

复杂系统电磁兼容评估的改进 TOPSIS 方法

田 锦¹, 谢拥军², 辛红全¹, 邱 扬¹, 柯仲明¹

(1. 西安电子科技大学机电工程学院, 陕西西安 710071; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 本文针对复杂系统电磁兼容要素特点和传统 TOPSIS 无法实现评估结果重用的问题, 建立了其系统评估贴适度模型, 确定了基于 ANP(网络层次分析)的网络分层指标赋权策略, 采用基于历史数据库样本统计方法确定的广义基准点替代传统 TOPSIS 方法仅在待评估方案中确定的正负理想点, 应用加权距离算子实现电磁兼容综合评估; 最后通过某车载通信系统的评估实例, 验证了方法的正确性。

关键词: 电磁兼容; 综合评估; 改进 TOPSIS; 网络层次分析 (ANP); 广义基准点

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)01-0105-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.01.019

A Synthetical EMC Evaluation Method for a Complicated System Based on a Novel TOPSIS Approach

TIAN Jin¹, XIE Yong-jun², XIN Hong-quan¹, QIU Yang¹, KE Zhong-ming¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the EMC characteristics of the Complicated system, a closeness degree model of systematic evaluation is established and a strategy to determine the weight of each index on the basis of ANP(the Analytic Network Process) is ascertained. By use a generalized standard point which is determined by sample statistical method on the historical database to replace the ideal point which is determined by traditional TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), EMC synthetical evaluation can be achieved with the weighted-distance concentration operator. The proposed methodology make the evaluation result fit to be reused. A case study on Vehicular Communication System is used to illustrate the applicability and effectiveness of the proposed approach.

Key words: Electromagnetic Compatibility(EMC); synthetical evaluation; novel TOPSIS; ANP; generalized standard point

1 引言

系统电磁兼容评估包括了采用专家打分方式的主观评价^[1]、测试验证及系统内设备的成对或成组评估^[2,3], 以及对系统内关键敏感设备的干扰预测评估与分析^[4,5], 其主要思想均为对系统最终性能的预测分析或测试评估, 无法反映系统中各设计要素(如布局、互连、接地等集成设计因素)对最终性能的影响, 该类方法所获得的评估结果不利于指导系统电磁兼容设计或生产水平的提升。

而针对复杂电子系统(如车载/舰载/机载等机动作通信系统)中各设计因素的电磁兼容综合评估属于多准则决策的研究范畴^[6], 其指标体系往往表现出复杂、相关、递进的分层网络化结构。此外, 工程中往往需要对不同的方案或是一次研制中的多次改进设计进行评估值

的对比, 必须保证某特定方案的评估结果在不同的评估对象序列中保持一致的评价值, 即保证评估结果是可重用的。但综合评估的传统 TOPSIS(逼近于理想解的排序方法)只适用于多个方案一次评估中的相对排序, 评估结果无法重用(本文算例中有对比)。

本文针对系统级电磁兼容特点, 提出了基于改进 TOPSIS 的复杂系统电磁兼容综合评估方法, 即通过网络层次分析法(The Analytic Network Process, ANP)实现系统电磁兼容的网络分层树型多属性指标赋权; 采用基于历史数据库样本统计的广义基准点搜索方法确定正负基准点, 以此替代传统 TOPSIS 方法仅在待评估方案中确定的正负理想点; 进而应用加权欧氏距离求解贴适度, 从而解决评估结果重用的问题。最后, 通过某车载通信系统的评估实例, 验证了该方法的正确性。

2 系统级电磁兼容网络分层树模型

基于不同任务的各类复杂系统千差万别,其任务特点、系统组成、频谱分布、电磁特性等都具有较大差异,必须建立分类指标体系.其中集成于有限空间平台(如车载、机载等)的机动式通信系统电磁兼容问题突出,具有典型代表性.其共性特点表现为:

(1)系统集成度高,局部电磁环境恶劣;

(2)电子设备种类多,数量大,互为潜在的干扰源与敏感设备;

(3)电磁耦合途径多,既包括通过天线端口的前门耦合,又包括通过电源/互连/接地系统而形成的后门耦合;

(4)干扰模式多,各影响因素对系统最终性能的影响呈现非线性;

(5)各种基本电磁兼容指标既相对独立,又具有一定的关联性.

