数求解算法^[9];2002 年日本学者设计了一种利用 FIR 滤波器来估算补偿系数的方法;2008 年 Praga-Alejo 提出岭回归估计的改进算法^[10],进一步提升了解算精度;2014 年郑文超、牛夏牧等也提出用岭回归法改进经典算法的方案,并通过实验验证了改进方案的有效性^[11],同年 Zhang 提出了一种基于模糊自适应卡尔曼滤波器的补偿系数解算方法,该方法的计算效果不受飞行器姿态幅值大小影响,对补偿动作要求较为宽松^[12]。

1.2 国外航磁补偿方法研究

从航空磁测在资源勘查领域的兴起到发展壮大,美国、加拿大、法国等西方发达国家在航磁补偿技术上一一直处于领军地位。上世纪 50 年代,磁力仪的分辨率和灵敏度不断提高,但探测效果并没有真正提高,究其原因主要是飞机磁场的干扰严重制约着磁力仪性能的发挥,于是各国学者将工作侧重点转向飞机磁干扰补偿。美国 TOLLES、ANDERSON、RICHARD 等学者为此获得多项美国专利^[13-15]:飞机磁场的补偿(US2692970)、飞机恒定磁场的补偿(US2696602)、飞机感应磁场的补偿(US2697186)、飞机涡流磁场的补偿(US2703 864、US2802983、US2715198)、飞机磁场补偿的电子系统(US2706801)、感应磁场补偿器(US2776403)。加拿大、法国学者也纷纷取得专利:可变感应场补偿器(CA740087)、便捷式磁力仪补偿系统(FR1039248)、磁探测装置自动补偿器(CA752958)。以上各专利的补偿方案各异,但均依据 T-L 方程,可以发现各国发明专利的争相申请对航磁补偿技术的进步起到了推动作用,但也占领了磁补偿的主要市场。

1.3 国内航磁补偿方法研究

国内航磁补偿工作大约始于上世纪 60 年代初,并在接下来的 20 年里主要以硬补偿方法研究为主。1965 年卓松年发表论文《飞机磁干扰场补偿原理设计》,推导了飞机磁干扰场的数学表达式,为我国磁补偿工作打下了理论基础^[1]。1976 年孙文裕发表

《飞行磁场补偿原理》,主要讨论了合金补偿问题^[1]。1979年李标芳、王振东发表《飞机的磁干扰及电子补偿方法》,论述了8项磁补偿原理和电子补偿理论,并给出补偿实例^[16]。同年,王振东论述了《飞机垂直感应场的补偿》问题,着重分析了垂直感应场的变化规律和补偿方法^[17]。1981年曾佩韦采用机动式航磁补偿法,从稳态磁补偿的一些基本公式出发进行了推导,提出一步式和渐进式两种补偿程序,并说明了两者的不同做法并阐述了各自特点^[18]。1988年吴文福在从海燕机磁干扰特征入手,提出了一种适合该机型的磁补偿方案,同时指出补偿线圈的正确安装和修正补偿的重要性和必要性^[19]。到上世纪80年代末,因操作程序繁琐和补偿精度不高的限制,硬补偿方案渐渐退出了历史舞台,取而代之的是软补偿技术。

1985年何敬礼发表《飞机磁场的自动补偿方法》一文,首先在国内谈及了与硬补偿方案不同的软补偿技术,即借助计算机技术对飞机恒定场、感应场和涡流场进行自动校正处理的方法,该方法不涉及补偿线圈,既可实时处理,也可事后处理^[20]。1993年吴文福描述了自动补偿算法及软硬件集成研发,并通过对一条船模的探测能力的测试说明了补偿方案的可行性^[21]。

21世纪初我国航空物探领域许多研究生纷纷以航磁补偿为研究课题,再次掀起了对该项工作的研究热潮。2009年刘晓杰在《航磁补偿技术研究》中借助MATLAB软件实现了测地磁补干扰、软补偿方法的仿真模拟^[22]。2011年赵双求在其硕士文论《UAV航磁系统及补偿研究》^[23]中描述了无人机磁干扰数学模型,给出了具体的补偿方案,并通过软件仿真实验说明了无人机补偿方案的可行性,指出无人机补偿可以不考虑涡流场干扰,大大简化了数学模型,但没有给出不考虑涡流场干扰的量化依据。2014年尹文超在《飞行器磁场补偿技术研究及仿真实现》^[24]中采用Ansoft Maxwell电磁仿真软件,模拟了导弹模型在磁场作用下对周围空间磁场的影响,给出了准确的磁场分布,并依据干扰场数学模型,结合MATLAB软件求出了16项补偿系数,但是该补偿方案是否可以推广应用到飞机磁干扰补偿还有待验证。2015年王婕、郭子祺^[25]等对固定翼无人机航磁测量系统的磁补偿问题进行了初步探索,试探性的提出了一种基于地面测量的静态补偿方案,解决了固定翼无人机空中机动飞行补偿难度大的问题,但限于其使用的航空磁力仪系统精度差未达到《航空磁测技术规范》(DZ/T0142-2010)要求,磁补

