文章编号:1674-2974(2024)08-0219-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024192

爆炸场强电磁辐射测试系统设计

崔元博[1],孔德仁[2†]
(1. 中国计量大学 计量测试与仪器学院, 浙江 杭州 310018;
2. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要:针对高能战斗部爆炸电磁辐射信号频段宽、变化幅度大、持续时间长、测试条件复杂等特点,设计基于混频天线的爆炸场强电磁辐射测试系统.设计4种测试天线:短波天线(1.5~30 MHz)、超宽带天线(30~1 000 MHz)、微带天线(5.9~6.0 GHz、8.4~8.5 GHz),通过优化天线结构、增加匹配电路提高测试效能,能够覆盖军械装备所有电磁敏感频段.采用模块化思路设计具有合路器、放大器、限幅器、滤波器等功能的信号调理器,放大器模块采取"固定增益放大器+步进式衰减器"结构,不仅实现全频段0~30 dB调节,同时将调节系统精度提升至0.5 dB,限幅器模块将采样信号功率限制在数采仪器最大承受功率的65%以下,极大提高测试系统对爆炸场强电磁信号的适应能力.通过采取混频段天线合路、高精度系数调节、多功能信号调理等技术手段,使测试系统满足高能战斗部爆炸电磁辐射测试试验所有指标.

关键词:高能战斗部;爆炸电磁场;宽带天线;微带天线;信号调理器
中图分类号:TN98;TH89 **文献标志码**:A

Design of High Intensity Electromagnetic Radiation Measurement System in Explosive Field

CUI Yuanbo[1], KONG Deren[2†]
(1. College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of the explosive electromagnetic radiation signal of high-energy warhead, such as wide frequency band, large change amplitude, long duration and complex measurement conditions, a measurement system of explosive electromagnetic radiation based on mixing antenna is designed. Four kinds of measuring antennas are designed: short-wave antenna (1.5~30 MHz), ultra-wideband antenna (30~1 000 MHz), microstrip antenna (5.9~6.0 GHz, 8.4~8.5 GHz). By optimizing the antenna structure and adding matching circuits, the measurement efficiency is improved, which can cover all electromagnetic sensitive frequency bands of ordnance equipment. The signal conditioner with many functions is designed by adopting a modular approach, which includes combiner, amplifier, limiter and filter. The amplifier module adopts the structure of "fixed gain amplifier & step attenuator", which not only realizes the adjustment of 0~30 dB in the full frequency band, but also improves the

* **收稿日期**:2023-06-12
基金项目:中央军委装备发展部装备项目(995-14021006010401), Equipment Development Department of Central Military Commission (995-14021006010401)
作者简介:崔元博(1991—),男,江苏宿迁人,中国计量大学讲师,工学博士
† 通信联系人,E-mail: derenkong@hotmail.com

accuracy of the adjustment system to 0.5 dB. The limiter module limits the sampling signal power to less than 65% of the maximum withstand power of the data acquisition instrument, which improves the adaptability of the measurement system to the electromagnetic signal of explosion field strength. The measurement system can meet all the indexes of high-energy warhead explosion electromagnetic radiation measurement by adopting such technical means as mixed-band antenna combination, high-precision coefficient adjustment, and multi-function signal conditioning.

Key words: high-energy warhead; explosive electromagnetic field; broadband antenna; microstrip antenna; signal conditioner

如今世界军事强国基本都完成了从机械化到电子信息化的转型,而这种转型几乎全是靠着电器技术和微电子集成电路的技术参与实现的.武器系统的电子信息化程度不断提高,也大大提高了战场电子装备的电磁敏感度.随着含能材料和高能战斗部的发展,弹药的当量和爆炸毁伤威力不断增大,爆炸电磁辐射对电子装备的干扰问题越来越凸显.研究战斗部爆炸电磁辐射对电子装备干扰问题,有必要厘清爆炸电磁辐射的特性和规律.爆炸产生电磁辐射是一个非常复杂的过程,受到很多不可控因素影响,数值仿真难以给出与试验匹配的结果,因此爆炸电磁辐射测试试验是必要的研究手段[1-4].

国内外科研人员对爆炸电磁辐射进行了数十年的测试试验,爆炸电磁辐射测量主要采取“天线-同轴线缆-示波器”的测量方式,测试对象是TNT、RDX、HMX、B炸药、RDX基含铝炸药、铝镁混合物和战斗部等,测试场所大部分为开放场地,少数情况为封闭空间,被测炸药质量最小10 g,最大345 kg,大部分范围是0.1~1 kg[5-10].由于被测炸药质量普遍较小,毁伤威力有限,所以天线距离被测炸药间距普遍在2~10 m,天线至数据存储仪器距离在5~20 m范围.天线绝大多数采用喇叭天线[11],其次是杆式天线[12],也有使用光导传感器和磁感应线圈等方式[13].天线尺寸在30~200 cm之间,离地面安置1 m左右,天线阻抗除极个别采用30 Ω,其余全部是50 Ω.天线接收频率最小仅80 kHz,最大4 GHz,大部分接收频率在10~1 000 MHz范围.数据记录设备基本采用示波器,最大采样率达2.5 GSa/s,采样频率范围0.2~1 000 MHz,数据记录时间短至0.3 μs,长至100 ms,平均记录时间1~10 ms.天线与示波器之间一般采用同轴线缆连接,使用最多的型号是SYV50-5系列,偶有使用RK-1线缆,大部分情况直接连接,也有使用信号调理器调节信号,线缆阻抗基本为50 Ω[14-17].

目前爆炸电磁辐射测试系统主要适用于小当量弹药试验测试,小当量弹药爆炸电磁信号变化幅度小,不需要前端信号调理,大多采用“天线-同轴线缆-示波器”结构;小当量炸药爆炸电磁辐射持续时间短,数据采集仪器平均记录时间范围为1~10 ms;小当量炸药爆炸威力较小,产生的冲击波或热流一般不会对测试仪器造成损伤,爆炸场测试范围约10~30 m,由于信号传输线缆较短,不需要考虑信号传输衰减等因素[18-20].高能战斗部爆炸场环境较为复杂,测试条件不容易控制,高能战斗部爆炸电磁信号变化幅度较大,需要进行信号高精度系数调节以及数据采集仪器功率过载保护;高能战斗部爆炸电磁辐射持续时间长,比如云爆战斗部二次起爆引信延时可超过500 ms,所以数据采集仪器记录时长至少达到600 ms;高能战斗部爆炸场测试范围超过100 m,信号传输线缆较长,信号传输衰减大,这些因素对电磁测试系统设计提出了较高要求[21-23].

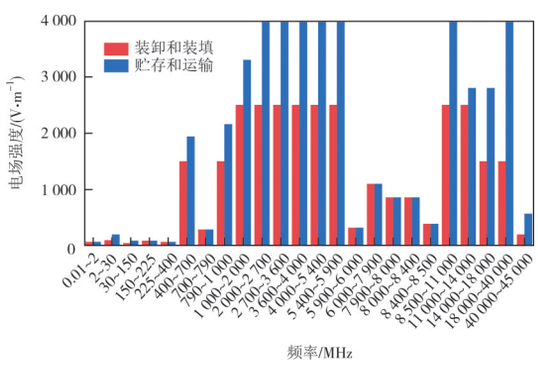
针对以上问题,本文设计了基于混频天线的爆炸场强电磁辐射测试系统,通过信号调理器解决电磁信号超量程、数据采集仪器易过载、信号传输损耗大等问题,适用于爆炸场环境下的高强度电磁辐射测量.

