

中文核心期刊要目总览

- 中国科技核心期刊
- •中国科学引文数据库(CSCD)
- 中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)
  中国学术期刊文摘数据库(CSAD)
- 中国学术期刊(网络版) (CNKI)

中文科技期刊数据库万方数据知识服务平台

- 中国超星期刊域出版平台
  国家科技学术期刊开放平台
- •荷兰文摘与引文数据库(SCOPUS)
- 日本科学技术振兴机构数据库 (JST)

#### 基于平行双线结构的低频场发生器设计

陈亮凡,吴钟杰,赵李刚,王正斌

Design of low-frequency electric field generator based on parallel-line transmission structures

CHEN Liangfan, WU Zhongjie, ZHAO Ligang, and WANG Zhengbin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023005

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 纳秒级电磁脉冲发生器的研制与相关寄生参数研究

Development of nanosecond electromagnetic pulse generator and related parasitic parameters 电波科学学报. 2018, 33(5): 557-564

#### 信息时代电磁兼容领域的挑战与应对(特邀文章)

The challenge and reply to EMC fields in the times of information(Invited) 电波科学学报. 2019, 34(4): 393-402

#### 基于多点接地的载荷舱电磁辐射抑制技术研究

Suppression of the electromagnetic radiation in the payload module based on the multi-point grounding 电波科学学报. 2019, 34(4): 505-511

#### 定向辐射式核电磁脉冲场模拟器的研制

Research on directional radiation HEMP simulator 电波科学学报. 2017, 32(1): 58-64

#### 大功率通信天线介质降损与末端电场的均化特性分析

Characteristics of dielectric loss and electric field homogenization at the terminal opening of high power communication antenna 电波科学学报. 2018, 33(2): 162-169

#### 数字逻辑电路GPIO电磁抗扰度的热应力效应分析

Analysis of thermal stress effect on the electromagnetic immunity of digital logic circuit's GPIO 电波科学学报. 2019, 34(4): 447-454



关注微信公众号,获得更多资讯信息

陈亮凡, 吴钟杰, 赵李刚, 等. 基于平行双线结构的低频场发生器设计[J]. 电波科学学报, 2024, 39(1): 167-172. DOI: 10.12265/j.cjors.2023005 CHEN L F, WU Z J, ZHAO L G, et al. Design of low-frequency electric field generator based on parallel-line transmission structures [J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(1): 167-172. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023005

# 基于平行双线结构的低频场发生器设计

陈亮凡1 吴钟杰1,3 赵李刚2 王正斌1\*

(1. 南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子学院,南京 210023; 2. 南京洛仑电磁科技有限公司,南京 211106;3. 中国电信股份有限公司海南分公司,海口 570105)

摘 要 针对电磁辐射抗扰度测试天线在低频时辐射效率低、体积大、难以生成高电场强度的问题,设计了 一款平行双线传输线电场发生器。该场发生器输入端使用阻抗比为1:4的传输线变压器巴伦,实现了输入端与 负载的阻抗匹配,以及非平衡端转化为平衡端;为保证场发生器电气性能的稳定性和可靠性,平行双线传输线采 用直径为100mm的铜管,负载采用耐大功率的无感陶磁电阻,能够承受2500W的连续波输入功率。实验结果 显示该场发生器在10kHz~100MHz的频率范围内电压驻波比均小于1.9,在距场发生器中心0.5m远处可产生 高达200V/m的电场强度,在1m远处可产生50~100V/m的场强。该电场发生器可旋转改变电极化方向,具有 覆盖范围广、场强分布均匀、场强幅度高的特点,广泛应用于低频辐射抗扰度测试。

关键词 电场发生器;传输线变压器;大功率;宽带;电磁兼容;辐射抗扰度

中图分类号 TM937 文献标志码 A 文章编号 1005-0388(2024)01-0167-06 **DOI** 10.12265/j.cjors.2023005

## Design of low-frequency electric field generator based on parallel-line transmission structures

CHEN Liangfan<sup>1</sup> WU Zhongjie<sup>1,3</sup> ZHAO Ligang<sup>2</sup> WANG Zhengbin<sup>1\*</sup>

 College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. Lorentz EM Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China; 3. Hainan Telecom Co. Ltd., Hainan 570105, China)

