

基于SAE-ARP958环天线校准技术研究

高刚, 朱宜生

(中国船舶重工第七二三研究所, 江苏 扬州 225001)

摘要: **目的** 介绍基于SAE-ARP958环天线校准技术, 研究提高该校准精确性的方法, 为精确监测电磁环境提供保障。**方法** 研制一套基于SAE-ARP958环天线的校准装置, 提出采用直径分别为30, 10, 4 cm的三个发射环天线作为磁场发生装置的校准方案, 并利用对比测试的方法对校准方案进行优化。**结果** 优化后的校准方案能够实现环天线的精确校准。**结论** 基于SAE-ARP958环天线校准方法具有不受待校环尺寸限制的优点, 而且精确性高, 值得向具有较多不同尺寸的环天线用户推广。

关键词: 校准装置; SAE-ARP958; 电磁环境

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.01.023

中图分类号: TJ06; TN820 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)01-0121-05

Loop Antenna Calibration Technology Based on SAE-ARP958

GAO Gang, ZHU Yi-sheng

(723 Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Yangzhou 225001, China)

ABSTRACT: **Objective** To introduce the loop antenna calibration technology based on the SAE-ARP958 and investigate the method improving the accuracy of the calibration, which guarantees accurate monitoring in electromagnetic environment. **Methods** The design of a set of loop antenna calibration based on the SAE-ARP958 was proposed, the calibration scheme of using three launch loop antennas with the respective diameter of 30 cm, 10 cm and 4 cm as the magnetic field generator was put forward, and the method of comparison test was used for optimization of the calibration scheme. **Results** The optimized calibration scheme can realize accurate loop antenna calibration. **Conclusion** Loop antenna calibration method based on the SAE-ARP958 has the advantage of not being restricted to loop antenna size, and the accuracy is high, which is worth to be prompted to the users with different loop antenna sizes.

KEY WORDS: calibration device; SAE-ARP958; electromagnetic environment

随着科技的不断进步和电子装备的投入使用, 电磁环境变得越来越复杂, 已经逐渐成为制约武器装备发挥作战效能的重要因素之一^[1], 因此, 电磁环境效应试验方法^[2]以及电磁环境适应性越来越受到重视。环

天线广泛用于对电磁环境尤其是磁场环境的监测^[3]。在GJB 151B《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》中明确要求使用环天线来进行低频传导发射(CE101)、辐射发射(RE101)和辐射敏感性(RS101)

收稿日期: 2015-09-15; 修订日期: 2015-09-21

Received: 2015-09-15; Revised: 2015-09-21

作者简介: 高刚(1988—), 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁兼容性。

Biography: GAO Gang(1988—), Master, Engineer, Research focus: electromagnetic compatibility.

的测量和测试,它的校准精确性对一个装备或分系统的合格性具有重要的影响。ANSI C63-4^[4]和 CISPR 16-1-4^[5]均要求使用环天线来进行 30 Hz 到 100 kHz 之间的磁场发射测量。MIL-STD 461E/F^[6-7]作为一个非常重要的军用电磁兼容标准,也要求使用环天线进行多个测试。此外,环天线在电力环境监测方面也具有广泛的应用^[8]。

天线系数作为环天线的一项重要参数,它的校准是电磁兼容工程师们极其关注的问题^[9]。商用环天线由于长期使用、磨损等原因^[10],商家提供的天线系数难以满足现场测试的精确度。因此,环天线在用于测量之前,必须对其天线系数进行校准,最好是每次测试前都进行现场校准,非常有必要开展环天线现场校准的研究。

1 基于标准场环天线校准方法

1.1 方法介绍

目前常见的标准场环天线校准方法主要是通过横电磁波传输室(TEM cell)和亥姆霍兹线圈^[11]产生量值可确定的标准场来实现。其中,横电磁波传输室法要满足“1/3”原则,因此,被校环天线尺寸受限于横电磁波传输室的尺寸,对于直径 30 cm 以上的待校环,TEM cell 的尺寸会非常大且造价不菲,同时还应充分考虑电场的影响。亥姆霍兹线圈在其公共轴线中点附近可产生较广的轴向均匀磁场区^[12],该方法适用频率范围和场均匀性区域之间相互制约,无法兼顾,因此在实际应用中其使用频率上限很难达到 30 MHz,尤其是对于尺寸较大的待校环。文中介绍的基于 SAE-ARP 958^[13]的校准方法,该方法不受待校环天线尺寸的影响,能够快速搭建校准现场并且实现环天线频率 10 kHz~30 MHz 的精确校准。