1 天线设计

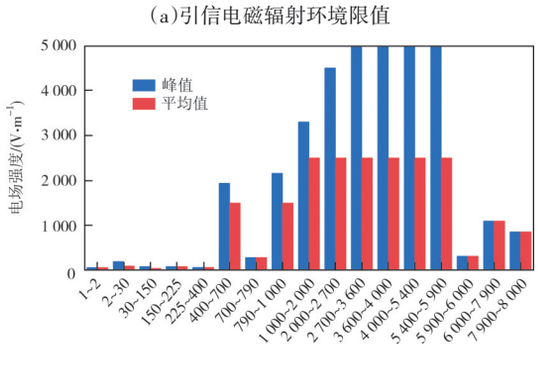
1.1 测试频段

测试频段是天线设计的首要指标,我国军方制定了战场电磁辐射环境对电子装备限制的强制执行标准,选取《系统电磁兼容性要求》(GJB 1389A—2005)和《引信电子安全与解除保险装置电磁环境与性能试验方法》(GJB 7073—2010)中的数据如图1所

示[24-25],图 1(a)表示引信装卸装填和贮存运输电磁环境限值随频率变化情况,图 1(b)表示军械危害外部电磁环境限值随频率变化情况.由图可知,在 0.01~400 MHz 频段,引信电磁辐射环境上限均不超过 100 V/m,军械外部电磁环境上限(均峰值)全部在 200 V/m 以下.超过 400 MHz 后,引信或军械的电磁辐射限值大幅上升,但是在 5.9~6.0 GHz、8.4~8.5 GHz 和 40~45 GHz 三个频段环境限值较低,电子装备更容易受到 0.01~1 GHz 频段的电磁辐射影响.因此,500 MHz 以下的低频段是军用装备最敏感的电磁频段,爆炸电磁辐射本质是等离子体性质变化产生电磁效应,非调制电磁信号频率几乎无法达到 20 GHz,目前文献尚无爆炸电磁辐射频率超过 20 GHz 的研究记录[26].综上,天线测试频段 0.01~500 MHz 符合爆炸场电磁辐射研究基本要求,为了防止信号遗漏,同时考虑军用电子设备抗干扰设计要求,本文将天线设计频段扩展至 1.5~1 000 MHz、5.9~6.0 GHz、8.4~8.5 GHz.



(a)引信电磁辐射环境限值



(b)军械危害外部电磁辐射环境限值

图 1　军械电子装备电磁辐射环境限值

Fig.1　Electromagnetic radiation environmental limit for military electronic equipment

1.2　宽带天线设计

在工程应用中测试天线尺寸 L 和电磁波长 λ 需满足:$L\geqslant\lambda/4$,现有研究条件下 1.5 MHz 是本文设计天线所能达到的最低频率.如果使用一根天线覆盖 1.5~1 000 MHz 频段,频程将达到 1 G/1.5 M=666.67 倍,远超出偶极子天线 20~30 倍的设计范围,因此以 30 MHz 频率为分界点,将 1.5~1 000 MHz 频段分为 1.5~30 MHz 和 30~1 000 MHz 两个设计频段.由于爆炸电磁辐射从爆心向四周扩散传播过程存在不均匀性,传播方向并不特定集中,因此采用短波全向天线测试 1.5~30 MHz 频段电磁波,采用内部为双锥结构的超宽带天线测试 30~1 000 MHz 频段电磁波,短波天线和超宽带天线设计模型及结构尺寸如图 2(a)所示.

1.5 MHz 频率的电磁波波长为 200 m,天线设计尺寸至少达到 50 m,短波天线设计尺寸仅为 1.92 m,超宽带天线频程(1 GHz/30 MHz=33.3 倍)偏高,这些因素将导致天线处于全反射状态,因此增加匹配电路使天线满足使用要求.

短波天线和超宽带天线匹配电路设计如图 2(b)所示,短波天线匹配电路 Term_2 端口阻抗 Z=(1.7-j1 348.1) Ω,由于短波天线测试频段(1.5~30 MHz)过低,端口阻抗的电阻(实部 1.7)过低,容抗(虚部 1 348.1)过高,因此在匹配电路中设计一个 10 kΩ 假负载 R_2,用于积蓄电磁辐射能量,增强天线接收能力;同时设计两级射频变压器(XFM_1 和 XFM_2)+LC 匹配电路,用于将端口阻抗调理至天线阻抗 50 Ω.超宽带天线匹配电路设计思路与短波天线相同,但是超宽带天线测试频段(30~1 000 MHz)较高,Term_4 端口阻抗 Z=(14.73- j39.47) Ω 中电阻和容抗值相对天线阻抗差值较小,因此只设计了一级射频变压器.短波天线和超宽带天线 S 参数测试值分别如图 2(c)和(d)所示,在设计频段内,短波天线 S 参数均低于-12 dB,超宽带天线 S 参数达到了小于-10 dB 的要求,增加匹配电路后,天线接收效率得到了较大提升.

1.3　微带天线设计

5.9~6.0 GHz 和 8.4~8.5 GHz 测试频段的带宽为 100 MHz,分别占测量总频率的 1.67% 和 1.17%,微带天线作为一种高频窄带天线完全满足测量需求,并且微带天线尺寸小、安装方式灵活多样,可以直接贴片在超宽带天线罩上,适合爆炸场环境测量,因此采用微带天线测试 5.9~6.0 GHz 和 8.4~8.5 GHz 频段电磁辐射.

本文采用侧馈直接接触型馈电天线设计,通过凹型馈电结构进行天线阻抗匹配.天线单元模型和结构模型如图 3 所示,为了提高天线增益,微带天线采用 1×2 阵列式设计,使用 T 型功分器进行馈电.贴片长宽分别是 L_{pa} 和 W_{pa},贴片间距为 O_{p},辐射缝隙尺

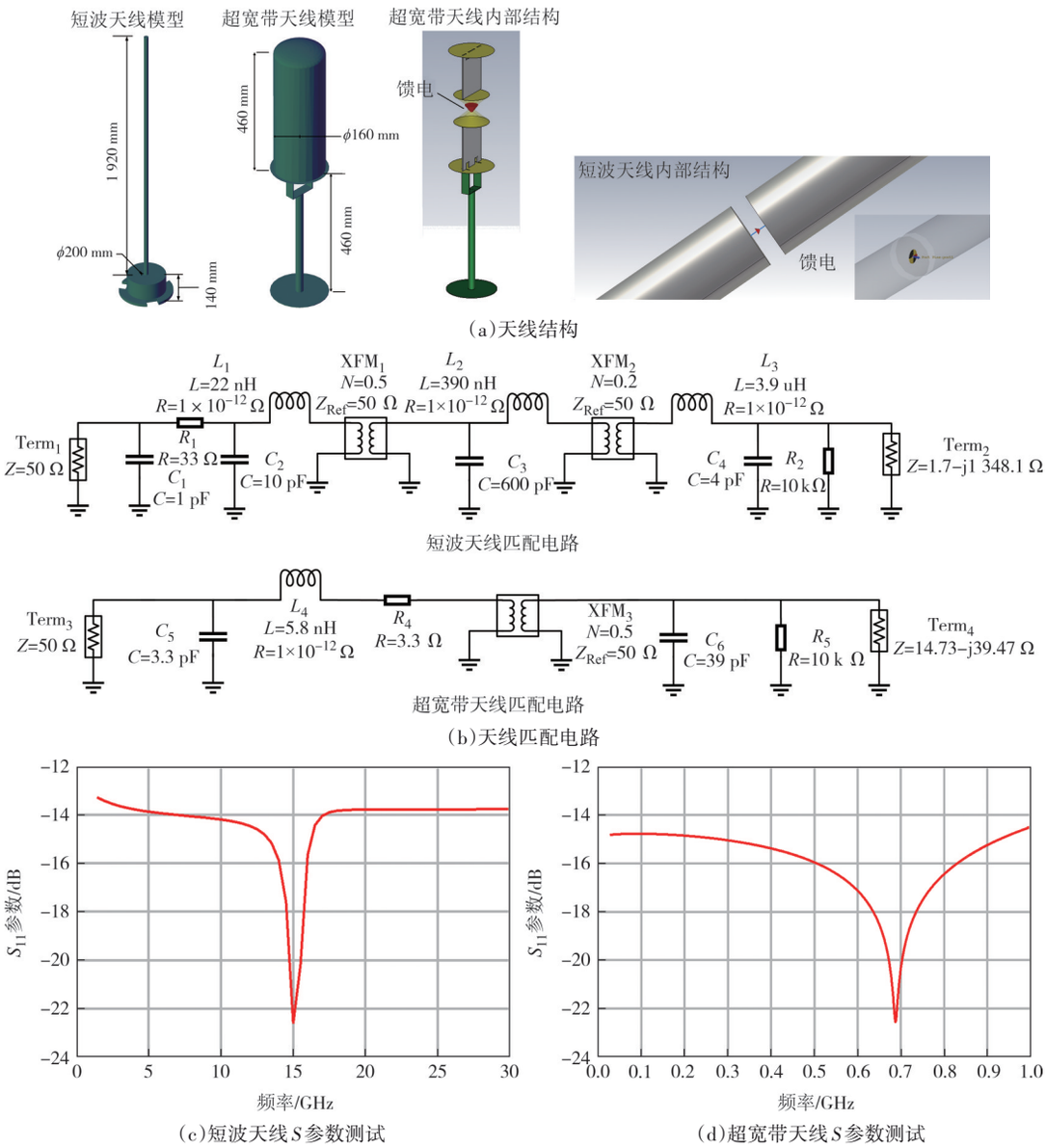
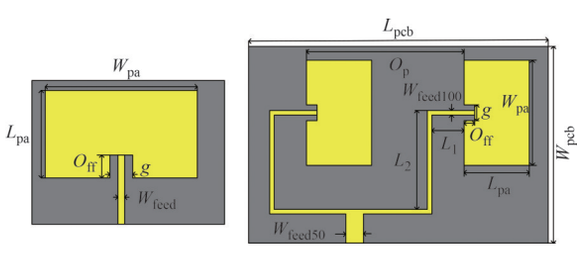