偿效果也必然受到牵连。

2 航磁补偿仪器

2.1 国外航磁补偿仪器

第二次世界大战结束不久,西方资本主义国家为了摆脱困境,加快了能源普查和开发利用,投入了大量的人力、财力、物力等,并将反潜航空磁测技术及航磁补偿技术放宽至民用,催生出了一大批航空物探公司,从而加速了航磁补偿仪器的研发速度和更新换代。

60年代中期,加拿大研制出AN/ASA-65(9)型半自动补偿器,由控制指示器、矢量磁力仪、电子输出放大器和补偿线圈组成。该套系统完成整个补偿过程约需30~45 min,品质因子小于1 nT。随后,该公司又推出AN/ASA-65型补偿器,进一步提高了自动化程度和补偿效率^[1]。

1970年,美国人PASSIER公布了在PR4-141飞机上使用的一种全新形式的补偿系统。该系统将方位函数发生器和磁力仪组合在一起,将3个互相垂直的补偿信号变换成对于方位而言是单值的补偿电信号,加到磁力仪传感器上,该补偿器的补偿精度达0.1 nT^[1]。

1983年,加拿大SONOTEK公司向市场推出了一种高精度航软补偿系统AADC,其特点是:纯粹的计算机校正处理,实时计算出干扰大小并加以去除;完全自动的补偿过程;没有近似,没有补偿线圈、没有易受干扰的线性电路;既可用于补偿单磁力仪也可用于补偿磁梯度测量系统,补偿后总磁场剩余值(偏向差曲线峰-峰值)0.05 nT,梯度场剩余值(偏向差曲线峰-峰值)0.09 nT/m^[1,26]。

基于AADC,加拿大RMS公司研发了AADC-II型航磁自动数字补偿仪。磁场范围:20 000~100 000 nT;分辨率:1 pT(0.001 nT);对总场补偿精度(补后标准差): $\pm 0.035 \sim \pm 0.08$ nT;对总场补偿改善率:10~20;采样率:最大10次/s;补偿时间:6~10 min。AADC-II建立在多处理器体系结构基础上,每个高灵敏度磁力仪的信号分配一个专门的处理器处理,处理器具有良好的同步性。多年来的应用实践证明AADC-II已成为航空磁力补偿的典范^[27-29]。

2006年初,加拿大安大略省RMS公司在AADC-II的基础上,又开发出集数据采集与磁补偿于一体的DAARC500系统,该系统结构紧凑、重量轻、抗干扰能力强。其磁场范围:20 000~100 000 nT;补偿改善率:对总场的典型值为10~20,对梯度

的典型值为 20~100; 补后标准差: ± 0.02 nT; 补偿时间: 6~8 min。DAARC500 补偿仪补偿效果代表了世界先进水平^[30]。

2.2 国内航磁补偿仪器

伴随着磁力仪精度的逐步提高和磁补偿技术的不断进步, 国内研制出了一系列成功应用的磁补偿器, 中国国土资源航空物探遥感中心(以下简称航遥中心)在这方面做出了突出贡献。

1964 年航空物探大队(现航遥中心, 下同)开始试制飞机磁干扰场补偿装置, 1965 年采用由感应线圈和坡莫合金构成的 CBK-1 装置在陕南地区进行磁干扰场补偿试验, 补偿精度 ± 20 nT(品质因子)。1977 年航空物探大队研制的 DBQ-1 型 8 项电子补偿器在通辽地区试飞, 1978 年开始用于航磁补偿, 补偿精度 ± 8 nT(品质因子)。1982 年航空物探大队研制的 DBQ-2 型 16 项电子补偿器用于松辽盆地的航空氦光泵磁力仪补偿, 补偿后转向差 0.6~1.3 nT。1988 年航遥中心改进 XXH 型 9 项电子补偿器, 灵敏度达 0.12 V/nT^[1]。

航遥中心研制 SHB-1 型三分量飞机姿态仪测量飞机姿态变化的 x 、 y 、 z 分量及其微分值, 用于事后补偿计算, 于 1992 年、1995 年先后用于湖南宁乡、通化航磁水平梯度测量试验和南海南部海域航磁概查的事后软补偿, 水平和垂直补偿精度(偏向差曲线峰-峰值)分别为 0.8 nT 和 0.5 nT^[1]。

