



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113074122 B

(45) 授权公告日 2022.04.29

(21) 申请号 202110345774.8

G01D 21/02 (2006.01)

(22) 申请日 2021.03.31

G21C 17/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113074122 A

(56) 对比文件

CN 101685678 A, 2010.03.31

CN 102456419 A, 2012.05.16

(43) 申请公布日 2021.07.06

CN 111794978 A, 2020.10.20

(73) 专利权人 中国核动力研究设计院
地址 610000 四川省成都市双流区长顺大道一段328号

CN 110969315 A, 2020.04.07

CN 110425154 A, 2019.11.08

CN 111749922 A, 2020.10.09

(72) 发明人 蒋兆翔 何攀 刘才学 王瑶
陈祖洋 尹龙

KR 102168403 B1, 2020.10.21

US 2017057667 A1, 2017.03.02

US 6948381 B1, 2005.09.27

(74) 专利代理机构 成都行之专利代理事务所
(普通合伙) 51220

审查员 胡春妍

代理人 李朝虎

(51) Int. Cl.

F04D 15/00 (2006.01)

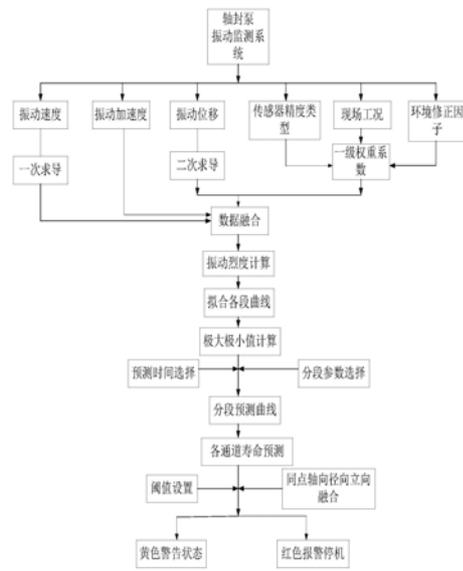
权利要求书4页 说明书14页 附图2页

(54) 发明名称

一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法,其特征在于,包括以下步骤:步骤1:对反应堆轴封泵的监测数据:振动加速度a(t)、振动速度v(t)、振动位移s(t), $T_{now} \geq t \geq T_{init}$;步骤2:确定一级加速度权重系数 Q_a 、一级速度权重系数 Q_v 、一级位移权重系数 Q_d ;步骤3:融合处理,得到融合振动A(t),步骤4:对振动烈度V(t)进行数学拟合处理,得到一个拟合曲线;步骤5:从拟合曲线中筛选出用于预测故障时刻的有效曲线段;步骤6:对有效曲线段进行高阶非线性函数拟合处理,得到对应的预测曲线;步骤7:计算预测曲线与振动烈度阈值线的交点,标记交点对应的时刻为预测故障时刻。



CN 113074122 B

1. 一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:获取初始时刻 T_{Init} 至当前时刻 T_{now} 条件下,对反应堆轴封泵的监测数据,监测数据包括:振动加速度 $a(t)$ 、振动速度 $v(t)$ 、振动位移 $s(t)$, $T_{now} \geq t \geq T_{Init}$;

步骤2:根据振动加速度传感器、振动速度传感器、振动位移传感器的传感器精度类型、现场工况、环境修正因子而确定一级加速度权重系数 Q_a 、一级速度权重系数 Q_v 、一级位移权重系数 Q_d ;

步骤3:将振动加速度 $a(t)$ 、振动速度 $v(t)$ 、振动位移 $s(t)$ 在一级加速度权重系数 Q_a 、一级速度权重系数 Q_v 、一级位移权重系数 Q_d 的约束下进行融合处理,得到融合振动 $A(t)$,并计算融合振动 $A(t)$ 的振动烈度 $V(t)$,振动烈度 $V(t)$ 为融合振动 $A(t)$ 的有效值;

步骤4:对振动烈度 $V(t)$ 进行数学拟合处理,得到一个拟合曲线;

步骤5:从拟合曲线中筛选出用于预测故障时刻的有效曲线段;

步骤6:对有效曲线段进行高阶非线性函数拟合处理,得到对应的预测曲线;

步骤7:计算预测曲线与振动烈度阈值线的交点,标记交点对应的时刻为预测故障时刻;

步骤3的具体过程为:

先将振动加速度 $a(t)$ 直接得到 $a'(t)$ 、振动速度 $v(t)$ 进行一次求导得到 $v'(t)$ 、将振动位移 $s(t)$ 进行二次求导得到 $s''(t)$;

将 $a'(t)$ 、 $v'(t)$ 、 $s''(t)$ 在一级加速度权重系数 Q_a 、一级速度权重系数 Q_v 、一级位移权重系数 Q_d 的约束下进行融合处理,得到融合振动 $A(t)$,并计算融合振动 $A(t)$ 的振动烈度 $V(t)$,振动烈度 $V(t)$ 为融合振动 $A(t)$ 的有效值;

步骤5的具体过程为:

对拟合曲线进行求导,得到极小值和极大值,采用极小值和极大值对拟合曲线进行标记而获得多个曲线段;

从多个曲线段中,筛选出上升沿曲线段,上升沿曲线段为用于预测故障时刻的有效曲线段;

其中,上升沿曲线段为:以时刻为横坐标,沿横坐标前进方向,先出现极小值、后出现极大值的曲线段。

2. 根据权利要求1所述的一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法,其特征在于,

在初始时刻 T_{Init} 至当前时刻 T_{now} 的范围内仅有1个有效曲线段时,

步骤6的具体过程为:

该有效曲线段记为有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$, M_{11} 为该有效曲线段的初始段首点, N_1 为该有效曲线段的段末点, M_{11} 的坐标表示为: $M_{11}(t_{11}, y_{11})$, N_1 的坐标表示为: $N_1(t_{1N}, y_{1N})$,其中, t_{11} 、 t_{1N} 分别为段首点时刻、段末点时刻, y_{11} 、 y_{1N} 分别表示段首点和段末点表征振动烈度 $V(t)$ 在 y 轴上的坐标表达值;

以有效曲线段 $M_{11} \sim N_1$ 为计算基础进行高阶非线性函数拟合处理得到1个预测曲线 $S11$;

步骤7的具体过程为:

计算预测曲线 $S11$ 与振动烈度阈值线的交点,标记交点对应的时刻为预测故障时刻。

3. 根据权利要求1所述的一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法,其特征

在于，

在初始时刻 T_{init} 至当前时刻 T_{now} 的范围内仅有1个有效曲线段时，
步骤6的具体过程为：

该有效曲线段记为有效曲线段： $M_{11} \sim N_1$ ， M_{11} 为该有效曲线段的初始段首点， N_1 为该有效曲线段的段末点； M_{11} 的坐标表示为： $M_{11}(t_{11}, y_{11})$ ， N_1 的坐标表示为： $N_1(t_{1N}, y_{1N})$ ；有效曲线段： $M_{11} \sim N_1$ 内存在多个有效点 M_{1n} ，有效点 M_{1n} 的坐标表示为： $M_{1n}(t_{1n}, y_{1n})$ ， $t_{11} \leq t_{1n} \leq t_{1N}$ ；其中， t_{11} 、 t_{1n} 、 t_{1N} 分别为初始段首点时刻、新段首点时刻、段末点时刻， y_{11} 、 y_{1n} 、 y_{1N} 分别表示初始段首点、新段首点、段末点表征振动烈度 $V(t)$ 在 y 轴上的坐标表达值；

从 M_{11} 开始，遍历该有效曲线段 $M_{11} \sim N_1$ 中多个有效点 M_{1n} ，将多个有效点 M_{1n} 作为新段首点后与 N_1 组成多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ ，多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ 记为：抽样有效曲线段： $M_{11} \sim N_1$ 、抽样有效曲线段： $M_{12} \sim N_1$ 、 \dots 、抽样有效曲线段： $M_{1n} \sim N_1$ 、 \dots ；

对多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ 分别进行高阶非线性函数拟合处理得到对应的多个预测曲线 S_{1n} ；

步骤7的具体过程为：

根据 t_{1N} 分别与多个 t_{1n} 设置对应的多个权重系数 k_{1n} ；

根据多个预测曲线 S_{1n} 与振动烈度阈值线分别相交而获得对应的多个交点，将所有交点对应的时刻 t_{1an} 在对应的权重系数 k_{1n} 的约束下进行融合计算后获得1个时刻 t_{1a} ，记时刻 t_{1a} 为该有效曲线段 $M_{11} \sim N_1$ 的预测故障时刻。

4. 根据权利要求3所述的一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法，其特征在于，

所述权重系数 $k_{1n} = s * \frac{t_{1n} + t_{1N}}{2t_{1N}}$ ；其中 s 为反应堆轴封泵工况修正系数，根据现场反应堆

轴封泵的工况和轴封泵工作的年限来确定；

$$\text{时刻 } t_{1a} = \frac{k_{11}t_{1a1} + k_{12}t_{1a2} + \dots + k_{1n}t_{1an}}{k_{11} + k_{12} + \dots + k_{1n}}。$$

