

# 基于谐振效应的电子起爆装置电磁敏感性分析方法

秦德淳, 苏东林, 武南开, 吴龙刚

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 针对战场环境中电子起爆装置易受电磁干扰影响的特点, 研究了电子起爆装置的电磁敏感特性, 提出了基于谐振效应的全波物理建模和本征特性仿真相结合的分析方法, 使用该方法计算了某型地雷非触发引信的电磁敏感性, 并从仿真和实验两个方面进行了验证。结果表明, 该方法计算精度高, 稳定性好, 对电子起爆装置电磁兼容性设计具有重要参考价值。

**关键词:** 电磁敏感性; 电子起爆装置; 谐振效应; 电磁兼容

中图分类号: TN 70

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.10.06

## Electromagnetic susceptibility analysis method of electro-explosive devices based on resonance effect

QIN De-chun, SU Dong-lin, WU Nan-kai, WU Long-gang

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Electro-explosive device (EED) is easily influenced by electromagnetic interference in war-field. To study the electromagnetic susceptibility of EED, the method of full-wave physical modeling and intrinsic characteristic simulation based on resonance effect is presented. The electromagnetic sensibility (EMS) of certain mine non-contact fuse is analyzed as an example. Both simulation and test are done to validate the correction of the EMS analysis method. The results demonstrate the precision and effectiveness of the proposed method which is of great value for reference to electromagnetic compatibility design of EED.

**Keywords:** electromagnetic susceptibility; electro-explosive device (EED); resonance effect; electromagnetic compatibility

## 0 引言

随着电子设备功率的提升和频段的扩展, 对电起爆装置的安全性乃至战场生存能力构成了严重威胁, 人们进一步认识到了对电子起爆装置电磁兼容性研究的重要性, 尤其是对电磁敏感性的研究进行了广泛的探讨。

文献[1]对电子起爆装置中桥丝温度与电流大小的关系进行了实验, 并对实验结果进行了统计分析, 得到了电流与温度之间的关系。文献[2]研究了电子起爆装置中桥丝的电磁敏感性和电磁干扰特性, 对电子起爆装置安全的预防提供了参考。文献[3]基于热平衡方程研究了电子起爆装置中脉冲效应对桥丝温度的影响, 提出了电子起爆装置脉冲敏感性的测量方法, 对电子起爆装置电磁兼容性分析提供了指导。文献[4]等研究了电子起爆装置中由电磁辐射引起的电流效应, 并将光纤用于电子起爆装置电磁辐射探测中。文献[5]提出了一种用于计算电子起爆装置电磁耦合效应的建模方法, 并讨论了典型电子起爆装置电磁响

应的成立条件。文献[6-7]预测了脉冲功率环境对电子起爆装置电磁效能的影响, 通过求解热平衡方程模拟了桥丝加热过程, 并对电子起爆装置的热效应进行了仿真。文献[8]利用红外光纤传感系统提出了一种电磁环境中电子起爆装置可靠性和安全性的量化分析方法。

近年来, 国内学者也对电起爆装置的电磁敏感性问题开展了一定研究, 文献[9]采用场线耦合理论对自由空间中处于平面波激励条件下的无屏蔽电子起爆装置的射频感应电流进行研究。文献[10]根据天线理论, 及偶极子天线达到半波谐振状态和电子起爆装置内阻抗与天线阻抗相匹配这两个基本假设下, 在多个场源同时作用时, 针对舰船甲板上电磁辐射对电子起爆装置的危害进行了分析与理论计算, 结果表明, 该能量可以对电子起爆装置产生严重的危害。文献[11-12]采用时域有限差分法, 对高功率微波源辐射下地雷电子起爆装置感应电流进行了数值分析, 并探讨了高功率微波照射下地雷电点火头引爆机理。

以上研究都是侧重从外部电磁环境角度开展对电子起

收稿日期: 2011-09-25; 修回日期: 2012-07-30。

基金项目: 国家自然科学基金(60831001); 国防基金(9140A31010109HK0101); 创新群体项目(60921001)资助课题

作者简介: 秦德淳(1978-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为军械电磁敏感性预测与试验。E-mail: shangyan535@163.com