1997 年航遥中心引进 AADC-II 型实时数字软补偿仪, 1998 年应用于湖南桃园地区航磁水平梯度测量的磁干扰补偿^[1]。历时 5 年多的消化与吸收, 2002 年底航遥中心研制出具有自主知识产权 SC1 型航磁自动数字补偿仪^[31], 其技术指标是: 适用的磁场范围为 20 000~100 000 nT, 测量分辨率为 ± 1 pT (0.001 nT), 对总场的补偿精度(补后标准差)典型值为 ± 0.035 nT, 改善率为 10~20。研制过程中, 在软、硬件设计上采用了多项先进的技术和方法。在数学模型建立上使用了新的算法, 减少了不确定性, 克服了方程的病态, 提高了求解精度。SC1 型软补偿器在补偿效果上同 AADC-II 具有相当的水平。软补偿技术属于高新技术, 以往只有少数先进国家掌握这项技术, SC1 型航磁自动数字补偿器的研制成功填补了国内这项技术的空白, 极大地促进了我国航磁测量技术的进步, 使我国的航磁测量技术进入世界先进水平的行列。

十一五期间, 航遥中心在 SC1 基础上成功研发出 AGS-863 多通道航磁梯度补偿仪^[32-33]。适用的磁场范围: 10 000~100 000 nT; 测量分辨率: ± 0.1 pT

(0.0001 nT); 总场补后标准差: 最好 ± 19 pT, 典型 ± 35 pT, 最大 ± 80 pT; 据骆遥、椴树岭^[32]等对其测试的结果显示, 梯度差值改善率范围为 12.7~89.0。可见, AGS-863 多通道航磁梯度补偿仪在补偿效果上与发达国家补偿仪具有相当水平, 并且在输入信号、磁场范围方面优于加拿大 DAARC500 补偿仪。

3 航磁补偿质量评价方法

航磁补偿结束后如何对航磁补偿结果进行评价是一个重要的问题。如今, 航磁软补偿技术已经取代了硬补偿技术, 但国际上采用的补偿结果评价准则并没有实现统一, 涉及的评价准则主要有品质因子准则和标准差准则^[34-35]。

早年在军事探测系统中, 因其宽带有限, 补偿动作频率下测量残留干扰可以足够的判别补偿效果, 其中测量的残留干扰称为“品质因子”(Figure of Merit, 缩写为 FOM), FOM 准则最初定义(Hood, 1967)如下: “该准则是通过叠加计算飞机在北、东、南和西 4 个航向上侧滚(20°)、俯仰(10°)、侧滑(10°)所记录的 12 个磁异常峰峰值(不考虑正负)而得。”因为每个动作需重复几次, 记录的是每个动作的残留误差幅值, 在模拟记录中类似正弦曲线包络^[36-37]。在这一时期, 虽然它并没有反应出地球物理学家所关心的直流部分, 但 FOM 准则同样应用到航空磁力测量和梯度测量系统中。

之后, 为了评估宽带补偿效果, 加拿大国家航空研究中心(NAE)提出测量补偿后残留磁干扰的标准差(σ)。为了辅助评估补偿效果, 将补偿前后的标准差 σ 相除, 即得到“改善率”(Improvement Ratio, 缩写为 IR)。 σ 评价准则的补偿动作与 FOM 动作相同, 航向间转弯角度控制在 30°~35°之间。据 Hardwick 和 Noriega 等学者分析, σ 评价准则优于 FOM 准则表现在前者代表了所有补偿动作的磁场情况, 包括直流在内的全部频带宽度。另外, σ 还有以下两个优点: σ 是自动数字求解(精确计算 FOM 的过程是繁琐的, 而且通常需要某种形式的手动测量。如果这个过程是自动的, 就需要确定每套动作的开始和结束点, 从而实时环境下的操作相当繁琐, 而且还容易出错); σ 对短周期补偿动作的精度依赖性不高(FOM 与补偿动作幅度成正相关)^[37]。

在实际的航磁测量工作中, 我国采用的评价标准同样经历了曲折的争论过程, 现已基本实现统一采用 σ 评价准则。然而, 国内外一些航空物探公司和单位依然采用 FOM 评价准则, 或许是他们不愿意

