

论电磁兼容性设计理念

赵岐诚

(南京电子技术研究所,江苏南京 210039)

摘 要: 能量兼容性会以电磁兼容性表象出现. 采用局限于电磁能量的理论和技术,可能会陷于技术困境或需要更高成本. 本文用能量兼容性及相关模型阐述电磁兼容性概念. 以机载雷达为例,初步分析论述能量兼容的电磁兼容性设计应用. 采用能量兼容设计理念,有助于应对电磁兼容的诱发因素,为规划、预防、处理设计中的电磁兼容问题提供必要条件.

关键词: 电磁兼容性; 能量兼容性; 机载雷达

中图分类号: TN03

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2020)02-0238-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.02.002

Design Concept of Electromagnetic Compatibility

ZHAO Qi-cheng

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210039, China)

Abstract: Energy compatibility emerges as the surface phenomena of electromagnetic compatibility. With theories and technologies limited to electromagnetic energy, it may lead to technical dilemma or higher costs. The concept of EMC is stated through energy compatibility and related models. The design of EMC with energy compatibility is preliminarily discussed by taking airborne radar as an example. Using the concept of energy compatibility design is helpful to deal with the inducing factors of EMC and provide requirements for planning, prevention and treatment of EMC problems in design.

Key words: electromagnetic compatibility; energy compatibility; airborne radar

1 引言

现实中,能量兼容性会以电磁兼容性表象出现. 现行标准对电磁兼容给出了基于现象的定义^[1,2],未定义诱发电磁兼容现象的因素模型. 诱发电磁兼容现象的初始因素可以是非电磁形式能量. 外表相同的电磁兼容现象可由不同的诱发因素产生. 应对电磁兼容问题,不仅需要预防、处理已知的电磁兼容问题,更需要预先规划,从而预防、处理未知的、潜在的电磁兼容问题. 随着信息技术及人类科技的发展,在能量工程等领域,局限于电磁能量的电磁兼容性设计理念可能会陷于技术困境或需要更高的成本. 本文提出电磁兼容的能量兼容性概念,即应用能量的多维性进行兼容性设计,以规划、预防、处理电磁兼容问题. 实践表明该理念更利于引导系统集成设计、提高设备/系统的稳定性与兼容性,降低研发成本. 文中以机载雷达^[3]为例,简述能量兼容的电磁兼容性设计应用.

2 电磁兼容的能量兼容性概念

2.1 能量的多维性

能量一般可用式(1)的数学模型表示,具有多维属性.

$$P_A = f_A(X_1, X_2, \dots, X_n, P_{AS}) \quad (1)$$

式(1)表示:在以 X_1, X_2, \dots, X_n 正交变量为维度的多维区域 G 中,源能量 P_{AS} 以函数关系 f_A 规律运行,形成能量 P_A ;其中, $n = 1, 2, 3, \dots, X_1, X_2, \dots, X_n$ 及 $P_A, P_{AS} \in G$. X_1, X_2, \dots, X_n 维度可以是时间 t 、频率 f 、电场 E 、磁场 H 、三维空间、...等,一般是有大小和方向的矢量;在约定条件下, X_i 可以用标量 x_i 表示, $i = 1 \sim n$.

能量在实际应用中往往通过技术或环境予以转化,约束成不同的形式. 如电路中,通过电路媒介的约束,某 A 点的能量可用电压 U_A 、电流 I_A 标量表征,其数学模型为式(2). 此时,能量的其它维属性被隐藏.

