

质子交换膜燃料电池健康状态指标融合

周 苏^{1,2}, 潘志榕¹, 温超凯¹, 樊 磊¹

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 中德学院, 上海 201804)

摘要: 基于信息论的方法, 筛选出包含较多燃料电池性能“不可逆衰退”信息的外部操作条件, 采用二次规划法将筛选出的外部操作条件与输出电功率进行融合, 提出了一种融合健康状态(state of health, SOH)指标。与以输出电功率为 SOH 的指标相比, 采用融合 SOH 指标, 在单调性、单池衰退一致性和综合评价指标上分别提升了 22.83%、91.96% 和 55.60%。

关键词: 燃料电池; 健康状态指标; 信息论; 二次规划

中图分类号: TM911

文献标志码: A

Integration of State of Health Indicators for Proton Exchange Membrane Fuel Cells

ZHOU Su^{1,2}, PAN Zhirong¹, WEN Chaokai¹, FAN Lei¹

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Chinesisch-Deutsches Hochschulkolleg, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In this paper, operating conditions containing more “irreversible degradation” information are filtered based on the method of the information theory. The sequential quadratic programming method is used to integrate operating conditions and the output power into the integrated state of health (SOH) indicator. Compared to the indicator with output power as SOH, the integrated SOH indicator improves by 22.83%, 91.96%, and 55.60% in the monotonicity, consistency of aging, and comprehensive performance, respectively.

Key words: fuel cell; state of health (SOH) indicator; information theory; sequential quadratic programming

质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)是一种将化学能转化为电能的装置,其燃料加注时间短、续航里程长等特

点决定了其更加适用于长途客车、重卡、工程机械等应用场景。然而,复杂的结构和材料属性,使燃料电池电堆的输出性能受工作环境的影响很大,动态的运行工况、反应气体的温/湿度和供应不合理等都会造成单池和电堆的性能衰退。燃料电池电堆采用串联式结构,单池的性能衰退影响整个电堆的性能和寿命。因此,为了优化其全生命周期的运行性能,有必要建立表征燃料电池健康状态(state of health, SOH)的指标,预测剩余使用寿命(remaining useful life, RUL),从而动态调整能量管理策略。

目前,涉及 PEMFC 的 SOH 指标的研究工作主要包括以下两方面内容。一方面,基于外部可检测数据,通过量化数据中的输出性能衰退信息,表征 PEMFC 的 SOH 和预测其 RUL。Chen 等^[1]将电堆输出电压、输出功率及内阻进行融合,建立了一种融合 SOH 指标,用于表征 PEMFC 的衰退情况,并根据 SOH 指标的当前值与初始值的信息来预测 RUL。另一方面,从内部组件材料出发,对 PEMFC 内部组件材料的衰退进行评估,如根据膜电极的衰退情况预测 RUL。Inaba 等^[2]对质子交换膜的衰退展开研究,通过测试质子交换膜的氢气渗透率随运行时间的变化表征质子交换膜的 SOH,用于评估 PEMFC 的耐久性。

将输出电压、电功率或阻抗等电变量作为 PEMFC 的 SOH 指标,是目前最常用的一种方法。然而,燃料电池电堆由多片单池串联,各单池的衰退情况各不相同,电堆的寿命和最大输出功率受性能最差的单池影响最大,因此,平均或总输出电压(或电功率)性能不足以表征电堆整体的衰退情况,各单池性能衰退的一致性问题的也尤为重要。仅采用电堆电压、电功率或阻抗等电变量作为 SOH 的指标,很难综合衡量或表征其 SOH 或寿命衰减程度,而电堆的温度、反应气体压力和流量等非电变量信息中也

收稿日期: 2022-03-03

第一作者: 周 苏(1961—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为新型车辆动力系统的建模、仿真和控制,人工智能技术在车辆交通中的应用。E-mail: suzhou@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

包含燃料电池的SOH信息。因此,本文将输出功率信息与外部操作条件(如电堆温度、反应气体压力和流量等非电变量)信息进行融合,提出了一种融合电与非电信息的SOH指标。

1 燃料电池衰退实验

1.1 实验条件及数据集介绍

本文采用的实验数据集为法国燃料电池实验室FCLAB提供的公开数据,为恒流拉载70 A工况下的稳态数据,数据集的时间长度为1 154 h,采样时间间隔为30 s。燃料电池衰退测试平台如图1所示^[3]。其中燃料电池电堆由5片单池串联,每片单池的活化面积为100 cm²,最高输出功率为1 kW。利用外围传感器对燃料电池电堆运行的外部操作条件进行监测并记录。

