

# 先进核反应堆专家评估系统架构的设计和实现

高 斌<sup>1</sup>,任俊生<sup>2</sup>,周志伟<sup>1</sup>,杨孟嘉<sup>2</sup>,顾军扬<sup>3</sup>

(1. 清华大学 核能与新能源技术研究院,北京 100084;

2. 中国广东核电集团有限公司 技术中心,广东 深圳 518124;

3. 中国广东核电集团有限公司 苏州热工研究院,江苏 苏州 215004)

**摘要:**先进核反应堆专家评估系统是核电反应堆评估软件系统开发的初次尝试。本系统在 Visual Studio .NET 开发平台上,使用 C++ 编程语言,在 Model-View-Control(MVC)体系架构的基础上实现了系统的具体功能。在国内先进反应堆的评估运用实践中表明,该系统的设计是可行有效的。

**关键词:**先进核反应堆;专家评估系统;系统架构;模型-视图-控制

中图分类号:TL413.1 文献标识码:A 文章编号:1000-6931(2007)03-0301-08

## Structure Design and Realization of Advanced Nuclear Reactor Expert Evaluation System

GAO Bin<sup>1</sup>, REN Jun-sheng<sup>2</sup>, ZHOU Zhi-wei<sup>1</sup>, YANG Meng-jia<sup>2</sup>, GU Jun-yang<sup>3</sup>

(1. *Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Technology Center, China Guangdong Nuclear Power Holding Co., Ltd., Shenzhen 518124, China;*

3. *Suzhou Nuclear Power Research Institute, China Guangdong Nuclear Power Holding Co., Ltd., Suzhou 215004, China)*

**Abstract:** Advanced nuclear reactor expert evaluation system is the initial practice of software on nuclear power plants evaluation system. The system was developed in C++ code under the Visual Studio Net environment, and it used Model-View-Control (MVC) pattern as its basic frame. The system was used to access the advanced nuclear reactor in China. Available results illustrate that the frame of the system is feasible and effective.

**Key words:** advanced nuclear reactor; expert evaluation system; system frame; Model-View-Control

我国现已建成和在建核电机组共 11 个,装机容量约 9 000 MW,并计划到 2020 年使核电装机容量达到 40 000 MW。因此,客观、全面地评价目前的核电技术,根据中国国情科学地决策新型核电反应堆的选择,是中国核电行业

面临的一项挑战。

本文采用苏州热工研究院研究确定的先进核电机组评价指标体系<sup>[1]</sup>,从数据库设计、系统方案初步设计及详细设计等方面对先进核反应堆专家评估系统的实现进行详细研究。

### 1 评估系统需求

核电厂先进反应堆专家评估系统的设计要求如下:1) 界面简洁,操作简单,运行稳定;2) 系统内部实现数据共享,但具体的访问操作有权限控制;3) 系统功能完善,能够满足系统评估要求,功能包括专家信息管理、评估指标信息管理、敏感性分析、专家评估信息管理。

本文所描述的先进核反应堆专家评估系统由如下 6 个模块组成:专家信息维护模块,指标信息维护模块,专家评估模块,查看评估信息报表模块,敏感性分析模块和系统信息维护模块。图 1 为评估系统功能组织结构图。

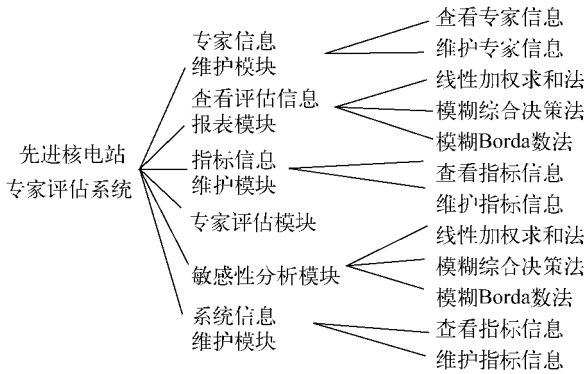


图 1 先进反应堆专家评估系统功能组织结构图  
Fig.1 Schematic structure of advanced nuclear reactor expert evaluation system

