

一种基于混合赋权-动态时间规整(DTW)相结合的多遥测参数综合诊断方法

潘点飞, 董文平, 刘力涛, 王魁, 唐斌, 郑为阁, 杨旋

(中国航天员科研训练中心, 北京, 100094)

摘要: 为提高监测系统的综合诊断效率, 提出基于混合赋权—动态时间规整 (Dynamic Time Warping, DTW) 相结合的综合诊断方法。首先, 运用归一化与层次分析法相结合的混合赋权方法, 确定监测系统多属性参数的权值系数。依据该权值系数可获取系统运行状态的综合特征参数, 从而将多参数诊断转换为单一综合特征曲线判读。其次, 提出基于特征提取的 DTW 距离计算方法, 将综合特征参数判读转换成时间序列相似性度量问题。最后, 通过综合特征参数的最佳 DTW 距离与度量阈值进行比较, 即可实现系统多遥测参数综合诊断。运用该方法, 对环境压力控制流程进行综合诊断, 分析结果表明该方法具有灵敏度高、计算简单、易于实现等特点, 为飞行器系统关键事件诊断及健康管理提供了一种有效方法。

关键词: 遥测参数; 混合赋权; 动态时间规划; 相似性; 综合诊断

中图分类号: V476.1 **文献标志码:** A

A Comprehensive Diagnostic Method for Multi-Telemetry Parameters Based on Hybrid Weighting Combined with Dynamic Time Warping (DTW)

PAN Dianfei, DONG Wenping, LIU Litao, WANG Kui, TANG Bin, ZHENG Weige,
YANG Xuan

(China Astronaut Research and Training Center, 100094, Beijing China)

Abstract: In order to improve the comprehensive diagnostic efficiency of the monitoring system, a comprehensive diagnostic method is proposed based on mixed weighted and dynamic time warping (DTW) algorithms. Firstly, a mixed weighted method combining normalization and the analytic hierarchy process (AHP) is applied to determine the weighting coefficients of multivariate telemetry parameters for system. Using these weighting coefficients, comprehensive characteristic parameters representing the operational state of the system can be obtained, thereby transforming multi-parameter diagnosis into single comprehensive characteristic curve analysis. Secondly, a DTW distance calculation method is introduced, which converts the comprehensive characteristic parameter judgment into a time-series similarity measurement problem. Finally, by comparing the optimal DTW distance of comprehensive characteristic parameters with the measurement threshold, the integrated diagnostic of multiple parameters for system can be achieved. By applying the method described in this paper, a comprehensive diagnosis of the environmental pressure control process was conducted. The analysis results indicate that the method features high sensitivity, simple computation and easy implementation, providing an effective method for the diagnosis of key events and health management of complex system.

Keywords: telemetry parameters; mixed weighted; dynamic time warping (DTW); similarity; comprehensive diagnostic.

0 引言

对于飞行器系统，不论是单机产品还是复杂系统，主要通过遥测参数对其运行状态进行实时监测。为了准确评估系统运行状态及其功能性能，往往需要对其多个参数进行综合分析。特别是针对复杂系统或单机，其遥测参数种类多样、关联性强，局部参数并不足以判断系统当前运行状态。因此，研究多参数综合诊断方法对保障飞行器在轨可靠、稳定、健康运行显得尤为重要^[1]。

多参数综合诊断方法被广泛应用于工业自动化、国防科技、航空航天等领域。其中，航空航天系统具有高安全性、高可靠性特点。其系统设计复杂，故障种类繁多、影响范围广泛且故障机理隐蔽。对其故障诊断及健康管理等方面的研究主要包括：基于时间序列的故障预测及其诊断方法研究^[2-6]，基于智能算法的飞行器健康管理系统系统设计^[7-9]，系统容错机制及功能重构技术研究等^[10-12]。上述研究在保障航天系统稳定可靠运行、降低运营成本、延长使用寿命等方面发挥了重要作用。但仍存在一些不足之处，主要表现在：数据预处理及建模要求高；多考虑单一特征参数或多个独立特征参数的影响，缺乏系统内多参数间的数据挖掘；研究模型的实时性、适用性方面存在一定局限性。

针对复杂系统多遥测参数综合诊断所面临的上述问题，本文提出最大-最小（max-min）归一化与层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）相结合的混合赋权方法，以规整系统运行过程中的综合特征参数，并将综合特征参数判读转换成特征曲线相似性度量问题。采用动态时间规整（dynamic time warping, DTW）距离计算方法，解决不同工作模式波动对时间序列相似性度量的影响，最终实现仅通过一条综合特征曲线即可判定系统功能的完备性。

与遥测监测领域普遍采用的单个参数阈值比较法相比，该方法将系统的多个关键参数规划为一个综合特征参数，简化了系统诊断的维度。并将层次分析法引入多遥测参数的权值计算中，消除了多属性参数不同量纲的影响，同时保留参数的变化特性。采用动态分段 DTW 距离计算策略提升了该方法的适应性

及准确性。其核心技术是多遥测参数的混合赋权及综合特征曲线的相似性度量，在确定上述关键指标后，该方法可应用于工业、航空、航天领域单机、子系统以及系统功能诊断。文章最后对环境压力控制流程中的遥测数据加以分析，以验证该方法的适应性。