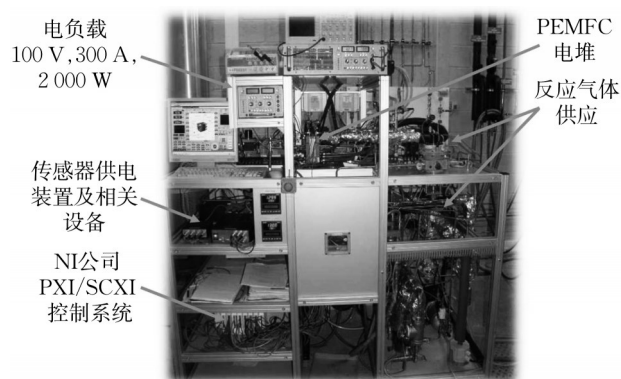


图1 PEMFC衰退测试平台@FCLAB^[3]

Fig. 1 Aging test platform for PEMFC @FCLAB^[3]

1.2 实验数据预处理

原始数据中数据量超过13万,数据中包含大量噪声信号,分析前需对其进行预处理。

第一步为重采样。原始数据采集于稳态工况,在短时间内各变量数值变化幅度小,为降低计算量,对原始数据进行重采样,重采样时间间隔为0.5 h。第二步为平滑滤波处理,采用局部加权回归的方法进行滤波。以 x 为中心点取前后一段长度的局部数据,通过权重矩阵 w ,依据靠近中心点的权重大,远离中心点的权重小的原则,赋予该段数据待测点附近每个点一定的权重。选取的权重矩阵为以下高斯核函数矩阵:

$$w(i, i) = \exp\left(\frac{|x(i) - x|}{-2k^2}\right) \quad (1)$$

式中: k 为截取的局部数据的长度。

选择权重矩阵后,利用最小二乘方法进行拟合,局部加权回归的损失函数如下所示:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^n w(i, i) (\hat{y}(i) - y(i))^2 \quad (2)$$

式中: (x, \hat{y}) 为该段函数回归的中心值, \hat{y} 为该数据点的拟合值,对于 n 个数据点可以得到 n 条加权回归线,取每条回归线的中心拟合值,即得到加权回归平滑处理后的数据。

预处理后的样本数为2 289,以电堆输出电压为例,预处理前后的数据分别如图2a、2b所示。经过重采样及平滑滤波处理后,数据的噪声明显降低,并且保留了原始数据的变化趋势。

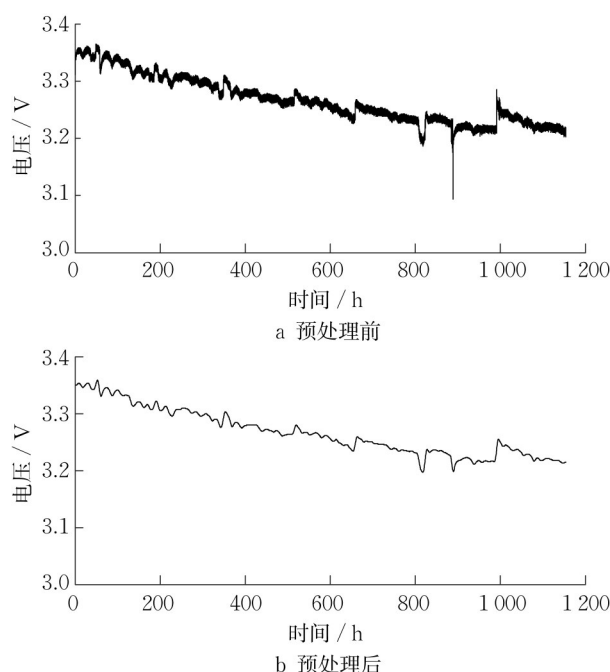


图2 预处理前后电堆电压

Fig. 2 Stack voltage before and after data preprocessing

1.3 实验数据分析

通过观察不难发现,随着运行时间的增加,燃料电池输出电压(或输出功率)整体呈下降趋势,但是,在电堆停机再启动时刻,输出电压有时也会呈现一定程度的“恢复”。燃料电池性能衰退具有不可逆性和可逆性,在燃料电池实际运行过程和衰退实验过程中都发现了“可逆衰退”和“不可逆衰退”现象。在燃料电池长期运行过程中输出电压永久性的衰退现象属于“不可逆衰退”,停机再启动时输出电压恢复的现象属于“可逆衰退”,如图3所示。

“不可逆衰退”产生的原因是,在系统和环境因

素的多重影响下燃料电池组件发生衰退,如质子交换膜穿孔、气体扩散层多孔结构腐蚀堵塞、催化层碳腐蚀以及催化剂损失等。“可逆衰退”中电压恢复的原因可归结为燃料电池在系统停机过程中由于操作条件改变而发生的性能恢复,如停机时水的排出有利于恢复膜电极的气体扩散性能;进行极化曲线测试时,拉载高电流时部分铂氧化物被还原,这有助于催化剂性能恢复^[4-5]。

