



·高功率微波技术·

大功率高线性度的电流注入探头性能分析及研制

孙江宁, 潘晓东, 卢新福, 万浩江, 魏光辉

(陆军工程大学石家庄校区电磁环境效应重点实验室, 石家庄 050003)

摘要: 针对大电流注入探头应用于大电流注入等效强场电磁辐射试验时阻抗容易发生非线性变化的问题, 通过分析大电流注入的方式, 对现有的商品化电流探头进行了线性度测试。测试结果表明, 注入功率增大, 不同频点的线性误差也随之增大。提出了研制大功率高线性度电流探头的方案, 进行研制并通过了测试。自行研制的电流注入探头最大耐受功率可达 500 W, 插入损耗随注入功率变化具备良好的线性度 0.3 dB @ 1-500 W, 可以满足开展大电流注入等效强场电磁辐射效应试验的技术需求。

关键词: 电流注入探头; 大功率; 高线性度; 非线性变化; 电磁辐射

中图分类号: O441, TM937

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.200350

Performance analysis and development of high-power and high-linearity current injection probes

Sun Jiangning, Pan Xiaodong, Lu Xinfu, Wan Haojiang, Wei Guanghui

(National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the problem that the impedance of the probe is prone to non-linear changes when applied to the bulk current injection test replacing high field intensity radiation, the linearity test of the existing commercial current probe is carried out by analyzing the method of large current injection. The test results show that as the injected power increases, the linearity error at different frequencies also increases. A plan for the development of a high-power and high-linearity current probe was proposed, and the probe was developed and passed the test. The self-developed current injection probe has a maximum withstand power of 500 W. The insertion loss varies with the injected power and has good linearity (0.3 dB @ 1-500 W). The probe can meet the technical requirements of carrying out bulk current injection (equivalent high field electromagnetic radiation effect) test.

Key words: current injection probe; high power; high linearity; nonlinear change; electromagnetic radiation

在大电流注入试验中, 电流注入探头是不可或缺的一部分, 信号源输出的电磁信号通过电流注入探头耦合至线缆, 从而实现注入的效果^[1]。电流探头有霍尔传感器和测量电流磁场两种类型^[2-3], 后者当前在大电流注入法研究中最常用。其形式大多为卡钳式电流注入探头。通过测量磁场, 反演推算电流, 常见装置是电流卡环和罗果夫斯基线圈^[4-5]。大电流注入时根据所卡线缆的不同可实现共模注入和差模注入^[6]。当所卡线缆同时包括信号线和地线时, 所采取的注入方式为共模注入。当所卡线缆仅有信号线时, 该注入方式为差模注入。而大电流注入技术模拟强场电磁辐射效应^[7-10]的方法对电流探头提出了更高的要求。

1 电流注入方式及等效电路模型

电流注入探头的等效电路模型如图 1 所示^[11], 其中电压源 $V_S^{(0)}$ 表示注入源耦合到传输线缆上的电压值, Z_p 表

* 收稿日期: 2020-12-24; 修订日期: 2021-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(61901521); 河北省自然科学基金项目(E2019506032)

作者简介: 孙江宁(1995—), 男, 硕士研究生, 从事电磁环境效应试验技术研究;

卢新福(1988—), 男, 讲师, 从事电磁环境效应测试与电磁兼容测试方法研究;

万浩江(1983—), 男, 讲师, 从事电磁环境效应和电磁兼容研究;

魏光辉(1964—), 男, 教授, 从事电磁环境效应试验与防护技术研究。

通信作者: 潘晓东(1980—), 男, 副教授, 从事电磁环境效应试验方法研究。

示探头卡入线缆后由于加载效应等效的阻抗, Y_p 是探头与线缆之间形成电容的导纳。该等效电路是连接在信号线和地线之间的, 因此对于平行双线情况, 如果注入探头只卡一根线, 则注入时的等效电路如图 2 所示^[12-13]。而如果注入探头同时卡两根线, 则每根线与地之间均构成图所示的等效电路模型, 在理论分析时需要根据注入方式建立对应的等效电路模型。

