

DOI: 10.19666/j.rlfed.202208219

基于动态规整与 Park 矢量离心变化率的风电机组变流器健康状态评估

高晨¹, 童博¹, 张宇², 姚中原², 谢小军¹, 赵勇¹

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2.华能江苏清洁能源分公司, 江苏 南京 210015)

[摘要] 针对风电机组变流器绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 模块故障率高且故障发生在较短时间尺度上的情况, 提出基于动态规整与 Park 矢量离心变化率的变流器 IGBT 健康状态评估方法, 利用动态规整算法建立相似度计算模型, 计算三相波形的最小规整距离与波形相似度并实现变流器运行状态判断; 利用 Park 矢量椭圆离心率与变化率进行 IGBT 状态评估并设定评估指标。分别通过仿真及实际运行数据验证。验证结果表明, 该方法具有较好的实用性, 在故障发生前波形相似度逐渐降低, Park 矢量离心率变化趋势持续增大, 表明这种算法模型能够明显区分正常波形与异常波形。采用该方法能及时反映变流器健康状态, 可以有效避免由于 IGBT 故障而导致电力电子系统关闭或损坏的情况。

[关键词] 风电机组; 变流器; 动态规整; Park 矢量; 健康状态评估

[引用本文格式] 高晨, 童博, 张宇, 等. 基于动态规整与 Park 矢量离心变化率的风电机组变流器健康状态评估[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 49-57. GAO Chen, TONG Bo, ZHANG Yu, et al. Health assessment of wind turbine IGBT based on dynamic regularization and Park vector centrifugal change rate[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 49-57.

Health assessment of wind turbine IGBT based on dynamic regularization and Park vector centrifugal change rate

GAO Chen¹, TONG Bo¹, ZHANG Yu², YAO Zhongyuan², XIE Xiaojun¹, ZHAO Yong¹

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Jiangsu Clean Energy Branch, Huaneng Power International Inc., Nanjing 210015, China)

Abstract: In view of the high failure rate of the insulated gate bipolar transistor (IGBT) of wind turbine converter and the fact that the failure occurs on a short time scale, a health state assessment method of the IGBT based on dynamic regularization and Park vector centrifugal change rate is proposed. The similarity calculation model is established by using the dynamic regularization algorithm to calculate the minimum regularization distance and waveform similarity of three-phase waveforms to judge the condition of the converter. The centrifugal rate and change rate of Park vector ellipse are used to evaluate the IGBT status and set the evaluation index. Moreover, the practicability is verified by simulation data and operation data, respectively. The results reveal that, these two methods have good practicability, the waveform similarity decreases gradually before the fault occurs, and the change trend of Park vector eccentricity continues to increase, which proves that the two algorithm models can clearly distinguish between normal and abnormal waveforms. Using these two methods can timely feed back of the converter health status, thus to effectively avoid the shutdown or damage of the power electronic system due to the IGBT fault and avoid the property loss caused by equipment fault.

Key words: wind turbine unit; converter; dynamic regularization; Park vector; health status evaluation

风电机组是集机械、电气设备于一体的复杂多部件系统^[1-2]。长期以来, 学者们针对叶轮系统^[3]、齿轮

箱^[4]、主轴承^[5]等关键机械部件的健康评估开展了大量研究, 电气设备受到的关注相对较少。然而常见

收稿日期: 2022-08-31 网络首发日期: 2023-02-25

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ20-H44)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ20-H44)

第一作者简介: 高晨 (1991), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为风电机组设备状态评估, gaochen@tpri.com.cn.

机组故障中以变流器故障为代表的电气系统故障虽然停机时间占比较低(8%),但故障率所占比例很高(32%)^[6]。

绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)模块作为变流器的“心脏”,更是整个风电系统及其电气设备正常运行的基础保障^[7-8]。在日常工作中,IGBT模块重复开通或关断,长期处于热冲击的反复作用下,容易产生疲劳效应,从而加速老化或失效,其实际状态与工作寿命将影响整个变流器设备或风能-电能转换系统的正常运行^[9-10]。由于IGBT故障发生时间尺度为微秒级,研究故障后的维修计划实际意义不大^[11],而通过实时监测IGBT模块状态,对IGBT的运行状态、健康状态进行准确评估,防止由于IGBT故障而导致电力电子系统关闭或损坏的情况出现,避免设备故障引起的财产损失,则更具有实际价值。

针对变流器状态监测参量选取,学者们进行了深入研究。通常情况下变流器功率器件内部热阻增加20%可作为功率模块基本失效的依据之一^[12-13]。然而,在高开关频率工况及复杂噪声环境下,采用功率模块内部的传感器很难监测到这些微弱的特征量信号,需要采取其他手段。基于电流的监测可以用来判断变流器中电力电子器件IGBT的开路故障,通过利用时频域分析^[14]、电流Park矢量法^[15]、归一化直流法^[16]、负载电流分析法^[17]和电流模式识别法^[18]等手段可以进行IGBT故障诊断。风电机组变流器故障发生前,变流器网侧电流波形会发生相应的畸变,传统电流波形分析采用快速傅里叶变换等手段获取频域电流信息。然而频域分析存在频谱泄漏、分辨率受限、无法区分实际状态等问题^[19-21]。采用平均电流Park矢量法存在负载电流越大,其Park矢量幅值也越大,因此该方法中故障界定值对负载比较敏感,不独立,在突加负载导致电流突然增大时会产生误诊断。基于此,本文提出基于动态规整与Park矢量椭圆变化率的变流器健康状态评估方法,并通过仿真与现场实际数据对所提出的方法进行验证。

1 健康评估算法原理

1.1 动态规整评估模型原理

动态规整(dynamic time warping, DTW)最先在语音数字处理领域得到诸多成功应用^[22],目前已成为时间序列相似比较的重要距离度量。与类欧氏

(Euclidean)距离不同,它不完全是点对点之间进行计算,而是在局部范围内可以跳过匹配序列中的若干点,从而使两序列能够以最佳方式匹配。这样既保持了大部分点对之间的匹配,同时又可以避免类欧氏距离的缺点。具体算法实施原理如下。