图 2 短波天线及超宽带天线设计

Fig.2 Design of short-wave antenna & ultra-wideband antenna

寸是 g 和 O_{ff}，馈线长度为 L_2，馈线至贴片距离为 L_1，馈线宽度 W_{feed} 为 0.8 mm，W_{feed50} 为 3 mm，天线基板为厚度 1.524 mm 的 Rogers 4003C，长宽分别是 L_{pcb} 和 W_{pcb}，介电常数为 3.55.



(a)单元模型 (b)结构模型

图 3 微带天线设计参数

Fig.3 Design parameters of microstrip antenna

微带天线工作在基模的谐振频率与贴片 L_{pa} 和 W_{pa} 相关，其中 L_{pa} 对谐振频率影响最大，L_{pa} 理想值一般为工作波长的 1/2，W_{pa} 对贴片天线频率影响较小，但是 W_{pa} 参数过宽可能引起高次模，因此根据本文微带天线设计频段，设置贴片初始值为 L_{pa1}=11.8 mm，W_{pa1}=20 mm，L_{pa2}=8.05 mm，W_{pa2}=13 mm. 由于采用一分二 T 型功分器结构，馈电微带阻抗设置为 100 Ω，微带天线阻抗随馈电点向中心移动而减小，需对贴片尺寸和微带天线结构模型尺寸参数进行优化求解.

寻优过程如表 1 所示，在 L_{pa}=12.4 mm 时 5.9~6.0 GHz 微带天线 S 参数达到 −10 dB 以下，在 L_{pa}=8.65 mm 时 8.4~8.5 GHz 微带天线 S 参数达到 −10 dB 以下. 微带馈电深入贴片的距离 O_{ff} 是影响阻抗匹配

的主要参数,两个天线单元之间距离O_p设置略大于1/2波长,以满足天线方向图和增益需求,一分二T型功分器输入端口50 Ω,输出端口100 Ω,已实现阻抗匹配.表1中S_{11}为两种微带天线设计频段中值(5.95 GHz和8.45 GHz)对应的S参数值,表中数据反映了L_{pa}和O_{ff}两个主要参数对天线S参数的影响,5.9~6.0 GHz天线和8.4~8.5 GHz天线第3组优化尺寸可以使S参数在工作频段中值达到-35.7 dB和-25.7 dB,由此可以得到两种微带天线的最佳设计尺寸.

表1　微带天线尺寸参数优化

Tab.1　Parmeter size optimization of microstrip antenna

组别	5.9~6.0 GHz微带天线/mm									S_{11}/dB
	L_{pa}	O_{ff}	W_{pa}	L_1	L_2	L_{pcb}	O_p	W_{pcb}	g	
1	11.8	1.50	20	6.13	18.26	60	30	45	3	−2.7
2	12.1	1.75	20	6.13	18.26	60	30	45	3	−5.9
3	**12.4**	**2.00**	**20**	**6.13**	**18.26**	**60**	**30**	**45**	**3**	**−35.7**
4	12.7	2.25	20	6.13	18.26	60	30	45	3	−6.4
5	13.0	2.50	20	6.13	18.26	60	30	45	3	−3.2
组别	8.4~8.5 GHz微带天线/mm									S_{11}/dB
	L_{pa}	O_{ff}	W_{pa}	L_1	L_2	L_{pcb}	O_p	W_{pcb}	g	
1	8.05	1.75	13	4	9.6	41.4	20	24.1	3	−4.5
2	8.35	2.00	13	4	9.6	41.4	20	24.1	3	−7.4
3	**8.65**	**2.25**	**13**	**4**	**9.6**	**41.4**	**20**	**24.1**	**3**	**−25.7**
4	8.95	2.50	13	4	9.6	41.4	20	24.1	3	−8.1
5	9.25	2.75	13	4	9.6	41.4	20	24.1	3	−5.0

2　信号调理器设计

2.1　总体架构设计

天线设计完成后无法再调整增益参数,高能战斗部爆炸产生的电磁信号幅度跨度很大,理想的采样信号幅值应占数据采集仪器总量程65%左右,因此需要使用信号调理器调节电磁信号幅度:对强电磁信号限幅,防止采样信号超出数据采集仪器量程;对弱电磁信号放大,防止采样信号较弱而影响信号分析.如果每根天线连接一个采样通道,会占用较多的数据采集通道,因此信号调理器需要设计合路器功能,将多个信号合成一个输出信号,减少数据采集仪器的资源占用;为了防止过高的信号功率损坏数据采集仪器电路,信号调理器需要具备限幅器功能;信号调理器应增加滤波器功能,滤除非测试频段的干扰信号,提高采样信号质量.综上,需要设计一个具有合路器、放大器、限幅器、滤波器四种功能的信号调理器.

本文设计的天线接收频率范围从1.5 MHz至8.5 GHz,除了放大器和衰减器模块可以覆盖全频段,合路器模块、限幅器模块、滤波器模块都无法覆盖1.5 MHz至8.5 GHz频段跨度.针对此问题采取措施:将4根测试天线分为两组,短波天线和超宽带天线为低频组,频率范围1.5~1 000 MHz;两个微带天线为高频组,频率范围5.9~8.5 GHz.信号调理器则设计低频和高频两组调理器电路,如图4所示,低频电路频段为1~1 000 MHz,高频电路频段为4~10 GHz,这样可以满足天线端口采样信号全频段调理需求.

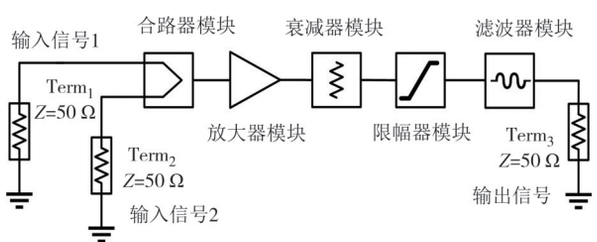


图4　信号调理器总体架构

Fig.4　Architecture of signal conditioner

信号调理器采用模块化设计思路,低频信号和高频信号调理器电路的功能模块排序相同,依次为合路器模块、放大器模块、衰减器模块、限幅器模块、滤波器模块,各功能模块设计方案如表2所示.

