

带载振动过程对燃料电池发动机性能的影响

杨云芃, 王祥祥

(中汽研新能源汽车检验中心(天津)有限公司, 天津 300300)

摘要:针对燃料电池发动机在车辆运行中存在的振动失效问题,本文以一款 270 kW 发动机为对象,通过三个方向的带载振动试验,对比分析了振动前后燃料电池发动机性能的变化规律,并重点研究了振动过程对发动机绝缘性能及稳态运行特性的影响,研究结果可为车用燃料电池发动机的设计与制造提供数据参考。

关键词:燃料电池发动机; 振动试验; 性能衰减; 绝缘电阻; 稳态特性; 功率波动

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

DOI: 10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.02.003

The Impact of On-load Vibration on Fuel Cell Engine Performance

YANG Yunpeng, WANG Xiangxiang

(CATARC New Energy Vehicle Research and Inspection Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the issue of vibration-induced failures in fuel cell engines during vehicle operation, this paper selects a 270 kW fuel cell engine as the research subject. It conducts loaded vibration tests in three directions to compare and analyze the performance variations of the engine before and after vibration. The study focuses particularly on the impact of the vibration process on the engine's insulation performance and steady-state operating characteristics. The findings provide a data reference for the design and manufacturing of vehicular fuel cell engines.

Key words: fuel cell engine; vibration test; performance degradation; insulation resistance; steady-state characteristics; power fluctuation

推动绿色发展、建设低碳社会的国家战略,让氢能经济备受关注^[1]。在此背景下,燃料电池汽车在我国能源结构调整中发挥着重要作用^[2],其可靠性与耐久性直接影响整个新能源汽车产业的发展。实车运行中,振动是导致燃料电池发动机性能发生衰减的主要原因之一^[3]。因此,研究振动对燃料电池发动机的影响,是评估并提升发动机可靠性、耐久性和稳定性的关键^[4]。这不仅能有效揭示发动机的潜在风险,更能从设计源头推动新能源领域装备质量的整体提升。鉴于发动机的可靠运行是整车质量的核心保障^[5],开展燃料电池发动机带载振动试验,正是落实这一保障、从设计源头消除潜在隐患的重要途径,也是切实满足装备制造业质量提升专项对高品质产品要求的必然选择^[6]。

1 影响机制

车辆运行中的振动主要表现为随机振动^[7],该振动对燃料电池发动机的影响机制主要包括以下方面:

1) 膜电极性能下降。持续的振动使催化剂层内部及其与质子交换膜和气体扩散层的界面处产生微裂纹,裂纹扩展造成活性催化剂颗粒团聚、迁移甚至从载体上剥落,致使电化学反应活性面积减小,活化极化损失增大,最终导致性能下降甚至局部停止工作。

当振动应力作用于质子交换膜时,存在制造缺陷、局部热点或化学降解的区域,易引发或加速微孔洞的产生与扩展,最终导致贯穿性穿孔或撕裂^[8]。同时,振动还可能导致气体扩散层纤维断裂、孔隙结构坍塌或压缩不均,致使反应气体和生成水的传输受阻^[9]。

收稿日期: 2025-08-12。

第一作者: 杨云芃 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事燃料电池汽车及其关键零部件的测试评价工作。E-mail: yangyunpeng@catarc.ac.cn。

2) 密封界面磨损。持续振动会使硅胶密封垫片发生微动磨损、永久变形、材料疲劳老化, 并导致密封界面(如气体扩散层与双极板、膜与边框)发生滑移, 进而引起氢气、空气、冷却液泄漏, 造成电堆短路或局部冷却不良。此外, 振动还会加剧双极板与气体扩散层界面的磨损, 导致导电涂层加速磨损剥落, 破损处暴露的金属基体在酸性潮湿环境中会加速腐蚀^[10]。

3) 紧固结构失效。振动过程中, 燃料电池发动机紧固螺栓可能发生松动或预紧力衰减, 导致整体压紧力下降。电堆整体刚度下降时, 更易发生共振, 进一步放大振动破坏效应, 导致气密性下降^[11]。