假设降维后的2条长度分别为 m 、 n 的一维时间序列为:

$$\begin{aligned} q[1:m] &= \{q_1, q_2, \dots, q_m\}; \\ c[1:n] &= \{c_1, c_2, \dots, c_n\} \end{aligned} \quad (1)$$

首先构造一个大小为 $m \times n$ 的距离矩阵,称为弯曲矩阵,如图1所示。其中方格 (i, j) ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$)对应数据点 (q_i, c_j) 之间的匹配,方格的值为 $d(q_i, c_j)$,称为基距离。基距离计算方法有多种,本文中,基距离计算公式为:

$$d(q_i, c_j) = (q_i - c_j)^2 \quad (2)$$

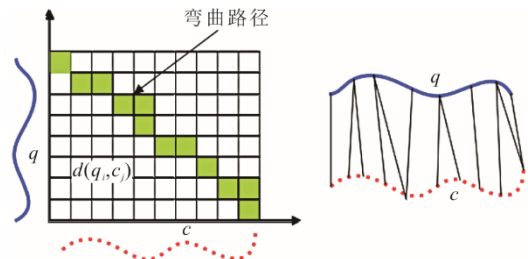


图1 计算DTW的弯曲矩阵
Fig.1 The bending matrix calculating DTW

构造弯曲矩阵并完成各点基距离计算后,各点对之间的距离对应转变为弯曲矩阵中的一条从方格 $(1, 1)$ 到方格 (m, n) 的弯曲路径,计算公式为:

$$W = w_1, w_2, \dots, w_l \{ \max(m, n) \leq l \leq m+n \} \quad (3)$$

定义一个映射函数 f_w 将弯曲路径中的 (q, c) 点对映射到弯曲路径中的一个方格,即:

$$\begin{aligned} f_w &: (q, c) \rightarrow W \\ w_k &= f_w(q_i, c_j) \\ 1 &\leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq l \end{aligned} \quad (4)$$

之后,对所有的距离进行累加得到DTW累加距离 d_{CD} (cumulative distances),即为两时间序列之间的距离,计算公式为:

$$d_{CD}(m, n) = d(q_m, c_n) + d_{CD\epsilon} \quad (5)$$

式中: $d_{CD}(m, n)$ 表示从 $(1, 1)$ 点开始到达 (m, n) 点的累加距离 d_{CD} ; $d_{CD\epsilon}$ 表示到达第 (m, n) 点前一个临近的点的最短距离,即 $d_{CD}(m, n-1)$ 与的最小值。

进一步地,为了解决周期序列平移导致的DTW累加过大问题,在最终累加距离 d_{CD} 中引入缩减系数,即:

$$\alpha = 1 - \frac{\sigma^2}{m \times n} \quad (6)$$

式中：为最长公共子串的偏移容忍度，具体为两序列计算标准差较大的一个。则最终经过优化的累加距离计算公式如式(7)所示，根据累加距离即可进行后续相似度转换。

$$d_{CDopt}(m, n) = \sigma \cdot d_{CD}(m, n) \quad (7)$$

1.2 Park 矢量离心变化率评估模型原理

网侧变流器拓扑结构如图 2 所示。

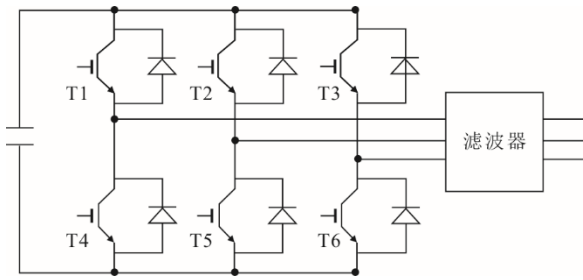


图 2 网侧变流器拓扑结构
Fig.2 Topology structure of the grid side inverter

传统计算方法中根据磁势相等原理，变流器网侧三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 可从三相静止坐标系变换到两相轴系，即 $i = i_\alpha + i_\beta$ 。Park 矢量变换方程为：

$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_a \\ i_\beta &= \frac{(i_b - i_c)}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (8)$$

完成变换后计算 i_α 和 i_β 1 个周期内的平均值，计算公式为：

$$a_{vr_v} = \frac{1}{N} \times \sum_{n=1}^N i_v(n); (v = \alpha, \beta) \quad (9)$$

式中： a_{vr_v} 为 1 个周期内电流平均值，其中 $v = \alpha, \beta$ 表示两相轴系； N 为周期内采样点数。

进一步可得到平均电流 Park 矢量的模和相角，计算公式为：

$$\begin{aligned} a_{vr} &= \sqrt{a_{vr_\alpha}^2 + a_{vr_\beta}^2} \\ \theta &= \arctan \frac{a_{vr_\beta}}{a_{vr_\alpha}} \end{aligned} \quad (10)$$

理论分析认为：变流器正常运行无故障情况下，1 个周期内的电流平均值为 0，平均电流 Park 矢量的模为 0；出现故障时，如开关开路或短路，此时相电流中出现直流分量，三相不对称，Park 矢量将会有一定的幅值和相位。故障管的具体判别方法为：当 Park 矢量的模大于某一阈值时，表明有故障出现，然后通过判别 Park 矢量的相角来确认具体哪只功率管发生了故障。发生故障时定子平均电流

Park 矢量相角 θ 所在的区间见表 1。

表 1 识别开路故障的角度区间
Tab.1 Identification of angle interval of the open circuit fault

IGBT 故障	角度(°)
T1	150~210
T2	210~270
T3	270~330
T4	330~30
T5	30~90
T6	90~150

若变流器仅仅运行状态偏离而非实际出现开路，运用此方法较难识别。基于此，本文在平均电流 Park 矢量法基础上，提出基于 Park 矢量椭圆变化率的变流器状态评估方法，具体原理如下。