爆装置电磁敏感性的研究,而忽略了电子起爆装置自身本征特性对电磁敏感性影响的研究。因此,本文提出一种基于矢量有限元的全波物理建模和本征特性仿真相结合的分析方法,从电子起爆装置自身谐振效应的角度入手,利用谐振频率分析电子起爆装置的电磁敏感性。首先对谐振效应原理进行分析,并选取了数值分析方法,接着以某型地雷非触发引信为例进行了具体分析,最后通过连续平面波扫描仿真和实验两种方式对本文提出的分析方法进行了验证,通过数据对比验证了分析方法的有效性。

## 1 电磁敏感性分析方法

### 1.1 谐振效应分析

电子起爆装置是实施点火与起爆等功能的电热装置,和任何电子设备相同,电子起爆装置有一个或几个谐振频率,当外界电磁波的频率与这些谐振频率中的任意一个接近时,将会产生谐振效应,由于谐振效应与电磁敏感性密切相关。因此,对电子起爆装置谐振频率的预测分析至关重要。

谐振效应,本质上是将电磁能量限制于特定区域内,电场和磁场相互转换,峰值交替出现在固定位置上的现象。对于如图 1 所示的矩形腔体,我们从电磁场的麦克斯韦方程出发,求解其满足特定边界条件的电磁场方程。

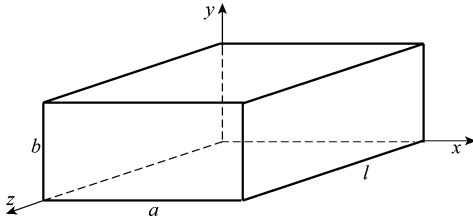


图 1 谐振腔示意图

当腔体谐振时,腔体内产生半波长整数倍的驻波,腔内的电磁波与矩形波导相对应,即腔体内存在着 TE 型振荡模式和 TM 型振荡模式。根据波导理论,均匀波导中 TE<sub>m</sub>, TM<sub>m</sub> 模式电场的横向分量可以表示为

$$E_T(x, y, z) = A^+ E_0(x, y) e^{-jk_z z} + A^- E_0(x, y) e^{jk_z z} \quad (1)$$

式中, E<sub>0</sub>(x, y) 为横向本征函数,只与横向坐标有关; A<sup>+</sup>, A<sup>-</sup> 分别为正向和反向行波的任意振幅系数。

TE<sub>m</sub>, TM<sub>m</sub> 的传输常数为

$$k_z = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (2)$$

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad (3)$$

式中, μ, ε 为腔体内填充介质的磁导率和介电常数。

将边界条件 z=0, E<sub>T</sub>=0 和 z=l, E<sub>T</sub>=0 代入式(1)中,可得

$$k_z = \frac{p\pi}{l} (p = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

这表明当腔体长度为半波长的整数倍时,将产生谐振效应。由此可见,本征模式求解的本质就是求出物体的谐振频率,而谐振频率是与物体的结构、尺寸相关的物理量。对于电子起爆装置来说,其自身的物理结构及材质等因素依

然会产生谐振效应。但由于其结构相对复杂,无法利用解析公式进行求解,因此本文结合矢量有限元的数值方法进行效应的分析。

### 1.2 基于矢量有限元的谐振效应数值分析方法

相对于其他数值分析方法,矢量有限元方法在进行谐振效应分析方面的优势在于,传统的有限元方法求解时谐电场时存在伪解和电磁场的奇异性问题,而矢量有限元方法可以克服这一问题。因此,本文选用了基于矢量有限元方法的电磁场数值计算软件 HFSS,该软件在计算本征特性方面较为成熟。

在本征求解中,由于不存在任何形式的辐射源或者激励,所以对于矢量有限元方法来讲,其导出的本征值方程形式为<sup>[13-15]</sup>

$$[\mathbf{A}]\{\mathbf{E}\} - k_0^2 [\mathbf{B}]\{\mathbf{E}\} = 0 \quad (5)$$

式中, [A] 是与相对磁导率 μ<sub>r</sub> 有关的矩阵; [B] 是与相对介电常数 ε<sub>r</sub> 有关的矩阵; k<sub>0</sub> 为腔体谐振时对应模式的波数。对于给定的腔体,只要将求解区域剖分成网格,建立两个矩阵 [A] 和 [B], 就可以通过求解本征值方程来求得腔体的各个模式谐振频率。在求解得出各个谐振频率的同时,也可以确定对应于每个谐振模式的场分布。