5. 根据权利要求1所述的一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法，其特征在于，

在初始时刻 T_{init} 至当前时刻 T_{now} 的范围内有 L 个有效曲线段时；

步骤6的具体过程为：

第1个有效曲线段记为有效曲线段： $M_{11} \sim N_1$ ， M_{11} 为该有效曲线段的初始段首点， N_1 为该有效曲线段的段末点； M_{11} 的坐标表示为： $M_{11}(t_{11}, y_{11})$ ， N_1 的坐标表示为： $N_1(t_{1N}, y_{1N})$ ；有效曲线段： $M_{11} \sim N_1$ 内存在多个有效点 M_{1n} ，有效点 M_{1n} 的坐标表示为： $M_{1n}(t_{1n}, y_{1n})$ ， $t_{11} \leq t_{1n} \leq t_{1N}$ ；其中， t_{11} 、 t_{1n} 、 t_{1N} 分别为初始段首点时刻、新段首点时刻、段末点时刻， y_{11} 、 y_{1n} 、 y_{1N} 分别表示初始段首点、新段首点、段末点表征振动烈度 $V(t)$ 在 y 轴上的坐标表达值；

从 M_{11} 开始，遍历该有效曲线段： $M_{11} \sim N_1$ 中多个有效点 M_{1n} ，将多个有效点 M_{1n} 作为新段首点后与 N_1 组成多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ ，多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ 记为：抽样有效曲线段： $M_{11} \sim N_1$ 、抽样有效曲线段： $M_{12} \sim N_1$ 、 \dots 、抽样有效曲线段： $M_{1n} \sim N_1$ 、 \dots ；

对多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ 分别进行高阶非线性函数拟合处理得到对应的多个预测曲线 S_{1n} ；

步骤7的具体过程为：

根据 t_{1N} 分别与多个 t_{1n} 设置对应的多个权重系数 k_{1n} ；

根据多个预测曲线 S_{1n} 与振动烈度阈值线分别相交而获得对应的多个交点，将所有交点对应的时刻 t_{1an} 在对应的权重系数 k_{1n} 的约束下进行融合计算后获得1个时刻 t_{1a} ，记时刻 t_{1a} 为第1个有效曲线段 $M_{11} \sim N_1$ 的预测故障时刻；

还包括步骤8，步骤8具体为：

重复步骤6、步骤7，获得第1个有效曲线段的对应的预测故障时刻 t_{1a} ； l 取1至 L 的正整数；

根据多个第1个预测故障时刻 t_{1a} 与当前时刻 T_{now} 确定多个权重系数 j_l ；

将所有预测故障时刻 t_{1a} 在对应的权重系数 j_l 的约束下进行融合计算后获得1个时刻 t_a ，记时刻 t_a 为最终预测故障时刻。

6. 根据权利要求5所述的一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法，其特征在于，

所述权重系数 $k_{1n} = s * \frac{t_{1n} + t_{1N}}{2t_{1N}}$ ；其中 s 为反应堆轴封泵工况修正系数，根据现场具体的工况和设备工作的年限来确定：

$$\text{时刻 } t_{1a} = \frac{k_{11}t_{1a1} + k_{12}t_{1a2} + \dots + k_{1n}t_{1an}}{k_{11} + k_{12} + \dots + k_{1n}};$$

$$\text{第1个有效曲线段对应的预测故障时刻 } t_{1a} = \frac{k_{n1}t_{na1} + k_{n2}t_{na2} + \dots + k_{nn}t_{nan}}{k_{n1} + k_{n2} + \dots + k_{nn}};$$

$$\text{权重系数 } j_l = \left(\frac{t_{1a}}{T_{Now}} \right)^2;$$

$$\text{时刻 } t_a = \frac{j_1t_{1a} + j_2t_{2a} + \dots + j_l t_{la}}{j_1 + j_2 + \dots + j_l}。$$

7. 根据权利要求1所述的一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法，其特征在于，

$$A(t) = \frac{Q_a a'(t) + Q_v v'(t) + Q_d s''(t)}{Q_a + Q_v + Q_d}。$$

8. 根据权利要求1所述的一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法，其特征在于，

所述一级加速度权重系数 $Q_a = P * A_a(T) * \epsilon * R_a(r) * F_a(f)$ ；

P 为反应堆轴封泵表面的压力情况， $A_a(T)$ 为加速度传感器在高温条件下的修正， ϵ 为加速度传感器的材料转换系数， $R_a(r)$ 为辐照剂量对加速度传感器的影响， $F_a(f)$ 为轴封泵的振动频率对加速度传感器的影响；

一级速度权重系数 $Q_v = E * A_v(T) * R_v(r) * F_v(f)$ ；

E 为现场电磁环境情况； $A_v(T)$ 为对速度在高温条件下的修正； $R_v(r)$ 为辐照剂量对速度传感器的影响， $F_v(f)$ 为轴封泵的振动频率对加速度传感器的影响；

一级位移权重系数 $Q_d = S * A_d(T) * M * R_d(r) * F_d(f)$ ；

S为反应堆轴封泵表面的面积,Ad (T) 为对位移传感器在高温条件下的修正,M为反应堆轴封泵靶材,Rd (r) 为辐照剂量对位移传感器的影响,Fd (f) 为轴封泵的振动频率对位移传感器的影响。

一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及核反应堆设备监控领域,具体一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法。

背景技术

[0002] 核反应堆中的主泵是一回路冷却剂强迫循环的动力源,其运行状态与核反应堆的性能和安全高度相关。主泵按类型分为屏蔽泵和轴封泵两种,以AP1000为代表的堆型中大多采用屏蔽电机型主泵,以华龙一号为代表的其他堆型普遍采用了轴封泵的结果形式,因此轴封泵的研究更有意义和实用性。

[0003] 目前,对轴封泵振动在线监测系统的研究尚为初期,一般通过监测能获取到轴封泵的振动加速度、振动速度、振动位移等物理量,但其监测的指标和参数不够全面,不能通过轴封泵的振动监测进行轴封泵寿命和工作状况的预测,不具有前瞻性,反应堆轴封泵若出现故障不是大修期间也很难修理,并会造成较大的经济损失。通过对主泵振动状态进行监测并提前预测未来的工作状况,可以掌握设备的运行状态,判别设备的异常表现,使核反应堆运行的安全系数提高。

[0004] 综上所述,本申请发明人在实现本申请实施例中发明技术方案的过程中,发现上述技术至少存在如下技术问题:

[0005] 在现有技术中,不能对核反应堆轴封泵的工作状况和寿命进行预测,以提早确定合理的检修时间和方案,减少停机损失,提高设备的可靠性,而其对于核电站和反应堆的安全性和经济性意义却是相当大的。

发明内容

[0006] 本发明目的提供一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法,其对监测参数加入了外部因素与传感器件的关联因素形成权重,从而对输入的监测参数进行修正,同时设置了合理的融合处理,再对融合后的数据进行筛选后进行预测处理,最终获得有效的预测故障时刻,达到能提前预测故障的目的,解决了现有技术不能有效的对核反应堆轴封泵的工况进行预测问题,实现了对核反应堆轴封泵运行寿命与故障预测的方法,根据寿命与故障预测时间,可提前制定对应的检修时间和方案,减少紧急停机带来的损失,提高轴封泵运行的可靠性,便于维护核反应堆长期稳定安全地运行。

[0007] 本发明通过下述技术方案实现:

[0008] 一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法,包括以下步骤:

[0009] 步骤1:获取初始时刻 T_{init} 至当前时刻 T_{now} 条件下,对反应堆轴封泵的监测数据,监测数据包括:振动加速度 $a(t)$ 、振动速度 $v(t)$ 、振动位移 $s(t)$, $T_{now} \geq t \geq T_{init}$;

[0010] 步骤2:根据振动加速度传感器、振动速度传感器、振动位移传感器的传感器精度类型、现场工况、环境修正因子而确定一级加速度权重系数 Q_a 、一级速度权重系数 Q_v 、一级位移权重系数 Q_d ;

[0011] 步骤3:将振动加速度 $a(t)$ 、振动速度 $v(t)$ 、振动位移 $s(t)$ 在一级加速度权重系数 Q_a 、一级速度权重系数 Q_v 、一级位移权重系数 Q_d 的约束下进行融合处理,得到融合振动 $A(t)$,并计算融合振动 $A(t)$ 的振动烈度 $V(t)$,振动烈度 $V(t)$ 为融合振动 $A(t)$ 的有效值;

[0012] 步骤4:对振动烈度 $V(t)$ 进行数学拟合处理,得到一个拟合曲线;

[0013] 步骤5:从拟合曲线中筛选出用于预测故障时刻的有效曲线段;

[0014] 步骤6:对有效曲线段进行高阶非线性函数拟合处理,得到对应的预测曲线;

[0015] 步骤7:计算预测曲线与振动烈度阈值线的交点,标记交点对应的时刻为预测故障时刻。

[0016] 本发明的设计原理如下:

[0017] 首先,轴封泵用在核电厂,我们采集轴封泵内部关键部位的加速度、速度、位移信号,从而获得故障预测所需的关键数据,轴封泵内部关键部位有:轴封泵的电机上部轴承、泵止推轴承、刚性联轴节;本发明的诊断针对转子、转轴、口摩擦、碰磨,通过这些位置的低频段信号表征其故障。

[0018] 由于传感上述关键部位的传感器式设置在轴封泵内部环境的,其传感器需要承受高温、高压等影响,因此,难免会对传感信号的真实性产生影响,本发明因此建立了权重系数 Q_a 、权重系数 Q_v 、权重系数 Q_d 对所获得的传感信号进行约束。其目的是:对核反应堆轴封泵的振动加速度、振动速度、振动位移的测量结果作出高温耐辐照环境影响下的结果补偿,进而提高预测方法的准确性与可靠性。

[0019] 其中权重系数 Q_a 、权重系数 Q_v 、权重系数 Q_d 取决于获取各振动信号的传感器类型、传感器材料、测量频率范围、测试温度、辐照剂量、轴封泵靶材、轴封泵面积等多种因素,其目的是使测量信号中判断更准确的信号占据的融合权重更大。

