

质量功能展开方法在压水堆燃料棒设计制造中的应用研究

张鹏鹤, 翟新杰, 李长征

中广核研究院有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2023年6月11日; 录用日期: 2023年7月24日; 发布日期: 2023年7月31日

摘要

核燃料组件设计、加工最主要目标之一就是要确保其在核电站内的可靠性, 从而实现业主/用户需求。为了从质量管理角度有效地提升燃料可靠性, 本文采用质量功能展开方法(QFD), 以压水堆中服役的燃料棒为分析对象, 对其设计、制造过程中的关键参数进行了分析评估。通过燃料棒特征参数的敏感性分析, 对比不同参数下的燃料棒性能与安全分析准则的差异, 采用层次分析法(AHP)实现相关准则的重要性评估。通过对安全分析准则的重要性评估, 可以得到安全分析准则与燃料棒特征参数的关系矩阵。基于上述结果, QFD分析方法的核心——质量屋构建完成后, 就可以很容易识别出燃料棒失效的主要风险, 通过上述分析研究, 得出了可以保证燃料棒完整性和提升燃料棒质量的相关建议。

关键词

燃料可靠性, 燃料棒, 质量功能展开, 设计制造

Applied Research on Quality Function Deployment in PWR Fuel Rod Design and Manufacturing

Penghe Zhang, Xinjie Zhai, Changzheng Li

China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen Guangdong

Received: Jun. 11th, 2023; accepted: Jul. 24th, 2023; published: Jul. 31st, 2023

Abstract

One of the main objectives in the design and manufacturing process of fuel assemblies is to fulfill

文章引用: 张鹏鹤, 翟新杰, 李长征. 质量功能展开方法在压水堆燃料棒设计制造中的应用研究[J]. 核科学与技术, 2023, 11(3): 316-325. DOI: 10.12677/nst.2023.113033

the customer expectations with a product that assures its reliability during its stay in the nuclear power plant. In order to improve fuel reliability in quality management way, the fuel rod served in PWR plant is used as research object by means of Quality Function Deployment method (QFD). The ASI step-by-step analysis and correlative matrix method are adopted in the analyzing process. Fuel rod safety criteria such as: internal pressure, fuel temperature calculation has been taken out to analyze the sensitivity of fuel rod parameters. The AHP method is used to evaluate importance of the safety requirements. Correlative matrix can be made by the importance assessment of each fuel rod technical characteristics to each safety requirements. Once the "House of Quality" is made, major risk of fuel rod failure can be recognized and relative key parameters of fuel rod can be filtered. Through detailed analysis and research, necessary suggestions are provided to keep integrality and promote quality of fuel rod.

Keywords

Fuel Reliability, Fuel Rod, QFD, Design and Manufacturing

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

燃料可靠性(FRI)是 WANO (World Association of Nuclear Operators)最关键的指标之一[1], 见图 1, 为了保障核电设备安全运转, 有必要梳理燃料失效主要类型、关键特征参数、预防措施和风险评价方法。

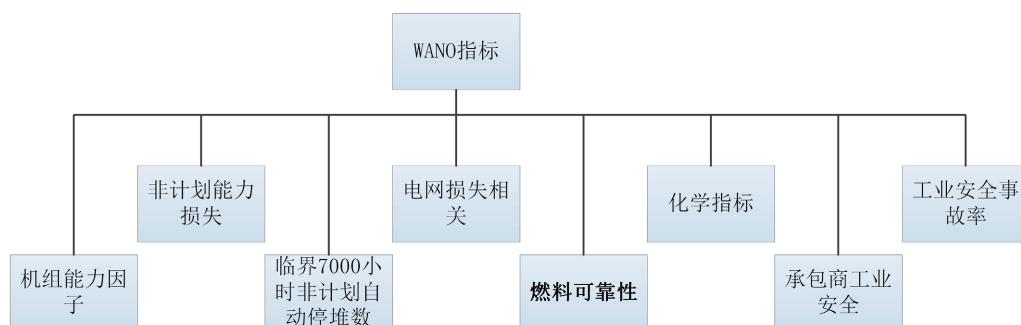


Figure 1. WANO performance indicator

图 1. WANO 关键指标

IAEA 统计了 1994 年~2006 年世界范围内压水堆燃料失效种类分布[2], 如图 2 所示, 引起燃料失效的因素众多, 从制造、运输、吊装环节到堆内运行都会影响燃料可靠性。为了降低燃料失效概率, 有必要采用先进的现代化质量管理方法, 做好质量保证(QA)和质量控制(QC), 从而识别出影响燃料可靠性的关键因素或相关环节, 最终实施相应的缓解措施。