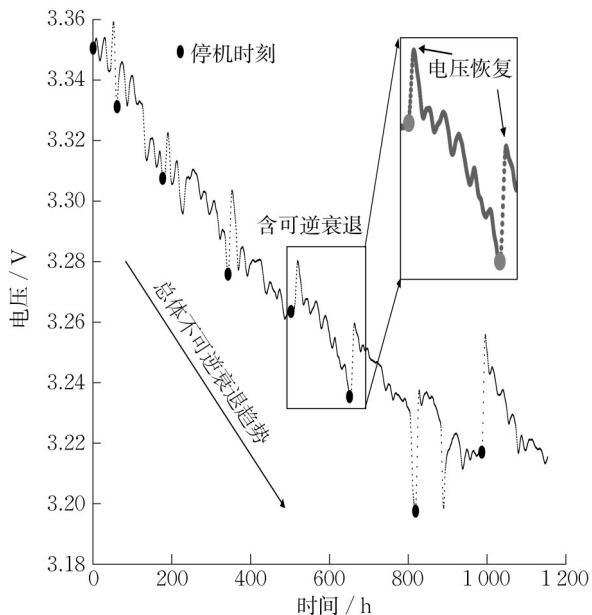


图 3 电堆电压的“可逆衰退”与“不可逆衰退”

Fig. 3 Reversible and irreversible degradation of stack voltage

另外,通过对 5 片单池的电压衰退情况进行对比分析可发现,各单池在长时间运行过程中的整体衰退趋势大致相同,但是每片单池的输出电压不一致,电压衰退的百分比也不同,如图 4 所示。根据木桶效应,燃料电池电堆的工作寿命和最大输出功率受性能最差的单池影响最大。因此,仅使用平均电压或总电压不足以表征电堆的衰退情况。

对预处理后的实验数据分析发现(图 3、图 4),燃料电池电堆在长期运行过程中存在“可逆衰退”和单池电压衰退不一致等现象。仅通过输出电压难以全面表征电堆的 SOH,除电堆电压、功率等电参数外,电堆温度、反应气体的压力和流量等非电参数也可能包含燃料电池电堆的衰退信息。因此,本文将输出功率信息与外部操作条件(如电堆温度、反应气体压力和流量等非电变量)信息进行融合,提出了一种融合电与非电信息的 SOH 指标,用于 SOH 估计及 RUL 预测。

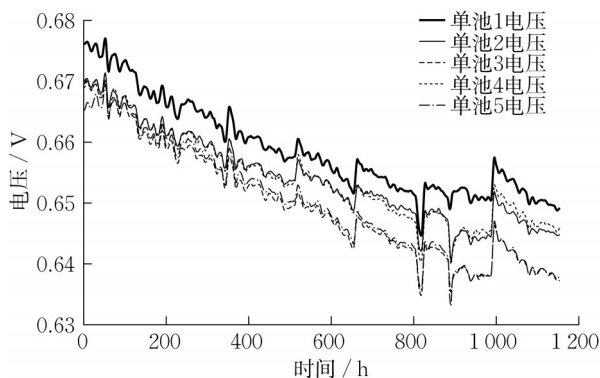


图 4 单池电压衰退曲线

Fig. 4 Voltage degradation of a single fuel cell

2 基于信息论的健康状态指标选取

采用的数据集记录了运行时间、拉载电流、输出电压以及外部操作条件等 16 个参数变量,其中外部操作条件如表 1 所示。

表 1 PEMFC 操作条件

Tab. 1 Operating conditions of PEMFC

编号	物理含义	单位	编号	物理含义	单位
①	阳极入口气体温度	℃	⑨	阳极入口气体压力	kPa
②	阳极出口气体温度	℃	⑩	阳极出口气体压力	kPa
③	阴极入口气体温度	℃	⑪	阴极入口气体流量	L·min ⁻¹
④	阴极出口气体温度	℃	⑫	阴极出口气体流量	L·min ⁻¹
⑤	冷却液入口温度	℃	⑬	阳极入口气体流量	L·min ⁻¹
⑥	冷却液出口温度	℃	⑭	阳极出口气体流量	L·min ⁻¹
⑦	阴极入口气体压力	kPa	⑮	冷却液流量	L·min ⁻¹
⑧	阴极出口气体压力	kPa	⑯	阴极相对湿度	%

为了筛选出与燃料电池电堆衰退信息关联度大的操作条件参数,本文基于信息论方法^[6-7],使用信息熵、排列熵和互信息定量评价各个操作条件参数中包含的信息量、变化趋势和与电堆输出功率衰退趋势的相关性,为后续将筛选出的操作条件参数与输出功率进行融合建立基础。

2.1 基于信息熵的健康状态指标选取

信息熵用于描述系统的不确定程度,信息熵越大表示系统的无序程度越大、系统包含的信息量越多。假设随机变量 X 可能出现的多种状态分别为 x_1, x_2, \dots, x_n , 则随机变量 X 的信息熵为

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (3)$$

式中: $P(x_i)$ 为状态 x_i 出现的概率, $0 \leq P(x_i) \leq 1$ 。

由信息熵的定义可知,要计算信息熵首先需要得到随机变量 X 的概率密度函数。本文采用以下高斯核函数法确定随机变量概率密度分布函数:

$$f_x(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2}{2\sigma_x^2 h^2}\right) \quad (4)$$