### 2 评估系统架构

先进反应堆评估系统的总体架构采用模型-视图-控制<sup>[2]</sup>(Model-View-Control)体系结构(图 2)。

MVC 包括 3 类对象:1) 模型对象,是应用程序的主体部分;2) 视图对象,是应用程序中负责生成用户界面的部分;3) 控制器对象,是根据用户的输入控制用户界面数据显示及更新模型对象状态的部分。MVC 模式不仅实现了功能模块和显示模块的分离,同时还提高了应用系统的可维护性、可扩展性、可移植性和组件的可复用性。

本系统按 MVC 架构总体设计分为数据服务层(Data Access)、业务层(Business)、逻辑控制层(Controllor)、表示层(UI),共 4 层。其中,业务层和数据层对应于 MVC 模式中的 Model,

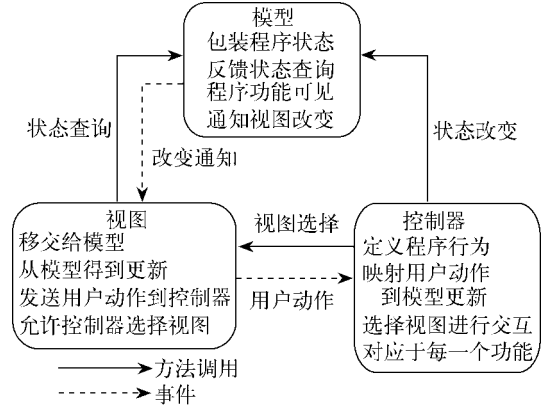


图 2 MVC 模式  
Fig.2 MVC pattern

表示层对应于 View,逻辑控制层对应于 Controller。

### 3 评估系统架构的实现

#### 3.1 数据服务层

数据服务层的宗旨是为数据源提供 1 个可供外界访问的接口来访问数据源的数据层组件,接口与具体采用的数据访问技术无关,以便于移植到不同的数据源上。

本系统的数据服务层数据访问接口采用 ADO.net 封装方式,这些数据访问组件均是基于 ADO.Net 的浅封装,它的优点在于封装层次低、速度快,并可以手动组织 sql 语句用来适应复杂的操作以及个性的优化等,缺点是无法直接处理自定义数据实体方式的业务实体对象,需要将业务实体中的数据属性以参数形式传入传出。但总体看,这种封装方式比较合适和灵活。

本系统设计采用 SQL Server2000 数据库,可使用相对简单的数据库操作模式,为以后系统的升级以及与其他数据库(oracle 等)的兼容创建一具有更强扩展性的数据访问层(图 3)。

数据库层构架具有以下特点<sup>[3]</sup>:

- 1) 数据访问框架易于使用、修改,能够兼容新发布的数据库技术;
- 2) 数据层能够返回多种数据结构给其它层,在本系统中,首要的任务是使数据层可以返回.NET 中的 DataSet 类型和 DataReader 类型,并易于对其进行扩展返回 XmlDocument、XmlReaders 等类型;

