频率域航空电磁系统一次磁场自动补偿技术

李军峰^{1,2},刘凯飞²,刘莹莹²,吴珊²

(1. 中国地质大学,北京 100083; 2. 中国地质科学院 地球物理地球化学研究所,河北 廊坊 065000)

摘要:为了提高三频航空电磁系统(FAEM)测量的自动化程度,设计实现了基于模糊控制和线性增量控制方法相结合的电磁补偿系统,来完成高精度、高稳定性、大动态范围的电磁补偿。以航空电磁接收机输出的电磁场实、虚分量值为控制的输入参量,以补偿线圈内的补偿电流为控制对象,80C52单片机为控制芯片,采用 FFSI法推理程序 实现补偿量的模糊控制,从而实现一次场和涡流场的实时程控补偿。航空电磁系统实验飞行数据表明,该控制系统可以快速实现一次磁场的实时高精度补偿,稳定性和补偿噪声水平能满足系统设计要求。

关键词:航空电磁系统;电磁补偿;模糊控制;单片机

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 8918(2009) 05 - 0536 - 05

我国自行研制的 HDY402 型三频翼尖硬架航空 电磁勘探系统的主要技术指标达到了世界同类系统 的先进水平,但该系统的一次磁场补偿操作较复杂, 亟需规范和化简操作程序,以提高系统的自动化程 度及可靠性、稳定性。为此,在中国地质科学院地球 物理地球化学勘查研究所基本科研业务费专项资金 资助下,开展了人工智能控制技术在航空电磁补偿 系统中的应用研究,以实现发射线圈激发的一次电 磁场及飞机金属机体涡流场的程控自动补偿。鉴于 补偿输出的滞后性和非线性,研究实现的自动补偿 系统中应用了具有非线性逼近能力的模糊控制技 术。

1 航空电磁补偿系统原理

翼尖硬架式航空电磁系统的方法原理^[1]可由 图 1 来说明。

图中示意一个翼尖硬架航空电磁系统刚好在矿体中心上方时,发射、接收及矿体三者之间的耦合关系。假定通有音频谐变电流的发射线圈具有的磁偶极矩为 m_1 ,它在周围空间产生一次磁场,在接收线圈处的一次磁场叫做 H_0 ,包括发射线圈激发的磁场 $H_{\rm T}$ 以及飞机的涡流场 $H_{\rm s}$ 。令在矿体处的一次磁场叫做 H_1 ,矿体在 H_1 的作用下,将产生涡旋电流或者被磁化,相当于在矿体中心建立一个二次磁偶极子,其磁矩为 m_2 ,在矿体周围建立一个二次磁场 H_2 。 H_2 为航空电磁系统实际要测量的有用信号,它又可





图1 补偿原理示意

分为与 H_0 同相的分量(实分量)和正交的分量(虚分量)。

当系统处在正常测量飞行高度时,在接收线圈 处, H_0 同 H_2 相比,其幅值要大几万至几百万倍。为 了可靠地测量 H_2 ,必须将 H_0 补偿掉。补偿的原理 很简单,在接收线圈处绕制补偿线圈,在其中加入与 H_0 相位相反、幅值相等的补偿场 H_c ,则接收线圈处 的 H_0 即可被 H_c 补偿掉。

通常,补偿系统可分为补偿信号提取(前向通 道)、调节和补偿电流输出(后向通道)3部分。基本 原理是从发射回路中提取一次场相互正交的实、虚 信号,通过补偿电路调节,产生实、虚补偿场 Re(H) 和 Im(H),从而合成补偿场 H_c(图 2)。



图 2 接收线圈处矢量关系

2 硬件系统设计方案

基于模糊控制的电磁补偿系统由控制器、前向 通道及后向通道组成。接收线圈检测到的磁场信号 通过正交变换得到总场实、虚分量信号,传递给控制 器,控制其产生控制信号,通过控制补偿阻容网络和 数字电位器 RDAC 的电阻值来改变补偿线圈中补 偿电流的大小和相位,实现一次场程控补偿。

2.1 前向通道

前向通道的作用是接收磁场信号,将它转换成 电信号并放大,正交变换后输出磁场的实、虚分量电 压值。前向通道由谐振接收探头、前置放大器、程控 增益放大、选频放大、正交矢量型锁定放大等组成 (图 3a)。

