

基于层次分析法选取影响硝酸盐自然循环回路性能的关键参数

邵世威 王 凯 曲世祥 何兆忠 陈 堃
(中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

摘要 硝酸盐自然循环回路(Nitrate natural circulation loop, NNCL)中驱动力和阻力在量级上非常接近, 由于环境、材料参数、结构参数和运行参数的波动都可能对 NNCL 系统性能造成不可忽略的影响, 因此需要找出影响 NNCL 系统性能的关键参数。层次分析法是一种采用专家经验构造判断矩阵, 通过计算参数不同权重供人们决策的系统分析方法。利用层次分析法对影响 NNCL 系统性能的 40 个参数进行建立层次结构模型和判断矩阵, 通过权重计算从而选出 12 个关键参数, 这些参数既包括物性参数、结构参数, 也包括运行参数。通过分析得出 NNCL 系统运行阶段应关注的关键参数依次为空气入口温度、加热功率和空气流量。

关键词 硝酸盐, 自然循环, 层次分析法, 关键参数

中图分类号 TL364⁺.2

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.040603

Screening key parameters affecting nitrate natural circulation loop performance based on analytic hierarchy process

SHAO Shiwei WANG Kai QU Shixiang HE Zhaozhong CHEN Kun
(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

Abstract Background: The driving force and resistance in nitrate natural circulation loop (NNCL) are almost in the same magnitude. The system performance of NNCL can be influenced by lots of parameters, such as environment, material, structural and operation condition, thus selection of key parameters affecting NNCL is very important. **Purpose:** The aim is to identify the key parameters affecting NNCL reliability. **Methods:** The analytic hierarchy process (AHP) is an effective method to analyze the importance of each parameter to the NNCL reliability using experts' judgment to structure judgment matrix and calculate the parameters' weight. In this paper, an AHP model and judgment matrix is established for the 40 parameters. **Results:** 12 key parameters are selected including physical parameters, structural parameters and operating parameters. **Conclusion:** The results show that the most important parameters affecting NNCL reliability are air temperature, heating power and air flow rate in the NNCL operational phase.

Key words Nitrate salt, Natural circulation, Analytic hierarchy process, Key parameters

20 世纪 80 年代国际上提出的非能动安全系统 系统的可靠性和经济性, 而广受关注。基于该设计理念, 由于设计思想简洁新颖, 能够提高安全 理念设计的非能动余热排出系统出现在多种先进型

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02050100)资助

第一作者: 邵世威, 男, 1983 年出生, 2008 年于哈尔滨工程大学获硕士学位, 主要从事反应堆安全分析

通信作者: 何兆忠, E-mail: hezhaozhong@sinap.ac.cn

Supported by Strategic Priority Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02050100)

First author: SHAO Shiwei, male, born in 1983, graduated from Harbin Engineering University with a master's degree in 2008, focusing on reactor safety analysis

Corresponding author: HE Zhaozhong, E-mail: hezhaozhong@sinap.ac.cn

收稿日期: 2015-12-28, 修回日期: 2016-03-07

反应堆设计中,如美国 AP1000、日本的先进反应堆(JAERI Passive Safety Reactor, JPSR)^[1]、韩国的模块化一体化先进反应堆(System-Integrated Modular Advanced Reactor, SMART)^[2]、中国的小型先进简化沸水堆(Small Simplified BWR, SSBWR-200)、球床模块式高温气冷堆(High Temperature Reactor-Pebble Module, HTR-PM)、中国实验快堆(China Experimental Fast Reactor, CEFR)等^[3]。

中国科学院先进核能创新研究院自 2012 年以来,在中国科学院战略先导专项支持下开展采用非能动安全系统的钍基熔盐堆研究和设计工作,硝酸盐自然循环回路(Nitrate natural circulation loop, NNCL)是创新研究院为研究熔盐自然循环特性而设计、建造的大型热工水力实验平台,为氟盐冷却高温堆非能动余热排出系统^[4-6]设计提供验证平台。NNCL 运行过程不依靠能动部件驱动,而是依靠处于不同高度的冷热源产生的硝酸盐密度差驱动回路运行,由于回路中驱动力和阻力往往处于同一个量级,都受很多不确定因素的影响,正是这些不确定性因素的存在,即使部件正常,仍有可能使 NNCL 系统性能达不到额定工作要求。层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)是一种有效筛选关键参数的方法,对众多研究参数建立清晰的层次结构,得到相对应的判断矩阵。然后计算各个参数对总目标影响大小的权重值,进而筛选出关键参数^[7]。本文利用层次分析法分析影响硝酸盐自然循环回路性能的关键参数,为后续实验方案设计、NNCL 可靠性研究工作提供支持和指导。