2. 质量功能展开方法简介

质量功能展开方法(简称 QFD)可以简要的表述为: 将用户的需求转换成合适的产品质量特征, 进而确定产品的设计标准, 再将这些设计标准系统地展开到各个功能部件的质量、零件的质量或服务项目的

质量上, 以及制造工序各要素或服务过程各要素的相互关系上[3]。

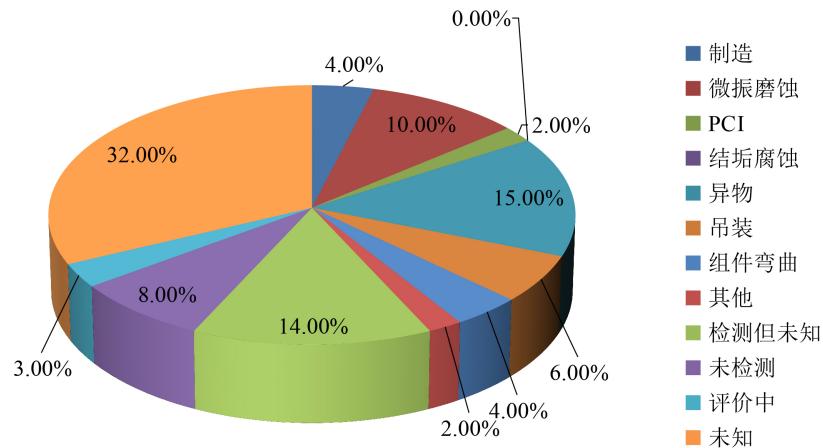


Figure 2. PWR Fuel failure type from 1994 to 2006

图 2. 1994 年~2006 年 PWR 燃料失效类型

质量屋是 QFD 方法的最基础、常用的工具, 最为典型的质量屋即如图 3 所示, 与房屋类似其分别由左墙、屋顶、天花板、房间、地下室和右墙构成: 左墙(用户需求及其重要度 Whats 矩阵)、屋顶(相互关系矩阵)、天花板(产品技术特性 Hows 矩阵)、房间(用户需求与技术特性之间的关系矩阵)、地下室(技术特性权重)、右墙(市场竞争性分析)。在核燃料可靠性分析评价中, 由于核燃料设计、制造行业的特殊性, 竞争性暂不考虑。



Figure 3. House of quality

图 3. 质量屋整体结构

左墙——客户需求及其权重

左墙是质量屋模型的输入，包括“客户”需求及其重要度，在本课题中站在电厂业主的角度并结合核燃料安全准则为特定输入，制定质量屋的初步输入。

天花板——产品特性或工程措施

天花板表述的是产品特性，它是根据“客户”的需求转化而来的产品具体的可执行、可度量的工程特性。在燃料可靠性评价中，产品就是燃料棒本身，其零部件设计、制造和加工要求是其特性，用于QFD分析。

房间——客户需求与技术特性的相关关系

房间，“顾客”需求与产品技术特性的关系矩阵是质量屋最关键的核心，通过特性参数分析评价将不同分析模式下特性参数的对应关系量化处理，用于后续进一步评价。

屋顶——相互关系矩阵

屋顶反映了天花板中各产品技术特性彼此之间的相关关系，或冲突或相互依存，对产品最终技术特性展开的结果也至关重要。燃料棒结构本身并不复杂，分析中要充分考虑技术特性间关联性，为计算过程进行更科学评估。

