



·高功率微波技术·

一种基于双环差分结构的脉冲磁场传感器*

王 可^{1,2}, 段艳涛², 石立华², 张 琪², 扶庆枫²

(1. 中国人民解放军 91336 部队, 河北 秦皇岛 066326; 2. 陆军工程大学 电磁环境效应与光电工程国家重点实验室, 南京 210007)

摘 要: 雷击近场等强电场环境下的磁场测量是电磁脉冲测量技术中的难点之一, 由于输出端结构的径向非对称性, 传统的环天线很难避免电场干扰。针对于此, 研制了一种基于双环差分结构的脉冲磁场传感器, 该传感器由双环天线和光传输系统组成。根据近场电磁场量的分布特性, 双环天线选择平行镜像对称放置的方式, 从而能够将终端电压区分为磁场响应分量和电场响应分量, 再通过末端差分电路即可去除电场响应分量, 得到纯净的磁场响应分量。试验表明, 在邻近雷击环境模拟装置中, 双环传感器相较于单环传感器具备更强的抗电场干扰能力, 能够实现磁场的准确测量。

关键词: 雷击近场; 磁场测量; 电场干扰; 双环差分结构; 磁场传感器

中图分类号: TM937.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210337

A pulsed magnetic field sensor based on dual-loop differential structure

Wang Ke^{1,2}, Duan Yantao², Shi Lihua², Zhang Qi², Fu Qingfeng²

(1. Unit 91336 of PLA, Qinhuangdao 066326, China;

2. National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects and Electro-Optical Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Magnetic field measurement in a strong electric field environment such as a lightning strike is one of the difficulties in electromagnetic pulse measurement technology. The traditional shielded small-loop antenna introduces radial asymmetry due to the output end structure, and it is difficult to avoid electric field interference. In response to this, this paper has developed a pulsed magnetic field sensor based on a dual-loop differential structure, which is composed of a dual-loop antenna and an optical transmission system. According to the distribution electromagnetic characteristics of the near-field, the dual-loop antenna chooses to be placed in parallel mirror symmetry, so that the terminal voltage can be divided into the magnetic field response component and the electric field response component, and then the electric field response component is removed by the differential circuit to obtain the pure magnetic field response component. Experiments have shown that in the nearby lightning strike electromagnetic field environment simulator, the dual-loop sensor has stronger anti-interference capability than the single-loop sensor, and can achieve accurate magnetic field measurement.

Key words: lightning strike near field, magnetic field measurement, electric field interference, dual-loop differential structure, magnetic field sensor

脉冲磁场的测量是电磁脉冲研究领域的重点之一^[1-6]。目前, 脉冲磁场传感器的发展迅速, 其中, 屏蔽小环磁场传感器因其结构简单、性能可靠, 特别是对于中低频信号的测量精度较高而备受关注。但是磁偶极子天线的输出端结构破坏了天线的对称性由于磁偶极子天线不可避免地存在输出端结构, 破坏了天线的对称性, 因此对于多极性的电磁脉冲环境测量通常很难满足测量要求, 极易被径向电场干扰导致磁场波形失真^[7]。尤其是对雷电回击、高空核爆的近场磁场测量, 现有的脉冲磁场传感器很难避免电场干扰^[8]。因此, 本文研制了一种基于双环差分结构的脉冲磁场传感器, 通过构造差分结构可以去除绝大部分径向电场响应分量, 从而获得了较为纯净的磁场响应,

* 收稿日期: 2021-07-31; 修订日期: 2021-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005509); 江苏省自然科学基金项目(BK20200586)

联系方式: 王 可, wk4emp@qq.com。

通信作者: 段艳涛, dcmchdyt@126.com。

实现了对雷电近场环境的准确测量。

1 双环差分测量原理

在电气小条件下,磁偶极子天线可由激励源和等效的集总电感表示,因此单环磁场传感器的等效电路如图1所示^[9]。其中 L 为磁偶极子的等效集总电感, Z_L 为负载阻抗, ω 为测得的磁场信号的频率, B_i 为入射磁场的磁感应强度。小环天线将被拾取磁场强度部分作为激励源,则磁场响应的大小和方向取决于入射磁场和传感器的灵敏度。此时传感器的灵敏度可以用等效面积 A_e 表示。激励源具有电压量纲,其拾取量可以表示为 $\frac{\partial B_i}{\partial t} \cdot A_e$ 。