1 NNCL 简介

1.1 系统组成

NNCL 设计散热能力为 20 kW,由主回路、硝酸盐充排系统、真空系统、通风塔系统、伴热系统和回路超压保护系统组成^[8]。NNCL 主要由双熔盐换热器(Direct Reactor Auxiliary Cooling System heat exchanger, DHX)、空气-硝酸盐换热器(Natural draft air-cooled heat exchanger, NDHX)、熔盐池、电加热器、空冷塔等设备组成。另外,在空冷塔底部装有风门和风机,用于调节空气流量,电加热器位于熔盐池底部,用于加热熔盐,见图 1。

NNCL 工作流程: DHX 内的硝酸盐吸收电加热器传递的热量而温度升高,受热后的硝酸盐密度减小并沿上升管路上升流入处于空冷塔内的 NDHX, NDHX 中的硝酸盐被流经空冷塔的空气冷却后而

密度增大,沿下降段返回双熔盐换热器中再次被加热上升,从而形成自然循环回路。

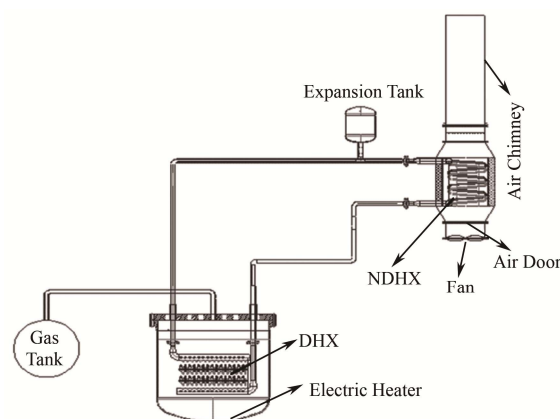


图 1 NNCL 系统原理图
Fig.1 Schematic of NNCL.

1.2 NNCL 功能准则

NNCL 系统功能:在整个运行寿期内,在正常稳定状态及预期的瞬态实验状态下,其热工水力参数必须保持在设计限值内。根据 NNCL 运行在单相状态并考虑硝酸盐熔点高(142 °C)的特点,提出 NNCL 需要满足以下两个功能准则:

1) 排热准则: NNCL 循环排热能力不小于 20 kW,且管道内硝酸盐温度不低于 150 °C。足够的排热能力是 NNCL 系统的重要功能,主要有加热器加热功率和 NNCL 带走的热量之偏差值来决定,该偏差值不能太大,否则系统排热能力将不能满足。若排热能力不足,则系统无法建立冷热阱之间温差,甚至自然循环可能中断。

2) 流动稳定性准则:管道堵塞不超过流通面积的 10%。NNCL 流动不稳定可能是有局部过冷导致硝酸盐凝固而堵塞造成,进而影响自然循环性能。

1.3 初步筛选性能参数

根据 NNCL 工程设计文件,从系统结构参数和系统运行参数两方面分析和选取影响 NNCL 系统性能的基本参数,共筛选出 40 个影响 NNCL 性能的基本参数。本节采用 10 分制原则收集 4 位热工水力专家对各个参数对系统性能影响程度的评分,然后筛选出专家总分与满分(40 分)之比大于 60%的因素作为层次分析法需要进一步分析的输入参数,通过计算后选择排序前 24 个参数作为层次分析法输入参数,见表 1。

表 1 NNCL AHP 模型中参数
Table 1 Parameters of AHP model of NNCL.

