

基于二维寻优的核电站松动件定位分析*

曹衍龙, 何元峰, 程实, 杨将新

(浙江大学现代制造工程研究所 杭州, 310027)

摘要 为快速、准确地估算出核电站一回路松脱零部件的碰撞位置, 提出了一种基于二维寻优的松动件定位方法。根据各个传感器与松动件碰撞位置关系, 建立松动件定位分析模型, 将松动件定位问题转化为一个二维寻优问题; 采用遗传算法进行寻优, 实现松动件的位置估计。该方法避免了波速测量误差对定位精度的影响, 提高了估算精度。分别用提出方法与三角形定位法和扫描定位法处理松动件碰撞模拟实验数据, 对比分析定位误差和计算耗时表明, 所提出的方法具有更高的定位精度和计算效率。

关键词 松动件; 定位分析; 二维寻优; 遗传算法

中图分类号 TL353

引言

作为整个核电站系统的重要组成部分, 核电站一回路系统内部存在大量的螺钉、螺母等连接件, 虽在安装之处对其进行了防脱措施, 但在高压蒸汽以及高速水流的不断冲击下仍会出现松动甚至跌落。根据美国核管理委员会 RG. 133 标准, 这些部件定义为松动件。松脱零部件的存在严重影响反应堆的运行稳定性和可靠性, 因此根据《核反应堆保护系统安全准则》的规定, 需要运用松动件监测系统 (loose parts monitoring system, 简称 LPMS) 监测松动件, 并通过测得的振动信号估计松动件位置^[1-2]。

松动件跌落位置估计的问题受到广大学者关注, 一般都是在钢制平板和钢球的模拟实验基础上, 根据冲击信号到达各个传感器的时间差进行计算, 根据时间差获取方法的不同分为时频分析方法和时域分析方法。

Kim Y B^[3]提出了一种利用 Wigner-Ville 分布来确定不同通道的松动件撞击信号时间差的时频分析方法, 该方法具有较高精度, 但是计算量很大, 且时频线需要手工绘制, 不利于实现自动分析。Park J H^[4]采用坐标扫描方法结合信号的 WV 分布进行定位, 虽然精度较高但计算相当耗时。Kryter 和 Shahrokhi^[5]提出了一种利用时间差和阻尼值估计

不同通道松动件撞击信号时间差的时域分析方法。Park G Y^[6]等提出一种基于能量轮廓的时域分析方法。对于时域分析方法和时频域分析方法, 定位精度均受到时间差的影响, 其中时域分析方法的定位精度还受到弹性波传播速度测定误差的影响。

笔者在扫描定位法的基础上, 将松动件定位问题转化为一个二维平面寻优问题, 采用遗传算法 (genetic algorithms, 简称 GA) 进行寻优定位分析, 避免了波速测定的不确定性影响。通过模拟实验数据分析, 对比了不同定位方法的定位效果。

1 核电站松动件定位分析模型

核电站中的主压力容器的主要部分为圆柱体, 在定位分析中, 一般将圆柱体展开成一个平面并建立坐标系, 如图 1 所示。假设松动件撞击点的真实坐标为 $P(x_P, y_P)$, 展开平面上共放置 N 个加速度传感器 ($N \geq 3$, 传感器个数越多, 冲击信号监测越全面, 图 1 中放置了 6 个传感器)。设传感器的坐标为 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, 6$), 平面上任意一点 Q 的坐标为 (x_Q, y_Q) , 则 Q 点与任意两个传感器之间的距离差为

$$D_{(Q,i,j)} = \sqrt{(x_Q - x_i)^2 + (y_Q - y_i)^2} - \sqrt{(x_Q - x_j)^2 + (y_Q - y_j)^2} \quad (1)$$

其中: $D_{(Q,i,j)}$ 为点 Q 到传感器 i 和 j ($i, j = 1, 2, \dots, 6$)

* 国家自然科学基金资助项目(编号 51175466); 浙江省钱江人才计划资助项目(编号: 2011R10016); 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(编号: 2011CB706505)