因此,根据系统电磁兼容关键要素的分解,建立机动式通信系统电磁兼容指标的网络分层树模型如图1所示.

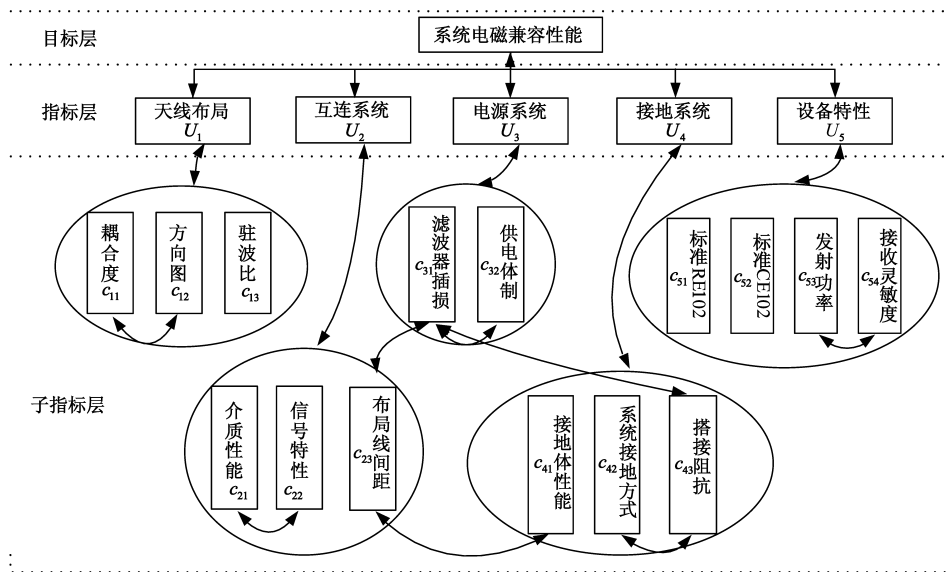


图1 机动式通信系统电磁兼容指标体系

该模型中目标层与指标层呈现分层树型结构,指标层中各指标按类相对独立,包括表征布局性能、互连系统、接地系统等平台载体电磁兼容的性能类型;也包括电源系统、设备特性等上装任务系统电磁兼容的性能类型;而子指标层数据呈现分类的网络关联特征,即每一类子指标与指标层相对应,但各具体子指标间存在一定的影响.如接地体特性与滤波性能、互连屏蔽性能均存在着关联关系,图中以双向关联表示.

3 基于改进 TOPSIS 的综合评估贴近度模型

根据多属性决策理论构造系统级电磁兼容性能的综合评估贴近度模型:

$$SR = f(\mathbf{w}, \mathbf{Q}) \quad (1)$$

其中: \mathbf{w} 为非负归一化的子指标层目标加权向量; \mathbf{Q} 为待评估方案中的量化数据集,又称为决策向量; f 为数据集结算子.

为实现该模型求解,针对系统电磁兼容的网络树型结构,采用网络分析法(ANP)求解获取 \mathbf{w} .

在对上述数据进行综合集顿时,本文采用基于历史数据库样本统计的广义基准点搜索方法获取规范化

的广义正、负基准点,代替传统 TOPSIS 中的正、负理想点;引入加权欧氏距离表示待评估方案分别与正、负基准点的靠近程度,并将待评估方案与正负基准点的距离进行综合,获得归一化的贴近度,贴近度越大,方案越优.

