

分段供电切换传感器的在线故障诊断方法*

徐兴华, 马伟明, 崔小鹏, 张明元, 李文禄

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘要:分段供电切换传感器是多段直线电机控制系统的重要部件。针对其故障检测与定位的问题,提出一种切换传感器故障的在线诊断方法。对采集的传感器信号数据进行压缩,以提高计算的效率;研究切换传感器信号根据次级运动的变化规律,定义标准信号集合;给出计算传感信号差异度的方法,作为分析信号相似程度的量化指标;将问题表示为基于有向图的搜索问题,并根据问题的特点缩小搜索的范围;由此提出搜索算法,可以根据测量的传感信号时序估计传感系统的状态变迁过程;给出故障定位流程,利用算法估计的结果,根据系统标准信号集合进行故障定位。为了说明算法与预期结果的一致性,给出3个命题并进行证明;通过实验验证了故障诊断方法的有效性。

关键词:分段供电;直线电机;切换传感器;故障诊断;有向图

中图分类号:TM359 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)06-024-13

Online fault diagnosis method of segment-powered switch control sensor

XU Xinghua, MA Weiming, CUI Xiaopeng, ZHANG Mingyuan, LI Wenlu

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,

Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Segment-powered switch control sensor is an important component for the segmented linear motor control system. For the problems of fault diagnosis and location, an online fault diagnosis method of switch control sensor was proposed. Sensor signal data were compressed to improve computational efficiency; the law of switch control sensor signals changing with shuttle movement was studied, and a set of standard signals were defined; a calculating method for the sensor signal difference which is considered as a quantitative indicator of similarity analysis of signal was given; this problem was represented as the search problem of directed graph and the search was narrowed to a smaller area according to the characteristics of the problem; the search algorithm was given for estimating the process of system state transition according to the metrical data of sensor signals; the fault location process was proposed on the basis of the standard signal set, then the faults were located with the estimated results of the algorithm. Three propositions were given and proved to discuss the consistency between the algorithm and the expected result. The fault diagnosis method was validated through the fault data analysis of actual prototype.

Key words: segment-powered; linear induction motors; switch control sensor; fault diagnosis; directed graph

采用分段供电的直线电机由于具有能量效率高、适装性好等优点,适合于大能量、长距离的直线运动,多应用于磁悬浮列车^[1-3]、磁悬浮发射^[4]、垂直运输^[5-6]和电磁发射^[7-9]等领域。

分段供电的控制经常采用“传感器+控制器+切换开关”的模式。例如:文献[3]采用光电传感器检测初级的运动位置,使用固态继电器作为分段供电的切换开关。文献[7]采用霍尔传感器检测位置,使用晶闸管作为分段供电的切换开关。图1是一种典型的分段供电控制系统。

图1中,切换传感器安装于每段的特定位置,

采用多传感器并列的冗余设计。以次级作为切换传感器感应的对象,当某一路传感器感应到次级时,输出高电平信号,当未感应到次级时,输出低电平信号,切换控制器根据切换传感器以及相邻切换控制器之间的控制信号,产生控制切换开关通断的控制指令。

切换传感器的常见故障情况包括:①偶发异常高电平,即不应该高电平的时候发出高电平信号;②偶发异常低电平,即未正常发出高电平信号;③持续异常高电平,即运行全过程都发出高电平信号;④持续异常低电平,即运行全过程都发出

* 收稿日期:2016-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477178);国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB035601)

作者简介:徐兴华(1982—),男,辽宁大连人,副研究员,博士,E-mail:xinghuaxv@163.com

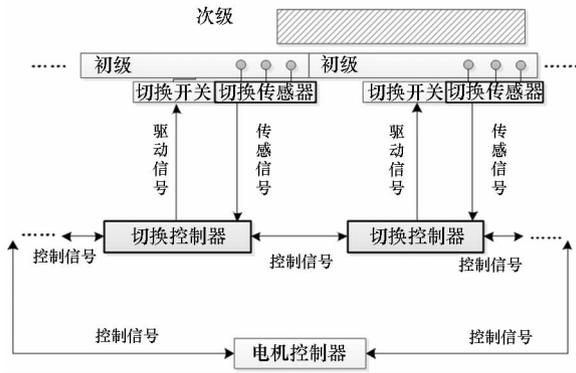


图1 典型的分段供电切换控制系统结构

Fig.1 Typical structure of segment-powered switch control system

低电平信号。前两种故障一般是由干扰或硬件性能下降导致,后两种一般是由硬件完全失效导致。

由于切换传感器的信号用于控制切换开关的导通或关断,一旦出现上述异常,不论是干扰还是硬件失效,都有可能引起切换开关误动作,从而影响直线电机正常工作,还有可能损坏设备。但此类故障较为隐蔽,不一定每次都造成电压电流明显的异常波动,往往难以及时发现。因此,在实际使用中,需要在线对系统运行的录波数据进行综合分析,以便及时维修。

目前关于分段供电故障诊断的研究常利用对各种故障模式下电流和电磁力等指标的变化特征进行分析来发现故障。文献[10]通过分析典型故障情况的等效电路,研究了直线电机故障情况下的运行特点;文献[11]通过研究正常与故障工况下的电磁力,给出了直线电机故障的判据;文献[12]通过分析分段直线感应电机在 $d-q$ 坐标系下的等效数学模型及控制策略,给出了分段供电切换故障的诊断方法。然而这些研究未直接对切换传感信号的特征进行分析,因此无法对切换传感器的故障进行精确诊断与定位。

对传感器故障诊断有多种途径^[13],主要包括硬件冗余^[14]、分析冗余和时序冗余等,基于的方法和理论也多种多样,如基于卡尔曼滤波方程组^[15]、基于小波包变换和支持向量机^[16]、基于动态不确定度^[17]等。多数方法是对单个传感器输出信号波形进行分析从而得到故障的时频特征,但分段供电系统中单个切换传感器所产生的的是方波信号,没必要使用复杂的信号处理算法对其进行处理。

文献[18-19]利用正常的霍尔传感器位置信号通过延时均分的方法,在无刷直流电机转子位置检测传感器进行故障诊断,但其诊断对象为

检测旋转运动的少量传感器,难以适用于检测瞬态直线运动的大量传感器。

文献[20]基于 Hilbert-Huang 变换和自适应滤波的方法,提出了一种对磁悬浮列车的悬浮传感器进行故障检测的方法,是一种从微观角度对每个传感器进行分析的方法,但由于本文研究的系统中切换传感器输出电平信号,因此无法从微观角度进行分析,只能从宏观角度对传感器信号的逻辑组合状态进行分析。

1 前提假设

本文在下列前提假设成立的情况下进行研究:

- 1) 次级的一次运动过程中不改变运动方向,如果改变了运动方向,应视为不同的运动过程;
- 2) 次级运动的起始位置已知;
- 3) 正常情况下,切换传感器在与次级耦合时一定发出高电平信号,未耦合时一定发出低电平信号。

2 传感信号的处理

2.1 数据压缩

在次级的一次运动过程中,各切换控制器通过高频采样将与其连接的传感器的感应信号按时间顺序记录下来,在线传输给故障诊断设备。诊断时须将各传感器的信号时序放在统一的时间基线下进行分析。

由于传感器使用的是电平信号,在高采样频率下,往往同一种状态就有几百至上千个采样点。假设同一种状态的所有采样数据合并为一个值,则可以大大提高计算效率,简化诊断逻辑。按此思路对采集到的数据进行压缩处理,在保持其信息完整的前提下,使数据量最小。

假设系统中一共有 M 个传感器,按照初级起始端到初级末端的顺序依次排列,编号为 1 至 M 。所有传感器在次级运动过程的数据可以用一个矩阵 S 表示:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1T} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{M1} & s_{M2} & \cdots & s_{MT} \end{bmatrix} = [s_1, s_2, \cdots, s_T] \quad (1)$$

式中: T 表示一次运动过程中总的采样周期数; s_{ij} 表示第 i 个传感器在第 j 个采样周期的信号,取值为 0 或 1 (0 表示无感应信号,1 表示有感应信

号); s_j 表示第 j 个采样周期所有传感器的信号。

从第 2 个至第 T 个采样周期, 每个信号当前值与前一个采样周期的值相减, 如得到 0 则表示信号在此时刻不变化, 用矩阵 E 表示:

$$E = \begin{bmatrix} s_{12} - s_{11} & s_{13} - s_{12} & \cdots & s_{1T} - s_{1(T-1)} \\ s_{22} - s_{21} & s_{23} - s_{22} & \cdots & s_{2T} - s_{2(T-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{M2} - s_{M1} & s_{M3} - s_{M2} & \cdots & s_{MT} - s_{M(T-1)} \end{bmatrix} = [e_2, e_3, \dots, e_T] \quad (2)$$

