

文章编号 : 0258-0926(2017)S1-0018-04 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2017.S1.0018

核电厂安全阀维修策略优化研究

郭 松, 李晓钟, 王宇翔

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 目前国内部分核电厂已安全运行十年以上, 进入了运行中期阶段, 其系统和设备取得了丰富的运行经验和数据积累。现有安全阀维修策略是基于早期的设计经验和设计阶段概率安全评价 (PSA) 的分析假设。这些假设在很大程度上未反映已运行核电厂的实际运行经验和反馈, 以及当前科技发展带来的设备可靠性提高等因素。本文将采用以可靠性为中心的维修 (RCM) 分析方法针对进入运行中期的核电厂安全阀设备进行维修策略的优化研究。

关键词: 核电厂; 安全阀; RCM; 维修策略

中图分类号: TL413 文献标志码: A

Optimization of Safety Valve Maintenance Policy for Nuclear Power Plants

Guo Song, Li Xiaozhong, Wang Yuxiang

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: At present, some nuclear power plants in China have been operating safely for more than 10 years, entering the middle stage of operation life. A lot of operational experience and data is accumulated for the system and equipment. The existing safety valve maintenance policy is based on the early design experience and the analysis assumptions of PSA (probabilistic safety assessment). These assumptions do not reflect the actual operational experience and feedback of the operating nuclear power plants. The reliability of these equipment is increased with the current technological developments. In this paper, the reliability-centered maintenance (RCM) method is used to optimize the maintenance policy of these safety valves.

Key words: Nuclear power plant, Safety valve, RCM, Maintenance policy

0 引言

目前国内核电厂安全阀维修策略是基于早期的设计经验积累和设计阶段概率安全评价 (PSA) 的分析假设。这些假设在很大程度上未反映已运行核电厂的实际运行经验和反馈, 以及当前科技发展带来的设备可靠性提高等因素。此外, 部分核电厂换料周期将由 12 个月短周期变为 18 个月长周期, 需要对安全阀的维修策略进行必要的优化调整。本文采用以可靠性为中心的维修 (RCM) 分析方法, 针对核电厂安全阀维修策略进行优化研究。

1 RCM 维修分析方法

RCM 维修分析方法是建立在机械系统设计特点、运行功能、故障模式和故障后果等分析的基础上的, 以最大限度提高机械系统的使用可靠性为目的, 应用概率统计所得的机械系统安全性和可靠性数据, 从机械系统的故障后果危害程度出发, 最终制定出实用、合理和科学的维修策略。其主要思想包括: 机械系统的固有可靠性是由机械设计和制造决定的; 尽量减少不必要的机械系统维修工作; 不断收集和分析机械系统使用中的故障数据。

2 安全阀维修策略优化

维修策略优化的主要步骤包括设备功能分析,主要故障模式及影响分析,维修方式、维修级别及维修周期的确定。本文以某型安全阀为例进行维修策略的优化。

2.1 设备功能分析

安全阀的重要功能任务是释放系统压力介质,实现系统超压保护。在进行安全阀维修策略分析时,必须对机械零部件进行筛选,重点针对安全阀超压保护功能及影响其性能的重要零部件进行分析,剔除无需进行预防性维修的项目。

2.2 故障模式及影响分析(FMEA)

安全阀主要的故障模式有7种,分别为不能开启、不能关闭、内部泄漏、外部泄漏、起跳压力值不精确、动作不灵活、阀门频跳或颤振。

安全阀发生故障后,对用户会造成一定的危害和物质财产损失,有必要对安全阀的危害程度进行分级评价,将安全阀故障的危害程度分为4级,由高到低分别为危害性故障(1级)、严重故障(2级)、一般故障(3级)和轻微故障(4级)。安全阀FMEA综合分析结果见表1。

2.3 确定维修方式、维修级别和维修周期

(1)确定维修方式。采用图1所示的逻辑分析方法选择维修方式。

(2)确定维修级别和维修周期。维修级别主

要针对定期预防性维修,核电厂安全阀的维修级别一般划分为3个等级:检查维护(主要针对电器附件故障)、压力整定(主要针对起跳压力值不精确、内部泄露及外部泄漏故障模式)和解体大修(主要针对不能开启、不能关闭、动作不灵活及阀门频跳或颤振故障模式)。