3.1 网络分析法求解目标加权向量

如图1中,设 ANP 指标层有元素组 U_1, \dots, U_N , 其中 U_i 中有子指标层元素 c_{i1}, \dots, c_{in_i} , 以目标层性能为准则, U_j 中元素 $c_{jl} (l=1, \dots, n_j)$ 为次准则^[6], 元素组 U_i 中各元素按其对于 c_{jl} 的影响力大小进行间接优势度比较,由此得归一化特征向量 $(ws_{i1}^j, ws_{i2}^j, \dots, ws_{in_i}^j)$. 然后,依次遍历次准则 $c_{jl} (l=1, \dots, n_j)$, 形成矩阵 WS_{ij} :

$$WS_{ij} = \begin{bmatrix} ws_{i1}^1 & ws_{i1}^2 & \dots & ws_{i1}^{n_j} \\ ws_{i2}^1 & ws_{i2}^2 & \dots & ws_{i2}^{n_j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ ws_{in_i}^1 & ws_{in_i}^2 & \dots & ws_{in_i}^{n_j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将矩阵 WS_{ij} 作为子矩阵,可以组集形成超矩阵 WS , 如下所示:

$$\mathbf{WS} = \begin{bmatrix} \mathbf{WS}_{11} & \cdots & \mathbf{WS}_{1j} & \cdots & \mathbf{WS}_{1N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{WS}_{i1} & \cdots & \mathbf{WS}_{ij} & \cdots & \mathbf{WS}_{iN} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{WS}_{N1} & \cdots & \mathbf{WS}_{Nj} & \cdots & \mathbf{WS}_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

超矩阵的子块 \mathbf{WS}_{ij} 都是归一化的,但是 \mathbf{WS} 却不是归一化的,为此,在指标层内,再次以目标层性能为准则,某指标层性能 U_i 为次准则,指标层内各指标的重要性进行比较,类似超矩阵 \mathbf{WS} 中子块 \mathbf{WS}_{ij} 的求取,得矩阵 \mathbf{WP} ,其反映了 \mathbf{WS} 子块的相对排序^[6],因此将其命名为加权矩阵,如下所示:

$$\mathbf{WP} = \begin{bmatrix} \mathbf{wp}_{11} & \cdots & \mathbf{wp}_{1N} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \mathbf{wp}_{N1} & \cdots & \mathbf{wp}_{NN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对超矩阵元素进行加权,得:

$$\mathbf{W} = (\mathbf{W}_{ij}) \quad (5)$$

$$\mathbf{W}_{ij} = \mathbf{wp}_{ij} * \mathbf{WS}_{ij}$$

\mathbf{W} 称为加权超矩阵,其列和为 1. 根据超矩阵极限原理^[6],当 $\mathbf{W}^\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{W}^t$ 存在时, \mathbf{W}^∞ 的各列元素趋于一致,表征了各子指标元素的极限相对排序向量,即为式(1)中的非负归一化的目标加权向量 \mathbf{w} .

3.2 基于样本统计的广义基准点搜索

将系统综合评估中数据源分为定量数据和定性数据两种.定性数据具有模糊的特性,对这样的数据量化过程中,会自然产生理论最优和最差,此时,我们就可以分别将理论最优、理论最差值确定为正负基准点在该维的坐标值.

而定量指标数据源典型分布规律包括正态分布、指数分布、 t 分布等^[7].其原始数据容量一般不是很大,样本中存在局部偶然、坏点等因素影响;此外,从物理意义出发,定量数据可分为望大型、望小型、适中型三种,为了在求取其广义基准点时建立统一的算法形式,首先将原始数据集映射至非负且望大型数据集,进而基于小样本理论进行分析.

记某原始数据指标的数据全体为 Ω . 现有原始样本 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$, ($X \subset \Omega$), 则其映射样本定义为:

$$\tilde{X} = (\tilde{x}_1, \cdots, \tilde{x}_i, \cdots, \tilde{x}_n)$$

$$\tilde{x}_i = \begin{cases} x_i & \text{非负望大型} \\ 1/(-x_i) & \text{非正望大型} \\ -x_i & \text{非正望小型} \\ 1/x_i & \text{非负望小型} \\ 1/|x_i - \bar{x}| & \text{适中型, } \bar{x} \text{ 为中值} \end{cases} \quad (6)$$

