

# 火电厂综合安全评价模型的构建与应用

李冲 杨宗霄 宋磊

LI Chong, YANG Zong-xiao, SONG Lei

河南科技大学 系统科学与工程研究所 河南 洛阳 471003

Institute of Systems Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China

E-mail: lc396194936@126.com

LI Chong, YANG Zong-xiao, SONG Lei. Construction and application of synthetic safety assessment model for power plants. *Computer Engineering and Applications* 2010, 46(2): 230-233.

**Abstract:** A synthetic safety assessment model for power plant is constructed by combining Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP), Set Pair Analysis (SPA) and system functionality, in which the key factors influencing the power plants safety are considered and interaction among the factors influencing the power plants safety is analyzed quantitatively. A preponderant function of system safety is constructed by using of the result to solve the problem that the system safety function preponderates over the weight sum of safety functions of sub-systems. The instances show that the model can integrate immanence relation and non-linearity influence of factors in power plant, which make safety assessment more reasonably and it can also offer scientific foundation for decision-making in safety management.

**Key words:** safety assessment of power plants; Set Pair Analysis (SPA); system functionality; Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP); synthetic safety assessment model

**摘要:** 将模糊层次分析法、集对分析和系统功能论集于一体, 构建了一个适用于火电企业的综合安全评价模型, 不但考虑了影响火电厂安全的关键因素, 而且可对火电厂安全因素之间的相互作用的协调性做量化分析, 并将其结果构造系统优势函数, 以解决系统安全功能大于各子系统安全功能之和的问题。实例表明该综合安全评价模型能够整合火电厂中各安全因素内在联系和非线性影响, 使安全评价趋于合理, 为企业安全生产管理提供科学的依据。

**关键词:** 火电厂安全性评价; 集对分析; 系统功能论; 模糊层次分析法; 综合安全评价模型

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.02.068 **文章编号:** 1002-8331(2010)02-0230-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TM621, TP301.6

火电厂发生危险事件的频率较高且后果较严重。依据火电厂安全生产评价体系, 通过综合分析设备系统、作业环境、生产管理等方面的各种危险因素, 可使安全生产的各种因素由不可控变为可控状态, 具有重要的现实意义。

系统分析法把整个生产系统作为一个统一的有机整体, 并将其抽象化而用数学模型来描述, 具有整体性、综合性和最优化的特点<sup>[1]</sup>。系统功能论认为系统内子系统间非线性相互作用, 能够产生整体协同效应, 使系统不断向有结构、有组织、多功能(有序)方向发展<sup>[2]</sup>, 即系统具有涌现性。系统分析法可以和时间变换函数结合对头颅波形分析<sup>[3]</sup>; 可以用于对神经网络系统数据处理错误检测的研究<sup>[4]</sup>; 可以和数据包络分析相结合对高速公路和经济适应性进行评价<sup>[5]</sup>; 可以对R形卡子成形方案进行分析<sup>[6]</sup>; 可以和差额法相结合对育种目标进行评估<sup>[7]</sup>, 都取得了显著的成果。然而系统涌现性的评价模型还尚未得到很好的解决。

袁小勃通过构造系统安全优势函数<sup>[8]</sup>作为系统涌现性的数

学模型, 进而从系统整体的角度对火电厂进行综合性安全评价。但是它的多阶功能层是经过用Delphi法构造因素横向组合的关系判断矩阵, 然后利用层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, AHP) 来量化的。由于因素组合数目较多, 专家构造的判断矩阵非常庞大, 这就存在数据来源非常困难, 而且主观性较强的问题。

层次分析法在火电厂工程<sup>[9]</sup>和其他领域的应用较为广泛<sup>[9]</sup>。AHP可和熵权<sup>[10]</sup>、神经网络<sup>[11]</sup>等相结合, 特别是和模糊数学产生了模糊层次分析法<sup>[12]</sup> (Fuzzy Analytical Hierarchy Process, FAHP)。FAHP在逐渐代替AHP应用于机械评估<sup>[13]</sup>、风险评估<sup>[14]</sup>等诸多领域。它可以很好的解决评价的标准本身具有的模糊性问题。

集对分析 (Set Pair Analysis, SPA) 在经济分析<sup>[15]</sup>、预测<sup>[16]</sup>、工程技术领域<sup>[17]</sup>等领域中的应用取得了开创性的成果。SPA用于深入展开有关系统的联系、预测、控制、仿真、演化、突变等问题的研究。它来量化多阶功能层可以很好避免Delphi法产生