则负载电压 V_L 可以表示为

$$V(j\omega) = \frac{j\omega A_e Z_L}{j\omega L + Z_L} B(j\omega) \quad (1)$$

由式(1)可知,根据磁偶极子天线的工作频率范围,磁场传感器可以分为微分模式,过渡模式和自积分模式^[10]。当 $Z_L \gg \omega L$, 单环传感器的负载电压 V_L 与微分磁场成正比,可表示为

$$V_L = A_e \cdot \frac{\partial}{\partial t} B \quad (2)$$

感应近场条件下,交变电场和交变磁场在相位上正交,因而在磁场测量中极易受到电场干扰。在屏蔽小环天线的基础上引入双环差分结构,即将两个相同的屏蔽小环天线平行镜像对称放置,如图2所示。同时将增大环天线的匹配阻抗从而减小环间互扰带来的不利影响。其中, E, H 分别表示入射的脉冲电场和脉冲磁场分量,用下标1和2对双环进行区分,并将其输出端电压 U 按照贡献来源不同分为 U_E 和 U_H , 分别表示电场和磁场响应的贡献。

根据电磁感应原理,则有

$$\begin{cases} U_1 = U_{E1} + U_{H1} \\ U_2 = U_{E2} + U_{H2} \end{cases} \quad (3)$$

两个开路截断的屏蔽小环天线镜像对称放置时,由于轴向磁通量反向而径向电通量相同,则双环天线的磁场响应电压分量应反相,而电场响应分量方向相同。则有

$$U_1 - U_2 = U_{H1} - U_{H2} = 2U_H \quad (4)$$

联立式(2),(4)可知,差分后的输出电压即为的微分磁场与天线等效面积乘积的2倍,且并不包含电场响应分量。

2 双环式差分磁场传感器的设计与实现

基于双环差分测量原理,本文提出一种脉冲磁场传感器如图3所示,图3(a)为工作原理图,图3(b)为实物图。传感器主要由双环天线、光传输系统组成,光传输系统又由光发射机、光纤和光接收机组成。双环天线的输出端分别与光发射机的输入端连接,光发射机的输出端与光接收机的输入端通过光纤连接,光接收机的输出端接入示波器即可实现磁场测量。

由式(2)可知,环天线的输出电压与磁场微分成正比。为了得到可直接观测的磁场波形,每一个环天线的输出端串联了一个 RC 积分电路,在光发射机内完成电压信号的积分运算;其次,利用差分电路把两个积分磁场信号差分以去除电场响应分量,可以实现纯净磁场信号的输出。

