

制造业可靠性系统工程标准

STANDARD OF RELIABILITY SYSTEMS ENGINEERING FOR MANUFACTURING ENTERPRISES

RSE-STD-151 2023

电子产品电磁性能确信可靠性分析 ——不确定测度

Belief Reliability Analysis of
Electromagnetic Performance of Electronic Products
-- Uncertainty Measure

(征求意见稿)



© 本标准属于深圳市为民可靠性系统工程研究院所有，享有著作权及其他法律规定的任何权益，受法律和国际条约保护。

2023-11-19 发布



深圳市为民可靠性系统工程研究院

目 次

1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
3.1 基本术语.....	1
3.2 公式符号.....	3
4 通用要求.....	4
4.1 电磁性能确信可靠性分析流程.....	4
4.2 电磁性能确信可靠性分析报告要求.....	5
5 详细要求.....	5
5.1 关键性能参数的确定.....	5
5.2 关键性能参数阈值的确定.....	6
5.3 电磁性能数字样机要求.....	6
5.4 电磁性能仿真分析.....	7
5.5 电磁性能裕量方程的建立.....	8
5.6 不确定性分析与量化.....	9
5.7 电磁性能确信可靠度的计算.....	10
附录 A（资料性附录）某芯片信号传输结构的电磁性能确信可靠性分析算例.....	12
附录 B（资料性附录）铁路道岔控制设备电磁屏蔽效能确信可靠性分析示例.....	16

前 言

本标准由深圳市为民可靠性系统工程研究院提出并发起编制。

本标准起草单位：北京航空航天大学、深圳市为民可靠性系统工程研究院、北京航空航天大学云南创新研究院、北京蓝威技术有限公司、北京全路通信信号研究设计院集团有限公司。

本标准主要起草人：李颖异、陈颖、康锐、何贝琛，王皓伟、阮进喜、张栋、孙超、叶翠、宋丽。

电子产品电磁性能确信可靠性分析——不确定测度

1 范围

本标准规定了不确定测度下电子产品电磁性能确信可靠性分析的步骤和要求，用于在对电子产品所处的电磁环境认识不充分、电磁试验数据量少而产生了认知不确定性的情况下，电子产品生命周期各阶段开展电磁性能设计、电磁性能评估工作。

本标准提供了最大电场强度、最大磁场强度、电磁屏蔽效能三个电磁性能指标的确信可靠性分析方法，其他电磁性能指标可参照本标准的方法进行分析。

本标准适用于深圳市为民可靠性系统工程研究院理事单位，也可供其他企业参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改版)适用于本文件。

RSE-STD-451 确信可靠性术语与定义

RSE-STD-1391 功能、性能及裕量分析

RSE-STD-12107 金属材料疲劳试验小样本数据统计方案与分析方法

GJB72A-2002 电磁干扰与电磁兼容性术语

GJB5240-2004 军用电子设备通用机箱机柜屏蔽效能要求和测试方法

GB/T24338.4-2009 轨道交通电磁兼容

3 术语和定义

3.1

电磁性能 electromagnetic performance

电子产品在电磁环境中产生和抵抗电磁干扰的能力。

3.2

电磁性能参数 electromagnetic performance parameter

电磁性能的定量表达，具体包括电场强度最大值、磁场强度最大值与电磁屏蔽效能等。

3.3

电场强度最大值 maximal electric field intensity

一种具体的电磁性能参数，指的是电子产品通电运行时所关注的 *g* 关键零部件或元器件的电场强度最大值。

3.4

磁场强度最大值 maximal magnetic field intensity

一种具体的电磁性能参数，指的是电子产品通电运行时所关注的关键零部件和元器件的磁场强度最大值。

3.5

电磁屏蔽效能 electromagnetic shielding effectiveness

一种具体的电磁性能参数，是对电子产品的屏蔽体隔离或限制电磁干扰的能力的度量。

3.6

电磁环境 electromagnetic environment

电子产品在既定工作环境中执行规定任务时可能遇到的各种传导型和辐射型电磁发射。

3.7

电磁干扰 electromagnetic interference

可能造成电子产品产生异常响应、故障或性能降级的电子信号或电磁发射。

3.8

电磁性能工作极限 operating limit of electromagnetic performance

电子产品在正常运行时可以产生和抵抗的最大电磁干扰程度。

3.9

电磁性能数字样机 electromagnetic performance digital prototype

在计算机上表达的用于计算电磁产品电磁性能的数字化模型。

4 公式符号

a	——	服从线性不确定分布的不确定变量的取值范围下限
b	——	服从线性不确定分布的不确定变量的取值范围上限
e	——	不确定变量的均值
σ	——	不确定变量的方差
f_{\min}	——	信号带宽最小频率
f_{\max}	——	信号带宽最大频率
E_e	——	无屏蔽体时的电场强度（本标准取仿真分析时激励源电场强度值）
E_p	——	有屏蔽体时的电场强度（本标准取仿真分析结果值）

E_{\max}	——	电场强度最大值
$E_{\max,th}$	——	电场强度最大值阈值
H_{\max}	——	磁场强度最大值
$H_{\max,th}$	——	磁场强度最大值阈值
M_E	——	电场强度最大值对应的性能裕量
M_E^*	——	M_E 的样本向量
M_H	——	磁场强度最大值对应的性能裕量
M_H^*	——	M_H 的样本向量
M_{SE}	——	电磁屏蔽效能对应的性能裕量
M_{SE}^*	——	M_{SE} 的样本向量
n	——	不确定样本数
$R_{B,E}$	——	电场强度最大值对应的电磁性能确信可靠度
$R_{B,H}$	——	磁场强度最大值对应的电磁性能确信可靠度
$R_{B,SE}$	——	电磁屏蔽效能对应的电磁性能确信可靠度
$R_{B,综合}$	——	综合多个关键性能参数的电磁性能确信可靠度
SE	——	电磁屏蔽效能
SE_{th}	——	电磁屏蔽效能的阈值
ξ	——	不确定变量符号
$\Phi_E(x)$	——	M_E 的确信可靠分布
$\Phi_H(x)$	——	M_H 的确信可靠分布
$\Phi_{SE}(x)$	——	M_{SE} 的确信可靠分布
μ_{e1}	——	外壳材料电导率
μ_{e2}	——	填充材料电导率
μ_m	——	外壳材料相对磁导率

5 通用要求

5.1 分析流程

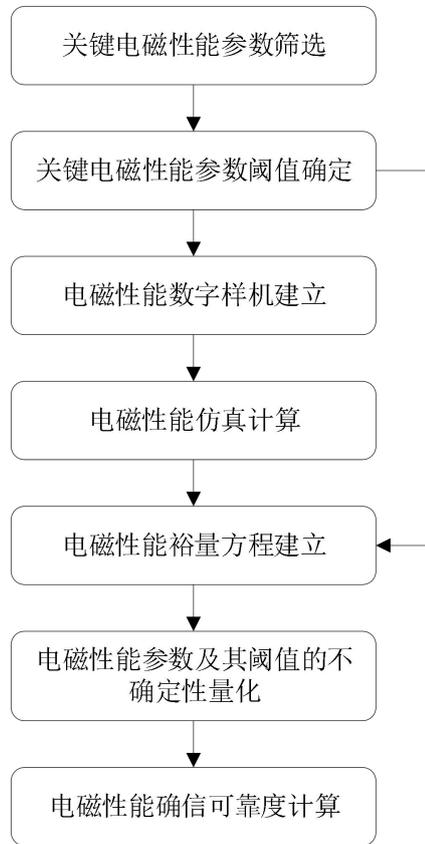


图 1 电磁性能确信可靠性分析的基本流程

电磁性能确信可靠性分析的基本流程见图 1，包括以下工作项目：

(1) 关键电磁性能参数筛选：从电场强度最大值、磁场强度最大值和电磁屏蔽效能这三个电磁性能参数中选择出需要进行分析的关键电磁性能参数；

(2) 关键电磁性能参数阈值确定：根据对电磁性能参数的实际使用需求，确定其阈值的取值；

(3) 电磁性能数字样机建立：根据电子产品的设计信息建立用于电磁性能仿真的数字样机模型；

(4) 电磁性能仿真计算：对电磁性能数字样机进行仿真，获取关键电磁性能参数值。如有电磁性能试验条件，可将仿真结果与试验结果进行比较，从而进行数字样机校核，通过多轮迭代获得更加准确的仿真结果；