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.70671035)。

作者简介: 李冲(1983-), 男, 硕士研究生, 从事系统分析与集成方法研究; 杨宗霄(1957-), 男, 博士, 教授, 从事过程工业系统安全技术方法和信息技术方法的研究。

收稿日期: 2008-08-26 修回日期: 2008-10-31

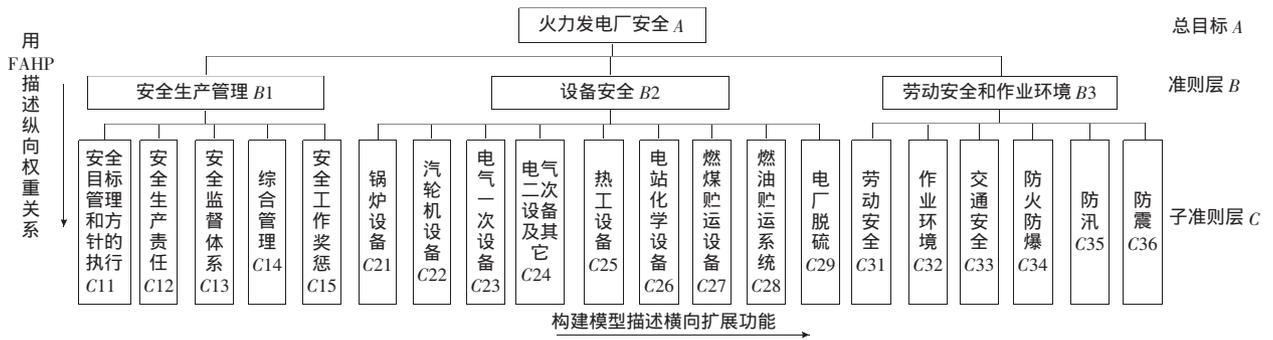


图1 火电厂安全评价递阶层次结构图

的主观性强 构建判断矩阵异常繁琐的问题。

据此,提出 FAHP、SPA 和系统功能论相结合,利用 FAHP 对系统线性层量化,火电厂安评专家打分记录结合 SPA 对系统的非线性功能层进行量化,进而构造系统安全优势函数,探索出了全新的火电厂安全评价模型。

### 1 火电厂安全评价系统的理论基础

#### 1.1 模糊层次分析法

任意两个三角模糊数<sup>[18]</sup>为  $p_1=(l_1, m_1, u_1)$  和  $p_2=(l_2, m_2, u_2)$ , 根据扩展原理,相应的模糊数学运算规则如下:

$$p_1 \oplus p_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (1)$$

$$\lambda \otimes p_1 = (\lambda l_1, \lambda m_1, \lambda u_1) \quad (2)$$

定义 1 设矩阵  $P=(p_{ij})_{n \times n}$ , 其中  $p_{ij}=(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ ,  $p_{ji}=(l_{ji}, m_{ji}, u_{ji})$ , 若满足

$$(1) l_{ii}=0.5, m_{ii}=0.5, u_{ii}=0.5, \forall i$$

$$(2) l_{ij}+u_{ji}=1, m_{ij}+m_{ji}=1, u_{ij}+l_{ji}=1, i \neq j, \forall i, j$$

则称  $P$  是三角模糊数互补判断矩阵。矩阵中的元素  $p_{ij}$  表示方案  $x_i$  优于方案  $x_j$  的程度。

#### 1.2 集对分析

集对分析的定义:  $A, B$  两个集合, 并设这两个集合组成集对  $H=(A, B)$ , 在某个具体背景(设为  $W$ )下, 对集对  $H$  的特性展开, 共得  $N$  个特性, 其中: 有  $S$  个为集对  $H$  中的集合  $A, B$  所共同具有; 在  $P$  个特性上集合  $A$  与  $B$  对立; 在其余  $F=N-S-P$  个特性上既不相互对立, 又不为这两个集合共同所有, 则称比值:  $S/N$  为这两个集合对问题  $W$  下的同一度, 简称同一度<sup>[17]</sup>;  $F/N$  为这两个集合对问题  $W$  下的差异度, 简称差异度<sup>[17]</sup>;  $P/N$  为这两个集合对问题  $W$  下的对立度, 简称对立度<sup>[17]</sup>。并用式  $\mu(W)=S/N+F/Ni+P/Nj$  统一表示, 这个式子称为联系度<sup>[17]</sup>, 简称为  $\mu=a+bi+cj$ 。当联系度  $a+bi+cj$  中的  $c \neq 0$  时, 同一度  $a$  与对立度  $c$  的比值  $a/c$  称为所论集对在指定问题背景下的联系势或集对势, 记为  $shi(H)=a/c$ 。并可以对集对势的强弱等级进行划分, 同时规定  $i'$  为集对势的稳定系数, 也可视为可信度, 即  $i'=a+c$ 。联系度的加法  $\mu_1+\mu_2=(a_1+a_2)+(b_1+b_2)i+(c_1+c_2)j$ 。