表2　信号调理器功能模块

Tab.2　Signal conditioner function module

功能模块	频率/通带范围	电路结构/主要芯片	作用
合路器(低频)	1~1 000 MHz	LC电路	天线输出低频信号合成
合路器(高频)	4~10 GHz	微带线结构	天线输出高频信号合成
放大器	0.01~10 GHz	HMC460LC5	30 dB固定增益
衰减器	DC~13 GHz	HMC424ALH5	0~31.5 dB步进式衰减
限幅器(低频)	0.3~3000 MHz	RLM-33-2W+	限制低频信号功率
限幅器(高频)	0.3~8.5 GHz	CLM-83-2W+	限制高频信号功率
滤波器(低频)	0~1 GHz	LC电路	滤除高频信号
滤波器(高频)	5.9~8.5 GHz	微带线结构	滤除低频信号

2.2 功能模块设计

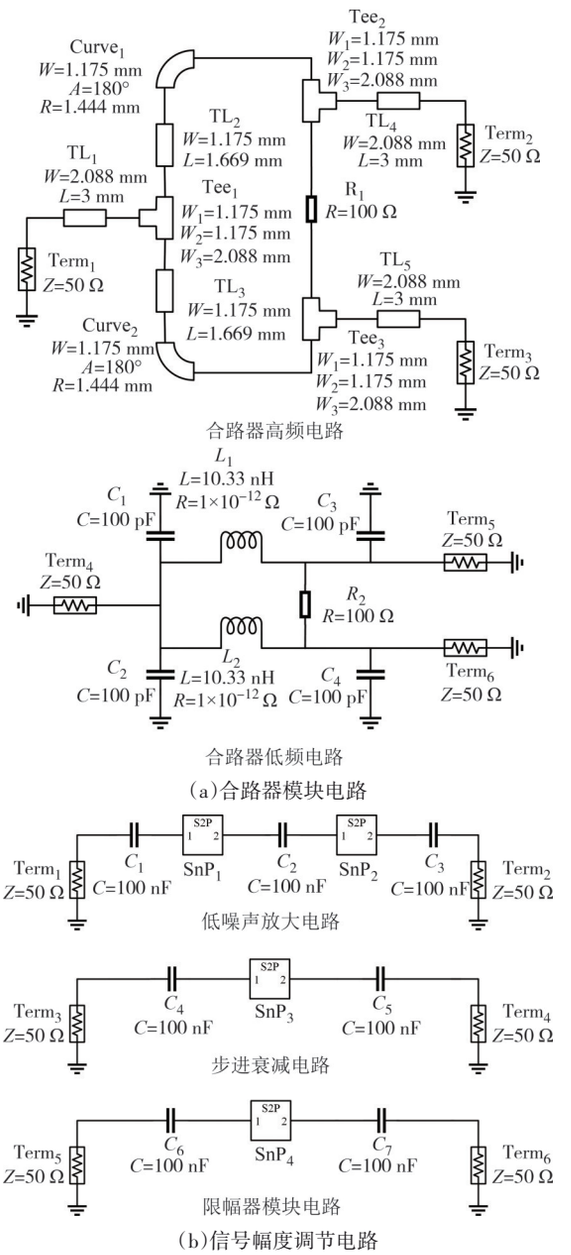
合路器模块电路设计如图5(a)所示,低频电路调理信号频率在1 GHz以下,若采用微带线结构电路需要满足封装尺寸超过1/2波长,1 GHz以下频段信号调理电路封装尺寸需要达到1 m,无法适应爆炸场测试条件,因此低频电路采用LC电路结构;高频电路采用典型威尔金森架构的微带线电路结构,由于高频调理信号频率在5 GHz以上,因此可以将封装尺寸限制在$0.5\lambda=0.5c/f=1.5\times10^8/5\times10^9=3$ cm,同时兼具带宽广、成本低的优点.合路器模块电路各端口匹配阻抗均为50 Ω,为了避免信号互相干扰,需要采用增加隔离电阻方法对合路器模块输入路之间进行隔离,当输入端偶模电压激励时,两路相位相同,信号沿阶梯阻抗变换器传输,此时隔离电阻无信号,合路器电路完全匹配;当输入端奇模电压激励时,两路相位相差180°,信号沿隔离电阻传输,由于合路器模块设计节数m=1,1/4波长阻抗为100 Ω,则R//100 Ω=50 Ω,隔离电阻R=100 Ω.

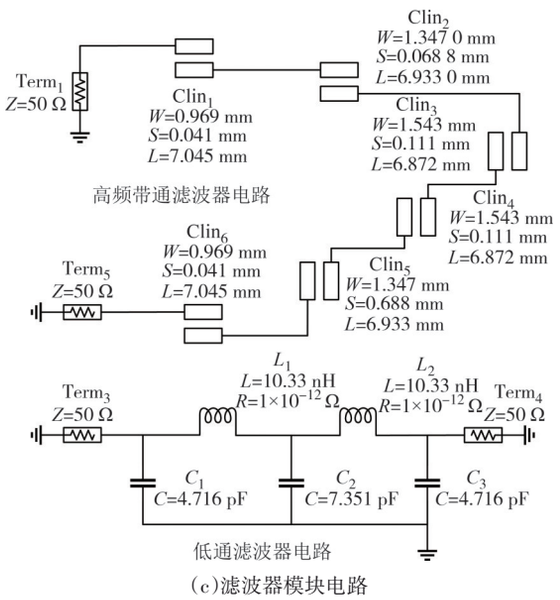
放大器功能模块如果直接采用步进式放大器调节信号,频率超过500 MHz信号的调节效果较差,频率超过1 GHz信号无法调节,本文天线测试频率最高达到8.5 GHz,步进式放大器无法满足要求.针对此问题采取措施:设计一个固定增益30 dB的放大器,再增加一个超过0~30 dB调节范围的步进式衰减器,覆盖频率最高达10 GHz,这样可以实现全频段0~30 dB步进式放大器功能,因此放大器模块采用"固定增益放大器+步进式衰减器"的结构实现全频段信号调节,放大器模块电路设计如图5(b)所示.

放大电路主芯片HMC460LC5有效频段为0.01~10 GHz,供电电压为+8 V,功率饱和点为+16.5 dBm,噪声系数为2.5 dB,最高增益为15 dB.由于爆炸电磁辐射信号变化幅度较大,为了增加信号调节范围,放大器模块电路采用两个HMC460LC5芯片串联,可以将增益范围提升至30 dB;衰减器电路主芯片HMC424ALH5有效频段为DC~13 GHz,衰减范围为0~31.5 dB,调节精度为0.5 dB.放大器和衰减器主芯片能够覆盖测试系统所有天线的输出信号频段,因此放大器模块不需要分开设计低频和高频电路.

限幅器模块电路设计如图5(b)所示,低频电路采用RLM-33-2W+为主芯片,高频电路采用CLM-83-2W+为主芯片,芯片输入功率范围可以达到12~32 dBm,由于限幅器会受到直流电压影响,在主芯片前后分别设计一个100 nF隔直电容,以阻止直流电平导通.测试系统的数据采集仪器最大量程±2.50 V,已知电磁辐射测试系统阻抗为50 Ω,则功率$P=U^2/R=2.5^2/50=125$ mW,对应的信号功率为20.97 dBm,所以数据采集仪器可承受的最大信号功率为20.97 dBm;限幅器模块低频电路最大输出功率为13 dBm,高频电路最大输出功率11.5 dBm,分别占数据采集仪器最大承受功率的62%和55%.综上,采用限幅器模块可以将采样信号功率(12~32 dBm)限制在数据采集仪器最大承受功率65%以内,可以达到数据采集仪器防过载目的.

本文电磁测试系统采用了混频天线合路测量方法,这要求带内信号具有频率选择特性,如果爆炸电





(c)滤波器模块电路

图 5　信号调理器功能模块电路设计

Fig.5　Circuit design of signal conditioner modules

磁辐射频段与测试仪器工作频段高度重合,由于射频通道分布参数作用,会产生带外耦合干扰,因此信号调理器有必要增加滤波电路.滤波器模块电路设计如图 5(c)所示,同样受到封装尺寸限制,低频电路采用 LC 切比雪夫滤波器结构的低通滤波电路,主要作用是滤除 1 GHz 以上频段信号,在截止频率 2 GHz 衰减率达到 40 dB;高频电路采用切比雪夫微带平行耦合结构的带通滤波电路,主要作用是滤除 5.9 GHz 以下和 8.5 GHz 以上频段信号,在截止频率 5 GHz 和 10 GHz 衰减率达到 30 dB.