即,建立了原始数据至非负望大型数据的映射 g :

$$g: X \rightarrow \tilde{X}$$

其中, $X \subset \Omega$, $\tilde{X} \subset \tilde{\Omega}$

根据小样本统计理论^[7],假设总体 $\tilde{\Omega}$ 服从某种分布,其概率分布函数为 $F(\tilde{x})$,则求出有限容量样本 \tilde{X} 的离散分布值 $\bar{F}(\tilde{x})$,应用 K-S 检验法^[8] (Kolmogorov-Smirnov 法)进行分布检验,如果满足下式,则接受原假设;否则拒绝接受.

$$D_n = \max_{-\infty < \tilde{x} < \infty} |F(\tilde{x}) - \bar{F}(\tilde{x})| < D_{n,\alpha} \quad (7)$$

式中: $D_{n,\alpha}$ 为显著性水平 α 上的临界值,可查表所得^[8], n 为 \tilde{X} 的样本容量.

若映射总体 $\tilde{\Omega}$ 的概率密度函数为 $F(\tilde{x})$,则元素 \tilde{x} 落在区间 $[\tilde{x}_a, \tilde{x}_b]$ 的概率可表示为:

$$P(\tilde{x}, \tilde{x}_a \leq \tilde{x} \leq \tilde{x}_b) = \int_{\tilde{x}_a}^{\tilde{x}_b} F(\tilde{x}) d\tilde{x} \quad (8)$$

$\forall \varepsilon > 0$, 当 $P(\tilde{x}, \tilde{x}_a \leq \tilde{x} \leq \tilde{x}_b) = 1 - \varepsilon$ 时,即当落入该区间的概率足够大时,认为 \tilde{x}_a, \tilde{x}_b 为映射总体 $\tilde{\Omega}$ 的临界分布点概率点;则对该指标而言, \tilde{x}_a, \tilde{x}_b 体现的就是该指标服从概率统计的最优和最差点,因此定义它们为该指标的基准点值.

对所求得的 \tilde{x}_a, \tilde{x}_b 做映射函数的逆变换即得对应原始数据的正负基准值:

$$x_{a,b} = g^{-1}(\tilde{x}_{a,b}) \quad (9)$$

3.3 基于加权欧氏距离的贴近度计算

设方案 i 的子指标向量(决策向量)为 $\mathbf{Q}_i = (q_{i1}, \cdots, q_{il}, \cdots, q_{iN_n})$ ($j = 1 \cdots N; l = 1 \cdots n_j$), 依据 3.2 节中方法获得的正负基准点向量分别为 $\mathbf{Q}^+ = (q_{11}^+ \cdots q_{j1}^+ \cdots q_{N_n}^+)$ 、 $\mathbf{Q}^- = (q_{11}^- \cdots q_{j1}^- \cdots q_{N_n}^-)$.

构造其无量纲归一化向量^[6]分别为 $\mathbf{y}_i = (y_{i1}, \cdots, y_{ij}, \cdots, y_{iN_n})$, $\mathbf{y}_+ = (y_{11}^+, \cdots, y_{j1}^+ \cdots y_{N_n}^+)$, $\mathbf{y}_- = (y_{11}^-, \cdots, y_{j1}^- \cdots y_{N_n}^-)$.

定义方案 i 与基准点的欧氏加权距离为:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{N_j} [(y_{jl}^i - y_{jl}^+)^2 * w_{jl}^2]}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{N_j} [(y_{jl}^i - y_{jl}^-)^2 * w_{jl}^2]} \quad (10)$$

得方案 i 的贴近度为:

$$SR_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (11)$$

SR_i 为一 0~1 之间的无量纲量,其数值大小表征了方案 i 电磁兼容综合性能的优劣程度,值越大,性能越优.