#### 1.3 系统功能论

系统是由相互作用和相互依赖的若干要素结合而成的具有特定功能的有机整体。系统功能是多种能量的特有融合与属性涵盖, 主要表现为系统功能随规模而增长, 随结构而优化。系统整体不等于部分之和, 构造的系统安全优势函数见式(3)其中  $\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i$  为线性部分。余下的依次叫做二次项部分, 三次项部分直至  $n$  次项部分, 统称作非线性部分。非线性对应着元素间

的合作功能。合作的效果不仅与各自发挥大小有关, 而且与配合的适度性有关。

$$F(x) = f_1 + f_2 + \dots + f_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i>j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \dots + \gamma \prod_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

系统安全优势函数可以清晰地描述系统的线性性与非线性性问题, 也就是系统组织结构功能与合作功能问题, 在将系统功能论用于安全评价的过程中, 有助于使火电厂整个安全系统更具有层次性和涌现性。涌现性是系统在同层次上的进化(即从无组织结构到有组织结构的进化), 体现了系统的功能结构。

### 2 火电厂综合安全评价模型的构建

#### 2.1 火电厂安全评价系统的层次分析

依据文献[19]建立的层次模型如图 1 所示, 该层次结构由总目标  $A$ 、准则层  $B$  和子准则层  $C$  组成。这些安全因素存在各种各样的错综复杂的关系, 主要包括两个方面: (1) 纵向的层次关系, 不同的层次存在隶属关系, 并且下一层次指标针对上层指标具有一定的权重。(2) 同一层次指标间的横向关系, 它们相互影响, 相互牵连, 在系统内横向地扩展为多阶功能层。例如: 安全监督体系质量的提高会带动劳动安全评分的提高, 作业环境的评分可以影响设备的评分, 电气一次设备状况会影响其他设备的使用等等。这种横向的相互影响关系大小用联系度表示。前者形成了系统的结构, 属于 FAHP 的研究对象, 对于后者提出了量化模型, 而同层次因素间的涌现性, 是系统功能论的研究范围, 模型结构见图 2。

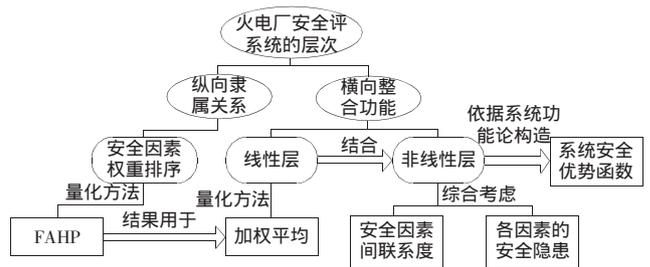


图2 综合安全评价模型构建

#### 2.2 火电厂安评指标纵向权重计算模型

该模型的构建可以分为 4 个步骤。

第一步要建立由评价指标组成的递阶层次结构, 层次结构大体分为三类, 即目标层、准则层和方案层, 见图 1。

第二步 构造三角模糊互补判断矩阵并计算可能度矩阵。

由于决策者判断的不准确性, 构造三角模糊数<sup>[18]</sup>矩阵来表示专家的判断。隶属于同一个指标因素的各个指标依次排列成

一行和一列,然后向专家反复询问,依据针对父指标的重要性两两进行比较,按照用0.1~0.9标度法<sup>[12]</sup>可构造判断矩阵的上三角,下三角依据三角模糊互补判断矩阵的定义得出。假设有 $q$ 个专家参与决策。记第 $k$ 个专家给出的判断矩阵为 $\tilde{p}^{(k)}=(\tilde{p}_{ij}^{(k)})_{n \times n}$ 其中 $\tilde{p}_{ij}^{(k)}=(l_{ij}^{(k)}, m_{ij}^{(k)}, \mu_{ij}^{(k)})$ 。判断矩阵的元素 $\tilde{p}_{ij}^{(k)}$ 为三角模糊数, $l_{ij}^{(k)}, m_{ij}^{(k)}, \mu_{ij}^{(k)}$  ( $u_{ij}^{(k)} \geq m_{ij}^{(k)} \geq l_{ij}^{(k)}$ )分别表示风险因素 $i$ 和风险因素 $j$ 相对于上一层指标的相对重要程度判断值的下界、最可能值、上界。并且 $\tilde{p}_{ij}^{(k)}$ 和 $\tilde{p}_{ji}^{(k)}$ 满足 $l_{ij}+u_{ji}=m_{ij}+m_{ji}=u_{ij}+l_{ji}=1$ 。设各个专家权重相同,则集结各个专家意见的计算式<sup>[18]</sup>为:

$$\tilde{p}_{ij}=(1/k) \otimes (\tilde{p}_{ij}^{(1)} \oplus \tilde{p}_{ij}^{(2)} \oplus \dots \oplus \tilde{p}_{ij}^{(k)})=$$

$$((\sum_{k=1}^q l_{ij}^{(k)})/k, (\sum_{k=1}^q m_{ij}^{(k)})/k, (\sum_{k=1}^q u_{ij}^{(k)})/k)_{n \times n}, i, j \in N \quad (4)$$

利用式(5)<sup>[18]</sup>,得到用三角模糊数表示的各因素模糊相对权重向量 $q$ 。

$$q_i=(\frac{\sum_{j=1}^n l_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n m_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}}) \quad i, j \in N \quad (5)$$

设 $q_i=(l_i, m_i, \mu_i)$ ,  $q_j=(l_j, m_j, \mu_j)$ 是任意两个因素的相对权重向量,按下式<sup>[20]</sup>计算 $n \times n$ 阶的可能度矩阵元素。

$$P_{ij}=\lambda \max\{1-\max\{\frac{m_j-l_i}{m_i-l_i+m_j-l_j}, 0\}, 0\}+$$

$$(1-\lambda) \max\{1-\max\{\frac{u_i-m_i}{u_i-m_i+u_j-m_j}, 0\}, 0\} \quad i, j \in N \quad (6)$$

$P_{ij}$ 表示 $q_i \geq q_j$ 的可能度,所在的矩阵仍为三角模糊数互补矩阵。 $\lambda$ 值的选择取决于决策者的风险态度<sup>[21]</sup>。这样对三角模糊数进行排序就转换为求解可能度矩阵的排序向量。

第三步,单层次权重向量排序。求解可能度矩阵的排序向量可以利用式(7)<sup>[21]</sup>即可得到排序向量 $w$ 。

$$w_i=\frac{\sum_{j=1}^n p_{ij}+\frac{n-1}{2}}{n(n-1)} \quad i \in N \quad (7)$$

第四步,层次总排序。该次安全性评价模型是树状结构,各因素关于总目标的权重可用递归式如下:

$$wz_i=\begin{cases} 1, & i \in \text{Root Node} \\ w_i \times wz_{F(i)}, & i \notin \text{Root Node} \end{cases} \quad (8)$$

$wz_i$ 表示风险因素 $i$ 的相对于总目标的权重值, $wz_{F(i)}$ 表示节点 $i$ 的父节点相对于总目标的权重值, $w_i$ 表示单层次权重向量值。显然,同一层次指标的关于总目标权重之和为1。

### 2.3 火电厂安评指标横向联系度计算模型

假设安全检查 $m$ 次,一共有 $n$ 个因素,构造矩阵 $A_j=(d_{ij})_{m \times n}$ ,元素 $d_{ij}$ 表示第 $i$ 次安全检查中,因素 $j$ 的评分值。因素之间的联系度可用下面方法计算:

(1)确定因素间的相关程度

$d_i$ 为因素 $i$ 评分组成的列向量。则两两因素间的相关程度可以表示为:

$$r_{ij}=\left| \frac{\text{cov}(d_i, d_j)}{\sqrt{DX} \sqrt{DY}} \right| \quad i, j \in N \quad (9)$$

$r_{ij}$ 是因素 $i$ 和因素 $j$ 的关系系数。

(2)计算两两因素的同一度、差异度、对立度,得到因素间的联系度。

如果两个因素得分变化相同的次数越多,这两个因素同一度就越高,相应部门配合性就越高。同一度的计算式如下:

$$h_{ijk}=(d_{(k+1)i} * \zeta_{ki(k+1)} - d_{ki}) * (d_{(k+1)j} * \zeta_{kj(k+1)} - d_{kj}) \quad i, j, k \in N \quad (10)$$

$$a_{ij}=\frac{\text{countif}(h_{ijk} > 0)}{m-1} \times r_{ij} \quad i, j \in N \quad (11)$$