式中: σ_x 为随机变量 X 的标准差; N 为观测样本数; h 为窗口宽度。

经过数据预处理后观测样本数为 2 289, 将样本分为 100 段, 窗口宽度 h 取 20, 通过公式 (3) 和 (4) 计算各操作条件的信息熵, 结果如表 2 所示。信息熵最高的前 5 个操作条件的编号分别为 ⑫、⑪、⑦、⑤和⑥, 表明这几个操作条件包含的信息量最丰富。其中, ⑫和⑪分别表示阴极出口和入口气体流量, ⑦表示阴极入口气体压力, ⑤和⑥分别表示冷却液的入口和出口流量, 表明燃料电池寿命衰减过程中, 流量、压力和温度会发生一定程度的变化。

2.2 基于排列熵的健康状态指标选取

排列熵用于衡量时间序列的复杂程度, 越规则

$$X = \begin{bmatrix} a(1) & a(1+L) & \cdots & a(1+(m-1)L) \\ a(2) & a(2+L) & \cdots & a(2+(m-1)L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a(N-(m-1)L) & a(N-mL) & \cdots & a(N) \end{bmatrix} \quad (5)$$

相空间中每一行为重构向量, 对各重构向量进行升序排序, 得到的排列为所有排列 $m!$ 中的一种, 将每种排列出现的频率作为出现的概率, 分别用 P_1, P_2, \dots, P_l 表示, 其中 $l \leq m!$, 则时间序列 $a(1), a(2), \dots, a(N)$ 的排列熵如下所示:

$$H(m) = -\sum_{i=1}^l P_i \lg P_i \quad (6)$$

将预处理后的各操作条件进行相空间重构, 本文采用虚假最邻近点法估算嵌入维数 m , 使用平均互信息法估算延迟时间 $L^{[7-8]}$, 选定 $m=3, L=5$, 排列熵的计算结果如表 3 所示。排列熵越小表明操作条件的单调性越好, 编号为 ⑮、⑧、⑤、⑥和⑪的操作条件排列熵较小, 表明对应操作条件的时间序列数据相对于其他操作条件具有较好的趋势性。

2.3 基于互信息的健康状态指标选取

互信息用于衡量两个变量之间的相关性, 两个变量之间的互信息越大, 相关性越高。目前燃料电池的输出功率被认为是与燃料电池的 SOH 高度相关的一种指标, 故本文通过计算各操作条件与电堆输出功率的互信息, 评价各操作条件与燃料电池 SOH 的相关程度。

Sharma^[9] 对互信息的计算进行了离散化, 如公式 (7) 所示。

表 2 PEMFC 操作条件的信息熵

Tab. 2 Information entropy of PEMFC operating condition

编号	信息熵数值	排序	编号	信息熵数值	排序
①	5.052 71	16	⑨	6.162 98	7
②	5.164 44	15	⑩	6.078 58	9
③	5.830 87	11	⑪	6.417 34	2
④	5.261 04	14	⑫	6.427 80	1
⑤	6.333 01	4	⑬	5.568 57	12
⑥	6.243 88	5	⑭	6.179 41	6
⑦	6.414 40	3	⑮	6.006 06	10
⑧	6.089 08	8	⑯	5.522 71	13

的时间序列, 其排列熵越小。

对于长度为 N 的时间序列 $a(1), a(2), \dots, a(N)$, 给定嵌入维度 m 和时间延迟 L , 采用相空间重构法对该其进行重构, 得到的相空间重构矩阵为

表 3 PEMFC 操作条件的排列熵

Tab. 3 Permutation entropy of PEMFC operating condition

编号	排列熵数值	排序	编号	排列熵数值	排序
①	1.261 73	14	⑨	1.230 49	11
②	1.233 60	12	⑩	1.211 17	8
③	1.279 43	16	⑪	1.203 51	5
④	1.219 67	9	⑫	1.209 52	7
⑤	1.202 03	3	⑬	1.264 23	15
⑥	1.203 13	4	⑭	1.227 06	10
⑦	1.204 92	6	⑮	1.031 98	1
⑧	1.202 02	2	⑯	1.237 79	13

$$M(X, Y) = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log_2 \frac{\hat{f}_{x,y}(x_i, y_i)}{\hat{f}_x(x_i) \hat{f}_y(y_i)} \quad (7)$$

式中: n 为样本个数; $\hat{f}_x(x_i)$ 和 $\hat{f}_y(y_i)$ 分别为随机变量 X 和 Y 的边缘概率密度估计函数; $\hat{f}_{x,y}(x_i, y_i)$ 为随机变量 X 和 Y 的联合概率密度估计函数。

各操作条件与输出功率的互信息计算结果如表 4 所示。

2.4 操作条件分析

通过计算各操作条件的信息熵、排列熵和互信息, 初步筛选出 7 个操作条件, 分别为冷却液入口和出口温度、阴极入口和出口气体温度、阴极入口和出口气体流量以及冷却液流量。