去改变沿袭多年的习惯。

4 航磁补偿技术发展趋势

随着地表及浅层矿产资源的大量开采利用及国际对矿产资源需求的不断增长,深部找矿已成大势所趋。航空磁测技术以其效率高、成本低等优点得到了广泛的应用,在寻找磁性金属矿方面发挥了绝对重要作用。另外,随着军民融合机制的出台和深入落实,磁补偿技术在弹道导航、反潜探测、目标打击等方面也将发挥重要作用。航磁补偿技术作为航空磁测技术的一个重要分支技术,随着现代高端计算机技术、智能化技术的不断更新,在航磁全张量梯度测量的发展方向上,必将走向更高的阶段。另外,进一步减少补偿模型假设条件、优化系数求解算法,从根本上提高补偿效果将受到更广泛的关注,航磁补偿评价标准也将实现国际化统一。

4.1 航磁模量梯度补偿向全张量梯度补偿发展

随着钾光泵、铯光泵磁力仪研发成功及更新换代,加拿大、美国等发达国家于上世纪 80 年初就开始了航磁模量梯度补偿技术的应用,特别是进入二十一世纪,只有很少的单位或公司还在使用单探头航空平台开展工作^[3]。国际上,航空高温超导磁力梯度仪和低温超导磁力梯度仪已进入实验阶段^[38],使得全张量梯度测量成为可能,必将催生出相应的补偿技术和补偿器。我国在航空磁力梯度测量和补偿上刚刚起步,与发达国家还有较大的差距,应加大人力、物力、财力投入,加快补偿技术研究和补偿仪器的研发。

4.2 磁补偿器向着小型化、轻型化方向发展

当今社会电子技术发展迅速,过去笨重的航磁测量和补偿设备已经向着集成化、小型化、轻型化方向迈进,并且随着远程遥控技术的发展成熟,使得航磁测量和补偿设备搭载于小型无人机成为可能。国际上,加拿大、美国、英国等已经应用无人机航磁系统进行商业勘探运作,国内有无人机航磁实验和试生产的相关报道^[39],但与真正实现工程化、实用化还有一定的差距。总之,随着电子等基础材料科学的进步,航磁补偿仪器必将向着成熟化、小型化、智能化方向发展。

4.3 磁补偿技术在军事和民用中实现军民融合

自 2005 年我国“国家安全军事地物理专业委员会”成立以来,地球物理技术在军事中的应用上升到了国家安全的高度。张金城^[40]提出“军队在勘探方法手段、理论创新、人才队伍建设方面,与地方科

研院所相比较还有较大差距”。磁补偿技术在中远程导弹导航、舰艇远程导航、远程打击及目标侦察等均是一项关键技术。在不久的将来,在搭建军民融合交流共享平台基础上,磁补偿技术也将实现军民融合,为国家安全贡献力量。

参考文献:

- [1] 何敬礼.飞机磁补偿、磁补偿器的历史、现状及发展趋势[J].地学仪器,1991,3:1-7.
- [2] 熊盛青.我国航空重磁勘探技术现状与发展趋势[J].地球物理学进展,2009,24(1):113-117.
- [3] 张洪瑞,范正国.2000 年来西方国家航空物探技术的若干进展[J].物探与化探,2007,31(1):1-8.
- [4] Leliak P. Identification and evaluation of magnetic field sources of magnetic airborne detector equipped aircraft[J]. IRE Trans Aerospace Navigational Elect, 1961, 8: 95-105.
- [5] 谭斌,林春生,等.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.
- [6] 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.
- [7] Bickel S H. Small signal compensation of magnetic fields resulting from aircraft maneuvers[J]. IEEE Trans on AES, 1979, 15(4): 515-525.
- [8] Leach B W. Aeromagnetic compensation as a linear regression problem[J]. Information Linkage between Applied Mathematics and Industry, 1980, 2: 139-161.
- [9] Williams P M. Aeromagnetic compensation using neural networks[J]. Neural Computing & Applications, 1993(1): 207-214.
- [10] Praga-Alejo R J, Torres-Trevio L M, Pia-Monarez M R. Optimal determination of K constant of ridge regression using a simple genetic algorithm[J]. Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2008: 39-44.
- [11] 郑文超,牛夏牧,等.一种改进的航磁补偿系数求解算法[J].智能计算机与应用,2014,4(1):92-93.
- [12] Zhang Y, Zhao Y X. An Aeromagnetic compensation algorithm for aircraft based on fuzzy adaptive karman filter[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014(2014): 1-9.
- [13] 欧洲专利局. <http://www.epo.org/>
- [14] Compensated magnetometer. <http://worldwide.espacenet.com/searchResultsST=singleline&locale=enEP&submitted=true&DB=&query=2696602&Submit=Search>.
- [15] Compensation of aircraft magnetic fields. <http://worldwide.espacenet.com/searchResultsST=singleline&locale=enEP&submitted=true&DB=&query=US2692970&Submit=Search>
- [16] 李标芳,王振东.飞机的磁干扰及电子补偿方法[J].物探与化探,1979,3(1):35-43.
- [17] 王振东.飞机垂直感应场的补偿[J].物探与化探,1979,3(1):44-46.
- [18] 曾佩伟.机动式航磁补偿法[J].长春地质学院学报,1981,11(3):94-102.
- [19] 何敬礼.飞机磁场的自动补偿方法[J].物探与化探,1985,9(6):464-469.