矩阵 E 表示的是各传感器信号的差分关系, 如果出现全为 0 的列向量, 则表示切换信号均未发生跳变。该矩阵通常是一个稀疏矩阵, 有大量列为零向量, 依次寻找非零向量对应的采样时刻 (采样周期序号) 设为 t_2, t_3, \dots, t_k , 再加入第 1 个采样周期, 设 $t_1 = 1$ 。

由此得到适合于逻辑判断的矩阵 Q :

$$Q = [s_{t_1}, s_{t_2}, \dots, s_{t_k}] = [q_1, \dots, q_k] \quad (3)$$

矩阵 Q 已将数据充分压缩, 它的每一列均代表传感器信号在一段时间内保持某一种组合逻辑, 共有 K 列。这些组合逻辑在下文中也称为“系统状态”。

2.2 标准信号集合

在由 M 个传感器组成的系统中, 由于传感器按一定的空间位置排列, 在次级的运动过程中, 在不出现故障的情况下, 传感信号固定地按一定的时序变化。在二维笛卡尔坐标系下表示传感器产生高电平信号的条件如图 2 所示, 其中 X 轴表示次级的运动位移, Y 轴表示传感器的分布位置, 次

级位于初级起点时, 次级尾端位置为坐标原点 O 。

图 2 中 l_e 为次级产生感应信号部分的长度, 线段 α 表示次级首端与传感器耦合的关系, 其表达式为:

$$y = x + l_e, x \in [0, x_{\max}] \quad (4)$$

线段 β 表示次级尾端与传感器耦合的关系, 其表达式为:

$$y = x, x \in [0, x_{\max}] \quad (5)$$

线段 α, β 包夹的面积就是使传感器产生感应信号的情况, 如位置关系在区域外, 传感器不产生感应信号。

p_1, p_2, \dots, p_M 为各传感器沿次级运动方向的安装位置, M 表示传感器的总数。在次级尾端位置 x 从 0 变化至 x_{\max} 的过程中, 系统状态不断变化, 设第 j 种系统状态为 $\theta_j = (F_{1j}, F_{2j}, \dots, F_{Mj})$, F_{ij} 表示第 j 种系统状态中第 i 号传感器的信号, 传感器与次级耦合时其信号取值为 1, 否则取值为 0, 可用分段函数表示:

$$F_{ij} = \begin{cases} 0, & x < p_i - l_e \text{ 或 } x > p_i, 1 \leq i \leq M \\ 1, & p_i - l_e \leq x \leq p_i, 1 \leq i \leq M \end{cases} \quad (6)$$

θ_j 在本文中称为第 j 种系统状态的“标准信号”, 标准信号反映了次级在某个位置时各传感器应出现的正常信号。

设 N_{tail} 是安装位置处于 $[0, x_{\max} - l_e]$ 区间的传感器数量, 即可能由次级尾端位置变化而改变信号的传感器数量; N_{head} 是安装位置处于 $[l_e, x_{\max}]$ 区间的传感器数量, 即可能由次级首端位置变化而改变信号的传感器数量。则次级运动全过程中可能出现系统状态的种类数是 $N = N_{\text{tail}} + N_{\text{head}}$ 。

将系统状态枚举为 $1, 2, \dots, N$, 所对应的标准信号集合表示为 $A = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$, θ_i 称为系统状态 i 的标准信号, $\theta_i = (F_{1i}, F_{2i}, \dots, F_{Mi})$, $1 \leq i \leq N$ 。

2.3 差异度计算

次级运动的全过程, 如果未发生任何故障, 所有传感器的信号会严格按一定的时序变化, 任何时候系统的实测信号都是标准信号。如果实测信号与标准信号有差异, 则可认为是传感器出现了异常。为了描述实测信号和标准信号的差异, 下面给出一种定量的计算方法。

定义维数是 M 、元素全为 1 的向量为 $\varepsilon = (1, 1, \dots, 1)^T$, 设有维数是 M 、元素取值为 $\{0, 1\}$ 的任意向量 p, q ; “ \cdot ” 表示内积。

定义函数 $\xi_1(p, q)$ 为:

$$\xi_1(p, q) = \frac{p \cdot (\varepsilon - q)}{M} \quad (7)$$

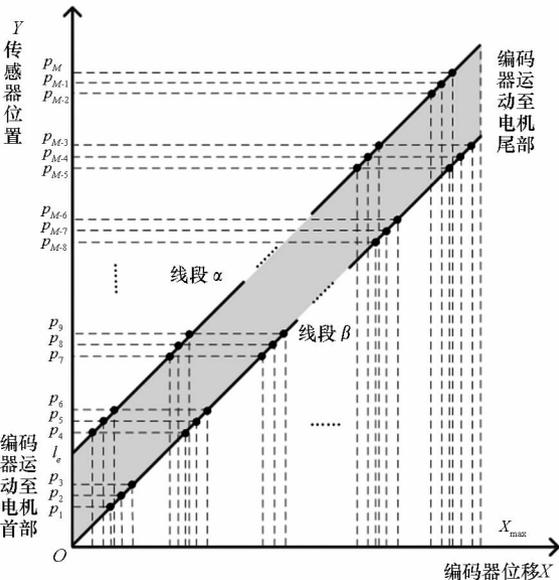


图 2 传感器信号变化与次级位移的关系图
Fig. 2 Relationship between the sensor signal changing and the secondary movement

函数 $\xi_1(p, q)$ 实际上是为了识别 p 中某个维数的元素值为 1 但 q 中相应维数的元素值为 0 的情况,函数值是发现此情况的维数占总维数的比例。

定义函数 $\xi_2(p, q)$ 为:

$$\xi_2(p, q) = \frac{(\varepsilon - p) \cdot q}{M} \quad (8)$$

函数 $\xi_2(p, q)$ 实际上是为了识别 p 中某个维数的元素值为 0 但 q 中相应维数的元素值为 1 的情况,函数值是发现此情况的维数占总维数的比例。

实测信号和标准信号的差异度可以用函数 $\xi(p, q)$ 计算:

$$\begin{aligned} \xi(p, q) &= \xi_1(p, q) + \xi_2(p, q) \\ &= \frac{p \cdot (\varepsilon - q)}{M} + \frac{(\varepsilon - p) \cdot q}{M} \\ &= \frac{p \cdot \varepsilon - p \cdot q + \varepsilon \cdot q - p \cdot q}{M} \\ &= \frac{\varepsilon \cdot p + \varepsilon \cdot q - 2(p \cdot q)}{M} \end{aligned} \quad (9)$$

由此得到矩阵 Ω' 为:

$$\Omega' = \begin{bmatrix} \xi(\theta_1, q_1) & \xi(\theta_1, q_2) & \cdots & \xi(\theta_1, q_K) \\ \xi(\theta_2, q_1) & \xi(\theta_2, q_2) & \cdots & \xi(\theta_2, q_K) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi(\theta_N, q_1) & \xi(\theta_N, q_2) & \cdots & \xi(\theta_N, q_K) \end{bmatrix} \quad (10)$$

矩阵 Ω' 表示系统状态在每一步跳变后,实测信号与各种标准信号的差异度。

定义对角矩阵 H :

$$H = \begin{bmatrix} t_2 - t_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & t_3 - t_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & t_K - t_{K-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & T - t_K \end{bmatrix} \quad (11)$$

对角线的元素是系统状态 q_1, q_2, \dots, q_K 的持续时间。

在矩阵 Ω' 的基础上,加入了每种状态持续时间作为权重因子,对测量信号与各种标准信号的差异度进行加权,得到矩阵 Ω :

$$\Omega = \Omega' H = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \cdots & \omega_{1K} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \cdots & \omega_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{N1} & \omega_{N2} & \cdots & \omega_{NK} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中任意一个元素 $\omega_{ij}, 1 \leq i \leq N$, 有:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} (t_{j+1} - t_j) \times \xi(\theta_i, q_j), & 1 \leq j < K \\ (T - t_K) \times \xi(\theta_i, q_K), & j = K \end{cases} \quad (13)$$

矩阵 Ω 能更好地反映系统变化的总体趋势,有利于提高判断的准确性。

3 最小差异优先搜索

3.1 搜索的有关定义

将传感器系统状态变迁的所有可能性表示为图 3 所示的有向图。其中的每一行表示系统的一种状态,从左到右的各列表示变化的先后次序,每个结点 (i, j) 表示在系统第 j 次变化中处于第 i 种状态。设用于描述系统的有向图为 G 。