预防性维修周期直接影响到安全阀预防性维修的有效性,同时也反映维修工作量和费用的大小。预防性维修周期及维修级别的确定,应根据安全阀零部件的磨损规律、维修的复杂性、故障后果、已有的维修经验及可靠性分析的结果确定。

该型安全阀原维修级别和周期分别为:检查维护(1C)、压力整定(2C)、解体大修(4C),C为大修周期。

基于安全阀的结构原理、运行经验、FMEA及可靠性指标分析结果等,将该安全阀的维修策略优化为:检查维护(1C)、压力整定(3C)、解体大修(6C)。

3 安全阀可靠性指标分析

3.1 可靠性基本指标参数

(1)可靠度。产品在规定条件和规定时间内,完成规定功能的概率,叫做产品的可靠度。用数学符号表示可靠度函数为:

$$R(t) = P(\xi > t) \quad (1)$$

表1 安全阀FMEA分析表

Table 1 Safety Valve FMEA Analysis Table

故障模式	故障原因	故障影响	危害度等级	维修措施	维修方式
不能开启	零件变形、运动件卡阻、感压元件破裂	无法进行超压保护	2级(严重故障)	定期解体,润滑运动件、更换易损件	定期预防性维修
不能关闭	弹簧断裂、运动件卡阻、零件变形、螺栓松动	造成系统介质泄露	2级(严重故障)	定期解体,润滑运动件、更换易损件	定期预防性维修
内部泄漏	密封面腐蚀或损伤、杂质附着密封面上、装配不当、弹簧松弛、导向部件变形	造成系统介质轻度泄露,影响超压保护功能	3级(一般故障)	定期进行密封性试验,如泄漏则检查研磨密封面、更换易损件	视情维修
外部泄漏	螺栓松动、装配不当、螺纹损坏、密封垫圈腐蚀或损坏	造成系统介质轻度泄露,影响超压保护功能	3级(一般故障)	在线监控安全阀,如泄漏则检查研磨密封面、更换易损件	监控维修
起跳压力值不精确	弹簧腐蚀或松弛、运动件卡阻、螺栓螺母松动、背压变化较大	影响超压保护功能	4级(轻微故障)	定期进行压力整定、润滑运动件、更换易损件	视情维修
动作不灵活	运动件变形卡阻、调节圈调整失当、装配不当、排放管阻力过大	影响超压保护功能	4级(轻微故障)	定期解体,润滑运动件、更换易损件	定期预防性维修
阀门频跳或颤振	进口管道阻力过大、排放管道阻力过大、调节圈调整不当、弹簧刚度太大	影响超压保护功能	4级(轻微故障)	定期解体,对安全阀进行维护	定期预防性维修