**Abstract** A low-frequency field generator based on parallel-line transmission structures is designed for the electromagnetic field radiation immunity test, which can solve the problems of low radiation efficiency, large volume, and difficulty in forming a high electric field strength at low frequencies. A transmission-line balun transformer with 1:4 impedance transformation ratio is designed to realize the impedance matching between the input port and the load, and the transformation of unbalanced input to balanced output. In order to ensure the stability and reliability of the electrical performances, copper pipes with the diameter 100 mm are adopted as the parallel transmission lines, and non-inductive ceramic resistors are used as the load, which makes the field generator withstand 2 500 W continuous waves. The experimental results demonstrate that the field generator has a voltage standing wave ratio (VSWR) less than 1.9 in the frequency band of from 10 kHz–100 MHz. It can generate the electric field up to 200 V/m at a distance of 0.5 meters from the center, and 50 V/m –100 V/m at a distance of 1 m. The electric field generator has the main advantages of high-intensity field strength, wide coverage, uniform distribution, and rotatable polarization.

**Keywords** electric field generator; transmission-line balun transformer; high power; broadband; electromagnetic compatibility; radiation immunity

收稿日期: 2023-01-09

资助项目: 江苏省研究生科研创新计划 (KYCX21\_0721)

通信作者: 王正斌 E-mail: wangzb@njupt.edu.cn

0 引 言

随着电子信息产业的迅速发展,越来越多的电子设备会处在同一空间,引发各种电磁辐射和电磁 干扰问题,电子设备的电磁兼容(electromagnetic compatibility, EMC)特性受到学界越来越多的关注<sup>[1-4]</sup>。 射频电磁场辐射抗扰度测试用来评价电气、电子产 品或系统抗电磁干扰的能力<sup>[5]</sup>,测试中需要根据频率 和场强要求使用不同场发生器天线,主要有对数周 期天线、双锥天线、棒状天线或电场发生器来产生 所需的电场强度<sup>[6-13]</sup>。

由于低频段(10 kHz~200 MHz)时天线的辐射效 率低、电压驻波比 (voltage standing wave ratio, VSWR)较高,因此低频测试时大部分使用的是电场 发生器。目前,电场发生器主要有电容式场发生器 与传输线式场发生器。电容式场发生器一般为平行 双杆末端开路的结构,当平行导体的长度等于测试 频率对应波长的四分之一时会发生谐振,因此电容 式场发生器工作带宽受限。文献[14]中的电容式场 发生器可以在 10 kHz~30 MHz的频段产生 50 V/m 的场强,但由于尺寸原因,难以将其应用于大型 电子产品的辐射抗扰度测试,且其覆盖频谱较窄,场 强也较小。

传输线式电场发生器一般采用平行双线传输线 结构,末端的负载阻抗与传输线特性阻抗匹配,其工 作频率与场发生器天线的长度无关。本文基于平行 双线结构与传输线变压器巴伦设计了一款传输线式 电场发生器。电路负载选择了耐高温和耐高功率的 无感陶瓷电阻,功率容量高达2500W。该场发生器 能在10kHz~100MHz频率范围内产生高达200 V/m的电场强度,且场强分布均匀,在其输入端所测 得的VSWR在整个工作频率范围内均小于1.9,可产 生符合GJB151B-2013标准<sup>[15]</sup>中RS103测试所需的 电场强度,适用于大部分电子设备的辐射抗扰度试 验。

1 场发生器电路原理分析

本文设计中的电场发生器以平行双线结构为 主,电场主要分布在平行双线之间,其等效电路如图1 所示。为了实现整个电路的宽带阻抗匹配,平行双 线的特性阻抗要与负载匹配,同时也要与信号源输 入端口阻抗匹配。

本文设计中的负载采用 377 Ω 的大功率陶磁电 阻,因此,平行双线的特性阻抗也应设计为 377 Ω。 对于均匀无耗平行双线传输线,其特性阻抗可表示 为<sup>[16]</sup>

$$Z_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}$$
(1)

式中: ε, μ分别为传输线周围媒质的介电常数和磁导 率; D为双线之间的距离; d为传输线单线的直径。 通过选择适当的传输线结构参数, 就可以实现平行 双线的特性阻抗为 377 Ω, 此时传输线之间的电磁波 处于行波状态, 且有