3　测试系统参数标定

3.1　测试系统组建

测试系统组成仪器实物如图 6 所示,天线测试频率最高达 8.5 GHz,根据 Nyquist 采样定理,如果进行 8.5 GHz 频率的信号采样,数据采集仪器的采样率至少要达到 20 GSa/s.

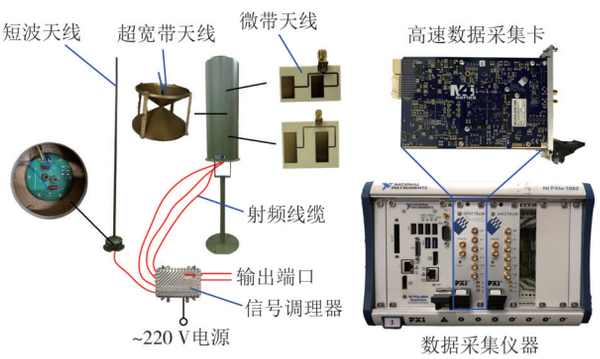


图 6　测试系统组成仪器

Fig.6　Instruments of electromagnetic measurement system

信号调理器可以将 4 根天线的端口信号合成为两个输出信号:低频信号 1.5~1 000 MHz 和高频信号 5.9~8.5 GHz,因此使用 2.5 GSa/s 采样率板卡匹配低频信号,20 GSa/s 采样率板卡匹配高频信号,可以保证采集到所有频段的电磁信号.基于 FPGA 的高速数据采集卡和 PXIe 通信接口可以提供高质量的信号采集功能和触发可靠性.高速数据卡 4 个通道同时采样时长不超过 813 ms,数据采集卡时域信号精确至 10^{-9} s,采样时长可设置为 810 ms,其中触发前采样时长 10 ms,触发后采样时长 800 ms,云爆战斗部二次起爆的间隔时间在 30~500 ms 范围[27],数据采集卡的采样时长和采样精度满足测试要求.基于混频天线的电场测试系统如图 7 所示,采用短波天线、超宽带天线、微带天线合路测试方法,覆盖频段范围 1.5~1 000 MHz、5.9~6.0 GHz、8.4~8.5 GHz,射频链路前端包括天线和信号调理器,经过信号传输线与数据采集仪器连接,高速数据采集卡记录信号.

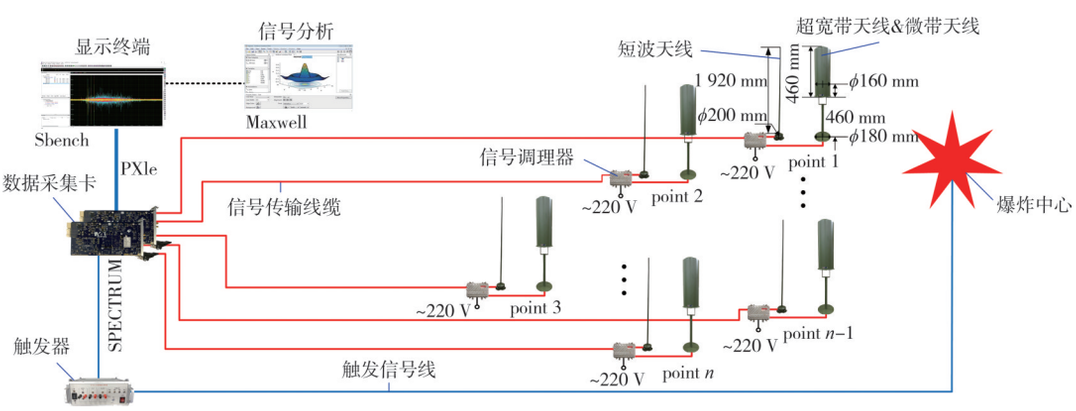


图 7　爆炸场电磁辐射测试系统

Fig.7　Electromagnetic radiation measurement system in explosive field

3.2 测试系统指标

天线参数及系统指标标准化测试通常在微波暗室中进行,测试校准系统如图8所示,测试仪器主要包括信号源、标准天线、场强探头、矢量网络分析仪、频谱分析仪、计算机(安装高速采集卡)等.通过信号源与接收机进行系统集成,利用收发同步实现时频域测试标定.微波暗室的动态测试范围受到源发射功率和接收天线灵敏度的限制,如图8在待测天线处使用宽动态范围的低噪声放大器,在矢量网络分析仪处增加功率放大仪器,可以有效减弱灵敏度限制影响.为了在微波暗室的有限空间中实现远场测试,在测量仪器之间放置射频吸收材料(RAM),可以最小化地面的反射,提高测量精度,同时扩展低频测试范围下限.

所有测量仪器满足50 Ω输入/输出阻抗要求,信号源输出频率稳定度小于1×10^{-6},输出幅度稳定度为0.2 dB,频谱分析仪的端口电压幅度测量误差限制优于±0.4 dB,数据采集仪器的幅度测量精度优于±2%,功率放大器接收仪器收到的信号至少高于噪声10 dB.按照95%的测量不确定度置信概率,测试仪器的射频频率测量不确定度为10^{-8},功率测量的不确定度为1 dB,测试频率点及步长如表3所示.

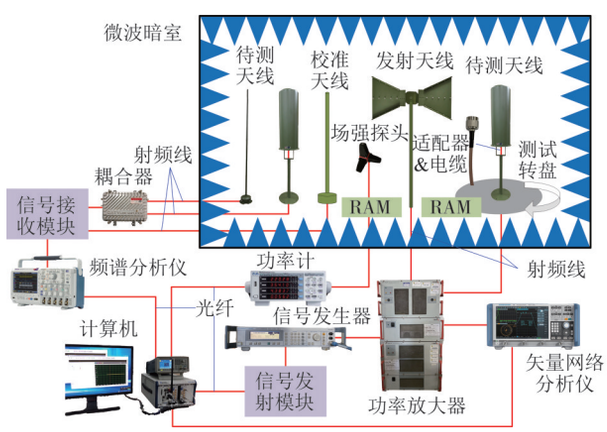


图8 参数指标测试校准系统

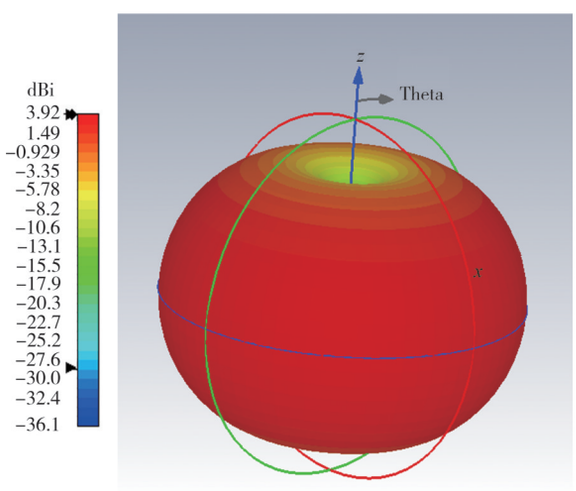
Fig.8 Parameter testing and calibration system

表3 测试频率点及步长

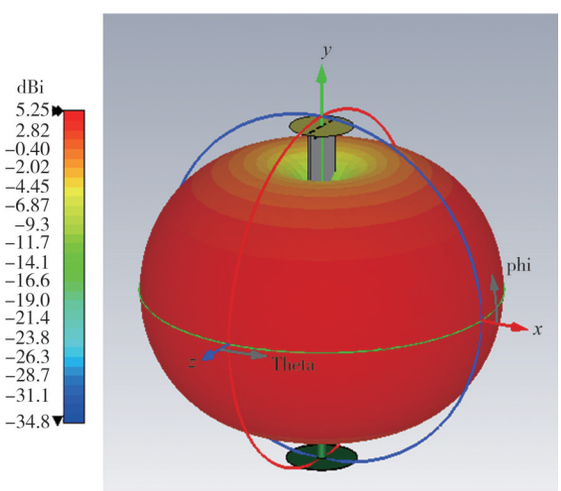
Tab.3 Testing frequency points and step size

