

直升机时间域航空电磁法补偿线圈

张一鸣, 高星乐, 郭兵, 刘洁, 付强, 刘蔚
(北京工业大学信息学部, 北京 100124)

摘要: 针对直升机时间域航空电磁法接收信号动态范围过大的问题, 一般采用同心补偿线圈减弱一次感应磁场的方法. 通过建立同心补偿系统磁场分布模型, 利用积分方程和非线性回归的方法对地下发射磁通进行了分析, 结合补偿线圈对发射磁矩的影响, 得出增大补偿线圈会减弱对地下目标体的探测能力; 通过分析发射线圈平面向下的纵向磁场, 得出增大补偿线圈会降低接收信号的动态范围同时会减弱近区效应. 因此, 补偿线圈的大小需根据接收线圈、数据采集系统精度以及飞机的飞行高度等因素进行选取.

关键词: 同心补偿; 积分方程; 非线性回归; 近区效应

中图分类号: TP 13

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2018)01 - 0073 - 07

doi: 10.11936/bjutxb2017010016

Helicopter-Borne TEM With Concentric Bucking Coil

ZHANG Yiming, GAO Xingle, GUO Bing, LIU Jie, FU Qiang, LIU Wei
(Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To solve the problem of the excessive dynamic range for receiving signals of helicopters by time domain electromagnetic method, concentric bucking coil was used to weaken the primary magnetic field in this paper. A model of magnetic field's distribution of concentric bucking system was established. Combining with the analysis of magnetic torque, the magnetic flux was analyzed by means of integral equation and nonlinear regression. It is concluded that the detection ability is weakened as the increase of the bucking coil. Through the analysis of the longitudinal magnetic field below the plane of the transmitting coil, it shows that the dynamic range of the receiving signal is reduced and the near-zone effect is weakened with the increase of the bucking coil. Therefore, the size of the bucking coil can be chosen based on the receiving coil, accuracy of data acquisition system, as well as the flight altitude of the helicopter.

Key words: concentric bucking; integral equation; nonlinear regression; near-zone effect

航空电磁法 (airborne electromagnetics, AEM) 是一种以飞机为运载工具进行地下目标体探测的方法^[1], 广泛用于矿产资源勘查、快速地质填图、油气勘查、地下水及环境和工程监测等各个领域^[2]. 目前固定翼航空电磁法和直升机电磁探测法是 AEM 中应用比较普遍的 2 种方法. 由于直升

机时间域航空电磁法 (helicopter-borne time-domain electromagnetic method, HTEM) 具有更大的探测深度, 并且可以根据地形控制飞行的速度和海拔高度, 因此比固定翼时间域航空电磁法应用更为普遍. 目前市场上一些大公司通过对传统航空电磁设备不断改进研发出具有大发射磁矩、低噪声、低

收稿日期: 2017-01-12

基金项目: 国家重大科研装备研制项目 (ZDYZ2012-1-05)

作者简介: 张一鸣 (1964—), 男, 教授, 主要从事电机节能、智能电源管理、电机调速和伺服驱动方面的研究, E-mail: ymzhang@bjut.edu.cn

基频、大探深等优良性能的 TDEM 系统,包括 VTEM Max、VTEM Plus、VTEM^[3]、SkyTEM^[4-5]、HeliTEM、HeliGEOTEM、AeroTEM^[6-7]、GPRTEM 等^[8]. 与传统航空电磁设备相比,这些系统增大了发射线圈直径与峰值电流,发射磁矩不断增加,采用了高性能的数据采集与处理系统,提高了分辨率,降低了噪声水平,接收实现了由单分量到多分量的转变,其应用范围更加广泛^[9]. 直升机时间域航空电磁法的原理是利用发射线圈向地下发送一次脉冲磁场,即为一次场;在其激发下,地下的地质体中激发出感应涡流,将产生随时间变化的感应二次场^[10]. 系统由接收线圈获取其二次感应电压,该电压值与磁感应强度对时间的变化率 dB/dt 成正比,分析电压曲线衰减情况可获得地下矿体的位置、形态、构造等信息^[11].