(5) 电磁性能裕量方程建立：根据 (2) 和 (4) 的获取结果，为筛选出的所有关键电磁性能参数建立电磁性能裕量方程；

(6) 电磁性能参数及其阈值的不确定性量化：分析关键电磁性能参数及其阈值的不确定性来源，并给出各来源的确信可靠分布；

(7) 电磁性能确信可靠度计算：结合电磁性能裕量方程和不确定性量化结果，在不确定测度下计算每个关键电磁性能参数对应的电磁性能确信可靠度。

5.2 分析报告

电子产品电磁性能确信可靠性分析报告至少包含以下内容：

- (1) 分析对象介绍；
- (2) 分析对象关键电磁性能参数的确定；
- (3) 分析对象的关键电磁性能参数阈值；
- (4) 电磁性能数字样机建立结果；
- (5) 电磁性能仿真分析结果；
- (6) 电磁性能裕量方程的建立结果；
- (7) 电磁性能参数及其阈值的不确定量化结果；
- (8) 电磁性能确信可靠度计算结果。

6 详细要求

6.1 关键电磁性能参数筛选

在下述三个参数中筛选出需要进行分析的关键电磁性能参数：

- (1) 功能、性能及裕量分析 (FPMA) 报告中给出的关键元器件或关键部位的电场强度最大值 E_{\max} ；
- (2) 功能、性能及裕量分析 (FPMA) 报告中给出的关键元器件或关键部位的磁场强度最大值 H_{\max} ；
- (3) 电子产品的电磁屏蔽效能 SE 。

基本筛选原则为：

- (1) 当重点关注的电磁性能是电子产品对典型使用场景中电磁干扰的响应情况时，选择电场强度最大值 E_{\max} 和磁场强度最大值 H_{\max} 作为关键性能参数；
- (2) 当重点关注的电磁性能是电子产品的屏蔽体对电磁干扰的隔离与限制能力时，选择电磁屏蔽效能 SE 作为关键性能参数。

6.2 关键电磁性能参数阈值确定

采用《RSE-STD-1391 功能、性能及裕量分析》标准中的需求阈值分析方法，确定筛选出的所有关键电磁性能参数的阈值。

针对本标准提供的三个电磁性能参数，需要特殊说明的是：

- (1) 如果对同一电磁性能参数的阈值有多种要求，应按照最严格的要求确定阈值；
- (2) 当阈值来源的要求中存在不确定性时，通过均值或标称值进行比较获得最严格的阈值要求。

6.3 电磁性能数字样机的建立

6.3.1 电磁性能数字样机建立要求

电磁性能数字样机的建立应满足以下要求：

- (1) 与实物同尺寸；
- (2) 尽量保留对电磁环境敏感的结构。模型颗粒度的具体要求如下：
 - a) 对元器件级电子产品建立其内部层次结构；
 - b) 对板级电子产品建立板间金属层。对于重点关注的板上元器件，建立元器件的内部层次结构与焊点，非重点关注的板上元器件用实物块表示；
 - c) 对设备级电子产品建立详细的设备外壳，保持外壳孔洞的原有形状（如圆孔、方孔）。对外壳中需要重点关注的电路板与元器件建立内部结构，非重点关注的电路板与元器件用实物块表示。忽略对电磁性能没有影响的结构和尺寸微小的元器件。
- (3) 圆角结构建模成直角结构。

6.3.2 电磁性能数字样机简化原则

电磁性能数字样机的简化原则如下：

- (1) 用于美观的有弧度的所有导角应简化为直角；
- (2) 删除对电磁性能没有影响的所有结构，如机箱上的把手、装饰物、风扇扇叶结构等；
- (3) 将螺丝钉、螺栓等用于连接的结构全部替换为与连接口形状匹配的规则立方体或圆柱体；
- (4) 删除所有凹槽、刻痕以及元器件上的铭文；
- (5) 删除对电磁环境不敏感的支撑结构；
- (6) 对于设备级电子产品，删除对电磁性能没有影响的结构和尺寸微小的元器件。

6.4 电磁性能仿真计算

6.4.1 仿真计算输入参数

电磁性能仿真计算的输入包括内因和外因，即组成电子产品的材料参数和电磁干扰源（或激励源）的形式与强度。具体包括：

- (1) 组成电子产品各部分（如机箱外壳、支撑结构、电路板与元器件等）的材料属性。
需要注意：
 - a) 对于能够在仿真软件的材料库中找到对应名称的材料，直接使用；
 - b) 对于仿真软件材料库中不存在的材料，应当联系供货商或者查阅产品手册，进一步获取该材料的相对磁导率、相对介电常数、体电导率、介质损耗角正切值、密度、朗德因子，并在在软件中自行创建该材料。
- (2) 影响电子产品的电磁干扰源（或激励源）信息，包括该激励源的位置、作用边界、强度与频率等。

6.4.2 仿真计算步骤

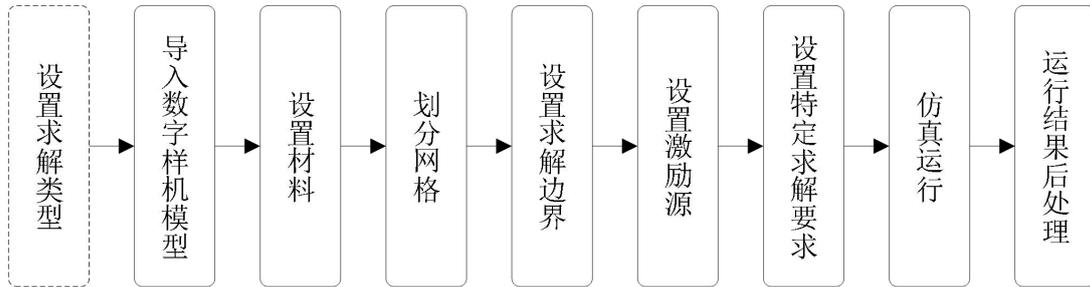


图 2 电磁性能有限元仿真分析流程

本标准采用有限元方法进行电磁性能仿真计算，具体步骤如图 2 所示，具体包括：

(1) 设置求解类型。有限元仿真软件在创建新工程项目时会要求用户选择求解类型，可根据具体的仿真需求进行设置，一般的设置原则是当关注关键性能参数的瞬态响应时，选择瞬态求解，当关注随时间的动态变化时，选择动态求解。如果不确定，选择软件的默认求解类型。