4) 辅助系统失效。振动环境下, 辅助系统主要面临以下三类典型故障: ①管路连接松动与泄漏: 振动会导致连接接头松动, 并使管路 with 支架发生摩擦磨损或疲劳断裂, 进而引发氢气、空气、冷却液泄漏, 造成性能下降并带来安全风险。②传感器与线束连接故障: 振动可导致电气接插件松动、接触不良, 以及线束磨损、短路或断路。这些故障会使控制系统接收错误信号, 从而导致误操作或通信中断。③空压机与氢循环泵轴承磨损: 高速旋转部件(如空气压缩机轴承)对振动极为敏感, 振动会加速轴承磨损、疲劳剥落, 严重时可导致轴承抱死, 进而造成供气不足, 最终导致发动机无法正常工作。

2 试验准备

为研究振动对燃料电池发动机性能的影响, 本文以一台额定功率为 270 kW 的燃料电池发动机为对象, 对比测试其在振动与非振动条件下的性能。试验条件设置如下:

1) 环境条件: 环境温度控制在 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 环境压力为 96~106 kPa。

2) 燃料电池发动机状态: 保持出厂时的外形结构和技术参数; 各系统完整; 安全系统可靠; 绝缘性能、气密性等安全相关性能符合要求。

3) 试验平台与氢气: 试验平台能提供稳定可靠的高、低压电源, 为燃料电池发动机辅助系统供电, 并能满足发动机的散热需求; 试验用氢气符合 GB/T 37244—2018^[12] 的规定。

3 试验过程

3.1 带载振动测试

将试验对象安装在振动台上, 依据试验标准, 依次进行垂直方向(z 轴)、横向(y 轴)和纵向(x 轴)的

随机振动测试。

鉴于目前燃料电池发动机暂无统一的振动国家标准, 本文主要依据 GB 38031—2025^[13] 中 8.2.1 条的规定进行测试(见表 1)。该测试为随机振动, 每个方向测试时间为 12 h, x 轴、 y 轴、 z 轴的均方根分别为 0.52g、0.57g、0.73g。该标准虽是针对车用动力电池安全性, 但其振动测试工况用于燃料电池发动机同样具有合理性和代表性。

选择此标准主要基于以下两点考量: 首先, 在适用性方面, 燃料电池发动机与动力电池包同为新能源汽车的核心高压部件, 安装位置相近, 且所承受的振动激励主要为路面激励源经悬挂系统传递至车身的随机振动, 两者所处振动环境高度相似。其次, 在有效性方面, 该标准的振动谱基于大量实际道路载荷数据制定, 模拟了车辆整个生命周期内最为严酷的振动环境, 能有效激发燃料电池发动机的关键振动失效模式, 其严苛性与有效性已在动力电池领域得到充分验证。因此, 将该标准用于燃料电池发动机的安全性评估是合理的。

表 1 振动测试条件

频率/ Hz	z 轴功率谱密度/ ($\text{g}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)	y 轴功率谱密度/ ($\text{g}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)	x 轴功率谱密度/ ($\text{g}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)
5	0.008	0.005	0.002
10	0.042	0.025	0.018
15	0.042	0.025	0.018
40	0.000 5	—	—
60	—	0.000 1	—
100	0.000 5	0.000 1	—
200	0.000 01	0.000 01	0.000 01

