

基于一般系统论的信息安全系统的理论研究

郭玉翠¹, 刘思奇¹, 雷敏^{2,3}, 程明智⁴

(1. 北京邮电大学理学院 北京 海淀区 100876; 2. 北京邮电大学计算机学院 北京 海淀区 100876

3. 灾备技术国家工程实验室 北京 海淀区 100876; 4. 北京印刷学院信息工程学院 北京 大兴区 102600)

【摘要】 基于一般系统论, 从一个全新的角度来研究信息安全系统, 为信息安全系统的理论研究开辟一条新道路, 先用层次分析法分析信息安全系统的影响因素以及它们之间的相互关系, 再通过微分方程模型来研究其中一些因素的相互作用。结果表明, 该模型能从一定程度上展现出信息安全系统发展中的内部变化, 对信息安全系统的发展起到一定的引导作用。

关键词 层次分析法; 微分方程模型; 一般系统论; 影响因素; 信息安全系统

中图分类号 TP309, N949 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.05.016

Theoretical Research about Information Security System Based on General System Theory

GUO Yu-cui¹, LIU Si-qi¹, LEI Min^{2,3}, and CHENG Ming-zhi⁴

(1. School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunication Haidian Beijing 100876;

2. Information Security Center, Beijing University of Posts and Telecommunications Haidian Beijing 100876;

3. National Engineering Laboratory for Disaster Backup and Recovery, Beijing University of Posts and Telecommunications Haidian Beijing 100876;

4. College of Information Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication National Daxing Beijing 102600)

Abstract Nowadays, researches on information security mainly focus on practical technologies, and many of them, such as quantum cryptography, intrusion detection, and disaster recovery, have been highly developed and widely used. However, from the theoretical perspective, there is still a lack of systematical theory which can dominate the operation and guide the development of the information security system from a certain level. In this paper, information security system is researched from a new perspective based on general system theory for the purpose of providing a new way to study information security system. Analytic hierarchy process is adopted to analyze the influencing factors of information security system and relationships among the factors themselves. Then, the interaction among some of the factors is studied through a model of differential equations. As the results show, the model in this paper reflects the inner changes of information security system to a certain extent, and plays a guiding role in the development of information security system.

Key words analytic hierarchy process; differential equations model; general system theory; influencing factors; Information security system

当前信息安全被看作信息网络和安全措施的简单叠加。信息安全领域的探索主要集中于实践层面, 即对信息网络和安全措施的研究, 而缺乏理论层面的研究。面对不断出现的复杂情况和问题, 原有的信息安全理论已很难满足日益增长的网络发展需求, 信息安全的发展迫切需要新的理论支撑。

由于信息技术应用的衍生性、资源的共享性、传播的跨界性以及通讯网络手段的多样性等特点,

信息安全是一个高度开放的系统。同时信息安全是一个动态变化的过程, 进攻和防御是瞬息万变并可以相互转换的, 信息安全系统内部各因素也相互影响。这就需要充分了解信息安全系统所包含的组成部分以及它们之间的关系, 以便能从组成部分的行为推导出该系统的行为。

本文是基于贝塔朗菲的一般系统论的探索性研究, 用层次分析法和微分方程组来研究信息安全系

统的影响因素和它们之间的相互作用, 分析系统行为, 为信息安全系统提供理论基础。

1 一般系统论

1.1 一般系统论概述

一般系统论^[1]之父、美籍奥地利生物学家贝塔朗菲最早将系统论应用于生物学的研究中。贝塔朗菲将系统定义为“由互相作用着的若干要素组成的复合体”, 系统的整体特征不能用部分特征的组合解释。一般系统论是对“整体”和“整体性”的科学探索, 它适用于不同本质的系统, 如机械、热学、化学等。只要提出问题, 并且恰当地定义系统概念, 就会发现存在着适用于一般化的系统的模型、原理和定律^[2]。