1.2 基于 SAE-ARP 958 校准方法

SAE-ARP 958 环天线校准是通过发射环产生感应场的一种方法,其校准距离通常为 1 m,发射环产生的平均磁场场强是通过表达式(1)来计算:

$$H = \frac{1}{2} \frac{d_{xmt}^2}{4} I n_{xmt} \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{4\pi^2 f^2}{c^2} \right) \left[L^2 + \left(\frac{d_{xmt}}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_{rev}}{2} \right)^2 \right]}{\left[L^2 + \left(\frac{d_{xmt}}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_{rev}}{2} \right)^2 \right]^{3/2}}} \quad (1)$$

式中: H 为磁场强度,A/m; d_{xmt} 和 d_{rev} 分别是发射环和接收环的直径,m; L 接收环与发射环之间的中心距离,m; I 发射环上的注入电流,A; n_{xmt} 发射环的匝数; f 校准频率,Hz; c 为光速,m/s。

$$AF = 20 \lg(H/U) \quad (2)$$

式中: AF 为待校环天线的磁场天线系数,dBS/m; H 为待校环的磁场强度,A/m; U 为待校环天线的感应电压,V。

2 校准方案设计

文中提出了采用直径分别为 30, 10, 4 cm 的三个发射环天线作为磁场发生装置,分段实现环天线 10 kHz~30 MHz 天线系数校准的方案,自主研发一套可自由拆卸组装的专用校准装置。该装置能够实现发射环和待校环两环同心同轴,提高天线系数校准的精确性。

2.1 发射环天线尺寸

作为磁场发生源的发射环需要满足多个条件:发射环各个位置上的电流相必须高度一致性,即环天线的周长必须小于自由空间波长的 1/8^[14];发射环天线的适用频率要远小于其谐振频率(工程上一般取小于谐振频率的 1/10);发射环需具备较高的辐射效率。因此,在设计过程中要充分考虑到发射环与信号源、电缆之间的阻抗匹配,采用三个发射环分段匹配,分段实现环天线校准正是基于此。

利用 Agilent E5061B 矢量网络分析仪对直径分别为 4, 10, 30 cm 的发射环天线阻抗特性进行测试并计算,测试结果如图 1 所示。

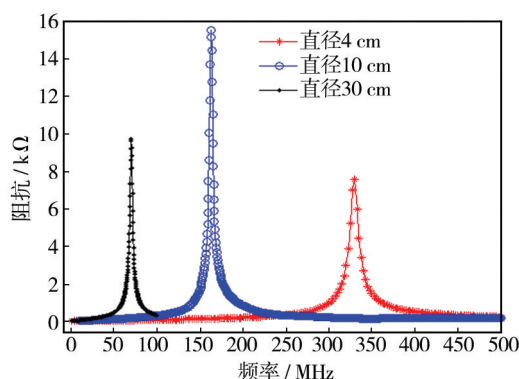


图1 环天线阻抗谐振特性

Fig.1 Impedance resonant characteristics of loop antenna

由图 1 可知,直径分别为 4, 10, 30 cm 的三个发射环天线的谐振频率^[15]依次为 328, 163, 70.2 MHz。根据 1.1 节中发射环尺寸需满足的条件,同时也为方便设计

环天线匹配电路,提高天线辐射效率,文中采用分段进行发射环天线设计,在频段0.15~6.0 MHz,6.0~15.0 MHz,15.0~30.0 MHz所使用的环天线尺寸分别为30,10,4 cm。