参数 Parameter	代码 Code	参数 Parameter	代码 Code
冷热源高度差 Altitude difference of heat and cold source	A	回路管道摩擦系数 Friction coefficient of loop pipe	M
弯头局部阻力系数 Local resistance coefficient of elbow	B	加热功率 Power	N
主回路管道长度 Piping length of primary circuit	C	硝酸盐密度 Nitrate density	O
DHX 换热器局部阻力 Local resistance of DHX	D	DHX 换热器材料导热系数 Thermal conductivity of DHX	P
NDHX 换热器局部阻力 Local resistance of NDHX	E	DHX 换热器对流换热系数 Heat transfer coefficient of DHX	Q
空冷塔空气流量 Air flow rate of cooling tower	F	NDHX 换热器材料导热系数 Thermal conductivity of NDHX	R
DHX 换热器换热面积 Heat transfer area of DHX	G	NDHX 换热器对流换热系数 Heat transfer coefficient of NDHX	S
DHX 换热器摩擦阻力 Friction resistance of DHX	H	百叶窗开度 Opening degree of louver	T
NDHX 换热器换热面积 Heat transfer area of NDHX	I	硝酸盐热膨胀系数 Coefficient of thermal expansion of nitrate	U
NDHX 换热器摩擦阻力 Friction resistance of NDHX	J	DHX 换热器管径 Diameter of DHX	V
回路泄漏 Circuit leak	K	NDHX 换热器管径 Diameter of NDHX	W
空冷塔入口空气温度	L	回路保温材料保温性能	X
Inlet air temperature of cooling tower		Insulation properties of insulation material	

2 层次分析模型

层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)是一种简便、灵活而又实用的多准则、多因素的决策方法,对多因素、多标准、多方案的综合评价及趋势预测相当有效,可对一些较为复杂、较为模糊的问题做出决策,特别适用于那些难于完全定量分析的问题,是用于分析复杂系统中各因素对系统运行影响的有效方法之一。

运用层次分析法建模的 4 大步骤: 1) 建立递阶层次结构模型; 2) 构造出各层次中的所有判断矩阵; 3) 层次单排序及一致性检验; 4) 层次总排序及一致性检验。

2.1 NNCL 层次分析模型

根据 NNCL 系统功能和功能准则建立 NNCL 的 AHP 模型结构层次。将 NNCL 系统功能和功能准则作为 AHP 模型结构的第一层和第二层,并通过专家打分法筛选出的 24 个参数作为第三层,如图 2。

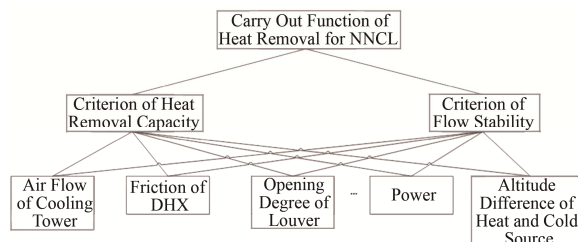


图 2 NNCL 的 AHP 模型
Fig.2 AHP model of NNCL.

2.2 构造判断矩阵并计算单序权重

层次分析法的重要计算是计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 和相应的特征矢量 $\mathbf{W}$ 。计算特征向量主要方法是幂乘法、方根法和规范列平均法。通常计算判断矩阵的最大特征值和相应的特征矢量,并不需要追求很高的精度,因为判断矩阵本身已带有不少的误差,因此本文采用快速计算的方根法(又称几何评价法)计算判断矩阵的最大特征值和相应特征矢量。方根法计算步骤:

1) 计算判断矩阵 A 各行元素乘积:

$$m_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

2) 计算 n 次方根:

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{m_i} \quad (2)$$

3) 对向量 $\bar{\mathbf{w}} = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 进行规范化:

$$\hat{w}_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j} \quad (3)$$

矢量 $\hat{\mathbf{w}} = (\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_n)^T$ 为所求特征向量。

4) 计算矩阵 A 的最大特征值:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A \hat{\mathbf{w}})_i}{\hat{w}_i} \quad (4)$$

根据所建立的NNCL层次结构请两位热工水力方面专家进行判断打分,利用评分几何平均法将两位专家构造的判断矩阵的各个元素进行几何平均,其形式如下:

$$a_{ij} = (\prod_{k=1}^m a_{ij}^{(k)})^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

式中: m 为打分专家人数。理论研究表明,评分几何平均法能保证合并后的判断矩阵互反性,其准确性和科学性比评分算术平均法高很多,是一种比较受到重视的群组决策分析方法之一^[9]。根据合并后的判断矩阵计算相应的最大特征值和相应的特征向量。具体计算结果如下:

1) 第一层和第二层各个因素进行两两对比,分别得出各自判断矩阵,并计算各自权重,见表2。

2) 第三层各个因素在两个准则下进行两两对比,分别得出各自判断矩阵,表3为在排热能力准则条件下构造的两两判断矩阵,表4为在流动稳定性准则条件下构造的两两判断矩阵。然后分别计算

各自判断矩阵中各个参数的权重(见表5、表6)和矩阵一致性检验。一致性检验结果:(1)表3: $\lambda_{\max}=24.0011$ 、 $CI=0.00005$ 、 $CR=0.00003$;(2)表4: $\lambda_{\max}=24.0277$ 、 $CI=0.00121$ 、 $CR=0.00073$ 。

表2 第一层与第二层的判断矩阵及权重(w_{21})
Table 2 Judgment matrix and weight of first and second layer.