1 系统多属性权值确定方法

1.1 系统的多属性决策

系统的多属性决策指利用系统的多个属性或标准，对其进行量化分析，寻求最优量化目标，以满足决策者的需求^[13]。多属性决策方法被广泛应用于工程、经济、管理以及军事等领域。航天器作为一个复杂系统，对其运行状态的诊断来源于遥测参数。复杂系统的运行参数种类多、数据大、且相互间关联性强。单一参数独立分析法虽然能够准确反映系统运行状态，但缺乏直观性、且过程繁琐、效率较低。为进一步优化上述方法，本文将多属性决策方法应用于复杂系统运行状态综合诊断中，利用多属性决策获取最优量化后的综合特征参数，将其与标准特征曲线进行比较，进而便捷、直观的诊断系统在轨运行状态。

1.2 基于混合赋权的多属性赋权方法

层次分析法是一种解决多属性、多层次复杂决策问题的数学建模方法，具有定性与定量相结合、适应范围广、易于实现等特点。层次分析法的基本原理是将复杂问题分解为：目标、准则、方案等多个层次，通过比较判断的方法确定各个属性之间的相对重要性，从而为目标决策提供量化依据。

复杂系统的多属性参数往往在幅值上存在较大差异，直接运用层次分析法进行加权容易影响模型的稳定性和准确性。为了消除多属性参数不同量纲的影响，且不影响参数的变化特性，在进行 AHP 系数加权之前，先对原始数据进行 max-min 归一化处理。

设多属性参数维度为 L ，各参数表示为长度为 N 的时间序列， $X = [X_1, X_2, \dots, X_L, \dots, X_L]$ ，其中，单一参数 X_l 在时间维度上的序列为：

$$X_l = [x_1, x_2, \dots, x_l, \dots, x_N] \quad (1)$$

对 X_l 进行 max-min 归一化处理得到 $\overline{X}_l$ 其各元素处理公式为：

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

其中, $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为时间序列的 X_i 极大值与极小值。因此, 可得各参数在时间维度上归一化序列 $\bar{X}$, $\bar{X} = [\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_l, \dots, \bar{X}_L]$ 。

确定一个复杂问题中各个属性系数、及其相对重要性是运用层次分析法的重要基础。通过构建判断矩阵是确定复杂系统各属性权重的有效方法, 层次分析法各属性权值确定流程如下图所示。

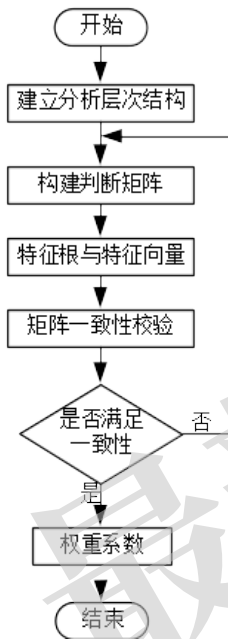


图1 层次分析法权值确定流程

Fig.1 Weight determination flowchart of analytic hierarchy process

首先需建立层次结构, 明确待解决问题的目标层, 识别影响决策的准则或标准, 确定选择方案或决策对象。其次, 构建判断矩阵并进行相关计算, 求解最大特征根与特征向量。最后, 对判断矩阵进行一致性校验, 以确定权重系数。

建立层次结构时需明确研究对象的目的、条件、问题等信息, 按照它们之间不同属性建立包含目标层、准则层以及方案层的层次结构。

构建判断矩阵, 将影响决策对象的 K 个系统属性作为评估因素, 建立评估因素集 A ,

并将评估因素进行两两之间相对重要性比较, 以定量表示各因素对决策对象的相对重要性。

$a_i \in A$, ($i=1,2,\dots,K$), 设 a_{ij} 表示 a_i 对 a_j 的相对重要性数值, 采用 1~9 标度法来表示两者相对重要性, 评估因素相对重要性等级表示如下^[14]。

表1 判断矩阵相对重要性等级
Table.1 Relative importance scale for judgment matrix

标度 a_{ij}	重要性等级
1	属性 a_i 相比 a_j , 同等重要
3	属性 a_i 相比 a_j , a_i 稍微重要
5	属性 a_i 相比 a_j , a_i 明显重要
7	属性 a_i 相比 a_j , a_i 强烈重要
9	属性 a_i 相比 a_j , a_i 极端重要。
2、4、6、8	属性 a_i 相比 a_j , 重要性介于上述标度之间, 取中值。 倒数 $a_{ji}=1/a_{ij}$, a_i 相比 a_j 之间相对重要性互为倒数。

根据上述系统评估属性的相对重要性定义, 对评估属性进行两两相对重要性比较, 构建判断矩阵 P 如下。

$$P = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1K} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{K1} & a_{K2} & \cdots & a_{KK} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $a_{ii} = 1$, $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$,

$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj}$ 。根据图 1 流程, 为确定层次分析法权值系数, 需求解判断矩阵的特征向量及最大特征值。

设判断矩阵 P 的最大特征根为 $\lambda_{\max}$, 特征向量为 $W = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$, 则其特征方程可表示为:

$$PW = \lambda_{\max} W \quad (4)$$

下面进行特征向量及最大特征根的求解。将判断矩阵 P 按列进行归一化处理, 得到矩阵 P_1 , 各元素为 b_{ij} 。

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^N a_{kj}} \quad (i,j=1,2,\dots,N) \quad (5)$$