振动试验中, 燃料电池发动机的运行工况依据 GB/Z 44116—2024^[14] 设定, 具体见表 2。该工况曲线如图 1 所示。

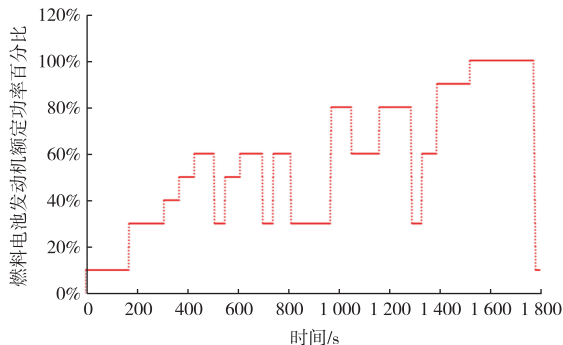


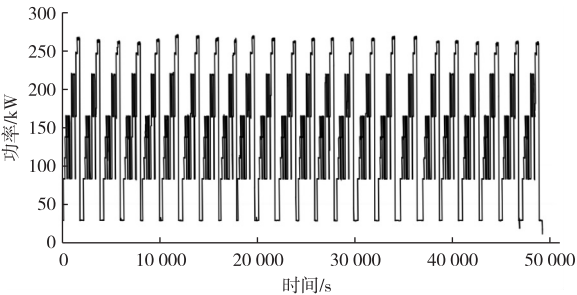
图 1 燃料电池发动机带载振动运行工况曲线

表 2 燃料电池发动机带载振动运行工况数据

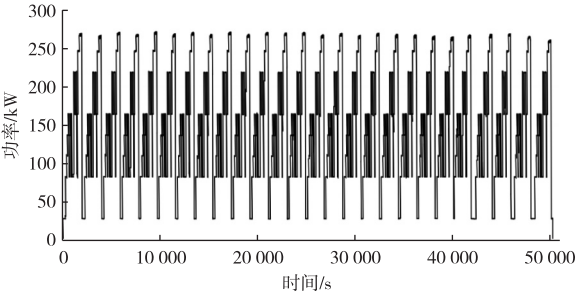
步骤	加载功率/kW	持续 时间/s	开始 时刻/s	结束 时刻/s
1	10% P_E	170	0	170
2	10% $P_E \sim 30\%P_E$	2	170	172
3	30% P_E	137	172	309
4	30% $P_E \sim 40\%P_E$	1	309	310
5	40% P_E	59	310	369
6	40% $P_E \sim 50\%P_E$	1	369	370
7	50% P_E	59	370	429
8	50% $P_E \sim 60\%P_E$	1	429	430
9	60% P_E	77	430	507
10	60% $P_E \sim 30\%P_E$	3	507	510
11	30% P_E	40	510	550
12	30% $P_E \sim 50\%P_E$	2	550	552
13	50% P_E	58	552	610
14	50% $P_E \sim 60\%P_E$	1	610	611
15	60% P_E	87	611	698
16	60% $P_E \sim 30\%P_E$	3	698	701
17	30% P_E	39	701	740
18	30% $P_E \sim 60\%P_E$	3	740	743
19	60% P_E	67	743	810
20	60% $P_E \sim 30\%P_E$	3	810	813
21	30% P_E	154	813	967
22	30% $P_E \sim 80\%P_E$	5	967	972
23	80% P_E	78	972	1 050
24	80% $P_E \sim 60\%P_E$	2	1 050	1 052
25	60% P_E	108	1 052	1 160
26	60% $P_E \sim 80\%P_E$	2	1 160	1 162
27	80% P_E	124	1 162	1 286
28	80% $P_E \sim 30\%P_E$	5	1 286	1 291
29	30% P_E	37	1 291	1 328
30	30% $P_E \sim 60\%P_E$	3	1 328	1 331
31	60% P_E	56	1 331	1 387
32	60% $P_E \sim 90\%P_E$	3	1 387	1 390
33	90% P_E	129	1 390	1 519
34	90% $P_E \sim 100\%P_E$	1	1 519	1 520
35	100% P_E	251	1 520	1 771
36	100% $P_E \sim 10\%P_E$	9	1 771	1 780
37	10% P_E	20	1 780	1 800

注： P_E 为燃料电池发动机额定功率。

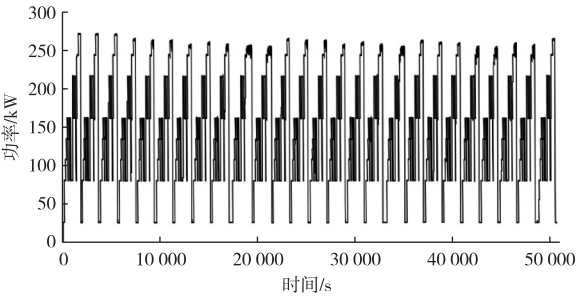
x,y,z 方向带载振动下的功率曲线如图 2 所示。受振动影响,燃料电池发动机在 3 个方向上的输出功率均出现波动,其中 z 方向波动最为明显。以每个循环工况最高功率点为例, z 方向上该点的最大功率(272. 81 kW)与最小功率(255. 49 kW)之间的相对波动幅度达 6. 35%,而 y 方向和 x 方向的波动幅度分别为 4. 55%和 2. 74%。这种瞬时波动主要是因为振动改变了电堆内液态水的分布与局部含量,进而影响了反应气体的供给。相较于水平方向的振动,垂直方向上的振动对于液态水的传输影响更大。