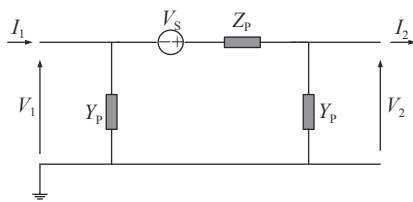


Fig. 1 Equivalent circuit of current injection probe

图 1 电流注入探头等效电路

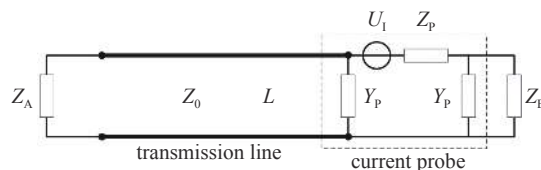


Fig. 2 Equivalent circuit of parallel two-wire differential mode injection

图 2 平行双线差模注入等效电路

2 大电流注入探头线性度

电流注入等效替代电磁辐射以及强场条件下线性外推试验要求注入源电压 V_1 与输出耦合到线缆上的等效电压源 $V_s^{(0)}$ 为线性变化关系, 两者的关系如式(1)所示。但是目前, 商品化的电流探头为了提高注入效率, 线圈缠绕得很密, 同时在线圈中插入了高磁导率的磁芯, 线圈的匝间电容、线圈与壳体之间电容以及高磁导率材料的磁饱和等因素的共同作用, 造成了电流探头的上限频率较低、高电平下的注入线性度较差。另外高功率注入后, 探头升温会导致磁芯磁导率下降(特别是到达居里温度以后, 磁芯的磁导率将急剧下降), 同样会导致注入线性度下降。电流注入探头的注入功率与输出功率呈现出非线性, 也导致在进行注入与辐射等效线性外推时的结果将不再准确。

$$V_s^{(0)} = H(j\omega) \cdot V_1 \quad (1)$$

为此, 对商品化的电流注入探头的注入线性度进行了测试, 测试装置如图 3 所示, 采用安捷伦 E5061A 300 kHz~1.5 GHz 网络分析仪和 ZN23101E 型校准装置, 校准装置一端接 50 Ω 的匹配负载。将某型电流注入探头放置于校准装置上, 通过使用矢量网络分析仪对校准装置的 S_{21} 以及 S_{11} 进行测试, 首先测试其在注入探头工作频率范围内 S_{21} 的变化, 测试结果如图 4 所示。进一步, 选用 50、100、200、300 MHz 四个测试频点, 使用矢量网络分析仪内部源测试了不同注入功率条件下 S_{21} 以及输入端口的 SWR 的变化情况。



Fig. 3 Vector network analyzer test device

图 3 矢量网络分析仪测试装置

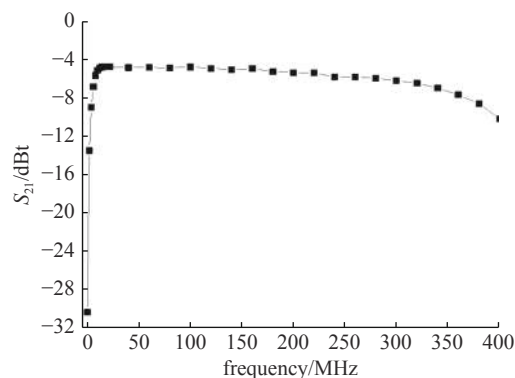


Fig. 4 S_{21} parameter tested for current injection probe

图 4 电流注入探头 S_{21} 参数测试

由图 4 可见, 在大电流注入探头工作频率 0.3~400 MHz 范围内的 S_{21} 比较平缓, 其 2~250 MHz 范围内 S_{21} 基本稳定在 -5 dB 左右。由此可见, 这种探头在其工作频率范围内大多数情况下 S_{21} 是比较大且趋于稳定的, 这说明电流注入探头在其工作频率范围内开展电磁辐射等效试验是满足试验要求的。