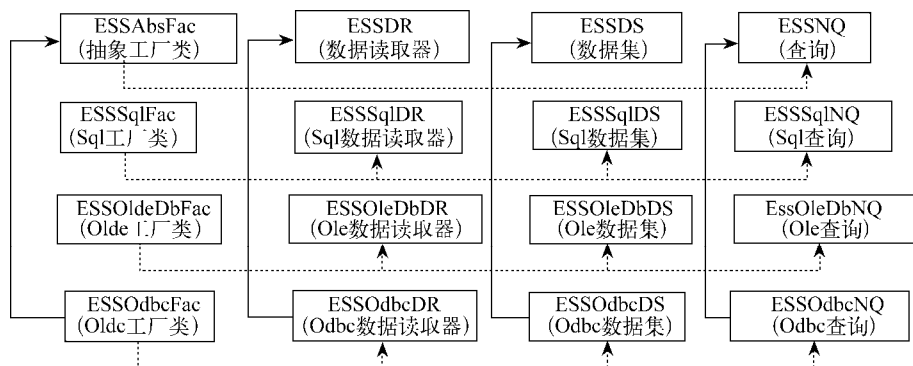


图 3 数据库层架构示意图

Fig. 3 Schematic structure of data access level

3) 采用 Abstract Factory、Factory Method、Singleton 等设计模式,能够以几乎相同的方式来处理系统支持的所有不同的数据库,有助于保证 1 个应用程序所使用的数据库访问代码独立于其所使用的数据库平台。

ADO.net 常用的数据提供者有 SQL Server、.NET 数据提供者、OLE DB、.NET 数据提供者、ODBC、.NET 数据提供者。抽象工厂设计模式封装了这 3 种不同的数据提供者 (DataProvider) 和不同数据类型 (DataSet、DataAdapter 等),具有“通用接口”的特性,使上层的数据实现独立于数据层,通过特定的工厂类选择特定的输出数据类型,达到不同数据库的连接和数据交换的目的。工厂模式在抽象工厂模式的基础上实现不同数据类型的返回。具体的工厂类相当于 .Net 数据提供者,抽象工厂类相当于输出类型,实现了数据层中的最重要的需求。

图 3 中未显示出单态 (Singleton) 模式来实现数据库的连接。GOF 对单态模式的定义为“确保 1 个类只有 1 个实例,并且提供全局访问点”,由于这一特性,在数据的连接上能够使用单态模式,节省资源。图 3 中也未显示用来包装来自上层的数据请求细节的 1 种方法 (程序中使用 EESRequest 类),负责将请求从客户应用程序传到数据层,而实际上,业务层的许多类均需要直接引用 EESRequest 类来进行数据传递。

### 3.2 业务层

业务层封装了实际业务逻辑,包含数据验证、事物处理、权限处理等业务相关操作,是整

个应用系统的核心。本系统将实际业务具体分为业务数据与业务操作两部分。

#### 1) 业务数据

业务数据是业务逻辑的核心,业务数据最终将以 1 种固定的格式表现于内存中,在系统的各个层次间传输,充当 DTO (数据传输对象) 角色。

#### 2) 业务操作

业务操作负责对业务数据进行各种业务相关的处理,例如验证、流向、整合、事物、权限等,但它不负责有关对数据源的操作。它与业务数据的关系设计有如下两种方式:

(1) 分离业务数据与业务操作,将业务数据单独封装到只有数据 get、set 的数据类中,这个数据类只充当 DTO,将业务操作封装到独立的 service 类中与业务数据一起充当业务层,这样,当系统不复杂时,显得简单直观,而随着系统日益复杂,service 类会变得杂乱,而将本身耦合紧密的数据与操作分离对于代码复用也是不利的因素;

(2) 整合业务数据与业务操作,将业务数据与相关的业务操作封装在一起称为业务实体,其作为统一的业务层为表示层提供服务,同时也负责作为 DTO 在各个层次间传输,每个业务实体均可作为 1 个单独组件形式存在,对于组件化复用有很大好处。

本系统采用第 2 种设计方式,只有业务层与数据层进行数据交换,进行数据库操作。实际上,系统对要进行操作的数据 (如专家信息) 和操作 (如查询,更新等) 进行封装,形成了新的业务层类供上层调用。这样,整合了业务数据