(2) 导入数字样机模型。将 6.3 节获得的产品数字样机模型导入有限元仿真软件。

(3) 设置材料。将 6.4.1 节获得的电子产品各部分材料赋给数字样机模型的对应部位。

(4) 划分网格。对关键性能参数对应的结构或元器件、重点关注的部位采用精细网格，其余部位采用稀疏网格。要求网格划分结果在通过网格独立性试验的基础上优选网格数少的划分结果。

(5) 设置求解边界。应当设置求解边界的范围与边界类型。a) 边界范围的设置要求：边界范围能够包围所有关注部位的最小范围；

b) 边界类型的设置要求：

- i. 当假设整个电子产品是由理想导体壁包围，且电场垂直于这些理想导体壁表面时，设置为理想导体边界；
- ii. 当假设整个电子产品是由理想导体壁包围，且磁场垂直于这些理想导体壁表面时，设置为理想导磁体边界；
- iii. 当模拟电磁波辐射到空间无限远处的吸收边界时，设置为辐射边界。

(6) 设置激励源。根据实际情况设置激励源的位置和类型。其中，激励源的类型可以是电脉冲信号、平面波等。

(7) 设置特定求解要求。根据仿真需求设置特定的求解要求，例如求解精度、扫频范围与步长等。

(8) 仿真运行。

(9) 运行结果后处理。查看运行结果，获取并记录电磁性能参数的具体值。

电磁性能仿真计算示例见附录 A 与附录 B。

6.5 电磁性能裕量方程的建立

本标准提供的三种电磁性能参数的电磁性能裕量方程形式如下：

(1) 电场强度最大值 E_{\max}

电场强度最大值 E_{\max} 的电磁性能裕量方程为

$$M_E = E_{\max,th} - E_{\max} \quad (1)$$

其中, M_E 为电场强度最大值对应的性能裕量; $E_{\max,th}$ 为电场强度最大值的性能参数阈值。

$E_{\max,th}$ 的具体数值按照 5.2 节提供的关键性能参数阈值确定原则获取; E_{\max} 的具体数值按照 5.4 节提供的电磁性能仿真分析方法要求获取。详见附录 A。

(2) 磁场强度最大值 H_{\max}

磁场强度最大值 H_{\max} 的电磁性能裕量方程为

$$M_H = H_{\max,th} - H_{\max} \quad (2)$$

其中, M_H 为磁场强度最大值对应的性能裕量; $H_{\max,th}$ 为磁场强度最大值的性能参数阈值。

$H_{\max,th}$ 的具体数值按照 5.2 节提供的关键性能参数阈值确定原则获取; H_{\max} 的具体数值按照 5.4 节提供的电磁性能仿真分析方法要求获取。详见附录 A。

(3) 电磁屏蔽效能 SE

电磁屏蔽效能 SE 的电磁性能裕量方程为

$$M_{SE} = SE - SE_{th} \quad (3)$$

其中, M_{SE} 为电磁屏蔽效能对应的性能裕量; SE_{th} 为电磁屏蔽效能的性能参数阈值。

SE_{th} 的具体数值按照 5.2 节提供的关键性能参数阈值确定原则获取; SE 具体数值的计算公式为

$$SE = 20 \lg \left(\frac{E_e}{E_p} \right) \quad (4)$$

其中, E_e 为无屏蔽体时的电场强度, E_p 为有屏蔽体时的电场强度。在计算时, E_e 即为激励源电场强度值; E_p 的值由电磁性能仿真分析获取。

将式(4)代入式(3)联立, 则电磁屏蔽效能 SE 的性能裕量方程可以进一步写作

$$M_{SE} = 20 \lg \left(\frac{E_e}{E_p} \right) - SE_{th} \quad (5)$$

6.6 不确定性分析与量化

6.6.1 认知不确定性来源分析

应从以下四个方面分析电磁性能的认知不确定性:

(1) 内因不确定性, 即组成电子产品的零部件与元器件由于工艺与生产差异带来的批次分散性造成的电子产品自身的不确定性。

(2) 外因不确定性, 即电磁干扰源(或激励源)的位置以及干扰信号频率与强度的不确定性

(3) 耦合关系的不确定性, 包括电子产品自身各元器件之间电磁干扰的不确定性以及

外界电磁干扰源（或激励源）对电子产品产生影响的不确定性。

(4) 电磁性能阈值的不确定性。

6.6.2 不确定性的量化

本标准采用以下两种不确定分布对单个变量进行认知不确定性量化，不确定分布函数用 $\Phi(x)$ 表示，具体如下：

(1) 正态不确定分布

$$\Phi(x) = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(e-x)}{\sqrt{3}\sigma}\right) \right)^{-1}, \quad x \in \mathfrak{R} \quad (6)$$

该分布记作 $N(e, \sigma)$ ，其中， e 和 σ 为实数，且 $\sigma > 0$ 。实际意义上， e 为不确定变量的均值， σ 为不确定变量的方差。

(2) 线性不确定分布：

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \end{cases} \quad (7)$$

本标准中，以上两种分布的选择原则为：

- (1) 当可以获取不确定变量的均值和方差时，选择正态不确定分布；
- (2) 当只能获取不确定变量的均值时，选择正态不确定分布，其方差由 6σ 原则确定；
- (3) 当无法获取不确定变量的均值，但可以获取它的取值范围 $[a, b]$ 或 (a, b) 时，选择线性不确定分布；
- (4) 当关于不确定变量的任何统计信息都无法获取时，估计该变量的取值范围 $[a, b]$ 或 (a, b) ，然后选择线性不确定分布。

6.7 电磁性能确信可靠度的计算

6.7.1 电磁性能裕量分布的获取

按照 6.6 节获取的确信可靠分布的形式进行 n ($3 \leq n \leq 10$) 次抽样，将各样本的数值代入电磁性能裕量方程中，获得电磁性能裕量的 n 个样本数据。

本标准采用修匀公式，从 n 个电磁性能裕量的样本数据中获取电磁性能裕量的分布。具体地，电场强度最大值、磁场强度最大值以及电磁屏蔽效能的性能裕量 M_E 、 M_H 以及 M_{SE} 的确信可靠分布的获取结果分别表示为 $\Phi_E(x)$ 、 $\Phi_H(x)$ 以及 $\Phi_{SE}(x)$ ($x \in \mathfrak{R}$)。

注：修匀公式的定义及使用方法详见标准《RSE-STD-12107-2023 金属材料疲劳试验小样本数据统计方案与分析方法》附录 A。

6.7.2 电磁性能确信可靠度计算

电场强度最大值、磁场强度最大值以及电磁屏蔽效能对应的电磁性能确信可靠度分别表示为 $R_{B,E}$ 、 $R_{B,H}$ 和 $R_{B,SE}$ ，计算公式分别为：

(1) 电场强度最大值 E_{\max}

$$R_{B,E} = 1 - \Phi_E(0) \quad (8)$$

(2) 磁场强度最大值 H_{\max}

$$R_{B,H} = 1 - \Phi_H(0) \quad (9)$$

(3) 电磁屏蔽效能 SE

$$R_{B,SE} = 1 - \Phi_{SE}(0) \quad (10)$$

对于同时选择电场强度最大值、磁场强度最大值以及电磁屏蔽效能中的 2 个或 3 个作为关键电磁性能参数，但最终仅需要一个综合性确信可靠性分析指标的情况，采用取小原则给出电子产品电磁性能的确信可靠度，即

$$R_{B,综合} = \min\{R_{B,E}, R_{B,H}, R_{B,SE}\}. \quad (11)$$

附录 A (资料性附录)