地下室——技术竞争性评估、目标值

地下室，技术竞争能力评估矩阵就是质量屋的输出部分，它包括根据“客户”要求的重要度和关系矩阵得到的各技术特性的权重，从而为产品设计开发中提供指导，使开发的产品在设计阶段就能为之后的制造过程节约成本，提高效率。CPR1000燃料棒设计本身已经固化，分析对象为棒束结构，其分析结论用于指导生产过程中薄弱环节，为进一步提升燃料可靠性提供方向。

本文基于QFD分析方法，以典型的CPR1000机组内辐照考验的燃料棒作为分析对象，结合燃料制造厂以及国内外电站运行经验数据对燃料可靠性进行分析评价。分析对象经历了堆内三个循环辐照(详见下图)，对应的包络功率史见图4。

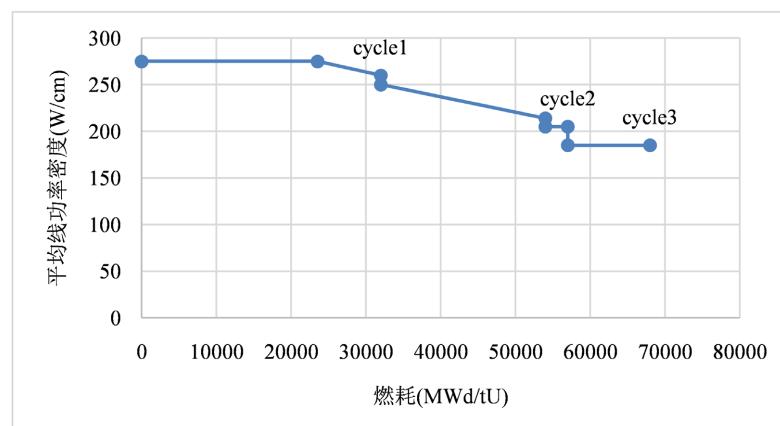


Figure 4. Fuel rod enveloped power history calculated by core physics analysis code

图4. 堆芯物理软件 SCIENCE 计算的燃料棒包络功率史

2.1. QFD 方法应用详述

2.1.1. 明确用户需求

燃料棒包壳完整性是维持可控链式反应的关键屏障，无论是设计环节还是制造环节，都要考虑对燃

料包壳完整性的影响。在 QFD 方法中关键的特征参数都需要进行量化，因此在燃料棒可靠性评估中，采用安全准则替代用户需求进行量化分析，相关安全准则在不同阶段的重要性评价通过层次分析法实现 (Analytic Hierarchy Process, AHP) [3]。相较于意见调查表、模糊分析法，层次分析法的精度和科学性更高 [4] [5]。

设计阶段进行评估的安全准则有：内压准则、温度准则、应变准则、腐蚀准则、应力准则和坍塌准则。以内压准则为例，通过燃料棒性能分析软件计算出的燃料棒内压和内压限值分别为 15.189 MPa 和 21.705 MPa，两者差值计算可得内压裕量为 6.516 MPa。以此类推可以得出各个准则的裕量与安全限值的比值如表 1 所示。

Table 1. The ratio of margin to criterion limit

表 1. 裕量与安全限值的比值

	内压	温度	应变	腐蚀	应力	坍塌
裕量/限值 r_m ($m = 1 \sim 6$)	0.300	0.483	0.866	0.703	0.512	0.650

备注：裕量/限值 = (限值 - 名义值)/限值，由于有可能出现超限的算例，所以需要对结果取绝对值后再排序对比。

按照裕量与安全限值比值的相对程度建立限值对比矩阵见表 2：

Table 2. Criteria comparison matrix

表 2. 限值对比矩阵

准则对比矩阵 c_{ij}	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$
	内压准则	温度准则	应变准则	腐蚀准则	应力准则	坍塌准则
$i = 1$ 内压准则	1.000	1.609	2.885	2.343	1.706	2.164
$i = 2$ 温度准则	0.622	1.000	1.793	1.457	1.061	1.345
$i = 3$ 应变准则	0.347	0.558	1.000	0.812	0.592	0.750
$i = 4$ 腐蚀准则	0.427	0.686	1.231	1.000	0.728	0.924
$i = 5$ 应力准则	0.586	0.943	1.691	1.373	1.000	1.268
$i = 6$ 坍塌准则	0.462	0.743	1.333	1.083	0.788	1.000