	排热能力 准则 Criterion of heat removal capacity	流动稳定性 准则 Criterion of flow stability	权重 Weight
排热能力准则 Criterion of heat removal capacity	1	1	0.5
流动稳定性准则 Criterion of flow stability	1	1	0.5

表3 在排热能力准则条件下的判断矩阵(w_{32}^1)
Table 3 Judgment matrix under criterion of heat removal capacity.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
A	1.00	0.95	1.64	0.95	0.95	1.00	1.00	0.95	1.00	0.95	1.45	0.89	0.95	1.00	0.89	1.55	1.73	1.55	1.73	1.00	0.89	1.64	1.64	1.10
B	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.10	1.10	1.00	1.10	1.00	1.45	0.89	1.00	1.10	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.73	1.73	1.18
C	0.61	0.58	1.00	0.58	0.58	0.63	0.63	0.58	0.63	0.58	0.84	0.45	0.58	0.63	0.58	1.00	1.10	1.00	1.10	0.63	0.58	1.00	1.00	0.59
D	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.10	1.10	1.00	1.10	1.00	1.45	0.89	1.00	1.10	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.73	1.73	1.18
E	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.10	1.10	1.00	1.10	1.00	1.45	0.89	1.00	1.10	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.73	1.73	1.18
F	1.00	0.91	1.58	0.91	0.91	1.00	1.00	0.89	0.89	0.89	1.45	0.89	0.89	1.00	0.89	1.55	1.73	1.55	1.73	1.00	0.89	1.60	1.60	1.10
G	1.00	0.91	1.58	0.91	0.91	1.00	1.00	0.89	1.00	0.89	1.45	0.89	0.89	1.00	0.89	1.55	1.73	1.55	1.73	1.00	0.89	1.60	1.60	1.10
H	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.12	1.12	1.00	1.10	1.00	1.45	0.89	1.00	1.10	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.73	1.73	1.10
I	1.00	0.91	1.58	0.91	0.91	1.12	1.00	0.91	1.00	0.89	1.18	0.89	0.89	1.00	0.89	1.55	1.73	1.55	1.73	1.00	0.89	1.60	1.60	1.10
J	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.12	1.12	1.00	1.12	1.00	1.45	0.89	1.00	1.10	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.73	1.73	1.10
K	0.69	0.69	1.20	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	1.00	0.81	0.66	0.66	0.66	1.14	1.14	1.14	1.14	0.66	0.66	1.14	1.14	0.81
L	1.12	1.12	2.24	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.24	1.00	0.89	0.89	0.89	1.79	1.79	1.79	1.79	0.89	0.89	1.79	1.79	1.26
M	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.12	1.12	1.00	1.12	1.00	1.52	1.12	1.00	1.10	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.73	1.73	1.10
N	1.00	0.91	1.58	0.91	0.91	1.00	1.00	0.91	1.00	0.91	1.52	1.12	0.91	1.00	1.14	1.45	1.73	1.45	1.73	1.00	0.87	1.50	1.50	1.10
O	1.12	1.00	1.73	1.00	1.00	1.12	1.12	1.00	1.12	1.00	1.52	1.12	1.00	0.88	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.14	1.00	1.82	1.82	1.18
P	0.65	0.58	1.00	0.58	0.58	0.65	0.65	0.58	0.65	0.58	0.88	0.56	0.58	0.69	0.58	1.00	1.10	1.00	1.10	0.66	0.58	1.00	1.00	0.59
Q	0.58	0.53	0.91	0.53	0.53	0.58	0.58	0.53	0.58	0.53	0.88	0.56	0.53	0.58	0.53	0.91	1.00	0.89	0.89	0.58	0.52	0.95	0.95	0.55
R	0.65	0.58	1.00	0.58	0.58	0.65	0.65	0.58	0.65	0.58	0.88	0.56	0.58	0.69	0.58	1.00	1.12	1.00	1.10	0.66	0.52	0.95	0.95	0.55
S	0.58	0.53	0.91	0.53	0.53	0.58	0.58	0.53	0.58	0.53	0.88	0.56	0.53	0.58	0.53	0.91	1.12	0.91	1.00	0.66	0.52	0.95	0.95	0.55
T	1.00	0.91	1.58	0.91	0.91	1.00	1.00	0.91	1.00	0.91	1.52	1.12	0.91	1.00	0.88	1.52	1.73	1.52	1.52	1.00	0.89	1.60	1.60	1.10
U	1.12	1.00	1.73	1.00	1.00	1.12	1.12	1.00	1.12	1.00	1.52	1.12	1.00	1.15	1.00	1.73	1.94	1.94	1.94	1.12	1.00	1.82	1.82	1.18
V	0.61	0.58	0.91	0.58	0.58	0.63	0.63	0.58	0.63	0.58	0.88	0.56	0.58	0.67	0.55	1.00	1.05	1.05	1.05	0.63	0.55	1.00	1.00	0.55
W	0.61	0.58	1.00	0.58	0.58	0.63	0.63	0.58	0.63	0.58	0.88	0.56	0.58	0.67	0.55	1.00	1.05	1.05	1.05	0.63	0.55	1.00	1.00	0.55
X	0.91	0.85	1.69	0.85	0.85	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	1.24	0.79	0.91	0.91	0.85	1.69	1.83	1.83	1.24	0.91	0.85	1.83	1.83	1.00