传统的航空电磁设备存在系统精度不高的问题. 以时间域航空电磁发射脉冲信号为例,在全波测量中因为 on-period 信号的强度比 off-period 信号的强度高出几个数量级,所以从 HTEM 系统接收到的全周期的数据受 on-period 信号的影响严重. 接收线圈接收信号的动态范围取决于发射线圈在开通和关断时期在接收线圈上感应的信号强度的比率,为降低接收信号的动态范围可在发射和接收线圈之间增加物理隔离,隔离系统可以降低对数据采集系统的要求. 但是,引入隔离装置也会带来一些负面影响,例如空间分辨率的损失、系统负重的增加、直升机飞行难度的加大. 对于动态范围的处理,HTEM 全波收录系统利用补偿线圈(bucking coil)减弱接收处一次场幅值的方式来降低接收数据的动态范围,合理地设计补偿线圈可以减弱对发射信号的影响,降低空间分辨率的损失,减小对系统负重的影响^[12].

目前国内外对于同心补偿线圈的研究主要是对其补偿原理、补偿线圈的作用及补偿前后磁场分布的分析. 2007年 Witherly 和 Irvine 在 VTEM 系统的基础上提出引入同心补偿线圈以实现电磁响应的全波记录^[13];2011年王世隆等^[14]对采用补偿环实现电流供电期间抵消接收处一次感应场的原理进行了说明并对补偿前后的磁场分布进行了分析;2013年 Kuzmin 等^[12]分析了引入补偿线圈对接收信号动态范围的影响. 本文通过分析补偿线圈对发射系统产生的影响,重点论述了补偿线圈的选取. 本文建立了发射线圈的磁场分布模型,利用积分方程和非线性回归的方法从磁通和发射磁矩 2 个方面分析了补

偿线圈发生变化时对地质体探测能力产生的影响,通过对发射线圈平面下方纵向磁场的分析,说明了补偿线圈大小对补偿效果的影响. 最后分析了选定补偿线圈后发射装置同心补偿方式的空间磁场分布,与前面文献中对同心装置补偿前后的磁场分析结果一致,验证了本文分析的正确性.

1 同心补偿系统模型的建立

本文研究的同心补偿式航空电磁系统采用补偿线圈与发射线圈和接收线圈同轴共面的方式,如图 1 所示. 模型的线圈装置由发射线圈、接收线圈和补偿线圈 3 个部分组成,补偿线圈位于发射线圈和接收线圈之间,其电流的方向与发射线圈相反,如图 1 中箭头方向所示. 由于接收线圈接收的发射线圈产生的一次感应磁场要远大于受激矿体产生的二次感应磁场,根据磁场叠加原理,当接收处发射线圈和补偿线圈贡献的磁场大小相等、方向相反时,接收处垂直一次磁场为零.

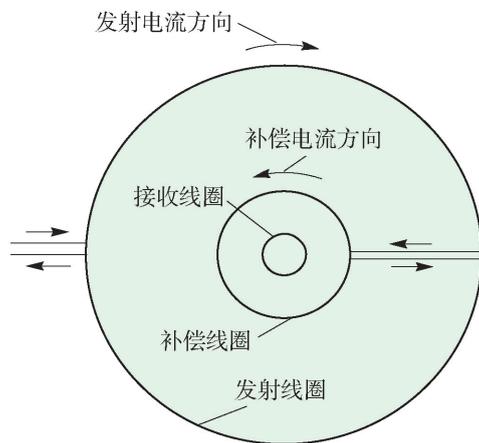


图 1 同心补偿线圈装置结构

Fig. 1 Block diagram of concentric bucking coil

1.1 空间磁场分布模型

现以发射线圈为例,分析发射装置的空间磁场分布. 设发射线圈的半径为 R ,其中心为坐标原点 O ,发射电流所在的平面为 $O-xy$ 平面, z 轴为旋转对称轴(见图 2),发射电流在全空间形成的磁场是以 z 轴对称的,只要求出通过发射线圈轴线平面上($O-yz$ 平面)的磁场分布,就可以得到发射电流在全空间形成的磁场分布.

由描述线元与磁场关系的毕奥-萨伐尔定律可求出发射线圈在 $O-yz$ 平面上任意一点 $P(0,y,z)$ 产生的磁场分量^[15]为

$$B_x = 0 \quad (1)$$

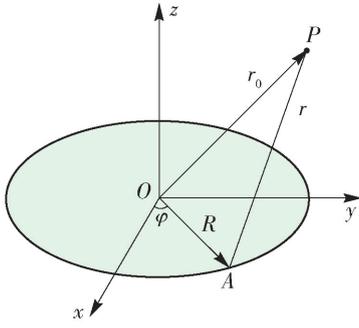


图2 电流元在 P 点的磁场

Fig. 2 Magnetic field of current element in point P

$$B_y = \frac{B_0 z}{y \sqrt{(R+y)^2 + z^2}} \left[\frac{R^2 + y^2 + z^2}{(R-y)^2 + z^2} E(k) - K(k) \right] \quad (2)$$

$$B_z = \frac{B_0}{\sqrt{(R+y)^2 + z^2}} \left[\frac{R^2 - y^2 - z^2}{(R-y)^2 + z^2} E(k) + K(k) \right] \quad (3)$$