$$Y_A = f_A(t, Y_{AS}), Y = U, I \quad (2)$$

由能量的多维性,电磁能量只是能量在电场、磁场等部分维度的反映。

2.2 能量与能量区域的兼容性

设能量区域 G 中的能量 P_A 与能量区域 D 存在连接途径,按 P_A 、 G 与 D 的相应关系, P_{Dc} 为能量 P_A 在 D 中可能的转化能量,如图 1(以多边形表述多维空间,下同)。根据 P_A 与 D 的状况,存在三种情形:① $P_{Dc} \notin D$, P_D 不存在,如图 2;② $P_{Dc} \notin D$, 能量 P_A 失真成 $P_D (\in D)$, 如图 3;③ $P_{Dc} \in D$, 如图 4。对第一种情形,能量 P_A 是区域 D 的不安全能量;对第二、三种情形,能量 P_A 是区域 D 的安全能量,其中, P_S 为能量 P_A 在 D 中产生的有效应用能量, P_N 为能量 P_A 在 D 中产生的无效应用能量。

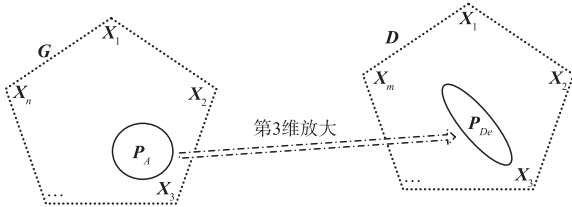


图1 能量区域 G 、 D 与能量 P_A 、 P_{Dc}

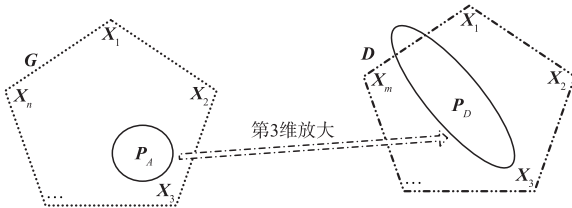


图2 能量 P_A 、区域 D 与非现实的超限能量 P_D

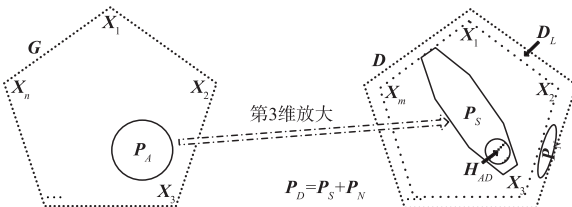


图3 能量 P_A 、区域 D 与失真能量 P_S (P_N 增大)

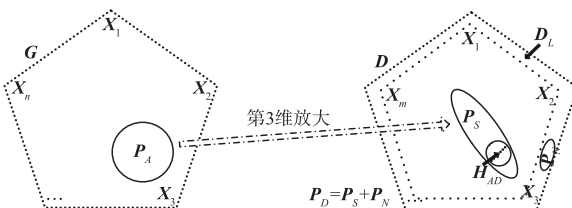


图4 能量 P_A 、区域 D 与正常能量 P_S 、 P_N

设 D_L 为能量区域 D 的无效应用能量限定范围,如图 3 ~ 图 7。 $D_L (\in D)$ 可以是与 D 同维度的子区域,用以限定 D 中无效应用能量兼容性限度的范围。在 D 中,若 $P_N \in D_L$,则在 D_L 条件下,能量 P_D 的无效应用能量是区域 D 相容的无效应用能量。在 D 中 P_S 的需求区域,若

能量 P_S 满足应用需求条件 H_{AD} (如图 3、图 4),则在 H_{AD} 条件下,区域 D 是能量 P_D 、 P_S 的相容区域;否则,区域 D 是能量 P_D 、 P_S 的不相容区域,如图 5。当且仅当 $P_N \in D_L$ 、 $P_S (\in D)$ 满足条件 H_{AD} 时,能量 P_D 、 P_S 与能量区域 D 是兼容的。

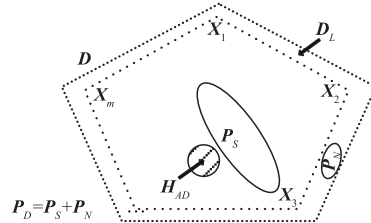


图5 H_{AD} 条件, 能量 P_D 、 P_S 与区域 D 不相容

条件 D_L 与能量区域 D 的应用需求等相关,条件 H_{AD} 与能量 P_S 的特征、需求等相关。一般地,兼容是有条件的。即同样的能量 P_D 或 P_S 及能量区域 D ,在不同的 D_L 、 H_{AD} 条件下,分别存在兼容和不兼容。