电流探头应用于大电流注入等效强场电磁辐射试验时阻抗容易发生非线性变化, 通过分析大电流注入的方式, 对现有的商品化电流探头进行了线性度测试, 结果如图 5 和图 6 所示。由图 5 和图 6 可知, 注入功率在 -5~10 dBm 范围内变化时, 四个频点对应的 S_{21} 以及输入端口的 SWR 均保持不变, 说明其输入输出功率间并没有发生非线性变化。这也证明了在这个功率范围内大电流注入探头输入输出功率保持了良好的线性关系, 对电流注入与电磁辐射等效以及外推不会产生影

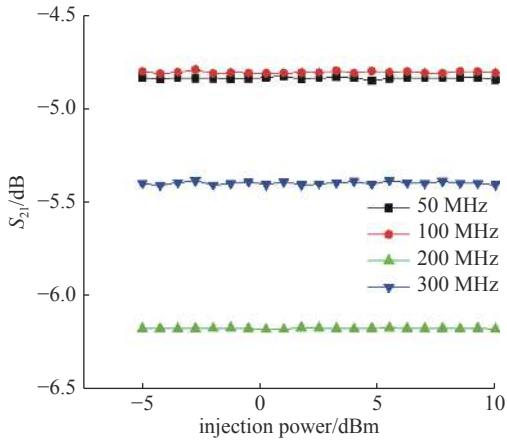


Fig. 5 Parameter change of S_{21} under different input power

图 5 不同注入功率下 S_{21} 参数变化

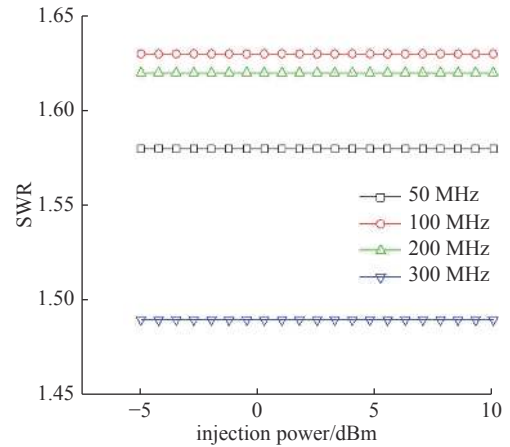


Fig. 6 Input port SWR under different input power

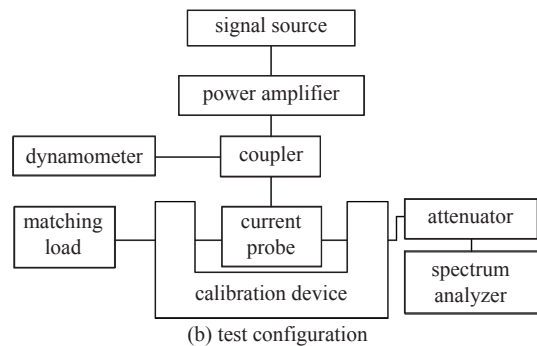
图 6 不同注入功率下输入端口 SWR

的最大值,因此需要进一步增大功率对探头线性度来进行测试。

由于矢量网络分析仪内部源最大输出功率为 10 dBm,为进一步研究大注入功率对电流注入探头线性度的影响,设计了以下试验。大功率注入试验如图 7 所示。校准装置一端接匹配负载,另一端连接由 40 dB 衰减器和频谱仪 (Agilent E4440A) 组成的接收测试系统,探头注入端口连接由射频信号发生器 (R&S SML01)、功率放大器 (AR 75A400M2)、双通道微波功率计、双向耦合器 (AR DC3002) 组成的注入源系统。