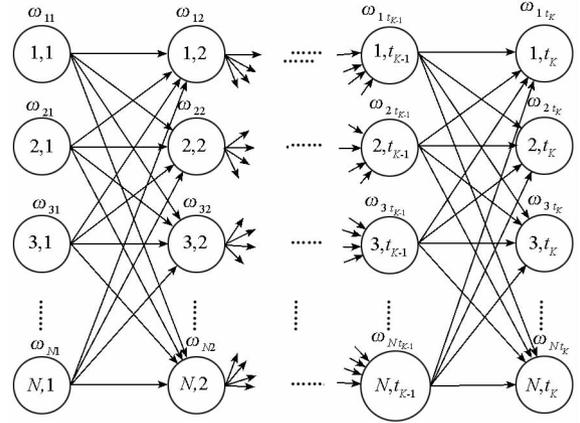


图 3 系统状态变迁有向图

Fig. 3 Directed graph of the system state transition

为了进行传感器故障诊断,提出了一种在有向图中寻找最相似系统变化过程的求解方法,称为“最小差异优先搜索”,下面先给出有关定义。

定义 1 时序向量是指系统状态变迁的有向图中用以描述从起始结点到终止结点的一次变化过程的向量,向量中每个元素都是对系统状态的枚举值,并根据时序依次排列,表达形式为 $seq_r^o = (n_1^o, n_2^o, \dots, n_r^o)^T, r \in \mathbf{Z}^+$ 。

时序向量可用于描述系统状态变化的过程。图 4 举例说明了一个典型的时序向量,以一条结点 (n_1^o, t_b) 到结点 (n_r^o, t_e) 的路径描述了系统的一

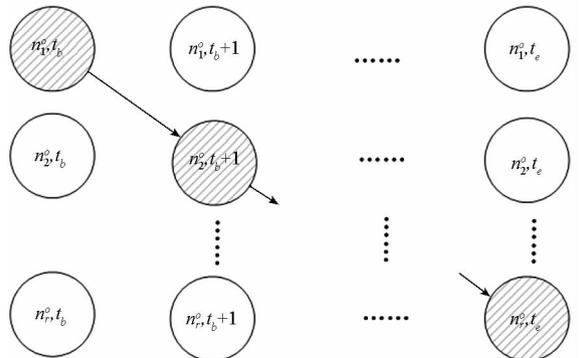


图 4 系统某次变化过程示意图

Fig. 4 Process of the system state transition

下面以前进的运动方向(图5)为例研究最佳时序的搜索方法。

对于前进方向的状态时序,可以分为3种,如图7所示,图7(a)是状态未变化的情况;图7(b)是状态变为后续相邻状态,表示次级运行产生的传感器信号变化;图7(c)是状态变为后续不相邻状态,一般为多个传感器在控制器同一采样周期内发生变化,造成状态连续跳变。时序向量中向后递进变化的方式必是此3种情况之一,除此之外,再无其他变化方式。

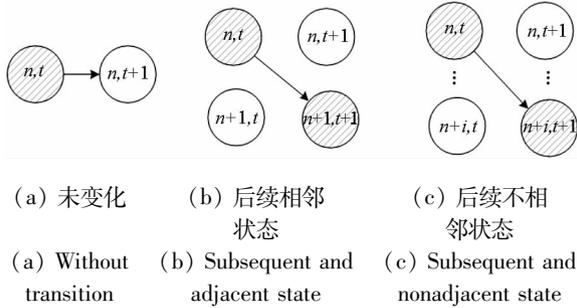


图7 系统允许的状态变化方式列举
Fig.7 List of the promised state transition

根据本文的假设,运动的起始位置已知,因此设在 $Area = \{\theta_{N_0}, \theta_{N_0+1}, \dots, \theta_N\}$ 上的最佳时序估计向量 $\overline{seq}_K = (n_1, n_2, \dots, n_{K-1}, n_K)^T$ 使得 $diff(\overline{seq}_K)$ 取最小值 $\sum_{i=1}^K \omega_{n_i}$ 。其中,集合 $Area$ 依次枚举了从 θ_{N_0} 至 θ_N 的全部系统参考信号。

由此可缩小搜索范围,如图8所示。路径的起点是图最左侧的结点 $(N_0, 1)$, 终点是图最右侧的一列上的某一个结点,即 $(N_0, K), (N_0 + 1, K), \dots, (N, K)$ 中的某一个结点。

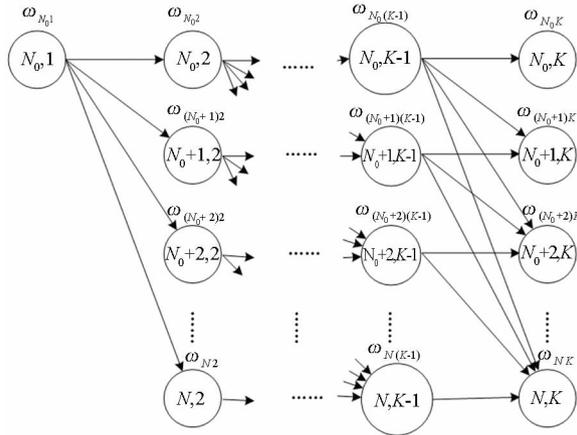


图8 化简后需搜索的有向图
Fig.8 Simplified directed graph

3.3 搜索算法

针对化简后的有向图,提出一种搜索算法,可

求解最佳时序估计向量,具体内容如下所示。

以结点 $(N_0, 1)$ 为起点,层层递进,求起点到每个结点代价最小(差异度最小)的路径,从起点开始遍历整条路径,终点为图右侧第 K 列上的结点,即可得到最佳时序估计向量。

对于 G 中从起点到其他各结点的最小差异时序估计向量,如果能记录其基于矩阵 Ω 的差异度,便可逐步递推至全图范围,直至找到最佳时序估计向量的差异度,因此定义 $(N - N_0) \times K$ 的矩阵 $Diff_0$:

$$Diff_0 = \begin{bmatrix} d_{N_0 1} & d_{N_0 2} & \dots & d_{N_0 K} \\ d_{(N_0+1) 1} & d_{(N_0+1) 2} & \dots & d_{(N_0+1) K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N 1} & d_{N 2} & \dots & d_{N K} \end{bmatrix} \quad (14)$$

对于矩阵 $Diff_0$ 中一个元素 d_{ij} ,其含义是从起点 $(N_0, 1)$ 到达结点 (i, j) 过程中,最小差异时序估计向量 $seq_j' = (n_1', n_2', \dots, n_{j-1}', n_j')^T$ 基于矩阵 Ω 的差异度 $diff(seq_j')$ 。 i, j 的取值范围是 $N_0 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq K$ 。

$Diff_0$ 的第1列对搜索没有实际意义,为简化问题,将其去掉。由此定义 $(N - N_0) \times (K - 1)$ 的矩阵 $Diff$:

$$Diff = \begin{bmatrix} d_{N_0 2} & d_{N_0 3} & \dots & d_{N_0 K} \\ d_{(N_0+1) 2} & d_{(N_0+1) 3} & \dots & d_{(N_0+1) K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N 2} & d_{N 3} & \dots & d_{N K} \end{bmatrix} \quad (15)$$

为记录矩阵 $Diff$ 每个元素对应的最小差异时序估计向量,定义 $(N - N_0) \times (K - 1)$ 的矩阵 $Path$ 用于记录搜索过程的中间结果:

$$Path = \begin{bmatrix} P_{N_0 2} & P_{N_0 3} & \dots & P_{N_0 K} \\ P_{(N_0+1) 2} & P_{(N_0+1) 3} & \dots & P_{(N_0+1) K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N 2} & P_{N 3} & \dots & P_{N K} \end{bmatrix} \quad (16)$$

矩阵 $Path$ 中每个元素 p_{ij} 的定义是,如果从起点 $(N_0, 1)$ 到达结点 $(N_0 + i, j)$ 的最小差异时序估计向量是 $seq_j' = (n_1', n_2', \dots, n_{j-1}', n_j')^T$, 那么 $p_{ij} = n_{j-1}'$ 。 p_{ij} 也可以理解为,在终点 $(N_0 + i, j)$ 向前回溯到上一个结点的记录。 i, j 的取值范围是 $1 \leq i \leq (N - N_0), 2 \leq j \leq K$ 。

根据矩阵 $Path$ 中的记录,可以逐步回溯最小差异路径上经过的所有结点,由此可获得最小差

异路径,即可得到最佳时序估计向量。

此问题本质上是图的优化问题,较类似于常见的最短路径规划问题,但有两个显著区别:①最短路径问题的权值是在结点之间的边上的,而此问题的权值在结点本身;②最短路径问题对结点的访问次序没有约束,而此问题中对结点的访问次序有一定的规则约束。

由于无法直接运用已有的搜索算法求解,因此提出一种根据矩阵 Ω 计算矩阵 *Diff* 和矩阵 *Path* 的算法,其步骤如下:

步骤 1:填写矩阵 *Diff* 的第 1 列。计算公式为

$$d_{i2} = \omega_{N_0 1} + \omega_{i2}$$

步骤 2:填写路径矩阵 *Path* 第 1 列。计算公式为

$$p_{i2} = N_0$$

步骤 3:令 $j = 2$ 。

步骤 4:填写路径矩阵 *Path* 第 j 列。计算公式为

$$p_{i(j+1)} = x$$

其中 x 满足 $d_{sj} = \min_{N_0 \leq l \leq i} d_{lj}$

步骤 5:填写最小差异矩阵 *Diff* 第 j 列。计算公式为

$$d_{i(j+1)} = d_{p_{i(j+1)}j} + \omega_{ij} = \min_{N_0 \leq l \leq i} d_{lj} + \omega_{i(j+1)}$$

步骤 6:如果 $j < K$,则 j 自增 1,跳转到步骤 4。

步骤 7:如果 $K = 1$,则跳转到步骤 12。

步骤 8:填写时序估计向量 \overline{seq}_K 中第 K 项 ($K > 1$)。计算公式为

$$\overline{n}_K = y$$

其中 y 满足 $d_{yK} = \min_{N_0 \leq l \leq N} d_{lK}$

步骤 9:令 $g = K - 1$ 。

步骤 10:填写时序估计向量 \overline{seq}_K 中第 g 项。计算公式为

$$\overline{n}_g = p_{i(j+1)}$$

步骤 11:如果 $g > 1$,则 g 自减 1,跳转到步骤 10。

步骤 12:填写 \overline{seq}_K 中第 1 项。计算公式为

$$\overline{n}_1 = N_0$$

步骤 4 至步骤 6 是一个不断迭代的过程,直至填满矩阵 *Diff* 和矩阵 *Path*;步骤 7 至步骤 12 是通过矩阵 *Path* 回溯生成最佳时序估计向量 \overline{seq}_K 的过程。

本算法可以由实测传感信号得到传感系统的最佳时序估计向量。

3.4 故障的定位

根据算法计算得到 $\overline{seq}_K = (\overline{n}_1, \overline{n}_2, \dots, \overline{n}_K)^T$,结合标准信号集合 $A = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$ (时序中第

j 状态的标准信号为 $\theta_{\overline{n}_j} = (F_{1\overline{n}_j}, F_{2\overline{n}_j}, \dots, F_{M\overline{n}_j})^T$ 、实测信号矩阵 $Q = [s_{t_1}, s_{t_2}, \dots, s_{t_k}]$ (时序中第 j 状态的实测信号为 $s_{t_j} = (s_{1t_j}, s_{2t_j}, \dots, s_{Mt_j})^T$) 以及状态跳变的时刻 t_1, t_2, \dots, t_k 可定位故障传感器及发生故障的时刻,具体流程如图 9 所示。

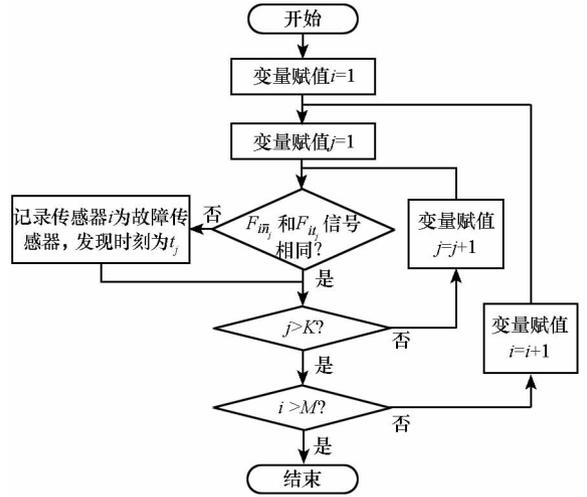


图 9 故障定位流程

Fig.9 Process of fault locating

4 算法的一致性

下面证明搜索目的与算法计算结果的一致性,可分为 3 个命题依次进行证明。

命题 1 由算法得到的矩阵 *Diff* 中任何一个元素 d_{ij} ($N_0 \leq i \leq N, 2 \leq j \leq K$), 设图 10 从结点 $(N_0, 1)$ 到结点 (i, j) 的任一时序向量 $\overline{seq}_j = (n_1, n_2, n_3, \dots, n_{j-1}, n_j)^T$ (其中 $n_1 = N_0, n_j = i$), 若其中任意 n_h ($2 \leq h \leq j-1$) 都满足 $n_{h-1} \leq n_h \leq n_{h+1}$, 则有:

$$d_{ij} = \begin{cases} \omega_{N_0 1} + \omega_{i2}, & j = 2 \\ \omega_{N_0 1} + \omega_{ij} + \min_{\substack{2 \leq h \leq j-1 \\ n_{h-1} \leq n_h \leq n_{h+1}}} \omega_{n_h}, & 3 \leq j \leq K \end{cases} \quad (17)$$

其中 d_{ij} 是由路径头部结点、尾部结点和头尾之间的结点三部分计算得到,如图 10 所示。

下面使用归纳法对子命题 1 进行证明,分为 3 个步骤:

步骤 ①:当 $j = 2$ 时,对于元素 d_{i2} ,根据算法的步骤 1,得到 $d_{i2} = \omega_{N_0 1} + \omega_{i2}$,满足命题要求。

步骤 ②:当 $j = 3$ 时,对于元素 d_{i3} ,根据算法的步骤 4、步骤 5 得到:

$$\begin{aligned} d_{i3} &= \omega_{i3} + \min_{n_1 \leq l \leq i} d_{l2} \\ &= \omega_{i3} + \min_{n_1 \leq l \leq i} (\omega_{n_1 1} + \omega_{l2}) \\ &= \omega_{n_1 1} + \omega_{i3} + \min_{n_1 \leq l \leq i} \omega_{l2} \\ &= \omega_{N_0 1} + \omega_{i3} + \min_{n_1 \leq l \leq i} \omega_{l2} \end{aligned} \quad (18)$$

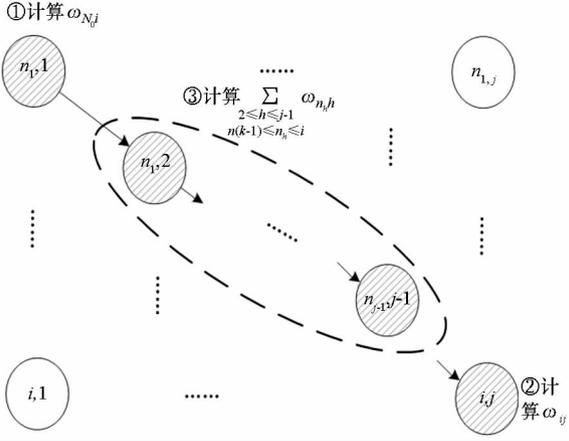


图 10 d_{ij} 的组成示意图

Fig. 10 Constitution of d_{ij}

由于求和公式中 h 只取 2, 求和公式可退化为只有 1 项:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{\substack{2 \leq h \leq 3-1 \\ n_{h-1} \leq n_h \leq i}} \omega_{n_{2h}} \\ &= \min \sum_{\substack{2 \leq h \leq 2 \\ n_{h-1} \leq n_h \leq i}} \omega_{n_{2h}} \\ &= \min \sum_{n_1 \leq n_2 \leq i} \omega_{n_2} \\ &= \min \omega_{n_2} \end{aligned} \quad (19)$$

结合式(18)和式(19)可得:

$$d_{i3} = \omega_{N_0i} + \omega_{i3} + \min \sum_{\substack{2 \leq h \leq 3-1 \\ n_{h-1} \leq n_h \leq i}} \omega_{n_{2h}} \quad (20)$$

满足命题要求。

步骤③: 当 $3 \leq j \leq K-1$ 时, 对于元素 d_{ij} , 如果

有 $d_{ij} = \omega_{N_0i} + \omega_{ij} + \min \sum_{\substack{2 \leq h \leq j-1 \\ n_{h-1} \leq n_h \leq i}} \omega_{n_{2h}}$, 那么根据算

法的步骤 4、步骤 5 可以计算 $d_{i(j+1)}$ 的值为:

$$\begin{aligned} d_{i(j+1)} &= \omega_{i(j+1)} + \min_{n_1 \leq g \leq i} d_{gj} \\ &= \omega_{i(j+1)} + \min_{n_1 \leq g \leq i} (\omega_{N_0g} + \omega_{gj} + \min \sum_{\substack{2 \leq h \leq j-1 \\ n_{h-1} \leq n_h \leq g}} \omega_{n_{2h}}) \\ &= \omega_{N_0i} + \omega_{i(j+1)} + \min_{n_1 \leq g \leq i} (\omega_{gj} + \min \sum_{\substack{2 \leq h \leq j-1 \\ n_{h-1} \leq n_h \leq g}} \omega_{n_{2h}}) \end{aligned} \quad (21)$$

