

基于多传感器数据融合的电动汽车 动力锂电池火灾探测系统

劳中建 张洋 丘嘉乐 梁中棚 连柏尧

(广州通达汽车电气股份有限公司, 广东 广州 510700)

摘要: 针对电动汽车动力锂电池火灾早期预警问题, 提出基于多传感器数据融合的电动汽车动力锂电池火灾探测系统。首先, 研究电动汽车动力锂电池火灾发生过程, 筛选火灾初期发生明显变化的物理参数及固体、气体发生物; 然后, 采用 D-S 证据理论对多传感器数据进行融合分析, 降低使用单一传感器时的误报率, 实现电动汽车动力锂电池火灾的准确判断; 最后, 根据多传感器数据的相关性对数据融合算法进行优化, 提高系统判断速度, 降低硬件成本。

关键词: 多传感器数据融合; 电动汽车动力锂电池; D-S 证据理论; 火灾探测

中图分类号: TP29

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2021)04-0004-04

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2021.04.004

0 引言

新能源汽车是国家重要战略性新兴产业^[1]。新能源汽车主要包括混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车、氢发动机汽车以及燃气汽车等。其中, 纯电动汽车的动力能源是锂电池。根据应急管理部门数据统计, 动力锂电池的热失控是引发电动汽车火灾、爆炸的主要原因, 而在现阶段热失控很难阻断^[2]。2017 年国家发布了强制标准 GB 7258—2017《机动车运行安全技术条件》, 要求电动汽车应配备动力锂电池火灾监测预警系统, 提前发现动力锂电池热失控并及时报警^[3]。

火灾探测方法一般根据火灾过程中的温度、烟雾值、CO 及 CO₂ 气体含量等参数进行判断, 如感烟式火灾探测法、CO 气体探测法等。这类探测方法原理及工程实现较简单, 但易误报或漏报, 并存在火灾检测滞后、适用电池种类少等问题。另有基于红外技术及图像识别技术进行火焰检测报警的探测系统, 但因汽车环境较恶劣, 检测精度不高, 反应滞后等原因不宜大范围推广应用。动力锂电池每种探测方法适用对象不同, 在特定情况下可能具有较高的探测精度, 但

由于每种传感器自身限制, 单一系统容易导致误报或漏报。若综合多种传感器优点, 有效融合多种传感器数据, 将提高探测准确性。为此, 本文提出基于多传感器数据融合的电动汽车动力锂电池火灾探测系统。

1 电动汽车动力锂电池火灾初期特征量选择

动力锂电池在高温、撞击、过充等情况下, 内部会发生热失控, 产生大量热并释放出多种可燃及有毒气体^[4]。在整个热失控过程中, 可用传感器监测以下有效信息:

- 1) 物理状态, 热失控发生时, 热量无法及时传递到外部, 导致动力锂电池及环境温度快速上升, 通过温度传感器可有效检测当前温度及温升上升情况;
- 2) 气体信息, 动力锂电池热失控初期发生化学反应时, 会产生 CO、HF、H₂、CH₄、C₂H₄、H₂S、SO₂ 等, 通过可燃气体传感器、CO 传感器、VOC 传感器等可检测这些气体浓度值^[5];
- 3) 固态高温产物, 在高温状态下, 高分子材料热裂解或燃烧所形成的物质, 以及燃烧物在不完全燃烧时的产生物, 最终形成烟雾, 通过光电或离子烟雾传感器可检测烟雾浓度值;

4) 声音信息, 热失控导致热量急剧上升, 当空气受热膨胀时会产生燃烧音, 这是一种频率为数赫兹的压力声波, 通过次声波传感器可有效检测燃烧中产生的声压, 但需与背景噪音区分开;

5) 火焰信息, 燃烧过程中的光辐射、热辐射、图像信息等构成火焰信息, 通过热红外传感器或摄像头可采集火焰信息。

由于燃烧音和火焰信息都是在电池已起火燃烧时产生的, 这种情况下明火即使可以扑灭, 但热失控也很难阻断。而物理状态、气体信息及固态高温产物在正常状态下都较稳定。通过火灾测试实验发现, 动力锂电池火灾早期时温度及气体浓度发生明显变化, 如温度从环境温度急速上升到 50℃ 以上; CO 浓度从 1 $\mu\text{L/L}$ 上升到 20 $\mu\text{L/L}$ 以上, 并且伴随温度升高; 可燃气体及烟雾也会先后出现, 但都处于一定限值内。因此, 本文选取物理状态(环境温度)、气体信息(可燃气体(H_2 、 CH_4)浓度、CO 浓度)及固态高温产物(烟雾浓度)作为动力锂电池火灾探测的特征变量。

2 系统硬件设计

基于多传感器数据融合的电动汽车动力锂电池火灾探测系统, 通过多传感器采集电动汽车动力锂电池火灾初期的特征变量, 经分析处理后, 通过执行单元输出结果。系统硬件主要由数据采集单元、电源单元、主控制器、存储单元、执行单元等组成, 结构如图 1 所示。

