

邓佳敏, 邹金慧, 郑绪东, 等. 加热烟草制品 (HTPs) 烟具的电池管理系统 (BMS) 综述 [J]. 中国烟草学报, 2020, 26 (3).
DENG Jiamin, ZOU Jinhui, ZHENG Xudong, et al. Battery management system (BMS) for heated tobacco products (HTPs): a review [J].
Acta Tabacaria Sinica, 2020, 26 (3). doi: 10.16472/j.chinatobacco.2019.322

加热烟草制品 (HTPs) 烟具的电池管理系统 (BMS) 综述

邓佳敏¹, 邹金慧¹, 郑绪东², 李志强², 汤建国²

¹ 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明市呈贡区景明南路727号 650000;

² 云南中烟工业有限责任公司技术中心, 昆明市五华区红锦路367号 650202

摘 要: 作为新型烟草制品领域最具发展潜力的产品, 以 IQOS 为代表的加热烟草产品 (Heated Tobacco Products, HTPs) 发展迅猛, 为了进一步促进国内企业 HTPs 产品研发, 本文围绕 HTPs 烟具的电池管理系统 (Battery management system, BMS) 剖析了国内外部分烟草公司现有烟具 BMS 的设计方案、功能参数, 综述了 BMS 总框架、电池温度估计方法、SOC (State of charge) 估计方法、SOH (State of health) 估计方法、SOF (State of function) 估计方法、SOE (State of energy) 估计方法、IBS (Intelligent battery sensor) 参数检测与信息存储、故障诊断报警方面的理论研究和要点, 总结了研究难点, 结合理论研究和存在问题, 为今后的研究开发提出了建议。

关键词: 加热烟草产品; 电池管理系统; 烟具; 锂离子电池; 设计方案; 功能参数

HTPs 产品因其具有饱满的烟雾量、舒适的口感、大幅降低有害物质释放量以及程控式的加热方式等优点, 所以越来越受到消费者和各大烟草公司的青睐^[1-5]。然而 HTPs 烟具属于新兴电子产品, 尚不拥有完善的 BMS, 现有产品大多直接或间接引用手机、充电宝等拥有成熟技术的 BMS, 但是 HTPs 烟具不同于手机、充电宝, 其性能主要体现在电池温度估计、SOC 估计、SOH 估计、SOF 估计、SOE 估计、IBS 参数检测与信息存储、故障诊断报警等指标中^[6]。因此, 急需设计一种专门适用于 HTPs 烟具的 BMS。

本文中首先剖析了国内外 HTPs 烟具 BMS 的产品现状, 然后分别系统地介绍了 BMS 的总体框架、电池温度估计方法、SOC 估计方法、SOH 估计方法、SOF 估计方法、SOE 估计方法、IBS 参数检测与信息存储、故障诊断报警等^[7]BMS 的核心技术, 最后分析了 BMS 的研究难点、局限以及今后的研究方向, 为 HTPs 烟具 BMS 的研发提供参考。

1 国内外 BMS 产品现状

1.1 国外现状

国外目前流行的 BMS 以及功能特点大致分为:

① 飞利浦·莫里斯烟草国际公司 (菲莫公司)^[8] 的 IQOS (型号: 2.4P): 包括 18650 (标称容量 2900 mA·h, 标称能量 11 W·h, 标称电压 3.7 V) 和 10370 (标称容量 120 mA·h, 标称能量 0.384 W·h, 标称电压 3.2 V) 锂电池各一颗, 分别作为充电单元和抽吸单元的电池; 恒流充电阶段充电电流均为 $2\text{ A} \pm 0.1\text{ A}$, 充满电的电池电压均达到 $4.2\text{ V} \pm 0.1\text{ V}$; 设有过电流保护与短路保护功能, 发生过电流或者短路时红灯亮自动关机; 设有过电压保护、低电压保护功能, 当电压过低或者过高时红灯亮起, 系统停止工作; 设有高温保护功能, 电池与电路板温度高于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时停止运行; 设有电量预算 IC (Integrated circuit, 集成电路), 充电单元采用 4 颗白光 LED 显示不同电量, 抽吸单元采用 1 颗

基金项目: 云南中烟工业有限责任公司重大专项“新型烟草产品关键技术开发” (2019XY02); 云南中烟工业有限责任公司科技计划资助项目“电加热不燃烧卷烟提质增效关键技术研究与应用” (2018XY01)