由于 ω_{ij} 可以看作是只有一个元素的序列求和再取最小值, 并且根据已知条件 $n_j = i$, 因此有:

$$\omega_{ij} = \min \sum_{\substack{h=j \\ n_{h-1} \leq n_h \leq g}} \omega_{ij} = \min \sum_{\substack{h=j \\ n_{h-1} \leq n_h \leq g}} \omega_{n_{2h}} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21)中, 得到:

$$\begin{aligned} d_{i(j+1)} &= \omega_{N_0i} + \omega_{i(j+1)} + \min_{n_1 \leq g \leq i} (\min \sum_{\substack{h=j \\ n_{h-1} \leq n_h \leq g}} \omega_{n_{2h}} \omega_{ij} + \\ & \min \sum_{\substack{2 \leq h \leq j-1 \\ n_{h-1} \leq n_h \leq g}} \omega_{n_{2h}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \omega_{N_0i} + \omega_{i(j+1)} + \min_{n_1 \leq g \leq i} (\min \sum_{\substack{2 \leq h \leq j \\ n_{h-1} \leq n_h \leq g}} \omega_{n_{2h}}) \\ &= \omega_{N_0i} + \omega_{i(j+1)} + \min_{\substack{2 \leq h \leq j \\ n_{h-1} \leq n_h \leq g}} \omega_{n_{2h}} \end{aligned} \quad (23)$$

因此, 当 $3 \leq j \leq K-1$ 时, 命题 1 如果对于 j 成立, 则对于 $j+1$ 也成立, 步骤③证毕。

结论: 归纳步骤①~③可以得到, 对于任何 $2 \leq j \leq K$, 都有命题 1 中的式(17)成立, 因此命题 1 得证。

命题 2 对于任意时序估计向量 $\text{seq}_K = (n_1, n_2, \dots, n_K)^T$, N_0 和 K 是固定量, 令 $n_1 = N_0$, 则对任意 $j \in \{2, 3, \dots, K\}$, 满足 $n_{j-1} \leq n_j \leq N$ 的充要条件是: 对于任意 $j \in \{2, 3, \dots, K\}$, 满足 $n_{j-1} \leq n_j \leq n_K, N_0 \leq n_K \leq N$ 。

在命题 1 成立的基础上, 根据反证法可证明命题 2 成立。

证明两个条件等价分为 2 个步骤: 首先证明充分性, 即从后面的条件(条件 2)成立可推出前面的条件(条件 1)成立; 再证明必要性, 即从条件 1 成立可推出条件 2 成立。

步骤①: 证明充分性。

由条件 2 成立可知对于任意 $j \in \{2, 3, \dots, K\}$, 有 $n_{j-1} \leq n_j \leq n_K, N_0 \leq n_K \leq N$, 从而有 $n_{j-1} \leq n_j \leq n_K \leq N$, 即 $n_{j-1} \leq n_j \leq N$, 即条件 2 成立可推出条件 1 成立。

步骤②: 证明必要性。

1) 首先利用反证法证明 $n_K \geq \max_{2 \leq j \leq K} n_j$ 。假设 $n_K < \max_{2 \leq j \leq K} n_j$, 不妨设 $n_h = \max_{2 \leq j \leq K} n_j, h < K$, 则 $n_h \leq n_{h+1} \leq \dots \leq n_K$, 即 $n_h \leq n_K$, 这与假设矛盾, 因此 $n_K \geq \max_{2 \leq j \leq K} n_j$, 反证法证毕。又由于 $\max_{2 \leq j \leq K} n_j \geq n_K$, 因此 $n_K = \max_{2 \leq j \leq K} n_j$, 所以对于任意 $j \in \{2, 3, \dots, K\}$, 满足 $n_{j-1} \leq n_j \leq n_K$ 。

2) 根据条件显然有 $n_K \leq N$ 。又由于 $N_0 = n_1 \leq n_2 \leq \dots \leq n_K$, 因此 $N_0 \leq n_K \leq N$ 。

根据 1) 和 2), 必要性得证。

结论: 综合步骤①和②可知, 命题 2 成立。

命题 3 由算法计算得到的向量 $\overline{\text{seq}}_K = (\overline{n}_1, \overline{n}_2, \dots, \overline{n}_K)^T$ 是最佳时序估计向量, 即对任意向量 $\text{seq}_K = (N_0, n_2, \dots, n_K)^T$, 如果任意 $j \in \{2, 3, \dots, K\}$, 则都满足 $n_{j-1} \leq n_j \leq N, \sum_{j=2}^K \omega_{n_{jj}}^- = \min(\sum_{j=2}^K \omega_{n_{jj}})$ 。

在命题 1、命题 2 成立的基础上, 根据归纳法可证明命题 3 成立, 过程如下:

当 $K = 1$ 时, 易知命题 3 成立。

下面分 3 种情况对 $K > 1$ 的情况进行证明, 因

此分为 3 个步骤:

步骤 ①: 当 $K = 2$ 时, 在时序估计向量 $\overline{seq_2} = \{N_0, n_2\}$ 中, 令 $n_1 = N_0$, 根据算法中的步骤 8, 可知:

$$d_{n_2}^- = \min_{N_0 \leq i \leq N} d_{i2} \quad (24)$$

再将命题 1 的结论代入式(24), 得:

$$\begin{aligned} d_{n_2}^- &= \min_{N_0 \leq i \leq N} (\omega_{N_01} + \omega_{i2}) \\ &= \omega_{N_01} + \min_{n_{j-1} \leq n_j \leq N} \left(\sum_{j=2}^2 \omega_{n_j j} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

根据命题 1, 有:

$$d_{n_2}^- = \omega_{N_01} + \omega_{n_2}^- = \omega_{N_01} + \sum_{j=2}^2 \omega_{n_j j}^- \quad (26)$$

由式(25) 和式(26), 得到:

$$\omega_{N_01} + \sum_{j=2}^2 \omega_{n_j j}^- = \omega_{N_01} + \min_{n_{j-1} \leq n_j \leq N} \left(\sum_{j=2}^2 \omega_{n_j j} \right) \quad (27)$$

即:

$$\sum_{j=2}^2 \omega_{n_j j}^- = \min_{n_{j-1} \leq n_j \leq N} \left(\sum_{j=2}^2 \omega_{n_j j} \right) \quad (28)$$

即当 $K = 2$ 时命题 3 成立。

步骤 ②: 当 $K = 3$ 时, 在时序估计向量 $\overline{seq_2} = \{N_0, n_2, n_3\}$ 中, 令 $n_1 = N_0$, 根据算法中的步骤 8, 可知:

$$d_{n_3}^- = \min_{N_0 \leq i \leq N} d_{i3} \quad (29)$$

$$d_{n_2}^- = \min_{N_0 \leq i \leq n_3} d_{i2} \quad (30)$$

根据算法中的步骤 5, 有:

$$d_{n_3}^- = \min_{N_0 \leq i \leq n_3} d_{i2} + \omega_{n_3}^- = d_{n_2}^- + \omega_{n_3}^- \quad (31)$$

根据式(26) 和式(31), 得到:

$$\begin{aligned} d_{n_3}^- &= \omega_{N_01} + \omega_{n_2}^- + \omega_{n_3}^- \\ &= \omega_{N_01} + \sum_{j=2}^3 \omega_{n_j j}^- \end{aligned} \quad (32)$$

根据命题 1, 有:

$$\begin{aligned} d_{n_3}^- &= \min_{N_0 \leq i \leq N} d_{i3} \\ &= \min_{N_0 \leq i \leq N} (\omega_{N_01} + \omega_{i3} + \min_{\substack{2 \leq j \leq 3-1 \\ n_{j-1} \leq n_j \leq i}} \sum \omega_{n_j j}) \\ &= \omega_{N_01} + \min_{N_0 \leq i \leq N} (\omega_{i3} + \min_{\substack{2 \leq j \leq 3-1 \\ n_{j-1} \leq n_j \leq i}} \sum \omega_{n_j j}) \\ &= \omega_{N_01} + \min_{N_0 \leq n_3 \leq N} (\omega_{n_3} + \min_{\substack{2 \leq j \leq 3-1 \\ n_{j-1} \leq n_j \leq n_3}} \sum \omega_{n_j j}) \\ &= \omega_{N_01} + \min_{N_0 \leq n_3 \leq N} \left(\min_{\substack{2 \leq j \leq 3 \\ n_{j-1} \leq n_j \leq n_3}} \sum \omega_{n_j j} \right) \\ &= \omega_{N_01} + \min_{\substack{2 \leq j \leq 3 \\ n_{j-1} \leq n_j \leq n_3 \\ N_0 \leq n_3 \leq N}} \sum \omega_{n_j j} \end{aligned} \quad (33)$$