测试频段/MHz	步长/MHz	测试频段/GHz	步长/MHz
1.5~30	1	0.5~1	10
30~100	3	5.9~6	10
100~500	10	8.4~8.5	10

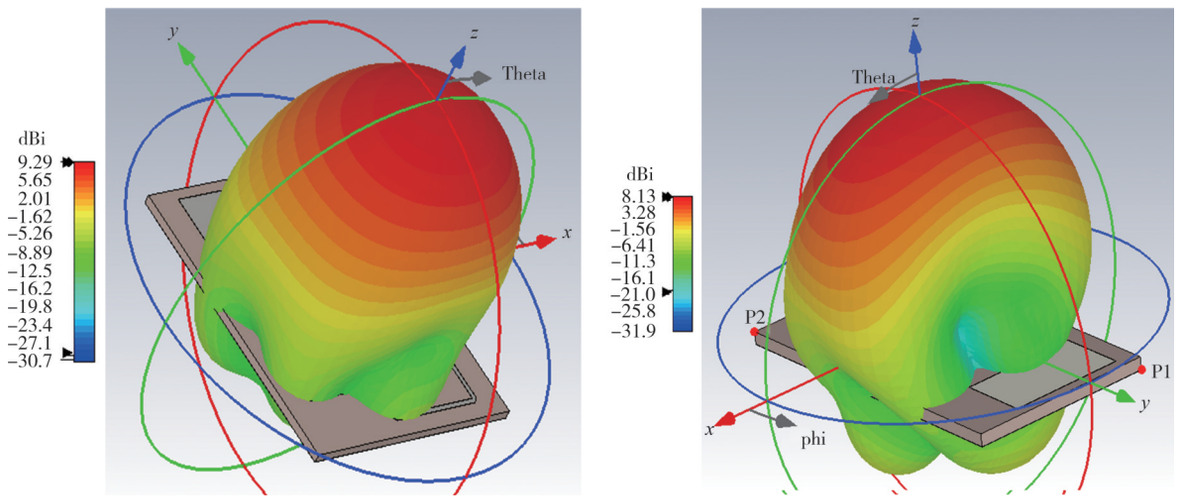
天线的主要指标包括方向图、驻波比和阻抗,这些参数不仅决定天线能否正常使用,还会影响信号分析和数据处理的精确度.完整的方向图是一个空间立体图形,按照参数指标测试校准系统(图8)安装天线和测量仪器,驱动转台转动使待测天线旋转,记录接收电平和天线旋转的方位角;以接收电平为纵轴,方位角为横轴,绘制成的曲线为待测天线的方向图,并可以得到波瓣宽度和前后辐射比;将待测天线绕轴旋转90°,重复测试步骤,可以得到待测天线正交切面方向图,最终形成完整的天线方向图.经测试得到短波天线、超宽带天线、微带天线方向图如图9(a)~(d)所示,短波天线和超宽带天线在整个工作频段内的水平面方向都能全向覆盖,垂直面方向图略有变化但总体起伏不大.微带天线主瓣方向没有产生畸变,天线指标良好,满足设计要求.