首先三相电流可从三相静止坐标系变换到两相轴系 d 、 q 轴，即 $I = I_d + jI_q$ 。假定 d 轴与 A 相电流 a 轴重合，则 Park 矢量变换方程为：

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中： i_d 、 i_q 分别为 dq 坐标下的电流； i_a 、 i_b 、 i_c 分别为网侧变流器三相电流瞬时值。

变流器正常运行时，Park 矢量长、短半轴长度基本相等，离心率非常小，此时 Park 矢量图近似为圆，一段时间内离心率的变化率也很小；当变流器发生状态异常并逐渐产生故障的过程中，Park 矢量椭圆长半轴逐渐增长，短半轴逐渐缩短，离心率也越来越大，离心率的变化率也随之变化。因此，综合考量运行中一段时间内离心率均值与变化率，即可以识别运行状态。

1.3 IGBT 健康状态评估模型原理

利用动态规整算法建立相似度计算模型，计算三相波形的最小规整距离与波形相似度，计算 Park 矢量椭圆离心率与变化率，并根据以上 2 种计算结果设定评估指标，实现健康状态评估。总体 IGBT 健康状态评估模型流程如图 3 所示。

2 变流器健康状态评估

2.1 动态规整评估模型

基于动态规整评估模型流程分为波形数据预处理、最优路径动态规整以及波形相似度计算。

2.1.1 波形数据预处理

采集固定时间颗粒内变流器网侧三相电流波

形数据,采集频率 3 000 Hz,采集时间颗粒 $t=60$ s,则可以获得波形数据矩阵 S 。 S 为 180 000 行 4 列矩阵,第 1 列为采样时间,第 2—4 列分别为 A、B、C 三相电流瞬时值。将波形数据矩阵 S 按行分为 10 个子矩阵,则子矩阵均为 18 000 行 4 列矩阵,可表示为:

$$S = [S_1, S_2, \dots, S_{10}]^T \quad (12)$$

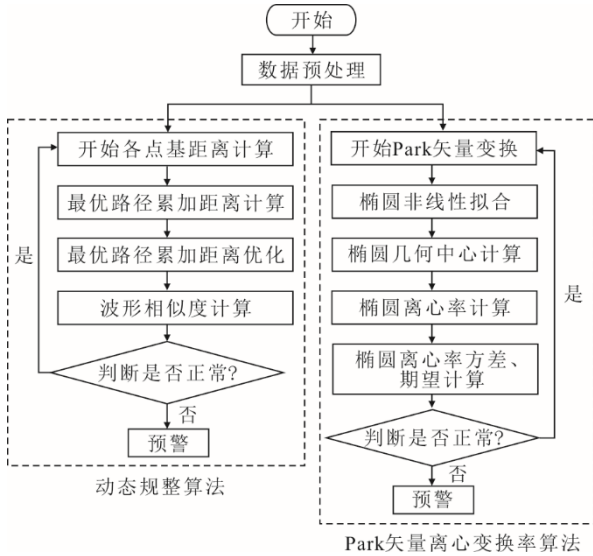


图 3 IGBT 健康状态评估模型流程

Fig.3 The process of the IGBT health state evaluation model

此处以 S_1 子矩阵中 A 相电流序列为例,设 A 相电流序列长度为 k 。计算 A 相电流序列的期望 E_A 与标准差 σ_A ,统计此组数据的中位数 M_{idA} 、众数 M_{ajA} ,并根据期望 E_A 、中位数 M_{idA} 与众数 M_{ajA} ,计算反映此组数据分布特性的参数 λ_A 。计算公式为:

$$\lambda_A = M_{idA}, \frac{1}{2} \times |E_A + M_{ajA}| \leq 5\% ; \quad (13)$$

$$\lambda_A = \frac{1}{2} \times |E_A + M_{ajA}|, \text{其他}$$

随后根据改进型拉伊达准则对 S_1 中 A 相电流序列中大范围离群数据点进行识别,若满足 $A_x \geq \lambda_A + 3\sigma_A$ 或 $A_x < \lambda_A - 3\sigma_A$, $1 \leq x \leq k$,则将 A_x 剔除。此处 A_x 为 S_1 中 A 相序列第 x 个数据。B、C 相电流序列采用相同方法处理。

完成离群点剔除后,对三相电流序列进行归一化处理,避免幅值的影响。通过式(14)对电流的幅值进行归一化处理(以 A 相为例):

$$a_{\text{norm}} = \frac{a - a_{\text{min}}}{a_{\text{max}} - a_{\text{min}}} \quad (14)$$

式中: a_{norm} 为归一化后的幅值; a 为 S_1 中 A 相序列中电流数据中实际采集值; a_{min} 为电流采集数据中幅值最小的值; a_{max} 为数据中最大值。B、C 相电流序列同方法处理。完成归一化后,可得到三相电流序列为:

$$\begin{aligned} A &= \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \\ B &= \{b_1, b_2, \dots, b_l\} \\ C &= \{c_1, c_2, \dots, c_j\} \end{aligned} \quad (15)$$

2.1.2 最优路径动态规整

利用动态时间归整 DTW 方法对齐 S_1 中时间序列 A 与时间序列 C,采用欧氏距离计算序列 A 中每个元素与序列 C 中每个元素的距离,根据计算结果构造一个 $n \times j$ 的矩阵 D :

$$D = \begin{pmatrix} d(a_1, c_1) & \dots & d(a_1, c_j) \\ \vdots & & \vdots \\ d(a_n, c_1) & \dots & d(a_n, c_j) \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中: a_p 为时间序列 A 中的第 p 个元素; c_q 为时间序列 C 中的第 q 个元素; $d(a_p, c_q)$ 为 a_p 和 c_q 2 个点的欧氏距离,根据式(2)计算 $d(a_p, c_q)$ 。

接着对获得的 D 进行动态时间规整路径,路径用 W 来表示,计算方式为:

$$\begin{aligned} W &= w_1, w_2, \dots, w_k \\ \{\max(n, j) \leq k < n + j - 1\} \end{aligned} \quad (17)$$

$$d_{\text{DTW}}(A, C) = \min \sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{w_i}{i}}$$