根据命题 2, 上式可化为:

$$d_{n_3}^- = \omega_{N_01} + \min_{\substack{2 \leq j \leq 3 \\ n_{j-1} \leq n_j \leq N}} \sum \omega_{n_j j} \quad (34)$$

综合式(32) 和式(34), 可以得到:

$$\omega_{N_01} + \sum_{j=2}^3 \omega_{n_j j}^- = \omega_{N_01} + \min_{\substack{2 \leq j \leq 3 \\ n_{j-1} \leq n_j \leq N}} \sum \omega_{n_j j} \quad (35)$$

即:

$$\sum_{j=2}^3 \omega_{n_j j}^- = \min_{\substack{2 \leq j \leq 3 \\ n_{j-1} \leq n_j \leq N}} \sum \omega_{n_j j} \quad (36)$$

即当 $K = 3$ 时命题 3 成立。

步骤 ③: 当 $K > 3$ 时, 采用反证法。假设命题 3 不成立, 即:

$$\sum_{j=2}^K \omega_{n_j j}^- > \min_{\substack{2 \leq j \leq K \\ n_{j-1} \leq n_j \leq n_3}} \sum \omega_{n_j j} \quad (37)$$

不妨设有某一组向量 $\overline{seq_K}' = (N_0, n_2', n_3', \dots, n_K')^T$ 满足:

$$\sum_{j=2}^K \omega_{n_j j} = \min_{\substack{2 \leq j \leq K \\ n_{j-1} \leq n_j \leq n_3}} \sum \omega_{n_j j} \quad (38)$$

根据命题 1 的结论, 上式可转化为:

$$\sum_{j=2}^K \omega_{n_j j}^- = \min_{\substack{2 \leq j \leq K \\ n_{j-1} \leq n_j \leq N}} \sum \omega_{n_j j} \quad (39)$$

根据算法中的步骤 8, 可知:

$$d_{n_K K}^- = \min_{N_0 \leq i \leq N} d_{iK} \quad (40)$$

对于任意 $1 \leq j < K$, 有:

$$d_{n_j j}^- = \min_{N_0 \leq i \leq n_{j+1}} d_{ij} \quad (41)$$

根据算法中的步骤 5, 有:

$$\begin{aligned} d_{n_K K}^- &= \min_{N_0 \leq i \leq n_K} d_{i(K-1)} + \omega_{n_K K}^- \\ &= d_{n_{(K-1)}(K-1)}^- + \omega_{n_K K}^- \\ &= d_{n_{(K-2)}(K-2)}^- + \omega_{n_{(K-1)}(K-1)}^- + \omega_{n_K K}^- \\ &= \dots \\ &= d_{n_h h}^- + \sum_{j=h+1}^K \omega_{n_j j}^- \\ &= \dots \\ &= d_{n_3}^- + \sum_{i=4}^K \omega_{n_i i}^- \end{aligned} \quad (42)$$

将式(32) 代入式(42), 得到:

$$\begin{aligned} d_{n_K K}^- &= \omega_{N_01} + \omega_{n_2}^- + \omega_{n_3}^- + \sum_{j=4}^K \omega_{n_j j}^- \\ &= \omega_{N_01} + \sum_{j=2}^K \omega_{n_j j}^- \end{aligned} \quad (43)$$

结合式(40) 和式(43), 得到:

$$\begin{aligned} \omega_{N_01} + \sum_{j=2}^K \omega_{n_j j}^- &> \omega_{N_01} + \sum_{j=2}^K \omega_{n_j j} = \\ \omega_{N_01} + \omega_{n_K K}^- + \sum_{j=2}^K \omega_{n_j j} & \quad (44) \end{aligned}$$

由于向量 $seq_K' = (N_0, n_2', n_3', \dots, n_K')^T$ 中, 对于任意 $j \in \{2, 3, \dots, K\}$, 满足 $n_{j-1} \leq n_j \leq N$, 因此根据命题 1, 有:

$$d_{n_K'K} = \omega_{N_01} + \omega_{n_K'K} + \min_{\substack{2 \leq j \leq K-1 \\ n_{j-1} \leq n_j \leq n_K'}} \sum \omega_{n_j'j} \leq \omega_{N_01} + \omega_{n_K'K} + \sum_{j=2}^K \omega_{n_j'j} \quad (45)$$

结合式(43)、式(44)和式(45)得:

$$d_{n_K'K} < d_{n_K K}^- \quad (46)$$

又由算法的步骤 8 可知:

$$d_{n_K K}^- = \min_{N_0 \leq l \leq N} d_{lK} \quad (47)$$

即 $d_{n_K'K} < \min_{N_0 \leq l \leq N} d_{lK}$, 显然不成立, 因此原假设不成立, 步骤 ③ 得证。

结论: 归纳步骤 ① ~ ③ 可知, 命题 3 成立。

命题 3 说明了由算法计算得到的向量 $seq_K = (\overline{n_1}, \overline{n_2}, \dots, \overline{n_K})^T$ 是最佳时序估计向量, 由此证明了算法与期望计算结果的一致性。

5 实验验证

利用样机对故障诊断算法进行实验验证, 方案如图 11 所示。针对几种典型的异常工况, 分别利用本文的方法对实际数据进行处理。

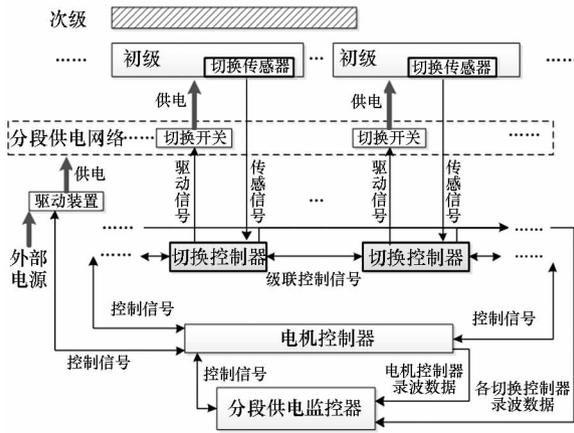
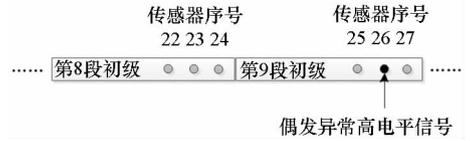


图 11 切换传感器故障诊断系统方案

Fig. 11 Fault diagnosis system for switch control sensor

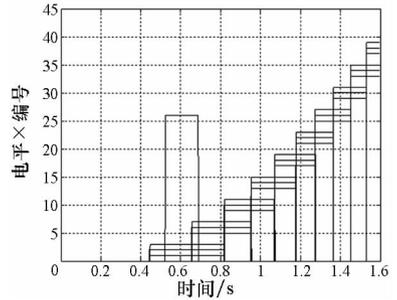
选取切换传感器偶发异常高电平、偶发异常低电平、持续异常高电平、持续异常低电平这 4 类故障发生时的典型数据, 故障分别如图 12 ~ 15 中的子图(a)所示; 传感器信号波形分别如图 12 ~ 15 中的子图(b)所示, 横坐标表示时间, 单位是秒, 纵坐标表示传感器电平 × 传感器编号, 其中传感器电平取值为 0 或 1 (0 代表低电平, 1 代表高电平), 传感器编号为从 1 开始递增的自然数。

根据此 4 类异常情况下的传感器数据, 使用本文的方法进行数据压缩, 并建立与标准信号的



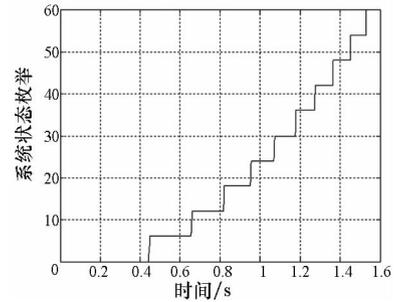
(a) 传感器位置及故障模式

(a) Sensor position and fault mode



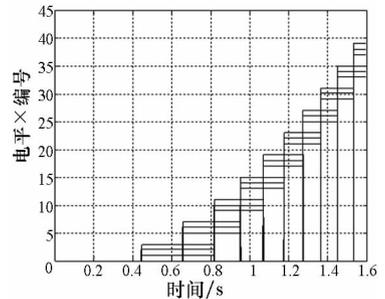
(b) 实际传感器信号

(b) Actual sensor signal



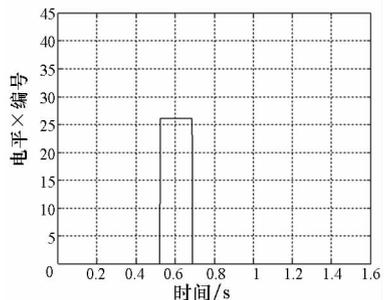
(c) 最佳时序估计

(c) The best sequence estimation



(d) 信号还原的结果

(d) Signal reduction result



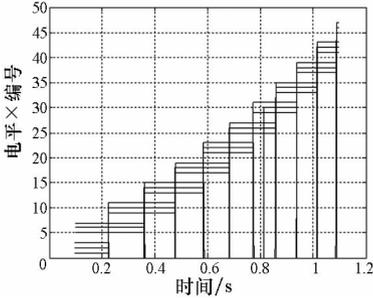
(e) 故障检测结果

(e) Fault diagnosis result

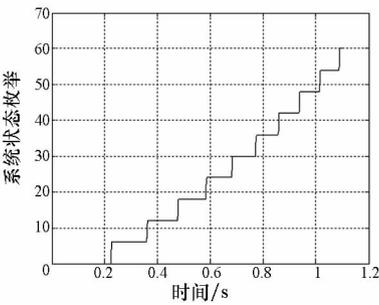
图 12 传感器偶发异常高电平信号的检测
Fig. 12 Detection for the accidentally abnormal high level signal of the sensor