用 c_{ij} 表示此数组元素， $c_{ij} = r_j/r_i$ ，则矩阵 C 表示如下：

$$C = \begin{pmatrix} 1.000 & 1.609 & 2.885 & 2.343 & 1.706 & 2.164 \\ 0.622 & 1.000 & 1.793 & 1.457 & 1.061 & 1.345 \\ 0.347 & 0.558 & 1.000 & 0.812 & 0.592 & 0.750 \\ 0.427 & 0.686 & 1.231 & 1.000 & 0.728 & 0.924 \\ 0.586 & 0.943 & 1.691 & 1.373 & 1.000 & 1.268 \\ 0.462 & 0.743 & 1.333 & 1.083 & 0.788 & 1.000 \end{pmatrix} \quad (1)$$

求各项参数进行几何平均值 \bar{k}_i ，并归一化 K_i ，处理方式如下：

$$\bar{k}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n c_{ij}} \quad (2)$$

由此得出安全准则重要度，计算结果见表 3：

Table 3. Importance rank of safety criteria
表 3. 安全准则重要度排序

	内压	温度	应变	腐蚀	应力	坍塌
\bar{k}_i	1.85	1.15	0.64	0.79	1.08	0.86
重要度排序	1	2	6	5	3	4

上述计算结果作为质量屋中左墙中“权重”输入部分。

2.1.2. 设计特征参数

设计特征参数即 QFD 方法中质量屋的天花板, 表述的是燃料棒的产品特性。根据燃料棒的功能需求和燃料棒完整性相关安全设计准则以, 参照 CPR1000 燃料棒结构特点, 结合工程运行经验以及国际研究经验[4], 选取燃料棒关键零部件的结构尺寸参数、物性参数作为关键设计特征参数进行评价, 对比分析不同设计参数在技术要求范围内的敏感性。

这些设计特征参数包括燃料棒长度、燃料密度、预充氦气压力、燃料富集度、包壳外径、包壳内径、芯块外径、芯块高度、芯块倒角宽度、芯块倒角深度、芯块碟形深度、芯块表面粗糙度、气腔长度、气腔弹簧自由长度、气腔弹簧圈数、气腔弹簧丝径和气腔弹簧外径等。

2.1.3. 构建设计阶段相关矩阵

相关矩阵即 QFD 方法中质量屋的屋顶, 表示各项设计特征参数之间的相互关系。为定量评估各个设计特征参数之间的关系, 并结合到相关安全准则, 采用相关系数方法评估各特征参数间的密切程度。

相关系数计算方式如下:

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (3)$$

其中, r_{xy} 表示样本相关系数, S_{xy} 表示样本协方差, S_x 表示 x 样本标准差, S_y 表示 y 的样本标准差。

$$S_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \quad (4)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (6)$$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (7)$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n \quad (8)$$

采用设计特征参数上下限计算出的内压、温度、应变等参数的差值作为样本, 利用上述相关系数计算公式求得设计特征参数的相互关系。以包壳外径和包壳内径相关性计算为例, 举例说明设计特征参数相互关系计算。

根据上述结果 x_i 和 y_i , 根据式(4)~(6)可以计算得到 x 、 y 的标准差及协方差, 代入到式(3), 可以计算得到 x 与 y 的相关系数, 其余特征参数依次类推。

如计算得出相关系数为正, 且大于 0.1 认为是正相关; 相关系数为负, 且小于 -0.1 认为是负相关。

2.1.4. 确定关系矩阵

关系矩阵是质量屋的关键部分,这部分作为质量屋的“房间”代表了设计特征参数与用户需求(安全准则)之间的相互关系。参照表4,通过对各个设计特征参数的敏感性分析,可以得到设计特征参数对各个安全准则影响程度的排序结果。为去除量纲影响,将数据标准化处理将关系矩阵关系度 r_{ij} 使用从1到9的整数表示(9表示影响最大,1表示影响最小,无影响则留空)。