式中: $B_0 = N_T \mu_0 I_T(t) / (2\pi)$; N_T 、 $I_T(t)$ 分别为发射线圈匝数和发射电流; R 为发射线圈半径; $K(k)$ 、 $E(k)$ 分别为第 1 类和第 2 类完全椭圆积分, 即

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\Phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \Phi}} \quad (4)$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \Phi} d\Phi \quad (5)$$

且 $k^2 = 4Ry/r_R^2$, $|k| < 1$, $r_R = \sqrt{(R+y)^2 + z^2}$, $2\Phi = \varphi + \pi/2$.

式(1)说明对 O - yz 平面内的各点, 磁感应强度的方向就在该平面内, 而没有 x 方向的分量, 即任一通过发射线圈轴线的平面, 平面的法向磁场均为零. 由式(2)(3)可得 O - yz 平面的磁场分布, 同理可得其他任意平面的磁场分布, 由于空间磁场的对称性可得发射线圈全空间的磁场分布. 同心补偿装置的实质是 2 个电流相反的线圈所产生的磁场的叠加, 同心补偿装置的磁场是发射补偿线圈共同作用的结果, 通过改变发射线圈和补偿线圈的缠绕方式与线圈匝数, 改变线圈电流的方向和大小, 使发射线圈和补偿线圈在接收处产生的垂直一次磁场为零. 补偿线圈空间的磁场分布与发射线圈原理相同. 根据磁场叠加原理, 可得同心补偿装置全空间的磁场分布情况.

1.2 补偿线圈对地下发射磁通的影响

接收线圈接收从地下传回的电压信号的强弱与磁场强度对时间的变化率成正比, 当发射脉冲波形

的频率一定的时候, 发射到地下的磁场强度增大, 磁场强度对时间的变化率随之增大. 根据法拉第电磁感应定律, 闭合导体回路中感应电动势 ξ 的大小与穿过回路的磁通量的变化率 $d\Phi/dt$ 成正比. 在实际探测过程中, 由于飞机飞行的速度相对于发射信号的变化速度很小, 可认为接收的感应电动势只是由发射信号变化引起的感应磁场的变化引起的, 即只存在感生电动势

$$\xi = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint_S B dS = -\iint_S \frac{\partial B}{\partial t} dS \quad (6)$$

由式(6)可知, 对于固定曲面 S , 磁感应强度的变化率与磁通的变化率成正比. 在时间域航空电磁场计算中对 dB/dt 直接积分得到的 B 对地下良导体非常敏感, 并且由于积分 B 对随机噪声有较强的压制能力, 对地下深部良导体有更好的探测能力^[2]. 根据式(6)磁场与磁通的关系, 当固定曲面 S 一定时, 可得

$$\Phi = \int_0^t \frac{d\Phi}{dt} dt = \int_0^t \frac{dB}{dt} S dt = BS \quad (7)$$

式(7)说明可以通过分析补偿线圈变化引起的发射到地下固定区域磁通的变化量来反映补偿线圈对磁场 B 的影响, 而磁场 B 信号的强弱直接影响接收信号的质量.

利用积分方程分析补偿线圈变化对发射到地下固定区域磁通的影响. 航空电磁系统模型如图 3 所示, 发射装置位于研究区域正上方, 模型参数为: 发射线圈半径为 R , 补偿线圈半径为 r , 研究区域的半径为 R' , 距发射装置的距离为 h . 研究随补偿线圈半径 r 的增大, 发射装置产生的通过地下研究区域的磁通量 Φ 的变化.