通过分析数据, 发现各操作条件变化幅度小, 趋

表 4 PEMFC 操作条件与输出功率的互信息
Tab. 4 Mutual Information between operating condition and power

编号	互信息数值	排序	编号	互信息数值	排序
①	0.841 07	16	⑨	0.890 56	6
②	0.844 64	15	⑩	0.888 12	8
③	0.878 85	11	⑪	0.900 28	3
④	0.848 38	14	⑫	0.902 88	1
⑤	0.898 42	4	⑬	0.865 33	12
⑥	0.897 33	5	⑭	0.887 71	9
⑦	0.901 87	2	⑮	0.887 36	10
⑧	0.889 93	7	⑯	0.864 28	13

势性较差,但是入口和出口处参数的差值的变化趋势较为明显。故对初步筛选出的操作条件进行修正,最终筛选结果如表 5 及图 5 所示。

表 5 修正后的操作条件
Tab. 5 Modified operating conditions

操作条件	物理含义	单位
$T(⑥-⑤)$	冷却液入口和出口温度差	$^{\circ}\text{C}$
$p(⑦-⑧)$	阴极入口和出口气体压力差	kPa
$q(⑫-⑪)$	阴极入口和出口气体流量差	$\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$
$Q(⑮)$	冷却液流量	$\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$

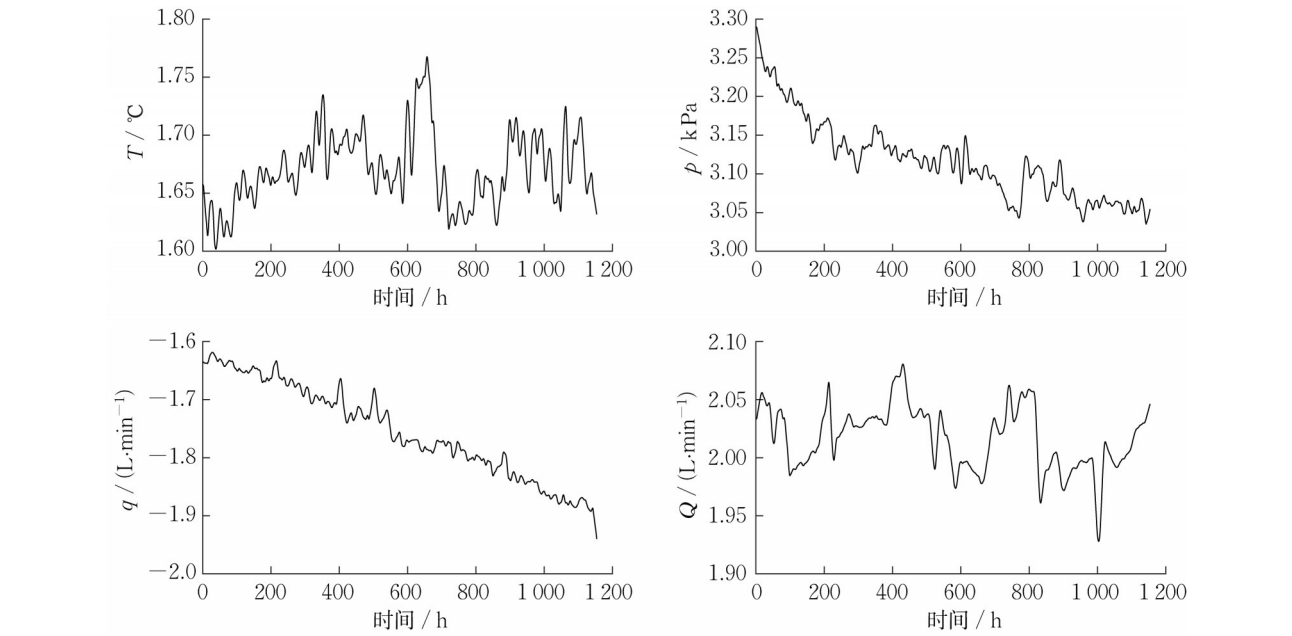


图 5 修正后的操作条件随时间的变化
Fig. 5 Modified operating conditions

3 健康状态指标融合方法

目前常用的 SOH 指标融合方法为距离函数分析法,通过计算样本在样本空间中的位置及样本之间的距离(包括欧氏、马氏以及测地距离等)得到当前时刻的 SOH。Chen 等^[1]采用测地距离和马氏距离的方法将电压、功率和内阻进行融合,建立了一种融合 SOH 指标。高雨旋^[10]采用马氏和欧氏距离的方法,将电压、内阻分别与电压均衡性和输出功率进行融合,结果表明前者建立的融合 SOH 指标响应速度更快,更适合用于燃料电池的 SOH 评估。

