

文章编号:1000-6788(2006)09-0141-04

基于部分失效的NPP典型系统技术状态评估

陈玲,蔡琦,蔡章生

(海军工程大学 船舶与动力学院,武汉 430033)

摘要: 针对传统的二元逻辑无法定量描述单元部分失效对系统整体性能的影响的问题,采用模糊数运算方法,对部分失效条件下的NPP典型系统性能进行了定量计算;并将该方法与模糊综合评估方法进行了比较,后者需定量确定权重系数,增加了结果的不确定性,因此前者计算结果可信度更高。

关键词: 核动力装置;部分失效;技术状态;模糊逻辑;模糊综合评估

中图分类号: TL361

文献标志码: A

Technical Condition Evaluation on Typical NPP System Based on Partial Failure

CHEN Ling, CAI Qi, CAI Zhang-sheng

(Ship and Power College, Naval Univ of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The effect of components' partial failure on system performance can not be quantitatively calculated by traditional binary logic. Fuzzy logic calculation is used in the paper to calculate the effect of partial failure on system performance and is compared with the fuzzy comprehensive evaluation. The latter needs quantitative weigh and the uncertainty increases. Therefore the result of the former is more creditable.

Key words: nuclear power plant; partial failure; technical condition; fuzzy logic; fuzzy comprehensive evaluation

1 引言

技术状态指产品在指定时刻的总体技术特性,它是产品各种技术特性的综合^[1]。核动力装置(Nuclear Power Plant, NPP)由于系统复杂、可测性差等特殊特性,其技术状态的综合评估具有指标选取难、数据模糊性、信息缺乏、数据子样小等特征。核动力装置设计寿命一般长达三十年以上,随着运行时间的推移,由于设备的老化、磨损或维修管理不当等原因,部分设备的性能出现退化,其技术状态呈逐年下降趋势。寻求NPP技术状态的评估方法,为使用管理和维修决策提供参考,是技术保障信息化建设的迫切需求。

核动力装置技术状态评估的主要手段之一,就是通过建立系统的性能参数模型,确定子系统或设备的性能参数改变对系统评估指标的影响;即NPP技术状态评估问题,可部分归结为NPP性能参数故障研究。

1.1 性能参数故障

NPP故障可分为运行故障和性能参数故障两类:运行故障是因设备不能投入工作而被判定为故障;性能参数故障是因设备的工作能力,如功率、流量、压力等,达不到规定的要求而被判定为故障。性能参数故障研究注重“故障-过程”的分析,由产品的故障机理和产品的设计参数来确定产品的可靠性模型。

NPP的性能参数故障研究中一类常见问题^[2]:某一给定的单元事件序列并不一定导致设备完全正常或完全失效,而是可能导致介于完全正常和完全失效之间的某一结果。特别对于某些典型的具有局部冗余的串联系统,虽然系统上每一个串联的功能单元失效都将导致系统功能的不可用,但是常见的情况是,系统中某一独立功能单元或包含局部冗余的功能单元并不是出现完全不可用状态,而是处于性能退化过程

收稿日期:2005-08-29

作者简介:陈玲(1977-),男(汉族),湖北襄樊,讲师,博士研究生,研究方向为核动力装置维修工程;蔡琦(1962-),男(汉族),广东潮州,教授,博士生导师;蔡章生(1935-),男(汉族),湖南攸县,教授,博士生导师。

中,系统仍然具有一定的完成部分任务需求的能力.对于这类单元处于部分失效状态的典型系统,如何进行技术状态评估,是本文研究的主要问题.

1.2 部分失效

核电站可靠性数据系统将组件的部分失效定义为:“部分表现为失效,或认为组件功能丧失”.这种失效模式为:组件虽然还能完成其功能,但部分能力丧失影响到其达到期望性能^[3].核动力装置中的大多数流体系统组件,如泵、电动阀和止回阀都存在部分失效的可能,这些组件能完成其预计的功能,但有可能达不到由装置最终安全分析报告 FSAR 或技术规范描述的成功临界值.文献[4]表明,由组件的功能降额引起的部分失效大约占全部失效的 74%.

船用核动力装置,在航行过程中,为了完成任务、甚至为了自救,系统或设备处于降额运行状态的现象更为普遍,即其系统处于部分失效状态的概率更高.因此,研究部分失效条件下的 NPP 技术状态评估,对船用堆具有更重要的意义.

2 模糊逻辑与二元逻辑

核动力装置的概率安全评价(PSA)方法,主要采用事件树/故障树模型来描述潜在事故情况及其频率.然而,采用传统的事件树/故障树方法有一个突出的问题,认为系统若不能达到规定的性能水平(成功临界值)则认为不可用,即限于二元逻辑,对于普遍存在的部分失效问题却缺乏有效的处理方法.