式中: w_i 为 W 的第 i 个元素, $w_i = (p, q)_i$,定义了序列 A 中 a_p 和序列 C 中 c_q 的映射关系; $\max(n, j)$ 表示 n 与 j 中较大的参量; $\text{DTW}(A, C)$ 表示由矩阵 D 的(1, 1)点开始至矩阵 D 的(n, j)点终止的路径; k 表示路径长度。

2.1.3 波形相似度计算

计算累加距离 d_{CD} ,从矩阵 D 的(1, 1)点开始沿着 2.1.2 节中得到的多条路径匹配这 2 个序列 A 和 C,每到一个点,之前所有的点计算的都会累加。到达终点(n, j)后,这个累积距离就是最后总的距离 d_{CD} ,提取根据多条路径计算得到距离 d_{CD} 中的最小值 $d_{CD, AC}$,即为序列 A 与序列 C 的最小规整路径距离。到达第(p, q)点的累加距离 d_{CD} 按照式(5)计算。

完成累加距离计算后,根据式(6)与式(7)完成累加距离优化,接着计算时间序列 A 与自身的最小规整路径距离,并将距离定义为 $d_{CD, \text{min}}$ 。

其次选取白噪声波形计算该序列与时间序列 A 最小规整路径距离, 并定义为 $d_{CD,max}$ 。则任意时刻时间序列 C 与时间序列 A 最小规整路径距离 $d_{CD,AC}$ 一定位于 $[d_{CD,min}, d_{CD,max}]$ 区间内。

将计算所得 $d_{CD,min}$ 、 $d_{CD,max}$ 与 $d_{CD,AC}$ 标准化在 $[0, 1]$ 区间内, 具体计算公式为:

$$d_{CD,ACnor} = \frac{d_{CD,AC} - d_{CD,min}}{d_{CD,max} - d_{CD,min}} \quad (18)$$

式中: $d_{CD,ACnor}$ 为标准化后的距离。可以得出, 白噪声波形序列与基准时间序列 A 最小规整路径距离为 1, 即 $d_{CD,maxnor}=1$; 基准时间序列 A 与自身的最小规整路径距离标准化后数值为 0, 即 $d_{CD,minnor}=0$; 且 $d_{CD,ACnor}$ 位于 $[0, 1]$ 区间内。

最后计算序列 C 与序列 A 相似度, 计算公式为:

$$F_{IAC} = \sqrt{\frac{d_{CD,maxnor} - d_{CD,ACnor}}{d_{CD,maxnor}}} \quad (19)$$

式中: F_{IAC} 表示序列 C 与序列 A 相似度。

2.2 Park 矢量离心变化率评估模型

数据预处理方法与 2.1.1 节相同, 完成数据处理后, 将所得的 10 个子矩阵 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{10}$ 中每个矩阵的行数除以 1 000 并进行向下取整, 得到数值 L 。根据数值 L 设置循环条件, 初始值为 1、步长为 1 000、终止值为 $1\ 000 \times L$ 。本文中的 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{10}$ 矩阵行数为 18 000, 则 $L=18$ 。

设置循环条件开始循环, 将每个矩阵中的三相电流数据按照 Park 矢量变换方程转换至以 d, q 轴构成的平面, 假定 d 轴与 A 相电流 a 轴重合, 每次循环, 每个子矩阵得到一个点 (i_d, i_q) , 该点 (i_d, i_q) 对应 dq 平面上的一个点 O ; 按照式(11)进行 Park 矢量变换。

(i_d, i_q) 为 (d, q) 平面的电流坐标, 则有:

$$O = \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (20)$$

循环结束后, 每个子矩阵对应得到 dq 平面上的的一系列点, 这些点构成每个子矩阵对应的矩阵 O_L :

$$O_L = \begin{pmatrix} i_{d1} & i_{d2} & \cdots & i_{dm} \\ i_{q1} & i_{q2} & \cdots & i_{qm} \end{pmatrix} \quad (21)$$

式中: m 表示循环次数。

利用非线性拟合方法, 将得到的矩阵 O_L 和圆锥曲线的二次参数形式结合拟合椭圆, 并利用非线性回归方法计算得到每个子矩阵对应的系数矩阵 p 。其中, 椭圆二次参数形式为:

$$f(xy) = p_1x^2 + p_2xy + p_3y^2 + p_4x + p_5y + 1$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = O_L = \begin{pmatrix} i_{d1} & i_{d2} & \cdots & i_{dm} \\ i_{q1} & i_{q2} & \cdots & i_{qm} \end{pmatrix} \quad (22)$$

系数矩阵 p 为:

$$p = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, 1\}^T \quad (23)$$

随后根据系数矩阵 p 计算椭圆中心。其中, 椭圆的几何中心为 (X_c, Y_c) , 计算公式为:

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 4p_1p_3 - p_2^2 \\ 1 \\ p_1p_3 - p_2^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_2p_5 - 2p_3p_4 \\ p_2p_4 - 2p_1p_5 \end{pmatrix} \quad (24)$$

式中: p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 为系数矩阵 p 中对应值。

根据之前步骤计算结果, 计算椭圆长轴 M_a , 短轴 M_{in} , 计算方法为:

$$\begin{pmatrix} M_a \\ M_{in} \end{pmatrix} = \sqrt{2} \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{p_1 + p_3 + \sqrt{(p_1 - p_3)^2 + p_2^2}}} \\ \sqrt{\frac{1}{p_1 + p_3 - \sqrt{(p_1 - p_3)^2 + p_2^2}}} \end{array} \right\} (p_1X_c^2 + 1) \quad (25)$$