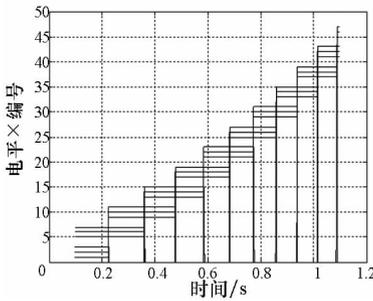
(a) 传感器位置及故障模式
(a) Sensor position and fault mode



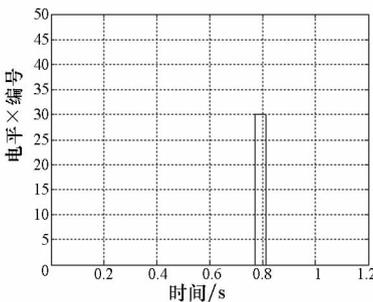
(b) 实际传感器信号
(b) Actual sensor signal



(c) 最佳时序估计
(c) The best sequence estimation



(d) 信号还原的结果
(d) Signal reduction result

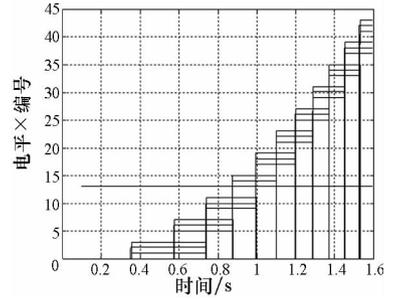


(e) 故障检测结果
(e) Fault diagnosis result

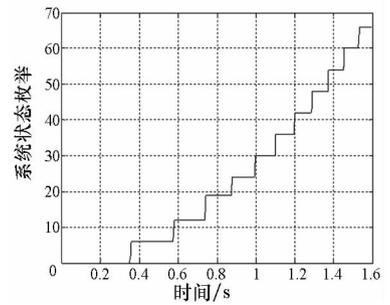
图 13 传感器偶发异常低电平信号的检测
Fig. 13 Detection for the accidentally abnormal low level signal of the sensor



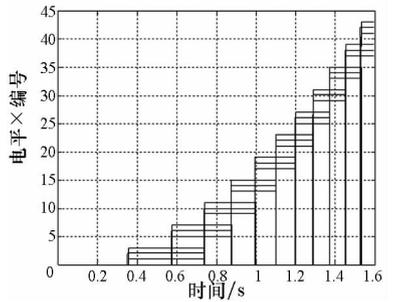
(a) 传感器位置及故障模式
(a) Sensor position and fault mode



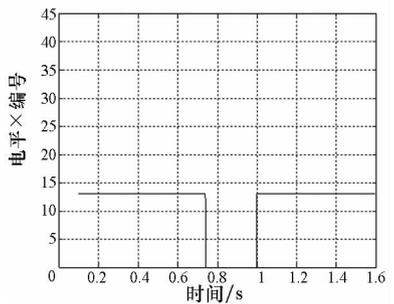
(b) 实际传感器信号
(b) Actual sensor signal



(c) 最佳时序估计
(c) The best sequence estimation



(d) 信号还原的结果
(d) Signal reduction result



(e) 故障检测结果
(e) Fault diagnosis result

图 14 传感器持续异常高电平信号的检测
Fig. 14 Detection for the continuously abnormal high level signal of the sensor

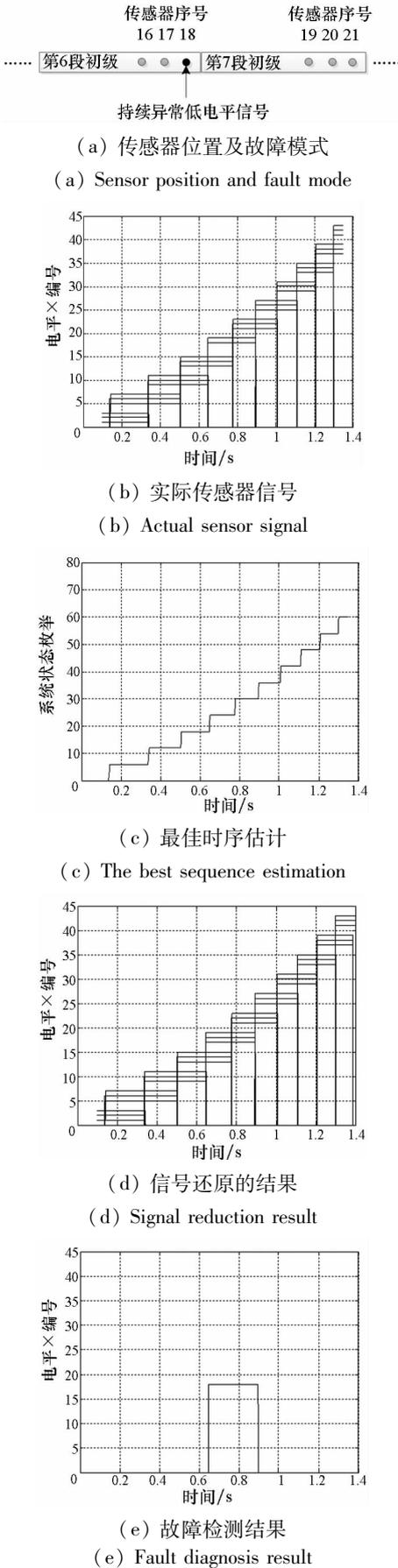


图15 传感器持续异常低电平信号的检测
Fig. 15 Detection for the continuously abnormal low level signal of the sensor

差异度矩阵,使用算法在矩阵中从起点至终点搜索最小差异路径,得到时序估计向量 seq_k ,分别如图12~15中的子图(c)所示,其中纵坐标是通过算法估计得到的状态序号。根据时序估计向量 seq_k 可还原出无故障条件下传感器应该发出的信号,分别如图12~15中的子图(d)所示,其横纵坐标的含义与子图(b)相同。通过本文故障定位流程得到的故障诊断结果分别如图12~15中的子图(e)所示,曲线中0代表正常,非0部分代表异常的传感器序号以及发现故障的时间。

图12表示了次级的一次运动中,在0.52~0.69 s之间第26号传感器(图12(a))产生偶发异常高电平信号(图12(b)),通过本文的算法可计算得到最佳时序估计(图12(c))。通过标准信号集合,将最佳时序估计还原为无故障条件下应该出现的信号(图12(d)),实测信号与标准信号进行比对,可得故障诊断的结果(图12(e))。

图13表示了次级的一次运动中,在0.77~0.81 s之间第30号传感器(图13(a))产生偶发异常低电平信号(图13(b)),通过本文的算法可计算得到最佳时序估计(图13(c))。通过标准信号集合,将最佳时序估计还原为无故障条件下应该出现的信号(图13(d)),实测信号与标准信号进行比对,可得故障诊断的结果(图13(e))。

图14表示了次级的一次运动中,在全过程0~1.6 s之间第13号传感器(图14(a))产生持续异常高电平信号(图14(b)),通过本文的算法可计算得到最佳时序估计(图14(c))。通过标准信号集合,将最佳时序估计还原为无故障条件下应该出现的信号(图14(d)),实测信号与标准信号进行比对,可得故障诊断的结果(图14(e))。其中0.73~0.99 s之间未检测到异常,这是由于此段时间内第13号传感器的高电平也符合正确的时序逻辑,无法区分是异常还是正常。