Table 4. Calculation of correlation between characteristic parameters
表4. 设计特征参数相互关系计算

		尺寸/mm	内压/bar	温度/°C	应变/%	腐蚀/μm	应力/MPa	坍塌/MPa
包壳外径 <i>x</i>	名义值 N	9.5	151.890	1339.340	0.134	29.653	263.387	189.160
	上偏差 U	9.54	152.223	1341.360	0.131	29.596	263.048	108.180
	下偏差 L	9.46	151.243	1337.280	0.131	29.708	264.553	136.580
$x_i = (U - L)/N$		0.006	0.003	0.007	-0.004	-0.006	-0.150	
包壳内径 <i>y</i>	名义值 NN	8.36	151.890	1339.340	0.134	29.653	263.387	189.160
	上偏差 UU	8.39	158.043	1393.300	-0.150	29.652	263.120	246.880
	下偏差 LL	8.33	147.393	1305.090	0.319	29.653	261.755	118.660
$y_i = (UU - LL)/NN$		0.070	0.066	-3.496	0.000	0.005	0.678	

根据计算结果,制作相关矩阵即质量屋屋顶见图5,其中:

- : 正相关,表示该交点对应的特征参数间存在相互加强、相互叠加的作用;
- : 负相关,表示该交点对应的特征参数间存在相互减弱、互相抵消的作用;
- ◆: 无相关,表示该交点对应的特征参数间不存在交互作用。

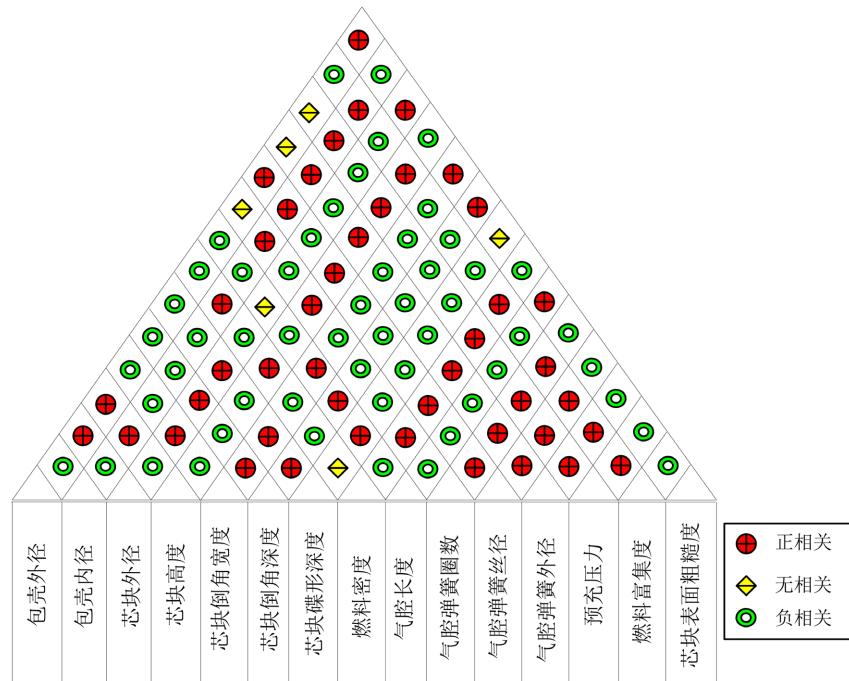


Figure 5. Technical correlation matrix

图5. 设计阶段质量屋屋顶

按照上述分析, 关系矩阵 R 参见表 5:

Table 5. Interrelationship matrix
表 5. 关系矩阵

	包壳外径	包壳内径	芯块外径	芯块高度	芯块倒角宽度	芯块倒角深度	芯块碟形深度	燃料密度	气腔长度	气腔弹簧圈数	气腔弹簧丝径	气腔弹簧外径	预充压力	燃料富集度	芯块表面粗糙度
内压	2	8	6	4	4	7	8	9	7	3	3	2	5	1	6
应力	8		7	3	4	5	3	9	6	3	3	1	4	7	8
应变		9	7				1	6							4
温度	7	9	8	1	3	4	4	8	5	3	2	2	6	6	7
腐蚀	6	3	7	5	4	5	8	9	1						2
坍塌		9	4	3	4	5	8	7	6	2	8	2	6	1	