[20] 吴文福.“海燕”机航磁仪的磁补偿方法和结果[J].声学电子工程,1988,11(3):27-32.

[21] 吴文福.16项自动磁补偿系统[J].声学电子工程,1993,4:14-30.

[22] 刘晓杰.航磁补偿技术研究[D].吉林:吉林大学,2009.

[23] 赵双求.UAV 航磁系统及补偿研究[D].长沙:中南大学,2011.

[24] 尹文超.飞行器磁场补偿技术研究及仿真实现[D].西安:西安理工大学,2014.

[25] 王婕,郭子祺.固定翼无人机航磁测量系统的磁补偿问题初探[J].地球物理学进展,2015,20(6):2931-2937.

[26] Automatic Aeromagnetic Digital Compensator For Geophysical Exploration and Environmental Surveys.http://www.gtk.fi/aerogeo/en/equipment/rms.pdf.

[27] AADC II型航空磁自动数字补偿仪(引进).http://www.agrs.cn/jszb/1498.htm.

[28] AADC II Automatic Aeromagnetic Digital Compensator as a Single Sensor or Multisensor MAD System for ASW Aircraft. http://www.rmsinst.com/ct2.htm.

[29] Overview of Aeromagnetic Compensation and RMS Instruments Model AADC-II Compensator.http://www.rmsinst.com/ct1.htm.

[30] Data Acquisition & Adaptive Aeromagnetic Real Time Compensator.http://www.rmsinst.com/.

[31] 航空物探设备.http://www.agrs.cn/jszb/1498.htm.

[32] 骆遥,椴树岭,王金龙,等.AGS-863 航磁全轴梯度勘查系统关键性指标测试[J].物探与化探,2011,35(5):620-625.

[33] AGS-863 多通道航磁数字补偿仪和数据收录系统(航遥中心自主研发).http://www.agrs.cn/jszb/1498.htm.

[34] 王林飞,薛典军,熊盛青,等.航磁软补偿质量评价方法及软件实现[J].物探与化探,2013,37(6):1028-1030.

[35] 刘浩,卢立波,杨望.关于高精度航磁测量中的磁补偿原理及补偿效果评价的探讨[J].物探化探计算技术,2014,36(4):431-435.

[36] Hardwick C D.Important design considerations for inboard airborne magnetic gradiometers [J].Geophysics, 1984, 49(11):2004-2018.

[37] Noriega G.Performance measures in aeromagnetic compensation [J].The Leading Edge,2011,30(10):1122-1127.

[38] 张昌达.航空磁力梯度张量测量—航空磁测技术的最新进展[J].工程地球物理学报,2006,3(5):361.

[39] 我国自主研发的无人机航磁及磁/放综合测量系统基本实现实用化. http://www.mlr.gov.cn/xwdt/zsdwdt/201412/t20141201_1336840.htm.

[40] 张金城,杨威,唐莉,等.关于构建军事地球物理环境资源数据融合机制的思考[J].地球物理学进展,2016,31(1):23-25.

History and prospects of aeromagnetic compensation technologies used in China and abroad

MENG Qing-Kui¹,ZHOU De-Wen¹,GAO Wei¹,YANG Yi¹,CHEN Hao¹,WANG Chen-Yang¹,LI Jian¹,ZHU Yan-Zhen²

(1.China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources,Beijing 100083,China; 2.Qinhuangdao Central Seismological Station of Earthquake Administration of Hebei Province,Qinhuangdao 066100,China)

Abstract: This paper briefly describes the basic principle of aeromagnetic compensation technology in three aspects, i.e., composition of plane interference field, establishment of the mathematical model, and solving model coefficients, and gives a review of the research history of domestic and foreign aeromagnetic compensation methods and aeromagnetic compensation instruments. Then, it compares two kinds of aeromagnetic compensation quality evaluation methods. On the basis of the analysis of aeromagnetic compensation technology research status, it analyzes and predicts the development trend of aeromagnetic compensation technologies.

Key words: aeromagnetic compensation;quality evaluation;research progress;development trend

(本文编辑:王萌)