将发射装置看作理想模型, 其产生的磁场关于

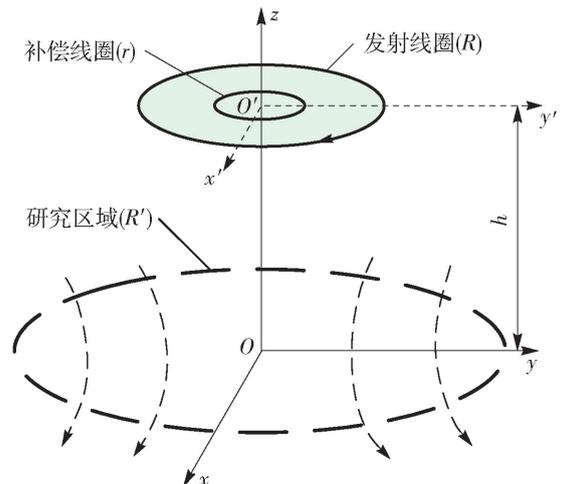


图3 模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model

z 轴具有轴对称性,通过研究区域的磁通可通过

$$\Phi = B_z S \quad (8)$$

求出. 分析发现 z 轴分量 B_z 是合磁感应强度 B 通过研究区域的主要分量,在时间域航空电磁系统瞬变全时响应正演模拟中 B 和 dB/dt 的电磁响应 x 方向的幅值比 z 方向的幅值均小 1 个数量级, z 方向的电磁响应具有较高垂向分辨率和勘探深度^[16]. 通过研究垂直磁场分量 B_z 可以反映发射到地下磁场强度的强弱. 在研究区域中的位置不同 B_z 的值也随之变化,由于磁场关于 z 轴具有轴对称性,对于理想的发射装置,研究区域任一同心圆上的磁感应强度相同,因此可由一条半径上的磁感应强度的变化趋势反映整个研究区域的磁场分布. 若已知磁场随半径的变化 $B_z(r')$,对 dr' 宽度范围内的环形积分元在半径 R' 上进行积分可得穿过研究区域的磁通

$$\Phi = \int_0^{R'} 2\pi r' B_z(r') dr' \quad (9)$$

式中,由于 $B_z(r')$ 没有可积的简单函数表达式,通过取采样点最小二乘法拟合的方法找到一个可描述 B_z 变化的一阶傅里叶函数

$$B_z(r') = a_0 + a_1 \cos(ur') + b_1 \sin(ur') \quad (10)$$

图 4 是发射线圈半径 $R = 15 \text{ m}$,发射线圈总电流 $I = 1400 \text{ A}$,研究区域的半径为 $R' = 30 \text{ m}$,发射装置在目标区域上方的高度 $h = 30 \text{ m}$ 时,补偿线圈半径 r 取不同值的情况下,研究区域一条半径上的垂直磁场分量 B_z 的变化曲线,为使补偿线圈半径的选取更具有普遍性,半径 r 按等步长递增取值.

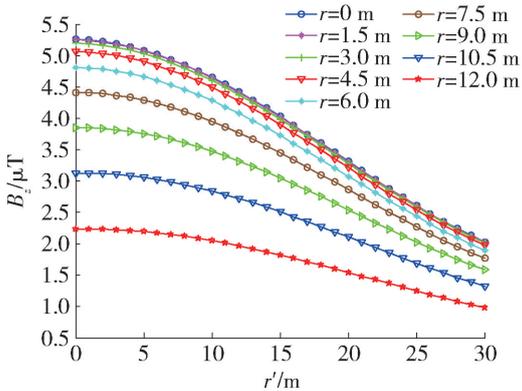


图 4 不同补偿半径研究区域一条半径上 B_z 值的变化曲线

Fig. 4 Changing curve of B_z on a radius of study area with different bucking radius

由图 4 可知,补偿线圈半径固定时, B_z 随距圆心距离 r' 的增大而减小,即在发射装置下方同一研究平面内中心轴线上的垂直磁场分量最大. 分别将不

同补偿半径时 $B_z(r')$ 的函数表达式(式(10))代入式(9),得出相应补偿半径下穿过研究区域的磁通量,再对所得磁通量数据进行最小二乘法拟合得到磁通量 Φ 随补偿半径 r 变化的曲线,如图 5 所示.

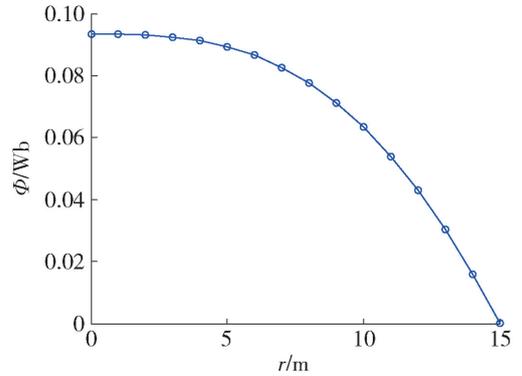


图 5 穿过研究区域磁通与补偿线圈半径的关系

Fig. 5 Relationship between magnetic flux through the target area and bucking coil radius

