

基于动态时间弯曲算法的核电厂瞬态识别方法研究

白晓明¹, 王新军¹, 艾红雷¹, 卫东², 郑连纲¹, 谢海¹

(1.中国核动力研究设计院 反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610213;

2.环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100010)

摘要: **目的** 对核电厂运行瞬态识别进行有效识别。**方法** 基于动态时间弯曲算法, 计算运行瞬态中温度、压力和流速数据与设计瞬态中对应数据之间的相似程度, 通过定义等效相似度反应温度、压力和流速的不同权重。在完成当前运行瞬态与各条设计瞬态之间的相似程度后, 通过比较相似度值, 将运行瞬态归类为设计瞬态。**结果** 通过对“华龙一号”核电厂的设计瞬态和基于设计瞬态摄动获得的虚拟运行瞬态进行验证, 文中提出的方法能够快速有效地对运行瞬态进行分类, 结果显示, 有95%以上的运行瞬态能够被正确识别。**结论** 基于动态时间弯曲算法和等效相似度建立的瞬态识别方法具有高效、准确等优点, 能够有效应用于核电厂的疲劳监测系统。

关键词: 瞬态识别; 疲劳监测; 核电厂; 动态时间弯曲

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.017

中图分类号: TM623 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0082-04

A Dynamic Time Warping Algorithm Based Transient Identification Method in Nuclear Power Plants

BAI Xiao-ming¹, WANG Xin-jun¹, AI Hong-lei¹, WEI Dong², ZHENG Lian-gang¹, XIE Hai¹

(1.Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China; 2.Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100010, China)

ABSTRACT: Objective To identify the transients in the nuclear power plant effectively. **Methods** Based on the dynamic time warping algorithm, the similarity between the temperature, pressure and flow rate in the operational transient and these in the design transient was calculated, respectively. Meanwhile, an effective similarity for the transient was defined to represent the different weight factor of temperature/pressure and flow rate. After the effective similarities for all the design transients were calculated, the current operational transient can be classified in to the best similar design transient. **Results** The design transient of Hualong 1 nuclear power plant and virtual operation transient obtained based on disturbance of design transient verified that the method proposed in this paper could effectively classify the operation transient. In the verification, more than 95% transients could be identified correctly. **Conclusion** Based on the DTW based algorithm and effective similarity, a transient identification method is proposed in present paper, this method is effective and accurate, and can be used in the fatigue monitor system of nuclear power plant.

KEY WORDS: transient identification; fatigue monitor; nuclear power plant; dynamic time warping

在核电厂的运行过程中,关键设备和管道系统的健康状态需要通过疲劳监测系统监测。由于核电厂运行瞬态的波动变化是导致设备和管道疲劳的重要因素,因此对运行瞬态的识别和分类是核电厂疲劳监测系统的关键技术。以美国核电厂延寿为例,延寿相关要求 10CFR54 中明确规定了需要进行疲劳分析,同时 NUREG-1801 中给出了满足 10CFR54 要求的指南。指南要求在延寿申请中,需要提供导致明显疲劳使用系数改变的瞬态发生次数。综上所述,通过瞬态统计方法获取电厂运行中真实瞬态发生的次数,对电厂的疲劳监测及延寿工作都具有重要的意义。

在核电厂的设计阶段,通过计算分析能够得到不同工况下的设计瞬态,但电厂的实际运行瞬态往往与设计瞬态相差较大,传统的瞬态识别方法难以直接基于设计瞬态进行。近年来,基于模式识别方法发展较快,并吸引了大量研究者进行相关的研究^[1-9]。人工神经网络、支持向量机、粒子群优化、隐马尔可夫模型和模糊熵方法等多种方法被应用于瞬态识别技术。大多数基于数据的方法都需要庞大的数据作为训练集,这在核电厂实际使用中并不可行。为解决这一问题,文中提出了基于动态时间弯曲(Dynamic Time Warping, DTW)算法以设计瞬态为参考进行瞬态识别的方法。在该方法中,以设计瞬态为基准,通过计算运行瞬态与设计瞬态之间的等效 DTW 距离,实现对运行瞬态准确高效地自动识别。该方法的研究对疲劳监测系统中基于循环次数的疲劳计算具有重要意义。

1 理论及方法

1.1 动态时间弯曲算法

动态时间弯曲算法是一种计算两组时间序列数据之间相似度的算法,该算法的核心思想是将两组数据的时间轴建立非线性对应关系,通过将时间序列拉伸或压缩来匹配计算两个时间序列之间的相似度,其原理如图 1 所示。图中的实线表示两个时间序列,虚线连接序列之间的相似点。DTW 使用所有相似点之间的距离综合衡量两个时间序列之间的相似性。与传统基于欧式距离计算相似度的方法不同,DTW 方法能够有效地计算时间轴长度不统一时数据之间的相似度,因此该算法被广泛应用于语音识别等领域。