2.1 双环天线

双环天线由两个屏蔽小环天线组成,主要负责将分布的磁场参量转换成终端电压。小环天线由一段弯成环形

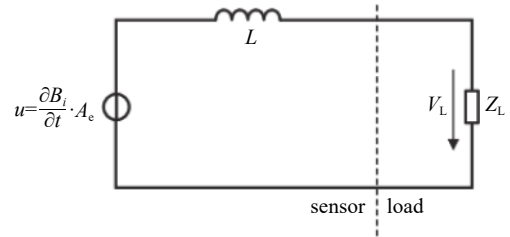


Fig. 1 Equivalent circuit of single loop magnetic field sensor
图1 磁偶极子天线等效电路

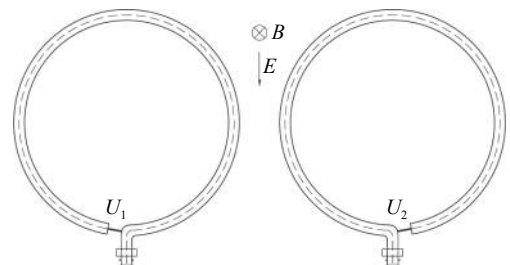


Fig. 2 Schematic diagram of dual-loop differential principle
图2 双环差分原理示意图

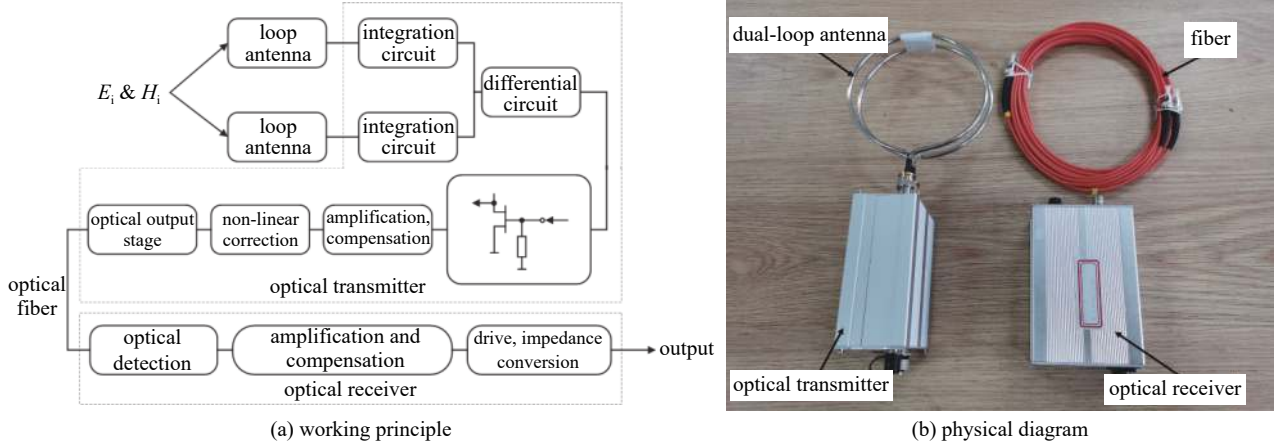


Fig. 3 Dual-loop differential magnetic field sensor
图3 双环式差分磁场传感器

的半钢同轴电缆制成，左半环末端的内导体与右半环屏蔽层短路焊接。为了便于拆装，测试用的小环天线与光发射机之间选择 BNC 接口连接。

双环天线应当选择两个尺寸相同的环天线，根据式(2)可知，单环传感器的量程由负载电压 V_L 和环天线的等效面积 A_e 的范围共同决定。其中，负载电压 V_L 主要由光发射机的输入电压等级决定；等效面积 A_e 则主要与环天线半径 r 有关，在进行初步估算时，可以近似认为 $A_e = \pi r^2$ 。

同时，双环天线之间应保证镜像对称放置条件且保持适宜的环间距 L 。其中镜像对称是差分计算的基本前提，而环间距是影响环间互扰的主要因素之一。当 L 过小时，双环天线互扰加剧；当 L 过大时，两个环天线所处的磁场环境不同，差分后引入误差。因此，应当在互扰程度可接受的前提下取较小的环间距。

针对选定的天线尺寸，为了匹配合适的环间距，本文利用 CST Studio 进行仿真计算，其仿真设置如图 4 所示。首先，利用一个环天线作为标准环，测得标准环在 1.2/50 μ s 双指数标准雷电波下的响应波形，记为标准波形；其次，在相同场环境中于相距标准环距离 L 处增加一个镜像放置的干扰环后，测得标准环上的响应波形，记为干扰波形。