再将上述矩阵按行求和，得到矩阵 P_2 ，各元素为 c_i 。

$$c_i = \sum_{j=1}^N b_{ij} \quad (6)$$

对矩阵 P_2 进行归一化处理，得到特征向量 W ，向量的各元素为 w_i 。

$$w_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^N c_i} \quad (7)$$

其最大特征根 $\lambda_{\max}$ 为：

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^N (PW)_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (8)$$

对判断矩阵进行一致性校验，若满足一致性指标则其特征向量即为各属性权值系数，否则需重新调整判断矩阵，直到满足一致性为准。引入相对一致性指标 CR ，相对一致性指标 CR 可由一致性指标 CI 与随机一致性指标 RI 的比值获得^[15]。即：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

式中，随机一致性指标 RI 与矩阵阶数相关，其取值如表 2 所示。一致性指标 CI 与判断矩阵的最大特征根、矩阵阶数相关，一致性指标越大判断矩阵的一致性越差。

表 2 随机一致性指标 RI 值

Table 2 Values of random consistency index					
矩阵阶数	1	2	3	4	5
RI	0	0	0.58	0.90	1.12
矩阵阶数	6	7	8	9	10
RI	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1} \quad (10)$$

若 $CR < 0.1$ ，则认为判断矩阵具有完全一致性，判断矩阵的特征向量 $W = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ 可以较好地反映各属性对目标决策的权重；若 $CR > 0.1$ ，则需重新调整各属性两两之间的相对重要性，修正判断矩阵，以满足相对一致性指标。

2 综合特征曲线相似性度量

2.1 基于动态时间规划的相似性度量

系统遥测参数作为一种典型的时间序列数据，遥测数据曲线相似性度量是研究时序

数据故障诊断、健康评估的关键技术之一。动态时间规划（Dynamic Time Warping, DTW）技术采用非线性动态编程模式匹配算法，通过规划时间轴来匹配映射时间序列形态，允许相比较的两个时间序列之间不等长、非一一对应关系，在相似性度量方面具有呈现出优良的特性。

动态时间规划需先在两个时间序列间构建规划路径，再利用最优规划路径搜索最小距离度量值。对于两个时间序列

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \text{ 和 } Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$$

首先构建一个 $m \times n$ 的规划矩阵 $D_{m \times n}$ 。其中，矩阵中每个元素 d_{ij} 表示两个时间序列 x_i 与 y_j 之间的匹配关系，即两个数据点之间的距离

$$d_{ij} = |x_i - y_j|$$

定义规划路径 V 为一系列满足约束条件的规划矩阵元素，表征时间序列 X 与 Y 之间的匹配关系。规划路径集合可表示为

$$V = \{v_1, v_1, \dots, v_k, \dots, v_K\}$$

元素 $v_k = (i_k, j_k)$ 代表规划矩阵中的数据点 x_i

与 y_j 的对齐距离 d_{ij} ，且 K 满足如下条件：

$$\max(m, n) \leq K \leq m + n$$

此外，规划路径还需满足以下约束条件：

(1) 有界性：规划路径起点是规划矩阵的 (1,1) 元素 d_{11} ，终止点是规划矩阵的 (m, n) 元素 d_{mn} ；

(2) 连续性：规划路径中的元素是连续相邻的，路径中间不能有间断，即 $i_k - i_{k-1} \leq 1$ ， $j_k - j_{k-1} \leq 1$ ；

(3) 单调性：规划路径中的元素随时间推移，始终从起始点向终止点前进，即 $i_{k-1} \leq i_k$ ， $j_{k-1} \leq j_k$ 。

根据规划矩阵 $D_{m \times n}$ 的各条规划路径，可以获得时间序列 X 和 Y 的对应累积路径 $E(V)$ 。可见，规划路径存在多解，时间序列之间的累积路径呈现多值。动态时间规划的目的是找出最小累积路径 D_{TW} ，及其对应的最佳规划路径。即：

$$D_{TW}(X, Y) = \min \{E(V)\} = \min \left\{ \sum_{k=1}^K v_k \right\} \quad (11)$$

累积路径对应规划矩阵起点 (1,1) 至终

点 (m, n) 之间的路径距离之和，累积路径的最小值对应最优规划路径，此时，两个时间序列相似度最大。为求解最优规划路径，可采用动态规划的方法，设 f 为规划路径累计距离，由规划路径约束条件可知：

$$f(i, j) = d(i, j) + \min \begin{cases} f(i, j-1) \\ f(i-1, j) \\ f(i-1, j-1) \end{cases} \quad (1)$$