根据之前计算结果, 计算得到每个子矩阵对应的拟合椭圆离心率 e , 计算方法为:

$$e = \sqrt{\frac{M_a^2 - M_{in}^2}{M_a^2}} \quad (26)$$

将所有的拟合椭圆离心率 e 组成矩阵 E , 其中矩阵 E 中元素满足正态分布。以 0.95 为置信区间对矩阵 E 中元素计算极大似然估计, 得到矩阵 E 分布的期望 μ 与方差 σ 。引入状态变量 $V_{al,t}$, 表示 t 时间段内的状态值。 $V_{al,t}$ 计算公式为:

$$V_{al,t} = k_1\sqrt{\mu} + k_2\sigma \quad (27)$$

$$k_1 + k_2 = 1$$

式中: k_1, k_2 为前置系数, 本文中, $k_1=0.35, k_2=0.65$ 。

重复之前的计算步骤, 计算 $S_2, S_3, S_4, \dots, S_{10}$ 时刻对应的状态值 $V_{2,t}, V_{3,t}, V_{4,t}, \dots, V_{10,t}$ 。根据状态值 $V_{al,t}, V_{2,t}, V_{3,t}, V_{4,t}, \dots, V_{10,t}$, 计算最终可供分析的状态评价指标 $Cond_{1,t}, Cond_{2,t}, Cond_{3,t}, Cond_{4,t}, \dots, Cond_{10,t}$ 。具体计算公式为:

$$\begin{array}{l} \text{若 } V_{i,t} \geq 0.3, c_{ond,i,t} = 1; \\ \text{其他, } c_{ond,i,t} = 0 \end{array} \quad (28)$$

最终若在 nt 总时间内, 连续出现 $n/2.5$ 次 (向下取整) c_{ond} 计算值为 1, 则认为变流器运行状态异常; 反之, 则认为设备正常。

3 模型仿真验证

为了验证动态规整评估模型与 Park 矢量离心变化率算法的实用性，采用仿真手段进行验证。

3.1 动态规整评估模型仿真验证

IGBT 模块建模对象选择为 Fuji 富士公司 6MBI450V-170-56 系列 IGBT。根据相应型号器件手册，提取并修改相关模型参数，利用 MATLAB/Simulink 建立网侧变流器模型，调整各 IGBT 触发设置不同状态，进而可以得到仿真变流器出口的基准波形、正常状态、频率异常等不同状态下的波形；同时利用噪声生成器产生噪声波形模拟故障发生前的波形。

按照本文 2.1.1 节及 2.1.2 节所述方法分别对仿真变流器网侧出口正常状态波形、频率异常波形以及噪声波形进行波形相似度计算，结果如图 4—图 6 所示。

图 4a)为利用 MATLAB/Simulink 模型得到的正常状态下的网侧变流器 5 周期波形（红色）与基准波形（蓝色）归一化后的波形对比；图 4b)为利用 MATLAB/Simulink 模型得到的正常状态下的网侧变流器 5 周期波形（红色）与 5 周期基准波形（蓝色）动态规整与累加距离计算结果。由图 4 可以看出，正常状态下波形与基准波形几乎完全重合，所有采集的波形点均可以匹配，通过计算结果也证实了正常状态下波形相似度很高。此时，正常波形序列与基准序列欧氏距离累加仅为 1.37 左右，对应相似度为 0.997。

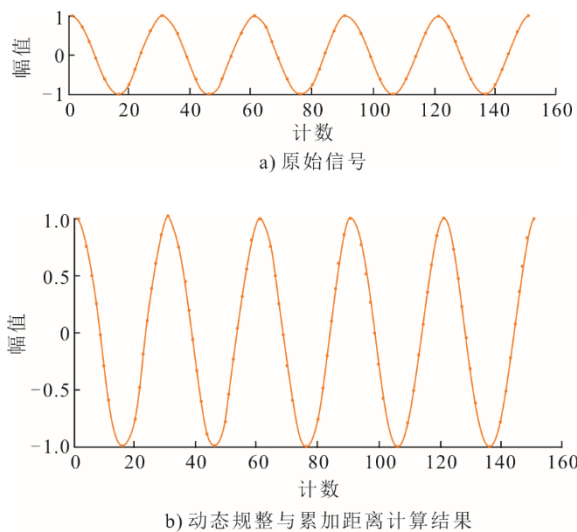


图 4 正常波形与基准波形对比
Fig.4 Comparison between the normal waveform and the reference waveform

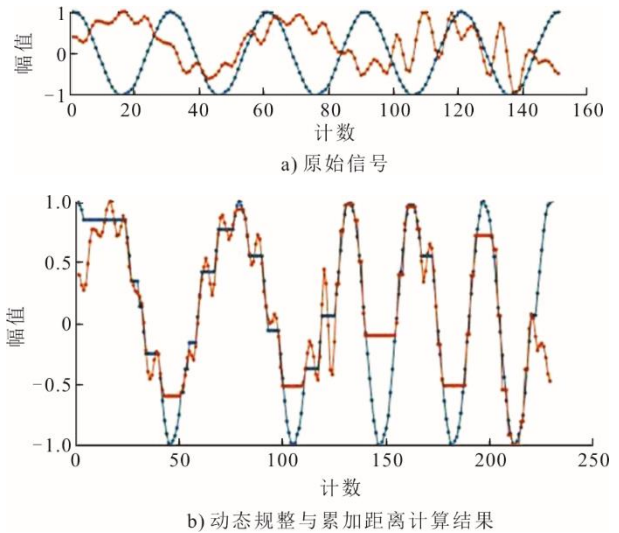


图 5 噪声波形与基准波形对比
Fig.5 Comparison between the noise waveform and the reference waveform