由图 5 可知,当发射电流一定时,随着补偿线圈半径的增加,发射到地下的磁通逐渐减弱,且减弱的速度随着补偿线圈的增加而增大,即发射磁场强度随补偿线圈半径的增加而减小,进而影响接收信号的强度. 为保证发射磁场强度及接收信号的强度,应对补偿线圈的最大尺寸进行限定. 当 $r = 7.5 \text{ m}$ 时,发射总磁通减弱 13.80%,磁场衰减严重,对发射和接收信号强度产生较大影响. 在该发射条件下,补偿线圈半径应不大于 5.3 m,此时磁场强度衰减不超过 5.00%.

考虑地形、安全问题及探测效率,线圈离地高度为 30~40 m^[17-18],根据以上分析可得到不同高度下的最大补偿线圈半径. 图 6 是线圈高度分别为 30、35、40 m 时的磁通变化曲线,当 $r = 5.3 \text{ m}$ 时,磁场强度的衰减分别为 5.00%、4.95%、4.86%,可发现在飞行高度范围内,补偿线圈的最大半径均在 5.3 m 附近,此时磁场强度衰减约为 5.00%. 由于补偿线圈对发射线圈的影响存在近区效应^[14],随着飞行高度的增加,其对发射磁场的影响越来越小,当补偿半径 $r = 5.3 \text{ m}$,线圈离地高度达 30 m 时,补偿线圈对发射线圈的影响已经很小,因此补偿半径基本不变.

1.3 补偿线圈对发射磁矩的影响

HTEM 装置的物探效果与发射磁矩的大小和时间域电磁法的波形收录方式紧密相关. 在深部探测方面,发射电流的磁矩越大,其深层探测能力越强^[19]. 下面研究补偿线圈对发射磁矩的影响.

由式(2)(3)可知,当发射电流为 I_T 、半径为 R 、

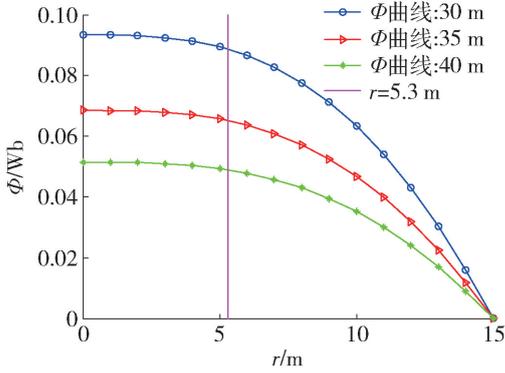


图6 不同高度下穿过研究区域的磁通变化曲线

Fig. 6 Magnetic flux through the target area at different altitudes

匝数为 N_T 的环形线圈时,线圈中心处的一次垂直磁场 B 为

$$B = \frac{\mu I_T}{2\pi R} N_T \quad (11)$$

式中 μ 为磁导率.

根据磁场叠加原理,当接收处垂直一次磁场为零时,满足

$$\frac{N_{T1}}{N_{T2}} = \frac{R}{r} \quad (12)$$

式中: N_{T1} 为发射线圈的匝数; N_{T2} 为补偿线圈的匝数; R 为发射线圈半径; r 为补偿线圈半径.

随着补偿线圈半径的增大,同心补偿发射装置的发射磁矩变化表达式为

$$M(r) = N_{T1} I \pi R^2 - N_{T2} I \pi r^2 \quad (13)$$

根据式(13)可得发射磁矩 M 随补偿线圈半径 r 增大的变化曲线,如图7所示,其中红色虚线和绿色实线与 M 曲线的交点分别表示补偿线圈半径为 $r = 3.0 \text{ m}$ 和 $r = 7.5 \text{ m}$ 时发射磁矩的大小.