(a) test device



(b) test configuration

Fig. 7 Power injection test device

图 7 大功率注入测试试验装置

选用了 50、100、150、200、300 MHz 五个频点不断增大注入源功率,同时记录实际输出功率,通过与线性计算值比较得其误差如图 8 所示。随着注入功率增大,不同频点的线性误差也随之增大,这就表明大电流注入探头的输入输出功率之间都不同程度地出现了非线性。其中低于 30 W 时各个频点的线性误差均低于 5%,这表明在注入功率低于 30 W 时,探头输入输出功率还是能够保证一定的线性度,这对于注入等效辐射试验是必须具备条件。但是在 150 MHz 频点,随着注入功率增大至 60 W 时其线性误差已经高于 12%,这对于注入等效替代强场电磁辐射试验要求注入功率达到几十 W 时是具有一定影响的。

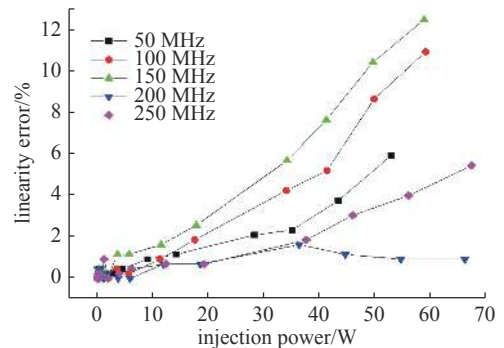


Fig. 8 Linearity error

图 8 线性误差

目标电流探头将用于等效强场电磁辐射效应试验,其必须要满足可以耐受大功率高线性度的要求,只有这样才能保证注入功率的线性变化以及无源等效电路在注入和辐照条件下一致。市购探头尽管插损为 5 dB,但是其设计的目的并不是用于这种类型的试验,在结构设计上就没有针对性。因而在大功率测试中,插损很大并且线性度也不佳的情况也是正常的。市购探头不适合应用于目标试验,因此需要研制新型大功率高线性度的电流探头。如果要求等效更高场强的辐射试验,需要研制更高功率条件下线性度良好的注入探头。

3 大功率高线性度电流注入探头研制

针对武器装备强场电磁辐射效应等效注入试验的技术需求,特别是为了确保大电流注入与高强度辐射场效应试验的等效性,需要具备高耐受功率和高线性的电流注入探头。目前商品化的电流注入探头,主要用于按照 MIL-STD-461C^[14]、GJB151B-2013^[15]、ED-107^[16] 等国内外标准开展武器装备和电子设备的传导敏感度试验,通常电流注入探头的耐受功率在 200 W 左右,不能满足开展强场等效注入试验的技术需求,特别是随着注入功率的增大,电流注入探头插损将发生显著变化(插损线性度差),工程中更是无法满足等效注入试验的技术需求。

通过项目组调研及试验研究发现:电流注入探头的插损线性度与注入功率密切相关,存在相互制约关系。注入功率的提升必然会导致电流注入探头发热严重,这里的热损耗来自于两个方面:一是缠绕线圈的焦耳损耗;二是磁芯(铁氧体材料)的涡流损耗和磁滞损耗。这两方面损耗均为频率越高发热越严重。电流注入探头温度的提升会导致铁氧体材料磁导率下降,进而导致电流注入探头的插损(注入效率)出现非线性,特别是当磁芯的温度超过居里温度时,磁畴磁矩的整齐排列将会被破坏,与磁畴相联系的一系列铁磁性质(如高磁导率、磁滞架线、磁致伸缩等)全部消失,电流注入探头将表现出插损急剧增大、注入效率大大降低。功率信号注入仅几 s 时探头塑料件就熔化了。