某芯片信号传输结构的电磁性能确信可靠性分析示例

A.1 产品介绍

本算例的分析对象是某个 BGA 封装芯片的信号传输结构，其三维模型如图 A.1 所示。产品整体呈现为一个不规则的刀片形状。最外层绿色的框状结构为 PCB 板，材料为 FR4。PCB 板内嵌入两个铜制金属层，即图中的深色区域。红蓝相间的金属细丝为金制导电细丝，作为信号的输入端。金制导电细丝的另一端与铜制导线相连，传递电信号，铜导线的末端为信号输出端。这些金属细丝与导线均印刻在 PCB 板内部。铜导线通过 PCB 板上的通孔结构与外部焊球相接。

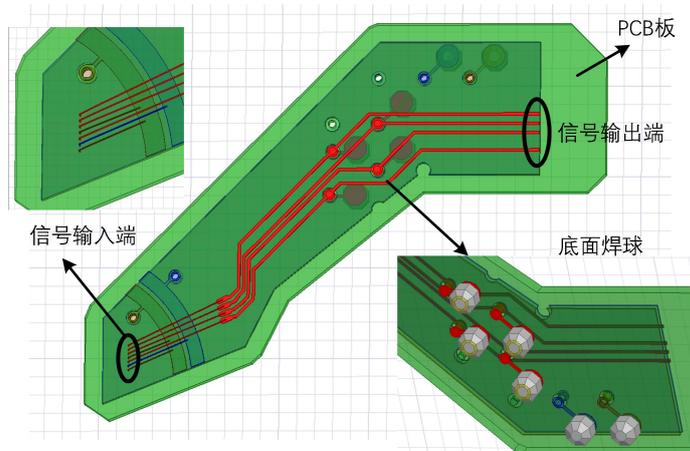


图 A.1 BGA 封装芯片的信号传输结构三维模型

本算例首先确定并给出芯片信号传输结构的关键性能参数及其阈值；然后进行电磁性能仿真分析；接着基于电磁性能仿真分析结果，建立电磁性能裕量方程；最后通过度量输入信号的不确定性，计算芯片信号传输结构在信号传输的短暂过程中某时刻的电磁性能确信可靠度。

需要说明的是，本算例旨在展示电磁性能确信可靠性分析的完整过程，算例中的输入性数据均为假设数据，这些输入性数据包括：关键性能参数的阈值取值、宽带脉冲输入信号的带宽及其确信可靠分布函数中的参数值。在工程实际中，输入性数据的具体数值按照本标准的详细要求获取，详见附录 B。

A.2 关键性能参数及其阈值

该芯片信号传输结构的输入信号是一个宽频短脉冲信号，该信号从输入端进入，沿着金属细丝和铜导线迅速传递至输出端。信号传输的过程会使位于传输线周围的金属材料内产生变化的电场与磁场。

本示例中的芯片信号传输结构对 PCB 板内两层铜制金属层上表面电场和磁场感应强度有要求，即感应产生的电场强度不超过 15000V/m，感应产生的磁场强度不超过 70A/m。因此，该结构的关键电磁性能参数为金属层上表面的电场强度最大值 E_{\max} 和磁场强度最大

值 H_{\max} ，各自的阈值为 $E_{\max,th} = 15000\text{V/m}$, $H_{\max,th} = 70\text{A/m}$ 。

需要说明的是，信号在传输的过程中，铜制金属层上表面的电场和磁场感应强度是动态变化的，接下来的分析都将以 400ps 这一时刻为例，即分析在信号传入结构 400ps 时，结构的电磁性能确信可靠度。其他时刻的分析过程与之相同。

A.3 电磁性能仿真分析

本算例使用的电磁性能仿真软件是 ANSYS Electronics Desktop 18.2 中的 HFSS 模块。将按照要求建立的芯片信号传输结构的数字样机模型导入软件中。将求解类型设置为瞬态求解。将求解边界设置为辐射边界，并将辐射边界设置为能够包住模型的有限大小。设置两个参考面，其中一个参考面与信号输入端接触且与 PCB 板面平行，另一个与焊球底端接触且与 PCB 板面平行，如图 A.2 所示。

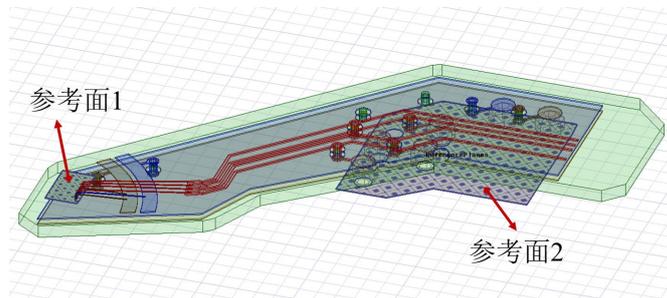


图 A.2 三维数字样机模型与参考面设置

在激励窗口中将各金属细丝与铜导线设置为集总端口。将输入信号设置为宽频脉冲信号，并将最小频率设置为 1kHz，最大频率设置为 10GHz。当前步骤中，尚未考虑不确定性，因此此时的输入信号是一个确定的变量。

完成边界设置与输入设置后，即可开始运行计算。待运行成功并结束后，调出 PCB 板内两层铜制金属层上表面在 400ps 时的电场和磁场的瞬态分布云图，如图 A.3 和图 A.4 所示。可以看到，此时的电磁性能参数的数值分别为

$$E_{\max} = 11138.9863\text{V/m},$$

$$H_{\max} = 51.3091\text{A/m}.$$

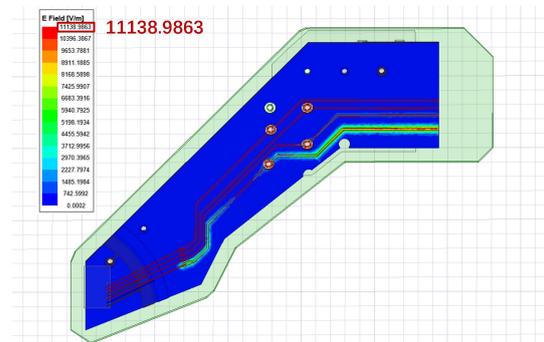


图 A.3 400ps 时的电场分布云图

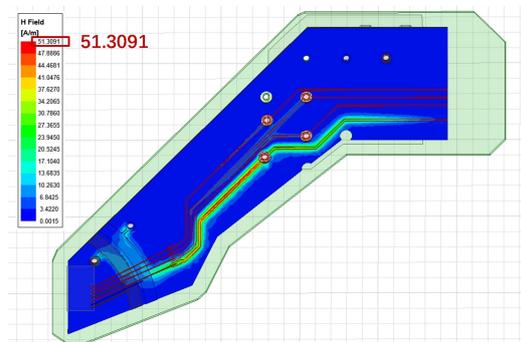


图 A.4 400ps 时的磁场分布云图

图 A.3 和图 A.4 所示的运行结果，就是在某个确定性的输入信号作用下，进行一次仿真获得的电磁性能参数的具体值。

A.4 电磁性能裕量方程

将电场强度最大值的阈值 15000V/m 带入式(1)，得到电场强度最大值的电磁性能裕量方程，即为：

$$M_E = E_{\max,th} - E_{\max} = 15000 - E_{\max}. \quad (\text{A.1})$$

将磁场强度最大值的阈值 70A/m 带入式(2)，得到磁场强度最大值的电磁性能裕量方程，即：

$$M_H = H_{\max,th} - H_{\max} = 70 - H_{\max}. \quad (\text{A.2})$$

对于图 A.3 和 A.4 的这一次仿真结果，电场强度最大值和磁场强度最大值对应的电磁性能裕量的具体数值为：

$$\begin{aligned} M_E &= 15000 - 11138.9863 = 3861.0137\text{V/m}, \\ M_H &= 70 - 51.3091 = 18.6909\text{A/m}. \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