[0020] 通过上述获得所需预测用的基础数据后,本发明进行了步骤3-步骤7的后续分析处理过程,概括起来为:融合基础数据、曲线拟合、筛选有效曲线段、基于曲线段进行预测曲线拟合,基于预测曲线进行预测时刻导出。

[0021] 上述后续分析处理过程的原理是:对基础数据融合处理可以提高对传感器输出的信号的准确度,从而获得最接近真实情况的数据。其融合后的数据可以理解为一个综合了三个参量的总振动烈度,即振动烈度由上述三种参量表征。其融合后即作为一种数值化的表达;接下来进行异动分析,其采用拟合后,将离散的数值整理为曲线,这样利于异动分析,找出明显的异动点,其中采样求导的方式对拟合曲线进行求最大、最小值,即表征了振动烈度的异动极点。而在一个连续的监测过程中,会存在多个最大、最小值,因此,其由最小值到最大值的时间连续线表明振动烈度异动持续升高,因此可以用于故障的将要发生的预测,而最大到最下的下降过程则表明振动烈度异动持续降低,表明故障不会存在,无需预测。因此,需要从拟合曲线中找到用于预测分析的有效曲线段,上述采用求导找到最大、最小值进行标记以及筛选上升态的曲线段为有效曲线段的做法,仅表达了其中的一种方式,并不是对本发明的具体约束限制,凡符合寻找有效曲线段的其他方式也属于本发明的总体构思保护范围。

[0022] 在寻找到故障升高的有效曲线段后,本发明采用了高阶非线性函数拟合处理,得到一种预测曲线,这样我们在设置阈值的基础上,将预测曲线与阈值进行交点计算,一定会找到一个预测时刻,因此可以基于预测时刻确定最终预测故障的时刻。

[0023] 总结来看,在上述处理过程的基础上,本发明首先提供了一种综合表征振动状态的振动烈度,分析并找到振动烈度中的有效异动,基于有效异动进行预测性分析,最终确定发送故障的预测时刻,为提前预测故障的发生时机,提供了科学依据。

[0024] 优选的进一步的方案有:预测时刻确定最终预测故障的时刻的方式包括:可以直接采用;也可以为了提高精度进行多次高阶非线性函数拟合处理得到多个预测曲线后得到多个交点、在得到多个预测时刻进行算数精度提升计算后确定最终预测故障的时刻;其中,由于一个测量时刻范围内可能会存在多个有效曲线段,因此,还可以进行时间轴方向的融合后,提高当前的预测的准确性,其大体过程为分别对单个有效曲线段按照上述方法获得多个有效曲线段对应的最终预测故障的时刻,然后对上述最终预测故障的时刻进行再次的融合得到最终预测故障的时刻。

[0025] 具体的,上述预测时刻确定最终预测故障的时刻的方式具体可以是以下三种方式:

[0026] 方式1:

[0027] 在初始时刻 T_{init} 至当前时刻 T_{now} 的范围内仅有1个有效曲线段时,

[0028] 步骤6的具体过程为:

[0029] 该有效曲线段记为有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$, M_{11} 为该有效曲线段的初始段首点, N_1 为该有效曲线段的段末点, M_{11} 的坐标表示为: $M_{11}(t_{11}, y_{11})$, N_1 的坐标表示为: $N_1(t_{1N}, y_{1N})$,其中, t_{11} 、 t_{1N} 分别为段首点时刻、段末点时刻, y_{11} 、 y_{1N} 分别表示段首点和段末点表征振动烈度 $V(t)$ 在y轴上的坐标表达值;

[0030] 以有效曲线段 $M_{11} \sim N_1$ 为计算基础进行高阶非线性函数拟合处理得到1个预测曲线 S_{11} ;

[0031] 步骤7的具体过程为:

[0032] 计算预测曲线 S_{11} 与振动烈度阈值线的交点,标记交点对应的时刻为预测故障时刻。

[0033] 方式2:

[0034] 在初始时刻 T_{init} 至当前时刻 T_{now} 的范围内仅有1个有效曲线段时,

[0035] 步骤6的具体过程为:

[0036] 该有效曲线段记为有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$, M_{11} 为该有效曲线段的初始段首点, N_1 为该有效曲线段的段末点; M_{11} 的坐标表示为: $M_{11}(t_{11}, y_{11})$, N_1 的坐标表示为: $N_1(t_{1N}, y_{1N})$;有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$ 内存在多个有效点 M_{1n} ,有效点 M_{1n} 的坐标表示为: $M_{1n}(t_{1n}, y_{1n})$, $t_{11} \leq t_{1n} \leq t_{1N}$;其中, t_{11} 、 t_{1n} 、 t_{1N} 分别为初始段首点时刻、新段首点时刻、段末点时刻, y_{11} 、 y_{1n} 、 y_{1N} 分别表示初始段首点、新段首点、段末点表征振动烈度 $V(t)$ 在y轴上的坐标表达值;

[0037] 从 M_{11} 开始,遍历该有效曲线段 $M_{11} \sim N_1$ 中多个有效点 M_{1n} ,将多个有效点 M_{1n} 作为新段首点后与 N_1 组成多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$,多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ 记为:抽样有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$ 、抽样有效曲线段: $M_{12} \sim N_1$ 、...、抽样有效曲线段: $M_{1n} \sim N_1$ 、...;

[0038] 对多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ 分别进行高阶非线性函数拟合处理得到对应的多个预测曲线 S_{1n} ;

[0039] 步骤7的具体过程为:

[0040] 根据 t_{1n} 分别与多个 t_{1N} 设置对应的多个权重系数 k_{1n} ;

[0041] 根据多个预测曲线 S_{1n} 与振动烈度阈值线分别相交而获得对应的多个交点,将所有交点对应的时刻 t_{1an} 在对应的权重系数 k_{1n} 的约束下进行融合计算后获得1个时刻 t_{1a} ,记时刻 t_{1a} 为该有效曲线段 $M_{11} \sim N_1$ 的预测故障时刻。

[0042] 所述权重系数 $k_{1n} = s * \frac{t_{1n} + t_{1N}}{2t_{1N}}$;其中 s 为反应堆轴封泵工况修正系数,根据现场反应堆轴封泵的工况和轴封泵工作的年限来确定;

[0043] 时刻 $t_{1a} = \frac{k_{11}t_{1a1} + k_{12}t_{1a2} + \dots + k_{1n}t_{1an}}{k_{11} + k_{12} + \dots + k_{1n}}$ 。

[0044] 方式3:

[0045] 在初始时刻 T_{Init} 至当前时刻 T_{now} 的范围内有 L 个有效曲线段时;

[0046] 步骤6的具体过程为:

[0047] 第1个有效曲线段记为有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$, M_{11} 为该有效曲线段的初始段首点, N_1 为该有效曲线段的段末点; M_{11} 的坐标表示为: $M_{11}(t_{11}, y_{11})$, N_1 的坐标表示为: $N_1(t_{1N}, y_{1N})$;有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$ 内存在多个有效点 M_{1n} ,有效点 M_{1n} 的坐标表示为: $M_{1n}(t_{1n}, y_{1n})$, $t_{11} \leq t_{1n} \leq t_{1N}$;其中, t_{11} 、 t_{1n} 、 t_{1N} 分别为初始段首点时刻、新段首点时刻、段末点时刻, y_{11} 、 y_{1n} 、 y_{1N} 分别表示初始段首点、新段首点、段末点表征振动烈度 $V(t)$ 在 y 轴上的坐标表达值;

[0048] 从 M_{11} 开始,遍历该有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$ 中多个有效点 M_{1n} ,将多个有效点 M_{1n} 作为新段首点后与 N_1 组成多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$,多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ 记为:抽样有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$ 、抽样有效曲线段: $M_{12} \sim N_1$ 、...、抽样有效曲线段: $M_{1n} \sim N_1$ 、...;

[0049] 对多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ 分别进行高阶非线性函数拟合处理得到对应的多个预测曲线 S_{1n} ;

[0050] 步骤7的具体过程为:

[0051] 根据 t_{1N} 分别与多个 t_{1n} 设置对应的多个权重系数 k_{1n} ;

[0052] 根据多个预测曲线 S_{1n} 与振动烈度阈值线分别相交而获得对应的多个交点,将所有交点对应的时刻 t_{1an} 在对应的权重系数 k_{1n} 的约束下进行融合计算后获得1个时刻 t_{1a} ,记时刻 t_{1a} 为第1个有效曲线段 $M_{11} \sim N_1$ 的预测故障时刻。

[0053] 还包括步骤8,步骤8具体为:

[0054] 重复步骤6、步骤7,获得第1个有效曲线段的对应的预测故障时刻 t_{1a} ;1取1至 L 的正整数;

[0055] 根据多个第1个预测故障时刻 t_{1a} 与当前时刻 T_{now} 确定多个权重系数 j_1 ;

[0056] 将所有预测故障时刻 t_{1a} 在对应的权重系数 j_1 的约束下进行融合计算后获得1个时刻 t_a ,记时刻 t_a 为最终预测故障时刻。

[0057] 所述权重系数 $k_{1n} = s * \frac{t_{1n} + t_{1N}}{2t_{1N}}$;其中 s 为反应堆轴封泵工况修正系数,根据现场具体的工况和设备工作的年限来确定。

[0058] 时刻 $t_{1a} = \frac{k_{11}t_{1a1} + k_{12}t_{1a2} + \dots + k_{1n}t_{1an}}{k_{11} + k_{12} + \dots + k_{1n}}$;

[0059] 第1个有效曲线段对应的预测故障时刻 $t_{1a} = \frac{k_{n1}t_{na1} + k_{n2}t_{na2} + \dots + k_{nn}t_{nan}}{k_{n1} + k_{n2} + \dots + k_{nn}}$;