系统论所使用的研究方法有很多, 如信息论、控制论、对策论、决策论和网络理论、运筹学、微分方程等等。其中, 数学的方法适用于宽广的领域, 如物理学、生物学、经济学, 并且是沟通了这些学科与一般系统论的通道。

1.2 系统的数学描述

系统可以用不同的数学方法定义, 本文选取一组联立微分方程式作为例子说明。

$$\begin{cases} \frac{dQ_1}{dt} = f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n), \\ \frac{dQ_2}{dt} = f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ \vdots \\ \frac{dQ_n}{dt} = f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \end{cases}$$

式中, Q_i 表示要素 P_i ($i=1,2,\dots,n$) 的某个量。上式表明, 任何一个 Q_i 的变化, 是所有 Q (从 Q_1 到 Q_n) 的函数; 反之, 任一 Q_i 的变化承担着所有其他量以及整个方程组的变化。

2 信息安全系统

以往在研究信息安全的时候, 缺乏对于信息安全系统整体的理论研究, 所以信息安全系统由哪些要素组成, 没有一个确定的划分。本文考虑到系统具有的整体性、关联性、等级结构性、动态平衡性等特点, 定义一个信息安全系统, 包含信息安全的各要素^[3-6], 如图1所示。

信息安全系统在物理、组织、人员和技术4个层面通过制定信息安全行业的标准, 将硬件、软件和通讯紧密联系在一起, 最终实现信息安全的最终目标, 即保密性、完整性和可用性。这些要素组成一

个信息安全整体, 各要素之间相互关联, 偏失了哪一方面, 都会使安全出现漏洞, 造成损失。这些要素之间具有等级结构性, 比如人员安全处于信息安全的基础等级, 而信息的完整性处于信息安全的较高等级; 并且是处于动态平衡状态的, 在系统内始终会存在此消彼长的涨落状态, 但系统是自组织的、运动的, 处于动态平衡状态或趋于动态平衡状态的。

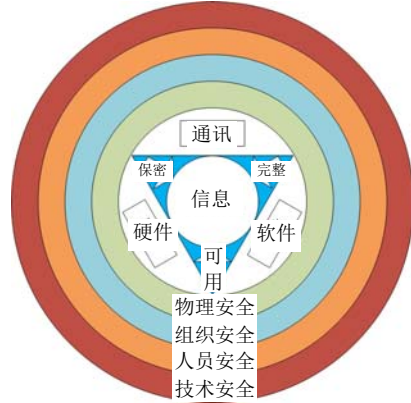


图1 信息安全系统构成

对于信息安全系统要素的分析, 是定性分析, 而用微分方程组的方法, 是定量的方法。本文采用层次分析法, 将定性的分析和定量的分析结合起来, 使微分方程组能被应用于信息安全系统的研究。

3 层次分析法分析信息安全系统

3.1 层次分析法概述

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)将一个复杂的多目标决策问题作为一个系统, 将目标分解为多个目标或准则, 进而分解为多指标的若干层次, 通过定性指标量化算出层次单排序(权重)和总排序, 作为目标优化决策的系统方法。

3.2 分析信息安全系统

按以下4个步骤, 对信息安全系统进行分析^[7-10]:

1) 递阶层次结构的建立。

运用AHP分析和决策问题时, 首先要构造一个有层次的结构模型。在该模型下, 复杂的问题被分解为一系列元素, 这些元素又按照它们的属性与关系形成若干层次, 上一层的元素对下一层的有关元素起支配作用。

结合第2节对信息安全系统的定义, 给出如图2所示信息安全系统层次结构。图中各层分别为目标层(O)、准则层(C_1 组织安全, C_2 人员安全, C_3 物理安全, C_4 技术安全)^[6]、子准则层(组织安全包括: C_{11} 安全管理体系, C_{12} 安全责任, C_{13} 信息处理授权, C_{14} 组织间合作; 人员安全包括: C_{21} 工作定义, C_{22}