(a) x 方向



(b) y 方向



(c) z 方向

图 2 带载振动功率曲线

从平均功率来看, x,y,z 三个方向带载振动下的平均功率分别为 142. 65 kW、149. 29 kW、150. 08 kW。相较于振动前的平均功率(151. 41 kW),燃料电池性能出现了明显衰减,这可能是持续振动导致了催化层活性下降。

不施加振动时,燃料电池发动机的功率曲线如图

3 所示。其平均功率为 151.41 kW,最大功率(271.68 kW)与最小功率(265.88 kW)之间的波动幅度为 2.14%。这表明,在非振动工况下,燃料电池发动机不仅平均性能更好,且工作更加稳定。因此,在车辆实际运行中,振动对燃料电池发动机的影响不可忽视。

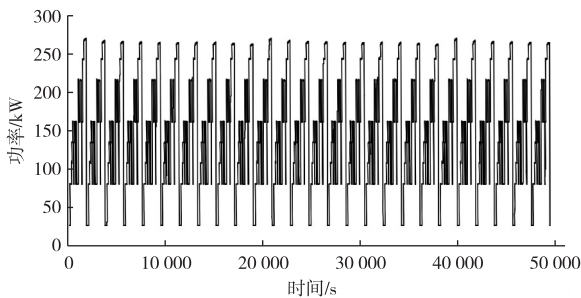


图 3 非振动条件下发动机功率曲线

3.2 绝缘电阻测试

在振动前后分别对燃料电池发动机进行绝缘电阻测试。测试在发动机冷却液处于热态后进行,采用兆欧表测量,并以燃料电池发动机与所有 B 级电压部件绝缘电阻的并联值作为其整体绝缘值。具体步骤如下:首先,测量燃料电池发动机正、负极分别对其外表面可导电或金属接地点的绝缘电阻值。然后,在内部高压接触器处于闭合状态下,单独测量燃料电池发动机辅助系统(所有 B 级电压部件)正、负极分别对其外壳的绝缘电阻。所有测量均需待兆欧表示数稳定后再进行读数。绝缘电阻测试结果见表 3。

表 3 绝缘电阻测试结果 Ω/V

项目	绝缘电阻	
	正极对地	负极对地
振动前	4 800	4 800
振动后 z 方向	3 060	3 040
振动后 y 方向	3 120	3 110
振动后 x 方向	3 090	3 030

从表 3 可知,振动对绝缘的影响较大,振动后绝缘电阻较振动前下降约 35%。此现象可能源于振动引起的内部电器件间爬电距离与电气间隙缩短,或绝缘材料因应力集中发生的摩擦磨损。

3.3 稳态性能测试

振动前后分别对燃料电池发动机进行稳态测试。测试流程如下:待燃料电池发动机结束热机、回到怠速(或最低功率点)后,先稳定运行 3 min;随后,测试

平台向燃料电池发动机发送加载指令,使其加载至额定功率点,并在此功率下继续稳定运行 3 min。测试结果见表 4。

表 4 振动前后额定点稳态测试结果

项目	电堆电流/A	系统功率/kW	氢气流 量/($g \cdot s^{-1}$)	系统效率/%	氢气利 用率/%
振动前	711.19	271.82	4.9987	45.56	96.56
振动后	755.62	271.51	5.4284	41.74	95.20

从表 4 可知,为达到额定功率输出,振动后所需的输出电流明显大于振动前。这表明振动导致了燃料电池堆的单片电压显著降低,其原因可能与振动引起的催化剂剥落或活性下降有关。此外,振动后燃料电池发动机的系统效率和氢气利用率均有所下降,这说明振动后燃料电池发动机辅助系统的功耗可能有所增加。

4 结束语

燃料电池发动机车载振动是一个复杂的机械-电化学耦合问题。振动过程可能引发微观层面的材料疲劳、磨损或界面失效,以及宏观层面的结构变形、松动或断裂,最终导致燃料电池发动机性能衰减、效率降低、寿命缩短,甚至出现突发性安全故障。因此,在设计生产过程中,需避开共振频段,开发抗疲劳、耐腐蚀的材料,同时采用可靠的防松策略、抗振连接件和管路布置,以保障燃料电池发动机长期运行的可靠性、耐久性与安全性。

参考文献:

[1] 任怡,代晓芳. 氢燃料电池汽车产业现状研究与前景分析[J]. 汽车实用技术,2025, 50(11):154-159.