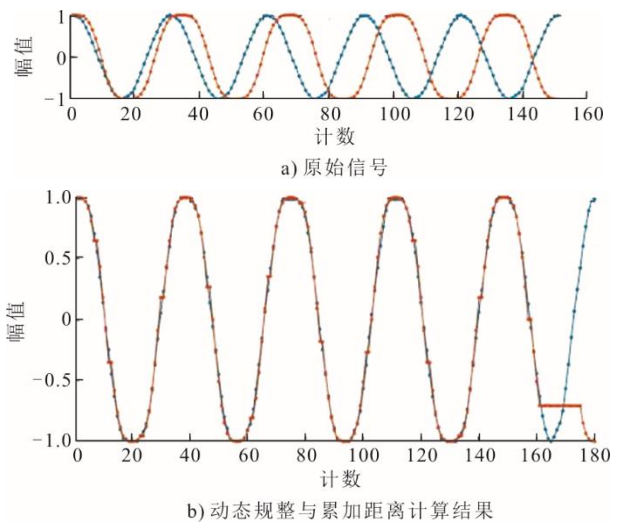


图 6 异常波形与基准波形对比
Fig.6 Comparison between the abnormal waveform and the reference waveform

图 5a)为利用噪声生成器产生的噪声波形（红色）与等长基准波形（蓝色）归一化后的波形对比；图 5b)为利用噪声生成器产生的噪声波形（红色）与等长基准波形（蓝色）动态规整与累加距离计算结果。由图 5 可以看出，噪声波形与基准波形相去甚远，两波形各点之间匹配关系很差，通过计算结果也证实了此时波形相似度很低，两波形的距离累加为 42.72 左右，对应相似度为 0.007。

图 6a)为利用 MATLAB/Simulink 模型得到的频率异常状态下的网侧变流器 5 周期波形（红色）与等长基准波形（蓝色）归一化后的波形对比；图 6b)为利用 MATLAB/Simulink 模型得到的频率异常状态下的网侧变流器 5 周期波形（红色）与等长基准波

形(蓝色)动态规整与累加距离计算结果。由图6可以看出,频率异常状态下的波形虽然与基准波形轨迹与趋势相近,但无法与图4一样达到完全匹配,通过计算结果也证实了此时波形相似度较低,两波形的欧氏距离累加为19.82左右,对应相似度为0.374。

综上,利用动态规整算法可以将参比电流时间序列与基准波形的波形相似度数值化,直观反映此时目标波形对应的状态。而且动态规整算法不仅能够识别非周期低相似度波形,也能够识别轨迹与趋势相近的周期波形的异常,且相似度的高低对不同类型的异常有一定的区分。

3.2 Park 矢量离心变化率评估模型仿真验证

实验 IGBT 模块建模对象仍选择为 Fuji 富士公司 6MBI450V-170-56 系列 IGBT。根据相应型号器件手册,提取并修改相关模型参数,采用与 3.1 节相同的方法建立网侧变流器模型,调整各 IGBT 触发设置不同状态。首先获取正常状态下三相电流波形,并且对正常状态下的三相电流波形进行频谱分析,波形与频谱结果如图7所示。从图7可以看出,三相波形幅值、相位、频谱均正常。

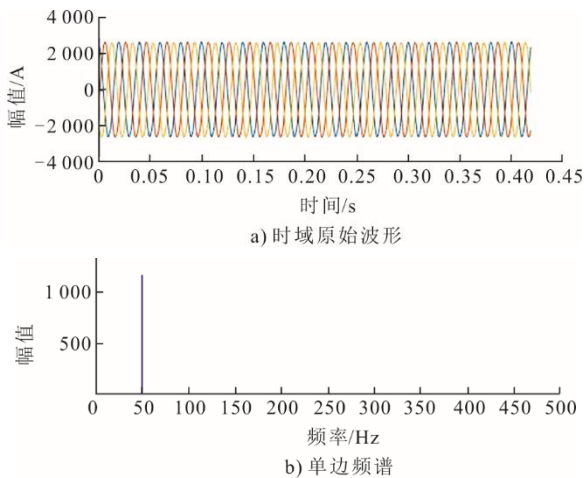


图7 正常波形与频谱

Fig.7 Display of normal waveform and frequency spectrum

同时,根据式(20)一式(28)计算此时波形持续时间内评估指标 c_{ond} 均为0,证实此时三相波形状态正常。

完成正常状态识别验证后,验证 Park 矢量离心变化率评估模型对于异常情况的识别能力。分别在正常三相波形基础上添加不同幅值噪声信号,并且调整各 IGBT 触发状态,使得 A 相、B 相、C 相幅值不同且逐相小幅递增,得到三相波形如图8所示。根据式(20)一式(28)完成椭圆拟合,拟合结果如图9所示。由图9可以看出,此时椭圆已出现离心情况,计算持续时间内评估指标 c_{ond} ,结果显示在

总时间内,连续出现 c_{ond} 计算值为1,证实变流器运行状态异常。

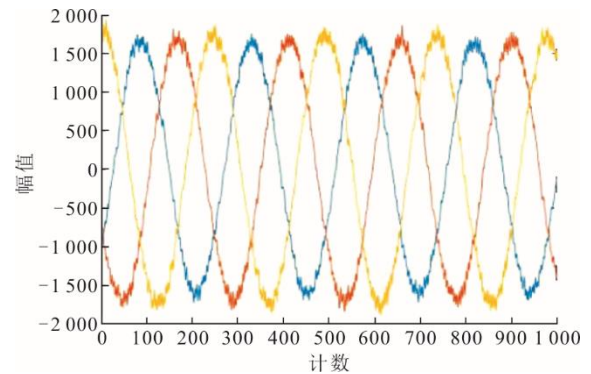


图8 异常波形展示

Fig.8 Display of abnormal waveform

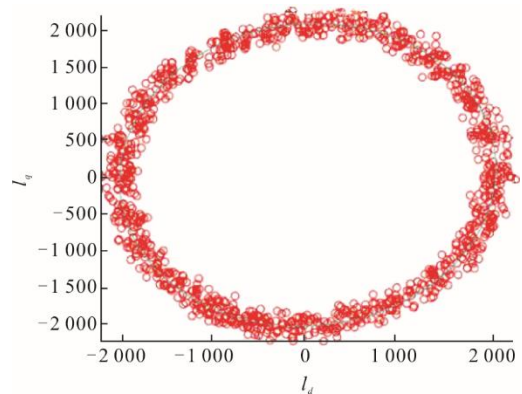


图9 异常波形椭圆拟合

Fig.9 Ellipse fitting of abnormal waveform

综上,通过仿真验证可以较为直观地看出, Park 矢量离心变化率评估模型能够准确识别出可能存在的异常情况。

4 实际运行数据验证

为了进一步验证基于动态规整与 Park 矢量离心变化率算法实用性,取现场实际运行数据进行验证。某海上风电场9号机组2020年发生变流器网侧故障,网侧三相电流故障录波信息如图10所示。