人员筛选, C_{23} 保密协议, C_{24} 用户培训; 物理安全包括: C_{31} 安全区域管理, C_{32} 物理安全界限, C_{33} 设备安全; 技术安全包括: C_{41} 防止恶意软件, C_{42} 密码口令, C_{43} 敏感系统隔离, C_{44} 信息加密, C_{45} 数字签名)和方案层(A, B, C)。

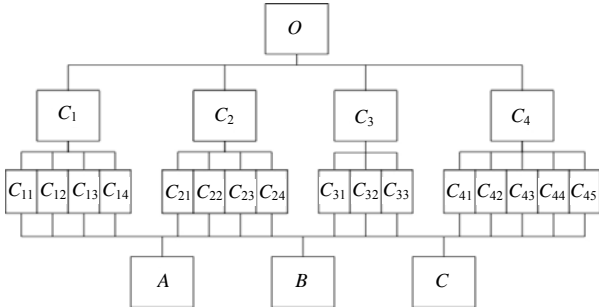


图2 信息安全系统层次结构

本文只考虑影响信息安全系统的要素, 即图中的准则层和子准则层, 而不考虑方案层, 故后文的运算中没有计算方案层。

2) 构造两两比较的判断矩阵。

在建立递阶层次结构以后, 上下层元素间的隶属关系就被确定了。对于准则C, 决策者比较它所支配的两个元素 C_i 和 C_j 哪一个更重要, 并按表1定义的比例标度对重要性程度赋值, 形成判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 其中 a_{ij} 是元素 C_i 和 C_j 相对于准则C的重要性比例标度。

表1 1~9标度的含义

比例标度	含义
1	两个元素相比, 具有相同的重要性
3	两个元素相比, 前者比后者稍重要
5	两个元素相比, 前者比后者明显重要
7	两个元素相比, 前者比后者强烈重要
9	两个元素相比, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	上述相邻判断的中间值

3) 权重向量和一致性指标。

通过两两比较得到的判断矩阵A不一定满足判断矩阵的互反性条件, AHP采用了一个数量标准来衡量A的不一致程度, 称为一致性指标。

判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, $a_{ij} = \frac{\omega_i}{\omega_j}$ 。 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots,$

$\omega_n)^T$ 是n个元素的权重。得到:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\omega_1}{\omega_2} & \dots & \frac{\omega_1}{\omega_n} \\ \frac{\omega_2}{\omega_1} & 1 & \dots & \frac{\omega_2}{\omega_n} \\ \vdots & \vdots & 1 & \dots \\ \frac{\omega_n}{\omega_1} & \frac{\omega_n}{\omega_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1} & \frac{1}{\omega_2} & \dots & \frac{1}{\omega_n} \end{bmatrix}$$

用 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 右乘上式, 得到 $AW = n\omega$, 表明 ω 为A的特征向量, 且A的特征根为n。即对于具有一致性的判断矩阵, 权重向量 ω 就是A的特征向量。

n阶正定方阵 $A > 0$, λ_{max} 是A的模最大的特征根。如果判断矩阵不具有 consistency, 则 $\lambda_{max} > n$, 此时的特征向量 ω 就不能真实的反应 C_1, C_2, \dots, C_n 在目标中所占的比重。定义衡量不一致程度的数量指标:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

对于具有一致性的判断矩阵来说, $CI \approx 0$ 。虽然CI值能反映出判断矩阵A的非一致性严重程度, 却没有指出这个非一致性是否可以接受, 所以还需要引入一个量度, 即随机一致性指标RI。表2为随机一致性指标。对于 $n = 1 \sim 8$, RI的值可以通过查表2得到。

表2 随机一致性指标

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

定义一致性比例为 $CR = \frac{CI}{RI}$ 。当 $CR \leq 0.1$ 时,

称判断矩阵具有满意的一致性, 否则就不具有满意的一致性。

由步骤2)、步骤3)构造两两比较的判断矩阵并检验其一致性。表3为准则层各因素相对于目标层的判断矩阵。

表3 准则层各因素相对于目标层的判断矩阵

O	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
C ₁	1	1/4.33	2.44	1/3.50
C ₂	4.33	1	3.75	3.14
C ₃	1/2.44	1/3.75	1	1/2.50
C ₄	3.50	1/3.14	2.50	1