取自发射电流的参考信号通过锁相环路生成相 互正交的2个参考信号,与磁场电压信号混频(相 乘)就能生成2个正交的"边带",再通过低通滤波 器抑制2个边带中的高边带或低边带,就能获得原 始信号的2个频率成分,它们之间存在正交关系^[2]。 这2个正交信号的大小和比值反应了磁场信号的幅 值和相位。其中,与发射电流(一次场)同相的称为 实分量,正交的称为虚分量。由于矿体二次磁场产 生的航电异常为几十至几千个 ppm(总磁场的百万 分之一),一般实、虚分量一次场需要补偿到 100 ppm 以下。



图 3 补偿控制前向通道(a)、后向通道(b)原理示意

2.2 后向通道

后向通道通过控制补偿线圈中电流的幅值和相 位来实现一次磁场实、虚分量补偿。航空电磁补偿 系统的技术指标为:补偿信号的温度系数要小于10 ppm/℃,系统的慢漂应小于100 ppm/h,补偿噪声小 于5 ppm。这就要求后向通道具有低温漂、低噪声 特性。因此,选用具有低温漂和低噪的阻容网络和 数字电位器构成补偿电流控制电路,数字电路与补 偿回路之间电气隔离。

后向通道由补偿信号提取电路、阻容网络、 RDAC 和补偿线圈构成(图 3b)。为了分别补偿一 次场的实、虚分量,补偿电路要产生相对应的正交补 偿信号,利用理想电容可将电流相移 90°的原理,虚 分量补偿信号从串联谐振发射回路中以分压形式取 出,然后串接电容器,再送入补偿圈,实现虚分量补 偿;相对应的,实分量补偿信号由串接电阻送入补偿 线圈。R_L和C_L及继电器构成粗补网络,可以补 偿一次场量值的90%以上。RDAC1、R1,RDAC2、 C2构成实、虚分量精细补偿电路。基于单片机的模 糊控制器产生补偿量控制信号,开关量控制粗补网 络,数字量控制细补电路。图4是数字电位器 AD5235的应用电路,通过SDI串行数据控制1024 档增量,相当于10位DAC。

2.3 控制器

控制器由80C52单片机、时序电路、接口扩展、 隔离和驱动、通讯和人机交互等模块组成。采用2



图4 数字电位器 AD5235 电路

片 80C52 单片机,一片用于多通道数据采集,另一 片用于系统集中控制。通讯模块完成两通道之间以 及和收录系统的数据传输。人机交互模块包括液晶 显示、功能按键及接口电路,用于实现手动功能及流 程控制。

3 控制策略设计

3.1 补偿控制设计思路

(1)正常测量时,前向通道放大倍数可达2万 多倍,而接收机量程有限。为避免接收机超量程,实 现2×10⁶ ppm 动态范围的补偿,在补偿过程中需要 根据前向通道输出幅值来调整其放大倍数,由小放 大倍数开始补偿,边补偿边提高接收机放大倍数,直 至正常工作状态。

(2)鉴于实、虚补偿电流的大小与一次场的实、 虚分量大体成线性关系,因此,粗补采用线性增量控 制,将一次场补偿到1×10⁴ ppm 以下。

(3)实、虚补偿量不能做到理想正交,在大增益 情况下,单个频率实、虚补偿电流间互相影响,各发 射频率间也会互相影响,补偿为非线性关系。因此, 一次场的精细补偿需采用模糊控制技术实现,补偿 范围为1×10⁴ ppm。

(4)虽然,三频补偿系统是多入多出(MIMO)的 控制系统,但为了简化系统设计,单个频率的补偿系 统按照单入单出系统分别处理实、虚分量。

3.2 线性增量控制

根据电磁场理论,与发射线圈共面的任意一点的一次磁场,只存在与截面相垂直的磁场分量^[1] H_{0x}

 $= -\frac{INS}{4\pi r^3}\mu_{r},其中,I为发射电流,N为发射线圈圈$

数,S为截面积,r为收发距,对于空心线圈,μ, =1。 补偿线圈内部的磁场为 H'_{0x} = nI'/2R,其中,I'