作者简介: 邓佳敏 (1993—), 硕士, 主要从事加热不燃烧烟草制品烟具控制系统、电池管理系统研究工作。Tel: 18313895892, Email: 1158737550@qq.com

通讯作者: 邹金慧 (1963—), Tel: 13629633876, Email: 553723956@qq.com

收稿日期: 2019-09-28; **网络出版日期:** 2020-06-09

三色 LED 显示电量；设有金属散热管装置，纵向贯通于整个装置中，可起到较好的散热效果^[9]。

②韩国 lil（型号：HYBRID）：包含 18650（标称容量 2950 mA·h，标称电压 3.6 V）锂电池一颗；BQ24190 锂电管理 IC；设有过吸烟保护功能，连续抽吸时间超过 5 s 时 LED 灯连续闪烁 10 次后输出截止；设有低电压保护功能^[10]，当电压低于 3.2 V 时 LED 灯连续闪烁 10 次后自动关机；设有高温保护功能，当检测到电池温度高于 85 °C 时红灯闪烁 10 次后进入关机保护状态；设有高温清洁模式，连续按开机键 5 次进入 530 °C 左右高温自动清洁模式；设有过电流保护功能，当检测到峰值电流大于 5 A 时启动过电流保护。

③英美烟草公司的 glo（型号：G003）：包含 18650（测量容量 3 000 mA·h；测量电压 3.7 V）锂电池一颗；VUBI TI 71 S19F 锂电管理 IC；设有过充电保护功能与过电流保护功能，当发生过充电或者过电流现象时两颗白灯连续闪烁 3 次进行提示；设有 0 V 充电功能，当电池因非正常放电导致过放电现象发生时锂电管理 IC 会自动保护电池使其进入休眠状态，电池处于休眠状态中当检测到电池恢复正常充电现象后，锂电管理 IC 会自动解除休眠状态；设有高温保护 NTC 装置，电池与电路板温度高于 60 °C 时停止运行；设有电量预算 IC，采用 4 颗三色 LED 显示不同电量；设有导热硅胶垫散热装置，采用导热硅胶垫（一种导热介质，用来减少电池表面与电路板接触面之间产生的接触热阻）对电池和电路板进行散热。

1.2 国内现状

近几年，国内 HTPs 烟具的 BMS 研究也取得了重大突破，以湖南中烟、云南中烟、四川中烟和湖北中烟等为主^[11-12]，产品主要包括：

①湖南中烟公司的 P 产品：包含 18650（测量容量 3 000 mA·h，测量电压 3.7 V）锂电池一颗；DW01 锂电保护 IC，可进行过充电保护、过放电保护、过电流保护；当电压过低时一颗红灯闪烁 6 次后系统停止工作；当发生短路或者过电流时，4 颗绿灯两两交替闪烁 6 次后停止工作。

②云南中烟公司的 W 产品：包括 18650（标称容量 2 200 mA·h，标称能量 8.14 W·h，标称电压 3.7 V）和 12350（标称容量 260 mA·h，标称能量 0.96 W·h，标称电压 3.7 V）锂电池各一颗，分别作为充电单元和抽吸单元的电池。CT2105 锂电保护 IC，可进行过充电保护，充满电时绿灯常亮 5 s 后熄灭，可

进行过电流保护，放电电流超过 9 A 时红灯闪烁 5 次后停止工作，可进行过放电保护，电池放电至 3 V 以下时自动进入休眠状态，直至检测到接入充电器时自动解除休眠状态；短路保护，检测到短路时，红灯闪烁 5 次后系统自动关机；设有高温保护 NTC 装置，电池与电路板温度高于 65 °C 时停止运行。

2 BMS 核心技术要点

2.1 BMS 总框架

BMS 的总体框图如图 1 所示，其中电池温度估计用于检测电池表面温度^[13-14]、环境温度以及电芯温度，通常与电池散热结构结合在一起；SOC 估计用于电池剩余电量估计^[15]，通常用百分比表示，100% 表示完全充电，0 表示完全放电；SOH 估计用于电池健康度^[16]的估计，可以理解为电池当前容量占出厂容量的比值；SOF 估计用于电池功能状态的估计，可以理解为控制策略中的一个参数^[17]，通常与电池充放电控制紧密联系；SOE 估计用于电池能量的估计，即烟具能够使用多长时间，通常为 SOC 估计的应用拓展，SOE 估计则利用 SOC 与 SOE 之间的映射关系^[18-19]进行估计，受到未来工况的影响较大；IBS 参数检测与信息存储用于对 BMS 中的数据信息进行采集以及对采集到的数据进行储存、调用；故障诊断用于检测突发故障并提供保护措施，主要包括过充电检测、过放电检测、过电流检测、电池温度检测、PCB（Printed circuit board，印刷电路板）温度检测、短路检测、加热片温度检测、电池兼容性检测等。