可见，在本次仿真中，电场强度最大值的性能裕量和磁场强度最大值的性能裕量均大于 0。这意味着，对于这一次确定性输入仿真而言，两个电磁性能参数均满足要求，因此，在当前这一输入信号下，从电磁性能的角度分析，该结构是可靠的。

A.5 考虑输入信号不确定性的确信可靠度计算

在产品实际的运行过程中，流入该结构的短脉冲信号带宽具有不确定性，即实际的输入信号带宽并不是精准的 1kHz~10GHz，而是有一定范围的波动。本示例用确信可靠分布描述与量化这种不确定性。

将带宽的左端，即最小频率 f_{\min} 设为不确定变量 ξ_l ；带宽的右端，即最大频率 f_{\max} 设为不确定变量 ξ_r ，单位均为 Hz。假设二者各自服从的确信可靠分布为

$$\begin{aligned} \xi_l &\sim N(10^3, 1.2 \times 10^2); \\ \xi_r &\sim N(10^{10}, 1.5 \times 10^9). \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

按照各自的分布，分别生成 10 个样本数据，组成 10 对，构成 10 个短脉冲信号样本。

对每一个短脉冲信号样本，进行如 A.3 节所述的仿真过程，得到每一个短脉冲信号下在 400ps 时的电场强度最大值 E_{\max} 和磁场强度最大值 H_{\max} 。仿真的结果数据如表 A.1 所示。

表 A.1 10 个短脉冲信号样本下的电磁性能仿真数据

序号	短脉冲样本信号		电磁性能仿真结果		性能裕量	
	$f_{\min}(\text{Hz})$	$f_{\max}(\text{Hz})$	$E_{\max}(\text{V/m})$	$H_{\max}(\text{A/m})$	$M_E(\text{V/m})$	$M_H(\text{A/m})$
1	1.07049×10^3	1.087225×10^{10}	14414.748	20.9346	585.252	49.0654
2	1.10010×10^3	1.051426×10^{10}	14705.0029	24.7551	294.9971	45.2449
3	9.43135×10^2	7.799881×10^9	11574.3076	33.0944	3425.6924	36.9056
4	1.20684×10^3	1.142945×10^{10}	7732.4321	45.7759	7267.5679	24.2241
5	1.02923×10^3	1.014429×10^{10}	12925.9912	40.123	2074.0088	29.8770
6	1.02529×10^3	1.029794×10^{10}	13823.959	31.0231	1176.041	38.9769
7	1.03091×10^3	1.045833×10^{10}	14134.1943	25.5439	865.8057	44.4561
8	1.13690×10^3	1.030618×10^{10}	14128.1719	34.3483	871.8281	35.6517

序号	短脉冲样本信号		电磁性能仿真结果		性能裕量	
	$f_{\min}(\text{Hz})$	$f_{\max}(\text{Hz})$	$E_{\max}(\text{V/m})$	$H_{\max}(\text{A/m})$	$M_E(\text{V/m})$	$M_H(\text{A/m})$
9	1.14421×10^3	9.590386×10^9	2484.917	71.3432	12515.083	-1.3432
10	9.81697×10^2	8.502176×10^9	15197.3584	15.6438	-197.3584	54.3562

设电场强度最大值的性能裕量 M_E 为不确定变量 ξ_E 。将其样本向量 $\mathbf{M}_E^*=[585.252, 294.9971, 3425.6924, 7267.5679, 2074.0088, 1176.041, 865.8057, 871.8281, 12515.083, -197.3584]$ 作为修匀公式的输入，计算获得不确定变量 ξ_E 的均值为 8.4036×10^3 ，方差为 9.1147×10^6 。因此， ξ_E 服从的确信可靠分布 $\Phi_E(x)$ 为 $\xi_E \sim N(8.4036 \times 10^3, 9.1147 \times 10^6)$ ，写成如式(6)所示的形式，即为

$$\Phi_E(x) = \left(1 + \exp \left(\frac{\pi (8.4036 \times 10^3 - x)}{9.1147 \times 10^6 \sqrt{3}} \right) \right)^{-1}, \quad x \in \mathfrak{R}. \quad (\text{A.5})$$

同样地，设磁场强度最大值的性能裕量 M_H 为不确定变量 ξ_H 。将其样本向量 $\mathbf{M}_H^*=[49.0654, 45.2449, 36.9056, 24.2241, 29.877, 38.9769, 44.4561, 35.6517, -1.3432, 54.3562]$ 作为修匀公式的输入，计算获得不确定变量 ξ_H 的均值为 12.3539，方差为 92.8588。因此， ξ_H 服从的确信可靠分布 $\Phi_H(x)$ 为 $\xi_H \sim N(12.3539, 92.8588)$ ，写成如式(6)所示的形式，即为

$$\Phi_H(x) = \left(1 + \exp \left(\frac{\pi (12.3539 - x)}{92.8588 \sqrt{3}} \right) \right)^{-1}, \quad x \in \mathfrak{R}. \quad (\text{A.6})$$

将式(A.5)和式(A.6)分别代入式(8)和式(9)，计算得电场强度最大值对应的电磁性能确信可靠度 $R_{B,E}$ 和磁场强度最大值对应的电磁性能确信可靠度 $R_{B,H}$ 分别为

$$R_{B,E} = 1 - \Phi_E(0) = 1 - \left(1 + \exp \left(\frac{8.4036 \times 10^3 \pi}{9.1147 \times 10^6 \sqrt{3}} \right) \right)^{-1} = 0.5004 \quad (\text{A.7})$$

$$R_{B,H} = 1 - \Phi_H(0) = 1 - \left(1 + \exp \left(\frac{12.3539 \pi}{92.8588 \sqrt{3}} \right) \right)^{-1} = 0.5600 \quad (\text{A.8})$$

将式(A.7)和式(A.8)获得的计算结果代入式(11)，获得该结构的综合性电磁性能确信可靠度计算结果，即

$$R_{B,\text{综合}} = \min \{ R_{B,E}, R_{B,H} \} = \min \{ 0.5004, 0.5600 \} = 0.5004. \quad (\text{A.8})$$

附录 B (资料性附录)

铁路道岔控制设备电磁屏蔽效能确信可靠性分析示例

B.1 产品介绍

本示例进行电磁性能确信可靠性分析的电子产品是一个铁路道岔控制设备。该设备由 14 块电路板，近 4000 个电子元器件构成，这些电路板和元器件全部组装在由铝合金制成的金属机箱内。产品的数字样机模型如图 B.1 所示。