和业务操作,为控制类服务。图4示出专家信息操作的UML示意图。

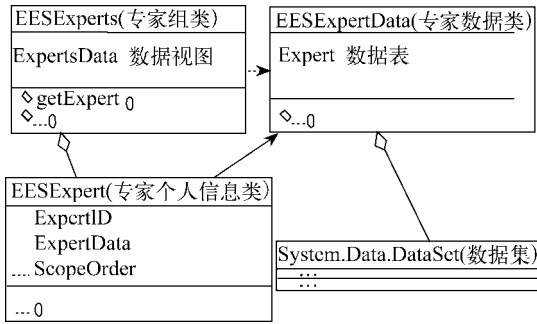


图4 专家信息操作示意图

Fig. 4 Schematic UML chart of operations for experts information

如图4所示,EESExperts是EESExpert的聚合类,提供了getExpert方法,可以根据expertID获得对单个Expert对象的访问,而单个的Expert则有相应的方法对数据进行访问。其他的一些方法,如修改、删除在图4中并未显示,但可包含在这个模式中。

### 3) 业务层的数学模型和算法

系统在采集到专家评估信息之后对系统进行评估,所使用的算法主要有权重确定方法(AHP算法)和评价方法(线性加权求和方法、模糊综合决策方法、模糊Borda数方法)。

本系统将算法当作1个单独的外接模块,通过导入算法模块所在的DLL资源来实现函数调用,并进行特定的数据处理。在业务层涉及到数据计算时才有相应的代码来引用DLL中的函数。

系统的算法涉及较多的矩阵运算。为避免自行开发矩阵运算算法带来不必要的麻烦,算法设计采用嵌入外接现有矩阵运算工具来实现。目前,常见的用于矩阵运算的科学计算工具有MatLab和SciLab两种。SciLab作为一种开源的科学计算软件,有较大的发展潜力,在功能上也与MatLab兼容。因此,系统采用SciLab来实现矩阵的运算<sup>[4]</sup>。

### 4) 指标权重的计算

评价指标体系是为反映评价目标的各个要素之间关系以及其重要程度而建立的量化系统。其中,评价目标的各要素是评价指标体系

中的指标项,各要素量化的评价标准即是标准,而重要的程度则用权重来体现。本系统采用层次分析法(简称AHP法)来确定各指标的重要性程度,将评价者对复杂系统的评价思维过程数学化,从而为决策者提供定量形式的决策依据,进而取得最优决策。其基本思路是通过分析复杂问题所包含的因素及其相互关系,将问题分解为若干层次和若干要素,并在每一层次按照一定准则对该层元素进行逐对比较,再按标度量化形成判断矩阵。通过计算判断矩阵的最大特征值以及相对应的正交化特征向量,得出该元素对该准则的权重,详细算法见参考文献<sup>[4]</sup>。

### 5) 综合评估计算方法

系统采用的综合评价方法包括线性加权求和法、模糊综合决策法和模糊Borda数法。线性加权求和法是最简单的多指标系统综合评估方法,往往对评估对象各指标反映的深层差异描述不够,本文不做详细展开。后两种评估方法是本评估系统采用的主要综合评估计算方法。

模糊综合决策法是在考虑多种因素的影响下,运用模糊数学工具对某事物做出综合评价的方法,其步骤如下。

设定评语集:本系统中专家对指标的评价分为5个档次,这样,可把因素定性划分为5个档次的评价集合{差,一般,比较好,好,非常好}。核反应堆的最终评价结果即可表示为对各种评价集合的隶属度。

计算评价矩阵:定义评价矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ ,其中 $R_{ij}$ 表示因素 $U_i$ 被评为 $V_j$ 的隶属度。设 $n$ 为有效咨询次数, $y_{ij}$ 为因素 $U_i$ 被评为 $V_j$ 次数,则有 $r_{ij} = y_{ij} / n$ 。其计算公式为:

$$B = A \cdot R = (a_1, a_2, \dots, a_n) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} = (B_1, B_2, \dots, B_m) \quad (1)$$