在燃料电池衰退过程中存在“可逆衰退”以及单池电压衰退的一致性问

题,因此,理想的融合 SOH 指标不仅应该消除由于“可逆衰退”造成的 SOH 指标再恢复情况,而且也要考虑衰退一致性问题,即具有良好的单调性和衰退一致性。

3.1 基于二次规划的健康状态指标融合方法

综合考虑单调性和衰退一致性,本文采用二次规划法将各单池输出功率与筛选出的操作条件进行融合。二次规划问题的目标函数如公式(8)所示。

$$o = \min_{\theta} \left\{ \eta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^t c_{i,j} e_{i,j} + \frac{(1-\eta)}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^t (h_{i,j} - \bar{h}_j)^2 \right\} \tag{8}$$

式中: θ 为输出功率和操作条件的加权融合系数; η 为调节单调性与衰退一致性权重的系数; n 为单池数量; t 为样本数据的时间跨度; $e_{i,j}$ 为第*i*个单池在第*j*个时刻对应的单调性补偿项; $c_{i,j}$ 为补偿项对应的权重系数; $h_{i,j}$ 为第*i*个单池在第*j*个时刻的融合 SOH 指标; \bar{h}_j 为 5 个单池在第*j*个时刻融合 SOH 指标的

平均值。

式(8)定义的SOH综合评价指标是单调性和衰退一致性的线性加权和。第一项为单调性指标,越小表明SOH指标的单调性越好;第二项为衰退一致性指标,越小表明SOH指标的衰退一致性越好。

通过引入补偿项 $e_{i,j}$,可以使融合SOH指标具有更好的单调性,如果下一时刻的融合SOH指标增加,则对该项进行补偿,加权融合系数应使补偿项的和最小,即融合SOH指标的单调性最好。 $e_{i,j}$ 的表达式如公式(9)所示。

$$e_{i,j} = \max(h_{i,j+1} - h_{i,j}, 0) \quad (9)$$

随着燃料电池系统的运行时间增加,传感器数据的测量误差增大,测量噪声增加,影响融合SOH指标的单调性。因此,随着时间 t 增加,应该给 $e_{i,j}$ 赋予更高的权重,即 $c_{i,j}$ 应随着 t 的增加而单调递增, $c_{i,j}$ 的约束条件如公式(10)所示。

$$\begin{cases} c_{i,j+1} \geq c_{i,j} \geq 0 \\ i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, t-1 \\ \sum_{j=1}^t c_{i,j} = 1 \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (10)$$

融合SOH指标的表达式如公式(11)所示。

$$h_{i,j} = \sum_{k=1}^a \theta_k s_{i,j,k} = \mathbf{x}_{i,j} \boldsymbol{\theta} \quad (11)$$

式中: a 为待融合数据的数量,取值为5; θ_k 为第 k 个加权融合系数; $s_{i,j,k}$ 为第 i 个单池在第 j 个时刻的第 k 个融合数据。 $\boldsymbol{\theta}$ 和 $\mathbf{x}_{i,j}$ 的表达形式如公式(12)和(13)所示。

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_a]^T \in \mathbf{R}^{a \times 1} \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_{i,j} = [s_{i,j,1}, s_{i,j,2}, \dots, s_{i,j,a}] \in \mathbf{R}^{1 \times a} \quad (13)$$

融合SOH指标为所有操作条件的加权平均值,向量 $\boldsymbol{\theta}$ 表示每一组融合数据的重要程度,其加权和为1。 $\boldsymbol{\theta}$ 的约束条件如公式(14)所示。

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{1}, A_{i,j,k} \theta_{i,j,k} \geq 0, k = 1, 2, \dots, a \quad (14)$$

式中: \mathbf{A} 为 $a \times a$ 的对角矩阵,对角元素的取值为1或-1;当操作条件数据呈降低趋势时,对应的对角元素取1,反之取-1。

综合公式(8)~(14),整理得到二次规划问题的标准数学形式为

$$\begin{cases} o = \min_{\boldsymbol{\omega}} \{ \boldsymbol{\eta} \mathbf{v}^T \boldsymbol{\omega} + (1 - \boldsymbol{\eta}) \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{H} \boldsymbol{\omega} \} \\ \text{s.t. } \mathbf{C} \mathbf{D} \boldsymbol{\omega} = \mathbf{1}, \mathbf{G} \boldsymbol{\omega} \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