2.3 能量的兼容性

设在以 X_1, X_2, \dots, X_m 正交变量为维度的能量区域 D 中, P_A 是 D_L 、 H_{AD} 条件下的兼容能量, P_B 是 D_L 、 H_{BD} 条件下的兼容能量。根据 P_A 、 P_B 与 D 的状况,存在三种情形:① $P_A + P_B \notin D$, $P_A + P_B$ 不存在,类似图 2;② $P_A + P_B \notin D$, 能量 $P_A + P_B$ 失真成 $P_A + P_B \in D$, 类似图 3;③ $P_A + P_B \in D$, 如图 6、图 7。对第一种情形,能量 $P_A + P_B$ 是区域 D 的不安全能量;对第二、三种情形,能量 $P_A + P_B$ 是区域 D 的安全能量。

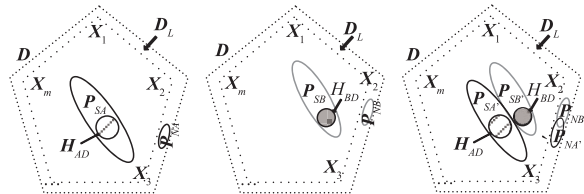


图6 能量区域 D 中能量 P_A 、 P_B 兼容

若 $P_A + P_B \in D$, P_S 为能量 $P_A + P_B$ 在 D 中产生的有效应用能量, P_N 为能量 $P_A + P_B$ 在 D 中产生的无效应用能量。能量 P_A 、 P_B 在独立、共同存在时产生的有效应用能量分别是 P_{SA} 、 P_{SB} 、 $P_{SA'}$ 、 $P_{SB'}$, 产生的无效应用能量分别是 P_{NA} 、 P_{NB} 、 $P_{NA'}$ 、 $P_{NB'}$ 。能量 $P_S = P_{SA} + P_{SB} \leq P_{SA} + P_{SB}$, $P_N = P_{NA} + P_{NB} \geq P_{NA} + P_{NB}$ 。

在 D 中,若 $P_N \in D_L$,则在 D_L 条件下,能量 $P_A + P_B$ 的无效应用能量是区域 D 相容的无效应用能量。在 P_S 的需求区域,若能量 P_S 满足条件 H_{AD} ,则在区域 D 的 H_{AD} 条件下,能量 P_B 、 P_{SB} 、 $P_{SB'}$ 分别是能量 P_A 、 P_{SA} 、 $P_{SA'}$ 的相容能量,如图 6。否则,能量 P_B 、 P_{SB} 、 $P_{SB'}$ 分别是能量 P_A 、 P_{SA} 、 $P_{SA'}$ 的不相容能量,如图 7。由能量 P_S 是否满足条件 H_{BD} ,能量 P_A 、 P_{SA} 、 $P_{SA'}$ 分别是能量 P_B 、 P_{SB} 、 $P_{SB'}$ 的相

容或不相容能量. 当且仅当 $P_N \in D_L, P_S (\in D)$ 满足条件 H_{AD}, H_{BD} 时, 能量 P_A, P_B 与能量区域 D 是共同兼容的, 简称能量 P_A, P_B 兼容. 即能量 P_A 与 P_B 兼容是在能量区域 D , 以及条件 D_L, H_{AD}, H_{BD} 下成立的.

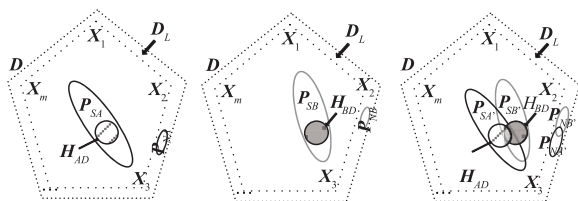


图7 能量区域 D 中能量 P_A, P_B 不兼容

在区域 D 的 D_L, H_{AD}, H_{BD} 条件下, 对不能共同兼容的能量 P_A, P_B , 通过能量形式转换, 在转换后区域也可能达到兼容.