$a_{ij}$ 是因素 $i$ 和因素 $j$ 的同一度。其中函数countif表示满足条件的数目, $\zeta_{ki(k+1)}$ 表示与因素 $i$ 同一个父因素的所有因素第 $k$ 次检查总得分与第 $k+1$ 次总得分的百分比。

差异度是一个表示不确定的量,用 $b_{ij}$ 表示,计算式如下:

$$b_{ij}=1-r_{ij} \quad i, j \in N \quad (12)$$

如果两个评价因素得分变化相反的次数越多,这两个因素的对立度就越高,相应部门配合性就越差。对立度的计算式如下:

$$c_{ij}=\frac{\text{countif}(h_{ijk} < 0)}{m-1} \times r_{ij} \quad i, j \in N \quad (13)$$

因素 $i, j$ 之间的联系度可以用 $\mu_{ij}$ 描述见式(14)。显然 $a_{ij}+b_{ij}+c_{ij}=1$ 。

$$\mu_{ij}=a_{ij}+b_{ij}+c_{ij} \quad (14)$$

同异反联系度 $\mu_{ij}$ 构成的矩阵满足如下性质:

对称性:任意的 $\mu_{ij}$ ,有 $\mu_{ji}=\mu_{ij}$ 。表示因素 $i$ 和因素 $j$ 的联系度与因素 $j$ 和因素 $i$ 的联系度相同。

对角线上的值为常量,即 $\mu_{ii}=1$ 。表示同一个因素的同一度为1,差异度和对立度为0。

### 2.4 火电厂安全优势函数的构建

依据系统功能论进行火电厂安全评价包括线性部分和非线性部分,即整体安全不仅与各安全因素状态有关,而且与他们之间联系度有关。火电厂安全优势函数的线性部分可用FAHP的结果结合加权平均法量化。因素的评分波动大小代表安全隐患高低,将其结合因素的同一度、对立度、置信度,归一化可得多阶功能层的模型,见式(15)~(16)。 $(a_{ij}-c_{ij})$ 越大表示两因素合作功能越高, $(a_{ij}+c_{ij})$ 表示这个量的可信程度, $\sum_{j=1}^n (a_{ij}-c_{ij})(a_{ij}+c_{ij})$

为各因素与整体的关系量化模型,其值越大表明结构越合理, $\text{var}(d_i)$ 是 $i$ 因素得分记录的方差,其值越高安全隐患越高, $s_i$ 值是相应组合项的功能系数,代表了横向功能扩展强度。

$$s_i=\frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij}-c_{ij})(a_{ij}+c_{ij})-\text{var}(d_i)}{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n (a_{ij}-c_{ij})(a_{ij}+c_{ij})-\text{var}(d_i))} \quad \lambda \in 2n \quad n \quad i, j \in N \quad (15)$$

$$F(x)=f_1+f_2+\dots+f_n=\sum_{i=1}^n wz_i x_i + \sum_{i>j} s_i s_j x_i x_j + \dots + \prod_{i=1}^n s_i \prod_{i=1}^n x_i \quad (16)$$

### 3 实例分析

某火电厂为了安全生产,并把安全评价作为日常活动,下面根据图1所示的风险分析模型,应用上述方法进行分析。

根据FAHP的原理和式(5)按火电厂安全评价标准<sup>[19]</sup>推算得到关于目标总权重,结果见表1。从表中可以得出在B层中,权重排序 $B1>B2>B3$ 。在C层次中 $C14, C15, C12$ 权重较高,表明从严管理,严格奖惩机制,加强安全监督检查,是搞好安全生产和防范事故发生的有效途径,对总目标“火力发电厂安全”非常重要。

此热电厂真实的几次初评、复查的得分率以及利用式(9)~

表 1 B、C 层指标的单层次权重和关于总目标的权重计算结果

C	B1=0.389 9	B2=0.326 8	B3=0.283 3	目标权重	排序
C11	0.182 6	-	-	0.071 2	4
C12	0.196 6	-	-	0.076 7	3
C13	0.182 6	-	-	0.071 2	5
C14	0.219 1	-	-	0.085 4	1
C15	0.219 1	-	-	0.085 4	2
C21	-	0.183 4	-	0.059 9	6
C22	-	0.136 8	-	0.044 7	13
C23	-	0.067 9	-	0.022 2	19
C24	-	0.087 3	-	0.028 5	18
C25	-	0.116 9	-	0.038 2	15
C26	-	0.112 1	-	0.036 6	16
C27	-	0.090 5	-	0.029 6	17
C28	-	0.065 1	-	0.021 3	20
C29	-	0.140 1	-	0.045 8	10
C31	-	-	0.168 0	0.047 6	8
C32	-	-	0.166 1	0.047 1	9
C33	-	-	0.193 8	0.054 9	7
C34	-	-	0.149 1	0.042 2	14
C35	-	-	0.161 5	0.045 8	11
C36	-	-	0.161 5	0.045 8	12