式中: $A$ 为由各评价指标所占权重组成的权重集; $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为各评价指标权重; $B$ 为综合评价结果。将计算结果 $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$ 归一化,得结果矩阵 $\bar{B}$ ,其中, $\bar{B}_i = B_i / \sum B_i$ 。

综合评分:将隶属度分别赋值取  $V = \{60 \ 70 \ 80 \ 90 \ 100\}$ ,利用公式即可得到评价结果  $R$ 。

$$R = \bar{B} \times V^T \quad (2)$$

模糊 Borda 数方法是在传统的 Borda 数方法和采用以评价为基础的委托群体效用函数分析方法的基础上发展起来的 1 种新的方法。这种方法强调评价对象中各准则评价的优序关系,利于在评价中突出强项因素的地位。计算原理如下。

确定隶属度:

$$u_{ij} = G_i(x_j) / \max\{G_i(x_j)\} \quad (3)$$

其中:  $x_j$  为第  $j$  个堆型的指标;  $G_i(x_j)$  为第  $j$  种堆型第  $i$  个指标的评分值;  $\max\{G_i(x_j)\}$  为第  $i$  个指标所有堆型的最大值。

建立模糊频数统计表:

$$f_{hj} = \sum_{i=1}^m \sigma_i^h(x_j) u_{ij} w_i \quad (4)$$

$$R_j = \sum_{h=1}^N f_{hj} \quad (5)$$

式中:  $w_i$  为第  $i$  个指标权重,采用 AHP 算法计算得到;  $\sigma_i^h(x_j)$ ,若  $x_j$  在第  $i$  个指标评测结果中优序关系排在第  $h$  位 ( $h = 1, 2, \dots, N$ ), 则  $\sigma_i^h(x_j) = 1$ , 否则  $\sigma_i^h(x_j) = 0$ 。

计算模糊 Borda 数。

计算模糊 Borda 数的方法为:

$$FB(x_j) = \sum_{h=1}^N \frac{f_{hj}}{R_j} Q_h \quad (6)$$

其中,  $Q_h = \frac{1}{2} (N - h) (N - h + 1)$ , Borda 数即为最终的评价结果。

### 3.3 逻辑控制层

逻辑控制层负责处理表示层 (UI) 和业务层之间的数据交互、UI 之间状态流程的控制、简单的数据验证和格式化等功能,其在 MVC 模式中处于相当重要的位置。实际上,在 .NET 事件驱动的编程模型下,UI 控制逻辑被自然地实现在事件函数中,例如, `OnFormLoad` 事件函数、`OnButtonClick` 事件函数。在这些事件函数中,主要任务是做 UI 控件与业务实体的数据交换与业务调用。

为更好地利用 MVC 模式来进行设计和利于系统的扩展及维护,并兼顾开发的便利,在一些简单视图的事物处理上,本系统直接使用其

视图的事件处理函数,如 `OnButtonClick` 事件函数。在一些比较复杂的视图或使用相对广泛的视图的事物处理上,本系统创建其对应的控制器 (controller 类) 来实现对这些视图的管理 (图 5)。

每个控制器均来自视图的 1 个独立类,视图的各种事物处理函数在控制器中进行实现。单个视图可有许多控制器,不同的控制器定义不同的行为。有多个控制器类,这意味着可在需要时易于添加控制器,实现不同的功能。例如,根据用户的访问权限,视图有不同的表现形式和行为,而系统需要再增加一特殊权限的用户时,可直接添加相应的控制器,并可重用大部分代码。在视图的行为差异较大或程序语言选择语句有限制时,视图和控制的分离优势更加明显。