Fig. 1 Schematic of the electric field generator circuit

### 2 传输线变压器电路原理分析

由于场发生器的输入端口阻抗一般为 50 Ω,因 此,在输入端与平行双线传输线之间需要一个 50:377 的宽频阻抗匹配网络。同时,考虑到输入端口一般 为非平衡同轴线,而平行双线为平衡电路,因此,匹 配网络还需要实现非平衡电路到平衡电路的转换。 本文设计采用传输线变压器巴伦来实现上述功能, 为便于制备,这里选择阻抗比为 1:4 的传输线变压 器巴伦。

传输线变压器巴伦主要有两种类型:一种是由 Guanella于1944年提出,利用传输线绕组形成阻塞 模式,以减少平衡到不平衡应用中的干扰<sup>[17]</sup>;另一种 是由 Ruthoff于1959年提出,通过在传输线上形成 正或负的电势梯度来获得宽带变换<sup>[18]</sup>。Guanella式 传输线变压器结构是对称的,有较好的平衡性。本 文设计了阻抗比为1:4的Guanella式传输线变压器 巴伦,如图2所示。由于电路的对称性,我们只需对 其中一对传输线进行分析,其传输矩阵为



图 2 阻抗比为 1:4 的 Guanella 式传输线变压器巴伦电路模 型

Fig. 2 Circuit model of Guanella-type 1:4 impedance ratio transmission-line balun transformer

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ \frac{1}{2}I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) & jZ_c \sin(\beta l) \\ j\frac{1}{Z_c} \sin(\beta l) & \cos(\beta l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, Z。为磁芯绕组的特性阻抗。可得传输线变压器输入端输入阻抗为

$$Z'_{\rm in} = \frac{U_{\rm i}}{\frac{1}{2}I_{\rm i}} = \frac{\frac{1}{2}U_2\cos(\beta l) + jZ_{\rm c}I_2\sin(\beta l)}{I_2\cos(\beta l) + j\frac{1}{Z_{\rm c}}\frac{1}{2}U_2\sin(\beta l)}$$
(4)

简化得

$$Z'_{\rm in} = \frac{Z_{\rm c}}{2} \frac{\frac{1}{2} Z_{\rm in} + j Z_{\rm c} \tan(\beta l)}{Z_{\rm c} + j \frac{1}{2} Z_{\rm in} \tan(\beta l)}$$
(5)

当 $Z_c = Z_m/2$ 时,  $Z'_m = Z_m/4$ 。因此对于图 2 所示的 传输线变压器模型,当传输线的特性阻抗为负载的 一半时,输入端阻抗与负载阻抗之比为 1:4,且此时 传输线变压器中的传输线线长不会因频率变化而影 响阻抗比。

#### 3 仿真分析

图 3 所示为传输线式场发生器的三维模型图, 考虑到实际使用中大地对平行双线的特性阻抗也有 影响,在电场发生器的下方建立了无限大地的模 型。实际使用中还有对电场极化方向不同的需求, 所以该场发生器模型还仿真了天线旋转支架对场分 布的影响。三维模型中两根黄色的平行线即为本文 设计中的平行双线传输线,材质设置为铜,长度为 2 030 mm, 直径为 100 mm, 平行双线间距为 1 000 mm,双线中心距离地面高1000 mm,传输线两端的 矩形立柱内分别放置传输线变压器巴伦和无感陶瓷 电阻,整体呈矩形结构。信源输入端与传输线变压 器巴伦相连,大功率射频信号从50Ω同轴端口输 入,通过传输线变压器巴伦进行阻抗匹配和平衡转 换,再经过平行双线传输到末端负载之中。负载由 8个无感陶瓷电阻串并联而成,其总阻抗值约为377 Ω,可耐受连续波功率高达2500W。