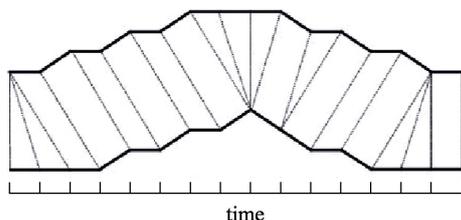


图 1 动态时间弯曲算法

1.2 瞬态分类方法

在核电厂设计过程中,需要基于不同工况的仿真结果建立设计瞬态列表。在设计瞬态中,通常包括温度、压力和流速的数据,即设计瞬态 $TR_n^{de}(t)$ 可以表示为:

$$TR_n^{de}(t) = [T_n(t), P_n(t), F_n(t)], n = [1, N] \quad (1)$$

式中: n 代表设计瞬态的序号,对应不同的情况(如反应堆升温、功率提升等); N 为设计瞬态总数; $T_n(t), P_n(t), F_n(t)$ 分别为第 n 条设计瞬态对应的温度、压力和流速的时间序列数据。其中温度、压力和流速等具有内在相关性,但不影响文中方法的使用。

在核电厂运行过程中,通过传感器采集的数据可获取核电厂运行状态中的真实瞬态,即运行瞬态 $TR^{op}(t)$ 可表示为:

$$TR^{op}(t) [T(t), P(t), F(t)] \quad (2)$$

瞬态分类的目标即将运行瞬态归类为对应的设计瞬态,并统计瞬态发生的次数,以便进行后续的疲劳分析。为将运行瞬态进行分类,首先利用动态时间弯曲算法计算运行瞬态 $TR^{op}(t)$ 中各个时间序列数据 $T(t), P(t), F(t)$ 与 N 个设计瞬态 $TR_n^{de}(t)$ 中对应数据的相似度,其结果可以表示为:

$$S_n = [S_n^T, S_n^P, S_n^F], n = [1, N] \quad (3)$$

式中: n 代表当前运行瞬态与第 n 条设计瞬态之间的相似度; S_n^T, S_n^P, S_n^F 分别对应温度、压力和流速的相似程度,可通过式(4)计算:

$$S_n^X = DTW[X(t), X_n(t)], X = T, P, F \quad (4)$$

为考虑瞬态分类中温度、压力和流速的不同权重,通过等效相似度 \bar{S}_n 计算:

$$\bar{S}_n = \sqrt{\lambda^T (S_n^T)^2 + \lambda^P (S_n^P)^2 + \lambda^F (S_n^F)^2}, n = [1, N] \quad (5)$$

式中: λ^T, λ^P 和 λ^F 分别为温度、压力和流速的权重因子。这些因子需要根据核电厂瞬态的实际情况进行验证并确定,对于压水堆核电厂,通常取 $\lambda^T > \lambda^P > \lambda^F$ 。

1.3 瞬态在线识别

基于 DTW 算法,建立了瞬态在线识别流程,如图 2 所示。需要注意的是,在瞬态识别过程中,用于进行瞬态比较的参考输入不仅包括设计瞬态,还包括已经被识别的运行瞬态。参考瞬态会随着瞬态识别数量的增加而不断增大,并有助于提高瞬态识别的正确率。此外,如果运行瞬态不能被识别为设计瞬态,将建立一个新运行瞬态的列表,用于后续的瞬态识别。

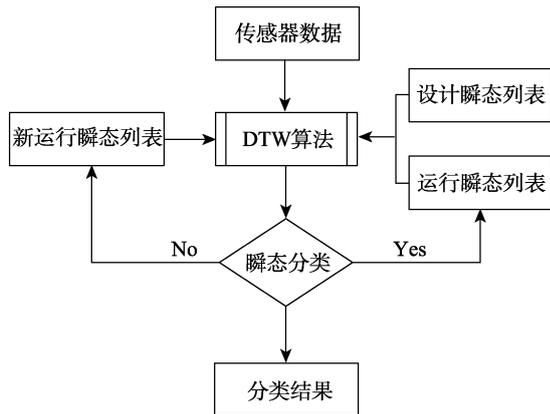


图2 在线识别流程

2 结果及分析

文中采用“华龙一号”的 40 条设计瞬态作为参考瞬态构建数据库。由于目前“华龙一号”尚无运行数据，通过以下方式构建虚拟瞬态：

1) 对设计瞬态中的折线点在横轴（时间）上进行摄动，摄动范围为设计瞬态的±50%。如某设计瞬态中两个折线点之间的时间间隔为 100 s，摄动后其时间间隔为 50~150 s 之间的随机数。

2) 对设计瞬态中的折线点在纵轴（温度或压力）上进行，摄动范围为设计瞬态的±25%。如某设计瞬态中两个折线点之间的温差为 100 °C，摄动后其温差为 75~125 °C 之间的随机数。