为补偿线圈电流,n 为补偿线圈圈数,R 为半径。 由此可见,补偿场和一次场都和发射电流有关。

如果只考虑一个分量的补偿,数字电位器的步长和



图 5 进行实分量补偿时的变化量关系

补偿电流之间存在线性的关系,也与补偿场之间有 一个线性关系。

图 5 是只进行实分量补偿时,实分量补偿电位 器步进增量与磁场补偿分量变化量之间的关系曲 线。由实验数据可知,实分量补偿增量和磁场实分 量之间基本呈线性关系;同时,当一次磁场补偿到一 定量值时,由于实、虚补偿之间的相互影响,各频率 线圈之间的耦合以及各种干扰因素,实分量补偿导 致了磁场虚分量的非线性变化。也就是说,实、虚分 量补偿互相影响,磁场的补偿需要实虚补偿循环往 复地进行。

所谓线性增量控制,就是利用输入输出在一定 精度范围内的近似线性关系,根据人工调节工序来 设计控制流程,最终实现补偿控制。对于精细补偿 时出现的非线性问题,采用模糊控制实现补偿。

3.3 基于单片机的模糊控制算法

模糊控制具有非线性逼近能力,不需要被控对 象的精确数学模型,而是基于专家知识和操作经验 的现代控制技术。利用模糊控制技术来实现补偿控 制,有利于解决补偿增量和磁场变化量的非线性问 题。

基本模糊控制的测控结构如图 6 所示。获得输入量的偏差 e^{*},偏差变化 ec^{*},对其进行模糊化,确 定实测量作用模糊子集,根据作用模糊控制规则,进 行作用模糊子集推理,获取模糊控制量并对其进行 反模糊化,最终获得精确的控制增量 u^{*}。

选用磁场实分量(或虚分量)输出值及其变化 率作为模糊输入变量 e*和 ec*,数字电位器档位增 量控制字为输出变量 u*。3个变量均模糊划分为7 个模糊子集{NB,NM,NS,ZE,PS,PM,PB},根据电 位器增量同磁场值变化之间的实验数据,定义 2 个 输入变量的基本论域是(-200,200)和(-100, 100),控制增量的模糊输出论域为(-200,200);3 个变量的隶属度函数均采用三角形函数。

确定控制量变化的原则是:当实、虚分量为正,



图6 基本模糊控制器结构

意味欠补,则增加补偿量;当实、虚分量为负值,意味 过补,则减小补偿量。补偿初始阶段,系统存在较大 偏差和偏差变化,选择控制量以尽快消除偏差为主, u[•]取值较大;当系统在控制精度范围内时,为避免 超调,以系统的稳定性为主要出发点,u[•]取值逐渐 减小。因此,按照模糊控制原理设计出 u 的模糊调 整规则如表 1 所示。

表1 u^{*}的模糊控制规则

e	ec						
	NB	NM	NS	ZE	PS	РМ	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE	ZE
ZE	NS	NS	NS	ZE	PS	PS	PS
PS	ZE	ZE	ZE	PS	PS	РМ	РМ
РМ	ZE	ZE	PS	РМ	РМ	РМ	PB
PB	ZE	PS	РМ	PB	PB	PB	PB

实测值的模糊化方法采用单值隶属度法,将系统的实时输入与论域上各模糊子集相匹配,取出该输入对各模糊子集的单值隶属度,即实现实时输入的模糊化。模糊推理采用作用模糊子集推理(FF-SI)方法。FFSI法首先考虑了实测量的作用模糊子集及作用模糊控制规则,不仅大大简化了模糊推理过程,而且推理计算简单,算法适于实时计算和单片机实现^[3-4]。

3.4 软件设计和控制算法实现

80C52 单片机的补偿控制软件采用 C 语言编 写,软件的整体结构采用模块化的方式,软件流程如 图 7 所示。主要的子程序有系统状态检测、开关状 态检测、数据采集、数据通讯和预处理、线性增量控 制、模糊控制等。发射状态、接收状态的各参数检测 正常后,可开始闭环补偿,也可进行开环手动补偿。 补偿目标是将各频率的实虚分量磁场值补偿到小于 100 ppm。实虚分量值大于1 万 ppm(前项通道增益 小于 100)时,采用线性增量控制方法调节补偿电 流,直至前向通道增益放大至1 000 倍,输出小于1 万 ppm 时,执行模糊补偿控制。图 8 为模糊控制子 程序流程图。