设计特征参数重要度计算公式如下:

$$\bar{w}_j = \sum_{i=1}^n \bar{k}_i \cdot R_{ij} \quad (9)$$

按照上述公式计算得到设计特征参数的重要度见表 6:

Table 6. Importance rating matrix
表 6. 重要度评级

	包壳外径	包壳内径	芯块外径	芯块高度	芯块倒角宽度	芯块倒角深度	芯块碟形深度	燃料密度	气腔长度	气腔弹簧圈数	气腔弹簧丝径	气腔弹簧外径	预充压力	燃料富集度	芯块表面粗糙度
特征参数重要度	25	39	41	20	22	32	38	53	30	13	17	8	24	18	28

2.1.5. 构建设计阶段质量屋

质量屋中的“左墙”、“屋顶”、“房间”、“地板”已经在前面章节做了梳理, 由于项目特征不进行竞争分析, 因此不分析“右墙”。特征参数的关系矩阵为“天花板”或“屋顶”部分按照结构特性进行评估, 对比不同特征参数间的相互关系, 将其与质量屋其他部分结合后如图 6 所示。

参照上述方式可以得到燃料棒制造质量屋, 见图 7。

3. 分析

通过上述章节敏感性计算及 QFD 质量屋的构建, 确定了对燃料可靠性最敏感的关键特征参数。质量屋分析结果显示, 芯块密度、晶粒尺寸和碟形尺寸相较于其他特征参数更为重要。

根据图 6、图 7 可以得知, 芯块密度会影响燃料的应变和传热, 进而对燃料棒内压、应力以及温度产生较显著的影响。晶粒尺寸对裂变气体释放的影响显著, 宏观上体现为对燃料棒内压、应力影响都比较明显。芯块碟形尺寸会影响燃料棒内部自由体积, 进而对燃料棒传热性能造成影响, 最终对包壳腐蚀、坍塌都有较大影响。