若存在以 X_1, X_2, \dots, X_n 正交变量为维度的能量区域 $G, n \geq m$, 能量 P_A 在 G_L, H_{AG} 条件下与 G 兼容, 能量 P_B 在 G_L, H_{BG} 条件下与 G 兼容, $P_A + P_B \in G$; 当区域 G 中 $P_A + P_B$ 产生的无效应用能量 $P_N \in G_L$, 有效应用能量 P_S 满足 H_{AG}, H_{BG} 时, 能量 P_A, P_B 在 G_L, H_{AG}, H_{BG} 条件下与能量区域 G 共同兼容, 能量 P_A, P_B 兼容, 如图 8.

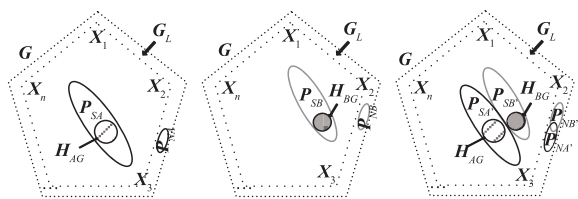


图8 能量转换区域 G 中能量 P_A, P_B 兼容

2.4 设备、系统的兼容性

设在以 X_1, X_2, \dots, X_n 正交变量为维度的能量区域 D 中, $n = 1, 2, 3, \dots, X_1, X_2, \dots, X_n \in D$; 能量区域 D 对无效应用能量的限度为 D_L , 存在 P_1, P_2, P_3, \dots 能量, 分别以条件 H_1, H_2, H_3, \dots 运行. 若 P_1, P_2, P_3, \dots 分别满足条件 D_L 和 H_1, H_2, H_3, \dots , 即分别与能量区域 D 兼容. 则运用 P_1, P_2, P_3, \dots 能量的设备、系统与形成能量区域 D 的设备、系统兼容.

若区域 D 中, 能量 $P_1 + P_2 + P_3 + \dots$ 满足 $D_L, H_1, H_2, H_3, \dots$ 条件, 则运用 P_1, P_2, P_3, \dots 能量的设备、系统与形成能量区域 D 的设备、系统共同兼容.

2.5 能量兼容性的基本应用

在工程设计、实施中, 预先评估、规划设备/系统运行中各部分、环节采用的能量形式、能量维度及环境能量维度. 根据应用能量和骚扰能量在各维度的差异性, 采取骚扰能量抑制、旁路等兼容性措施. 在特定能量空间无法与骚扰能量兼容时, 基于能量的多维性, 利用应用能量和骚扰能量在其它维空间存在的差异性, 采取

相关措施实现共同兼容. 在体系化设计、应用中, 结合信息工程技术等, 协调、规范、适应体系中各类能量的有序应用.

3 电磁兼容的能量兼容性设计

类似可靠性设计^[4], 电磁兼容性设计是能量应用设计在能量兼容性方面的体现, 一般是伴随能量应用需求设计开展, 不进行独立设计, 除非是拾遗补缺. 因而, 电磁兼容性设计理论与技术有较广泛的内涵, 主要有以下部分.

3.1 能量应用设计

能量兼容性首先与应用能量的能力相关. 如 2.2 节所述, 同样的能量 P_D 或有效应用能量 P_S 及能量区域 D , 在采用不同的能量应用技术, 即基于不同的无效应用能量限定范围 D_L 、有效应用能量需求条件 H_{AD} , 能量 P_D 或 P_S 与能量区域 D 分别存在兼容和不兼容. 而且, 当在某区域无法实现期望能量兼容时, 通过采用不同的能量应用技术, 可实现兼容性. 如机载雷达探测低空目标, 采用普通脉冲技术的时域处理, 目标回波淹没在地杂波中; 采用脉冲多普勒技术的频域处理, 可有效抑制地杂波, 探测到强地杂波背景下的机动目标^[3]. 由 2.2、2.3 节可以看到, 能量应用设计(理论与技术)是电磁兼容性设计基础之一.