利用矢量有限元进行谐振效应仿真流程如图 2 所示。

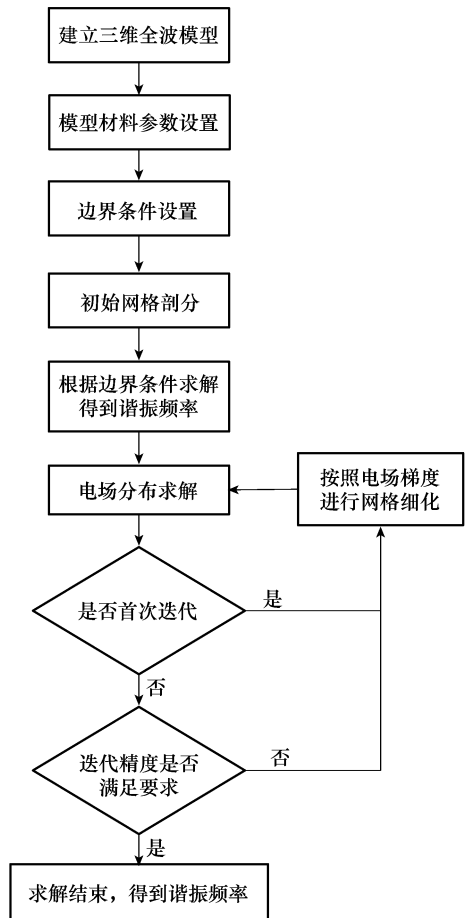


图 2 本征特性仿真流程图

利用矢量有限元法求解复杂腔体谐振频率的步骤为：

(1) 建立全波物理模型，并设置模型材料参数，包括相对介电常数  $\epsilon_r$ ，相对磁导率  $\mu_r$ 。同时，由于实际物体微小的单元会对谐振微扰及物体材料参数直接影响谐振频率，模型要尽量精确，材料参数也要和实际一致。

(2) 设置边界条件，并剖分初始网格，将仿真模型离散化。这里，我们为了权衡仿真精度与速度，将四面体作为基本网格单元。

(3) 根据剖分的网格与材料参数，建立求解方程  $[A]\{E\} - k_0^2[B]\{E\} = 0$ ，并进行矩阵求解得到谐振频率与电场分布。

(4) 根据求得的电场分布，按照电场的梯度细化网格，同时再次建立求解方程并求解谐振频率，直到与上一次求解的谐振频率的差值满足精度要求。

## 2 本征特性仿真

### 2.1 全波物理建模

基于矢量有限元数值分析方法，建立了地雷引信全波物理模型，仿真模型正、反面如图 3 所示。

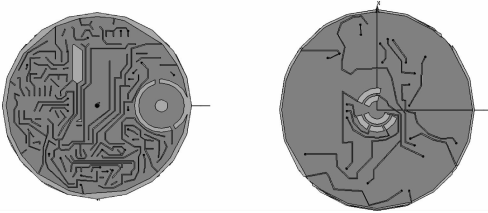


图 3 地雷引信全波仿真模型

建模过程按照地雷引信的材料和相关参数进行设置，没有采用简化或者等效方法处理仿真模型，确保了仿真模型与实际地雷引信的一致性。同时，为了权衡仿真精度和仿真效率，对于电子起爆装置的材料都设置成了理想无耗的导体或介质。