### 3.4 表示层

表示层 (UI) 是用户界面,负责从用户方接收命令、请求数据,并将其传递给逻辑控制层处理,然后将结果呈现出来<sup>[3]</sup>。

本系统涉及比较复杂的信息收集和显示工作,相应的人机交互界面也较复杂。在视觉方面,系统采用了类似 WindowXP 风格的操作面板设计,左边是功能菜单区域,右边是操作区域,当点击左边相应功能菜单时,在右边操作区域即有相应的显示,在最下方的状态栏中显示软件的运行状态。系统所使用的图标,如敏感性分析 3 种算法的图标,个性鲜明,能表明算法的特点,便于用户区分。在用户的操作上,系统尽可能标示操作流程的系统化,为用户提供较为简单易懂的流程化操作,并提供完整的帮助

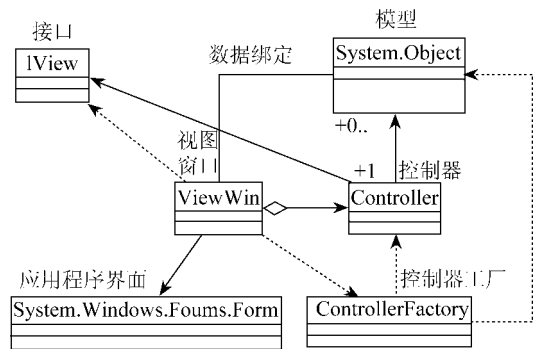


图 5 视图控制器示意图

Fig. 5 Schematic chart of View-Controller

信息来引导用户使用软件。

在系统的实现过程中,不可避免的有视图的重复。在本系统中,大部分的视图均涉及到查询和维护两个操作,如专家信息维护界面和专家信息显示界面。系统定义了单个视图的多种控制器,实现视图与控制器的分离,达到代码重用的目的。图6所示为系统主框架界面。

#### 4 评价结果分析

针对不同核电反应堆类的宏观评估的分析结果已进行了详细描述<sup>[5,6]</sup>。本文仅给出新开发的针对不同型号的先进压水堆核电机组进行评估的微观评估功能模块给出的专家评价结果。评价的对象包括 M310+改进, AP1000 和 EPR3 种堆型。

系统权重计算结果(AHP法)列于表1,采用3种不同的评估计算方法的实际结果列于表2、3。由3种方法得到的计算结果可看出,计算

方法虽不同,但结论却相同:在所有专家评比这些反应堆后,AP1000类型的反应堆排名第一, EPR排名第二, M310+改进排名最后。从具体的指标来看, M310+改进型压水堆的综合排名虽为第三,但在技术成熟性和自主化与本土化两方面排名第一,具有明显优势;除此之外,经济竞争性也排名第二,优于 EPR。结果表明,如果近期内要求采用自主化成熟技术,在中国采用 M310+改进仍是最现实的。AP1000除在技术成熟性和自主化与本土化两指标排名第三外,其余指标的性能排名全部第一,说明从逐步实现自主化和本土化的观点来分析, AP1000最具有发展潜力。结果表明,计算方法虽不相同,但计算结果却具有一致性,这些结果从不同的方面反映了专家们对不同堆型的评价信息。

模糊 Borda 数最后计算结果为: M310+改进得分 70.663 395; AP1000 得分最高为 100; EPR 得分最低,为 74.990 034。



图6 系统主界面示意图

Fig. 6 Schematic chart of main user interface

表 1 系统权重计算结果  
Table 1 Numerical results of system weight

顶级性能	顶级指标权重	评价指标	二级指标权重
整体特性	0.151 599	基本规格	0.089 795
		满足电网需求能力	0.084 784
		机组可利用率	0.423 918
		正常运行系统可靠性	0.401 504
安全可靠	0.322 417	事故遏制能力	0.279 163
		防止堆芯损坏	0.225 921
		严重事故预防	0.198 293
		严重事故缓解	0.070 702
经济竞争性	0.186 952	专设安全系统可靠性	0.225 921
		基本建设投资	0.5
		基本上网电价	0.5
		建造周期	0.341 226
可建造性	0.071 19	建造质量的保证	0.341 226
		先进建造技术	0.108 155
		模块化建造	0.084 475
		厂址适应性	0.124 917
人机关系	0.066 078	人机界面	0.571 429
		数字化仪控与通讯	0.285 714
		改善运行、维护性能的措施	0.142 857
技术成熟性	0.122 05	不需要原型示范电厂	0.121 957
		成功技术应用	0.558 425
		已有运行业绩	0.319 618
环境优越性	0.040 433	中低放废弃物处置能力	0.123 038
		高放废物处置能力	0.123 038
		职业放射性照射	0.238 288
		气态排放	0.238 288
		液态排放	0.230 501
		厂外排放	0.046 846
自主化与本土化	0.039 28	技术转让范围、深度与合作方式	0.285 714
		设计自主化程度	0.571 429
		设备制造本土化程度	0.142 857