有: $\lambda_{max} = 4.2556$, $CI = 0.0852$, $RI = 0.90$, $CR = 0.09465$ 。

同样可以建立子准则层各因素相对于准则层各因素的判断矩阵。各判断矩阵如表4~表7所示。

表4 子准则层各因素相对于C₁的判断矩阵

C ₁	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄
C ₁₁	1	3.57	3.50	2.90
C ₁₂	1/3.57	1	1/2.44	2.36
C ₁₃	1/3.50	2.44	1	2.57
C ₁₄	1/2.90	1/2.36	1/2.57	1

有: $\lambda_{\max} = 4.2445$, $CI = 0.0815$, $RI = 0.90$, $CR = 0.0906$ 。

表5 子准则层各因素相对于 C_2 的判断矩阵

C_2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}
C_{21}	1	3.57	3.50	2.90
C_{22}	1/3.57	1	1/2.44	2.36
C_{23}	1/3.50	2.44	1	2.57
C_{24}	1/2.90	1/2.36	1/2.57	1

有: $\lambda_{\max} = 4.0599$, $CI = 0.0200$, $RI = 0.90$, $CR = 0.0222$ 。

表6 子准则层各因素相对于 C_3 的判断矩阵

C_3	C_{31}	C_{32}	C_{33}
C_{31}	1	2.56	3.11
C_{32}	1/2.56	1	1/2.22
C_{33}	1/3.11	2.22	1

有: $\lambda_{\max} = 3.1104$, $CI = 0.0552$, $RI = 0.58$, $CR = 0.09517$ 。

表7 子准则层各因素相对于 C_4 的判断矩阵

C_4	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{45}
C_{41}	1	1/2.70	1/2.22	1/3.33	1/3.13
C_{42}	2.70	1	2.14	1.17	1/1.42
C_{43}	2.22	1/2.14	1	1/2.71	1/2.25
C_{44}	3.33	1/1.17	2.71	1	2.33
C_{45}	3.13	1.42	2.25	1/2.33	1

有: $\lambda_{\max} = 5.0351$, $CI = 0.0088$, $RI = 1.12$, $CR = 0.0078$ 。

4) 层次总排序。

层次总排序采用自上而下的方法, 将每一层的权重逐层合成, 从而计算出最底层各方案对于目标层的排序权重。各方案对目标层的总权重可以按下式计算:

$$W_l = \sum \omega_i \omega_{ij} \omega_{ijl}$$

式中, W_l 为第 l 个方案相对于目标层的权重; ω_i 表示准则 C_i 相对于目标层的权重; ω_{ij} 表示子准则 C_{ij} 相对于准则 C_i 的权重; ω_{ijl} 表示第 l 个方案相对于子准则层 C_{ij} 的权重。

由表3可以求得准则层各因素相对于目标层的权重。 C_1 相对于 O 的权重 $\omega_1 = 0.1082$, C_2 相对于 O 的权重 $\omega_2 = 0.4681$, C_3 相对于 O 的权重 $\omega_3 = 0.0453$, C_4 相对于 O 的权重 $\omega_4 = 0.3784$ 。同样由表4~表7, 可以求得各子准则层因素相对于对应准则层的权重。结果如下:

$$\omega_{11} = 0.3284, \quad \omega_{12} = 0.2673, \quad \omega_{13} = 0.2910,$$

$$\begin{aligned} \omega_{14} &= 0.1133; & \omega_{21} &= 0.0991, & \omega_{22} &= 0.3221, \\ \omega_{23} &= 0.3677, & \omega_{24} &= 0.2111; & \omega_{31} &= 0.4429, \\ \omega_{32} &= 0.1730, & \omega_{33} &= 0.3841; & \omega_{41} &= 0.0808, \\ \omega_{42} &= 0.2181, & \omega_{43} &= 0.1793, & \omega_{44} &= 0.2690, \\ \omega_{45} &= 0.2528. \end{aligned}$$