3) 对摄动之后的折线添加高斯白噪声，模拟传感器采集过程中的噪声影响。

需要注意的是，每条虚拟运行瞬态均由相应的设计瞬态变化而来，因此具有标签。通过对这些瞬态的识别，能够获得当前方法的识别率。

为综合考虑各类参数的影响，本报告在计算等效相似度时引入了温度、压力和流速的权重因子。这些因子需要根据实际核电厂瞬态的情况进行标定，以确保后续使用的瞬态识别精度。对于“华龙一号”等压水堆，流量对瞬态分类的贡献很小，并且在一些设计瞬态中并未对流量参数进行描述，因此本报告中假设流量权重因子 $\lambda^F = 0$ 。对于温度和压力权重因子对识别率的影响见表 1。由此可见，在不考虑压力影响时，瞬态识别率较低；在考虑压力影响后， λ^P / λ^T 在 0.25~1 之间均能获得 90%左右的识别率，稳定性较强。因此，文中对温度、压力和流速的权重因子分别取为 $\lambda^T = 1$ ， $\lambda^P = 1$ 和 $\lambda^F = 0$ 进行计算，图 3 和图 4 中为运行瞬态的计算过程。

表 2 权重因子对瞬态识别率的影响

λ^P / λ^T	0	0.25	0.5	0.75	1
识别率%	74.80	91.20	91.40	90.20	90.20

图 3 中纵坐标为当前瞬态与各条设计瞬态之间的 DTW 距离，当 $\lambda^T = 1$ ， $\lambda^P = 1$ 和 $\lambda^F = 0$ 时，等效相似度 \bar{S}_n 对应图 3 中各点到原点的距离。在图 3 中第 30 号瞬态明显比其他瞬态更接近原点，因此当前瞬态被识别为 30 号瞬态。当前运行瞬态与 30 号设计瞬态的温度和压力的对比见图 4，可见虽然运行瞬态在时间轴和温度、压力轴上与设计瞬态都有较大的偏移，运行瞬态能够被有效识别。

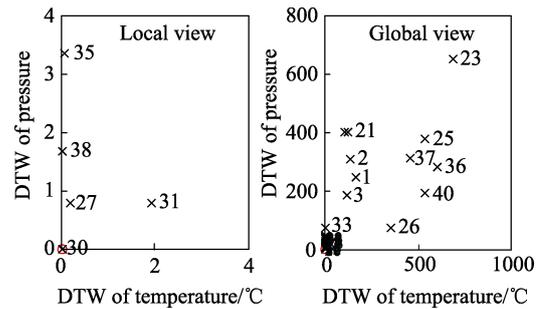


图3 温度和压力的 DTW 相似度

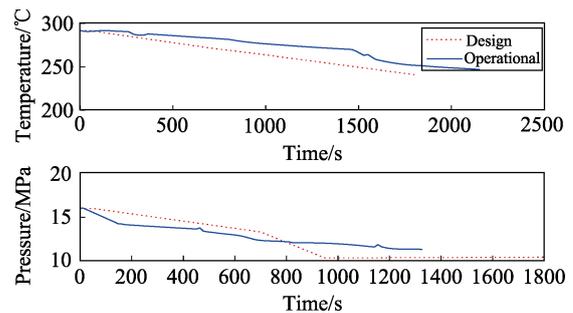


图4 运行瞬态与设计温度的对比

3 结语

文中基于动态时间弯曲算法提出了一种进行核电厂瞬态识别的方法，该方法能够利用设计瞬态作为参考瞬态对运行瞬态进行识别。由于该方法不需要过多地运行瞬态进行模型训练，因此更适用于新型核电厂。同时，该瞬态识别方法是核电厂疲劳监测系统的重要组成部分。

参考文献：

[1] MOL A C A, MARTINEZ A S, SCHIRRU R. A Neural Model for Transient Identification in Dynamic Processes With “Do Not Know” Response[J]. Annals of Nuclear Energy, 2003, 30: 1365-1381.

[2] Mol A C A, Almeida J C S, Pereira C M N A, et al. Neural and Genetic-based Approaches to Nuclear Transient Identification Including “Don’t Know” Response[J]. Progress in Nuclear Energy, 2006, 48: 268-282.

[3] MEDEIROS J A C C, SCHIRRU R.. Identification of

- Nuclear Power Plant Transients Using the Particle Swarm Optimization algorithm[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2008, 35: 576-582.
- [4] GOTTLIEB C, ARZHANOV V, GUDOWSKI W. Feasibility Study on Transient Identification in Nuclear Power Plants Using Support Vector machines[J]. *Nuclear Technology*, 2006, 155: 67-77.
- [5] KWON K C. HMM-based Transient Identification in Dynamic Process[J]. *Transactions on Control, Automation, and Systems Engineering*, 2000(2): 40-46.
- [6] KWON K C, KIM J H. Accident Identification in Nuclear Power Plants Using Hidden Markov Models[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1999, 12: 491-501.
- [7] KWON K C, KIM J H, SEONG P H. Hidden Markov Model-based Real-time Transient Identifications in Nuclear Power Plants[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2002, 17: 791-811.
- [8] 常远, 郝轶, 黄晓津, 等. 基于模糊熵的核电站瞬态识别方法[J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(9): 1640-1645.
- [9] 常远, 黄晓津, 李春文, 等. 基于模糊熵的核电站瞬态分段识别方法[J]. *核动力工程*, 2014, 35(1): 106-109.