在标准形式下, \mathbf{C} 为 $1 \times a$ 的单位矩阵,其他变量

矩阵的定义如公式(16)~(20)所示,其中, \mathbf{Z} 为零矩阵, \mathbf{I} 为单位矩阵。

$$\begin{cases} \mathbf{v} = [\mathbf{Z}^{1 \times a}, \mathbf{c}_1^T, \mathbf{c}_2^T, \dots, \mathbf{c}_n^T]^T \\ \mathbf{c}_i = [c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,t}]^T \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega} = [\boldsymbol{\theta}^T, \mathbf{e}_1^T, \mathbf{e}_2^T, \dots, \mathbf{e}_n^T]^T \\ \mathbf{e}_i = [e_{i,1}, e_{i,2}, \dots, e_{i,t}]^T \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \mathbf{H} = \mathbf{B}^T \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{L} \boldsymbol{\lambda} \mathbf{B} \\ \mathbf{B} = \boldsymbol{\theta} \boldsymbol{\omega}^{-1} \\ \boldsymbol{\lambda} = [\mathbf{x}_{1,t}^T, \mathbf{x}_{2,t}^T, \dots, \mathbf{x}_{n,t}^T]^T \\ \mathbf{L} = \frac{1}{n} (\mathbf{I} - \frac{1}{n} \mathbf{I} \mathbf{I}^T) \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{a \times a} & \mathbf{Z}^{a \times nt} \\ \mathbf{E}^{(t-1) \times a} & \mathbf{E}^{(t-1) \times nt} \end{bmatrix} \\ \mathbf{E} = \begin{bmatrix} s_{i,2} - s_{i,1} \\ s_{i,3} - s_{i,2} \\ \vdots \\ s_{i,t} - s_{i,t-1} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (19)$$

$$\mathbf{D} = [\mathbf{A}, \mathbf{Z}^{a \times nt}] \quad (20)$$

3.2 健康状态指标融合结果与评价

基于二次规划法,将SOH的单调性和衰退一致性作为优化的目标函数,将冷却液温度差、阴极入口和出口气体压力差、阴极入口和出口气体流量差、冷却液流量与输出功率的加权融合系数作为优化参数。

单调性和衰退一致性的权重系数 η 影响融合SOH指标的结果, η 越大则单调性权重越大、衰退一致性权重越小。本文采用均方误差(mean squared error, MSE)作为选择 η 时的评价指标,计算如公式(21)所示。

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^t (h_{i,j} - \hat{h}_{i,j})^2 \quad (21)$$

式中: $h_{i,j}$ 为第 i 个单元在第 j 时刻的融合SOH指标,由于稳态工况下输出功率的衰退一定程度上能表征燃料电池的健康状态,因此,对输出功率进行多项式拟合作为用于评价SOH指标的 $\hat{h}_{i,j}$ 。

不同 η 值得到融合SOH指标的MSE结果如图6所示。随着 η 的增加,单调性在目标函数中占据的比重越来越大,MSE的整体变化趋势为先下降后上升,但如 $\text{MSE} - \Delta$ (Δ 为MSE的差分值)所示,MSE的变化不是单调的,当 η 取0.63时MSE有全局最小值0.2613。因此,取 $\eta = 0.63$ 作为二次规划的目标函数中单调性和衰退一致性的加权系数。

使用MATLAB对二次规划问题进行求解,首

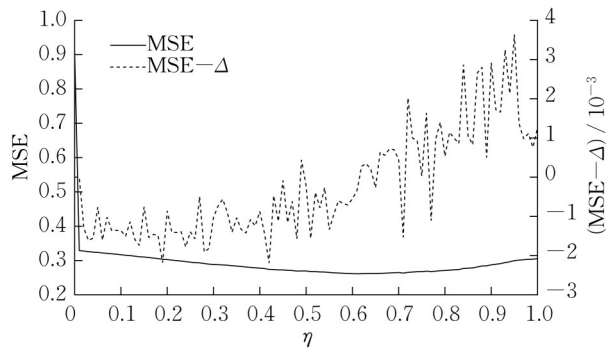


图 6 不同 η 下的融合 SOH 指标的 MSE

Fig. 6 MSE of integrated SOH indicator at different η value

先需要将各物理参数归一化,优化参数初始值设置为 $\theta = [0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2]$, θ 的取值范围为 $\theta_k \in [0, 1], k = 1, 2, \dots, 5$, 参数优化结果如表 6 所示。

结合图 5 中操作条件的变化趋势对 SOH 指标融合结果进行分析,在 4 个操作条件参数中阴极入口和出口气体的压力差和流量差本身具有较好的趋势性,因此与功率进行加权融合时所占的权重系数相对于其他操作条件参数更大。

表 7 融合 SOH 指标和输出功率对比

Tab. 7 Comparison of integrated SOH indicator and output power

指标	融合 SOH 指标	输出功率	融合 SOH 指标相比于输出功率的提升/%
单调性指标	1.117 3	1.447 8	22.83
衰退一致性指标	0.178 7	2.222 0	91.96
综合评价指标	0.770 0	1.734 2	55.60

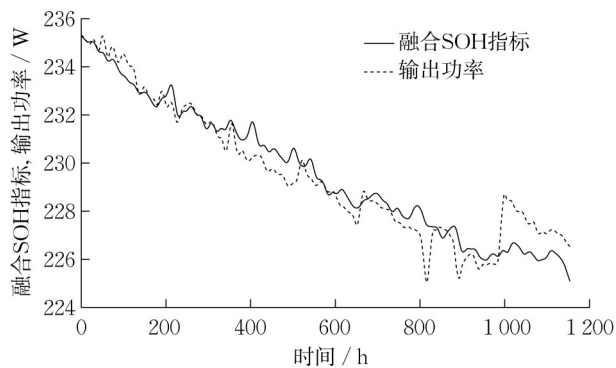


图 7 反归一化后的融合 SOH 指标与输出功率对比

Fig. 7 Comparison of inverse-normalized integrated SOH indicator and output power