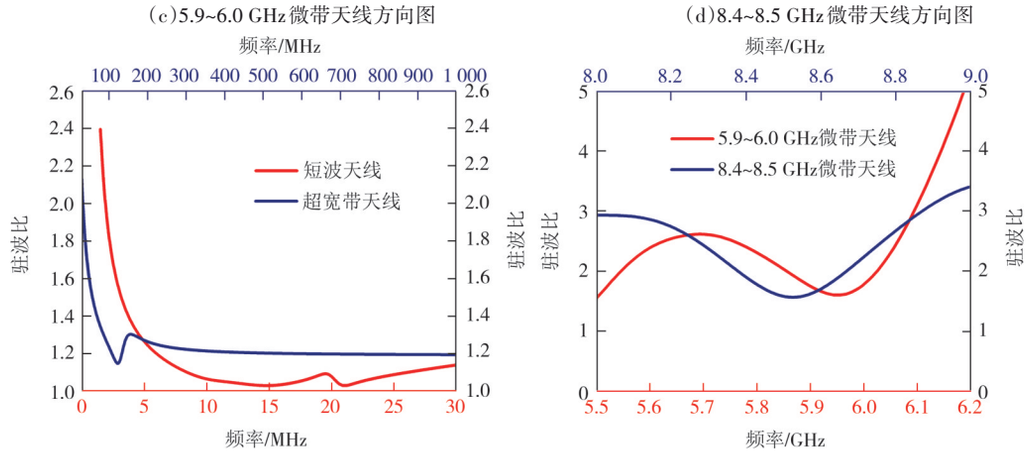
(a)短波天线方向图



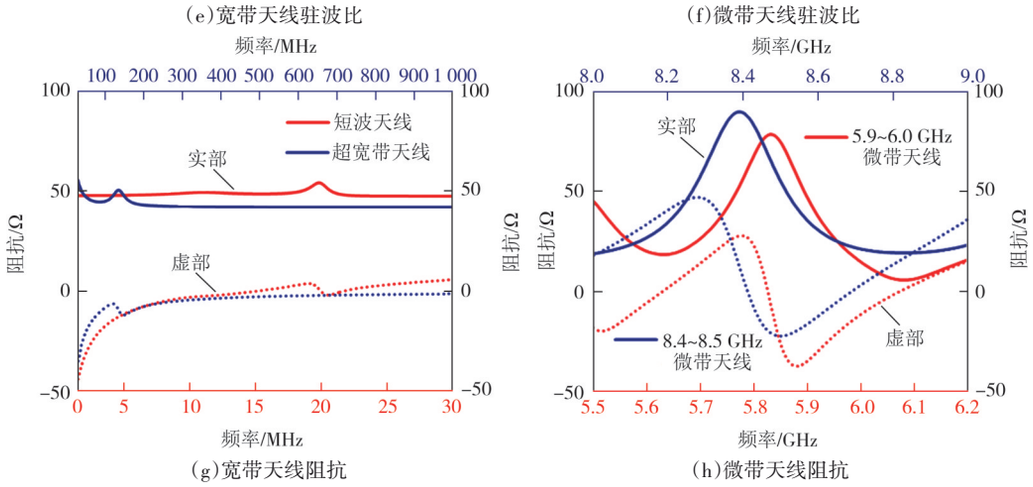
(b)超宽带天线方向图



(c)5.9~6.0 GHz微带天线方向图　　(d)8.4~8.5 GHz微带天线方向图



(e)宽带天线驻波比　　(f)微带天线驻波比



(g)宽带天线阻抗　　(h)微带天线阻抗

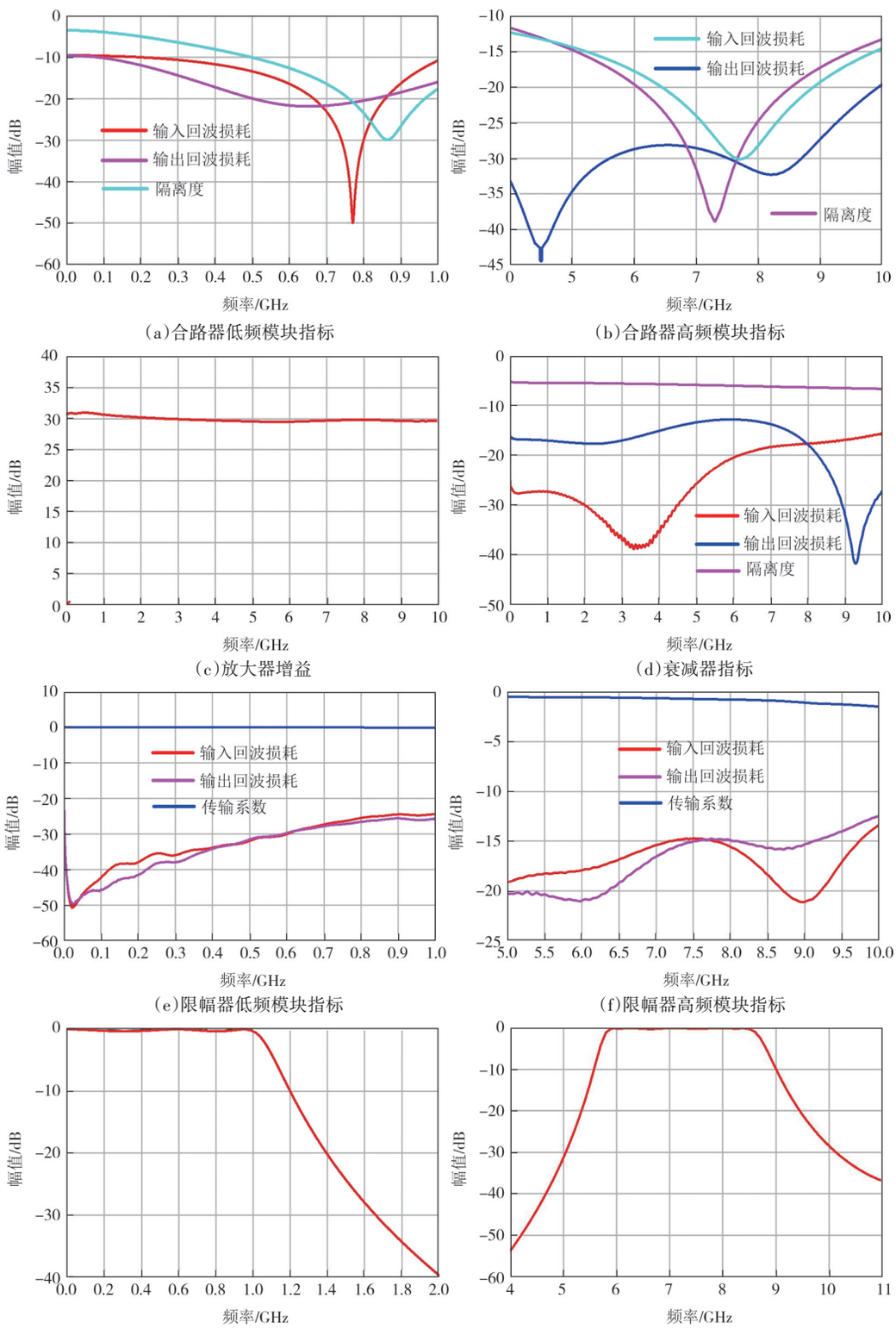
图 9　天线参数测试结果

Fig.9　Test results of antenna parameters

天线的匹配特性包括驻波比(VSWR)和阻抗值,这两个参数主要用于检验天线是否达到使用要求,驻波比≤2.5 为合格标准,阻抗值分为实部和虚部,实部最佳值为 50 Ω,虚部最佳值为 0.采用网络分析仪测试待测天线驻波比,测试前需要将测试仪器和转接头/线作为一个整体进行校准,以消除转接线带来的误差.按照表 3 所列频率范围和步长调整参数,得到待测天线的驻波比如图 9(e)和(f)所示,阻抗测量值如图 9(g)和(h)所示.短波天线(1.5~30 MHz)、超宽带天线(30 MHz~1 GHz)、微带天线(5.9~6.0 GHz 和 8.4~8.5 GHz)的驻波比在设计测试频段均小于 2.5,阻抗实部接近 50 Ω,阻抗虚部接近 0,天线匹配特性指标符合要求.

信号调理器位于爆炸电磁辐射测试系统前端,

其中合路器模块与测试天线输出端口直接相连,因此须重点关注输入输出回波损耗.合路器模块指标测试结果如图10(a)和(b)所示.低频电路的输入输出回波损耗在0.5~1 GHz频率范围小于-15 dB,隔离度小于-10 dB,高频电路的输入输出回波损耗和隔离度在天线端口信号频率范围(5.9~8.5 GHz)均小于-15 dB;合路器模块高低频电路的传输系数与-3 dB(理想值)相差不超过0.5 dB,实现混频天线合路测试.



(a)合路器低频模块指标 (b)合路器高频模块指标

(c)放大器增益 (d)衰减器指标

(e)限幅器低频模块指标 (f)限幅器高频模块指标

(g)低通滤波器传输系数 (h)高频带通滤波器传输系数

图10 信号调理器指标测试结果

Fig.10 Test results of signal conditioner indicators

信号调理器放大器模块指标测试结果如图10(c)和(d)所示:放大器增益稳定在30 dB,变化幅度极小,衰减器输入输出回波损耗基本小于-15 dB,传输衰减值很稳定,指标良好.衰减器是所有模块中唯一可以调节系数的器件,所以信号调理器的调节系数完全依靠传输衰减值调整,衰减器的衰减值范围为0~31.5 dB,步进式衰减器的调节精度可以达到0.5 dB,实现高精度系数调节.

限幅器模块指标测试结果如图10(e)和(f)所示:低频和高频限幅器电路的输入输出回波损耗均小于-15 dB,测试结果显示低频和高频限幅器的传输系数与0(理想值)相差均不超过0.5 dB,符合设计要求.

滤波器模块处于信号调理器结构末端,距离天线端口较远,所以滤波器模块的输入输出回波损耗系数限值较高.滤波器模块指标测试结果如图10(g)和(h)所示:低频电路的带外抑制达到2 GHz,衰减40 dB,高频电路的带外抑制达到5 GHz和10 GHz,衰减30 dB,可以达到很好的滤波效果.

爆炸电磁辐射测试系统测试频段为:1.5~1 000 MHz、5.9~6.0 GHz、8.4~8.5 GHz,采样时间为810 ms,采样精度为10^{-9} s,输出范围为-2.5~+2.5 V.测试天线和信号调理器参数指标分别如表4~表5所列,测试系统总体指标和各组成仪器指标可以满足高能战斗部爆炸电磁辐射测试试验所有要求.

表4　测试天线参数

Tab.4　Test antenna parameters

天线类别	测试频段	S_{11}参数/dB	扫描方向/(°)	增益/dB	驻波比	阻抗
短波天线	1.5~30 MHz	-38~-10	360	-20~5	0.1~2.2	Re(47~54);Im(-43~5.8)
超宽带天线	30~1 000 MHz	-23~-10	360	-2~7	1.2~1.8	Re(42~55);Im(-35~0)
微带天线#1	5.9~6.0 GHz	-13~-10	63.1	8.8~9.5	1.5~1.8	Re(56~78);Im(-27~27)
微带天线#2	8.4~8.5 GHz	-13~-10	82.4	8~8.2	1.6~1.9	Re(55~89);Im(-22~6.2)

表5　信号调理器参数

Tab.5　Signal conditioner parameters

调节频段	调节系数/dB	调节精度/dB	限幅功率/dBm	滤波抑制/dB
1 MHz~1 GHz; 4~10 GHz	0~30	0.5	输入(12~32)输出;(11.5~13)	-40(2GHz~); -30(~5GHz/10GHz~)

4　结 论

针对爆炸场强电磁辐射测试要求,设计了电磁辐射测试系统,采取混频天线合路测试、多功能信号调理等手段,实现1.5 MHz至8.5 GHz混合波段电磁测试,能够覆盖军械电磁环境限值标准中所有敏感频段,可以高精度调节爆炸强电磁脉冲信号幅度,具体工作如下.

1)根据爆炸电磁辐射特性和引信抗电磁干扰设计要求,设计了四种测试频段天线:短波天线(1.5~30 MHz)、超宽带天线(30~1 000 MHz)、微带天线(5.9~6.0 GHz和8.4~8.5 GHz),通过优化天线结构、匹配电路设计提高了天线测试效能,确保各类天线在工作频段S参数低于-10 dB.