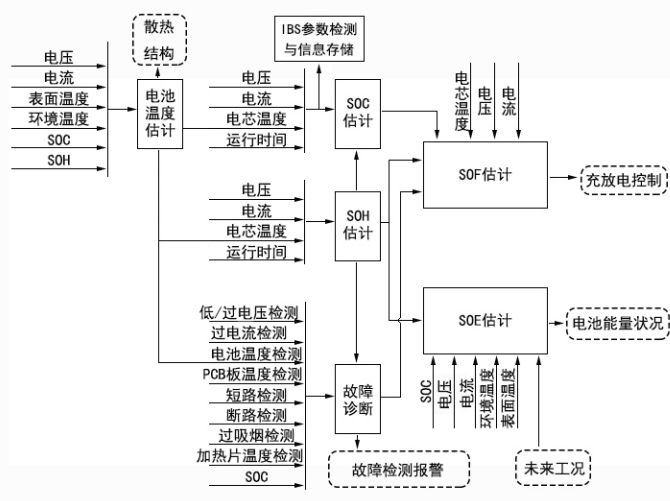


图 1 BMS 总框图

Fig. 1 General block diagram of BMS

2.2 电池温度估计

电池温度估计关系到电池的容量、功率和安全性,其关键技术主要包括电池最优工作温度范围选择、温度场计算、传热介质选择、散热结构设计。电池散热结构为电池温度估计中最重要的环节之一。主要是根据电池工作期间所受的内、外热负载状况,采用一种或多种散热结构来保证整个电池系统的工作温度维持在一定范围内。

目前,电池散热结构主要包括:空冷、液冷、热管冷却^[20]和相变冷却^[21]。

空冷和液冷分别以空气和液体为介质进行散热,是目前应用较广的两种散热结构;热管冷却采用热管进行散热,比液冷具有更高的散热效率;相变冷却采用相变材料进行散热,即采用管内冷却介质相变过程中吸收或释放大热量的原理实现降温,由于冷却介质密封于热管中,不易泄露,因此具有更高的安全性。

热管冷却适用于高精度、高倍率的BMS;相变冷却结构紧凑、冷却效果好、接触热阻低,但是占据空间大,相变材料所吸收的热量需要依靠风冷、液冷或其他散热结构的辅助,因此所需要的成本更高。国内外现有烟具因考虑到体积、成本和安全性因素的综合影响,多选用空冷、热管冷却、导热材料(相变冷却)对电池系统进行散热,如:英美烟草公司的glo(型号:G003)中采用导热硅胶垫置于电池与PCB之间进行散热;菲莫公司的IQOS(型号:2.4P)中采用热管冷却与空冷两种方式相结合进行散热,电池和PCB外置金属散热管,纵向贯通于整个装置中,当进行抽吸动作时带动空气流通,从而达到散热的目的;湖南中烟公司的P产品和云南中烟公司的W产品均采用空冷进行散热。迄今为止液冷、热管液冷(热管冷却技术包括热管空冷和热管液冷)、相变材料冷却这3种散热结构尚未应用于实际产品中,今后可能会成为新的发展方向。

2.3 SOC估计

目前,国内外SOC估计的理论体系已经相当完善,SOC估计方法主要分为3类,分别是基于经验的方法、基于模型的方法和基于数据拟合的方法,具体分类如图2所示。

基于经验的方法主要包括安时积分法和开路电压法^[22-26]。安时积分法和开路电压法两者的结合为当前最普遍的使用方法。

基于模型的方法主要包括电化学第一模型法^[27-28]和等效电路模型法。基于模型的方法是通过电池本身的化学反应、物理特性,采用等效电路元件进行电池

模型的建立,进而对SOC的规律进行阐述。其中,等效电路模型法又可以分为时域等效电路模型法^[29-32]和频域等效电路模型法^[33-35]。时域等效电路模型法又包括卡尔曼滤波法^[36]、粒子滤波法^[37]和其他方法^[38]。