表 4 在流动平衡准则条件下的判据矩阵(W_{32}^2)
Table 4 Judgment matrix under criterion of flow stability.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
A	1.00	0.95	1.64	0.95	0.95	1.00	1.00	0.95	1.00	0.95	1.45	0.89	0.95	1.00	0.89	1.55	1.73	1.55	1.73	1.00	0.89	1.34	1.34	1.34
B	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.10	1.10	1.00	1.10	1.00	1.45	0.89	1.00	1.10	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.41	1.41	1.45
C	0.61	0.58	1.00	0.58	0.58	0.63	0.63	0.58	0.63	0.58	0.84	0.45	0.58	0.63	0.58	1.00	1.10	1.00	1.10	0.63	0.58	0.71	0.71	0.84
D	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.10	1.10	1.00	1.10	1.00	1.45	0.89	1.00	1.10	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.41	1.41	1.45
E	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.10	1.10	1.00	1.10	1.00	1.45	0.89	1.00	1.10	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.41	1.41	1.45
F	1.00	0.91	1.58	0.91	0.91	1.00	1.00	0.95	0.89	0.95	1.45	0.89	0.89	1.00	0.89	1.55	1.73	1.55	1.73	1.00	0.89	1.30	1.30	1.34
G	1.00	0.91	1.58	0.91	0.91	1.00	1.00	0.95	1.00	0.95	1.45	0.89	0.89	1.00	0.89	1.55	1.73	1.55	1.73	1.00	0.89	1.30	1.30	1.34
H	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.05	1.05	1.00	1.10	1.00	1.45	0.89	1.00	1.05	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.41	1.41	1.34
I	1.00	0.91	1.58	0.91	0.91	1.12	1.00	0.91	1.00	0.89	1.18	0.89	0.89	1.00	0.89	1.55	1.73	1.55	1.73	1.00	0.89	1.30	1.30	1.34
J	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.05	1.05	1.00	1.12	1.00	1.45	0.89	1.00	1.05	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.41	1.41	1.34
K	0.69	0.69	1.20	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	1.00	0.81	0.66	0.66	0.66	1.14	1.14	1.14	1.14	0.66	0.66	0.81	0.81	1.14
L	1.12	1.12	2.24	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.24	1.00	0.89	0.89	0.89	1.79	1.79	1.79	1.79	0.89	0.89	1.26	1.26	1.79
M	1.05	1.00	1.73	1.00	1.00	1.12	1.12	1.00	1.12	1.00	1.52	1.12	1.00	1.10	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.10	1.00	1.41	1.41	1.34
N	1.00	0.91	1.58	0.91	0.91	1.00	1.00	0.95	1.00	0.95	1.52	1.12	0.91	1.00	1.14	1.45	1.73	1.45	1.73	1.00	0.87	1.22	1.22	1.34
O	1.12	1.00	1.73	1.00	1.00	1.12	1.12	1.00	1.12	1.00	1.52	1.12	1.00	0.88	1.00	1.73	1.90	1.73	1.90	1.14	1.00	1.48	1.48	1.45
P	0.65	0.58	1.00	0.58	0.58	0.65	0.65	0.58	0.65	0.58	0.88	0.56	0.58	0.69	0.58	1.00	1.10	1.00	1.10	0.66	0.58	0.71	0.71	0.84
Q	0.58	0.53	0.91	0.53	0.53	0.58	0.58	0.53	0.58	0.53	0.88	0.56	0.53	0.58	0.53	0.91	1.00	0.89	0.89	0.58	0.52	0.95	0.95	0.77
R	0.65	0.58	1.00	0.58	0.58	0.65	0.65	0.58	0.65	0.58	0.88	0.56	0.58	0.69	0.58	1.00	1.12	1.00	1.10	0.66	0.52	0.95	0.95	0.77
S	0.58	0.53	0.91	0.53	0.53	0.58	0.58	0.53	0.58	0.53	0.88	0.56	0.53	0.58	0.53	0.91	1.12	0.91	1.00	0.66	0.52	0.95	0.95	0.77
T	1.00	0.91	1.58	0.91	0.91	1.00	1.00	0.91	1.00	0.91	1.52	1.12	0.91	1.00	0.88	1.52	1.73	1.52	1.52	1.00	0.89	1.30	1.30	1.34
U	1.12	1.00	1.73	1.00	1.00	1.00	1.12	1.00	1.12	1.00	1.52	1.12	1.00	1.15	1.00	1.73	1.94	1.94	1.94	1.12	1.00	1.48	1.48	1.45
V	0.75	0.71	1.41	0.71	0.71	0.77	0.77	0.71	0.77	0.71	1.24	0.79	0.71	0.82	0.67	1.41	1.05	1.05	1.05	0.77	0.67	1.00	1.00	1.10
W	0.75	0.71	1.41	0.71	0.71	0.77	0.77	0.71	0.77	0.71	1.24	0.79	0.71	0.82	0.67	1.41	1.05	1.05	1.05	0.77	0.67	1.00	1.00	1.10
X	0.75	0.69	1.20	0.69	0.69	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.88	0.56	0.75	0.75	0.69	1.20	1.29	1.29	1.29	0.75	0.69	0.91	0.91	1.00