$W_{ij} = \omega_i \omega_{ij}$ 表示子准则 C_{ij} 相对于目标 O 的权重。

$$\begin{aligned} W_{11} &= \omega_1 \omega_{11} = 0.0355, & W_{12} &= \omega_1 \omega_{12} = 0.0289, \\ W_{13} &= \omega_1 \omega_{13} = 0.0315, & W_{14} &= \omega_1 \omega_{14} = 0.0123, \\ W_{21} &= \omega_2 \omega_{21} = 0.0464, & W_{22} &= \omega_2 \omega_{22} = 0.1508, \\ W_{23} &= \omega_2 \omega_{23} = 0.1721, & W_{24} &= \omega_2 \omega_{24} = 0.0988, \\ W_{31} &= \omega_3 \omega_{31} = 0.0201, & W_{32} &= \omega_3 \omega_{32} = 0.0078, \\ W_{33} &= \omega_3 \omega_{33} = 0.0174, & W_{41} &= \omega_4 \omega_{41} = 0.0306, \\ W_{42} &= \omega_4 \omega_{42} = 0.0825, & W_{43} &= \omega_4 \omega_{43} = 0.0678, \\ W_{44} &= \omega_4 \omega_{44} = 0.1018, & W_{45} &= \omega_4 \omega_{45} = 0.0957. \end{aligned}$$

从权重的计算结果可以看出, 在信息安全系统的准则层中, C_2 和 C_4 权重较大, 即技术安全和人员安全所占比重较大, 是起主要作用的因素。因此, 在下面的微分方程模型中只考虑这两个因素。

4 建立微分方程模型

在层次分析法分析结果的基础上, 令 f 表示技术在信息安全系统中所占的比重, g 表示人员在信息安全系统中的比重。

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dt} \text{ 表示 } f \text{ 的增长率, } \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} \text{ 表示 } g \text{ 的增长率。}$$

技术的增长率由两方面构成: 自变化和其他因素对它的影响。当其他因素不对技术产生作用的时候, 其他因素在发展, 比重在上升, 会导致技术所占比重下降; 人员的不断发展会导致技术的不断创新, 技术的比重会上升。人员的增长率也由自身变化和其他因素影响两方面构成: 人类的知识水平和从业经验在不断提高, 会持续发展; 技术不断创新, 其比重上升以后会影响人员的比重。所以本文得到如下的关系:

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dt} = Ag - B, \quad \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = C - Df$$

其中, A 、 B 、 C 、 D 是正数。经过整理, 可以得到微分方程组:

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = (Ab - B)f \\ \frac{dg}{dt} = (C - D)g \end{cases} \quad (1)$$

它的奇点是 $M(0,0)$ 和 $N(\frac{C}{D}, \frac{B}{A})$ 。式(1)的雅克

比矩阵为 $\begin{bmatrix} Ag - B & Af \\ -Dg & C - Df \end{bmatrix}$ 。将 $M(0,0)$ 代入, 得 $\begin{bmatrix} -B & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix}$, 显然 $M(0,0)$ 是鞍点。将 $N\left(\frac{C}{D}, \frac{B}{A}\right)$ 代入, 得 $\begin{bmatrix} 0 & \frac{AC}{D} \\ -\frac{DB}{A} & 0 \end{bmatrix}$, 特征方程为: $\lambda^2 + BC = 0$, 特征

根为: $\lambda_{1,2} = \pm i\sqrt{BC}$, 所以 $N\left(\frac{C}{D}, \frac{B}{A}\right)$ 是中心。运用 Maple, 可以画出大致的相轨线如图3所示。