其中， $i \in [1, m]$ ， $j \in [1, n]$ 。由上式可知，累积路径最小距离为 $D_{TW}(X, Y) = f(m, n)$ ，累积路径最小距离上的包含的各个元素组成了最佳规划路径^[16]。如图2所示，为两个时间序列 X 和 Y 的规划矩阵，阴影部分表示最佳规划路径 $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots \rightarrow v_K$ ，累积路径最小距离为：

$$D_{TW}(X, Y) = v_1 + v_2 + \dots + v_K \quad (2)$$

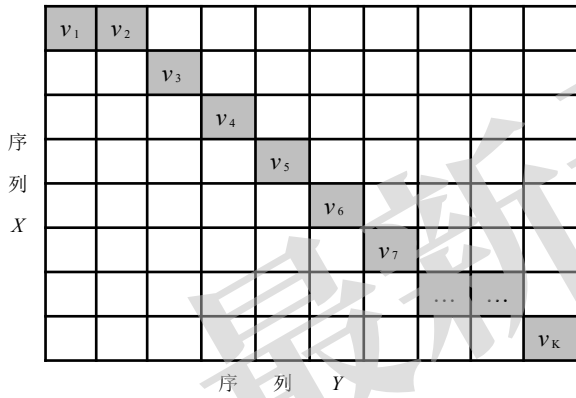


图2 动态时间规划最佳规划路径

Fig.2 Optimal planning path of dynamic time warping

对应高维时间序列，其 DTW 距离计算不仅复杂度大，且度量时间段内数据变化往往呈现多个波动模式。常规固定长度滑窗计算的累积路径最小距离波动较大，而等长切分计算方法容易导致信息缺失，因此，本文提出基于特征提取的动态分段 DTW 距离计算方法。

为保证时间序列中的各个波动模式不会被分段到不同的子段中而影响相似性度量，首先对于时间序列的波动模式进行特征提取，再依据波动模式特征划分时间序列，最后对各子段进行累积路径最小距离计算，并最终完成时间序列的与标准特征曲线的相似性度量。

考虑到时间序列的集中趋势、离散程度、极值、变化趋势等主要统计特性，选择均值、

标准差、峰值、单调性作为特征提取的主要指标。根据实际应用工况，将时间序列适应性划分为 s 个子段，即 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_s\}$ 。对每个子段 X_j

($0 < j \leq s$) 进行 DTW 距离计算，时间序列累积路径最小距离为：

$$D = [D_1, D_2, \dots, D_j, \dots, D_s] \quad (15)$$

其中， $D_j = D_{TW}(X_j, Y_j)$ 。

该方法能够对周期内存在多个波动模式的时间序列进行相似性度量，并且保证了度量的准确性，在降低 DTW 距离计算复杂度的同时，增进了对不同特征时间序列的适用性。

2.2 多参数综合诊断方法实施步骤

遥测监测系统的运行状态反馈涉及到多类型、多维度遥测参数，且数据之间存在着强相关性，需对系统相关联的多遥测参数进行综合诊断。基于层次分析法的多属性赋权方法将系统不同类型的遥测参数进行加权融合，可获取表征系统运行状态的综合特征曲线。同时鉴于动态时间规划距离很好地解决了特征曲线相似性度量的问题，因此利用该方法将综合特征曲线与标准曲线进行相似性度量，从而解决监测系统多参数综合诊断所面临的计算复杂、量纲干扰、效率低等问题。

综上，基于层次分析法的多遥测参数综合诊断方法实施过程如下：

(1) 选取表征系统运行状态的多遥测参数序列。设多元遥测参数维度为 L ，各参数表示为长度为 n 的时间序列，系统周期内正常运行状态下时间序列为 X_{dl} ，其中 $0 \leq l \leq L$ 。

$$\begin{cases} X_{d1} = \{x_{d1_1}, x_{d1_2}, \dots, x_{d1_n}\} \\ X_{d2} = \{x_{d2_1}, x_{d2_2}, \dots, x_{d2_n}\} \\ \vdots \\ X_{dL} = \{x_{dL_1}, x_{dL_2}, \dots, x_{dL_n}\} \end{cases} \quad (3)$$

(2) 计算系统各特征参数的权值。

首先，对数据进行 max-min 归一化处理，消除各遥测参数的量纲影响；

其次，建立层次结构模型。最上层为目标层，表征系统运行状态的综合特性属性。最下层是指标层，为表征系统运行状态的各单一参数。中间层为指标层，表示各特征参数对综合特征属性的重要程度。