基于数据拟合的方法主要包括神经网络法^[39-40]、支持向量机法^[41-42]和模糊控制法^[43]。基于数据拟合的方法不必考虑电池内部复杂的电化学反应,只需通过大量的数据进行拟合来估计电池的SOC。

菲莫公司的IQOS(型号:2.4P)、英美烟草公司的glo(型号:G003)以及云南中烟公司的W产品对于SOC估计均采用开路电压法进行估计,用LED1、LED2、LED3、LED4分别代表25%、50%、75%、100%的电量。韩国lil(型号:HYBRID)和四川中烟公司宽窄功夫(型号:1.3)也均采用开路电压法进行SOC估计,不同之处在于采用1颗三色LED灯进行不同电量显示。虽然SOC估计方法种类很多,但是目前均是采用基于经验的方法,其缺点是基于经验的方法往往需要漫长的经验积累去发现总结规律,若电池相关参数发生变动则需要重新总结规律,普适性较差,而基于模型和数据拟合的方法只需先建立一个简单粗糙的模型,然后用大量的数据进行填充

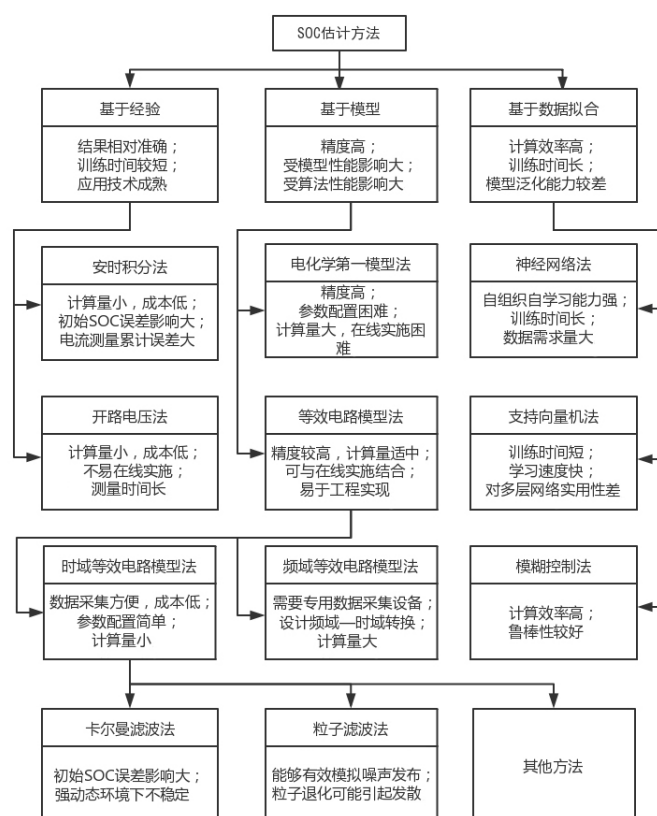


图2 SOC估计方法

Fig. 2 SOC estimation methods

进而使模型不断契合数据,其优点是基于模型和数据拟合的方法可以省去漫长的经验积累总结规律这一阶段,通过简单的模型和大量的数据节省漫长的研究时间,以后可加大基于模型和数据拟合方法的研究力度,尤其像卡尔曼滤波法、粒子滤波法、神经网络法及模糊控制法。

2.4 SOH 估计

目前,国内外对 SOH 的估计主要从离线和在线两个方向进行,具体分类如图 3 所示。

离线估计是一种传统的电池健康估计方法,这种方法通过电池的内在特性对其 SOH 进行估计,是现代在线智能法的基础,在早期 SOH 估计中比较常见。SOH 离线估计方法主要包括容量法、部分放电法、内阻法^[44]、电化学阻抗法、双脉冲放电负载测试法^[45]和初期电压跌落法。

在线估计是近些年在离线估计的基础上发展起来的,最主要的优点是可以实时进行 SOH 估计。SOH 在线估计方法主要包括电压曲线拟合法、神经

网络法^[46]、支持向量机法^[47]、卡尔曼滤波法^[48]、粒子滤波法^[49]、模糊逻辑推理法^[50]、滑模观测器法^[51]和自回归模型法^[52]。