为了评估环间距对互扰程度的影响，本文提出一种综合失真率 ε ，用以表征双环天线的互扰程度大小，其计算公式给出如下

$$\varepsilon = \varepsilon_u + \varepsilon_t \quad (5)$$

式中： ε_u 为幅值失真率，用以表征测量波形相较于标准波形在幅值上的失真程度； ε_t 为时间失真率，用以表征测量波形相较于标准波形在上升时间和半宽时间上的失真程度。

$$\varepsilon_t = |T_{1i} - T_{1s}|/2T_{1d} + |T_{2i} - T_{2s}|/2T_{2d} \quad (6)$$

$$\varepsilon_u = |U_i - U_s|/U_d \quad (7)$$

式中： U_s 、 U_i 分别为标准波形和干扰波形的幅值； U_d 表示标准波形与干扰波形之间的幅值差的绝对值； T_{1s} 、 T_{1i} 分别为标准波形和干扰波形的上升时间； T_{1d} 表示标准波形与干扰波形之间的上升时间差的绝对值； T_{2s} 、 T_{2i} 分别为标准波形和干扰波形的半宽时间； T_{2d} 表示标准波形与干扰波形之间的半宽时间差的绝对值。

互扰仿真时取环直径为 10 cm，共设置五组不同的环间距 L ，分别为 1, 3, 5, 7, 9 cm。仿真结果见表 1。由表 1 可以看到，当环间距小于 5 cm 时，综合失真率 ε 大于 5%。综合考虑，当 $r=10$ cm 时，取 $L=5$ cm。最后，根据确定的环半径和

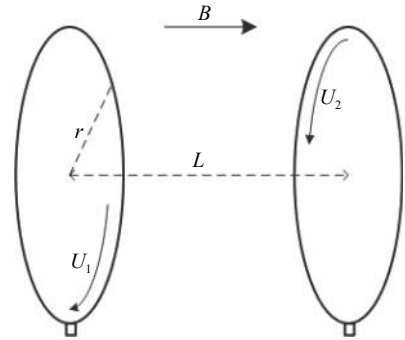


Fig. 4 Mutual interference analysis of dual-loop antenna
图4 双环天线互扰分析示意图

表 1 仿真结果

Table 1 Results of simulation

L/cm	$\varepsilon_u/\%$	$\varepsilon_t/\%$	$\varepsilon/\%$
1	10.52	2.58	13.11
3	4.63	2.20	6.83
5	3.27	1.77	4.45
7	0.78	1.51	2.29
9	0.63	1.44	2.07

环间距,制成固定模具,用于保持双环天线相对位置固定。

2.2 光传输系统

脉冲磁场的测量通常伴随着复杂的变化的电磁环境,为了避免传输过程中的干扰,目前常用的是基于光电隔离技术的光传输解决方案^[11-13]。本文采用的光传输系统主要由光发射机、单模光纤、光接收机组成。

光发射机用于将输入的磁场微分电信号转换为输出的差分磁场光信号,在其内部依次完成输入信号的积分、差分、放大、非线性补偿、滤噪、电光转换,最终实现光信号的输出。

光发射机内置两块 8.4 V 锂电池,可以实现 ± 8.4 V 直流供电。另外,光发射机采用铝制外壳,以保护信号在其内部传递不受干扰,同时严格限制孔缝结构,使其可以在强电磁场中工作。经试验验证,其屏蔽效能超过 80 dB。

单模光纤用于连接光发射机和光接收机,其长度可以根据所需布线长度而调整。通常利用光纤衰减系数来评估光纤对光信号功率的衰减。对于单模光纤,光纤衰减系数通常取 0.18 dB/km^[14]。

光接收机通常置于屏蔽良好的室内或者屏蔽柜工作,其输入端通过 ST 接口与光纤相连,输出端可以通过 BNC 接口与示波器等采集设备相连。光接收机用于实现磁场光信号到磁场电信号的转换,光信号在其内部经由光电转换、放大、补偿、阻抗转换模块,最终在其输出端复现出光发射机输入级的电信号。

3 试验验证与结果分析

本文中,我们提出了双环差分测量原理,并设计研制了一种用于近场测量的脉冲磁场传感器,这种新型的磁场传感器,相较于传统的单环传感器具有较强的抗干扰能力,特别是在强电场环境中,能够实现对磁场的准确测量。同时,双环差分结构可以适用于多种环天线,从而匹配不同磁场环境的测量要求,因此在脉冲磁场测量领域有着较为广泛的应用前景。