由图7可知,随着补偿线圈半径的增大,发射磁

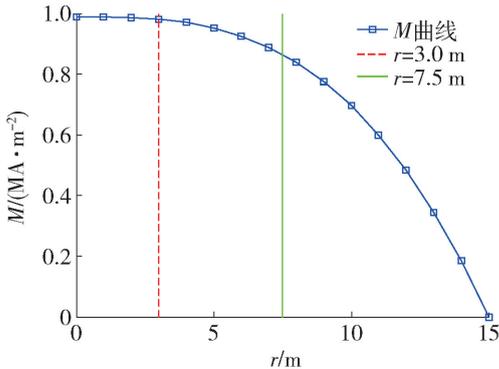


图7 发射磁矩与补偿线圈半径的关系

Fig. 7 Relationship between transmitting magnetic moment and bucking coil radius

矩逐渐减小,且减小速度呈上升趋势. 当 $r = 3.0 \text{ m}$ 时,总发射磁矩仅减少 0.8%,接收区域一次场强度被削弱,且可实现全波收录;当 $r = 7.5 \text{ m}$ 时,总发射磁矩减少 12.5%,此时虽然也可实现全波收录,但会对探深产生较大影响,为了在保证探深的情况下实现全波收录,应合理设计补偿线圈的尺寸. 在假设条件下,为保证实现全波收录时磁矩损耗不超过 5.0%,补偿线圈半径应在 3.0 ~ 5.5 m.

2 发射装置同心补偿方式的磁场分析

前面从磁通和磁矩 2 个方面分析了补偿线圈对接收和探深产生的影响. 同心补偿装置的补偿原理是利用发射补偿线圈产生的磁场的叠加,使接收处垂直一次磁场为零,由于同心补偿装置磁场分布的对称性,下面结合前面建立的空间磁场分布模型对发射线圈平面下方补偿前后的磁场变化进行分析.

2.1 z 轴方向上的磁场分布

在时间域航空电磁系统瞬变全时响应正演模拟中, z 方向电磁响应的幅值比其他方向的幅值大 1 个数量级, z 方向的电磁响应具有较高垂向分辨率和勘探深度^[16],下面对 z 轴方向的磁场进行分析. 根据式(2)(3),中心轴线上的磁感应强度 $B_y = 0$,且 $y = 0$,代入可得 z 轴方向上的磁场分布满足

$$B_z = \frac{B_0}{\sqrt{R^2 + z^2}} \left[\frac{R^2 - z^2}{R^2 + z^2} E(k) + K(k) \right] \quad (14)$$

通过式(14)得到当发射线圈半径 $R = 15 \text{ m}$,发射线圈总电流 $I = 1400 \text{ A}$ 、不同补偿线圈半径时中心轴线上的磁感应强度变化曲线如图8所示. 对比无补偿线圈(即 $r = 0 \text{ m}$ 时)的情况,补偿线圈的引入使圆心附近($z = 0 \text{ m}$ 处)的纵向一次场减弱,但补偿线圈对 z 轴方向磁场的影响主要集中在圆心下方有限范围内,即补偿线圈对磁场的影响有明显的近区

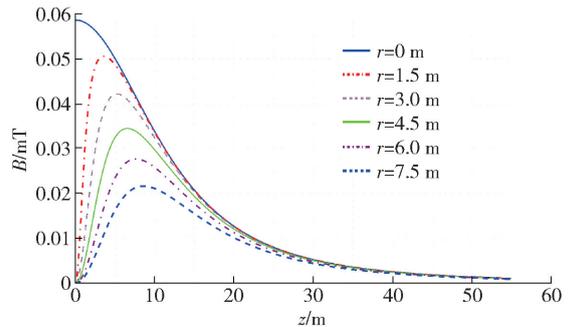


图8 不同补偿半径时 z 轴方向的磁场变化曲线

Fig. 8 Changing curve of magnetic field of bucking coil with different radius on z axis

效应^[14]. 对比 $r=1.5\text{ m}$ 与 $r=0\text{ m}$ 曲线可知补偿线圈仅在 z 轴 $0\sim 5\text{ m}$ 范围内有显著影响,即仅对线圈平面下方 5 m 范围内的磁场有影响;当 $r=3.0\text{ m}$ 时,补偿线圈影响的范围增大到线圈下方 10 m 附近,随补偿半径的增加,影响的范围增大,当 $r=7.5\text{ m}$ 时,补偿线圈影响的范围可达 30 m . 随着补偿线圈的增大,减弱了近区效应的影响,但补偿效果却提高了,飞机飞行达到一定高度时,由于近区效应,补偿线圈的影响可忽略不计,因此补偿线圈半径应根据发射接收装置以及飞机飞行高度的实际情况进行确定.