3.2 兼容性规划设计

能量应用工程通常采用社会化工工、体系化构成形式实现. 即在一个由能量应用设备、系统构成的多维能量区域环境中, 存在多个或多系列应用能量的设备或系统. 如 2.4 节, 若需多个或多系列应用能量 P_1, P_2, P_3, \dots 的设备或系统共同兼容工作, 就需共同存在时满足相应 $D_L, H_1, H_2, H_3, \dots$ 条件. 为此, 需根据相关能量应用理论与技术, 规划设计多维能量区域 D 、能量形式 P_1, P_2, P_3, \dots 、无效应用能量限定范围 D_L 、能量需求条件 H_1, H_2, H_3, \dots . 能量兼容性规划设计依托于能量应用理论与技术, 也推动能量应用理论与技术的发展.

3.3 兼容性能设计

兼容性能设计是能量应用设计在兼容性方面的体现, 如可靠性设计. 若将能量应用设计作为一个多面体, 则它是其中的一个面; 将能量应用设计作为一个设计集合, 则它是其中的一个设计子集, 并约束相关设计子集. 设计时, 对有效或包含有效应用的能量, 应杜绝 2.2、2.3 节的情形①, 避免情形②. 在能量的各维度采用相关的理论和技术措施, 如电磁维度采用电磁场等理论与技术措施, 保障有效或包含有效应用的能量满足有效应用能量需求条件 H_{AD} , 无效应用能量低于能量区域的无效应用能量限定要求 D_L . 对骚扰能量通过正反两方面运用兼容或不兼容技术措施, 对其屏蔽、旁路、

抑制等处理,使其在能量区域满足限定要求 D_L 。

屏蔽、滤波、接地是设计中应用频度较高的术语。称其为术语,因为无论是理论上还是技术措施上,屏蔽、滤波、接地设计并非局限于字面内容。以屏蔽为例,一般是指电场、磁场等个别能量区域维度的屏蔽;实际是可在能量区域各维度开展的屏蔽,并根据实际情形从正、反两方面加以应用,如屏蔽保护有效应用能量或屏蔽隔离骚扰能量。

3.4 兼容性应用实施

兼容性应用实施是兼容性能设计的延续和贯彻。在应用实施时需忠实于兼容性设计要求。如在生产、组装、应用过程中,需按兼容性设计要求开展相应工作。健全的管理体系、良好的企业文化有助于保障兼容性应用实施。

4 机载雷达电磁兼容性设计应用

机载雷达的使用条件、应用需求决定了其效能的发挥,需与其它设备或系统协同工作,需具备体系应用兼容能力;因此,其电磁兼容性设计具有典型特点。机载雷达设计是应用需求、安全性、抗干扰、电磁兼容、可靠性、小型化、轻型化、测试性、维修性、热设计、低功耗、...等设计的集合,电磁兼容性设计只是其中的一个子集,但贯穿于整个设计、应用过程。在当前常规的机载雷达研发中,电磁兼容性设计 \approx 频谱工程设计^[5]+信息工程设计。采用信息工程一词的原因是:基于现行标准^[6]定义,软件工程不足以包容频谱工程设计之外的电磁兼容性设计内容;尽管许多电磁兼容性设计工作需在软件工程中开展。本章从设计分类角度简述能量兼容设计理念应用。

4.1 总体设计

机载雷达的电磁兼容性总体设计是贯穿于雷达工程设计中的一个类别,不限于顶层设计,由以下设计子集组成:

(1) 规划设计

规划设计包括产品实现和产品体系兼容性应用中能量技术集的构成、组合、运用、规范等的设计。形成相关的频谱工程、信息工程模型,以分析、评估、调整、规范所采用的能量应用技术集。