表 5 排热能量准则条件下参数权重表
Table 5 Weight of parameter under criterion of heat removal capacity.

参数 Parameter	权重 Weight	参数 Parameter	权重 Weight	参数 Parameter	权重 Weight
冷热源高度差 Altitude difference of heat and cold source	0.05	NDHX 换热器换热面积 Heat transfer area of NDHX	0.05	DHX 换热器对流换热系数 Heat transfer coefficient of DHX	0.03
管道弯头局部阻力系数 Local drag coefficient of elbow	0.05	NDHX 换热器摩擦阻力 Friction resistance of NDHX	0.05	NDHX 换热器导热系数 Thermal conductivity of NDHX	0.03
主回路管道长度 Piping length of primary circuit	0.03	回路泄漏 Circuit leak	0.03	NDHX 换热器对流换热系数 Heat transfer coefficient of NDHX	0.03
DHX 换热器局部阻力 Local resistance of DHX	0.05	空冷塔入口空气温度 Inlet air temperature of cooling tower	0.05	空冷塔百叶窗开度 Opening degree of louver	0.05
NDHX 换热器局部阻力 Local resistance of NDHX	0.05	主回路管道摩擦系数 Coefficient of loop pipe	0.05	硝酸盐热膨胀系数 Coefficient of thermal expansion of nitrate	0.05
空冷塔空气流量 Air flow rate of cooling tower	0.05	回路加热功率 power	0.05	DHX 换热器管径 Diameter of DHX	0.03
DHX 换热器换热面积 Heat transfer area of DHX	0.05	硝酸盐密度 Nitrate density	0.05	NDHX 换热器管径 Diameter of NDHX	0.03
DHX 换热器摩擦阻力 Friction resistance of DHX	0.05	DHX 换热器导热系数 Thermal conductivity of DHX	0.03	回路保温材料保温性能 Insulation properties of insulation material	0.04

表 6 排热能量准则条件下参数权重表
Table 6 Weight of parameter under criterion of flow stability.