因此,研制大功率、高线性度的电流注入探头,需要从选择性能良好的铁氧体材料、优化缠绕线圈以及改变磁芯与外壳结构等方面进行设计研制,具体设计研制方案如下。

(1) 选择居里温度高、不易发生磁饱和的铁氧体材料

选择锰锌 2000 铁氧体材料作为电流注入探头的磁芯,该材料具有饱和磁通密度高、功率损耗小、居里温度高等特点,适合用于上限频率为 400 MHz 的大功率、高线性度电流注入探头研制。铁氧体材料采用多层结构,单层应尽可能薄,同时铁氧体材料不同层之间应是绝缘的且紧密接触(通过刷绝缘漆等方式实现),从而有效降低涡流损耗,减少发热,提高承受注入功率的能力。在研制此探头时,选取 8 块锰锌 2000 铁氧体材料,每 4 块材料并行,电流探头的两瓣各填充 4 块(每块环形磁芯厚度为 20.22 mm,内外径的差值为 19.1 mm)。

(2) 改进缠绕线圈的结构及绕线方式

采用双侧线圈设计方案,为了降低缠绕线圈导致的焦耳热损耗同时使电流注入探头不易发生磁饱和,将传统的单根多匝缠绕线圈,转变为线圈四线并绕(多根并联)同时减小缠绕匝数的方法进行优化设计。线圈四线并绕能够有效降低高频阻抗(减小发热)和增加承受电流的能力,适当减小缠绕匝数能够使铁氧体磁芯不易发生磁饱和。采用双侧线圈设计方案,降低线圈电流的同时提高左右两侧磁场的均匀性,使两侧发热均匀,提高注入探头承受功率的能力。研制此探头时,线圈采取了四线并绕,线圈的匝数为 4 匝。

(3) 电流注入探头外壳的结构设计

为加强电流探头的散热效率,需要在电流注入探头外壳的结构上进行优化:

①调整注入探头内、外金属壳体尺寸,使铁氧体与金属壳体紧密接触,有利于散热(探头内金属壳直径 27.46 mm,外金属壳直径 94.44 mm,探头高度 111.58 mm);

②外金属壳体内壁和内金属壳体外壁开槽,线圈从槽里面走,使铁氧体与金属壳体能够紧密接触;

③外金属壳体外壁做散热片处理,增加机壳散热面积,进一步增强散热效果,因此,在电流探头的两瓣中各设计了 7 块散热片,散热片厚度为 3 mm,每片散热片间隔 4 mm,位置位于电流探头的中央;

④铁氧体与金属壳体之间(黄色部分)的小间隙填入导热硅脂,进一步改善注入探头的散热条件,提高其耐受功率值。填充导热硅脂时,保证铁氧体与金属壳体之间的间隙完全填满填实。只有这样才能保证更好地散热。

磁芯及电流注入探头外壳的结构设计如图 9 所示。

在上述方案基础上,进行了耐受高功率高线性度的电流探头的研制。自行研制的电流探头的具体尺寸如图 10 所示,图 10 中(a)为电流探头外部尺寸,(b)为电流探头内部磁芯相关尺寸。

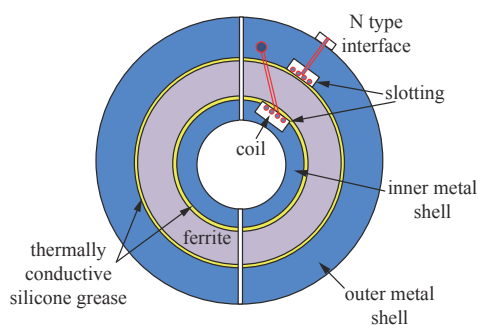


Fig. 9 Cross-sectional structure design of magnetic core and current injection probe shell