4 评估实例

依据所建立的机动式通信系统电磁兼容评估指标体系(图 1),对某型通信车系统中的五种车型方案进行

评估,各子指标原始数据源对应决策向量如表 1 中“待评估方案”(2~6 列)给出.为了对比传统 TOPSIS 和本文所提改进 TOPSIS 的不同点,分别应用两种评估方法

对如下方案序列进行评估:

(1)方案序列 1:取表 1 中方案 1、2、3、4

(2)方案序列 2:取表 1 中方案 1、3、4、5

表 1 某型车载系统子指标向量

子指标		待评估方案*					改进 TOPSIS		传统 TOPSIS			
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	正基准点	负基准点	方案序列 1		方案序列 2	
									正理想点	负理想点	正理想点	负理想点
耦合度 (dB)	c_{11}	-27.67	-20.68	-25.27	-26.06	-25.48	-35	-8	-27.67	-20.68	-27.67	-25.27
方向图畸变系数	c_{12}	0.55	0.476	0.519	0.513	0.591	0.9	0.1	0.55	0.476	0.591	0.513
驻波比	c_{13}	2.64	2.46	2.79	2.58	1.55	1.5	4	2.46	2.79	1.55	2.58
介质屏蔽 (dB)	c_{21}	55	40	60	71	70	75	30	71	40	71	55
屏蔽层接地方式	c_{22}	0	0.3	1	0.3	1	1	0	1	0	1	0
布局线间距 (cm)	c_{23}	6	9	10	11	13	15	0	11	6	13	6
滤波器插损 (dB)	c_{31}	80	45	50	55	85	100	20	85	45	85	50
供电体制	c_{32}	1	0.4	1	0.5	1	1	0	1	0.4	1	0.5
接地汇流排性能	c_{41}	0.2	0	0.4	0.4	0.8	1	0	0.4	0	0.8	0.2
系统接地方式	c_{42}	0.6	0.3	1	1	0.6	1	0	1	0.3	1	0.6
搭接阻抗 (Ω)	c_{43}	0.1	5	1	10	3	0.01	20	0.1	10	0.1	10
设备 RE102 性能	c_{51}	0.4	0.6	0.8	0.6	1	1	0	0.8	0.4	1	0.4
设备 CE102 性能	c_{52}	0.8	0.5	1	0.5	1	1	0	1	0.5	1	0.5
发射机带外抑制 (dB)	c_{53}	55	34	65	47	71	85	10	65	34	71	47
接收机灵敏等级	c_{54}	0.1	0.1	0.3	0.3	0.6	1	0	0.3	0.1	0.6	0.1

注:表中各参数值构成与原始数据对应的决策向量,其中定性数据采用分等级综合量化,定量数据取原始数据的加权平均值.

表 1 中正、负理想点是基于传统 TOPSIS^[6]直接在评估方案序列中按最优最差性能点得出,因此与所选评估方案序列有关,如表 1 中第 9~12 列中给出.

而表 1 中正、负基准点采用 3.2 节中所提样本统计方法获取,限于篇幅,以耦合度指标(即表 1 中 c_{11} 指标)基准点的搜索为例进行说明.

根据数据统计分析,假设耦合度样本数据服从正态分布,由式(7)得 $D_n = 0.0729$,查表得 $D_{n,0.01} = 0.1363$,满足一致性检验条件,说明耦合度数据服从正态分布.因此,由式(9)可得其正、负基准点分别为 $x_a = -35$, $x_b = -8$.

由式(2)~(5)得各指标权向量为: $w = \{0.13, 0.1, 0.09, 0.08, 0.06, 0.05, 0.04, 0.04, 0.04, 0.07, 0.06, 0.05, 0.08, 0.06, 0.05\}^T$.

表 2 评估结果对比

评估方法及方案序列		评估结果(贴近度)				
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
传统 TOPSIS	序列 1	0.60	0.30	0.64	0.57	—
	序列 2	0.46	—	0.43	0.37	0.62
改进 TOPSIS	序列 1	0.58	0.44	0.66	0.59	—
	序列 2	0.58	—	0.66	0.59	0.75

从表中可以看出,在传统 TOPSIS 求取贴近度时,由于待评估方案序列的改变,使方案 1、3、4 在两次评估中,所得的贴近度值不同,显然这不利于评估结果的重用;而利用本文提出的改进 TOPSIS 评估方法,所得的方

案 1、3、4 的贴近度在不同次的评估中保持不变,评估结果可以重用,而不要求待比较的方案必须进行同一次评估.