图 3 传输线式电场发生器三维模型图 Fig. 3 3D model of the transmission line E-field generator

为了简便研究与分析传输线式电场发生器的电 场分布特性,在全波电磁仿真软件中对该场发生器 进行建模仿真,选取 10 kHz、50 MHz、100 MHz 作为 仿真的测试频率点。在距离传输线 z=1 m 远处设 xOy 观察平面,大小为 3 m × 2.5 m,如图 4 所示。可 以看出,当设置输入功率为 2 500 W 时,在距离电场 发生器设备中心 1 m 远处的平面内,所有频点均可 以实现场强值超过 50 V/m,且绝大部分区域甚至超 过 100 V/m。该传输线式电场发生器在大部分区域 的电场分布较为均匀,且覆盖区域较为广阔,可以应 用于较大尺寸电子设备的辐射抗扰度测试。







(b) 50 MHz





图 4 距离场发生器中心 1 m 远处 xOy 平面内场强仿真分布图 Fig. 4 E field simulation distributions in the xOy plane 1 m away from the center of the E-field generator

图 5 进一步给出了当输入功率为 2 500 W 时,在 距离该场发生器中心 z= 0.5 m 远处 xOy 观察平面内 的场强分布图。可以看出,该传输线式电场发生器 在 10 kHz、50 MHz、100 MHz 等频点均可产生高达 200 V/m 的电场强度,且在很大区域范围内场强分布 均匀。该场强值能够满足绝大部分辐射抗扰度测试 标准要求。





(b) 50 MHz



图 5 距离场发生器中心 0.5 m 远处 xOy 平面内场强 仿真分布图



4 实测结果

图 6 为传输线式场发生器在测试现场的实物照 片。其背后的旋转支架可调整场发生器距离地面的 高度、俯仰角度,以及 *xOy* 平面内的极化旋转。 图 7 为该电场发生器在小信号输入功率下的实测 VSWR。可以看出,在 10 kHz ~100 MHz 的频率范围 内 VSWR 均在 1.9 以下,说明该场发生器反射功率 较小。



图 6 传输线式电场发生器实物测试图

Fig. 6 Picture of transmission line E-field generator



图 7 传输线式电场发生器实测 VSWR Fig. 7 Measured VSWR of transmission line E-field generator

图 8 所示为距离场发生器中心 1 m 远处场强探 头实际测量得到的电场强度随频率变化的曲线。可 以看出,当输入功率一定时,除了 20 MHz 频点处场 强较弱之外,该电场发生器在整个工作频率范围内 均能产生较稳定的场强,其主要原因可能是 20 MHz 时产生了谐振吸收。当输入功率大于 1 000 W 时,所有频点都能产生大于 50 V/m 的场强;当输入 功率为 2 000 W 时,20 MHz 频点附近场强为 70.2 V/m,其他频点处场强基本上都大于 100 V/m。



图 8 距离场发生器 1 m 远处的场强测试曲线

Fig. 8 Measured E-field strength at a distance of 1 m from the center of distance generator

图 9 进一步给出了该场发生器天线在距离中心 0.5 m 远处的场强测量值。可以看出,要产生 50 V/m

的电场强度,输入功率只需要在 100 W 左右;而当要 产生大于 150 V/m 的场强时,在 10 kHz 频点处所需 输入的功率远大于其他频点,这主要是因为在低频 点处发生了磁饱和,等效电感值下降所引起。当输 入功率接近 2 500 W 时,所有频点处均可产生大于 200 V/m 的场强,能够满足国内外电磁发射和敏感度 测试标准。



图 9 距离场发生器 0.5 m 远处的场强测试曲线 Fig. 9 Measured E field strength at a distance of 0.5 m from the center of distance generator

#### 5 结 论

本文介绍了一种传输线式电场发生器的电路结 构和设计原理。为了在较宽的频率范围内实现阻抗 匹配和非平衡转平衡电路,采用了阻抗变换比为 1:4的 Guanella 型传输线变压器巴伦,其结构简单, 能够实现更好的阻抗变换,使得场发生器天线的 VSWR性能更优。全波仿真分析了该场发生器的电 场分布特性,然后设计与加工了一款低频传输线式 电场发生器,其在 10 kHz~100 MHz 的频域范围内能 够实现 VSWR 均小于 1.9,在距其中心 0.5 m 远处可 产生高达 200 V/m 的场强,而在 1 m 远处亦可产生大 于 50 V/m 的场强,在较广的区域内场强分布均匀, 能够满足许多大型电子设备辐射抗扰度试验的需 求。