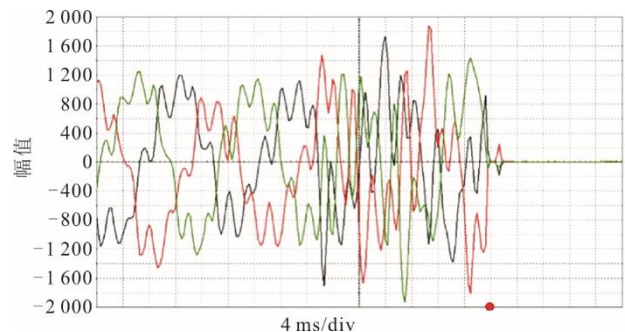


图10 故障录波数据

Fig.10 The fault recording data

由图 10 可以看出, 录波起始时刻三相电流波形已经出现较严重的畸变, 波形仍保持周期性, 但谐波含量很高, 运行 35 ms 左右开始发生剧烈震荡, 此时波形已失去周期性, 整体呈现无序特性, 约 70 ms 后电流幅值为 0, 表明此时变流器停止工作。

首先利用动态规整与 Park 矢量离心变化率对故障录波数据进行分析。选择对比三相波形中两相之间的相似度, 通过计算可以得出故障录波开始时刻至 35 ms 内 A 相波形(红)与 C 相波形(黑)相似度均值为 0.128, 此时对应状态指标 c_{ond} 均为 1; 故障录波 35 ms 至故障录波 70 ms 内 A 相波形(红)与 C 相波形(黑)相似度均值为 0.014, 此时对应状态指标 c_{ond} 均为 1。这表明整个故障录波期间波形状态已经异常。

虽然利用动态规整与 Park 矢量离心变化率算法分析故障录波数据可以得出波形异常的结论, 然而从故障录波波形本身也能直观地看出。因此, 为了进一步验证动态规整与 Park 矢量离心变化率算法对于故障发生前状态变化趋势的识别, 通过监控系统分别获取故障发生前 150~90 s 的三相电流波形数据与故障发生前 90~30 s 的三相电流波形数据进行相似度分析, 故障发生前 150~90 s A 相与 C 相相似度分析结果如图 11 所示。故障发生前 90~30 s A 相与 C 相相似度分析结果如图 12 所示。

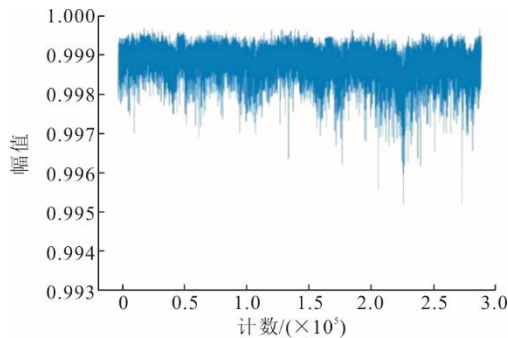


图 11 故障前 150~90 s A 相与 C 相波形相似度
Fig.11 The waveform similarity of phase A and phase C 150~90 s before fault

由图 11 可见, 在网侧故障发生前 150~90 s, A 相与 C 相的波形相似度在 1.000~0.994 波动, 表明此时波形相似度高, 状态正常。由图 12 可见, 故障发生前 90~30 s A 相与 C 相的波形相似度逐渐由 1.000 减小至 0.940, 并在一定范围内波动, 表明状态有可能向异常转变。

图 13 为故障发生前 90~30 s 的三相电流部分波形截取图。由图 13 可见, 网侧三相电流波形已经出现轻微异常。在此情况下, Park 矢量椭圆拟合具体数据计算结果见表 2。

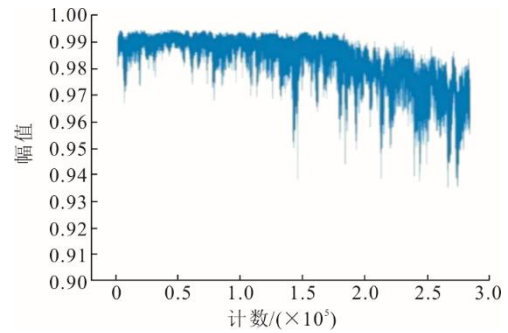


图 12 故障前 90~30 s A 相与 C 相波形相似度
Fig.12 The waveform similarity of phase A and phase C 90~30 s before fault

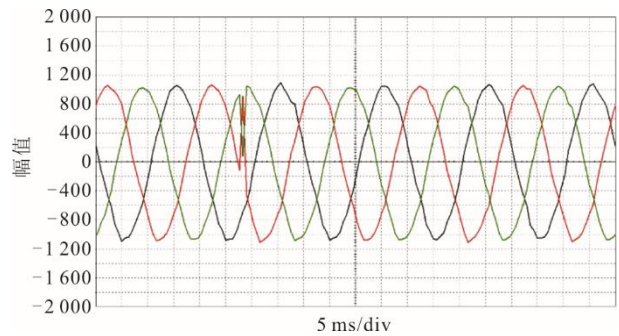


图 13 故障前 90~30 s 部分波形
Fig.13 Part of the waveform of 90~30 s before fault

表 2 各参数计算结果
Tab.2 Calculation results of each parameter

时间段	μ	σ	V_{al}	c_{ond}
1	0.482	0.065	0.285	0
2	0.476	0.077	0.291	0
3	0.486	0.132	0.330	1
4	0.477	0.170	0.352	1
5	0.480	0.171	0.353	1
6	0.483	0.174	0.356	1
7	0.475	0.067	0.284	0
8	0.479	0.169	0.352	1
9	0.486	0.177	0.359	1
10	0.484	0.172	0.355	1