2.2 匹配电路

为了能够实现发射环与信号源、电缆之间的阻抗匹配,专门对三个发射环分别设计了匹配电路。匹配电路主要包含以下组成部分:发射环天线(等效为一个电感)、1 Ω精密电阻(串联在环天线上用来获得环上电流)、电路网络等。发射环匹配电路采用线路板设计,直接安装在发射环底座中。经测试,文中使用的4,10,30 cm的发射环在相应频段内的电压驻波比均小于1.5。设计的三个发射环如图2所示。

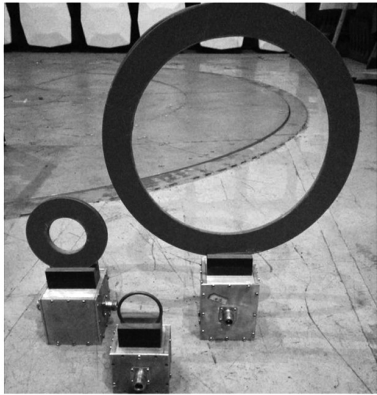


图2 发射环天线
Fig.2 Launch loop antenna

2.3 校准装置研制

为了实现SAE-ARP 958D环天线感应场法校准的精确性和减少校准测试中的不确定度,根据发射环及待校环的尺寸,自主研制一套校准装置以保证两环的同心共轴,其中心距离为1 m,校准装置如图3所示。



图3 环天线校准装置
Fig.3 Loop antenna calibration device

3 提高校准精确性方法研究

利用自主研制的校准装置,开展以ETS-Lindgren公司的6507型有源环天线作为待校准天线的校准测试,通过将该测试得到的天线系数结果与ETS-Lindgren公司提供的磁场天线系数进行对比,不断优化校准设计方案,提高校准精确性。

3.1 影响校准结果的因素分析

校准过程中发现,影响校准结果精确性的因素除了文中专门研制的校准装置外,还有校准装置与电缆的摆放方向,当校准装置摆放方向与电缆几乎平行时,天线系数校准结果会与ETS-Lindgren公司提供的磁场天线系数更符合一致,见表1。天线系数 AF_1 为校准装置摆放方向与电缆几乎平行状态下的校准结果;天线系数 AF_2 为校准装置摆放方向与电缆几乎垂直状态下的校准结果;天线系数 AF_0 为ETS-Lindgren公司提供的磁场天线系数。根据这一现象,从理论上进行了原因分析:频率在3 MHz以下, AF_1 、 AF_2 与 AF_0 之间的差值较小,主要是由于在较低频率杂散电容形成的通路阻抗远大于回线返回信号源通路的阻抗,因此,大部分电流都是沿着回线返回信号源,此时的共模电流就非常小;当频率较高时,杂散电容形成的通路阻抗已经很小,就会存在一定比例的共模电流,共模电流导致共模辐射,直接影响到天线系数的校准结果。发射环上共模电流产生的原理如图4所示,共模电压是导致共模电流的根本原因,发射环线路板上的地线电压作为共模电压,可以驱动电缆上的共模电流,形成共模辐射。考虑到导致这一现象的主要原因来自于发射环上及其电缆上的共模电流,因此,提高校准

表1 不同状态下的环天线校准结果

Table 1 Calibration results of loop antenna under different states			
f/MHz	$AF_1/(\text{dB}\cdot\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	$AF_2/(\text{dB}\cdot\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	$AF_0/(\text{dB}\cdot\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$
0.15	-33.9	-33.7	-34.5
0.25	-33.8	-33.7	-34.6
0.50	-34.0	-34.0	-34.6
0.75	-33.8	-33.8	-34.5
1.0	-34.3	-33.8	-34.3
3.0	-34.5	-34.3	-34.3
10.0	-22.1	-21.5	-35.3
15.0	-28.5	-27.7	-35.5
20.0	-47.5	-49.2	-35.8
30.0	-52.7	-53.3	-36.7