[0060] 权重系数 $j_i = \left(\frac{t_{ia}}{T_{Now}}\right)^2$;

[0061] 时刻 $t_a = \frac{j_1 t_{1a} + j_2 t_{2a} + \dots + j_i t_{ia}}{j_1 + j_2 + \dots + j_i}$ 。

[0062] 具体的,确定有效曲线段的方式具体为:步骤5的具体过程为:

[0063] 对拟合曲线进行求导,得到极小值和极大值,采用极小值和极大值对拟合曲线进行标记而获得多个曲线段;

[0064] 从多个曲线段中,筛选出上升沿曲线段,上升沿曲线段为用于预测故障时刻的有效曲线段;

[0065] 其中,上升沿曲线段为:以时刻为横坐标,沿横坐标前进方向,先出现极小值、后出现极大值的曲线段。

[0066] 具体的,监测数据的预处理的具体方式为:步骤3的具体过程为:

[0067] 先将振动加速度 $a(t)$ 直接得到 $a'(t)$ 、振动速度 $v(t)$ 进行一次求导得到 $v'(t)$ 、将振动位移 $s(t)$ 进行二次求导得到 $s''(t)$;

[0068] 将 $a'(t)$ 、 $v'(t)$ 、 $s''(t)$ 在一级加速度权重系数 Q_a 、一级速度权重系数 Q_v 、一级位移权重系数 Q_d 的约束下进行融合处理,得到融合振动 $A(t)$,并计算融合振动 $A(t)$ 的振动烈度 $V(t)$,振动烈度 $V(t)$ 为融合振动 $A(t)$ 的有效值。

[0069]
$$A(t) = \frac{Q_a a'(t) + Q_v v'(t) + Q_d s''(t)}{Q_a + Q_v + Q_d}。$$

[0070] 具体的: Q_a 、 Q_v 、 Q_d 的测算过程如下:

[0071] 所述一级加速度权重系数 $Q_a = P * Aa(T) * \epsilon * Ra(r) * Fa(f)$;

[0072] P 为反应堆轴封泵表面的压力情况, $Aa(T)$ 为加速度传感器在高温条件下的修正, ϵ 为加速度传感器的材料转换系数, $Ra(r)$ 为辐照剂量对加速度传感器的影响, $Fa(f)$ 为轴封泵的振动频率对加速度传感器的影响;

[0073] 一级速度权重系数 $Q_v = E * Av(T) * Rv(r) * Fv(f)$;

[0074] E 为现场电磁环境情况; $Av(T)$ 为对速度在高温条件下的修正; $Rv(r)$ 为辐照剂量对速度传感器的影响, $Fv(f)$ 为轴封泵的振动频率对加速度传感器的影响;

[0075] 一级位移权重系数 $Q_d = S * Ad(T) * M * Rd(r) * Fd(f)$;

[0076] S 为反应堆轴封泵表面的面积, $Ad(T)$ 为对位移传感器在高温条件下的修正, M 为反应堆轴封泵靶材, $Rd(r)$ 为辐照剂量对位移传感器的影响, $Fd(f)$ 为轴封泵的振动频率对位移传感器的影响。

[0077] 具体的,

[0078] (1)、其中,振动加速度通过高温耐辐射压电式加速度传感器进行接触式测量,技术指标参考如下:工作温度: $0^{\circ}\text{C} \sim 450^{\circ}\text{C}$;灵敏度: $\geq 10\text{pC/g}$;幅值线性度: $\pm 10\%$;频率范围: $5\text{Hz} \sim 10\text{kHz}$;累积辐照剂量: $3 \times 10^8 \text{rad}$;

[0079] Q_a 表示为: $Q_a = P * Aa(T) * \epsilon * Ra(r) * Fa(f)$;

[0080] P 为被测物(轴封泵)表面的压力情况,振动加速度的测量受到核反应堆环境下高压的影响,随着压力的增大,测量结果受到影响,准确性下降,压力过大则传感器会受到损害,核反应堆的压力范围一般为 $0 \sim 20\text{MPa}$,用函数可初略表示为:当 $0 \leq P < 6$ 时, $P = 1$;当 $6 \leq P$

<12 时, $P=0.8$; 当 $12 \leq P < 18$ 时, $P=0.4$; 当 $P > 18$ 时, $P=0$;

[0081] $A_a(T)$ 为对加速度测量结果在核反应堆高温条件下的修正, 由于加速度传感器内部不含对温度特别敏感的材料, 但测量范围较广, 仍存在一定程度的结果漂移, 设置线性补偿函数对其进行修正即可, 由于核反应堆内一般达不到 450°C 的温度, 其线性补偿函数的系数的确定通过在现场安装调试时或环境试验箱中将温度范围覆盖在 $0^\circ\text{C} \sim 320^\circ\text{C}$ 条件下测量批量数据进行曲线拟合的方式进行确定。

[0082] ε 为加速度传感器的高温耐辐射压电陶瓷的转换系数, 由于陶瓷的一致性有一定差别且为其固有性质, 经制造后通过常温常压正常环境下的测试可以标定。

[0083] $R_a(r)$ 为辐照剂量对加速度传感器的影响, 核反应堆的中子及伽马辐照会使传感器内部的材料、元件及结构发生改变, 进而影响其输出性能, 在累积辐照剂量 (即 $3 \times 10^8 \text{ rad}$, R_a) 的 0.75 倍之前, 其输出值不受辐照剂量的影响, 之后会随着辐照剂量的增加导致输出值减小, 用函数可表示为: 当 $r \leq 0.75R_a$ 时, $R_a(r) = 1$; 当 $0.75R_a \leq r < 2R_a$ 时, $R_a(r) = -0.8r + 1.6$; 当 $r \geq 2R_a$ 时, $R_a(r) = 0$ 。

[0084] $F_a(f)$ 为测试频率 (轴封泵的振动频率) 对传感器的影响, 轴封泵的振动频率一般为 $0 \sim 1000 \text{ Hz}$, 范围内低频下振动加速度的测试较为准确, 为随着频率递增的趋势, 可用函数表示如下: 当 $f \geq 600$ 时, $F_a(f) = 0.6$; 当 $200 \leq f < 600$ 时, $F_a(f) = 0.8$; 当 $f < 200$ 时, $F_a(f) = 1$ 。

[0085] (2)、其中, 振动速度通过高温耐辐射磁电式速度传感器进行接触式测量, 技术指标参考如下: 工作温度: $0^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$; 灵敏度: $20 \text{ mV}/(\text{mm}/\text{s})$, 精度: $\pm 10\%$, 频率范围: $10 \text{ Hz} \sim 1 \text{ kHz}$; 累积辐照剂量: $1 \times 10^8 \text{ rad}$;

[0086] Q_v 表示为: $Q_v = E * A_v(T) * R_v(r) * F_v(f)$ 。

[0087] E 为现场电磁环境情况, 由于磁电式速度传感器的原理为通过切割磁力线进行感应电动势的输出, 可能会耦合进旁边测试测量设备的小信号, 进而对测试准确性带来影响, 该值需通过现场进行测试与标定, 与正常环境情况下的测试值进行比较, 并拟合出信号范围内的对应关系, 该值的取值范围为 $0 \sim 1$, 1 代表不受现场环境的影响。

[0088] $A_v(T)$ 为对测量结果 (速度) 核反应堆高温条件下的修正, 由于速度传感器内部不含对温度特别敏感的材料, 但仍存在一定程度的结果漂移, 设置线性补偿函数对其进行修正即可。线性补偿函数的系数的确定, 通过在现场安装调试时或环境试验箱中将温度范围覆盖在 $0^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 条件下测量批量数据进行曲线拟合的方式进行确定。

[0089] $R_v(r)$ 为辐照剂量对速度传感器的影响, 核反应堆的中子及伽马辐照会使传感器内部的材料、元件及结构发生改变, 进而影响其输出性能, 在累积辐照剂量 (即 $3 \times 10^8 \text{ rad}$, R_v) 的 0.75 倍之前, 其输出值不受辐照剂量的影响, 之后会随着辐照剂量的增加导致输出值减小, 用函数表示为: 当 $r \leq 0.75R_v$ 时, $R_v(r) = 1$; 当 $0.75R_v \leq r < 2R_v$ 时, $R_v(r) = -0.8r + 1.6$; 当 $r \geq 2R_v$ 时, $R_v(r) = 0$ 。

[0090] $F_v(f)$ 为测试频率 (轴封泵的振动频率) 对速度传感器的影响, 轴封泵的振动频率一般为 $0 \sim 1000 \text{ Hz}$, 范围内中频段下振动速度的测试较为准确, 为随着频率递增的趋势, 可用函数表示如下: 当 $f \geq 600$ 时, $F_v(f) = 0.8$; 当 $200 \leq f < 600$ 时, $F_v(f) = 1$; 当 $f < 200$ 时, $F_v(f) = 0.8$ 。

[0091] (3)、其中, 振动位移信号通过高温耐辐射电涡流位移传感器通过电磁感应的方式进行非接触式测量, 技术指标参考如下: 工作温度: $0^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$; 测量范围: 2 mm ; 幅值线性

度： $\pm 10\%$ ；横向灵敏度： $< 3\%$ ；频率范围： $10\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$ ；累积辐照剂量： $4.4 \times 10^6 \text{rad}$ ；