再次，构建判断矩阵。根据各特征参数的相对重要性，采用 1~9 标度法构造成对比较矩阵。

计算特征向量并进行一致性校验。计算判断矩阵最大特征值及对应的特征向量，利用一致性指标、随机一致性指标和一致性比率进行一致性检验。

最后，根据一致性检验结果，获取各特征参数权值系数向量 W 。

(3) 根据多属性权值系数将各特征参数融合为统一标准形式 $\bar{X}_d$ 。

$$\bar{X}_d = \sum_{l=1}^L (\bar{X}_{dl} \cdot w_l) \quad (4)$$

(4) 同理对待衡量时间序列进行统一融合，即：

$$\bar{X} = \sum_{l=1}^L (\bar{X}_l \cdot w_l) \quad (5)$$

其中， $\bar{X}_l = \{\bar{x}_{dl_1}, \bar{x}_{dl_2}, \dots, \bar{x}_{dl_n}\}$ 。

(5) 根据动态时间规划求解待度量时间序

列 $\bar{X}$ 与统一标准时间序列 $\bar{X}_d$ 之间的最佳规

划路径，从而得到累积路径最小值 D_{TW} ；

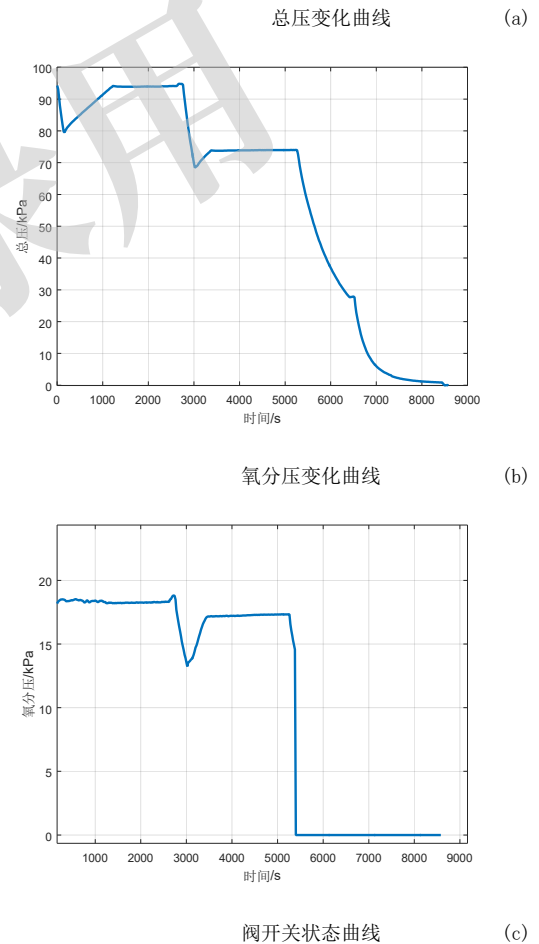
(6) 最后将度量周期内最佳规划距离 D_{TW} 与度量阈值 γ 进行比较，若小于该阈值，则表示时间序列与标准曲线高度相似，系统在该周期内运行状态正常。反之，则与标准曲线不满足相似性，表明该时间周期内运行状态异常。

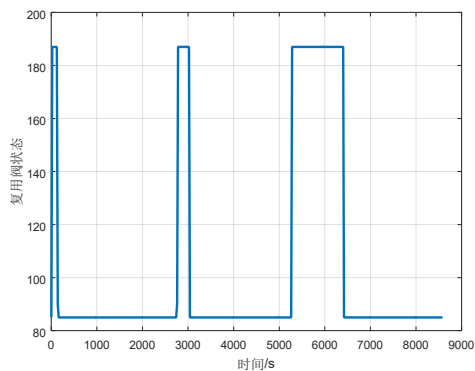
3 压力控制流程中的多参数综合诊断

泄复压功能是密闭舱内环境压力控制的

关键功能，具有保障人员安全、减少气体资源流失、维持密闭舱内环境稳定、防止舱内设备受损等重要作用^[17]。密闭舱总压、氧分压，泵转速、泵电流，阀开关状态等参数是判断出环境压力控制的关键参数。在环境压力控制过程中，监测人员需同步关注上述参数的实时变化情况。

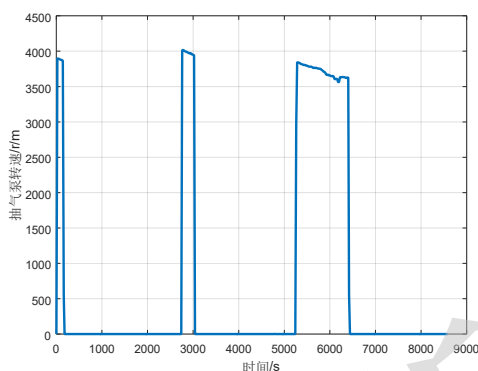
整个压力控制过程因工况不同而时间长短各异，多则会持续十个小时左右。为提高长时间序列计算效率，将环境压力控制过程分解为泄压与复压两个过程。以泄压过程作为研究对象，采用本文所述多参数综合诊断方法进行分析，复压过程分析方法同理，文中不再赘述。泄压过程中各参数典型特征曲线如下图所示。





泵转速变化曲线

(d)



泵电流变化曲线

(e)

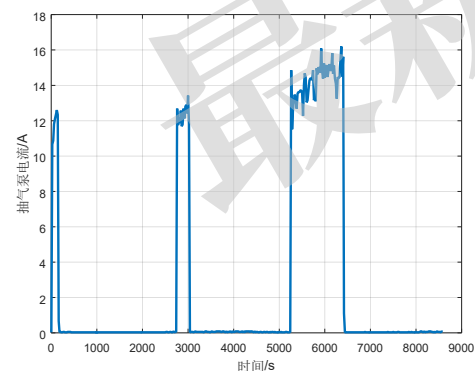


图3 多遥测参数典型曲线

Fig.3 Typical cures of multiple telemetry parameters

可见，各参数量纲不同，同一时刻各参数值差别巨大，直接相加或简单归一化融合会削弱或丢掉小幅值参数信息。采用本文所述多参数综合诊断方法，将泄复压功能的多参数判断转化为综合特征参数诊断问题，以提高地面岗位人员在关键事件中的判读效率。

首先根据层次分析法计算各关键参数的权值系数，结合任务经验及专家评估，各关键参数相对重要标度如下：

表3 关键参数相对重要标度

Table 3 Relative importance index of key parameters

参数	总压	氧分压	阀开 关状态	泵转 速	泵电 流
重要 标度	1	2	7	3	5

依据公式（7）得到各参数的权值系数如下表4所示。

表4 关键参数权值系数

Table4 Weight coefficient of key parameters

参数	总压	氧分压	阀开 关状态	泵转 速	泵电 流
权值系数	0.4595	0.2298	0.0656	0.1532	0.0919

根据权值系数和多属性参数得到综合特征参数标准曲线如下图所示。综合考虑各关键参数变化特性及工程经验，设置 $\gamma=1$ 作为综合特征参数与标准曲线最小累积距离的判断阈值。