图 9 磁芯及电流注入探头外壳的结构设计

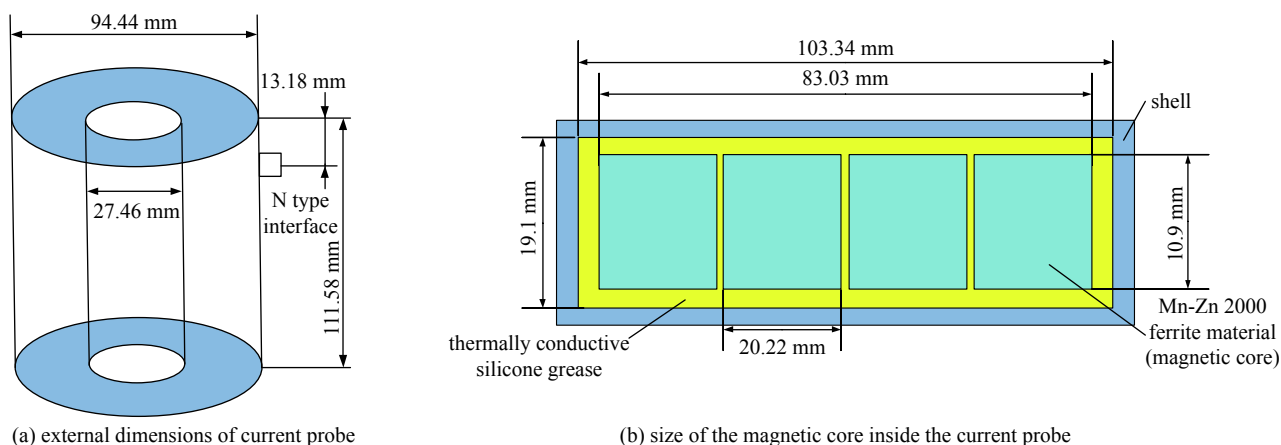


Fig. 10 Relevant dimensions of the self-developed current injection probe

图 10 自行研制电流注入探头相关尺寸

采用上述设计方案研制的最终优化后的电流注入探头如图 11 所示。为检验自行研制电流探头的性能指标，对其性能参数进行测试。测试配置如图 12 所示，小功率下随频率变化的插入损耗测试结果如图 13 所示，随注入功率变化探头的插入损耗测试结果以及高功率耐受度测试结果如图 14 所示，500 W 功率条件下探头的 1 min 耐受测试如图 15 所示。

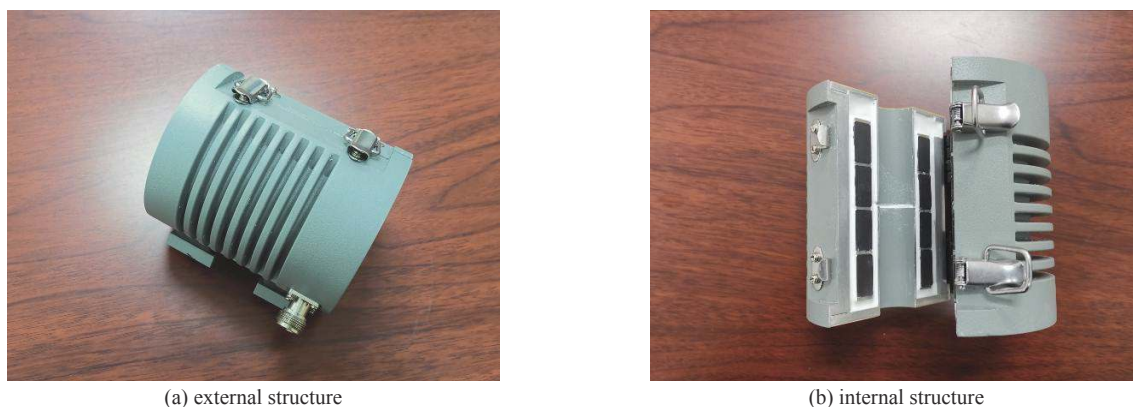


Fig. 11 The final optimized current injection probe

图 11 最终优化后的电流注入探头



Fig. 12 Physical configuration of current injection probe performance test

图 12 电流注入探头性能测试实物配置

由图 14 可以看出，自行研制的电流注入探头的测试频段优于 300 kHz–400 MHz(由于该注入探头不用于电磁脉冲测试，因此对插损曲线平坦度没有要求)；当注入功率从 1 W 变化到 500 W 时，不同频点电流注入探头的插入损耗变化很小，最大变化量为 0.3 dB。由图 15 可以看出，不同频率下施加 500 W 功率达到 1 min 后，注入探头未发生损坏(在模拟强场电磁辐射效应试验中，注入探头使用时间一般在 30 s 之内)。试验结果表明：自行研制的电流