本例中 $n=10$ 。利用上述方法进行分析。可以看出, V_{al} 计算值分布在 0.285~0.359, 且连续 4 次大于设定值 0.3, 则对应状态指标 c_{ond} 均为 1, 表明此段时间内变流器运行出现异常。

综上, 通过运行数据验证可以得出, 利用动态规整与 Park 矢量离心变化率算法不仅可以识别出故障波形, 还可以看出故障发生前波形相似度逐渐降低, Park 矢量离心率变化趋势持续增大, 这种变化有助于评估风电机组变流器的健康状态。

5 结 论

本文提出了基于动态规整与 Park 矢量椭圆变化率的变流器健康状态评估方法并通过仿真及现

场实际数据对所提出的方法进行了验证。

1) 通过仿真可以看出, 动态规整算法可以将参比电流时间序列与基准波形的波形相似度数化, 直观反映目标波形对应的状态。同时, 动态规整算法不仅能够对非周期低相似度类故障波形识别, 也能够识别出轨迹与趋势相近的周期波形的异常, 且相似度的高低对不同类型的异常有一定的区分。Park 矢量离心变化率评估模型对于正常与异常波形也可以完成识别。

2) 实际运行数据验证表明, 2种方法综合利用不仅可以识别出波形故障状态, 也能成功在故障发生前识别出设备运行状态异常, 即在故障发生前波形相似度逐渐降低, Park 矢量离心率变化趋势持续增大。采用2种方法及时反映了变流器健康状态, 可以有效避免由于 IGBT 故障而导致电力电子系统关闭或损坏的情况, 从而避免设备故障引起的财产损失。

[参考文献]

- [1] WEI Q, LU D G. A survey on wind turbine condition monitoring and fault diagnosis: part I: components and subsystems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6546-6557.
- [2] KANG J, SOBRAL J, SOARES C G. Review of condition-based maintenance strategies for offshore wind energy[J]. Journal of Marine Science and Application, 2019, 18(1): 1-16.
- [3] 绳晓玲. 叶轮不平衡故障下双馈风力发电机运行特性分析及控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 26-37. SHENG Xiaoling. Research on running characteristics and control of doubly-fed induction generator under blade imbalance fault[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 26-37.
- [4] LIU Z P, ZHANG L. A review of failure modes, condition monitoring and fault diagnosis methods for large-scale wind turbine bearings[J]. Measurement, 2020, 149: 107002.
- [5] ESTEFANIA A, SERGIO M M, HE ANDRÉS, et al. Wind turbine reliability: a comprehensive review towards effective condition monitoring development[J]. Applied Energy, 2018, 228: 1569-1583.
- [6] WANG T Y, HAN Q K, CHU F L, et al. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox: a review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 126: 662-685.
- [7] WANG H, MARCO L, FREDE B. Toward reliable power electronics: challenges, design tools, and opportunities[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 17-26.
- [8] LAMB J, MIRAFZAL B. Open-circuit IGBT fault detection and location isolation for cascaded multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4846-4856.
- [9] XIANG D W, LI R, PETER T, et al. Condition monitoring power module solder fatigue using inverter harmonic identification[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 27(1): 235-247.
- [10] HYUNSEO O, BONGTAE H, PATRICK M, et al. Physics-of-failure, condition monitoring and prognostics of insulated gate bipolar transistor modules: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2413-2426.
- [11] 李刚, 张建付, 文福拴, 等. 计及信息不确定性的风电机组健康状态实时评估方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 111-117. LI Gang, ZHANG Jianfu, WEN Fushuan, et al. Evaluation of real-time health condition for wind turbines considering information uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 111-117.
- [12] YANG S Y, XIANG D W, BRYANT A. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25: 2734-2752.
- [13] JIN T D, MECHEHOUL M. Minimize production loss in device testing via condition-based equipment maintenance[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2010, 7(4): 958-963.
- [14] 陈昭宇. 基于知识库的变流器故障诊断研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 36-45. CHEN Zhaoyu. The study of converter fault diagnosis based on knowledgebase[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 36-45.
- [15] MENDES A, CARDOSO A. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach[C]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference. London: IEEE, 1999: 704-706.
- [16] 于泳, 蒋生成, 杨荣峰. 变流器 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 30-35. YU Yong, JIANG Shengcheng, YANG Rongfeng. IGBT open circuit fault diagnosis method for inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 30-35.
- [17] YANG W X, COURT R, JIANG J S. Wind turbine condition monitoring by the approach of SCADA data analysis[J]. Renewable Energy, 2013, 53(9): 365-376.
- [18] 黄涛, 陈民铀, 赖伟. 计及疲劳累积及健康状态的风电变流器可靠性评估模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4845-4854. HUANG Tao, CHEN Minyou, LAI Wei. Reliability evaluation model of wind power converter considering fatigue accumulation and health status[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4845-4854.
- [19] 钱照明, 张军明, 盛况. 电力电子器件及其应用的现状和发展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5149-5161. QIAN Zhaoming, ZHANG Junming, SHENG Kuang. Status and development of power semiconductor devices and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5149-5161.
- [20] RASMU Ø N, JENS D, STIG M N. Innovative measuring system for wear-out indication of high power IGBT modules[C]. 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix: IEEE, 2011: 1785-1790.
- [21] 李辉, 刘盛权, 冉立. 大功率并网风电机组变流器状态监测技术综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 1-10. LI Hui, LIU Shengquan, RAN Li. Overview of condition monitoring technologies of power converter for high power grid-connected wind turbine generator system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 1-10.
- [22] BERNDT D J, CLIFFORD J. Finding patterns in time series: a dynamic programming approach[J]. Advances in Knowledge Discovery & Data Mining, 1996, 2: 229-248.

(责任编辑 杜亚勤)