### 2.2 谐振效应仿真

仿真设置：

- (1) 频率范围：300 MHz~1 GHz；
- (2) 边界条件：吸收边界距地雷引信模型  $1/2 \lambda$ 。

仿真结果：

通过地雷引信本征特性仿真计算，得到了地雷引信在 300 MHz~1 GHz 频段内的谐振频点，如表 1 所示。

表 1 地雷引信谐振频点 GHz

谐振频点 1	谐振频点 2	谐振频点 3	谐振频点 4
0.545	0.558	0.706	0.901

如表 1 所示，在 300 MHz~1 GHz 频段，引信出现了 4 个谐振频点，产生谐振和非谐振电磁耦合效果如图 4 和图 5 所示。

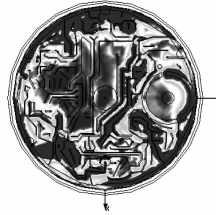


图 4 谐振效果图

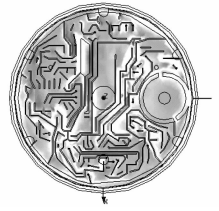


图 5 非谐振效果图

图 4 和图 5 表明，在谐振频点与非谐振频点上，非触发引信耦合的电磁能量相差较大，所以仿真得到的谐振频点很可能是导致非触发引信产生电磁敏感现象的频点。

## 3 实验验证与分析

为了证明本文方法对电起爆装置电磁敏感性预测分析的有效性，从连续平面波扫频仿真和实装试验两个角度对仿真结论的可信性进行验证。

### 3.1 连续平面波扫频仿真验证

地雷的作战使用要求和技术特点表明，地雷战场布设位置与通信、雷达和电子对抗等电磁辐射源距离较远，满足远场辐射条件。因此，本文以连续平面波为激励源，研究地雷引信的电磁敏感性。连续平面波扫频仿真是对地雷电起爆装置面临电磁辐射环境的再现，找出可能引起地雷电子引信敏感的频率。

仿真设置：

- (1) 频率范围：300 MHz~1 GHz；
- (2) 电磁波类型：连续平面波；
- (3) 极化方向：水平极化；
- (4) 照射角度： $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和  $90^\circ$ ；
- (5) 电场强度：15 V/m；
- (6) 边界条件：吸收边界距地雷引信模型  $1/2 \lambda$ 。

根据地雷战场使用特点，只对水平极化激励源进行仿真，图 6 为平面波辐射仿真示意图。

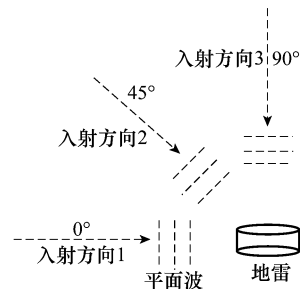


图 6 地雷引信平面波辐射仿真示意图

电磁波以  $0^\circ$  入射时，如图 7 所示，在 550 MHz、700 MHz 和 910 MHz 频点处，地雷引信出现了明显的能量耦合峰值。电磁波以  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  入射时，地雷引信上电磁能量耦合较强的频点如表 2 所示。

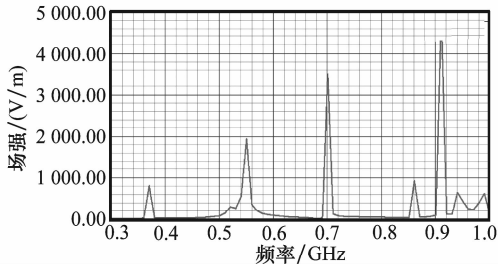


图 7 地雷引信平面波辐照仿真结果(0°入射)

表 2 0°、45°和 90°入射时耦合较强频点 MHz

辐照角度	频点 1	频点 2	频点 3
0°	552	694	904
45°	543	703	916
90°	542	710	919

如表 1 所示,在 300 MHz~1 GHz 频段,引信出现了 4 个谐振频点。其中前两个频点非常接近,可以看作一个频点,这 3 个谐振频点与平面波辐照仿真中的得到的 3 个地雷能量耦合峰值频点基本一致,表明谐振效应可能是导致地雷引信产生较大电磁能量耦合的原因。

### 3.2 实验验证

为验证仿真结论,进行了地雷引信电磁波辐照实验测试,考虑到安全等因素,取出了地雷装药,使引信发火输出端接电点火头。

试验布置及参数设置如下:

- (1) 模拟辐射源:连续波;
- (2) 试验场地:开阔场;
- (3) 频率范围:300 MHz~1 GHz;
- (4) 极化方向:水平极化;
- (5) 电磁波照射角度:0°、45°和 90°;
- (6) 场强:<50 V/m;
- (7) 天线与地雷距离:3 m(满足远场条件)。

按照上述试验布置和参数设置进行了测试,得到的测试数据如表 3 所示。以表 3 中所示频率和角度对地雷进行辐照时,地雷的引信出现误动作现象。

表 3 实验验证测试数据 MHz

辐照角度	频点 1	频点 2	频点 3
0°	532	728	923
45°	547	692	881
90°	543	689	893

### 3.3 数据对比分析

把连续平面波扫频仿真、实测数据与本征特性仿真结果进行了对比,如图 8~10 所示。

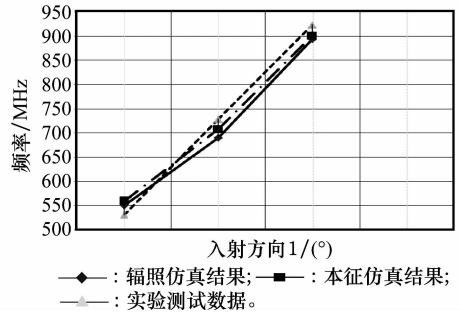


图 8 仿真结果与实测数据对比图(0°入射)

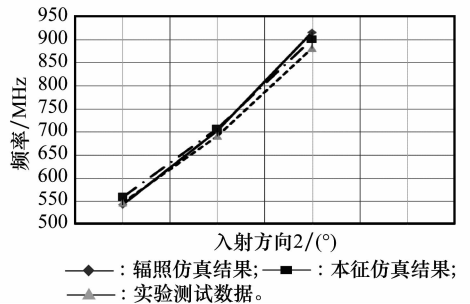


图 9 仿真结果与实测数据对比图(45°入射)

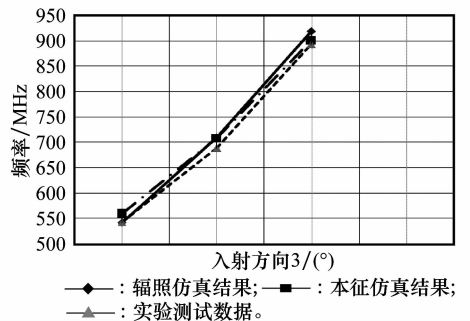


图 10 仿真结果与实测数据对比图(90°入射)

连续平面波扫频仿真和实装试验结果表明,本征特性仿真与验证数据一致性较好,验证了本文提出仿真方法的有效性。但是本征特性仿真结果与验证数据存在一定误差,导致这种误差出现的原因主要有以下三个方面<sup>[16]</sup>:

(1) 算法误差。自适应迭代算法先选用较粗的剖分,然后看仿真精度是否满足要求,如不满足,则进一步细化,直到达到给定的精度,本文平面波照射仿真精度为 4.2%;本征特性仿真精度为 2%。

(2) 建模误差。地雷引信建模过程中忽略了地雷外壳的影响,虽然大部分电磁波会穿透塑料外壳,但是在电磁波穿过地雷外壳时仍会产生反射。

(3) 测试误差。在进行验证实验时,由测试系统的非理想性而引起的误差,该误差也包括测试场地和人为操作所导致的误差。

## 4 结束语

本文针对电子起爆装备的电磁敏感性问题, 结合地雷非触发引信, 提出了基于谐振效应的电磁敏感性定量分析方法。文中建立了地雷非触发引信的全波物理模型, 在此基础上进行了谐振效应仿真, 实现了对电子起爆装备电磁敏感性的定量计算, 并从仿真和实测两方面对该方法的有效性进行了验证。综合本文进行的仿真和实验研究表明:

(1) 本征特性仿真得到的谐振频率, 与平面波辐照仿真及实验测试的电磁敏感频率吻合较好, 说明了谐振效应是导致地雷引信出现电磁敏感现象的主要原因。

(2) 平面波辐照仿真结果和验证实验结果表明: 地雷引信的电磁敏感性受电磁波入射角度的影响较小。

(3) 本文的仿真计算结果与验证实验测试结果一致性较好, 验证了本文提出方法的有效性。

(4) 仿真计算数据与实际测试数据之间的误差由算法误差、建模误差以及测试误差所导致。

综上所述, 基于谐振效应的电磁敏感性分析方法具有较高的仿真精度, 可以很好地实现电子起爆装备敏感频点的预测分析, 具有良好的实际应用价值。

## 参考文献:

- [1] John W A, Dennis S F. Measurement procedures for electromagnetic compatibility assessment of electro-explosive devices [J]. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 1988, 30(4):484 - 493.
- [2] Thompson R H. *Evaluation and determination of sensitivity and electromagnetic interactions of commercial blasting caps* [M]. Philadelphia: Franklin Institute Research Laboratories, 1973.
- [3] Yao H Z, Feng Q M, Zhao T A, et al. Pulse sensitivity of EED[C]// *Proc. of the 5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, 2009:447 - 449.
- [4] Lee K R, Bennett J E, Pinkston W H, et al. New method for assessing EED susceptibility to electromagnetic radiation [J]. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 1991, 33(4):328 - 333.
- [5] Rachidi M N, Pena F, et al. Modeling of the electromagnetic coupling to electro-explosive devices[C]// *Proc. of the General Assembly and Scientific Symposium*, 2011:1 - 4.
- [6] Parson J, Dickens J, Walter J, et al. Energy deposition and electromagnetic compatibility assessment of electro-explosive devices[C]// *Proc. of the International Power Modulators and High Voltage Conference*, 2008:439 - 442.
- [7] Parson J, Dickens J, Walter J, et al. Energy deposition assessment and electromagnetic evaluation of electro-explosive devices in a pulsed power environment[C]// *Proc. of the Pulsed Power Conference*, 2009:892 - 896.
- [8] Zhao T A. Study on the test technique of induced current of EED in electromagnetic field[C]// *Proc. of the 5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, 2009:450 - 454.
- [9] 李贵兰, 李国新, 汪佩兰. 基于场线耦合理论的电爆装置射频感应电流仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(2):265 - 269. (Li G L, Li G X, Wang P L. RF induced current simulation of electro-explosive device based on field coupling to line theory[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(2):265 - 269.)
- [10] 张波, 汪佩兰. 舰船环境下射频对电爆装置的危害[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(7):70 - 72. (Zhang B, Wang P L. The hazard of radiation frequency to EED on warship[J]. *Ship Science and Technology*, 2007, 29(7):70 - 72.)
- [11] 罗根新, 方向, 高振儒. 地雷电引火头的高功率微波效应研究[J]. 解放军理工大学学报, 2003, 4(1):52 - 54. (Luo G X, Fang X, Gao Z R. Research on high power microwave effects on mine igniters[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2003, 4(1):52 - 54.)
- [12] 高振儒, 方向, 罗根新, 等. 高功率微波对地雷电子引信的辐射效应研究[J]. 探测与控制学报, 2003, 25(4):17 - 20. (Gao Z R, Fang X, Luo G X, et al. The study on the effects of high power microwave radiatio on the mine electronic fuzes[J]. *Journal of Detection & Control*, 2003, 25(4):17 - 20.)
- [13] Ilic' M M, Miroslav D. Higher order hybrid FEM-MoM technique for analysis of antennas and scatterers[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2009, 57(5):1452 - 1460.
- [14] Venkatarayalu N V. Efficient constrained finite element solution for electromagnetic eigenvalue problems with lossy anisotropic materials[C]// *Proc. of the Microwave Conference*, 2011:1949 - 1952.
- [15] Venkatarayalu, N V. FEM modeling of axisymmetric cavities with divergence-free constraint equation and hierarchical basis functions[C]// *Proc. of the Microwave Conference*, 2009:100 - 103.
- [16] 徐小文, 苏东林, 戴飞, 等. EMC 测试及其测量不确定度[J]. 电子测量技术, 2006, 29(1):52 - 53. (Xu X W, Su D L, Dai F, et al. Measurement conducted emission and the measurement uncertainties[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2006, 29(1):52 - 53.)