(2) 适应性设计

基于现实,对已规划的能量技术集的构成、组合、运用、规范等,以及相应的频谱工程、信息工程模型进行适应性调整的设计。

(3) 规范设计

基于规划的能量技术集的构成、组合、运用、规范等,及相应的频谱工程、信息工程模型,规范、约束雷达各组成、环节的设计。

4.2 电讯硬件设计

基于已规划的能量技术集及相应的频谱工程、信息工程模型开展。硬件设计包含以下内容:

(1) 元件的工程分析与应用设计

硬件设计所采用的元器件都不是纯净的、完美的。首先需要了解待采用的元件软硬件特性,对于选定元件更需掌握其特性;元件的选择应基于原理应用需求,通过工程计算进行;使用时应基于应用条件、应用需求,契合地组合其它元件,以发挥元件的有效功能,规避其不利影响。

(2) 硬件模型设计

硬件模型设计是在硬件设计前,评估各环节对需求的实现程度、计算详细的设计参数、规避应用中可能存在的问题等,所作的一系列工程计算。和总体设计、元件的工程分析与应用设计相关,或融为一体。硬件模型设计是硬件设计的充分条件。

在硬件模型的兼容性设计中,不仅需要分析、评估已知的、未知的、潜在的其它能量可能造成的不利影响(如 2.2、2.3 节的情形①、②,像分布式参数引起的高频高压上电冲击脉冲等);在能量传递、应用、处理等各环节,还需分析、评估有效应用、无效应用能量特性、可能的状况,以及技术组合措施途径(如软件电磁兼容设计的组合应用方式)等,以规避各种不利情形的发生。

(3) 硬件设计

在上述分析、模型设计基础上,综合应用机载雷达设计集合,开展电原理电路、PCB 板、...等硬件设计。设计中采用包括屏蔽、滤波、接地、...等原理在内的技术,保障兼容性能。如对无法在能量区域输入途径选择(屏蔽、隔离)的骚扰、待应用能量,在能量应用区域形成骚扰能量抑制区域方式,即骚扰能量的不兼容区域,阻断骚扰能量的不利影响,如接收机镜频抑制设计。硬件设计中应密切设计子集的结合,如结合热设计以避免增强电路噪声、降低可靠性。

4.3 软件设计

软件运行过程伴随能量变化、应用过程,同样应采取电磁兼容设计。类似硬件设计,不是所有的软件设计都需进行电磁兼容性设计。对存在与物理层、能量环境发生交互影响的软件,需进行电磁兼容性设计。机载雷达无法避免该类软件的存在。

软件电磁兼容性设计是一组规则、机制和相应指令集组合的设计,与硬件电磁兼容性设计直接或间接组合应用。用于①屏蔽物理层^[7]瑕疵或缺陷,在应用层获得物理层无瑕疵或缺陷那样的稳定、可靠界面;②使所在设备或系统适应外部各种变化的能量环境;③使所在设备或系统对外部能量环境产生最小影响。

软件电磁兼容性设计技术与采用的硬件平台、能

量技术相关,一般在工程模型指导下进行.设计时,首先,基于4.2节(1)、(2)识别物理层瑕疵或缺陷,基于工程模型分析、评估外部能量环境及其响应特性;其次,基于应用需求、前者状况、使用条件,确定应对规则、机制;最后,编制相关指令集并融入到整体软件中.

从现实表象看,不采用软件电磁兼容性设计可以另付代价,如选用或重新设计成本更高的物理平台,或提高全寿命周期费用等.所以,软件的电磁兼容性设计是提高设备运行稳定性、可靠性、体系兼容性及降低成本的设计.

4.4 结构工艺设计

结构工艺设计^[8]也是一系列设计技术的集合.在电磁兼容性方面,是设备或系统电磁兼容性设计的有机组成部分,与电讯设计共同实现兼容能力.主要体现在屏蔽、滤波、接地和实现方面.