2.2 发射装置同心补偿方式的空间磁场仿真

前面从理论上分析了补偿线圈对发射和接收产生的影响,下面通过仿真对上面理论进行分析验证. 选定补偿线圈后,对同心补偿线圈进行仿真,仿真参数为:发射线圈半径 $R=15\text{ m}$,补偿线圈半径 $r=3.0\text{ m}$,发射电流 $I=280\text{ A}$,发射线圈匝数 $N_T=5$,补

偿线圈匝数 $N_B=1$,补偿前后的仿真结果如图9所示,图例中红色表征磁场强度大,蓝色表征磁场强度小. 由图9(a)知,磁场最强处位于 y 轴 15 m 且 z 轴为 0 m 处,说明发射线圈上的磁场最强. 由色标图可得沿 z 轴向下,磁场逐渐减弱且呈椭球状扩散. 有补偿线圈的图9(b)与无补偿线圈的图9(a)对比,在 z 轴 $-5\sim 0\text{ m}$ 以及 y 轴 $0\sim 2\text{ m}$,接收区域磁场强度降低了 $3\sim 4$ 个数量级,减弱了中心处的磁场强度,降低了接收信号的动态范围, z 小于 -10 m 以外的磁场分布仍然呈椭球状扩散,可近似为无补偿状态. 常规 HTEM 的飞行高度为 $30\sim 40\text{ m}$,此时发射装置中补偿线圈的影响很小. 选定补偿线圈后的仿真结果与王世隆等^[14]对同心补偿式直升机时间域航空电磁法吊舱校准装置研究中 HTEM 发射装置的分析结果一致,验证了本文对补偿线圈理论分析的正确性.

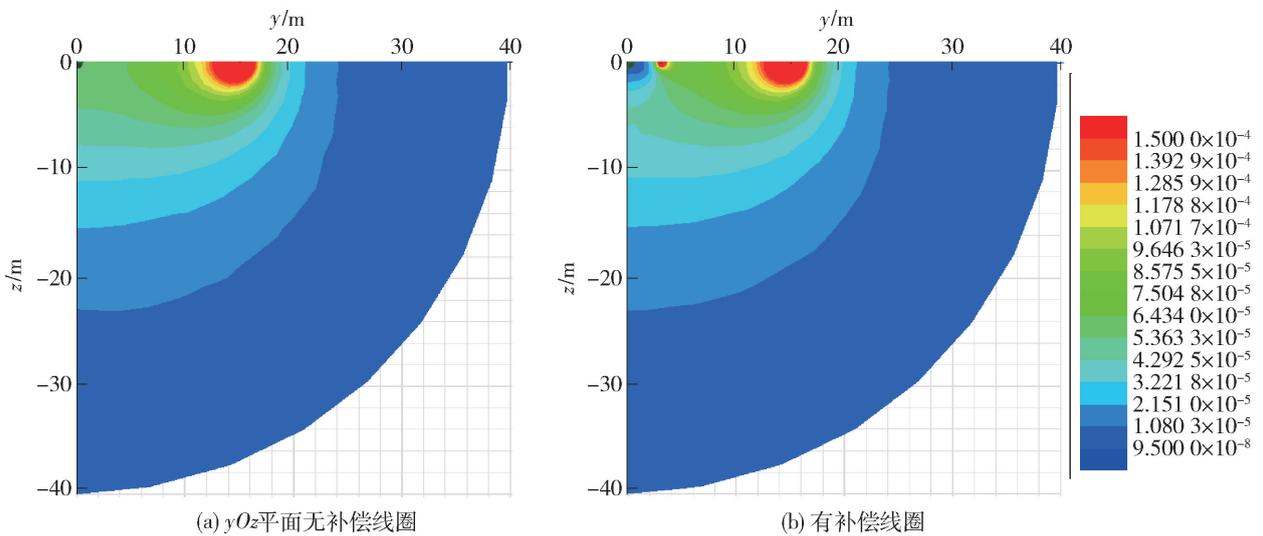


图9 yOz 平面无补偿线圈及有补偿线圈的发射装置磁场分布

Fig.9 Magnetic field distribution on yOz plane without bucking coil and with bucking coil

3 结论

1) 当通过发射装置的电流一定时,随补偿线圈半径的增加,穿过地下介质的磁场强度减弱,接收信号随之减弱. 为保证发射和接收信号的强度,需限制补偿线圈的尺寸. 当发射线圈半径为 15 m 时,补偿线圈半径应不大于 5.3 m .

2) 同心补偿装置是以损失发射磁矩来降低接收信号动态范围的一种直接方法. 当补偿线圈半径增大时,发射磁矩减小,且减小的速度呈上升趋势. 这里,发射装置采用 5 匝半径为 15 m 的发射线圈,当补偿线圈半径为 7.5 m 时,总发射磁矩减少

12.5% ,对探深产生较大影响.