参数 Parameter	权重 Weight	参数 Parameter	权重 Weight	参数 Parameter	权重 Weight
冷热源高度差 Altitude difference of heat and cold source	0.05	NDHX 换热器换热面积 Heat transfer area of NDHX	0.05	DHX 换热器对流换热系数 Heat transfer coefficient of DHX	0.03
管道弯头局部系数 Local resistance coefficient of elbow	0.05	NDHX 换热器摩擦阻力 Friction resistance of NDHX	0.05	NDHX 换热器导热系数 Thermal conductivity of NDHX	0.03
主回路管道长度 Piping length of primary circuit	0.03	回路泄漏 Circuit leak	0.03	NDHX 换热器对流换热系数 Heat transfer coefficient of NDHX	0.03
DHX 换热器局部阻力 Local resistance of DHX	0.05	空冷塔入口空气温度 Inlet air temperature of cooling tower	0.05	空冷塔百叶窗开度 Opening degree of louver	0.05
NDHX 换热器局部阻力 Local resistance of NDHX	0.05	主回路管道摩擦系数 Friction coefficient of loop pipe	0.05	硝酸盐热膨胀系数 Coefficient of thermal expansion of nitrate	0.05
空冷塔空气流量 Air flow rate of cooling tower	0.05	回路加热功率 Power	0.05	DHX 换热器管径 Diameter of DHX	0.04
DHX 换热器换热面积 Heat transfer area of DHX	0.05	硝酸盐密度 Nitrate density	0.05	NDHX 换热器管径 Diameter of NDHX	0.04
DHX 换热器摩擦阻力 Friction resistance of DHX	0.05	DHX 换热器导热系数 Thermal conductivity of DHX	0.03	回路保温材料保温性能 Insulation properties of insulation material	0.03

3) 将通过一致性检验的判断矩阵进行第三层对第一层的组合权重计算, 计算公式如下:

$$W = (w_{32}^1, w_{32}^2)^T \times w_{21} \quad (6)$$

组合权重排序见表 7。

表 7 组合权重排序表
Table 7 Sorting table of combining weights.

参数 Parameter	组合权重 Combining weights	参数 Parameter	组合权重 Combining weight	参数名称 Parameter	组合权重 Combining weight
硝酸盐热膨胀系数 Coefficient of thermal expansion of nitrate	0.051	DHX 换热器摩擦阻力 Friction resistance of DHX	0.049	回路泄漏 Circuit leak	0.033
硝酸盐密度 Nitrate density	0.050	冷热源高度差 Altitude difference of heat and cold source	0.046	NDHX 换热器 管径 Diameter of NDHX	0.032
主回路管道摩擦系数 Friction coefficient of loop pipe	0.050	回路加热功率 Power	0.046	DHX 换热器 管径 Diameter of DHX	0.032
空冷塔入口空气温度 Inlet air temperature of cooling tower	0.050	空冷塔百叶窗开度 Opening degree of louver	0.046	NDHX 换热器导热系数 Thermal conductivity of NDHX	0.029
DHX 换热器局部阻力 Local resistance of DHX	0.050	DHX 换热器换热面积 Heat transfer area of DHX	0.046	DHX 换热器导热系数 Thermal conductivity of DHX	0.029
NDHX 换热器局部阻力 Local resistance of NDHX	0.050	空冷塔空气流量 Air flow rate of cooling tower	0.045	主回路管道长度 Piping length of primary circuit	0.028
管道弯头局部系数 Local resistance coefficient of elbow	0.050	NDHX 换热器换热面积 Heat transfer area of NDHX	0.045	NDHX 换热器对流换热系数 Heat transfer coefficient of NDHX	0.027
NDHX 换热器摩擦阻力 Friction resistance of NDHX	0.049	回路保温材料保温性能 Insulation properties of insulation material	0.039	DHX 换热器对流换热系数 Heat transfer coefficient of DHX	0.027

得到组合权重矢量后，进行组合一致性检验，确定组合矢量是否可以作为最终的决策依据。组合一致性检验要逐层进行。若第 k 层的一致性指标为 $CI_1^{(k)}, \dots, CI_n^{(k)}$ (n 是第 $k-1$ 层因素的数目)，随机一致性指标为 $RI_1^{(k)}, \dots, RI_n^{(k)}$ ，定义：

$$CI^{(k)} = [CI_1^{(k)}, CI_2^{(k)}, \dots, CI_n^{(k)}]w^{(k-1)} \quad (7)$$

$$RI^{(k)} = [RI_1^{(k)}, RI_2^{(k)}, \dots, RI_n^{(k)}]w^{(k-1)} \quad (8)$$

则第 k 层对第一层的组合一致性比率为：

$$CR^{(k)} = CR^{(k-1)} + \frac{CI^{(k)}}{RI^{(k)}} \quad (k=3,4,\dots) \quad (9)$$