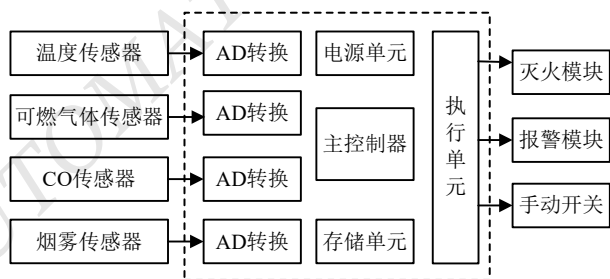


图 1 基于多传感器数据融合的电动汽车动力锂电池火灾探测系统硬件结构图

2.1 数据采集单元

数据采集单元包括温度传感器 DS18B20、可燃气体传感器 MQ-4、CO 传感器 TGS5141、烟雾传感器 NIS-07 及 AD 转换器 AD7888, 主要用于采集电动汽车动力锂电池火灾初期的特征变量。

2.2 电源单元

电源单元采用 LM2576S-5.0 将车内 24 V 电压转换为 MCU 工作所需电压 5 V, 并提供过压、过流等保护功能。

2.3 主控制器

主控制器 STM8S207RCT6 作为数据融合算法运行载体, 根据采集的特征变量, 经过 D-S 数据融合算法进行融合分析, 实现电动汽车动力锂电池火灾准确预警^[6]。D-S 数据融合算法复杂度降低, 采用 8 位 MCU 作为主控制器, 可降低硬件成本。

2.4 存储单元

存储单元用于存储传感器历史数据及过程运行数据, 以供数据融合算法使用。

2.5 执行单元

执行单元包括灭火模块、报警模块、手动开关等, 通过采集控制信号及控制其输出预警, 达到控制灭火器的目的。

3 系统关键算法设计

基于多传感器数据融合的电动汽车动力锂电池火灾探测系统关键算法是多传感器数据融合算法。Dempster- Shafer (D-S) 证据理论是一种处理不确定性的推理理论, 也是一种应用广泛的多传感器数据融合算法。数据融合时不必精确说明各个传感器难以获得的概率, 可建立单个传感器的可信度函数, 再通过 Dempster 合并规则整合多个传感器的信息, 最后根据决策逻辑进行决策^[7]。多传感器数据融合算法框图如图 2 所示。

在多传感器数据融合算法中, 温度传感器、可燃气体传感器、CO 传感器及烟雾传感器数据的可信度

函数不一致^[8]。首先，进行基本可信度的初始赋值；然后，根据每次采集的传感器信息，重新进行基本可信度的修正赋值^[9]，随着采集数据的不断积累，不断地修正基本可信度；最后，根据决策规则进行决策。这种可信度赋值及修正方法存在局限性，每个传感器对目标判决的概率赋值都受经验和积累数据的影响。

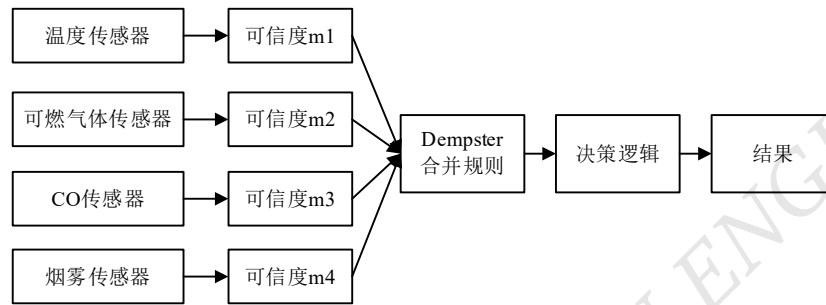


图2 多传感器数据融合算法框图

4 实验及结果

本系统传感器的特征变量有4个，它们对判断是否发生火灾的可信度值不同。根据实验室数据及经验值，对每个变量在不同范围分别赋予不同的确定性及不确定性值，如表1所示。

表1 4个特征变量初始可信度

变量	数值范围	确定性	其他	不确定性
环境温度 /°C	40~50	0.3	0.4	0.3
	50~70	0.5	0.2	0.3
	>70	0.9	0.05	0.05
可燃气体 浓度 /(μL/L)	100~500	0.4	0.4	0.2
	500~1000	0.6	0.3	0.1
	>1000	0.85	0.1	0.05
CO 浓度 /(μL/L)	10~50	0.3	0.5	0.2
	50~100	0.7	0.2	0.1
	>100	0.9	0.05	0.05
烟雾浓度 /(dB/m)	0.1~0.2	0.2	0.6	0.2
	0.2~0.35	0.4	0.4	0.2
	>0.35	0.8	0.1	0.1

同时，不同传感器探测值处于火灾不同阶段时相关性差别较大，在火灾初期，一些传感器相关性较小，可能导致火灾未能正确识别。本文设计的数据融合算法根据传感器相关性对 D-S 证据理论进行优化，针对多传感器变量，取确定性最高的2个特征变量进行融合计算，可有效降低系统复杂度。