收稿日期: 2011-09-07; 修改稿收到日期: 2011-12-26

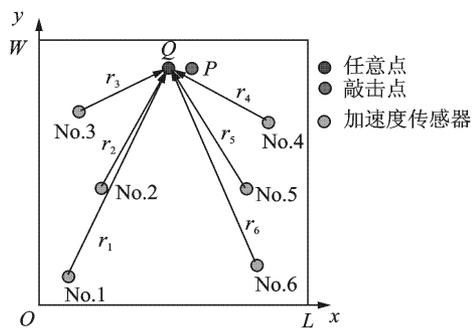


图1 松动件定位示意图

且 $i \neq j$)的距离差。

由于 Q 点到传感器2和传感器3的距离差即传感器2和传感器3相对于传感器1的距离之差,即 $r_2 - r_3 = (r_1 - r_2) - (r_1 - r_3)$,为了计算 Q 点到各个传感器的相对距离,同时为了避免数据冗余,将传感器1作为参考传感器,计算 Q 点到传感器1和到传感器 i ($i=2,3,\dots,6$)的距离之差。按照式(1)计算传感器 i 到传感器1的距离可获得任意点 Q 到各个传感器的距离差为

$$D_{Qi} = D_{(Q,i,1)} \quad (i=2,\dots,6) \quad (2)$$

同理,可求得撞击点 $P(x_P, y_P)$ 与各个传感器的距离差为

$$D_{Pi} = D_{(P,i,1)} \quad (3)$$

定义 d_{Qi} 为 D_{Pi} 与 D_{Qi} 的比值

$$d_{Qi} = \frac{D_{Pi}}{D_{Qi}} = \frac{D_{(P,i,1)}}{D_{(Q,i,1)}} \quad (4)$$

假设弹性波在传播介质中的传播速度为 c ,第 i 个传感器接收到冲击信号的时刻为 T_i ,则可得实际碰撞点 P 与各个传感器相对于传感器1的距离差为

$$D'_{Pi} = ct_{(i,1)} \quad (5)$$

其中: $t_{(i,1)} = T_i - T_1, i=2,\dots,6$ 。

将式(5)代入式(4),得到估计点的距离差和实际碰撞点距离差的比值为

$$d'_{Qi} = \frac{D'_{Pi}}{D_{Qi}} = c \cdot \frac{t_{(i,1)}}{D_{(Q,i,1)}} \quad (6)$$

其中: d'_{Qi} 为估计点位置和实际点位置差别的大小,全部 d'_{Qi} 构成数组 d'_Q ,它的方差为

$$\sigma_Q = \sum_{i=2}^6 (d'_{Qi} - \bar{d}_Q)^2 \quad (7)$$

其中: $\bar{d}_Q = \frac{1}{5} \sum_{i=2}^6 d'_{Qi}$; σ_Q 为方差。

σ_Q 的值越小, d'_Q 各元素的大小越相近。理想情况下, P 点与 Q 点的坐标相同时,有 $D_P = D_Q$,即 D'_P 与 D_Q 对应元素之比为1,此时 d'_Q 的各元素大小相等,

$\sigma_Q = 0$,有

$$c \frac{t_{(2,1)}}{D_{(Q,2,1)}} = c \frac{t_{(3,1)}}{D_{(Q,3,1)}} = c \frac{t_{(4,1)}}{D_{(Q,4,1)}} = c \frac{t_{(5,1)}}{D_{(Q,5,1)}} = c \frac{t_{(6,1)}}{D_{(Q,6,1)}} \quad (8)$$

在实际计算过程中,由于不可避免的测量等误差的存在, σ_Q 只能接近于0;因此, σ_Q 的值越小,表示预测点越接近实际撞击点。可将松动件定位问题转化为以下寻优问题

$$\begin{cases} \min \sigma_Q \\ 0 < x_Q < L \\ 0 < y_Q < W \end{cases} \quad (9)$$

其中: σ_Q 为式(7)计算的距离向量的方差; L 和 W 分别为压力容器展开后平面的长度和宽度。

在式(8)中,将介质中弹性波的波速 c 作为一个常量提取出来;在式(7)计算方差之前先对 d'_Q 进行归一化处理,从式(7)到式(9)的定位分析过程中波速对定位问题不存在影响。这样既省却了波速的标定,也消除了波速测定误差对定位精度的影响。

2 基于遗传算法的定位方法的实现

遗传算法^[7-8]的本质是一种迭代算法,即对某一随机产生或特定的初始解集进行编码,然后利用选择、复制、交叉和变异等特定操作规则,通过预先设定的适应度函数计算每个个体的适应度值,按照“优胜劣汰,适者生存”的原则,对个体进行筛选,使得适应度高的个体被保留,适应度低的个体则被淘汰,这样就保证了新的群体既继承了上一代的信息,同时优于上一代。如此反复循环,引导群体向“最适应环境”的个体逼近,经过逐代进化,最终收敛到满足条件的最优解。

基于GA的定位分析方法的基本程序框图如图2所示,主要步骤为:

1) 采用二进制坐标编码。模拟实验钢板尺寸为 $6\ 470\text{ mm} \times 2\ 010\text{ mm}$,即坐标平面满足 $0 < x < 6\ 470, 0 < y < 2\ 010$,为保证编码精度在 1 mm 以内, x 方向采用13位编码, y 方向采用11位编码。如坐标点(550,850)的二进制编码为

$$000101011100001101100010$$

共24位,其中前13位为 x 坐标,后11位为 y 坐标。

2) 根据收敛性和算法效率等因素,将种群大小设置为100;初始种群则根据 x, y 预先设定的范围通过随机函数随机产生;适应度值根据式(9)进行计算

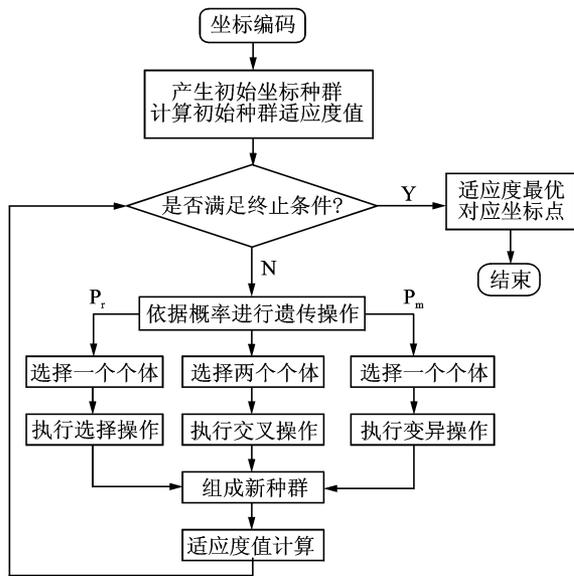


图2 GA寻优的程序框图

3) 终止条件对于算法的收敛性、搜索效率以及寻优结果的优劣等有重要影响,为了获得全局最优结果,这里的终止条件设置为两方面:种群中的最优个体对应的适应度值一方面要满足设定的阈值,另一方面要满足在一定的迭代代数内的振动幅度小于设定的阈值。只有当两个条件同时达到时,寻优过程才会结束,此时的最优个体即为所求结果。

3 模拟实验和结果分析

模拟实验在长、宽、高为 $6\,470\text{ mm} \times 2\,010\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ 钢板上进行。为了模拟核电站现场中的传感器布置,图3中的两排传感器按照相同的间隔错开布置;为了尽量减少环境噪声的影响,在钢板四角均由防震阻尼装置(减振器)支撑,如图3所示。实验中认为波在钢板各个方向的传播速度是一致的。由

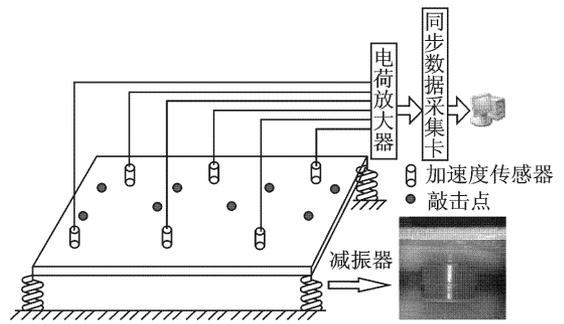


图3 模拟实验示意图

于定位分析中测得信号起振点的确定影响分析结果,因此实验采用同步数据采集卡避免非同步采集卡的分时测量误差,减少实验设备对实验结果的影响。

为了分析松动件的质量和跌落位置对定位效果的影响,在实验中采用跌落物质量为 679 g 和 $2\,088\text{ g}$ 的钢球,分别在9个不同位置进行了敲击实验;为了便于对比分析,实验中钢球距离钢板平面的原始高度均为 30 cm 。

为了对比不同定位方法的定位效果,采用3种定位分析方法对实验数据进行分析。方法1为笔者提出的基于二维寻优的松动件定位分析方法;方法2为扫描定位分析方法,其中扫描步长为 1 mm ;方法3为三角形定位分析方法。真实坐标和计算坐标中的数值分别对应钢板坐标系的 x 和 y 的坐标值。在三角形定位分析方法中,敲击点位于三角形内部和外部的定位精度不同,且位于内部的定位精度高。在定位分析中,首先任意选择3个传感器进行定位分析,在得到估计位置后,计算估计的位置和对应的传感器组成的三角形中心的距离,选择其中距离最小的一组传感器对应的定位结果作为最终定位分析结果。3种方法的定位分析结果如表1和表2所示。3种定位方法的单次定位耗时如表3所示。