3) 补偿线圈的引入导致接收线圈处一次场被削弱,接收数据的动态范围减小,降低了对数据采集系统的要求. 补偿线圈对 z 轴方向磁场的影响有明显的近区效应,补偿线圈增大,近区效应减弱,当飞机的飞行高度一定时,易对发射到地下的信号产生干扰,但补偿效果却随之提高.

参考文献:

- [1] 殷长春,任秀艳,刘云鹤,等. 航空瞬变电磁法对地下典型目标体的探测能力研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(9): 3370-3379.

- YIN C C, REN X Y, LIU Y H, et al. Exploration capability of airborne TEM systems for typical targets in the subsurface[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3370-3379. (in Chinese)
- [2] 裴易峰, 殷长春, 刘云鹤, 等. 时间域航空电磁磁场计算与应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2191-2196.
PEI Y F, YIN C C, LIU Y H, et al. Calculation and application of B-field for time-domain airborne EM[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2191-9196. (in Chinese)
- [3] WITHERLY K, IRVINE R. The VTEM heli-time domain EM system: four case studies [C] // ASEG 18th International Geophysical Conference and Exhibition. San Diego: ASEG, 2006.
- [4] SORENSEN K I, AUKEN E. SkyTEM: a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system [J]. Exploration Geophysics, 2004, 35(3): 194-202.
- [5] HALKJAER M, SORENSEN K I, CHRISTENSE N B, et al. SkyTEM: status and development[J]. Preview, 2006, 123: 29-31.
- [6] BOYKO E, PATERSON N R, KWAN K. AeroTEM characteristics and field results [J]. The Leading Edge, 2001, 20(10): 1130-1138.
- [7] BCLCH S J, BOYKO W P, PATERSON N R. The aeroTEM airborne electromagnetic system [J]. The Leading Edge, 2003, 22(6): 562-566.
- [8] CHATURVEDI K A. Integrated application of heliborne and ground electromagnetic surveys for mapping EM conductor for uranium exploration and its subsurface validation[J]. Geophysics, 2013, 78(1): 13-24.
- [9] JEAN M, LEGAULT A. Airborne electromagnetic systems-state of the art and future directions [C] // CAEG Recorder. Calgary: CSEG, 2015.
- [10] 牛之璉. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007: 1-2.
- [11] DAVIS A. Quantitative characterization of airborne electromagnetic system [D]. Melbourne: Royal Melbourne Institute of Technology University, 2007: 3-57.
- [12] KUZMIN P V, ORRISON E B. Bucking coil and b-field measurement system and apparatus for time domain electromagnetic measurements: US8400157B2 [P]. 2013-03-19.
- [13] WITHERLY K, IRVINE R. Mapping targets of high conductance with the VTEM airborne EM system [C] // ASEG 19th Geophysical Conference and Exhibition. San Diego: ASEG, 2007.
- [14] 王世隆, 王言章, 随阳轶, 等. 同心补偿式直升机时间域航空电磁法吊舱校准装置研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2397-2406.
WANG S L, WANG Y Z, SUI Y Y, et al. A bird calibration device of helicopter-borne TEM with concentric bucking loop[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(9): 2397-2406. (in Chinese)
- [15] 陈秉乾, 王稼军. 电磁学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012: 125-136.
- [16] 殷长春, 黄威, 贲放. 时间域航空电磁系统瞬变全时响应正演模拟[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 3153-3162.
YIN C C, HUANG W, BEN F. The full-time electromagnetic modeling for time-domain air electromagnetic systems [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(9): 3153-3162. (in Chinese)
- [17] 李怀渊, 张景训, 江民忠, 等. 航空瞬变电磁法系统 VTEM^{plus}的应用效果[J]. 物探与化探, 2016, 40(2): 360-364.
LI H Y, ZHANG J X, JIANG M Z, et al. The application effect analysis of the VTEM^{plus} system [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(2): 360-364. (in Chinese)
- [18] SHANE M, ROGER M, HEATHER C, et al. Review of three airborne EM systems [C] // ASEG 22nd International Geophysical Conference and Exhibition. San Diego: ASEG, 2012: 26-29.
- [19] 王世隆, 林君, 王言章, 等. 直升机式航空时间域电磁法全波收录[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(3): 776-781.
WANG S L, LIN J, WANG Y Z, et al. Helicopter-borne TEM full-wave recording [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(3): 776-781. (in Chinese)

(责任编辑 吕小红)