依据国军标 GJB1389A,在实验室搭建了一套邻近雷击环境模拟装置^[15],如图 5 所示。模拟装置主要由 Marx 发生器,场照射器,截断装置和电容分压器组成。其中,Marx 发生器用于产生 1.2/50 μs 标准雷电波冲击高压;场照射器用于承载被测物并产生相对均匀的电磁脉冲环境;截断装置用于产生截断脉冲高压,形成陡峭的下降沿;电容分压器用于接地系统的高压测量^[16]。

由于场照射器采用平行板式,因此在正负电极两端存在巨大瞬时电位差,导致在垂直方向存在强大的瞬变电场。在利用传统单环磁场传感器测量水平磁场时,即使采取较好的屏蔽手段也极易出现测量结果被干扰的现象,因此考虑采用双环差分结构去除电场响应分量,从而实现磁场的准确测量。

对比图 6 三个波形可以看到:(1)单环测量波形在 0.4~1.5 μs 之间存在着强烈的干扰,与双环测量波形在波形前端并不吻合;(2)单环测量波形前端的干扰在 1.5 μs 之后消失,与双环测量波形在波形后端基本吻合;(3)CST 仿真波形前端与双环天线相似且并不存在振荡分量;(4)三个波形在波形后端具有很高的-致性,基本符合被测磁场环境。

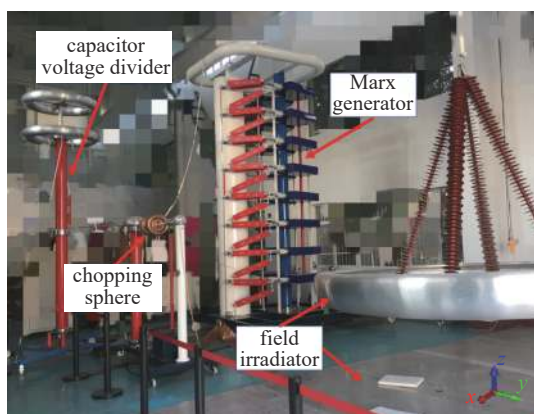


Fig. 5 Mutual interference analysis of dual-loop antenna

图 5 邻近雷击环境模拟装置

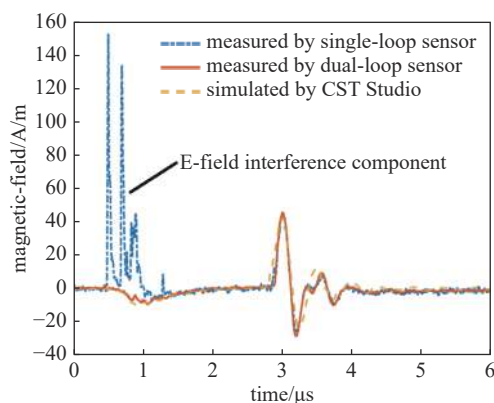


Fig. 6 Comparison of magnetic field measurement results

图 6 磁场测量结果对比图

综上所述,单环测量波形在 0.4~1.5 μs 之间的波形畸变显然不是磁场响应而应该是电场干扰,可能是由于截断装置击穿空气间隙时产生的高能快速变化的电场导致。对比单环测量和双环测量结果可以看到,双环测量波形通过差分去除了这部分干扰分量从而得到了较为纯净的磁场响应。因此,试验和仿真结果可以证明,双环传感器