根据式(9)可以计算第三层对第一层的组合一致性比率为 $0.000381 < 0.10$ ，通过一致性检验。

3 层次结果分析

基于层次分析法，得到 NNCL 层次模型中每一个基本参数对目标层的组合权重，清晰地说明了各个基本参数对 NNCL 系统性能的影响程度。对 NNCL 系统性能影响较大的前 12 位因素中，既包括硝酸盐的热物性参数，也包括工程参数和运行参数。

首先，自然循环系统依赖工作介质冷热源所产生的密度差而驱动工作介质流动，而热膨胀系数直接体现密度受温度变化的程度，因此热膨胀系数的大小决定不同介质在其它条件相同情况下的自然循环能力强弱。

其次，自然循环中驱动力和阻力往往处于同一个量级，阻力中局部阻力往往占据系统阻力一大部分，因此自然循环系统设计和建造中关注和降低局部阻力是提高系统性能的一个重要手段。

最后，在自然循环系统运行期间，加热功率对系统性能的影响较大，加热功率的增加会导致系统吸收热量变多，换热器进出口温差增大，回路流量增加，系统排热能力加强。而空气流量对系统性能影响较小，因为空气流量越大，回路温度越低，由于硝酸盐粘度与温度成反比，导致回路流量降低。由于硝酸盐回路温差通回路的质量流量和硝酸盐比热有关，在二者共同作用下，空气流量对 NNCL 回路温差影响较小。文献[10]通过 RELAP5 分析已经证明结果的合理性。另外，如果空气入口温度过低，在低功率下可能会导致 NDHX 换热器管道局部堵塞，影响系统性能。

4 结语

1) 在 NNCL 系统设计阶段应该更加关注影响 NNCL 系统性能的参数，主要是计算过程中工质介质物性的准确性和回路局部阻力的优化。

2) 在 NNCL 系统运行阶段主要关注的参数依次为空气入口温度、加热功率和空气流量三个运行参数。

本文采用 AHP 筛选出影响 NNCL 性能的关键参数，为后续 NNCL 实验设计和可靠性分析提供技术支持，同时也为氟盐自然循环特性研究提供借鉴。

参考文献

- 1 Iwamura T, Murao Y, Araya F, *et al.* A concept and safety characteristics of JAERI passive safety reactor (JPSR)[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 1995, **29**(9): 397–404. DOI: 10.1016/0149-1970(95)00068-U
- 2 Ser Gi Hong, Jae Seung Song. A preliminary simulation study of dynamic rod worth for SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) reactor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, **60**(10): 350–356. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.05.014
- 3 严春. 先进反应堆非能动余热排出系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010
YAN Chun. Design of passive residual heat removal system for advanced reactor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010
- 4 Ingersoll D T, Clarno K T, Forsberg C W, *et al.* Status of physics and safety analyses for the liquid-salt-cooled very high-temperature reactor (LS-VHTR)[R]. ORNL/TM-2005/218, Oak Ridge National Laboratory, 2005
- 5 Wang X, Lyu Q, Sun X, *et al.* A modular design of direct reactor auxiliary cooling system for AHTRs[R]. *Transaction of the American Nuclear Society*, Hollywood, FL: American Nuclear Society Annual Meeting, 2011, **104**: 1077–1080
- 6 Ingersoll D T, Forsberg C W, Ott L J, *et al.* Status of preconceptual design of the advanced high-temperature reactor (AHTR)[R]. ORNL/TM-2004/104, Oak Ridge National Laboratory, 2004
- 7 许树柏. 实用决策方法—层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988
XU Shubo. Practical decision-making process-principle of analytic hierarchy process[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988
- 8 蔡创雄, 袁晓峰, 王纳秀, 等. 硝酸盐自然循环回路预概念设计报告[R]. TMSR-SE-NS-TR-2016-2, 上海: 中

- 国科学院上海应用物理研究所, 2014
- CAI Chuangxiong, YUAN Xiaofeng, WANG Naxiu, *et al.* The nitrate natural circulation loop concept design report[R]. TMSR-SE-NS-TR-2013-2, Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014
- 9 刘新宪, 朱道立. 选择与判断-AHP(层次分析法)决策[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 1990
- LIU Xinxian, ZHU Daoli. Selection and judgment-(AHP) decision-making[M]. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 1990
- 10 王凯, 蔡创雄, 何兆忠, 等. 硝酸盐自然循环回路系统特性分析[J]. 核技术, 2015, 38(4): 040602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.040602
- WANG Kai, CAI Chuangxiong, HE Zhaozhong, *et al.* Characteristics analysis of nitrate salt natural circulation loop[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(4): 040602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.040602