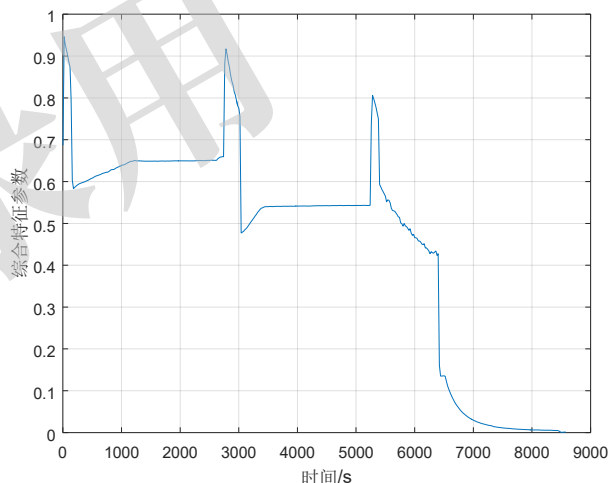


图4 综合特征参数的标准曲线

Fig.4 Standard curve of comprehensive characteristic parameters

获得综合特征参数的标准曲线后，即可将待测时间序列与标准曲线进行相似度检测。整个泄压过程可分为：预控、复用 I、复用 II、泄压四个阶段。由图 5 可以看出，每次环境压力调控时间各不相同，泄压过程中各阶段的维持时间也不相同，且各阶段曲线特征差异较大。

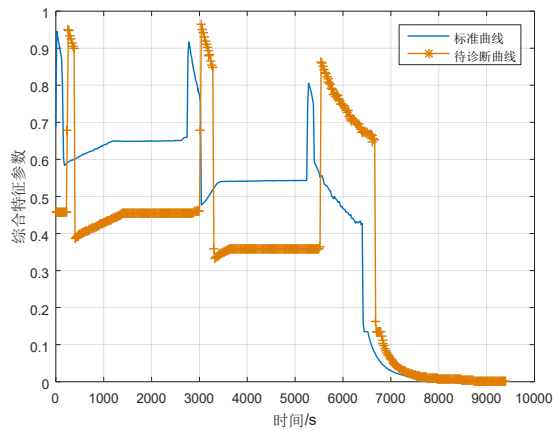
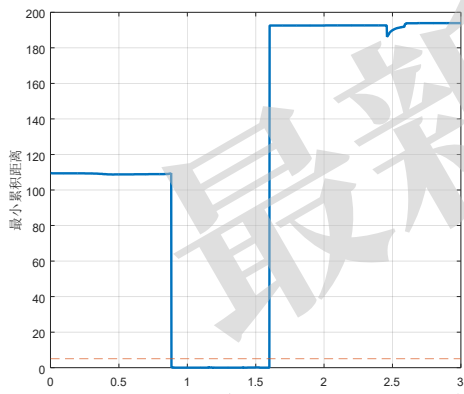


图5 综合特征参数曲线

Fig.5 Curve of comprehensive characteristic parameters

因此，为提高检测效率，采用动态分段度量方法进行相似度衡量。鉴于DTW时间规划距离计算时允许待测序列长度与标准序列长度不一致、非一一对应关系，以抽气泵的开启、关闭作为泄压过程各个阶段相似性度量的起止时间。依据本文所述方法，选择某次环境压力控制中的泄压过程数据，与图4标准综合特征曲线进行相似度检测，最小累积路径随时间关系变化曲线如下图6所示。

最小累积距离随时间变化曲线



泄压过程中最小累积距离随时间变化曲线

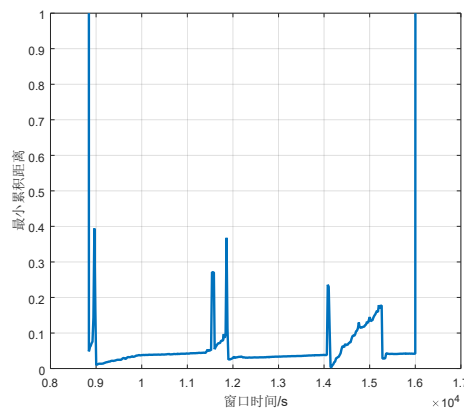


图6 最小累积距离随时间变化曲线（正常）

Fig.6 The curve of the minimum cumulative distance

changing with time (normal)

根据数据分析结果，此次泄压过程从第8840s开始启动，持续到第16000s，经历预控、复用I、复用II及完全泄压四个阶段。图6(a)是泄压前后及泄压过程中，最小累积距离随时间变化曲线。在泄压之前及泄压完成后，为非关键事件时段，因此最小累积距离的值较大。图6(b)是图6(a)中泄压关键事件时段内最小累积距离的局部放大曲线。可见，图6(b)中最小累积距离的4个尖峰发生在预控、复用I、复用II、泄压四个阶段切换时刻，但其峰值均在判定阈值1以下。因此，该泄压过程的综合特征参数与标准综合特征曲线的相似度极高，从而可判定此次泄压过程中系统状态正常。反之，则认为系统遥测状态与标准特征曲线不相似，泄压过程中系统状态异常。