对于部分失效问题,可采用模糊逻辑技术将二元逻辑树分解成组件的更详细的模糊状态.将组件的物理特性用其模糊状态的组合来表示,则系统的状态依赖于组件的模糊状态,通过模糊逻辑的运算,可得出组件部分失效后系统所处的技术状态.假定某泵的流量是 20m³/s,现在的流量是 18m³/s,按传统的二元逻辑,该泵处于故障状态;但如果采用模糊逻辑,该泵完成任务的可能性则很高(成功的隶属度 0.9),显然模糊逻辑更能准确反映设备的技术状态.

考虑图 1 所示的简单串联系统,阀 VA、泵 PA 均处于部分失效状态:阀 VA 降额到其能力的 75%,即可通过流量为额定流量的 75%;泵 PA 降额到其额定能力的 65%.假定泵和阀均有三种模糊状态:u₁(全流量 100%)、u₂(部分流量 50%)、u₃(无流量 0),这三种状态之间没有明显的界限,可以从一种状态逐渐转变到另一种状态,其隶属函数均如图 2 所示.

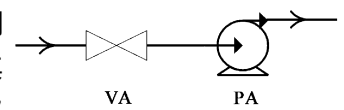


图 1 简单串联系统

可确定阀 VA 和泵 PA 的模糊子集分别为:

$$VA = \frac{0.5}{u_1} + \frac{0.5}{u_2} + \frac{0}{u_3}; \quad PA = \frac{0.3}{u_1} + \frac{0.7}{u_2} + \frac{0}{u_3}.$$

整个串联系统的状态为:

$$VA \quad PA = \frac{0.3}{u_1} + \frac{0.5}{u_2} + \frac{0}{u_3}.$$

即系统的输出性能为:

$$0.3 \times 100\% + 0.5 \times 50\% + 0 \times 0\% = 55\%.$$

而按传统的二元逻辑,系统处于完全失效状态;通过模糊逻辑的运算,可将部分失效对系统的影响定量化,确定系统的性能系数降为 0.55.

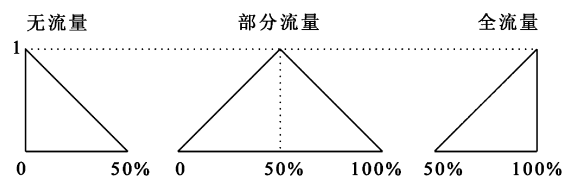


图 2 隶属函数

3 实例分析

核动力装置为了增加系统可靠性,普遍采用局部冗余的并联结构^[5],图 3 为 NPP 的典型回路:两支路各有一个闸阀、两台泵、两个止回阀;闸阀 Z1、Z2,泵 PA、PB、PC、PD,止回阀 ZA、ZB、ZC、ZD.

3.1 模糊逻辑计算

对图 3 所示典型系统,首先分析在已知各设备的性能降额情况下,通过模糊逻辑运算规则,定量计算系统性能的改变.假定某次重大事故之后,系统降额运行,各设备所处状态为:止回阀 ZA、ZC 完全正常;ZB、ZD 部分失效,流量降为 80%;PA 部分失效,流量降为 75%;PB 完全正常;Z1 部分失效,流量降为 80%;PC 完全失效;PD 部分失效,流量降为 90%;Z2 部分失效,流量降为 75%.

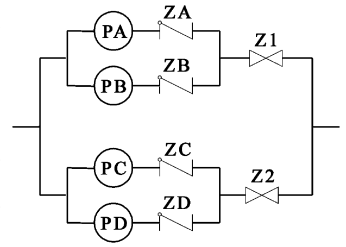


图 3 NPP 典型系统

假定所有泵和阀均有三种功能状态,即全流量、部分流量、无流量,三种状态之间没有明显的界限,可以从一种状态逐渐转变到另一种状态,其隶属函数如图 2 所示,可求出当前流量对三种状态的隶属度.则各设备的模糊子集分别为:

$$\begin{aligned}
 ZA &= ZC = \frac{1}{u_1} + \frac{0}{u_2} + \frac{0}{u_3}; & ZB &= ZD = \frac{0.6}{u_1} + \frac{0.4}{u_2} + \frac{0}{u_3}; & PB &= \frac{1}{u_1} + \frac{0}{u_2} + \frac{0}{u_3}; \\
 PA &= \frac{0.5}{u_1} + \frac{0.5}{u_2} + \frac{0}{u_3}; & PC &= \frac{0}{u_1} + \frac{0}{u_2} + \frac{1}{u_3}; & PD &= \frac{0.8}{u_1} + \frac{0.2}{u_2} + \frac{0}{u_3}; \\
 Z1 &= \frac{0.6}{u_1} + \frac{0.4}{u_2} + \frac{0}{u_3}; & Z2 &= \frac{0.5}{u_1} + \frac{0.5}{u_2} + \frac{0}{u_3}.
 \end{aligned}$$