目前为止,国内外 HTPs 烟具(包括菲莫公司的 IQOS 等国内外各大企业)尚无产品具有 SOH 估计功能,但在手机行业和汽车行业已有应用,如电池最大容量低于 80% 需更换电池;电池温度过高,电池过充、过放导致的隐患及其隐患的排除方式等。HTPs 烟具 SOH 估计功能关系到电池全寿命周期预测。电池的 SOH 受温度、充放电倍率、放电深度、循环区间、截止电压等多种因素影响。目前电池 SOH 的研究和建模分析等虽有一定的成果,但仍处于定性研究阶段。因此,未来 SOH 估计将会成为 HTPs 烟具 BMS 的一个研究方向。

2.5 SOF、SOE 估计

SOF 估计用于电池功能状态的估计,可以理解为控制策略中的一个参数,通常与电池充放电控制紧密联系。对于烟具来说,SOE 被定义为某特定时刻,电池可以供给发热元件等各种负载的功率,可以简单的理解为 SOF 是 SOC 和温度的相关函数。在实际应用中,BMS 不仅需要考虑特定时刻电池对外输出的功率,还需考虑电池允许充电的最大功率。菲莫公司的 IQOS (型号: 3.0 Multi) 采用 DS2780 作为充电 IC,电芯温度估计采用 1-Wire 接口,使用集成温度传感器测量电池温度。通过检测电池充放电过程中的电流、电压、时间及其电芯温度进行 SOC 估计。通过 SOC 和电芯温度的相关函数计算电池特性参数(SOF 估计),最后将其储存在 24 位的 EEPROM 内存中;云南中烟公司的 W 产品采用 MP2625 作为充电 IC,电芯温度估计采用 NTC 传感器。电池充放电电流通过 ISET 引脚与 GND 之间的电阻来检测,电压通过 VLIM 引脚进行检测。图 4 为相关充电 IC 原理图。

SOE 估计用来估计电池的能量状态,常用于 SOC 估计的进一步研究,SOC 与 SOE 相互映射是进行 SOE 估计的基础,简单的用 SOC 与 SOE 相互映射的关系来估计 SOE 并不准确,主要原因是电池在实际运行工况下,HTPs 烟具运行过程中会产生多种能量消耗,使电池的实际 SOE 估计难度增加,比如,烟具在短时间内进行全功率状态(预热状态和高温清洁状态)放电,在此期间电池的 SOE 估计难度非常大,也称之为未来工况。因此,SOE 估计受到未来工况^[53]的影响较大。目前,通用的 SOE 估计方法为:额定能量(W·h)=额定容量(A·h)×额定电压(V),如菲莫公司的 IQOS (型号: 2.4P) 18650 电池标称