精确性的方法关键在于有效控制环上及电缆上的共模电流。

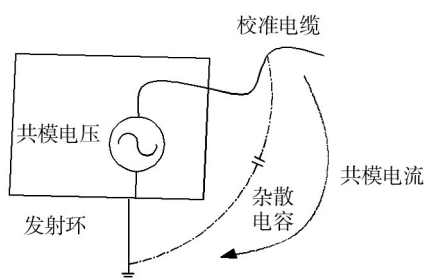


图4 电缆上的共模电流

Fig.4 The common-mode current on the cable

3.2 提高校准精确性的方法

由表1可以看出,低频段受共模电流影响较小,高频段影响较大。考虑到共模扼流圈有在低频段的共模抑制效果小,在高频段的共模抑制效果明显的特点,文中采用了在发射环匹配电路端进行1:1巴伦^[16]设计的方法,巴伦起着共模扼流圈和阻抗过渡的作用。该方法能够有效抑制环上的共模电流,同时为了更好地抑制电缆上的共模电流,在校准电缆上均匀加25个BF-100-B铁氧体磁珠。通过上述两个方法,可以明显减小共模电流对环天线校准的影响。

4 方案优化及校准测试

4.1 校准方案优化

校准方案的优化主要体现在发射环设计的优化及现场校准测试电缆的处理两方面。优化后的校准方案采用的是经过巴伦设计的直径分别为30, 10, 4 cm的三个发射环作为磁场发生装置。虽然共模扼流圈能够抑制环上的大部分共模电流,但仍然有一小部分共模电流会存在于校准电缆上。为了进一步提高天线系数的校准结果,在校准测试中校准装置摆放方向与电缆尽量平行,同时在校准电缆上均匀分布25个BF-100-B铁氧体磁珠,该方法有助于减小电缆上的共模电流。

4.2 校准测试

环天线校准测试在暗室中进行,发射环和待校准环分别位于校准装置的两端,其中信号源SML03(9 kHz~3.3 GHz)通过电缆射频输出给发射环,待校准环天线

6507通过电缆与频谱仪FSP30(9 kHz~30 GHz)相连,25个BF-100-B铁氧体磁珠均匀分布在发射以及接收电缆上。

经测试获得待校准环天线的磁场天线系数 AF_3 , AF_0 为ETS-Lindgren公司提供的磁场天线系数,经过优化设计方案后的校准结果见表2。由表2可以看出,设计方案优化后的校准结果与ETS-Lindgren公司提供的磁场天线系数一致性非常高,进一步表明了文中提出的校准方案的合理性。

表2 优化设计方案后的校准结果

Table 2 Loop calibration results after optimized design

f/MHz	$AF_3/(\text{dB} \cdot \text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	$AF_0/(\text{dB} \cdot \text{S} \cdot \text{m}^{-1})$
0.15	-34.5	-34.5
0.25	-34.6	-34.6
0.50	-34.7	-34.6
0.75	-34.6	-34.5
1.0	-34.6	-34.5
3.0	-34.5	-34.3
10.0	-35.1	-35.3
15.0	-36.9	-35.5
20.0	-36.6	-35.8
30.0	-36.8	-36.7

5 结语

文中提出的基于SAE-ARP 958的校准方案,在自主研制的校准装置的辅助下,实现了环天线的精确校准(最大误差为1.4 dB)。由于受发射环底座大小的限制,文中采用的是共模扼流圈抑制环上共模电流的方法,具有较理想的抑制效果。如果在发射环空间允许的情况下,在发射环上安装一个小型共模滤波器,可以获得更精确的校准结果。该方法突破了电磁波传输室法和亥姆霍兹线圈法等标准场法受待校准环天线尺寸限制的禁锢,校准装置移动方便,可以满足快速搭建校准现场的需求,特别适用于有大量不同尺寸环天线需要校准的用户。

参考文献:

- [1] 沈阳,李修和,李勇. 雷达装备复杂电磁环境适应性评价研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 1—5.
- SHEN Yang, LI Xiu-he, LI Yong. Research on Complex Electromagnetic Environmental Worthiness Evaluation of Radar Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(3): 1—5.