表1 质量为 679 g 钢球对应的定位分析结果

mm

编号	真实坐标	方法1		方法2		方法3	
		计算坐标	误差	计算坐标	误差	计算坐标	误差
1	(2 050,550)	(2 035,503)	49	(2 039,497)	54	(2 064,610)	62
2	(1 150,850)	(1 150,817)	48	(1 087,784)	91	(1 126,855)	24
3	(550,1 150)	(604,1 126)	59	(524,1 089)	66	(494,1 057)	108
4	(4 450,850)	(4 448,863)	13	(4 462,846)	13	(4 486,817)	49
5	(5 050,1 150)	(4 993,1 130)	60	(5 061,1 080)	71	(4 971,1 099)	94
6	(3 550,1 150)	(3 571,1 108)	47	(3 572,1 106)	49	(3 445,1 218)	125
7	(2 950,1 150)	(2 925,1 131)	31	(2 938,1 121)	31	(2 905,1 206)	72
8	(3 250,1 450)	(3 258,1 456)	10	(3 260,1 457)	12	(3 279,1 449)	29
9	(1 750,1 450)	(1 738,1 508)	59	(1 728,1 385)	69	(1 800,1 525)	90

表2 质量为2 088 g钢球对应的定位分析结果

编号	真实坐标	mm					
		方法1		方法2		方法3	
		计算坐标	误差	计算坐标	误差	计算坐标	误差
1	(2 050,550)	(2 041,519)	32	(2 041,521)	30	(2 002,478)	87
2	(1 150,850)	(1 213,820)	70	(1 133,740)	111	(1 157,793)	57
3	(550,1 150)	(616,1 191)	78	(474,1 169)	78	(571,1 184)	40
4	(4 450,850)	(4 472,868)	28	(4 473,867)	29	(4 466,851)	16
5	(5 050,1 150)	(5 088,1 200)	63	(4 985,1 113)	75	(4 944,1 076)	129
6	(3 550,1 150)	(3 539,1 130)	23	(3 526,1 177)	36	(3 503,1 197)	67
7	(2 950,1 150)	(2 945,1 148)	5	(2 940,1 128)	24	(2 906,1 192)	61
8	(3 250,1 450)	(3 260,1 440)	12	(3 263,1 458)	15	(3 196,1 514)	84
9	(1 750,1 450)	(1 757,1 431)	20	(1 758,1 432)	20	(1 814,1 521)	96

表3 3种定位方法的单次定位耗时 s

定位方法	方法1	方法2	方法3
单次定位耗时	6.1	740.3	1.8

为了直观比较方法1~方法3的计算误差,根据表1和表2绘制误差变化比较如图4所示。可以看出,采用方法1定位,计算结果的最大误差为78 mm,采用方法2定位,计算结果的最大误差为111 mm,采用方法3定位,结果最大误差为129 mm。可见,从整体定位精度来看,方法1和方法2略优于方法3;但从误差数值和误差曲线可知,方法1和方

法2比较稳定,不会由于钢球质量或敲击位置的不同而出现大的波动,方法3的波动则相对较大。

从表3可以看出,方法3定位速度最快,方法2定位速度最慢;方法1和方法3的定位耗时不会随着钢板尺寸的增大出现大的变换,而方法2的定位耗时不仅会与扫描步长的减小而成倍增长,还会随着钢板尺寸的增大而增长。

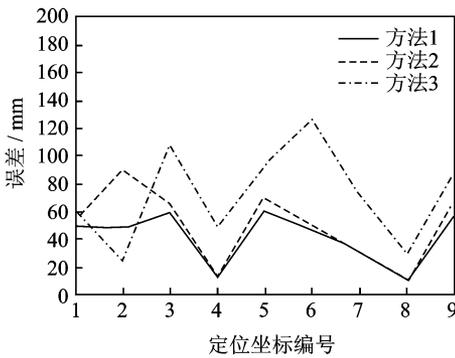
综上所述,方法1在保证定位效率的前提下提高了定位精度,并且针对不同质量以及不同的敲击位置,均具有比较好的定位精度和稳定性。

4 结束语

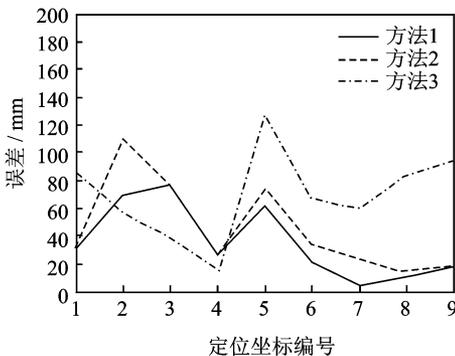
通过分析碰撞位置与传感器距离的关系,避免波速测量误差给定位精度带来的影响;通过遗传算法进行寻优处理,将松动件定位问题转化为一个二维寻优问题。该方法直接对平面内坐标点进行寻优,提高了定位效率。通过模拟实验数据分析,对比三角形定位法、扫描定位法和笔者所提方法的定位效果,验证了所提出方法的可行性和稳定性。