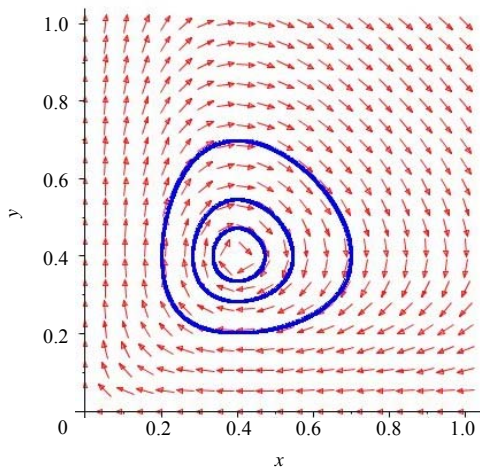


图3 微分方程组相轨线

从图3可以看出, 信息安全系统中技术和人员所占比重是周期变化的, 在某些时间内它们会相互促进, 共同发展; 在某些时间内它们又会相互抑制, 此消彼长。这充分说明了信息安全系统是一个动态平衡的稳定系统, 它内部的因素在随着时间不断变化。图3中最内圈的轨线, 是以上文层次分析法求得的 $f = 0.4681$, $g = 0.3784$ 为初值所画。从这一条轨线可以看出, 不管时间怎么变化, 技术和人员因素都不会消亡, 不会超出一定的范围, 并会始终保持在信息安全系统占有主导地位。

将式(1)两式相除, 得:

$$\frac{df}{dg} = \frac{(Ag - B)f}{(C - Df)g}$$

通过分离变量, 解得:

$$Df - C \ln f = B \ln g - Ag$$

令 $H(f, g) = Df + Ag - C \ln f - B \ln g$, $H(f, g)$ 表示信息安全系统的安全程度, 上述方程可以看做一个三维空间。

考虑方程:

$$H(f, g) = Df + Ag - C \ln f - B \ln g \text{ 的极值点。}$$

$$H'_f(f, g) = D - \frac{C}{f}, \quad H'_g(f, g) = A - \frac{B}{g}$$

由

$$\begin{cases} H'_f(f, g) = 0 \\ H'_g(f, g) = 0 \end{cases}$$

解出 $N\left(\frac{C}{D}, \frac{B}{A}\right)$ 是 $H(f, g)$ 在第一象限的极值点。

又因为:

$$H''_{fg}(f, g) = 0$$

$$H''_{ff}(f, g) = \frac{C}{f^2} > 0, \quad H''_{gg}(f, g) = \frac{B}{g^2} > 0$$

$$\Delta = H''_{fg}(f, g) - H''_{ff}(f, g)H''_{gg}(f, g) = -\frac{BC}{f^2g^2} < 0$$

故 $N\left(\frac{C}{D}, \frac{B}{A}\right)$ 为极小值点。即技术所占比重为

$\frac{C}{D}$ 时, 人员所占比重为 $\frac{B}{A}$ 时, 信息安全系统的安全程度最低。由于 $H(f, g)$ 没有极大值点, 故只要控制技术和人员的比重不为 $\left(\frac{C}{D}, \frac{B}{A}\right)$, 信息安全系统的安全程度就不会取到最小值。

5 结论

本文基于一般系统论, 从一个全新的角度来研究信息安全系统。先利用层次分析法, 分析信息安全系统的影响因素和它们之间相对重要性, 然后运用微分方程组来研究其中一些因素的相互作用。在一定程度上解释了它们的相互作用和变化规律。尝试运用信息论、控制论等方法, 来控制信息安全系统的变化, 让其向着一个良好的方向发展。

参考文献

- [1] 冯·贝塔朗菲. 一般系统论—基础、发展和应用[M]. 林康义, 魏宏森, 译. 北京: 清华大学出版社, 1987.
BERTALANFFY L V. General system theory[M]. translated by LIN Kang-yi, WEI Hong-sen. Beijing: Tsinghua University, 1987.
- [2] 戴汝为, 操龙兵. 一个开放的复杂巨系统[J]. 系统工程学报, 2001, 16(5): 376-381.
DAI Ru-wei, CAO Long-bing. Open complex giant system[J]. Journal of Systems Engineering[J], 2001, 16(5): 376-381.
- [3] 王恩普, 彭海英. 网络信息安全技术概述[J]. 现代计算机, 2003(4): 54-56.
WANG En-pu, PENG Hai-ying. Summary of security technique on network information[J]. Modern Computer, 2003(4): 54-56.
- [4] 杨海鹏, 徐志英. 网络信息安全体系构建的研究[J]. 吉林工程技术师范学院学报, 2011, 27(2): 73-75.