使用与上例相同的方法,将模糊逻辑量化,可分别得出两条环路性能的模糊子集:

$$C1 = [(PA \quad ZA) \quad (PB \quad ZB)] \quad Z1; \quad C2 = [(PC \quad ZC) \quad (PD \quad ZD)] \quad Z2.$$

计算可得 $C1 = \frac{0.6}{u_1} + \frac{0}{u_2} + \frac{0}{u_3}$,其流量为 $0.6 \times 100\% = 60\%$; $C2 = \frac{0.5}{u_1} + \frac{0.2}{u_2} + \frac{0}{u_3}$,其流量为 $0.5 \times 100\% + 0.2 \times 50\% = 60\%$;

两条支路的流量均可达到原有流量的 60%. 两条支路并联起来后系统的模糊子集为:

$$C = C1 \quad C2 = \frac{0.6}{u_1} + \frac{0.2}{u_2} + \frac{0}{u_3}.$$

系统的流量为 $0.6 \times 100\% + 0.2 \times 50\% = 70\%$.

即在上述已知条件下,系统的性能降为原来的 70%.

3.2 模糊综合评价

已知各设备的隶属函数,也可采用模糊综合评估方法对系统的技术状态进行评价^[6],但困难在于定量确定各设备间的权重,常用的方法如专家打分法、层次分析法等在核动力装置中的适用性都较差.本文根据系统的故障树分析确定各设备的权重:

$$A = [0.0833, 0.0833, 0.0833, 0.0833, 0.0833, 0.0833, 0.0833, 0.0833, 0.1667, 0.1667];$$

则可直接进行模糊综合评估的计算:

$$\begin{aligned}
 B &= A \cdot R = A * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.6 & 0.6 & 1 & 0.5 & 0 & 0.8 & 0.6 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.4 & 0 & 0.5 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\
 &= [0.6417, 0.2450, 0.0833].
 \end{aligned}$$

即采用模糊综合评价方法,系统的性能降为 $0.6417 \times 100\% + 0.2450 \times 50\% = 76.42\%$.

4 结论

以上实例分析表明,两种方法都能定量确定系统性能的降额,且计算结果比较接近;但模糊综合评估方法需要定量确定设备间的权重系数,增加了评估结果的不确定性.因此,模糊逻辑的直接运算方法,在进行部分失效条件下的 NPP 技术状态评估时,具有更强的适用性,其计算方法简便,计算结果可信度更高.

本文将模糊数学的基本理论应用于部分失效情况下的 NPP 技术状态评估,定量评判了组件部分失效对系统整体性能的影响.核动力装置的技术状态评估中的模糊性普遍存在,受 NPP 可达性差及现有状态监测技术条件所限,其状态监测难以为技术状态综合评估提供全面、足够信息.评估信息的贫乏、不完整,要求在进行评估建模时,必须考虑数据的模糊性.因此,应对模糊数学在 NPP 技术状态评估的应用进行深入研究,以彻底解决 NPP 技术状态评估的模糊性问题.

为实现技术保障的信息化,NPP 的技术状态综合评估,应结合模糊数学、灰色理论解决数据不确定性问题,结合神经网络技术解决 NPP 多状态下的多输入多输出问题,最终结合仿真软件建立一套完整的评估系统,实现在各种环境下及时准确的评价装置的技术状态,为 NPP 科学使用管理服务.

参考文献:

- [1] 金家善.船用蒸汽动力装置技术状态评估方法研究[D].武汉:海军工程大学,2003.
Jin Jiashan. Technical condition evaluation on marine steam power plant[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2003.
- [2] 陈小虎.舰船蒸汽动力装置功能可靠性研究[D].武汉:海军工程大学,2002.
Chen Xiaohu. Functional reliability research of marine steam power plant[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2002.
- [3] NPRDS Reporting Guidance Manual[R]. INPO,1994.
- [4] Ni T,Modarres M. Partial Failure effects of Safety Systems and Components in Light Water Reactor[A]//The 1995 Joint ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference. Honolulu, Hawaii,1995.
- [5] 赵新文.舰艇核动力一回路装置[M].北京:海潮出版社,2001.
Zhao Xinwen. Primary Circuit Plant of Nuclearpowered Warship[M]. Beijing: Hai-Chao Publishing Company,2001.
- [6] 许友林.模糊信息处理在舰艇等级评估中的应用[J].模糊系统与数学,2000,14(2):100-106.
Xu Youlin. Fuzzy information processing used in warship's stages assessment[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000,14(2):100-106.