该方法弥补了环境压力过程中需对总压、氧分压，泵转速、泵电流，阀开关状态等多个关键参数同时进行诊断的不足。解决了多遥测参数综合过程中参数变化特征、参数量纲、参数关联性等影响。将图6的结果与常规综合参数诊断方法进行比较，结果如图7所示。由于各参数的变化特征具有显著区别，若未采用分段DTW距离计算方法，会导致综合诊断结果大大滞后，且有效判断时段小于实际工况；若未对多参数进行有效赋权，其大量纲、突发性参数将会严重影响DTW距离的计算结果，导致最终导致相似性检测结果错误。

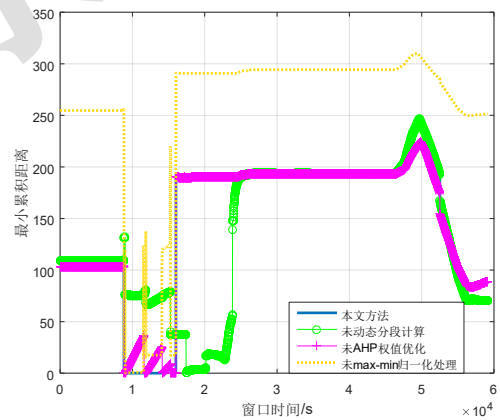


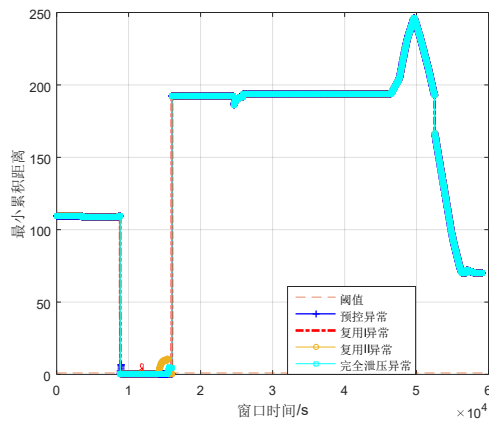
图7 不同方法计算的最小累积距离

Fig.7 The minimum cumulative distance calculated by different methods

为进一步验证该方法对系统异常状态的诊断能力，分别模拟泄压过程中预控、复用I、复用II及完全泄压四个阶段异常数据。其故障模式分别设置为：预控阶段总压异常、复用I阶段氧分压异常、复用II阶段抽气泵异常、完全泄压阶段总压异常。将系统综合特征参数与标准综合特征曲线进行相似度检测，得到最小累积距离随时间关系变化曲线如下图所示。

最小累积距离随时间变化曲线

(a)



泄压过程中最小累积距离随时间变化曲线 (b)

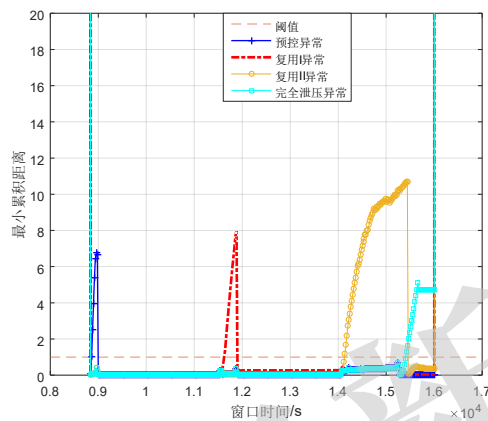


图8 最小累积距离随时间变化曲线 (异常)

Fig.8 The curve of the minimum cumulative distance changing with time (abnormal)

可见,在上述四种代表性故障模式中,环境压力控制系统的综合特征曲线与标准特征曲线的最小累积距离明显高于判定阈值1,可快捷判断该阶段系统状态异常。其中,预控阶段与复用I阶段持续时间较短,因此其异常状态持续时间相对短暂;复用II阶段为抽气泵故障工况,因其参数变化特征明显,导致该阶段的系统最小累积距离值较大;而泄压阶段总压已在30kPa以下,其异常数据变化不大,故该阶段的系统最小累积距离值相对较小。

综上,本文将反映系统运行状态的多个遥测参数规划为综合特征曲线,将其与标准综合特征曲线进行相似度检测,从而实现对系统运行状态进行综合诊断。

4 结论

本文以监测系统多遥测参数综合诊断为应用背景,针对多关联参数检测中存在效率低、量纲差异大、计算复杂等问题,提出基于混合赋权—动态时间规整相结合的综合诊断方法。该方法具有灵敏度高、计算简单、易于实现、适应性强等特点。运用归一化与层次分析法相结合的混合赋权方法确定系统综合特征参数是实施该方法的基础,基于动态分段

DTW距离计算策略,可提高该方法的适用性及准确性。该方法为系统多遥测参数综合诊断工作提供一种有效的技术手段,目前聚焦于系统运行状态的诊断,在检测出系统异常后还无法快速准确定位故障源。后续将持续开展典型故障分析、故障快速定位等领域的研究,以进一步提升系统多遥测参数诊断的支撑能力。