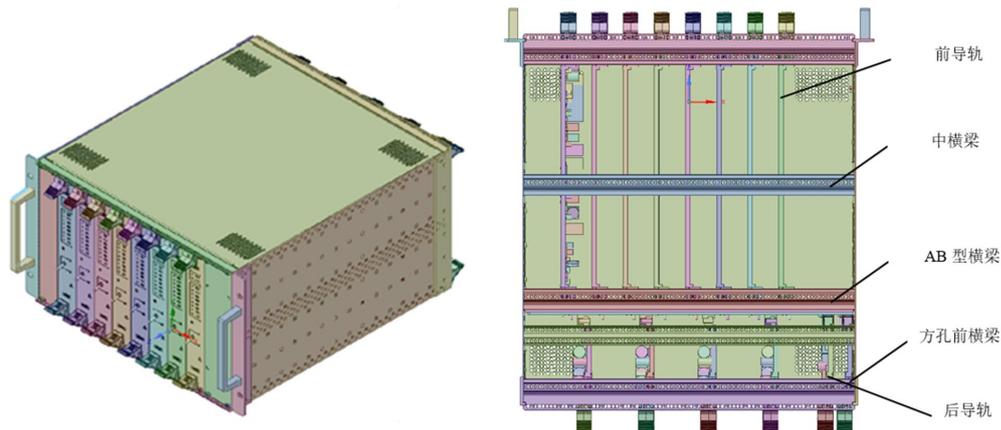


图 B.1 铁路道岔控制设备数字样机结构示意图

本示例首先确定以电磁屏蔽效能作为电磁性能指标，并根据相关标准确定其阈值；然后利用 DOE 的田口设计方法设计并进行仿真试验；在此基础上接着建立电磁屏蔽效能的性能裕量方程；最后进行不确定分析与量化，计算电磁屏蔽效能对应的确信可靠度。

B.2 关键性能参数及其阈值

本示例的铁路道岔控制设备的主要功能板工作在道岔机箱内部，机箱对电路板抵御外界电磁干扰、保持稳定运行具有重要的作用。机箱作为电子设备中工作单元、电子部件的载体，其屏蔽效能的高低对电子设备的正常运行有重大的影响。

经过 FPMA 论证，需要对本产品的电磁屏蔽效能进行电磁性能可靠性分析，即本示例产品的关键电磁性能参数为电磁屏蔽效能 SE 。

该产品的合作方没有对电磁屏蔽效能提具体要求，因此本示例根据国军标《GJB5240-2004 军用电子设备通用机箱机柜屏蔽效能要求和测试方法》中的要求获取电磁屏蔽效能的阈值。由 GJB5240-2004 中对各级机箱的定义可知，该道岔控制设备机箱属于二级机箱，因此，将二级机箱机柜屏蔽效能要求作为该设备电磁屏蔽效能的阈值。针对不同的电磁环境，该阈值的取值不同，如表 B.1 所示。

为了确定合适的电磁环境频率范围，按照 5.4 节的步骤进行了预仿真分析。分析结果显示，机箱在处于谐振频率附近时，电磁屏蔽效能急剧下降出现最小值，此时机箱极易受到电磁环境的影响，并且 CPU 处为电磁环境下最易受干扰的部位。因此，本示例重点分析在谐振频率附近机箱对 CPU 处的屏蔽效能。

由于预仿真分析获得的一阶谐振频率为 372MHz（如图 B.2），按照二级机箱屏蔽效能要求（见表 B.1），选用 30dB 作为电磁屏蔽效能的阈值 SE_{th} 。

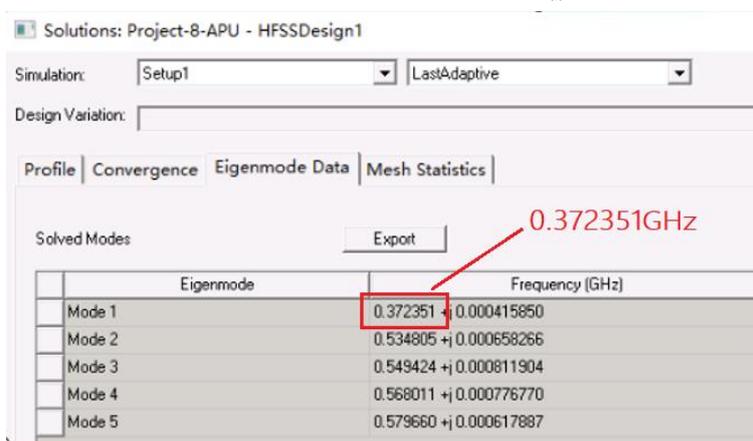


图 B.2 预仿真分析获得的一阶谐振频率值（注：谐振频率只取仿真结果的实数部分）

表 B.1 机箱机柜的屏蔽效能分级（摘自 GJB5240-2004）

屏蔽效能等级	屏蔽效能最低要求		
	10kHz~30MHz	30MHz~230MHz	230MHz~1000MHz
1	-	20	10
2	10	40	30
3	30	60	50
X	按用户要求		

B.3 电磁性能仿真分析

本示例使用的电磁性能仿真分析软件为 ANSYS Electronics Desktop 18.2 中的 HFSS 模块。

将经过简化处理的产品数字样机模型导入仿真软件中，并进行如下设置：

- (1) 将求解类型设置为 Modal；
- (2) 将求解边界设置为辐射边界，并设置合适的辐射边界大小，使之能够包住整个数字样机；
- (3) 将激励源设置为平面波，相应的频率与电场强度值根据合作方提供的《电磁兼容测试报告中》中射频电磁场辐射抗扰度试验标准中的试验场强大小来确定，见表 B.2。按照表 B.2 的频率信息，仿真将按照频率范围 80~1000 MHz 以及 800~2000 MHz 分段进行；
- (4) 设置扫频方式为离散式扫频，扫频范围选择 80~1000 MHz 以及 800~2000 MHz，扫频步长设置为 0.025。

仿真结束后，可查看数字样机模型的电场分布情况。例如，在 800~2000MHz 的频率范围内，激励源入射方向为水平时，机箱整体以及各电路板的电场分布云图如图 B.3~图 B.6 所示；在 80~1000MHz 的频率范围内，激励源入射方向为垂直时，机箱整体以及各电路板的电场分布云图如图 B.7~图 B.10 所示。

表 B.2 射频电磁场辐射抗扰度试验标准

试验结果			
频率(MHz)	试验场强(V/m)	天线极化方向	试验现象描述和试验结果
80~1000	10	水平/垂直	按预期正常工作, 合格
800~960	20	水平/垂直	
1400~2000	20	水平/垂直	