(1)屏蔽:采用封闭或基于截止波导^[9]等理论和技术的非封闭设计,屏蔽指定对象.

(2)滤波:采用能量的传导性设计,旁路骚扰能量等,产生空间滤波效应.

(3)接地:采用环境适应性设计,满足接地要求.

(4)实现:采用适应于生产条件、应用环境的工艺设计,满足生产和应用环境要求.

5 结论

局限于电磁量子空间的电磁兼容性设计理念是多维能量空间能量兼容性设计理念的子集.电磁兼容性设计理念与应用的能量技术相关,不是一成不变的.在能量应用的各环节,应采用与能量技术及所在多维能量区域相关的兼容性设计理论与技术.

参考文献

- [1] GB/T 17624.1-1998 idt IEC61000-1-1:1992,电磁兼容 综述 电磁兼容基本术语和定义的应用与解释[S].北京:中国标准出版社,1998.1-14.
GB/T 17624.1-1998 idt IEC61000-1-1:1992, Electromagnetic Compatibility-General-Application and Interpretation of Fundamental Definitions and Terms[S]. Beijing: Standards Press of China,1998.1-14. (in Chinese)
- [2] GJB 72A-2002,电磁干扰和电磁兼容性术语[S].北京:总装备部军标出版发行部,2003.1-16.
GJB 72A-2002, Terminology for Electromagnetic Interference and Electromagnetic Compatibility[S]. Beijing: General Armament Department Military Standard Publishing Department,2003.1-16. (in Chinese)
- [3] GB/T 3784-2009,电工术语 雷达[S].北京:中国标准出版社,2009.1-20.
Electrotechnical Terminology-Radar[S]. Beijing: Standards Press of China,2009.1-20. (in Chinese)
- [4] GJB451A-2005,可靠性维修性保障性术语[S].北京:总装备部军标出版发行部,2005.1-7.
GJB451A-2005, Reliability, Maintainability and Supportability Terms[S]. Beijing: General Armament Department Military Standard Publishing Department,2005.1-7. (in Chinese)
- [5] 陈穷,等.电磁兼容性工程设计手册[M].北京:国防工业出版社,1993.4-7.
Chen Qiong, et al. Electromagnetic Compatibility Engineering Design Manual[M]. Beijing: National Defense Industry Press,1993.4-7. (in Chinese)
- [6] GB/T 11457-2006,信息技术 软件工艺术语[S].北京:中国标准出版社,2006.1-260.
GB/T 11457-2006, Information Technology-Software Engineering Terminology[S]. Beijing: Standards Press of China,2006.1-260. (in Chinese)
- [7] GB/T 9387.1-1998 idt ISO/IEC 7498-1:1994,信息技术 开放系统互连 基本参考模型 第1部分:基本模型[S].北京:中国标准出版社,1998.24-44.
GB/T 9387.1-1998 idt ISO/IEC 7498-1:1994, Information Technology-Open Systems Interconnection-Basic Reference Model-Part 1: The Basic Model[S]. Beijing: Standards Press of China,1998.24-44. (in Chinese)
- [8] GB/T 8582-2008,电工电子设备机械结构术语[S].北京:中国标准出版社,2008.4-15.
GB/T 8582-2008, Terminology for Mechanical Structures of Electrotechnical and Electronic Equipment[S]. Beijing: Standards Press of China,2008.4-15. (in Chinese)
- [9] GJB 1389A-2005,系统电磁兼容性要求[S].北京:总装备部军标出版发行部,2006.1-13.
GJB 1389A-2005, Electromagnetic Compatibility Requirements for Systems[S]. Beijing: General Armament Department Military Standard Publishing Department,2006.1-13. (in Chinese)

作者简介



赵岐诚(通讯作者) 1965年生于景德镇市,1986年毕业于武汉大学信息工程系无线电电子学专业,学士.现任南京电子技术研究所高工,研究方向为机载雷达系统工程.在电子信息系统工程中,先后从事硬件、软件、设备、系统研发.

E-mail:13912967806@139.com