注入探头最大耐受功率可达 500 W, 插入损耗随注入功率变化具备良好的线性度 0.3 dB @ 1-500 W。

4 结论

本文针对目前大电流注入探头应用于大电流注入试验时阻抗容易发生非线性变化的问题, 开展了大功率高线性度的电流注入探头的分析和研制。通过分析大电流注入的方式, 探索了使电流探头大功率下发生非线性变化的原因, 对商品化的电流探头进行了线性度测试。测试结果表明, 随着注入功率增大, 不同频点的线性误差也随之增大, 这就表明大电流注入探头的输入输出功率之间都不同程度地出现了非线性。进行了大功率高线性度电流注入探头的研制, 提出了研制方案, 制作出了电流探头实物并进行了测试。测试结果表明, 自行研制的电流注入探头插入损耗随注入功率变化具备良好的线性度 0.3 dB @ 1-500 W, 最大耐受功率可达 500 W, 可以满足开展大电流注入等效强场电磁辐射效应试验的技术需求。在模拟强场电磁辐射效应时, 该电流探头可以耐受高功率且保持较好的线性度。这样既保证的外推之后无源等效电路与原电路相同, 也保证了注入功率的线性外推。

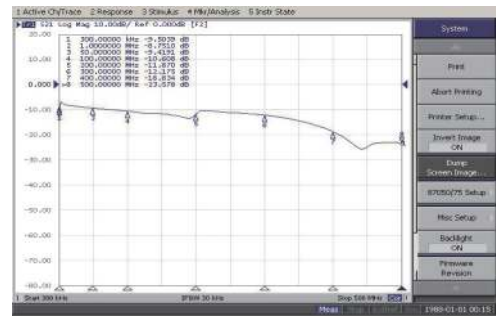


Fig. 13 Insertion loss curve of the self-developed current injection probe

图 13 自研电流注入探头插损曲线

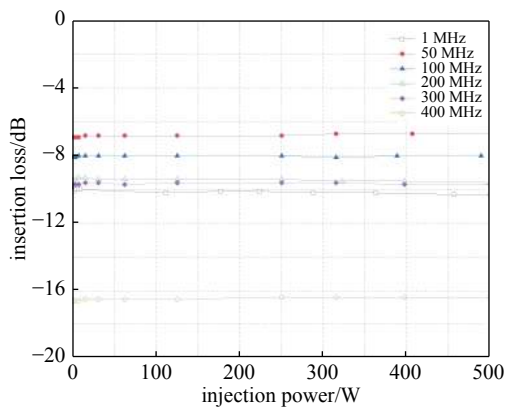


Fig. 14 Test result of the self-developed current injection probe's insertion loss

图 14 自研电流注入探头插损测试结果

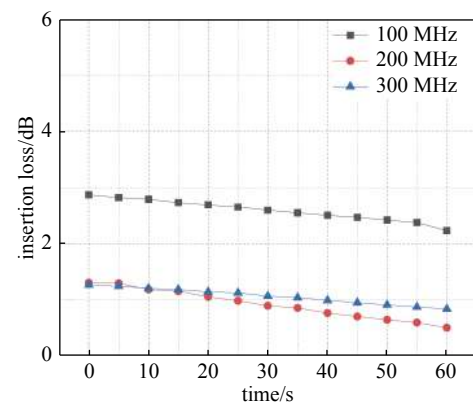


Fig. 15 Test result of the self-developed current injection probe withstanding 500 W power

图 15 自研电流注入探头 500 W 耐受功率测试结果

参考文献:

- [1] Flavia G, Sergio A P. Bulk current injection in twisted wire pairs with not perfectly balanced terminations[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(6): 1293-1301.
- [2] 马伟明. 电力电子系统中的电磁兼容[M]. 武汉: 武汉水利水电大学出版社, 1999. (Ma Weiming. Electromagnetic compatibility in power electronic systems[M]. Wuhan: Wuhan University of Water Resources and Hydropower Press, 1999)
- [3] 钱照明, 程肇基. 电磁兼容设计基础及干扰抑制技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000. (Qian Zhaoming, Cheng Zhaoji. Design basis of electromagnetic compatibility and interference suppression technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000)
- [4] Kojovic L. PCB Rogowski coils benefit relay protection[J]. *IEEE Computer Applications in Power*, 2002, 15(3): 50-53.
- [5] Kojovic L. Rogowski coils suit relay protection and measurement[J]. *IEEE Computer Applications in Power*, 1997, 10(3): 47-52.
- [6] Flavia G, Giordano S, Sergio A P. The concept of weak imbalance and its role in the emissions and immunity of differential lines[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(6): 1346-1349.
- [7] 谭伟, 高本庆, 刘波. EMC测试中的电流注入技术[J]. 测试与测量, 2003(4): 19-22. (Tan Wei, Gao Benqing, Liu Bo. The advances in development of current injection methods for EMC testing[J]. Testing and Measurement, 2003(4): 19-22)
- [8] 杨茂松, 孙永卫, 潘晓东, 等. 双绞线BCI等效替代强场电磁辐射实验研究[J]. 微波学报, 2018, 34(6): 72-77. (Yang Maosong, Sun Yongwei, Pan Xiaodong, et al. Testing technology of using twisted pair cable BCI as substitution for high field continuous wave EM radiation[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(6): 72-77)
- [9] 魏光辉, 卢新福, 潘晓东. 强场电磁辐射效应测试方法研究进展与发展趋势[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1347-1355. (Wei Guanghui, Lu Xinfu, Pan Xiaodong. Progress and development trend of testing method for high field electromagnetic radiation effect[J]. High Voltage Technology, 2016, 42(5): 1347-1355)

- Xiaodong. Recent progress and development in test methods for high intensity electromagnetic field radiation effect[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5): 1347-1355)
- [10] 潘晓东, 魏光辉, 卢新福, 等. 差模定向注入等效替代强电磁脉冲辐射效应实验方法[J]. 电波科学学报, 2017, 32(2): 151-160. (Pan Xiaodong, Wei Guanghui, Lu Xinfu, et al. Test method of using differential mode injection as a substitute for high intensity electromagnetic pulse radiation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2017, 32(2): 151-160)
- [11] 孙永卫, 杨茂松, 潘晓东, 等. 大电流注入探头对电磁辐射敏感性研究的影响[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(12): 1362-1368. (Sun Yongwei, Yang Maosong, Pan Xiaodong, et al. Influence of bulk current injection probe on electromagnetic radiation sensitivity research[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(12): 1362-1368)
- [12] 杨茂松, 孙永卫, 潘晓东, 等. 平行双线BCI等效替代强场连续波电磁辐射实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 093201. (Yang Maosong, Sun Yongwei, Pan Xiaodong, et al. Testing technology of using bulk current injection with parallel double line as substitute for high field continuous wave electromagnetic radiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 093201)
- [13] 潘晓东, 魏光辉, 卢新福, 等. 电磁注入等效替代辐照理论模型及实现技术[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2293-2301. (Pan Xiaodong, Wei Guanghui, Lu Xinfu, et al. Equivalent surrogate irradiation theoretical model and realization technology of electromagnetic injection[J]. High Voltage Technology, 2012, 38(9): 2293-2301)
- [14] MIL-STD-461C, Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment[S]. 2001.
- [15] GJB151B, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. 2013. (GJB151B, Electromagnetic emission and susceptibility requirements and measurements for military and subsystems. 2013)
- [16] ED-107, Guide to certification of aircraft in a high-intensity radiated field (HIRF) environment[S]. 2010.