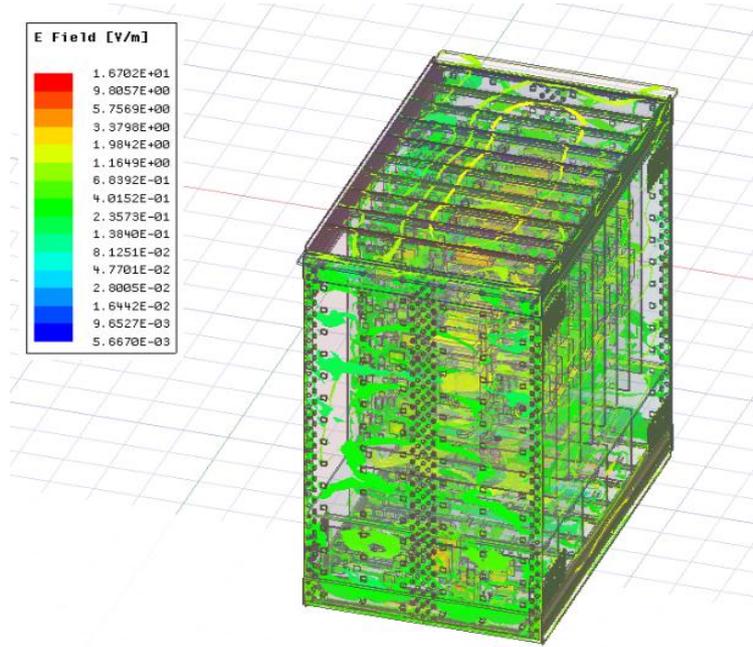


图 B.3 800~2000 MHz 机箱整体电场分布情况

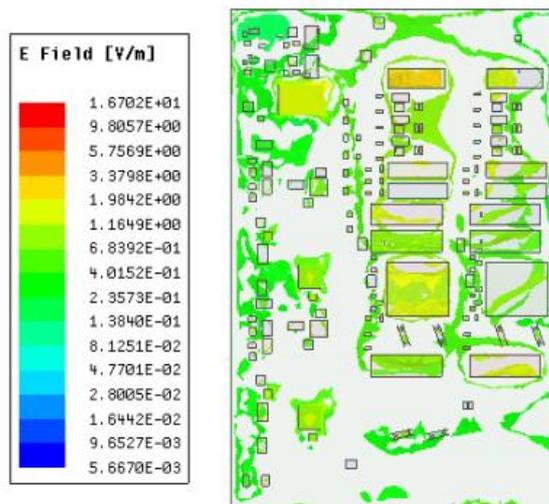


图 B.4 800~2000 MHz APU 电路板电场分布情况

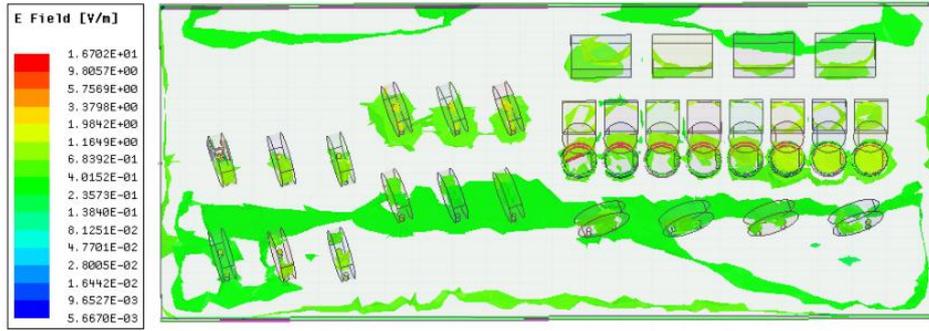


图 B.5 800~2000 MHz APT 电路板电场分布情况



图 B.6 800~2000 MHz CFT 电路板电场分布情况

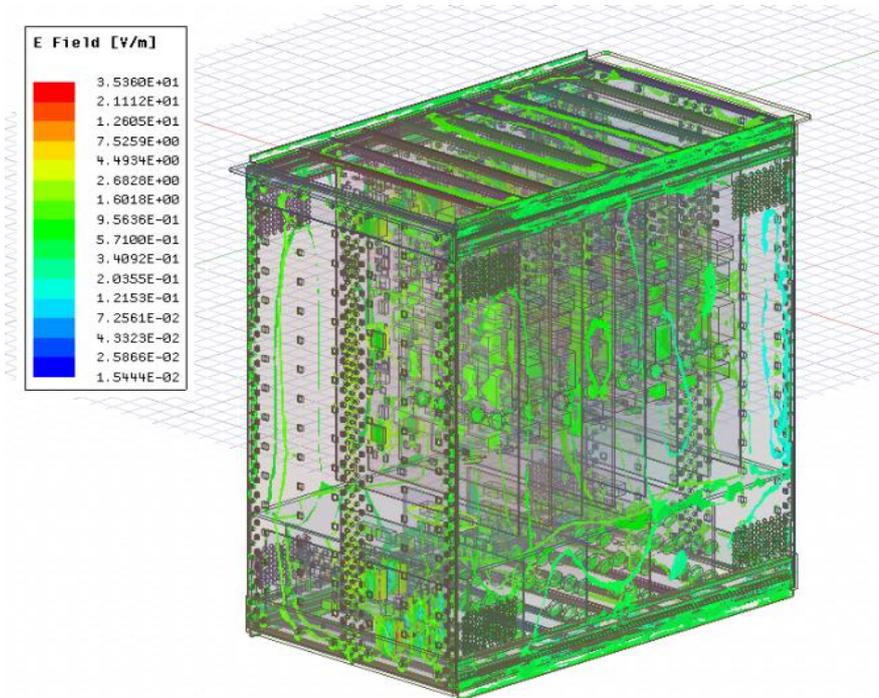


图 B.7 80~1000 MHz 电磁波传播方向沿 Y 轴的机箱电场分布情况

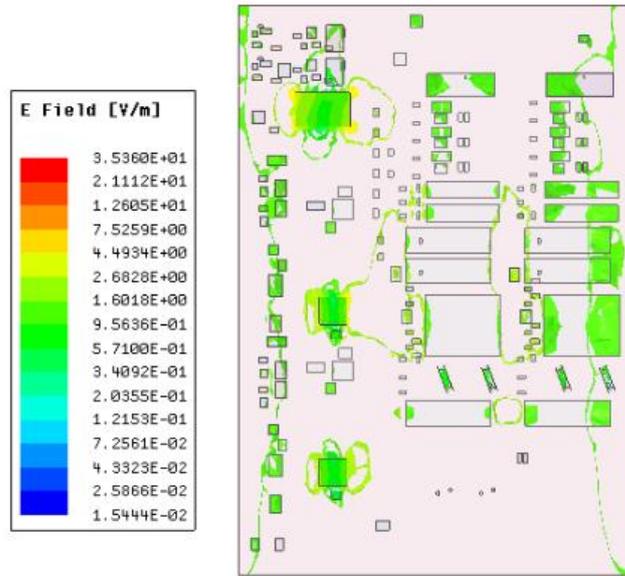


图 B.8 80~1000 MHz APU 电路板电场分布情况

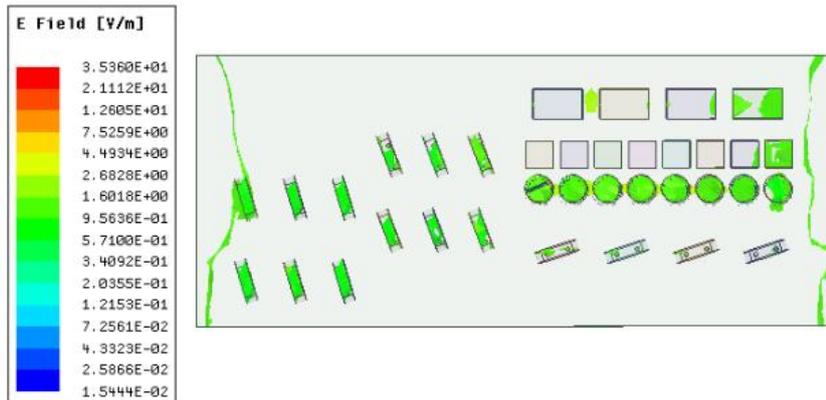


图 B.9 80~1000 MHz APT 电路板电场分布情况

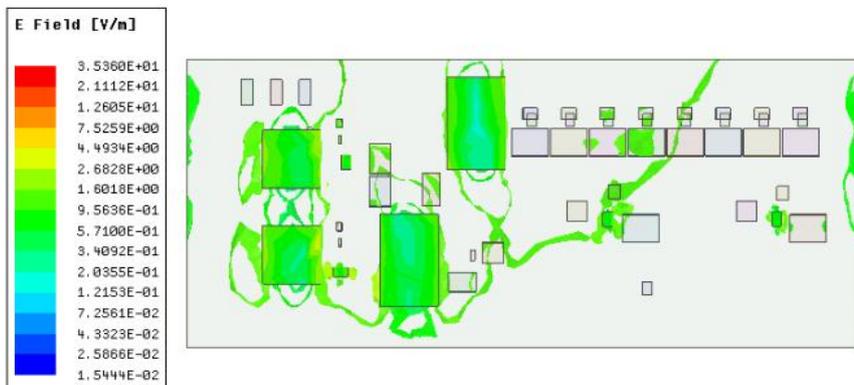


图 B.10 80~1000 MHz CFT 电路板电场分布情况

B.4 电磁屏蔽效能的性能裕量方程

将电磁屏蔽效能的阈值 30dB 代入式(5)，获得电磁屏蔽效能的性能裕量方程，即

$$M_{SE} = 20 \lg \left(\frac{E_e}{E_p} \right) - 30. \quad (\text{B.1})$$

其中， E_e 取的是电磁仿真分析过程中激励源的电场强度值； E_p 取的是产品 CPU 所在位置在仿真的扫频范围内电场强度的最大值。

B.5 不确定性量化

本示例的不确定性来源有两类，一是干扰源的不确定性，即激励源电场强度 E_e 是不确定变量；二是电子产品自身的不确定性，包括外壳材料电导率 μ_{e1} 、外壳材料相对磁导率 μ_m 以及填充材料电导率 μ_{e2} ，均为不确定变量。

产品设计方提供的上述四个变量的取值范围分别为

$$\begin{aligned} 10 &\leq E_e \leq 20, \\ 1.22 \times 10^7 &\leq \mu_{e1} \leq 3.77 \times 10^7, \\ 0.999830 &\leq \mu_m \leq 1.063138, \\ 1.45 \times 10^7 &\leq \mu_{e2} \leq 5.00 \times 10^7. \end{aligned}$$

按照 5.6.2 节给出的确信可靠分布形式选择原则，上述四个不确定变量的分布均为线性不确定分布，具体为：

(1) 激励源电场强度 E_e 的分布 $\Phi_{E_e}(x)$ ：

$$\Phi_{E_e}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 10 \\ \frac{x-10}{20-10}, & 10 < x \leq 20. \\ 1, & 20 < x \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

(2) 外壳材料电导率 μ_{e1} 的分布 $\Phi_{\mu_{e1}}(x)$ ：

$$\Phi_{\mu_{e1}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1.22 \times 10^7 \\ \frac{x-1.22 \times 10^7}{3.77 \times 10^7 - 1.22 \times 10^7}, & 1.22 \times 10^7 < x \leq 3.77 \times 10^7. \\ 1, & 3.77 \times 10^7 < x \end{cases} \quad (\text{B.3})$$

(3) 外壳材料相对磁导率 μ_m 的分布 $\Phi_{\mu_m}(x)$

$$\Phi_{\mu_m}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.999830 \\ \frac{x-0.999830}{1.063138-0.999830}, & 0.999830 < x \leq 1.063138. \\ 1, & 1.063138 < x \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