#### 参考文献

[1] 齐万泉, 汪宗福, 马蔚宇, 等. 相似原理应用于混响室缩比模型的验证分析[J]. 电波科学学报, 2011, 26(1): 180-185.
 QI W Q, WANG Z F, MA W Y, et al. Verification and ana-

lysis on similitude principium used in compact model of reverberation chamber[J]. Chinese journal of radio science, 2011, 26(1): 180-185. (in Chinese)

[2] MADSEN K, HALLBJORNER P, ORLENIUS C. Models for the number of independent samples in reverberation chamber measurements with mechanical, frequency, and combined stirring [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2004, 3(1): 48-51.

- PRIMIANI V M, MOGLIE F, PASTORE A P. Field penetration through a wire mesh screen excited by a reverberation chamber field: FDTD analysis and experiments[J].
   IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2009, 51(4): 883-891.
- [4] 贾锐, 王庆国, 程二威. 混响室条件下的辐射敏感度测试 新方法[J]. 电波科学学报, 2012, 27(3): 532-537.
  JIA R, WANG Q G, CHENG E W. New method of susceptibility test in reverberation chamber[J]. Chinese journal of radio science, 2012, 27(3): 532-537. (in Chinese)
- [5] 张亮. 电磁兼容(EMC)技术及应用实例详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [6] ABDULHAMEED A A, KUBÍK Z. Investigation of broadband printed biconical antenna with tapered balun for EMC measurements [J]. Energies, 2021, 14(13): 1-15.
- [7] AUSTIN B A, FOURIE A. Characteristics of the wire biconical antenna used for EMC measurements[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 1991, 33(3): 179-187.
- [8] MCLEAN J, SMITH D, MEDINA A, et al. Quasifrequency-independent, H-plane, log-periodic dipole arrays for automotive EMC immunity testing applications[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No. 00CH37016). Washington, DC, 2000: 563-568.
- [9] BANG, HAN C, JUNG K, et al. High-frequency performance improvement of LPDA for EMC/EMI measurements[C]// 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Osaka, 2021: 621–622.
- [10] ZINGARELLI M, GREGO R. 9 kHz–30 MHz E-field measurement by an innovative ROD antenna embedding a fully CISPR 16-1-1 receiver[C]// Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Shenzhen, 2016: 788-790.
- [11] AZARO R, GANDOLFO A. A detailed numerical analysis of the electric field distribution in rod antenna radiated emission setups[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI). New Orleans, 2019: 537-542.
- [12] STEWART M G, SIEW W H, CAMPBELL L C. Design of portable electric and magnetic field generators[J]. Measurement science and technology, 2000(11): 1596-1601.
- [13] 代明珍,康宁,黄承祖,等.一种平行极板电场发生器的设计[C]//第28届全国电磁兼容学术会议论文集,2022:64-67.
- [14] WU Z J, ZHANG J M, CHEN H, et al. High-power electric

field generator for radiated susceptibility tests[C]// 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Nanjing, 2021: 1-3.

- [15] 中国电子技术标准化研究院. GJB 151B-2013 军用设备 和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. 北京: 总装 备部军标出版发行部, 2013.
- [16] POZAR D M. Microwave engineering[M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [17] GUANELLA G. Novel matching system for high frequencies[J]. Brown Boveri review, 1944, 31: 327-329.
- [18] RUTHROFF C T. Some broad-band transformers[J]. Proceedings of the IRE (PIRE), 1959, 47: 1337-1342.

#### 作者简介

**陈亮凡** (1999—), 男, 广西人, 南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子学院硕士研究生, 研究方向为传输线变压器、射频铁氧体器件的研究与设计。E-mail: 741246751@qq.com

吴钟杰 (1997—), 男, 海南人, 南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子学院硕士, 中国电信股份有限公司海南分公司工程师, 研究方向为传输线变压器、射频铁氧体器件的研究与设计。E-mail: 1219023417@njupt.edu.cn

赵李刚 (1984—), 男, 广东廉江人, 南京洛仑电 磁科技有限公产品总监, 华南理工大学电子工程系 硕士研究生, 研究方向为通信天线及微波器件研究 与设计。E-mail:leon@lorentzcomms.com