表 3 C 层指标的历史得分及横向功能扩展强度

	历史得分率(%)					s	排序
	初评 1	复查 1	复查 2	初评 2	初评 3		
C11	57.78	83.33	88.89	96.67	70.00	0.055 3	11
C12	51.00	86.71	94.14	79.14	65.71	0.024 5	15
C13	67.50	88.00	91.00	93.00	78.00	0.071 5	7
C14	58.33	86.67	83.33	84.71	90.59	0.021 9	17
C15	58.00	91.00	85.00	85.00	75.00	0.085 2	3
C21	60.33	88.33	91.08	77.42	68.00	0.047 2	12
C22	57.08	89.91	92.30	73.53	71.68	0.024 0	16
C23	67.23	91.58	92.87	70.68	69.13	0.062 0	9
C24	66.22	92.13	95.43	91.74	82.99	0.066 0	8
C25	64.53	89.16	95.42	99.91	78.53	0.044 0	13
C26	63.21	89.78	90.95	83.22	77.34	0.055 8	10
C27	61.76	90.98	93.53	49.06	64.53	0.072 4	5
C28	64.33	86.00	96.00	71.67	71.67	-0.009 5	19
C29	-	-	-	-	-	-	-
C31	35.16	88.39	91.13	74.68	65.97	0.072 3	6
C32	68.33	91.11	94.44	51.67	75.00	0.087 5	2
C33	73.64	89.09	100.00	81.82	70.91	0.027 3	14
C34	23.33	80.00	96.67	62.00	57.33	0.020 0	18
C35	92.00	100.00	100.00	84.00	84.00	0.096 9	1
C36	100.00	100.00	100.00	80.00	80.00	0.075 8	4

(15)计算的结果 s 见表 2,表 3(C29 是最新添加的指标,尚未有评分记录)。在 B 层中 B1、B2、B3 的方差分别为 0.021 7、0.019 9、0.033 9 B3 安全隐患较高,横向扩展功能最小。而 B2 的 s 值较大,表明从横向上看设备安全横向扩展功能强,显得比较关键。在 C 层中 C35、C32、C15 排在前三位。从数据分析表明“防汛”工作做的非常到位,不存在安全隐患。“作业环境”和“安全奖惩”横向扩展功能强,应受到重视。“燃油贮运”和“防火、防爆”的 s 值最小,安全隐患较高。“电气一次设备”是接用于生产、输送和分配电能的生产过程的高压电气设备,“电气二次设备”是指对一次设备的工作进行监测、控制、调节、保护以及为运行、维护人员提供运行工况或生产指挥信号所需的低压电气设备。其他设备正常工作对这两类设备依赖性强,而它们的 s 值在“设备安全”中排在前二位,这正好符合事实。

表 2 B 层指标的历史得分及横向功能扩展强度

A	历史得分率(%)					s	排序
	初评 1	复查 1	复查 2	初评 2	初评 3		
B1	55.39	87.04	91.83	70.72	83.74	0.444 9	2
B2	62.86	89.96	93.22	64.37	80.77	0.472 3	1
B3	47.67	88.79	93.97	68.10	70.77	0.082 7	3

依据准则层 B 火电厂的安全优势函数可以表示为：

$$F(x) = f_1 + f_2 + \dots + f_n = \sum_{i=1}^n w_i x_i + \sum_{i>j=1}^n s_{ij} x_i x_j + \dots + \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n x_i x_j = \\
 0.389 9x_1 + 0.326 8x_2 + 0.283 3x_3 + 0.082 7 \times 0.444 9x_3x_1 + \\
 0.082 7 \times 0.472 3x_3x_2 + 0.472 3 \times 0.444 9x_3x_1 + \\
 0.444 9 \times 0.472 3 \times 0.082 7x_3x_2x_1 = \\
 0.389 9x_1 + 0.326 8x_2 + 0.283 3x_3 + 0.036 8x_3x_1 + \\
 0.039 1x_3x_2 + 0.210 1x_3x_1 + 0.017 4x_3x_2x_1 \quad (17)$$