图7 补偿软件总流程



图 8 模糊控制子程序流程

4 测试结果分析

为了验证实时自动补偿控制的效果和实用性, 航空电磁系统的仪器进行了多架次试飞测试。测试 参数如下:以 Y12 飞机搭载三频航空电磁系统,真 高 500 m 平飞(此时大地二次场影响可忽略);高频 (8 kHz)、中频(1.5 kHz)和低频(460 Hz)发射磁矩 分别为450 NIS,250 NIS,120 NIS。前向通道采样率 8 个/s,控制数据取样周期为1 s。

图9为线性增量控制和模糊控制实现的3个频 率6分量精细补偿实测曲线,增益为1000倍。由 图可见,基于 FFSI 法的模糊控制补偿曲线收敛较 快,不存在稳态误差。由于被控对象的精确数学模 型较难获得,线性增量控制在精细补偿中的控制效 果较差。

图 10 为航空电磁系统高频实分量补偿全过程 实测曲线。增益 1~100 倍,采用线性增量控制,使 得放大后前向通道的信号强度不超出量程。增益达 到 1 000 时,采用模糊控制,补偿精度达到 10 ppm。 同人工补偿控制相比较,实时自动补偿达到相同补 偿精度(30 ppm)所需的时间缩短 10 倍以上,并能 够稳定、持续地跟踪和补偿系统预热过程中的零点 漂移。静态补偿噪声 5 ppm,补偿后零点漂移小于 50 ppm/h,证明自动补偿控制电路对整系统的影响 满足设计要求。



图 9 三频六分量补偿过程实测曲线



图 10 高频实分量补偿控制过程实测曲线

5 结语

· 540 ·

三频航空电磁系统应用了单片机实时控制硬件 系统和模糊控制技术,在保证噪声和零漂水平的前 提下,实现了大动态范围的一次磁场的精细自动补 偿。实验数据表明,该控制系统能够满足频域航电 系统的整体要求,能够实现良好的补偿效果。在此 基础上,实现了发射电流的稳流控制、一次场相位的 自动调节、环境噪声的自动检测,将较为繁琐的航空 电磁操作简化为六个功能按键,提高了该测量系统 的稳定性、一致性和自动化程度。

参考文献:

- 周风桐.补偿式航空电磁法[J].物化探研究报导,1982(11):
 17.
- [2] 高晋占.微弱信号监测[M].北京:清华大学出版社,2004: 170.
- [3] 张吉礼,孙德兴.基于作用模糊自己推理的单片机模糊控制实现原理及其应用[J].控制理论及应用,18(4):576.
- [4] 欧进萍,张吉礼.作用模糊子集推理方法的研究与应用[J].模 糊系统与数学,2000(3):58.

THE ELECTROMAGNETIC AUTOMATIC COMPENSATION TECHNOLOGY OF THE FAEM SYSTEM

LI Jun-feng^{1,2}, LIU Kai-fei², LIU Ying-ying², WU Shan²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Open Laboratory of Exploration Geophysics, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: In order to improve the automation degree of the tri-band AEM system, the author designed an electromagnetic compensation unit based on the fuzzy control and linear incremental control approach so as to complete the high-precision, high stability, and large dynamic range Em compensation. With the real and imaginary components of the electromagnetic field output by the airborne electromagnetic receiver as the control input parameters, the compensation current in the compensation coil as the control object, the 80C52 monolithic processor as the control chip, the author adopted FFSI inference program to implement the fuzzy control of the compensation quantity, so as to realize the real time program control of the linear field and the voxtex field. The experimental data show that the control system can quickly achieve the real-time compensation with high stability and noise level.

Key words: FAEM electromagnetic system; compensation system; fuzzy control; MCU

作者简介:李军峰(1972-),男,高级工程师,主要从事航空电磁法仪器系统研发及应用研究。

万方数据