[2] 杨运芑,赵鑫,王祥祥. GB/T 24549—2020 主要内容简析[J]. 客车技术与研究,2021,43(5):57-59.

[3] 吴迪,高岩,郭婷. 基于实际运行场景下燃料电池堆振动测试评价方法[J]. 中国标准化, 2024(13):255-258.

[4] 黄希宇,赵庆尧,邹利民,等. 大功率氢燃料电池发动机振动工装仿真优化设计及试验验证[J]. 机电工程技术, 2024, 53(12):213-216.

[5] 李小毅. 燃料电池发动机实验室测试系统的设计[D]. 武汉:武汉理工大学,2005.

[6] 孙田,熊兴旺,王娇娇,等. 燃料电池发动机经济特性分析[J]. 时代汽车, 2024(15):139-141.

重,且优化结果满足工程要求。同时,通过在优化过程中同步权衡多工况约束,最终实现了轻量化与综合性能的良好平衡。然而,单次优化因样本数量多而导致计算成本较高,未来在增加仿真算力的同时,还需考虑简化仿真模型以提升计算效率。

参考文献:

- [1] 李长玉,林佳鹏,钱宇晨,等. 基于有限元分析的某轿车白车身轻量化设计[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 144-149.
- [2] 李作轩,贾良跃,郝佳,等. 基于多工况关联的无人车辆车身结构轻量化优化设计[J]. 兵工学报, 2023, 44(11): 3529-3542.
- [3] 段利斌,周华锦,杜展鹏,等. 基于 SHCA-T 算法的车身骨架多工况耐撞性优化设计[J]. 汽车工程, 2023, 45(2): 304-312.
- [4] ZENG F, LI W, ZHENG H, et al. Applications of a DOE-based MDO in full vehicle crash safety and NVH design[R]. SAE International; Warrendale, 2021.
- [5] 于保君,何洪军,肖永富,等. 某小型客车车身骨架轻量化综合优化设计[J]. 客车技术与研究, 2021, 43(3): 22-25.
- [6] 周伟,李敏,丘铭军,等. 基于改进遗传算法的车身板件厚度优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3): 523-532.
- [7] 王立功,王超,邹益胜,等. 性能驱动的转向架构架结构设计方法[J]. 机械设计与制造, 2019(3): 118-121.
- [8] 王平,郑松林,吴光强. 基于协同优化和多目标遗传算法的车身结构多学科优化设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 102-108.
- [9] LI D H, TIAN J W, Shi S W, et al. Lightweight design of commercial vehicle cab based on fatigue durability[J]. Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2023, 136(1): 421-445.
- [10] FANG J G, GAO Y K, SUN G Y, et al. Multiobjective robust design optimization of fatigue life for a truck cab[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015(135): 1-8.
- [11] 王登峰,李慎华. 基于 Pareto 挖掘的白车身侧碰安全件轻量化优化设计[J]. 中国机械工程, 2021, 32(13): 1584-1590.
- [12] OUYANG J, XIAO Y Y, SHU C, et al. The Correction scheme of enhanced response surface method to support full vehicle MDO design [R]. SAE International; Warrendale, 2021.
- [7] 李维,刘亮红,鹿政华,等. 某燃料电池储氢系统框架随机振动疲劳分析与优化[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(22): 128-133.
- [8] 温小飞,陈泽滔,詹志刚,等. 质子交换膜燃料电池单电池振动响应分析[J]. 电源技术, 2022, 46(8): 903-906.
- [9] 焦道宽,郝冬,王晓兵,等. 振动对燃料电池扩散层液态水传输行为探究[J]. 汽车工程, 2023, 45(3): 402-408.
- [10] 裴冯来,欧阳云瀚. 强化道路振动谱影响下的燃料电池电性能与气密性衰减规律[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 714-721.
- [11] 顾平林,姜于亮,谢庆诗. 振动对燃料电池电堆气密性的影响分析[J]. 时代汽车, 2022(2): 154-157.
- [12] 全国氢能标准化技术委员会. 质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气: GB/T 37244—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 1-7.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车用动力蓄电池安全要求: GB 38031—2025[S]. 中国标准出版社, 2025: 9.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. 燃料电池发动机及关键部件耐久性试验方法: GB/Z 44116—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024: 23-24.

(上接第15页)