式(17)就是基于 FAHP、SPA 和系统功能论的火电厂安全评价数学模型。在实际应用中,对式(17)中的 x 进行赋值和计算,再与最佳安全状态(即专家设定安全值)进行比较即可确定火电厂的安全水平。这里仅给出了准则层 B 的安全评价模型,对于子准则层(方案层)C 也可按相同的方法进行分析处理。

#### 4 结语

依据华北电力集团公司发布安全评价指标体系,提出在模糊层次分析法得到基于纵向关系的火电厂安全指标权重之后,利用新的模型将指标联系度量化的方法,将其结果结合系统功能论从系统整体的角度评价企业的安全状况,显然该方法解决了系统安全功能不等于各子系统安全功能之和的问题,通过前面的分析表明:(1)该评价模型应用于火电厂安全评价是可行的;(2)用 SPA 代替 AHP 构建多阶功能层,避免了数据来源困难的问题;(3)该评价模型可操作性强,易于使用计算机等先进工具实现,有利于实现安全评价科学化;(4)s 较低的因素应加强整改力度,可为管理人员和安评整改提供较大的参考价值。该方法适用于对于一个火电厂多次评测的情况,评测次数越多系统安全优势函数越准确。

#### 参考文献：

- [1] Dent J B, Blackie M K. System simulation in agriculture[M]. London: Applied Science Publication Ltd, 1979: 125.
- [2] 范文涛, 丁义明, 龚小庆. 建立系统科学基础理论框架的一种可能途径与若干具体思路(之四)[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(8): 16-28.
- [3] Zou R, Park E H, Kelly E M. Intracranial pressure waves: Characterizations of a pulsation absorber with notch filter properties using systems analysis Laboratory investigation[J]. Journal of Neurosurgery, 2008, 2(1): 83-94.
- [4] Józef K, Marcin M. Confidence estimation of GMDH neural networks and its application in fault detection systems[J]. International Journal of Systems Science, 2008, 39(8): 783-800.
- [5] 刘奕, 贾元华. 基于 DEA 模型的区域高速公路社会经济适应性评价方法研究[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(3): 1-5.
- [6] 李强, 秦波. 基于系统分析设计方法的 R 形卡子成形方案设计[J]. 锻压技术, 2007, 32(2): 47-49.

表1 修正后模态频率

	$f_1/\text{Hz}$	$f_2/\text{Hz}$	$f_3/\text{Hz}$	$f_4/\text{Hz}$	$f_5/\text{Hz}$	$f_6/\text{Hz}$	$\sqrt{\sum \Delta f_i^2/n}$
实际测量值	26.03	36.35	82.43	105.54	119.02	128.89	-
修正前计算值	28.64	40.48	86.26	108.34	124.67	136.54	4.775 3
PSO 修正值	27.68	37.57	84.55	107.52	122.01	133.62	2.706 1
CPSO 修正值	26.59	36.42	82.75	106.43	120.82	130.75	1.148 4
QPSO 修正值	26.54	36.40	82.78	106.41	120.78	130.43	1.049 7
CQPSO 修正值	26.08	36.36	82.50	105.62	120.04	129.27	0.447 0

粒子群算法、混沌粒子群算法、量子粒子群算法及改进量子粒子群算法模型修正过程适应度函数收敛曲线如图5:

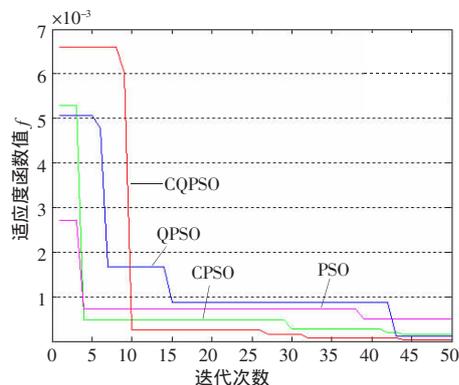


图5 适应度函数收敛曲线

由表1和图5可知,四种算法都能对平板模型进行有效修正,利用前四阶频率修正后的前六阶频率都能向实测值靠近。由于算法的随机性,初始种群的优劣是无法控制的,在相同的

(上接 208 页)