相较于传统的单环传感器具有更强的抗干扰能力。

4 结 论

本文提出了双环差分测量原理,并设计研制了一种用于近场测量的脉冲磁场传感器,这种新型的磁场传感器,相较于传统的单环传感器具有较强的抗干扰能力,特别是在强电场环境中,能够实现对磁场的准确测量。同时,双环差分结构可以适用于多种的环天线,从而匹配不同磁场环境的测量要求,因此在脉冲磁场测量领域有着较为广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 潘启军, 马伟明, 赵治华, 等. 磁场测量方法的发展及应用[J]. *电工技术学报*, 2005, 20(3): 7-13. (Pan Qiming, Ma Weiming, Zhao Zhihua, et al. Development and application of measurement method for magnetic field[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2005, 20(3): 7-13)
- [2] 闫哲, 毕晓亮, 杨嘉祥. 电磁脉冲模拟器电磁场计算[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(2): 249-254. (Yan Zhe, Bi Xiaoliang, Yang Jiexiang. Electromagnetic field calculation of electromagnetic pulse simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(2): 249-254)
- [3] 王伟, 石跃武, 聂鑫, 等. 快前沿脉冲磁场测量系统研制[J]. *高电压技术*, 2020, 46(6): 2209-2218. (Wang Wei, Shi Yuewu, Nie Xin, et al. Development of magnetic field measuring system for fast risetime pulse[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(6): 2209-2218)
- [4] 曹荣刚, 邹军, 袁建生. 脉冲功率电源辐射电磁场测量与分析[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(9): 1426-1430. (Cao Ronggang, Zou Jun, Yuan Jiansheng. Measurement and analysis of EMF around pulsed power supplies[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(9): 1426-1430)
- [5] Weiss R, Itzke A, Reitenspiß J, et al. A novel closed loop current sensor based on a circular array of magnetic field sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(7): 2517-2524.
- [6] Lenz J, Edelstein S. Magnetic sensors and their applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006, 6(3): 631-649.
- [7] 中国电子产品可靠性与环境试验研究所: 差分磁场探头, 201910092916.7[P]. 2019-04-19. (CEPREI: Differential magnetic field probe, 2019-04-19)
- [8] 周璧华, 陈彬, 石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. (Zhou Bihua, Chen Bin, Shi Lihua. EMP and EMP protection. Beijing: National Defense Industry Press, 2003)
- [9] 王莹. 脉冲功率科学与技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010. (Wang Ying. Science and technology on pulsed power. Beijing: Beihang University Press, 2010)
- [10] 张海霞, 赵英俊, 杨叔子. 脉冲磁场传感器的理论计算与检测[J]. *仪表技术与传感器*, 1997(6): 8-11. (Zhang Haixia, Zhao Yingjun, Yang Shuzi. Theoretical calculation and pick-up method of induction magnetic sensors[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 1997(6): 8-11)
- [11] 梁可道, 米彦, 李成祥, 等. ns级脉冲磁场传感器的研制[J]. *高电压技术*, 2009, 35(8): 1994-1999. (Liang Kedao, Mi Yan, Li Chengxiang, et al. Development of a nanosecond pulsed magnetic field sensor[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(8): 1994-1999)
- [12] 孔旭, 谢彦召. 基于光纤技术的电磁脉冲3维电、磁场测量系统[J]. *高电压技术*, 2015, 41(1): 339-345. (Kong Xu, Xie Yanzhao. Electric field and magnetic field measuring system for EMP measurement based on fiber technology[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(1): 339-345)
- [13] 李炎新, 石立华, 高成, 等. 用宽带模拟量光纤传输系统测量脉冲电磁场[J]. *高电压技术*, 2006, 32(2): 34-36. (Li Yanxin, Shi Lihua, Gao Cheng, et al. Measurement of pulse electromagnetic field using wide band fiber optic analogue transmission system[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(2): 34-36)
- [14] 梁猛, 刘崇琪, 杨祎. 光纤通信[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015. (Liang Meng, Liu Congqi, Yang Yi. Optical fiber communications. Beijing: Posts and Telecom Press, 2015)
- [15] GJB 1389A-2005: 系统电磁兼容性要求[S]. (GJB 1389A-2005: System electromagnetic compatibility requirements[S])
- [16] 王可, 段艳涛, 石立华, 等. 邻近雷击电场环境模拟装置的设计与实现[J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(5): 119-123. (Wang Ke, Duan Yantao, Shi Lihua, et al. Design and realization of a nearby lightning-electric field environment simulator[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(5): 119-123)