[0092] Q_d 表示为： $Q_d = S * A_d(T) * M * R_d(r) * F_d(f)$ 。

[0093] S 为被测物(轴封泵)表面的面积,需保持均匀平整,当其小于传感器探头面积 S_d 的2倍时,测量结果受到影响,准确性下降,用函数可表示为:当 $S \geq 2S_d$ 时, $S = 1$;当 $S_d \leq S < 2S_d$ 时, $S = 0.5$;当 $S < S_d$ 时, $S = 0$ 。

[0094] $A_d(T)$ 为对测量结果(位移)在核反应堆高温条件下的修正,由于电涡流传感器内部含有线圈等温度敏感材料,测量结果对温度 T 最为敏感,会随着温度 T 的变化进行漂移,需设置高阶补偿函数对其进行修正,由于每个传感器的线圈参数并不完全一致,因此其温补函数是二次函数或更高阶函数,其函数的系数的确定通过在现场安装调试时或环境试验箱中将温度范围覆盖在 $0^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 条件下测量批量数据进行曲线拟合的方式进行确定。

[0095] M 为被测物(轴封泵)靶材,一般有45#钢,304#不锈钢、铁等,其变化范围在1附近,一般初始传感器校准为45#钢的靶材后设置为1。

[0096] $R_d(r)$ 为辐照剂量对位移传感器的影响,核反应堆的中子及伽马辐照会使位移传感器内部的材料、元件及结构发生改变,进而影响其输出性能,在累积辐照剂量(即 $4.4 \times 10^6 \text{rad}$, R_d)的0.75倍之前,其输出值不受辐照剂量的影响,之后会随着辐照剂量的增加导致输出值减小,用函数表示为:当 $r \leq 0.75R_d$ 时, $R_d(r) = 1$;当 $0.75R_d \leq r < 2R_d$ 时, $R_d(r) = -0.8r + 1.6$;当 $r \geq 2R_d$ 时, $R_d(r) = 0$ 。

[0097] $F_d(f)$ 为测试频率(轴封泵的振动频率)对传感器的影响,轴封泵的振动频率一般为 $0 \sim 1000\text{Hz}$,范围内高频下振动位移的测试较为准确,为随着频率递增的趋势,可用函数表示如下:当 $f \geq 600$ 时, $F_d(f) = 1$;当 $200 \leq f < 600$ 时, $F_d(f) = 0.8$;当 $f < 200$ 时, $F_d(f) = 0.6$ 。

[0098] 本发明的有益效果为:本发明通过轴封泵振动监测系统中获取的各种振动信号、综合传感器类型精度范围、现场工况、数据时间有效性、监测点三轴方向的振动情况等因素,设定权重因子,对轴封泵故障与寿命的预测,能提前预测系统某个通道或监测点达到黄色警告和红色报警状态所需的时间,提早确定设备合理的检修时间和方案,减少停机损失,这种预先维修的策略和设备健康管理的方式对反应堆安全性和经济性的提升意义是相当大的。

附图说明

[0099] 此处所说明的附图用来提供对本发明实施例的进一步理解,构成本申请的一部分,并不构成对本发明实施例的限定。在附图中:

[0100] 附图1为本发明的流程示意图。

[0101] 附图2为有效曲线段、预测曲线与阈值的关系图。

具体实施方式

[0102] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,下面结合实施例和附图,对本发明作进一步的详细说明,本发明的示意性实施方式及其说明仅用于解释本发明,并不作为对本发明的限定。

[0103] 实施例1

[0104] 如图1、图2所示:

- [0105] 一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法,
- [0106] 一种对反应堆轴封泵振动监测的故障时刻预测方法,包括以下步骤:
- [0107] 步骤1:获取初始时刻 T_{Init} 至当前时刻 T_{now} 条件下,对反应堆轴封泵的监测数据,监测数据包括:振动加速度 $a(t)$ 、振动速度 $v(t)$ 、振动位移 $s(t)$, $T_{\text{now}} \geq t \geq T_{\text{Init}}$;
- [0108] 步骤2:根据振动加速度传感器、振动速度传感器、振动位移传感器的传感器精度类型、现场工况、环境修正因子而确定一级加速度权重系数 Q_a 、一级速度权重系数 Q_v 、一级位移权重系数 Q_d ;
- [0109] 步骤3:将振动加速度 $a(t)$ 、振动速度 $v(t)$ 、振动位移 $s(t)$ 在一级加速度权重系数 Q_a 、一级速度权重系数 Q_v 、一级位移权重系数 Q_d 的约束下进行融合处理,得到融合振动 $A(t)$,并计算融合振动 $A(t)$ 的振动烈度 $V(t)$,振动烈度 $V(t)$ 为融合振动 $A(t)$ 的有效值;
- [0110] 步骤4:对振动烈度 $V(t)$ 进行数学拟合处理,得到一个拟合曲线;
- [0111] 步骤5:从拟合曲线中筛选出用于预测故障时刻的有效曲线段;
- [0112] 步骤6:对有效曲线段进行高阶非线性函数拟合处理,得到对应的预测曲线;
- [0113] 步骤7:计算预测曲线与振动烈度阈值线的交点,标记交点对应的时刻为预测故障时刻。
- [0114] 本发明的设计原理如下:
- [0115] 首先,轴封泵用在核电厂,我们采集轴封泵内部关键部位的加速度、速度、位移信号,从而获得故障预测所需的关键数据,轴封泵内部关键部位有:轴封泵的电机上部轴承、泵止推轴承、刚性联轴节;本发明的诊断针对转子、转轴、口摩擦、碰磨,通过这些位置的低频段信号表征其故障。
- [0116] 由于传感上述关键部位的传感器式设置在轴封泵内部环境的,其传感器需要承受高温、高压等影响,因此,难免会对传感信号的真实性的影响,本发明因此建立了权重系数 Q_a 、权重系数 Q_v 、权重系数 Q_d 对所获得的传感信号进行约束。其目的是:对核反应堆轴封泵的振动加速度、振动速度、振动位移的测量结果作出高温耐辐照环境影响下的结果补偿,进而提高预测方法的准确性与可靠性。
- [0117] 其中权重系数 Q_a 、权重系数 Q_v 、权重系数 Q_d 取决于获取各振动信号的传感器类型、传感器材料、测量频率范围、测试温度、辐照剂量、轴封泵靶材、轴封泵面积等多种因素,其目的是使测量信号中判断更准确的信号占据的融合权重更大。
- [0118] 通过上述获得所需预测用的基础数据后,本发明进行了步骤3-步骤7的后续分析处理过程,概括起来为:融合基础数据、曲线拟合、筛选有效曲线段、基于曲线段进行预测曲线拟合,基于预测曲线进行预测时刻导出。
- [0119] 上述后续分析处理过程的原理是:对基础数据融合处理可以提高对传感器输出的信号的准确度,从而获得最接近真实情况的数据。其融合后的数据可以理解为一个综合了三个参量的总振动烈度,即振动烈度由上述三种参量表征。其融合后即作为一种数值化的表达;接下来进行异动分析,其采用拟合后,将离散的数值整理为曲线,这样利于异动分析,找出明显的异动点,其中采样求导的方式对拟合曲线进行求最大、最小值,即表征了振动烈度的异动极点。而在一个连续的监测过程中,会存在多个最大、最小值,因此,其由最小值到最大值的时间连续线表明振动烈度异动持续升高,因此可以用于故障的将要发生的预测,而最大到最下的下降过程则表明振动烈度异动持续降低,表明故障不会存在,无需预测。因

此,需要从拟合曲线中找到用于预测分析的有效曲线段,上述采用求导找到最大、最小值进行标记以及筛选上升态的曲线段为有效曲线段的做法,仅表达了其中的一种方式,并不是对本发明的具体约束限制,凡符合寻找有效曲线段的其他方式也属于本发明的总体构思保护范围。

[0120] 在寻找到故障升高的有效曲线段后,本发明采用了高阶非线性函数拟合处理,得到一种预测曲线,这样我们在设置阈值的基础上,将预测曲线与阈值进行交点计算,一定会找到一个预测时刻,因此可以基于预测时刻确定最终预测故障的时刻。

[0121] 总结来看,在上述处理过程的基础上,本发明首先提供了一种综合表征振动状态的振动烈度,分析并找到振动烈度中的有效异动,基于有效异动进行预测性分析,最终确定发送故障的预测时刻,为提前预测故障的发生时机,提供了科学依据。

[0122] 实施例2

[0123] 如图1、图2所示:

[0124] 优选的进一步的方案有:预测时刻确定最终预测故障的时刻的方式包括:可以直接采用;也可以为了提高精度进行多次高阶非线性函数拟合处理得到多个预测曲线后得到多个交点、在得到多个预测时刻进行算数精度提升计算后确定最终预测故障的时刻;其中,由于一个测量时刻范围内可能会存在多个有效曲线段,因此,还可以进行时间轴线方向的融合后,提高当前的预测的准确性,其大体过程为分别对单个有效曲线段按照上述方法获得多个有效曲线段对应的最终预测故障的时刻,然后对上述最终预测故障的时刻进行再次的融合得到最终预测故障的时刻。

[0125] 具体的,上述预测时刻确定最终预测故障的时刻的方式具体可以是以下三种方式:

[0126] 方式1:

[0127] 如图2中,当随着采样时间的推进,采样从初始时刻 T_{init} 开始,若当前时刻 T_{now} 进程到 t_2 时,

[0128] 因此,将所获得的采样数据经过计算后,在 T_{init} -至 t_2 (T_{now})的这个范围内,仅有1个有效曲线段,其图2中的实线性表示拟合曲线,其中的,在 T_{init} -至 t_2 的这个范围内,点 M_{11} ~点 N_1 (上升)这个实线段为一个有效曲线段;其对应的预测曲线为左侧的虚线,该虚线会延展到设定的阈值线,其中,本发明可以设置1个黄色预警线和一个红色预警线,即在图2中表征为 y_a 、 y_b ;因此,该预测曲线与2个预警线分别会存在2个交点,2个交点对应2种预警时刻,即预测故障时刻。