4 结语

结合信息论和二次规划等方法,建立了一种单

表 6 基于二次规划法的参数优化结果

Tab. 6 Optimization results of integrated SOH indicator based on sequential quadratic programming

物理量参数	单位	优化参数	优化参数初始值	优化值
T	$^{\circ}\text{C}$	θ_1	0.2	0.024 6
p	kPa	θ_2	0.2	0.181 6
q	$\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	θ_3	0.2	0.413 6
Q	$\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	θ_4	0.2	0.096 6
输出功率	W	θ_5	0.2	0.283 6

融合 SOH 指标和输出功率在单调性、衰退一致性以及综合评价指标上的对比如表 7 所示,将融合 SOH 指标反归一化处理与输出功率进行比较,结果如图 7 所示。

融合 SOH 指标与输出功率的变化趋势近似,但相比于输出功率,具有以下优点:

(1) 融合 SOH 指标考虑了外部操作条件中包含的燃料电池衰退信息,在保留输出功率中长期衰退趋势信息的同时,能够剔除其中“可逆衰退”造成的影响。

(2) 融合 SOH 指标考虑了单池之间衰退的一致性问题,因此,相比于输出功率包含更多的衰退信息。

调性、衰退一致性良好的燃料电池融合 SOH 指标。公开的燃料电池寿命测试实验数据表明,燃料电池电压在长期运行过程中存在“可逆衰退”及单池电压衰退不一致等现象。基于信息论的方法对燃料电池的外部操作条件进行筛选,筛选出与燃料电池电堆衰退信息关联度大的操作条件参数;进一步,基于二次规划法将燃料电池输出功率与筛选出的外部操作条件参数进行融合,提出了一种融合电与非电信息的 SOH 指标。研究结果表明,融合 SOH 指标的均方差为 0.261 3,相比于输出功率,在单调性上提升了 22.83%,在衰退一致性上提升了 91.96%,在综合评价指标上提升了 55.60%。综上,融合 SOH 指标融合了电与非电信息,在保留长期“不可逆衰退”信息的同时,能有效剔除由于停机再启动而出现的“可逆衰退”信息,并且考虑了单池衰退的一致性问题,该思路对燃料电池 SOH 指标建立过程具有一定

的指导意义。

作者贡献声明:

周 苏:学术指导,论文审阅及修改。

潘志镛:数据分析,论文撰写。

温超凯:数据处理,融合方法研究,论文修改。

樊 磊:学术指导,数据分析,论文修改。

参考文献:

- [1] CHEN Jiayu, ZHOU Dong, LÜ Chuan, *et al.* A novel health indicator for PEMFC state of health estimation and remaining useful life prediction [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42 (31) : 20230. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.241.
- [2] INABA M, KINUMOTO T, KIRIAKE M, *et al.* Gas crossover and membrane degradation in polymer electrolyte fuel cells [J]. *Electrochimica Acta*, 2006, 51 (26) : 5746. DOI: 10.1016/j.electacta.2006.03.008.
- [3] FCLAB. IEEE PHM 2014 Data Challenge [EB/OL]. [2022-01-15]. <http://eng.fclab.fr/ieee-phm-2014-data-challenge/>.
- [4] KUNDU S, FOWLER M, SIMON L C, *et al.* Reversible and irreversible degradation in fuel cells during open circuit voltage durability testing[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 182(1): 254. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.04.009.
- [5] 潘瑞. 面向燃料电池外特性的老化行为建模及延寿策略研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学, 2020.
- PAN Rui. Research on aging behavior modeling and lifespan prolongation strategy of fuel cell with external characteristics [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [6] 刘华文. 基于信息熵的特征选择算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2010.
- LIU Huawen. A study on feature selection algorithms using information entropy[D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [7] 周俊. 数据驱动的航空发动机剩余使用寿命预测方法研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- ZHOU Jun. Research on date-driven prediction methods for remaining useful life of aero-engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [8] 张来斌,陈敬龙,段礼祥. 基于混沌理论的往复式压缩机故障诊断[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(1):112.
- ZHANG Laibin, CHEN Jinglong, DUAN Lixiang. Fault diagnosis of reciprocating compressor based on chaos theory [J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science)*, 2012, 36(1):112.
- [9] SHARMA A. Seasonal to interannual rainfall probabilistic forecasts for improved water supply management. Part 1 : a strategy for system predictor identification [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 239 (1) : 232. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00346-2.
- [10] 高雨旋. 质子交换膜燃料电池在线监测及寿命预测[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
- GAO Yuxuan. Online monitoring and remaining useful life prognostics of PEMFC [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.