图15表示了次级的一次运动中,在全过程0~1.4 s之间第18号传感器(图15(a))产生持续异常低电平信号(图15(b)),通过本文的算法可计算得到最佳时序估计(图15(c))。通过标准信号集合,将最佳时序估计还原为无故障条件下应该出现的信号(图15(d)),实测信号与标准信号进行比对,可得故障诊断的结果(图15(e))。其中只有0.63~0.90 s之间检测到异常,其余时间未检测到异常,这是由于其余时间内第18号传感器的低电平也符合正确的时序逻辑,无法区分是异常还是正常。

因此,对于上述4类传感器异常,本文的方法

都能够准确定位故障。但由于本文的方法是基于信号时序逻辑进行判断的,因此对于故障产生的信号与正常信号一致的時刻,本文的方法无法分辨。

在实际系统中,每一段直线电机都安装有一台切换传感器盒,利用本文的方法可直接定位至故障的切换传感器盒,通过更换备件的方法可实现部件级维修。

6 结论

针对长初级短次级直线电机切换控制传感器的失效问题,提出了一种切换传感器故障的在线诊断与定位方法。根据次级运动时产生的切换传感信号,提出数据压缩方法和搜索限制条件,从而提高计算效率。根据次级运动的变化规律,定义了切换传感器的标准信号集合,给出了计算传感信号差异度的方法,利用有向图对问题进行描述,并提出了最优搜索算法,给出了切换传感器故障诊断与定位流程,提出了 3 个命题并给出了具体证明过程以说明算法过程与期望结果的一致性。最后通过实验验证了方法的有效性。本方法为无位置数据情况下分段供电切换控制系统的在线故障诊断提供了一种有效途径。

参考文献 (References)

- [1] 董海军. 卧龙磁悬浮列车试验线牵引供电系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
DONG Haijun. Research on the power supply system of Wolong maglev test line [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [2] Thornton R, Thompson M T, Perreault B M, et al. Linear motor powered transportation[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(11): 1754 - 1757.
- [3] 周大进, 马家庆, 赵立峰, 等. 真空管道 HTS 磁浮列车实验系统环形加速器设计[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(4): 391 - 398.
ZHOU Dajin, MA Jiaqing, ZHAO Lifeng, et al. Design of ring-shaped accelerator for high temperature superconducting maglev trains moving in evacuated tube[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(4): 391 - 398. (in Chinese)
- [4] 黄永刚, 王素玉, 王家素, 等. 高温超导磁悬浮冷发射装置供电控制系统的设计[J]. 低温与超导, 2007, 35(2): 121 - 124.
HUANG Yonggang, WANG Suyu, WANG Jiasu, et al. The power supply control system design of high temperature superconducting maglev launch system[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2007, 35(2): 121 - 124. (in Chinese)
- [5] 上官璇峰, 励庆孚, 袁世鹰. 多段初级永磁直线同步电动机驱动系统整体建模和仿真[J]. 电工技术学报, 2006, 21(3): 52 - 57.
SHANGGUAN Xuanfeng, LI Qingfu, YUAN Shiyong.

- Integrated modeling and simulation of the systems driven by multi-segment primary permanent linear synchronous motors[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2006, 21(3): 52 - 57. (in Chinese)
- [6] 上官璇峰, 励庆孚, 袁世鹰. 多段初级永磁直线同步电机驱动的垂直提升系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 7 - 12.
SHANGGUAN Xuanfeng, LI Qingfu, YUAN Shiyong. The vertical hoist system driven by PMLSM with multi-segment primary[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(18): 7 - 12. (in Chinese)
- [7] Michael R D, Douglas J S, Thomas C, et al. Electromagnetic aircraft launch system—EMALS[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1): 528 - 553.
- [8] Patterson D, Monti A. Design and simulation of an electromagnetic aircraft launch system [C]//Proceedings of IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, 2002: 1475 - 1480.
- [9] 鲁军勇, 马伟明, 孙兆龙. 多段初级直线感应电动机静态纵向边端效应研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 95 - 101.
LU Junyong, MA Weiming, SUN Zhaolong. Research on static longitudinal end effect of linear induction motor with multi-segment primary[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29(33): 95 - 101. (in Chinese)
- [10] 上官璇峰, 励庆孚, 袁世鹰. 分段初级 PMLSM 提升系统能耗制动时电路切换故障分析[C]//2006 年全国直线电机学术年会, 2006: 174 - 180.
SHANGGUAN Xuanfeng, LI Qingfu, YUAN Shiyong. Analysis on the circuit switch fault of the vertical hoist system driven by multi-segment primary PMLSM for energy-loss brake[C]// Proceedings of the Linear Motor Symposium of 2006, 2006: 174 - 180. (in Chinese)
- [11] 于芳, 余海涛, 胡敏强. 长定子直线同步电机电磁推力计算和故障分析[J]. 微电机, 2010(8): 31 - 34.
YU Fang, YU Haitao, HU Minqiang. The propulsion force computation and fault analysis of the long-stator linear synchronous motors[J]. Micromotors, 2010(8): 31 - 34. (in Chinese)
- [12] 崔小鹏, 王公宝, 马伟明, 等. 直线电机分段供电故障诊断研究[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(8): 9 - 14.
CUI Xiaopeng, WANG Gongbao, MA Weiming, et al. Research on fault diagnosis of segment-powered linear induction motor[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(8): 9 - 14. (in Chinese)
- [13] 张娅玲, 陈伟民, 章鹏, 等. 传感器故障诊断技术概述[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(1): 4 - 6.
ZHANG Yaling, CHEN Weimin, ZHANG Peng, et al. Overview on sensor fault diagnosis technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(1): 4 - 6. (in Chinese)
- [14] 黎梨苗, 陆绮荣, 徐永杰. 基于硬件冗余的传感器故障诊断研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(19): 211 - 212.
LI Limiao, LU Qirong, XU Yongjie. Research of sensor fault diagnosis based on hard ware redundancy[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(19): 211 - 212. (in Chinese)

579. (in Chinese)
- [9] 万晨. 舰载机阻拦装置刚柔耦合系统建模及动态特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013: 8.
WAN Chen. Research on rigid-flexible coupling model and dynamic character of carrier-based aircraft arresting system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013: 8. (in Chinese)
- [10] 张新禹. 阻拦索的动力学特性分析及仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 9.
ZHANG Xinyu. Dynamic analysis and simulation of arresting cable[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011: 9. (in Chinese)
- [11] Zhang Y X, Zhang M Y, Ma W M, et al. Modeling of a double-stator linear induction motor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 47(11): 572-579.
- [12] Mc Donnell Douglas Corporation. NATOPS flight manual navy model F/A-18E/F 165533 and up aircraft [R]. US Navy A1-F18EA-NFM-000, 2008.
- [13] 陈稗, 昂海松. F/A-18F 舰载飞机起降特性分析[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2011, 25(3): 66-74.
CHEN Bai, ANG Haisong. Analysis of take-off and landing characteristics of F/A-18F carrier-based aircraft [J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2011, 25(3): 66-74. (in Chinese)
-
- (上接第36页)
- [15] 谭平, 蔡自兴, 余伶俐. 不同精度的冗余传感器故障诊断研究[J]. 控制与决策, 2011, 26(12): 1909-1912.
TAN Ping, CAI Zixing, YU Lingli. Research on fault diagnosis of different precision redundant sensors[J]. Control and Decision, 2011, 26(12): 1909-1912. (in Chinese)
- [16] 冯志刚, 王祁, 徐涛, 等. 基于小波包和支持向量机的传感器故障诊断方法[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2008, 32(5): 609-614.
FENG Zhigang, WANG Qi, XU Tao, et al. Sensor fault diagnosis based on wavelet packet and support vector machines[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 32(5): 609-614. (in Chinese)
- [17] 赵志刚, 赵伟. 基于动态不确定度理论的多传感器系统传感器失效检测方法[J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2723-2726.
ZHAO Zhigang, ZHAO Wei. A new sensor fault detection method based on dynamic uncertainty theory [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(6): 2723-2726. (in Chinese)
- [18] 李自成, 刘新芝, 曾丽, 等. 无刷直流电机转子位置传感器故障诊断及容错策略[J]. 微电机, 2014, 47(4): 59-61.
LI Zicheng, LIU Xinzhi, ZENG Li, et al. Fault diagnosis and fault-tolerant control strategy for rotor position of brushless DC motor drives[J]. Micromotors, 2014, 47(4): 59-61. (in Chinese)
- [19] 周近, 莫晓晖. 开关磁阻电机位置传感器故障的实时诊断与容错控制研究[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(6): 77-84.
ZHOU Jin, MO Xiaohui. Research of fault real-time diagnosis and fault-tolerant control of position sensors for switched reluctance motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(6): 77-84. (in Chinese)
- [20] 翟毅涛. 中低速磁浮列车传感器故障检测[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
ZHAI Yitao. Fault detection of sensors in middle-low velocity maglev train[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2009. (in Chinese)