[0129] 具体的数据处理如下:

[0130] 在初始时刻 T_{init} 至当前时刻 T_{now} 的范围内仅有1个有效曲线段时,

[0131] 步骤6的具体过程为:

[0132] 该有效曲线段记为有效曲线段: M_{11} ~ N_1 , M_{11} 为该有效曲线段的初始段首点, N_1 为该有效曲线段的段末点, M_{11} 的坐标表示为: $M_{11}(t_{11}, y_{11})$, N_1 的坐标表示为: $N_1(t_{1N}, y_{1N})$,其中, t_{11} 、 t_{1N} 分别为段首点时刻、段末点时刻, y_{11} 、 y_{1N} 分别表示段首点和段末点表征振动烈度 $V(t)$ 在 y 轴上的坐标表达值;

[0133] 以有效曲线段 M_{11} ~ N_1 为计算基础进行高阶非线性函数拟合处理得到1个预测曲线 S_{11} ;

[0134] 步骤7的具体过程为:

[0135] 计算预测曲线S11与振动烈度阈值线的交点,标记交点对应的时刻为预测故障时刻。

[0136] 方式2:

[0137] 如图2中,当随着采样时间的推进,采样从初始时刻 T_{init} 开始,若当前时刻 T_{now} 进程到 t_2 时,

[0138] 因此,将所获得的采样数据经过计算后,在 T_{init} -至 t_2 (T_{now})的这个范围内,仅有1个有效曲线段,其图2中的实线性表示拟合曲线,其中的,在 T_{init} -至 t_2 的这个范围内,点 M_{11} ~点 N_1 (上升)这个实线段为一个有效曲线段;其对应的预测曲线为左侧的虚线,该虚线会延展到设定的阈值线,其中,本发明可以设置1个黄色预警线和一个红色预警线,即在图2中表征为 y_a 、 y_b ;因此,该预测曲线与2个预警线分别会存在2个交点,2个交点对应2种预警时刻,即预测故障时刻。然后,在有效曲线段选择1个有效点 M_{12} ,将 M_{11} 换为 M_{12} ,重复上述过程,会得到一个新的预测故障时刻,在有效曲线段选择1个有效点 M_{1n} ,将 $M_{1(n-1)}$ 换为 M_{1n} ,重复上述过程,会得到一个新的预测故障时刻;多次之后,得到多个预测故障时刻,这些预测故障时刻一般会落到一个范围内,用户可以整定一个范围阈值(如图2所示的预测曲线所经过的区间),去掉未在该范围内的,余下的进行融合计算,得到最终的预测故障时刻。

[0139] 具体的:

[0140] 在初始时刻 T_{init} 至当前时刻 T_{now} 的范围内仅有1个有效曲线段时,

[0141] 步骤6的具体过程为:

[0142] 该有效曲线段记为有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$, M_{11} 为该有效曲线段的初始段首点, N_1 为该有效曲线段的段末点; M_{11} 的坐标表示为: $M_{11}(t_{11}, y_{11})$, N_1 的坐标表示为: $N_1(t_{1N}, y_{1N})$;有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$ 内存在多个有效点 M_{1n} ,有效点 M_{1n} 的坐标表示为: $M_{1n}(t_{1n}, y_{1n})$, $t_{11} \leq t_{1n} \leq t_{1N}$;其中, t_{11} 、 t_{1n} 、 t_{1N} 分别为初始段首点时刻、新段首点时刻、段末点时刻, y_{11} 、 y_{1n} 、 y_{1N} 分别表示初始段首点、新段首点、段末点表征振动烈度 $V(t)$ 在 y 轴上的坐标表达值;

[0143] 从 M_{11} 开始,遍历该有效曲线段 $M_{11} \sim N_1$ 中多个有效点 M_{1n} ,将多个有效点 M_{1n} 作为新段首点后与 N_1 组成多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$,多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ 记为:抽样有效曲线段: $M_{11} \sim N_1$ 、抽样有效曲线段: $M_{12} \sim N_1$ 、...、抽样有效曲线段: $M_{1n} \sim N_1$ 、...;

[0144] 对多个抽样有效曲线段 $M_{1n} \sim N_1$ 分别进行高阶非线性函数拟合处理得到对应的多个预测曲线 S_{1n} ;

[0145] 步骤7的具体过程为:

[0146] 根据 t_{1n} 分别与多个 t_{1N} 设置对应的多个权重系数 k_{1n} ;

[0147] 根据多个预测曲线 S_{1n} 与振动烈度阈值线分别相交而获得对应的多个交点,将所有交点对应的时刻 t_{1an} 在对应的权重系数 k_{1n} 的约束下进行融合计算后获得1个时刻 t_{1a} ,记时刻 t_{1a} 为该有效曲线段 $M_{11} \sim N_1$ 的预测故障时刻。

[0148] 所述权重系数 $k_{1a} = s * \frac{t_{1n} + t_{1N}}{2t_{1N}}$;其中 s 为反应堆轴封泵工况修正系数,根据现场反应堆轴封泵的工况和轴封泵工作的年限来确定;

[0149] 时刻 $t_{1a} = \frac{k_{11}t_{1a1} + k_{12}t_{1a2} + \dots + k_{1n}t_{1an}}{k_{11} + k_{12} + \dots + k_{1n}}$ 。

[0150] 方式3:

[0151] 如图2中,当随着采样时间的推进,采样从初始时刻 T_{init} 开始,若当前时刻 T_{now} 进程到如图中的 T_{now} 时,

[0152] 因此,将所获得的采样数据经过计算后,在 T_{init} -至 T_{now} 这个范围内,有L个(图中有2个)有效曲线段,其图2中的实线性表示拟合曲线,其中的,在 T_{init} -至 t_2 的这个范围内,点 M_{11} ~点 N_1 (上升)这个实线段为一个有效曲线段,点 M_{n2} ~点 N_{n2} (上升)这个实线段也为一个有效曲线段;其对应的预测曲线为相邻的虚线,该虚线会延展到设定的阈值线,其中,本发明可以设置1个黄色预警线和一个红色预警线,即在图2中表征为 y_a 、 y_b ;因此,该预测曲线与2个预警线分别会存在2个交点,2个交点对应2种预警时刻,即预测故障时刻。

[0153] 然后,以第1个有效曲线段为例,在有效曲线段选择1个有效点 M_{12} ,将 M_{11} 换为 M_{12} ,重复上述过程,会得到一个新的预测故障时刻,在有效曲线段选择1个有效点 M_{1n} ,将 $M_{1(n-1)}$ 换为 M_{1n} ,重复上述过程,会得到一个新的预测故障时刻;多次之后,得到多个预测故障时刻,这些预测故障时刻一般会落到一个范围内,用户可以整定一个范围阈值(如图2所示的预测曲线所经过的区间),去掉未在该范围内的,余下的进行融合计算,得到第1个有效曲线段的最终的预测故障时刻。

[0154] 然后,重复上述过程,获得第2个有效曲线段的最终的预测故障时刻。

[0155] 最终,在时间轴方向上,存在多个有效曲线段对应各自的最终的预测故障时刻。为了提高准确度,将按照权重对上述最终的预测故障时刻融合计算,获得当前时刻所预测出的最终的预测故障时刻。

[0156] 具体的:

[0157] 在初始时刻 T_{init} 至当前时刻 T_{now} 的范围内有L个有效曲线段时;

[0158] 步骤6的具体过程为:

[0159] 第1个有效曲线段记为有效曲线段: M_{11} ~ N_1 , M_{11} 为该有效曲线段的初始段首点, N_1 为该有效曲线段的段末点; M_{11} 的坐标表示为: $M_{11}(t_{11}, y_{11})$, N_1 的坐标表示为: $N_1(t_{1N}, y_{1N})$;有效曲线段: M_{11} ~ N_1 内存在多个有效点 M_{1n} ,有效点 M_{1n} 的坐标表示为: $M_{1n}(t_{1n}, y_{1n})$, $t_{11} \leq t_{1n} \leq t_{1N}$;其中, t_{11} 、 t_{1n} 、 t_{1N} 分别为初始段首点时刻、新段首点时刻、段末点时刻, y_{11} 、 y_{1n} 、 y_{1N} 分别表示初始段首点、新段首点、段末点表征振动烈度 $V(t)$ 在y轴上的坐标表达值;

[0160] 从 M_{11} 开始,遍历该有效曲线段: M_{11} ~ N_1 中多个有效点 M_{1n} ,将多个有效点 M_{1n} 作为新段首点后与 N_1 组成多个抽样有效曲线段 M_{1n} ~ N_1 ,多个抽样有效曲线段 M_{1n} ~ N_1 记为:抽样有效曲线段: M_{11} ~ N_1 、抽样有效曲线段: M_{12} ~ N_1 、...、抽样有效曲线段: M_{1n} ~ N_1 、...;

[0161] 对多个抽样有效曲线段 M_{1n} ~ N_1 分别进行高阶非线性函数拟合处理得到对应的多个预测曲线 S_{1n} ;

[0162] 步骤7的具体过程为:

[0163] 根据 t_{1n} 分别与多个 t_{1n} 设置对应的多个权重系数 k_{1n} ;

[0164] 根据多个预测曲线 S_{1n} 与振动烈度阈值线分别相交而获得对应的多个交点,将所有交点对应的时刻 t_{1an} 在对应的权重系数 k_{1n} 的约束下进行融合计算后获得1个时刻 t_{1a} ,记时刻 t_{1a} 为第1个有效曲线段 M_{11} ~ N_1 的预测故障时刻。