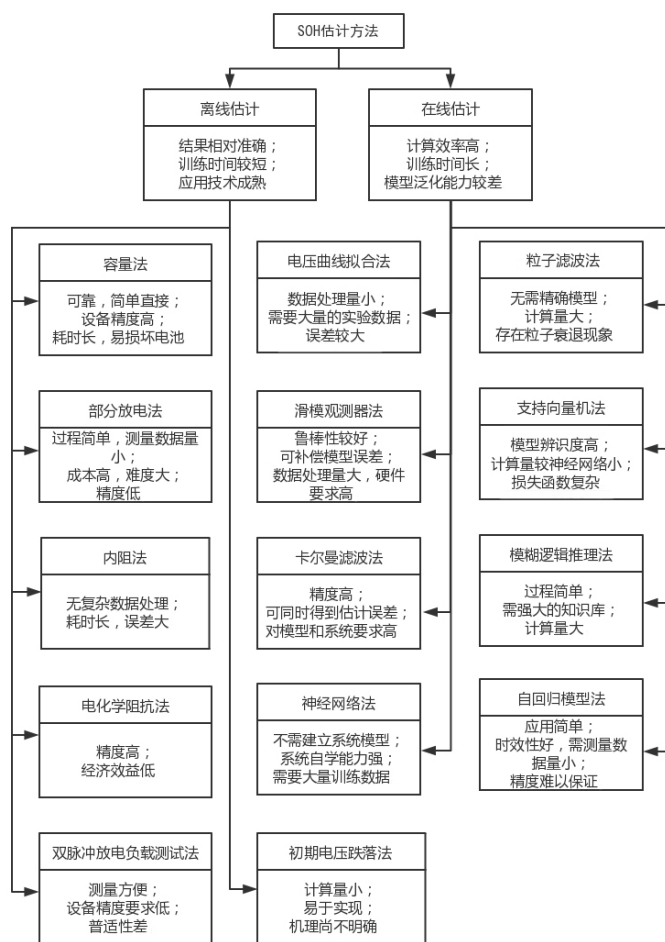


图 3 SOH 估计方法

Fig. 3 SOH estimation methods

能量 ($11 \text{ W} \cdot \text{h}$) = 标称容量 ($2.9 \text{ A} \cdot \text{h}$) $\times$ 标称电压 (3.7 V)；云南中烟公司的 W 产品 18650 电池标称能量 ($8.14 \text{ W} \cdot \text{h}$) = 标称容量 ($2.2 \text{ A} \cdot \text{h}$) $\times$ 标称电压 (3.7 V)。随着 HTPs 烟具的逐渐发展, BMS 也将进行升级换代。下一代烟具 BMS 将不只是优化硬件系统的性能, 而更为注重 SOF、SOE 估计软件系统的研发。近几年来尽管离线系统的机理模型研究、状态估计研究等方面取得了不错的进展, 但在线系统应用方面仍有很大的研究空间。

2.6 IBS 参数检测与信息存储

IBS 参数检测用于 BMS 的数据采集, 通过 IBS 模块测量电池的充放电电流、电池端压以及电池表面温度。然后使用 SPI (Serial peripheral interface) 全双工通信协议高速同步地以 PWM (Pulse width modulation) 斩波信号将采集结果发送至 HTPs 烟具的控制单元、加热单元以及充电单元。SPI 协议因其只使用四根线而大大节约了芯片的引脚, 同时方便 PCB 布线, 节约空间, 因此广泛使用在 HTPs 烟具中。菲莫公司的 IQOS (型号: 3.0 Multi) 采用 DS2780 作为 IBS, 如图 4 (a) 所示。电池充放电电流数据通过

压降检测电阻 $RSNS$ 进行采集, 电池端压数据通过 VDD (引脚 4) 和 VSS (引脚 2) 之间的连续电平信号进行采集, 电池表面温度通过集成温度数据传感器 NTC 进行采集。在 IBS 参数检测方面, 以菲莫公司的 IQOS 为代表的公司基本都在使用由半导体、电介质、磁性材料等固体元件构成的集成传感器, 这类传感器成本低、可靠性高、性能好、接口灵活, 但是缺乏自诊断功能、记忆功能、多参量测试功能和物联网功能。因此, 微小型化、智能化、多功能化和网络化将是 BMS 今后的发展方向。

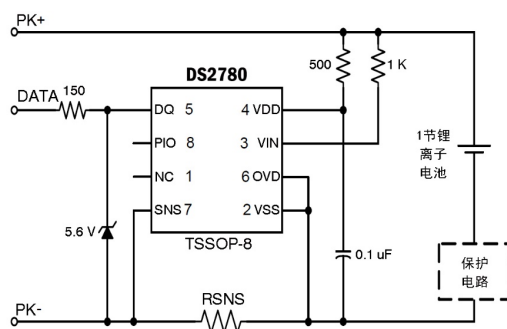
信息存储作为 BMS 中不可或缺的一环, 主要是将 HTPs 烟具使用过程中产生的信息流以某种格式储存在芯片内部, 使 BMS 快速地、准确地识别、定位和检索存储的信息。菲莫公司的 IQOS (型号: 3.0 Multi) DS2780 芯片的内存空间为 256 字节, 其 EEPROM 内存可用于储存 HTPs 烟具模型参数、应用程序操作参数和用户信息。当相对剩余有效容量超过设定边界值 4% 时, 自动触发保护设备。累积电流寄存器和时间标量寄存器会自动保存到 EEPROM, 防止超过 4% 的充电或放电数据丢失。用户信息拥有永久内存 16 字节, 用于储存电池和 BMS 的流水代码、日期、诊断信息、电池尺寸、充放电参数、辅助模型数据等, 且一旦锁定, 不允许写操作。在信息存储方面, 国内外 HTPs 烟具普遍使用的 EEPROM 内存具有很强的耐用性, 特别适用于小容量、高事务、低延迟的 BMS, 但是随着云计算和物联网技术的不断发展, 海量的数据出现标志着大数据时代的来临, 传统的储存方式开始无法满足需求。因此, 以云存储为代表的虚拟储存方法将更好的解决海量 BMS 数据储存和实时调用的难题。