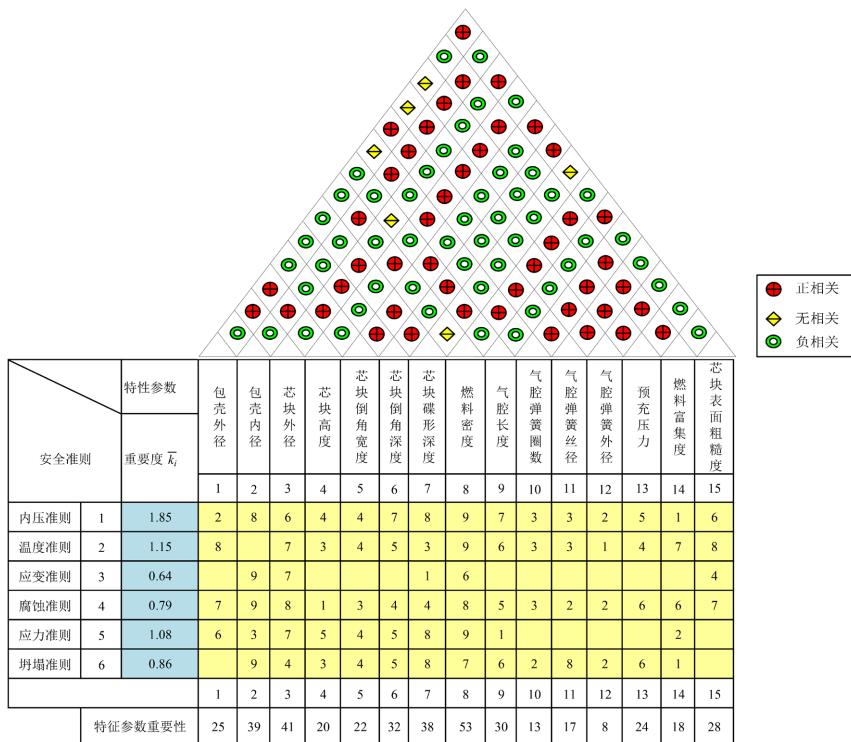


Figure 6. Design house of quality

图6. 设计阶段质量屋

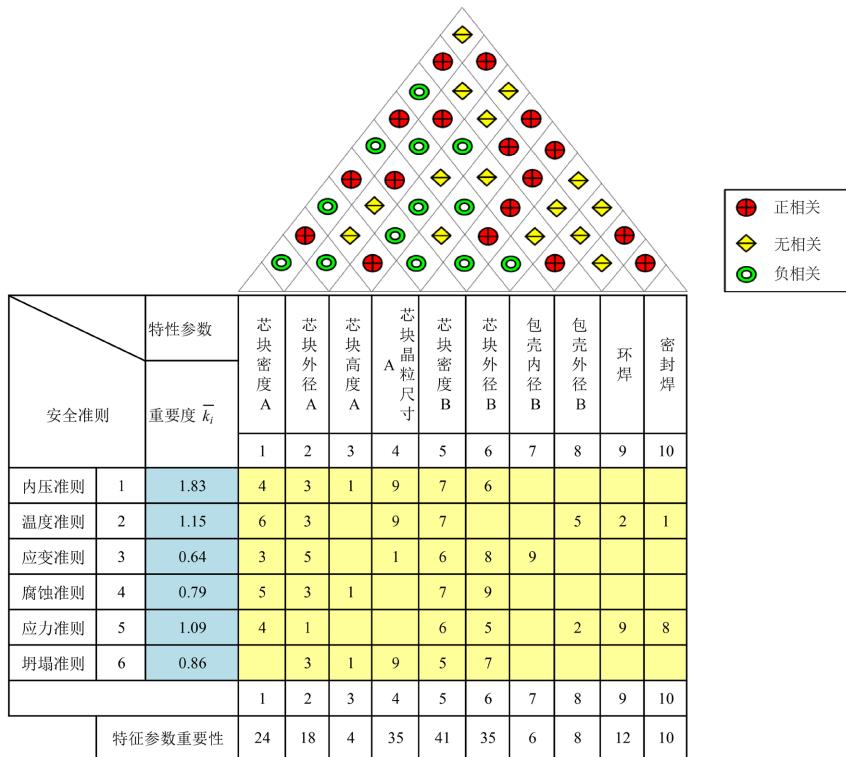


Figure 7. Fabrication house of quality

图7. 制造阶段质量屋

4. 结论

本文使用 QFD 分析工具, 通过燃料棒性能分析软件对燃料棒设计、制造等环节进行了详细分析计算, 评估了燃料设计参数、燃料棒零部件在设计制造阶段的重要性。通过上述计算分析, 确定了影响燃料可靠性较敏感的关键特征参数, 同时得出如下结论, 期待可以指导工程应用并在实践中进一步验证。

- 在燃料棒加工制造过程应采取措施严格控制芯块密度, 减少 B 级芯块发生概率, 提升芯块加工质量。
- 为了减少芯块性能对燃料棒性能的影响, 在芯块加工制造过程中, 晶粒尺寸以及碟形尺寸应严格控制, 保持工艺的稳定性, 进而提升燃料可靠性。

参考文献

- [1] (2017) WANO Performance Indicators. 1-2.
- [2] International Atomic Energy Agency (2010) Review of the Fuel Failures in Water Cooled Reactors. IAEA Nuclear Energy Series NO. NF-T-2.1, Vienna.
- [3] 邵家骏. 质量功能展开[M]. 机械工业出版社, 2003: 1-5.
- [4] Aguirre, F. and BALLASTEROS, I. (2002) Quality at the Source (QATS) System Design under Six Sigma Methodology. *ENUSA*, 2, 43-44.
- [5] 颜家杰. 基于 QFD 的某小型特种车辆设计[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016: 11.