由表1可知：当温度为40℃~50℃时，电动汽车动力锂电池可能处于室外高温环境或充电状态下，不确定性较高，当温度超过70℃时，发生火灾的确定性为0.9；当可燃气体浓度较低时，存在误报的可能性较大，若浓度达到1000 μL/L以上，发生火灾的确定性为0.85；当CO浓度很低时，几乎不可能发生火灾，若超过100 μL/L时，发生火灾的确定性为0.9。

电动汽车运行环境较恶劣，动力锂电池充电时环境温度会异常，若仅以环境温度或烟雾浓度等单一传感器数据作为判断依据，可能导致误报。本系统对多个传感器数据进行融合，随着温度值变高，如果同时出现可燃气体浓度升高或者CO浓度、烟雾浓度升高，则判断发生火灾的概率较大。

实验采集的特征变量：可燃气体浓度为120 μL/L，CO浓度为60 μL/L，烟雾浓度为0.1 dB/m，温度为40℃~50℃。采用D-S数据融合算法，用火灾概率最高的环境温度及CO浓度进行融合计算，与采用单一传感器进行判断的结果比较，对比结果如表2所示。

表2 D-S数据融合算法与单一传感器火灾探测对比结果

传感器变量	概率值			结论
	火灾	其他	不确定	
环境温度	0.3	0.3	0.4	不确定
可燃气体浓度	0.4	0.4	0.2	不确定
CO 浓度	0.7	0.2	0.1	火灾
烟雾浓度	0.2	0.6	0.2	不确定
融合结果	0.74	0.21	0.05	火灾

由表2可知：若根据温度传感器、可燃气体传感器、CO传感器及烟雾传感器中的任何一个传感器数据进行判断，火灾无法确定，但通过数据融合算法火灾不确定性明显下降；同时也排除了火灾不同阶段有些传感器没反应的情况，加速系统的反应能力。

5 结语

本文设计了基于多传感器数据融合的电动汽车动力锂电池火灾探测系统，提出以环境温度、可燃气体浓度、CO浓度、烟雾浓度作为电动汽车动力锂电池火灾特征变量的组合方案，并将D-S数据融合算法应用于多传感器数据融合。实验结果表明：D-S数据融合算法可有效解决单一传感器不确定性高的问题；

通过对多个传感器采集的数据融合，电动汽车动力锂电池火灾判定变为一致性描述^[10]，降低系统的不确定性，提高系统的正确决策能力和预警可靠性。

参考文献

- [1] 高朝春.一种基于多信息融合的火灾预警系统[J].信息技术与信息化,2014(9):86-87.
- [2] 应朝阳.GB7258—2012《机动车运行安全技术条件》制修订情况介绍[J].中国标准导报,2012,(7):6-9.
- [3] 张少禹,董海斌,李毅,等.动力锂离子电池热失控火灾试验模型研究[J].消防科学与技术,2018,37(3):397-400.
- [4] 王淮斌,杜志明.低压环境下锂离子电池安全性研究进展[J].消防科学与技术,2019,38(6):884-890.
- [5] 闫军.工作区有害气体检测的五种常用传感器[J].仪器仪表与分析监测,2001(2):6-7.
- [6] 赵英,陈淑娟.基于多传感器数据融合的火灾预警系统[J].现代电子技术,2010(24):173-175,179.
- [7] 蓝金辉,马宝华,蓝天,等.D-S证据理论数据融合方法在目标识别中的应用[J].清华大学学报(自然科学版),2001,41(2):53-55,59.
- [8] 付瑞玲,王宁,杜志强.基于多传感器信息融合的火灾报警器设计[J].计算机测量与控制,2018,26(1):206-208,212.
- [9] 张淑清,邓红,王艳玲.D-S证据理论在数据融合中的应用及改进[J].传感技术学报,2003,16(1):78-81.
- [10] 郭涛,李龙飘,费庆国,等.数据融合技术中Dempster-Shafer证据理论的应用[J].信息化纵横,2009(16):80-82.

Electric Vehicle Power Lithium Battery Fire Detection System Based on Multi-Sensor Data Fusion

Lao Zhongjian Zhang Yang Qiu Jiale Liang Zhongpeng Lian Baiyao
(Guangzhou Tongda Auto Electric Co., Ltd. Guangzhou 510700, China)

Abstract: Aiming at the early warning problem of electric vehicle power lithium battery fire, an electric vehicle power lithium battery fire detection system based on multi-sensor data fusion is proposed. Firstly, the fire process of electric vehicle power lithium battery is studied to screen the physical parameters and solid and gas generators that change significantly in the early stage of the fire; Then, the D-S evidence theory is used to fuse and analyze the multi-sensor data, reduce the false alarm rate when using a single sensor, and realize the accurate judgment of lithium battery fire of electric vehicle; Finally, according to the correlation of multi-sensor data, the data fusion algorithm is optimized to improve the system judgment speed and reduce the hardware cost.

Key words: multi-sensor data fusion; lithium battery for electric vehicle power; D-S evidence theory; fire detection

作者简介:

劳中建,男,1981年生,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:自动化控制理论及技术。E-mail: 14945584@qq.com