[0165] 还包括步骤8,步骤8具体为:

[0166] 重复步骤6、步骤7,获得第1个有效曲线段的对应的预测故障时刻 t_{1a} ;1取1至L的正

整数；

[0167] 根据多个第1个预测故障时刻 t_{1a} 与当前时刻 T_{now} 确定多个权重系数 j_1 ；

[0168] 将所有预测故障时刻 t_{1a} 在对应的权重系数 j_1 的约束下进行融合计算后获得1个时刻 t_a ，记时刻 t_a 为最终预测故障时刻。

[0169] 所述权重系数 $k_{1n} = s * \frac{t_{1n} + t_{1N}}{2t_{1N}}$ ；其中s为反应堆轴封泵工况修正系数，根据现场具体的工况和设备工作的年限来确定。

[0170] 时刻 $t_{1a} = \frac{k_{11}t_{1a1} + k_{12}t_{1a2} + \dots + k_{1n}t_{1an}}{k_{11} + k_{12} + \dots + k_{1n}}$ ；

[0171] 第1个有效曲线段对应的预测故障时刻 $t_{1a} = \frac{k_{n1}t_{na1} + k_{n2}t_{na2} + \dots + k_{nn}t_{nan}}{k_{n1} + k_{n2} + \dots + k_{nn}}$ ；

[0172] 权重系数 $j_i = (\frac{t_{1a}}{T_{now}})^2$ ；

[0173] 时刻 $t_a = \frac{j_1t_{1a} + j_2t_{2a} + \dots + j_it_{ia}}{j_1 + j_2 + \dots + j_i}$ 。

[0174] 实施例3

[0175] 在上述实施例1和2的基础上，

[0176] 具体的，确定有效曲线段的方式具体为：步骤5的具体过程为：

[0177] 对拟合曲线进行求导，得到极小值和极大值，采用极小值和极大值对拟合曲线进行标记而获得多个曲线段；

[0178] 从多个曲线段中，筛选出上升沿曲线段，上升沿曲线段为用于预测故障时刻的有效曲线段；

[0179] 其中，上升沿曲线段为：以时刻为横坐标，沿横坐标前进方向，先出现极小值、后出现极大值的曲线段。

[0180] 具体的，监测数据的预处理的具体方式为：步骤3的具体过程为：

[0181] 先将振动加速度 $a(t)$ 直接得到 $a'(t)$ 、振动速度 $v(t)$ 进行一次求导得到 $v'(t)$ 、将振动位移 $s(t)$ 进行二次求导得到 $s''(t)$ ；

[0182] 将 $a'(t)$ 、 $v'(t)$ 、 $s''(t)$ 在一级加速度权重系数 Q_a 、一级速度权重系数 Q_v 、一级位移权重系数 Q_d 的约束下进行融合处理，得到融合振动 $A(t)$ ，并计算融合振动 $A(t)$ 的振动烈度 $V(t)$ ，振动烈度 $V(t)$ 为融合振动 $A(t)$ 的有效值。

[0183]
$$A(t) = \frac{Q_a a'(t) + Q_v v'(t) + Q_d s''(t)}{Q_a + Q_v + Q_d}$$
。

[0184] 具体的： Q_a 、 Q_v 、 Q_d 的测算过程如下：

[0185] 所述一级加速度权重系数 $Q_a = P * Aa(T) * \epsilon * Ra(r) * Fa(f)$ ；

[0186] P为反应堆轴封泵表面的压力情况， $Aa(T)$ 为加速度传感器在高温条件下的修正， ϵ 为加速度传感器的材料转换系数， $Ra(r)$ 为辐照剂量对加速度传感器的影响， $Fa(f)$ 为轴封泵的振动频率对加速度传感器的影响；

[0187] 一级速度权重系数 $Q_v = E * Av(T) * Rv(r) * Fv(f)$ ；

[0188] E为现场电磁环境情况； $Av(T)$ 为对速度在高温条件下的修正； $Rv(r)$ 为辐照剂量对

速度传感器的影响, $F_v(f)$ 为轴封泵的振动频率对加速度传感器的影响;

[0189] 一级位移权重系数 $Q_a = S * A_d(T) * M * R_d(r) * F_d(f)$;

[0190] S 为反应堆轴封泵表面的面积, $A_d(T)$ 为对位移传感器在高温条件下的修正, M 为反应堆轴封泵靶材, $R_d(r)$ 为辐照剂量对位移传感器的影响, $F_d(f)$ 为轴封泵的振动频率对位移传感器的影响。

[0191] 具体的,

[0192] (1)、其中, 振动加速度通过高温耐辐射压电式加速度传感器进行接触式测量, 技术指标参考如下: 工作温度: $0^{\circ}\text{C} \sim 450^{\circ}\text{C}$; 灵敏度: $\geq 10\text{pC/g}$; 幅值线性度: $\pm 10\%$; 频率范围: $5\text{Hz} \sim 10\text{kHz}$; 累积辐照剂量: $3 \times 10^8\text{rad}$;

[0193] Q_a 表示为: $Q_a = P * A_a(T) * \varepsilon * R_a(r) * F_a(f)$;

[0194] P 为被测物(轴封泵)表面的压力情况, 振动加速度的测量受到核反应堆环境下高压的影响, 随着压力的增大, 测量结果受到影响, 准确性下降, 压力过大则传感器会受到损害, 核反应堆的压力范围一般为 $0 \sim 20\text{MPa}$, 用函数可初略表示为: 当 $0 \leq P < 6$ 时, $P = 1$; 当 $6 \leq P < 12$ 时, $P = 0.8$; 当 $12 \leq P < 18$ 时, $P = 0.4$; 当 $P > 18$ 时, $P = 0$;

[0195] $A_a(T)$ 为对加速度测量结果在核反应堆高温条件下的修正, 由于加速度传感器内部不含对温度特别敏感的材料, 但测量范围较广, 仍存在一定程度的结果漂移, 设置线性补偿函数对其进行修正即可, 由于核反应堆内一般达不到 450°C 的温度, 其线性补偿函数的系数的确定通过在现场安装调试时或环境试验箱中将温度范围覆盖在 $0^{\circ}\text{C} \sim 320^{\circ}\text{C}$ 条件下测量批量数据进行曲线拟合的方式进行确定。

[0196] ε 为加速度传感器的高温耐辐射压电陶瓷的转换系数, 由于陶瓷的一致性有一定差别且为其固有性质, 经制造后通过常温常压正常环境下的测试可以标定。

[0197] $R_a(r)$ 为辐照剂量对加速度传感器的影响, 核反应堆的中子及伽马辐照会使传感器内部的材料、元件及结构发生改变, 进而影响其输出性能, 在累积辐照剂量(即 $3 \times 10^8\text{rad}$, R_a) 的 0.75 倍之前, 其输出值不受辐照剂量的影响, 之后会随着辐照剂量的增加导致输出值减小, 用函数可表示为: 当 $r \leq 0.75R_a$ 时, $R_a(r) = 1$; 当 $0.75R_a \leq r < 2R_a$ 时, $R_a(r) = -0.8r + 1.6$; 当 $r \geq 2R_a$ 时, $R_a(r) = 0$ 。

[0198] $F_a(f)$ 为测试频率(轴封泵的振动频率)对传感器的影响, 轴封泵的振动频率一般为 $0 \sim 1000\text{Hz}$, 范围内低频下振动加速度的测试较为准确, 为随着频率递增的趋势, 可用函数表示如下: 当 $f \geq 600$ 时, $F_a(f) = 0.6$; 当 $200 \leq f < 600$ 时, $F_a(f) = 0.8$; 当 $f < 200$ 时, $F_a(f) = 1$ 。

[0199] (2)、其中, 振动速度通过高温耐辐射磁电式速度传感器进行接触式测量, 技术指标参考如下: 工作温度: $0^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$; 灵敏度: $20\text{mV}/(\text{mm/s})$, 精度: $\pm 10\%$, 频率范围: $10\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$; 累积辐照剂量: $1 \times 10^8\text{rad}$;

[0200] Q_v 表示为: $Q_v = E * A_v(T) * R_v(r) * F_v(f)$ 。

[0201] E 为现场电磁环境情况, 由于磁电式速度传感器的原理为通过切割磁力线进行感应电动势的输出, 可能会耦合进旁边测试测量设备的小信号, 进而对测试准确性带来影响, 该值需通过现场进行测试与标定, 与正常环境情况下的测试值进行比较, 并拟合出信号范围内的对应关系, 该值的取值范围为 $0 \sim 1$, 1 代表不受现场环境的影响。

[0202] $A_v(T)$ 为对测量结果(速度)核反应堆高温条件下的修正, 由于速度传感器内部不含对温度特别敏感的材料, 但仍存在一定程度的结果漂移, 设置线性补偿函数对其进行修

正即可。线性补偿函数的系数的确定,通过在现场安装调试时或环境试验箱中将温度范围覆盖在 $0^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 条件下测量批量数据进行曲线拟合的方式进行确定。

[0203] $R_v(r)$ 为辐照剂量对速度传感器的影响,核反应堆的中子及伽马辐照会使传感器内部的材料、元件及结构发生改变,进而影响其输出性能,在累积辐照剂量(即 $3\times 10^8\text{rad}$, R_v)的0.75倍之前,其输出值不受辐照剂量的影响,之后会随着辐照剂量的增加导致输出值减小,用函数表示为:当 $r\leq 0.75R_v$ 时, $R_a(r)=1$;当 $0.75R_v\leq r<2R_v$ 时, $R_v(r)=-0.8r+1.6$;当 $r\geq 2R_v$ 时, $R_v(r)=0$ 。