(4) 填充材料电导率 μ_{e2} 的分布 $\Phi_{\mu_{e2}}(x)$

$$\Phi_{e_2}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1.45 \times 10^7 \\ \frac{x - 1.45 \times 10^7}{5.00 \times 10^7 - 1.45 \times 10^7}, & 1.45 \times 10^7 < x \leq 5.00 \times 10^7 \\ 1, & 5.00 \times 10^7 < x \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

B.6 确信可靠度计算

按照线性不确定分布的特点，分别在激励源电场强度 E_e 、外壳材料电导率 μ_{e1} 、外壳材料相对磁导率 μ_m 以及填充材料电导率 μ_{e2} 各自的取值范围内取最小值、中位值以及最大值，并随意交叉组合，构成 9 组数据。具体地， E_e 取值为 10, 15 和 20V/m； μ_{e1} 取值为 1.22×10^7 , 2.50×10^7 和 3.77×10^7 S/m； μ_m 取值为 0.999830, 1.031484 和 1.063138； μ_{e2} 取值为 1.45×10^7 , 3.23×10^7 和 5.00×10^7 S/m。

将 9 组数据作为电磁性能仿真的输入，在仿真软件中依次运行，获取 CPU 位置处的扫频范围内电场强度的最大值，即为式(B.1)中的 E_p 。将每一组的 E_e 和 E_p 代入式(B.1)进行计算，获得 9 组电磁屏蔽效能的性能裕量值。9 组仿真输入数据、仿真输出数据以及电磁屏蔽效能的性能裕量计算值见表 B.3。

表 B.3 9 组性能仿真试验数据与电磁屏蔽效能的性能裕量计算值

仿真输入				运行结果	计算结果
激励源 电场强度 E_e (V/m)	外壳材料 电导率 μ_{e1} (S/m)	外壳材料 相对磁导率 μ_m	填充材料 电导率 μ_{e2} (S/m)	CPU 位置 电场强度 E_p (V/m)	电磁性能裕量 M_{SE} (dB)
10	1.22×10^7	0.999830	1.45×10^7	0.35277679	-0.95
10	2.50×10^7	1.031484	3.23×10^7	0.36517413	-1.25
10	3.77×10^7	1.063138	5.00×10^7	0.33496544	-0.5
15	1.22×10^7	1.031484	5.00×10^7	0.28680800	4.37
15	2.50×10^7	1.063138	1.45×10^7	0.26859088	4.94
15	3.77×10^7	0.999830	3.23×10^7	0.37246997	2.1
20	1.22×10^7	1.063138	3.23×10^7	0.28842307	6.82
20	2.50×10^7	0.999830	5.00×10^7	0.27959538	7.09
20	3.77×10^7	1.031484	1.45×10^7	0.35077610	5.12

设电磁屏蔽效能的性能裕量 M_{SE} 为不确定变量 ξ_{SE} 。将其样本向量 $M_{SE}^* = [-0.95, -1.25, -0.5, 4.37, 4.94, 2.1, 6.82, 7.09, 5.12]$ 作为修匀公式的输入，计算获得不确定变量 ξ_{SE} 的均值为 2.216，方差为 3.801。因此， ξ_E 服从的确信可靠分布 $\Phi_E(x)$ 为 $\xi_E \sim N(2.216, 3.801)$ ，写成如式(6)所示的形式，即为

$$\Phi_{SE} x = \left(+ \left(\frac{\pi(2.216 - x)}{3.801\sqrt{3}} \right) \right)^{-1} \quad x \in \mathfrak{R}. \quad (\text{B.6})$$

将式(A.5)代入式(10)，计算得电磁屏蔽效能对应的电磁性能确信可靠度 $R_{B,SE}$ ，即

$$R_{B,SE} = 1 - \Phi_{SE}(0) = 1 - \left(1 + \exp\left(\frac{2.216\pi}{3.801\sqrt{3}}\right) \right)^{-1} = 0.7422. \quad (\text{B.7})$$