- [2] 王玉明,谭志良,毕军建. 复杂电磁环境对雷达与指控系统的影响[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 12—15.
WANG Yu-ming, TAN Zhi-liang, BI Jun-jian. Effects of Complex Electromagnetic Environment on Radar and C2 System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 12—15.
- [3] 胡白涛,洪力,李渤. 环天线校准[J]. 现代测量与实验室管理, 2007(5): 1—4
HU Bai-tao, HONG Li, LI Bo. Loop Antenna Calibration[J]. The Modern Measurement and Laboratory Management, 2007(5): 1—4
- [4] ANSI/IEEE Standard C63.4—1992, American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz[S].
- [5] CISPR16—1—4, Specification for Radio Interference Measuring Apparatus and Measurement Methods[S].
- [6] MIL-STD—461E—1999, Inteiference Standards Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment[S].
- [7] MIL-STD—461F—2007, Interference Standards Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment[S].
- [8] SOYDAN Caklr, RAMIZ Hamid, LEVENT Sevgi. Loop-Antenna Calibration[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, October 2011, 53(5): 60—66.
- [9] 白同云,吴畏,陈志雨. 天线系数的校准和使用[J]. 电波科学学报, 2000, 15(4): 526—529.
BAI Tong-yun, WU Wei, CHEN Zhi-yu. The Antenna Factor of the Calibration and Use[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000, 15(4): 526—529.
- [10] 高刚. 磁场环天线校准技术和屏蔽效能测试技术研究[D]. 南京:东南大学, 2014.
GAO Gang. Magnetic Field Loop Antenna Calibration Technology and Magnetic Field Shielding Effectiveness Testing Technology Research[D]. Nanjing:Southeast University, 2014.
- [11] CISPR—16—1—6, Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods—Part 1—6: Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus—EMC Antenna Calibration[S].
- [12] ANDRES F. RESTREPO A, FRANCO—MEJIA E, et al. Study and Analysis of Magnetic Field Homogeneity of Square and Circular Helmholtz Coil Pairs: A Taylor Series Approximation [J]. Andean Region International Conference, 2012: 77—80.
- [13] SAE—ARP 958 Rev D, Electromagnetic Inteiference Measurement Antennas, Standard Calibration Method[S].
- [14] 高月,高攸纲. 用标准场法校准环天线[J]. 电子质量, 2003(9): 12—13.
GAO Yue, GAO You-gang. Using the Standard Field Method Calibration Loop Antenna[J]. Electronic Quality, 2003(9): 12—13.
- [15] 陈益胜. 基于标准场法的低频磁场暴露计校准方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
CHEN YI-Sheng. Based on the Standard Field Method of Low Frequency Magnetic Field Exposure Meter Calibration Method Research[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [16] ZHANG Zhen-yu, GUO Yong-xin, ONG Ling-chune. A New Wide-band Planar Balun on a Snigel-Layer PCB[J]. IEEE Microwave And Wireless Components Letters, 2005, 278(15): 416—418.

(上接第120页)

- Quality, 2012(1): 32—36
- [10] 房昺,张鹏飞,原玲,等. 钛合金紧固件用铝涂料的性能与应用[J]. 涂料工业, 2013, 43(5): 17—22.
FANG Bing, ZHANG Peng-fei, YUAN Ling, et al. Properties and Application of Al-Based Coatings for Titanium Alloy Fasteners[J]. Paint and Coating Industry, 2013, 43(5): 17—22.
- [11] HB 5374—87, 不同金属电偶腐蚀测定方法[S].
HB 5374—87, Different Methods for Determination of Galvanic Corrosion[S].
- [12] ZHANG J Q. Electrochemical Measurement Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [13] 王淑芹. 铝颜料的国外状况[J]. 中国涂料, 1994(2): 44—49.
WANG Shu-qin. Foreign Status of Aluminum Pigment[J]. Chinese Paint, 1994(2): 44—49.
- [14] AMIRUDIN A, THIENY D. Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy to Study the Degradation of Polymer-coated Metals[J]. Progress in Organic Coatings, 1995, 26(1): 1—28.
- [15] 王凤平,康万利,敬和民,等. 腐蚀电化学原理、方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
WANG Feng-ping, KANG Wan-li, JING He-min, et al. The Principle, Method and Application of Corrosion Electrochemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.