- [2] 高洪深. 决策支持系统理论、方法、案例[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] 罗家奇, 李斌. 基于 Agent 会话的自适应 Web 服务交互[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(10).
- [4] Chen S M, Ke J S, Chang Jin-fu. Knowledge representation using fuzzy Petri nets[J]. IEEE Transaction on Knowledge and Data Engi-

(上接 233 页)

- [7] 唐辉, 李同树, 吴常信. 应用系统分析法评估优质肉鸡配套系的育种目标[J]. 浙江大学学报, 2006, 32(4): 438-443.
- [8] 袁小勃, 杨宗霄, 刘刚. 系统分析法在火电厂安全评价中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 44-48.
- [9] Kwang E Y, Youn C C. Analytic hierarchy process approach for identifying relative importance of factors to improve passenger security checks at airports[J]. Journal of Air Transport Management, 2006, 12: 135-142.
- [10] 冯义, 李洪东. 基于熵权和层次分析法的电力客户风险评估及其规避[J]. 继电器, 2007, 35(24): 66-70.
- [11] 李晓峰. 基于 AHP 的人工神经网络模型的建立[J]. 四川大学学报, 2003, 35(1): 101-103.
- [12] 黄卫来, 黄松. 一种改进的三角模糊数互补判断矩阵的排序方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(7): 1090-1093.
- [13] 薄瑞峰, 李瑞琴. 基于模糊效用值排序的模糊层次分析法在机械运动方案优选中的应用[J]. 中国机械工程, 2007, 18(18): 2174-2178.
- [14] 彭钊, 强茂山. 模糊层次分析法在 Duber Khwar 项目风险评价和投

迭代次数内, 标准粒子群算法在初始种群较优的条件下只能搜索到较差精度, 混沌粒子群算法和量子粒子群算法的初始种群优劣程度相当, 最终搜索精度也接近, 综合两者优点的混沌量子粒子群算法在初始种群最差的情况下搜索到了最高的精度, 修正后前四阶频率接近实测值, 第五阶和第六阶频率精度也有了提高, 证实了修正结果的有效性。

四种算法运行过程中发现, 粒子群规模越大, 在相同的迭代次数内运行时间越长, 修正精度越高, 这是因为大种群分布范围广, 有更高的几率寻找最优解。另外, 如果不陷入局部最优, 小种群也能在增加迭代次数的条件下找到指定精度的最优解。

## 6 结论

混沌量子粒子群算法将混沌搜索机制引入到量子粒子群算法, 充分利用了混沌的遍历特性和量子粒子群计算简便等优点, 具有较高的搜索效率。用该算法修正后平板前六阶频率都能向实测值逼近, 证实了修正的有效性。作为一种随机搜索算法, 混沌量子粒子群算法仍存在复现性差等缺点, 算法本身仍需在以后的研究过程加以改进。

## 参考文献:

- [1] 张建科, 刘三阳, 张晓清. 改进的粒子群算法[J]. 计算机工程与设计, 2007(9).
- [2] 苗荣, 闰伟, 李树荣. 基于粒子群位移转移的混合遗传算法及其应用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(15): 37-40.
- [3] 侯力, 王振雷, 钱锋. 基于混沌序列的自适应粒子群优化算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(18).
- [4] 孔庆琴, 孙俊, 须文波. 基于 QPSO 的改进算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(28): 58-60.
- [5] Looney C G. Petri fuzzy nets for rule-based decision-making[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics-part A, 1998, 18(1): 178-183.
- [6] 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [7] 门鹏, 段振华. 基于代数的模糊 Petri 网逆向推理算法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1).
- [8] 标决策中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2003, 23(3): 44-50.
- [15] 王洪光, 吴业明. 工业企业经济和环境综合效益的集对分析[J]. 数学的实践与认识, 2006, 36(1): 70-74.
- [16] 郑丕谔, 岳成艳. 基于集对论的信用风险分析[J]. 天津大学学报, 2004, 37(1): 84-88.
- [17] 金华征, 程浩忠. 模糊集对分析法应用于计及 ATC 的多目标电网规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 45-48.
- [18] 姜艳萍, 樊治平. 一种三角模糊数互补判断矩阵的排序方法[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(7): 34-36.
- [19] 刘检. 火力发电厂安全性评价[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [20] 徐泽水. 对方案有偏好的三角模糊数多属性决策方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(8): 9-11.
- [21] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001(16): 311-314.
- [22] Erensal Y C, Albayrak E. Evaluating the technological competencies and determining key capabilities in technology management using fuzzy analytical hierarchy process[C]//Portland International Conference on Management of Engineering and Technology, Portland State University, 2005, 5: 174-184.