参考文献

- [1] AI Shaojie, SONG Jia, WANG Pengcheng. Review of the development of autonomous fault diagnosis and prediction technology for manned spacecraft[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2023, 6(1): 26-42 (艾绍洁, 宋佳, 王鹏程. 载人航天器自主故障诊断与预测技术研究进展综述[J]. 无人系统技术, 2023, 6(1): 26-42)
- [2] PAN Dianfei, HU Wei, ZHOU Wenxing, *et al.* A telemetry data prediction method of environmental control and life support system based on time series analysis[J]. *Cyber Security and Data Governance*, 2020, 39(12): 67-72 (潘点飞, 胡伟, 周文兴, 等. 一种基于时间序列的环控生保系统遥测数据预测方法[J]. 信息技术与网络安全, 2020, 39(12): 67-72)
- [3] LIU Zhenmin, ZHOU Xiang, PENG Zongyao, *et al.* Intelligent fault diagnosis method for space launch based on knowledge[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(S2): 280-285 (柳振民, 周翔, 彭宗尧, 等. 基于知识库的航天发射故障智能诊断方法[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(S2): 280-285)
- [4] DJEBKO K, PUPPE F, KAYAL H. Model-based fault detection and diagnosis for spacecraft with an application for the SONATE triple cube nano-satellite[J]. *Aerospace*, 2019, 6(10): 105.
- [5] DUNLAP K, HIBBARD M, MOTE M, *et al.* Comparing run time assurance approaches for safe spacecraft docking[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2022, 6: 1849-1854.
- [6] HAN Xu, WANG Jianyu, ZU Xianfeng. Testing methodology for system maximum-

- error specification based on timing series model[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, **34**(4): 839-845 (韩旭, 王建宇, 祖先锋. 基于时间序列模型的系统最大指标评定方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, **34**(4): 839-845)
- [7] YANG Tongzhi, ZHANG Xinxin, DONG Fang, *et al.* Research on spacecraft health management technology based on knowledge graph[J]. *Spacecraft Engineering*, 2023, **32**(2): 61-69 (杨同智, 张鑫鑫, 董房, 等. 基于知识图谱的航天器健康管理技术研究[J]. 航天器工程, 2023, **32**(2): 61-69)
- [8] XU J P, MENG Z Y, XU L. Integrated system health management-based fuzzy on-board condition prediction for manned spacecraft avionics[J]. *Quantity and Reliability Engineering International*, 2016, **32**(1): 153-165.
- [9] CHEN Wei, HU Guangrui, WANG Yaping. Knowledge acquisition in an expert system for fault diagnosis of certain spacecraft[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, **34**(6): 845-847 (陈玮, 胡光锐, 汪亚平. 飞行器故障诊断专家系统中的知识获取机制[J]. 上海交通大学学报, 2000, **34**(6): 845-847)
- [10] GAO Zhi, WANG Yuanyuan, SHAO Xing. Finite-time adaptive attitude tracking fault-tolerant control for spacecraft[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2019, **10**(1): 73-79 (高直, 王媛媛, 邵星. 航天器有限时间自适应姿态跟踪容错控制[J]. 航天工程进展, 2019, **10**(1): 73-79)
- [11] HASAN M N, HARIS M, QIN S Y. Flexible spacecraft's active fault-tolerant and anti-unwinding attitude control with vibration suppression[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, **122**: 107397.
- [12] LIPPE C, D'AMICO S. Optimal spacecraft swarm reconfiguration through chief orbit refinement[J]. *Acta Astronautica*, 2021, **183**: 162-175.
- [13] ZHANG Zhongcheng. A new method for the problem of multi-attribute decision making[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2006, **28**(6): 117-120 (张忠诚. 多属性决策问题的一种新方法[J]. 武汉理工大学学报, 2006, **28**(6): 117-120)
- [14] LIU Yingxin, LIU Sa, WANG Weiyao. Computation of weight in AHP and its application[J]. *Journal of Shenyang University (Natural Science)*, 2014, **26**(5): 372-375 (刘莹昕, 刘飒, 王威尧. 层次分析法的权重计算及其应用[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2014, **26**(5): 372-375)
- [15] LI Lingjuan, DOU Kun. Research on the consistency of the judgment matrix in AHP[J]. *Computer Technology and Development*, 2009, **19**(10): 131-133 (李玲娟, 豆坤. 层次分析法中判断矩阵的一致性研究[J]. 计算机技术与发展, 2009, **19**(10): 131-133)
- [16] LIU Litao, PAN Dianfei, TANG Bin, *et al.* Multi-parameter similarity measurement method for system operation state[J]. *Journal of Space Engineering University*, 2025, **2**(3): 42-48 (刘力涛, 潘点飞, 唐斌, 等. 多遥测参数综合度量的系统运行状态检测方法[J]. 航天工程大学学报, 2025, **2**(3): 42-48)
- [17] ZHANG Hao, WEI Chuanfeng, LI Yingbin, *et al.* Simulation test method of manned spacecraft depressurization and repressurization[J]. *Spacecraft Engineering*, 2012, **21**(4): 106-110 (张昊, 魏传锋, 李英斌, 等. 载人航天器泄复压地面模拟试验方法[J]. 航天器工程, 2012, **21**(4): 106-110)

作者简介:

第一作者: 潘点飞, 男, 1984年7月出生, 安徽颍上人, 中国航天员科研训练中心助理研究员, 博士, 主要研究方向为环控生保系统控制。

通信作者：董文平，男，1970年2月出生，黑龙江肇东人，中国航天员科研训练中心研究员，硕士，主要研究方向为环控生保系统设计。

最新录用