参 考 文 献

[1] Bechtold B, Kunz U. KUES' 95-The modern diagnostic system for loose parts monitoring[J]. Progress in Nuclear Energy, 1999, 34(3):221-230.
 [2] Figedy S, Oksa G. Modern methods of signal processing in the loose part monitoring system[J]. Progress in Nuclear Energy, 2005, 46(3):253-267.
 [3] Kim Y B, Kim S J, Chung H D, et al. A study on technique to estimate impact location of loose part using wigner-ville distribution[J]. Progress in Nuclear Energy, 2003, 43(1-4): 261-266.



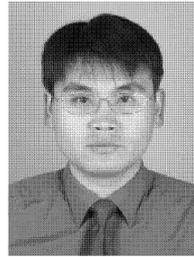
(a) 679 g小球



(b) 2 088 g小球

图4 不同质量小球在不同定位方法下的结果误差比较

- [4] Park J H, Kim Y H. Impact source localization on an elastic plate in a noisy environment[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17: 2757-2766.
- [5] Kryter R C, Shahrokhi F. Summary of studies on methods for detecting, locating, and characterizing metallic loose parts in nuclear reactor coolant system [R]// U. S. Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/CR-2344. Springfield; U. S. Department of Commerce, 1981.
- [6] Park G Y, Cheon S W, Lee C K, et al. An estimation method for impact location of loose parts[J]. Progress in Nuclear Energy, 2005, 48(2006): 360-370.
- [7] 李兵, 杨殿阁, 郑四发, 等. 基于遗传算法的动态优化波叠加噪声源识别方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 99-112.
Li Bing, Zhang Diange, Zheng Sifa, et al. Sound source identification method with dynamic optimal wave superposition algorithm based on genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 99-112. (in Chinese)
- [8] 张良安, 梅江平, 黄田. 基于遗传算法的机器人自动化生产线缓冲区容量分配方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11): 101-106.
Zhang Liangan, Mei Jiangping, Huang Tian. Genetic algorithm-based buffer allocation of a robot production line[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 101-106. (in Chinese)



第一作者简介:曹衍龙,男,1975年11月生,副教授。主要研究方向为信号检测与分析等。曾发表《基于可行稳健性的公差设计方法研究》(《浙江大学学报:工学版》2005年第3期)等论文。

E-mail: sdcaoyl@zju.edu.cn

《振动、测试与诊断》2010年影响因子

根据中国科学技术信息研究所《2011年版中国科技期刊引证报告(核心版)》最新公布,《振动、测试与诊断》2010年影响因子为0.663,在29种航空、航天科学技术类期刊中排名第一。在收录的1998种中国科技核心期刊中(不含港澳台地区),综合评价排名为232名。在此,编辑部衷心感谢广大读者、作者和审稿人对本刊的一贯支持与关怀!

表1 2010年航空、航天科学技术类期刊影响因子

刊名	影响因子		刊名	影响因子	
	数值	排名		数值	排名
振动、测试与诊断	0.663	1	中国空间科学技术	0.291	15
航空学报	0.599	2	测控技术	0.290	16
宇航学报	0.582	3	航天返回与遥感	0.283	17
CHINESE JOURNAL OF AERONAUTICS	0.545	4	空气动力学学报	0.266	18
航空动力学报	0.428	5	强度与环境	0.265	19
计算机测量与控制	0.428	6	航空制造技术	0.250	20
电光与控制	0.409	7	航天控制	0.223	21
推进技术	0.366	8	飞行力学	0.211	22
北京航空航天大学学报	0.354	9	导弹与航天运载技术	0.171	23
固体火箭技术	0.349	10	中国民航大学学报	0.163	24
航天器环境工程	0.329	11	航空精密制造技术	0.160	25
航天器工程	0.321	12	航空计算技术	0.137	26
实验流体力学	0.310	13	飞行器测控学报	0.108	27
南京航空航天大学学报	0.294	14	宇航计测技术	0.090	28
			南昌航空大学学报自然科学版	0.070	29

(数据摘自中国科学技术信息研究所《2011年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,科学技术文献出版社)