[0204] $F_v(f)$ 为测试频率(轴封泵的振动频率)对速度传感器的影响,轴封泵的振动频率一般为 $0\sim 1000\text{Hz}$,范围内中频段下振动速度的测试较为准确,为随着频率递增的趋势,可用函数表示如下:当 $f\geq 600$ 时, $F_v(f)=0.8$;当 $200\leq f<600$ 时, $F_v(f)=1$;当 $f<200$ 时, $F_v(f)=0.8$ 。

[0205] (3)、其中,振动位移信号通过高温耐辐射电涡流位移传感器通过电磁感应的方式进行非接触式测量,技术指标参考如下:工作温度: $0^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$;测量范围:2mm;幅值线性度: $\pm 10\%$;横向灵敏度: $<3\%$;频率范围:10Hz~1kHz;累积辐照剂量: $4.4\times 10^6\text{rad}$;

[0206] Q_d 表示为: $Q_d=S*Ad(T)*M*Rd(r)*Fd(f)$ 。

[0207] S 为被测物(轴封泵)表面的面积,需保持均匀平整,当其小于传感器探头面积 S_d 的2倍时,测量结果受到影响,准确性下降,用函数可表示为:当 $S\geq 2S_d$ 时, $S=1$;当 $S_d\leq S<2S_d$ 时, $S=0.5$;当 $S<S_d$ 时, $S=0$ 。

[0208] $A_d(T)$ 为对测量结果(位移)在核反应堆高温条件下的修正,由于电涡流传感器内部含有线圈等温度敏感材料,测量结果对温度 T 最为敏感,会随着温度 T 的变化进行漂移,需设置高阶补偿函数对其进行修正,由于每个传感器的线圈参数并不完全一致,因此其温补偿函数是二次函数或更高阶函数,其函数的系数的确定通过在现场安装调试时或环境试验箱中将温度范围覆盖在 $0^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ 条件下测量批量数据进行曲线拟合的方式进行确定。

[0209] M 为被测物(轴封泵)靶材,一般有45#钢,304#不锈钢、铁等,其变化范围在1附近,一般初始传感器校准为45#钢的靶材后设置为1。

[0210] $R_d(r)$ 为辐照剂量对位移传感器的影响,核反应堆的中子及伽马辐照会使位移传感器内部的材料、元件及结构发生改变,进而影响其输出性能,在累积辐照剂量(即 $4.4\times 10^6\text{rad}$, R_d)的0.75倍之前,其输出值不受辐照剂量的影响,之后会随着辐照剂量的增加导致输出值减小,用函数表示为:当 $r\leq 0.75R_d$ 时, $R_d(r)=1$;当 $0.75R_d\leq r<2R_d$ 时, $R_d(r)=-0.8r+1.6$;当 $r\geq 2R_d$ 时, $R_d(r)=0$ 。

[0211] $F_d(f)$ 为测试频率(轴封泵的振动频率)对传感器的影响,轴封泵的振动频率一般为 $0\sim 1000\text{Hz}$,范围内高频下振动位移的测试较为准确,为随着频率递增的趋势,可用函数表示如下:当 $f\geq 600$ 时, $F_d(f)=1$;当 $200\leq f<600$ 时, $F_d(f)=0.8$;当 $f<200$ 时, $F_d(f)=0.6$ 。

[0212] 以上所述的具体实施方式,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施方式而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

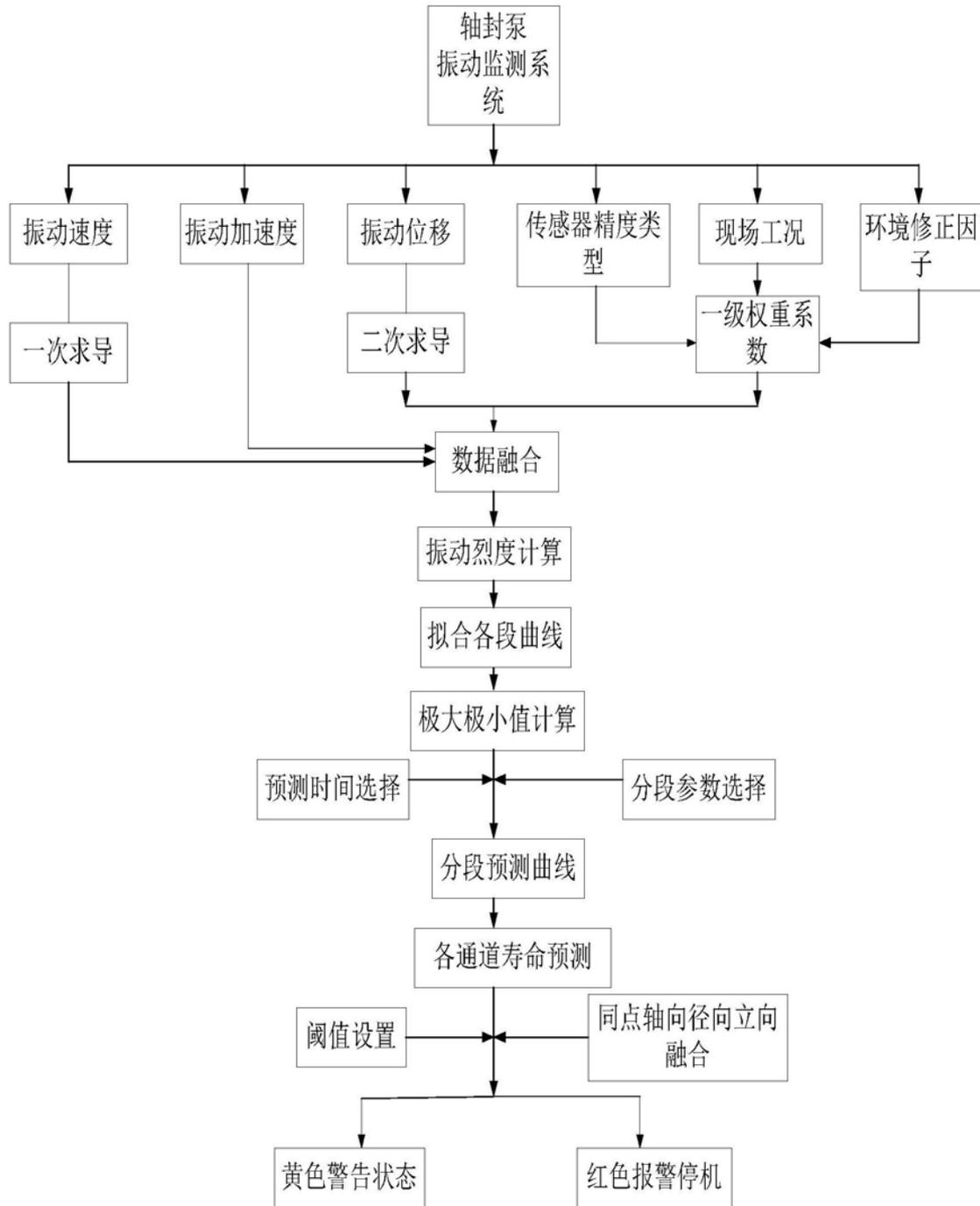


图1

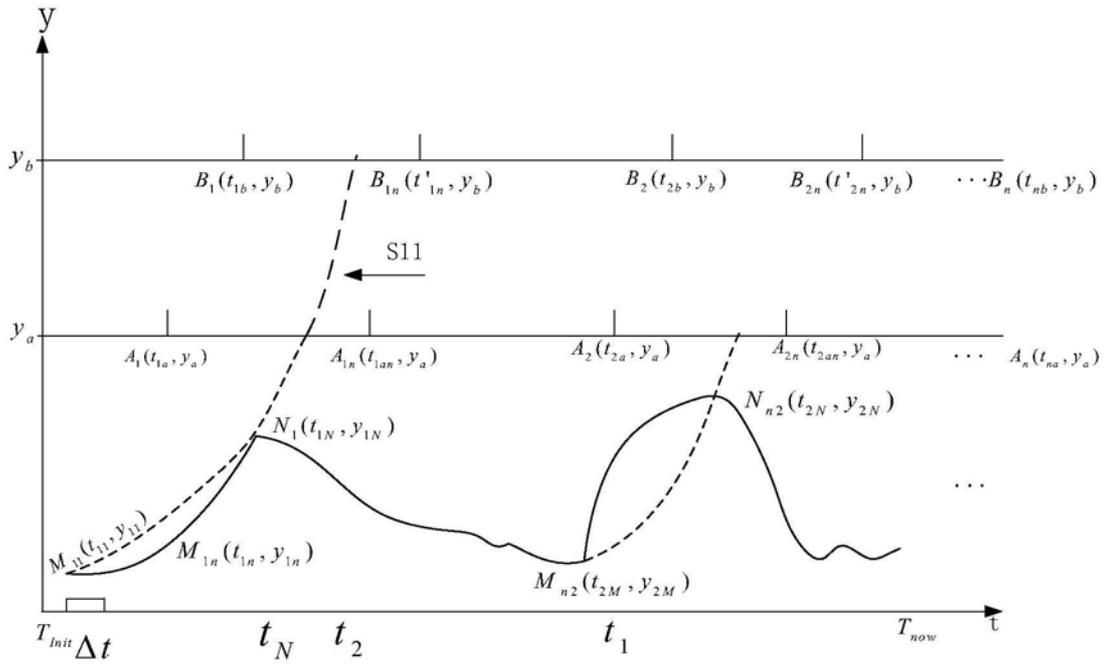


图2