表 2 线性加权计算结果

Table 2 Numerical results of linear weighting

反应堆型	整体性能	安全可靠	经济竞争性	可建造性	人机关系	技术成熟性	环境优越性	自主化与本土化	综合得分
M310+改进	3.680 6	2.970 7	3.116 3	3.293 8	3.028 5	4.128 1	3.262 8	3.493 87	3.306
AP1000	4.362 9	4.050 4	3.229 7	3.633 9	4.090 2	2.697 8	3.632 9	2.746 03	3.684
EPR	3.891 7	3.813 0	3.000 0	3.432 4	3.857 1	3.362 0	3.563 7	3.007 93	3.552

表 3 模糊综合法综合结果

Table 3 Numerical results of fuzzy synthetic method

反应堆型	整体性能	安全可靠	经济竞争性	可建造性	人机关系	技术成熟性	环境优越性	自主化与本土化	综合得分
M310+改进	86.77	79.70	81.159	81.057	80.285	91.281	82.629	84.938	82.920
AP1000	88.91	90.49	82.297	86.361	89.847	76.978	85.774	77.460	86.033
EPR	88.95	88.12	80.000	84.311	88.571	83.620	85.643	80.079	85.525

## 5 结论

本系统按照软件工程的思想完整地实现了整个系统的架构和实现,有强大的数据库管理功能,系统界面简洁明了,并通过调用外部数学工具实现了3种不同算法对信息的评价。本系统可轻易扩展使用不同的数据库,算法模块稳定性强,系统操作简单易行,有很好扩展性。本系统实现了由原始的人工评价到计算机综合处理的评价,由定性评价到定量评价的转换。在经过专家评估,收集到评估信息之后,本系统运行结果具体量化了各种指标所占权重,及不同反应堆的综合情况,与实际情况相吻合,有效地反映了先进核反应堆的各种属性的地位和影响。

## 参考文献:

[1] 杨孟嘉. 先进核电厂评价系统的研究和开发[J]. 核电, 2005(1):2-7.  
 [2] STEVE B. Application programming in small-talk-80: How to use model-view-controller (MVC)[R]. USA:[s. n.], 1992.

[3] TOM F, JOIN S. Professional design pattern in VB.NET building adaptable applications[M]. 北京:清华大学出版社, 2003:38-56.  
 [4] 官睿. 先进核反应堆微观评价系统算法实现[D]. 北京:清华大学, 2005.  
 [5] 张奇,朱书堂,周志伟,等. 基于模糊层次分析法的先进核反应堆评价系统研究[J]. 核动力工程, 2005, 26(1):91-95.  
 ZHANG Qi, ZHU Shutang, ZHOU Zhiwei, et al. Study of advanced evaluation system based on a fuzzy AHP method for nuclear reactors[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(1):91-95 (in Chinese).  
 [6] 张奇,朱书堂,周志伟. 核电站先进反应堆评价系统的决策方法研究[J]. 核科学与工程, 2005, 25(2):131-136.  
 ZHANG Qi, ZHU Shutang, ZHOU Zhiwei. Study on decision-making methods for nuclear power stations evaluation system[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2005, 25(2):131-136(in Chinese).