2)设计了具有合路器、放大器、限幅器、滤波器四种功能的信号调理器,采用"固定增益放大器+步进式衰减器"结构将全频段调节系数精确至0.5 dB,具有0~30 dB调节范围,输入信号功率限制在数据采集仪器最大承受功率的65%以内,滤波器模块带外抑制衰减超过30 dB,通过LC电路和微带天线电路分频设计结构将封装尺寸限制在小型范围,实现节约采样通道、高精度系数调节、数据采集仪器防功率过载等目的.

3)组建了基于"测试天线-信号调理器-信号传输线-高速数据采集卡"结构的爆炸电磁辐射测试系统,设计了基于虚拟仪器的天线参数及系统指标测试系统,对天线和信号调理器的主要指标进行测试校准,经测试,天线方向图、驻波比、阻抗以及信号调理器回波损耗、带外抑制等参数满足高能战斗部爆炸电磁辐射测试试验所有要求,具有较高的应用价值.

参考文献

[1] CUI Y B, KONG D R, JIANG J, et al. Research on electromagnetic radiation characteristics of energetic materials [J]. Magnetochemistry, 2022, 8(5): 57.

[2] CUI Y B, KONG D R, JIANG J. Measurement method for

electromagnetic radiation generated during a high-capacity warhead explosion [J]. Measurement Science and Technology, 2023,34(9):095015.

[3] 陈鸿. 典型炸药爆炸电磁辐射特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
CHEN H. Study on electromagnetic radiation characteristics from typical explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[4] 崔元博,孔德仁,张学辉,等. 典型炸药爆炸过程中电磁辐射特性分析[J]. 国防科技大学学报,2022,44(6):70-80.
CUI Y B, KONG D R, ZHANG X H, et al. Analysis of electromagnetic radiation characteristics during typical explosives explosion [J]. Journal of National University of Defense Technology,2022,44(6):70-80.(in Chinese)

[5] KOLSKY H. Electromagnetic waves emitted on detonation of explosives[J]. Nature,1954,173:77.

[6] BORONIN A P, KAPINOS V N, KRENEV S A, et al. Physical mechanism of electromagnetic field generation during the explosion of condensed explosive charges [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves,1990,26(5):597-602.

[7] VAN LINT V A J. Electromagnetic emission from chemical explosions [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1982, 29(6):1843-1849.

[8] 陈生玉,孙新利,钱世平,等. 化爆引起的电磁辐射[J]. 爆炸与冲击,1997,17(4):363-368.
CHEN S Y, SUN X L, QIAN S P, et al. Electromagnetic radiation caused by chemical explosion[J]. Explosion and Shock Waves,1997,17(4):363-368.(in Chinese)

[9] SOLOVIEV S P, SWEENEY J J. Generation of electric and magnetic field during detonation of high explosive charges in boreholes [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005,110(B1): 01312.

[10] 戴晴,李传胪,陈国强,等. 低温等离子体激励宽带电磁波信号的实验研究[J]. 电子信息对抗技术,2009,24(5):72-74,78.
DAI Q, LI C L, CHEN G Q, et al. Experimental study of wideband electromagnetic radiation from plasma cloud [J]. Electronic Information Warfare Technology,2009,24(5):72-74, 78.(in Chinese)

[11] 陈鸿,何勇,潘绪超,等. RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号特性实验研究[J]. 含能材料,2020,28(5):475-482.
CHEN H, HE Y, PAN X C, et al. Experimental study on characteristics of explosive electromagnetic radiation signals of RDX based aluminized explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2020,28(5):475-482.(in Chinese)

[12] 王长利,李迅,刘晓新,等. 典型炸药爆炸过程的电磁辐射实验研究[J]. 兵工学报,2014,35(增刊2):188-192.
WANG C L,LI X,LIU X X, et al. The experimental research on the electromagnetic radiation aroused by detonation of explosive [J].Acta Armamentarii,2014,35(Sup.2):188-192.(in Chinese)

[13] 张家洪,王欣,陈福深. 用于爆炸辐射电磁脉冲时域测量的集成光波导电场传感器研制[J].仪器仪表学报,2022,43(7):149-156.
ZHANG J H,WANG X,CHEN F S. Research and development of an integrated optical waveguide sensor for measurement of the explosive radiation electromagnetic pulse[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2022,43(7):149-156.(in Chinese)

[14] 曹景阳,谢树果,苏东林,等. 航天火工品爆炸引起的电磁干扰测量[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(11):1384-1387, 1394.
CAO J Y,XIE S G,SU D L, et al.Electromagnetic interference caused by aerospace explosives[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2011,37(11):1384-1387,1394.(in Chinese)

[15] KUHL A L,WHITE D A,KIRKENDALL B A. Electromagnetic waves from TNT explosions [J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications,2014,6(10):280-295.

[16] 赵丽君,易涛,朱宏娜,等. 桥丝电爆炸过程中的电磁脉冲效应[J]. 含能材料,2019,27(6):481-486.
ZHAO L J,YI T,ZHU H N,et al. Electromagnetic pulse effect during the bridge wire electric explosion [J].Chinese Journal of Energetic Materials,2019,27(6):481-486.(in Chinese)

[17] CHEN H,PAN X C,HE Y, et al. Measurement of time-varying electron density of the plasma generated from a small-size cylindrical RDX explosion by Rayleigh microwave scattering[J]. Plasma Science and Technology,2021,23(4):045401.

[18] 栗建桥,马天宝,宁建国. 爆炸对自然磁场干扰机理[J].力学学报,2018,50(5):1206-1218.
LI J Q, MA T B, NING J G. Mechanism of explosion-induced disturbance in natural magnetic field [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(5): 1206-1218.(in Chinese)

[19] 任会兰,储著鑫,栗建桥,等. B炸药爆炸过程中电磁辐射研究[J]. 力学学报,2020,52(4):1199-1210.
REN H L,CHU Z X,LI J Q,et al. Research on electromagnetic radiation during the explosion progress of composition B explosives [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020,52(4):1199-1210.(in Chinese)

[20] REN H L, CHU Z X, LI J Q. Study on electromagnetic radiation generated during detonation [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2019, 44(12): 1541-1553.

[21] 崔元博,孔德仁,张学辉,等. TNT爆炸电磁辐射信号测量及分析[J]. 含能材料,2021,29(3):241-250.
CUI Y B,KONG D R,ZHANG X H, et al. Measurement and analysis of electromagnetic radiation signals of TNT explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2021,29(3):241-250.(in Chinese)

[22] 崔元博,商飞,孔德仁,等. 爆炸场电磁辐射特性测试技术研究[J]. 火工品,2019(5):1-5.
CUI Y B,SHANG F,KONG D R,et al. Research on testing technology of electromagnetic radiation characteristics in explosive field[J]. Initiators & Pyrotechnics,2019(5):1-5.(in Chinese)

[23] CUI Y B, KONG D R. Analysis of electromagnetic radiation spectrum during the explosion of energetic materials [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 585(1): 012026.

[24] 中国人民解放军总装备部.系统电磁兼容性要求: GJB 1389A—2005[S].北京:中国人民解放军总装备部, 2005.
The General Reserve Department of PLA. Electromagnetic compatibility requirements for systems: GJB 1389A—2005 [S]. Beijing: The General Reserve Department of PLA, 2005.(in Chinese)

[25] 中国人民解放军总装备部.引信电子安全与解除保险装置电磁环境与性能试验方法: GJB 7073—2010[S].北京:中国人民解放军总装备部, 2010.
The General Reserve Department of PLA. Electronic safety and arming device, electromagnetic environmental and performance test methods for fuze: GJB 7073—2010[S]. Beijing: The General Reserve Department of PLA, 2010.(in Chinese)

[26] CUI Y B, KONG D R, JIANG J, et al. Research on electromagnetic radiation mechanism during detonation of energetic material[J].Sensors,2022,22(7):2765.

[27] 崔元博,商飞,孔德仁. 云爆弹爆炸电磁辐射测试试验研究[J]. 测试技术学报,2020,34(2):99-103.
CUI Y B, SHANG F, KONG D R. Experimental study on electromagnetic radiation test of cloud explosion bomb [J]. Journal of Test and Measurement Technology,2020,34(2):99-103.(in Chinese)