- YANG Hai-peng, XU Zhi-ying. Network the Study of constructing information security system[J]. Journal of Jilin Teachers Institute of Engineering and Technology, 2011, 27(2): 73-75.
- [5] 吕欣. 信息系统安全保障理论与评价指标体系[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(10): 10-12.
- LÜ Xin. Studies on information system assurance theory and evaluation indicator systems[J]. Microelectronics and Computer, 2006, 23(10): 10-12.
- [6] 胡勇, 漆刚, 陈麟, 等. 信息系统风险量化评估指标体系[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2006, 43(5): 1048-1052.
- HU Yong, QI Gang, CHEN Lin, et al. The quantitative assessment indexes of risk evaluation in information system[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2006, 23(10): 10-12.
- [7] 杨海鹰, 余建坤, 谢建, 等. 信息系统安全评价指标体系的评价因素集研究[J]. 全国商情理论研究, 2011(Z4): 32-35.
- YANG Hai-ying, YU Jian-kun, XIE Jian, et al. Research on evaluation factors of security evaluation index in the information system[J]. China Business, 2011(Z4): 32-35.
- [8] 费军, 余丽华. 基于模糊层次分析法的计算机网络安全评价[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(10): 120-123.
- FEI Jun, YU Li-hua. Computer network security assessment with fuzzy analytic hierarchy process[J]. Computer Applications and Softwares, 2011, 28(10): 120-123.
- [9] 朱建军. 层次分析法的若干问题研究及应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- ZHU Jian-jun. Research on some problems of the analytic hierarchy process and its application[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.
- [10] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004(3): 65-70.
- JIN Ju-liang, WEI Yi-ming, DING Jing. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process[J]. Shuili Xuebao, 2004(3): 65-70.

编辑 税红

(上接第671页)

- [6] KOJIMA T, SHIDA Y, FUJINO T. A study of SLM PAPR reduction of OFDM signals without side information[C]// Proceedings of the IEEE ATC2010. Ho Chi Minh City, Vietnam: IEEE, 2010: 168-171.
- [7] ZHU Da-lin, NATARAJAN B. Residue number system arithmetic inspired hopping pilot pattern design for cellular downlink OFDMA[C]// Proceedings of the IEEE WTS2010. Tampa, FL, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [8] ZHU Da-lin, NATARAJAN B. Residue number system arithmetic-inspired hopping-pilot pattern design[J]. IEEE Trans Veh Technol 2010, 59(7): 3679-3683.
- [9] YANG Lie-liang, HANZO L. Performance of a residue number system based parallel communication system using orthogonal signaling: Part I-system outline[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(6): 1528-1540.
- [10] YANG Lie-liang, HANZO L. A residue number system based parallel communication scheme using orthogonal signaling: Part II-multipath fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(6): 1547-1559.
- [11] WANG Yu-ke. New Chinese remainder theorems[C]// Proceedings of the 1998 IEEE Conference on Signals, Systems & Computers. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, 1998: 165-171.
- [12] SLOANE N, WYNER A. Claude E Shannon: Collected papers[M]. USA: Wiley-IEEE Press, 1993: 5-83.
- [13] MA Shang, HU Jian-hao, ZHANG Lin, et al. An efficient 2ⁿ RNS scaler and its VLSI implementation[C]// Proceedings of the IEEE ICCAS2008. Xiamen: IEEE, 2008: 1370-1373.
- [14] YE Yan-long, HU Jian-hao, MA Shang, et al. A new efficient RNS-to-binary conversion for the three-moduli sets[C]// Proceedings of the IEEE ICCAS2009. Milpitas, CA, USA: IEEE, 2009: 1000-1005.

编辑 张俊