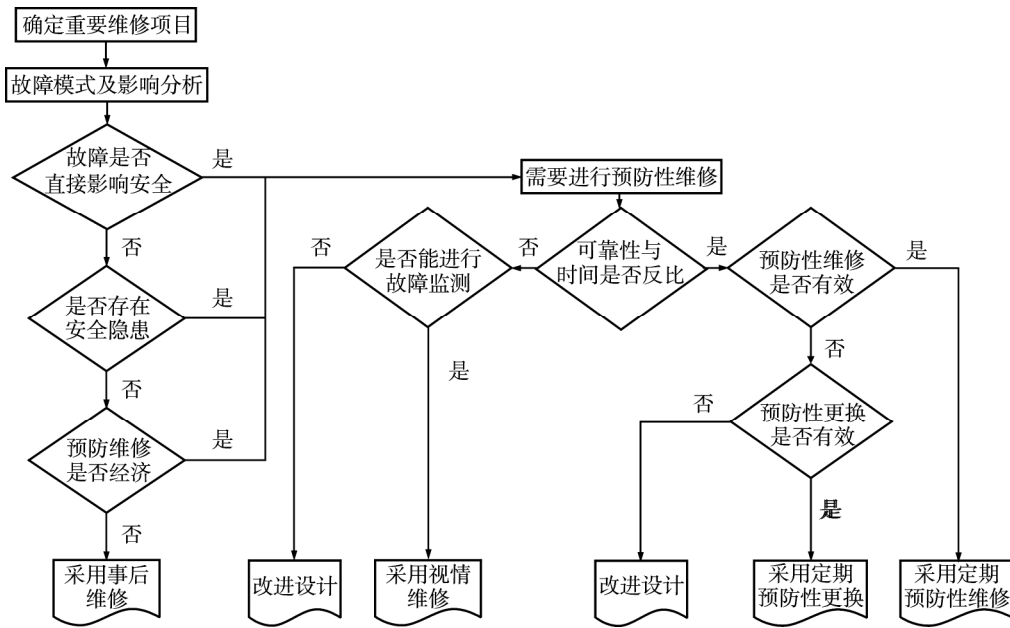


图1 维修方式选择流程图
Fig. 1 Flow Chart of Maintenance Method Selection

式中， ξ 表示产品发生故障前的工作时间； t 表示规定的工作时间。

(2) 平均故障间隔时间。平均故障间隔时间 (T_{BF}) 是需维修加以恢复的全部故障时间的平均值，其表达式为：

$$T_{BF} = \frac{T}{n} \quad (2)$$

式中， T 为总工作时间； n 为总的故障次数。

(3) 平均故障率。在规定条件下和规定时间内，产品的故障与寿命单位总数之比。当产品寿命服从指数分布时，平均故障率 λ 和 T_{BF} 互为倒数。

3.2 安全阀可靠性指标计算及分析

该型安全阀从机组首次装料时间开始估算，累积运行时间为 1401600 h，共发生故障次数为 2 次，故障模式均为内部泄漏。

(1) 故障率计算。故障率是产品可靠性最常用的数量特征指标之一。故障率函数即为产品的故障率曲线。对于许多设备来说，在早期故障期（在此时期内，产品的故障率较快地下降）之后及耗损故障期（在此时期内，产品的故障率较快地上升）之前，产品的故障率基本上是稳定的，产品寿命服从指数分布。即使是复杂的系统或设备，通过定期进行预防性维修，或产品出故障后

即予修复，则在一定时间后，产品的寿命亦渐趋于指数分布。

由于指数分布假设是一种比较保守的假设，因此，一般可假设产品的寿命分布为指数分布。在核工程领域，针对泵阀等机电设备，一般也采用指数分布进行可靠性数据的统计和分析。

对于指数分布，故障率为常数，因此，平均故障率的估计值 λ 为：

$$\lambda = \frac{n}{T} \quad (3)$$

对于故障数为 0 的情况，故障率的分子用 0.693 来计算。其理论依据是采用故障数为 1 时的 50% χ^2 卡方分布值来计算，置信上、下限则为零。当故障数为零时，相应地：

$$\lambda = \frac{\chi^2(0.50, 2)}{2T} = \frac{0.693}{2T} \quad (4)$$

因此，根据式 (3) 及式 (4) 计算出该型安全阀各故障模式的故障率分别为：内部泄漏故障率为 2.47×10^{-6} ；其他故障率为 2.47×10^{-7} 。计算结果表明，该安全阀的故障率很低。

(2) 可靠度计算。当系统的故障服从指数分布时，产品的可靠度的表达式为：

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

表 2 某型安全阀可靠度
Table 2 Reliability of a Certain Safety Valve

故障模式	故障率	原周期下可靠度	优化后可靠度
内部泄漏故障	2.47×10^{-6}	0.997299	0.995951
其他故障	2.47×10^{-7}	0.999459	0.999188

安全阀实际运行中出现的故障为内部泄漏故障，其对应维修级别为压力整定级别，因此按照压力整定周期进行可靠度计算；对于其他故障模式，按照解体大修周期计算其可靠度，由式（5）得出可靠度计算结果，并比较维修策略优化前后可靠度的变化，见表 2。

（3）可靠性计算结果分析。由以上计算结果可以看出，该型安全阀的故障率很低，可靠度很高。安全阀维修周期优化前后，安全阀可靠度变化在 0.15% 以下，可靠度变化很小，表明维修周期的延长未影响安全阀运行的可靠性，表明安全阀的维修策略优化结果可行。

4 结 论

本文运用 RCM 分析方法，结合核电厂安全阀运行的实际情况，以某型安全阀为例，进行了故障模式、故障原因、故障影响、可靠性指标等分析，针对主要故障模式提出了维修措施。

同时针对安全阀的维修级别和维修周期进行了优化，并通过可靠性指标的对比分析，证明了维修周期的变化未影响安全阀运行的可靠性。

（责任编辑：孙 凯）