为验证评估结果,我们采用电台间干扰带宽这一任务系统的应用性能指标作为表征各车型电磁兼容综合性能的依据.相应 5 种车型的干扰带宽测试结果如表 3 所示,干扰带宽越小,电磁兼容综合性能越优.

表 3 实测干扰带宽对比 (MHz)

方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
两电台邻道干扰	5.0	6.5	4.5	5.5	3.6
两电台谐波干扰	0.15	0.75	0.05	0.15	0.025

其方案优劣的排序与按本文所提改进 TOPSIS 方法评估结果基本一致,均为方案 5 最优,方案 2 最差,验证了评估方法的正确性.

5 结论

本文提出了针对复杂系统电磁兼容综合评估的改进 TOPSIS 方法,然后利用该评估方法,对某车载通信系统多种车型方案的电磁兼容性能进行了综合评估,并与工程实例相比较,验证了该方法的可行性.同时利用该评估结果,还可进一步分析系统设计中的电磁兼容薄弱环节,为系统改进提供依据.

参考文献

- [1] Herbert K Mertel. Evaluation of EMC Programs [A]. Electromagnetic Compatibility Symposium Record [C]. US: IEEE, 1969. 173 - 176.
- [2] 严义君, 杨显清. 集群电子设备电磁兼容性评估方法 [J]. 电子科技大学学报, 2001, 30(3): 245 - 249.
Yan Yijun, Yang Xianqing. Methods of evaluating electromagnetic compatibility of cluster electronic equipments [J]. Journal of UEST of China, 2001, 30(3): 245 - 249. (in Chinese)
- [3] 田锦, 谢拥军, 邱扬, 胡超. 共址跳频系统组网优化 [J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(3): 354.
Tian Jin, Xie Yong-jun, QIU Yang, Hu Chao. Optimization of network design for co-site frequency-hopping system [J]. Journal of UEST of China, 2009, 38(3): 354. (in Chinese)
- [4] 秦森, 杨显清, 赵家升, 胡皓全. 接收机电磁兼容效能评估模型研究 [A]. 2007 年全国微波毫米波会议论文集 [C]. 北京, 2007. 1560 - 1562.
- [5] 纪奕才, 邱扬, 陈伟, 孙保华, 刘其中. 车载多天线系统的电磁兼容问题分析 [J]. 电子学报, 2002, 30(4): 560 - 563.
JI Yi-cai, QIU Yang, CHEN Wei, SUN Bao-hua, LIU Qi-zhong. Analysis of EMC Problems of the Vehicular Multiple Antennas System [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(4): 560 - 563. (in Chinese)
- [6] Satty T L. Decision making-The analytic hierarch work porcesses (AHP/ANP) [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, 13(1): 1 - 35.
- [7] 盛骤, 谢式千. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [8] 易丹辉, 董寒青. 非参数统计: 方法与应用 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.

作者简介



田 锦 女, 1972 年出生, 现为西安电子科技大学机电工程学院副教授, 为该校电磁场与专业博士研究生, 获得过 3 项省部级科技进步奖. 主要研究方向为信息安全、通信系统电磁兼容设计及综合评估技术.

E-mail: tj402@126.com



谢拥军 男, 1968 年 5 月生于陕西西安, 现为北京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算电磁学及其应用、天线与微波工程、太赫兹技术等.

E-mail: yjxie@buaa.edu.cn

辛红全 男, 1987 年出生, 2009 年毕业于西安电子科技大学机械电子工程专业, 现为该校机械电子工程专业硕士研究生.



邱 扬 男, 1957 年出生, 现任西安电子科技大学机电工程学院教授, 博士生导师, 电磁兼容性国防重点实验室客座教授, 陕西省电磁兼容专业委员会副主任. 获得过 5 项省部级科技进步奖. 主要研究方向为计算机信息安全、移动通信系统电磁兼容设计、复杂系统电磁环境效应技术.

E-mail: qiuyang@vip.sina.com

柯仲明 男, 1986 年出生, 2009 年毕业于西安电子科技大学机械电子工程专业, 现为该校机械电子工程专业硕士研究生.