2.7 故障诊断报警

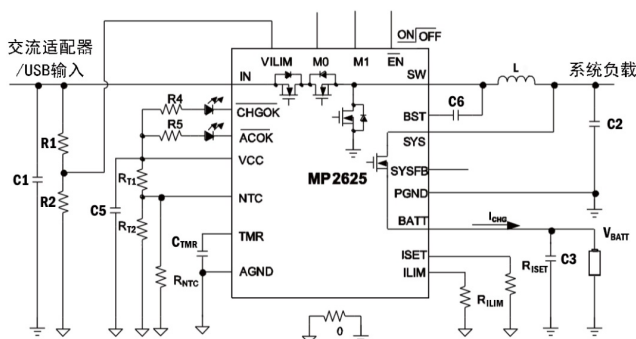
故障诊断用于检测突发故障并提供保护措施, 主要包括过充电检测、过放电检测、过电流检测、电池温度检测、PCB 温度检测、短路检测、断路检测、加热片温度检测和电池兼容性检测等。

过充电检测: 电池充满电后如果继续充电, 易造成电池端压持续增加, 当端压超出电池允许的充电截止电压的一定范围后, 电池温度将急剧上升从而导致烟具损坏甚至燃烧。因此电池充满后需进行过充电保护^[54]。

过放电检测: 烟具搁置时间过长或者放电过于严重均是产生电池过放电的原因。电池过放电通常会导致烟具电池内化学物质反应过于严重, 难以复原, 造成电池寿命严重缩短。为了避免过放电现象对电池寿



a. 菲利浦·莫里斯烟草国际公司的 IQOS (3.0 Multi) 充电 IC



b. 云南中烟公司的 W 产品充电 IC

图 4 BMS 充电 IC 原理图

Fig. 4 Schematic diagram of charging ICs of BMS

命的影响就需要对电池进行过放电检测。

过电流、过温度检测：电池充放电电流超出额定充放电电流一定范围后均会出现过电流现象。过电流现象会造成电路元件损坏，严重的话会造成烟具温度过高甚至燃烧现象；过温度检测是指对烟具内部 PCB 和电池表面等温度进行检测。

短路检测：是过电流检测的一种极限形式，其控制过程和原理同过电流检测一致，短路相当于在电池正负极之间加上一个阻值无限小的电阻，致使保护板的负载电流瞬时达到 10 A 以上，激活短路报警。

加热片温度检测：在 HTPs 烟具中，加热片温度需要恒定在 340 ℃ 左右持续对烟草进行“烘烤”。温度过高会导致烟草烤糊，产生烟味^[55]；温度过低会导致烟雾量减小，影响抽吸体验。

电池兼容性检测：电池必须保持容量、输入输出电流电压、芯片等严格符合 HTPs 烟具的要求规格，否则会导致 HTPs 烟具寿命缩短、损坏、不能正常工作甚至出现燃烧爆炸等安全事故。

湖南中烟公司的 P 产品故障诊断报警主要采用 DW01 锂电保护 IC，具体电路原理图如图 5 所示。

过充电检测：正常充电过程中，引脚 3 (OC) 检测到电池电压高于过充电电压 (4.30 ± 0.05) V，且引脚 4 (TD) 检测到延时时间超过规定时间 (80 ms) 时，引脚 3 (OC) 由高电位变为低电位，同时 MOS 管 M2 关断，终止充电。

过放电检测：正常放电过程中，引脚 1 (OD) 检测到电池电压低于过放电电压 (2.40 ± 0.10) V，且引脚 4 (TD) 检测到延时时间超过规定时间 (100 ms) 时，引脚 3 (OC) 由高电位变为低电位，同时 MOS 管 M1 关断，终止放电。

过电流检测与短路检测：电池正常工作过程中，若引脚

2 (CS) 检测到过电流或者短路的情况时，即引脚 2 (CS) 电压高于 (140 ± 30) mV，且引脚 4 (TD) 检测到延时时间超过规定时间 (10 ms) 时，引脚 2 (CS) 由高电位变为低电位，回路关闭，终止工作。目前，BMS 在故障诊断方面已经比较完善，但是仍然有进一步改进的空间，如：电池或驱动漏电后的绝缘检测诊断、电池兼容性检测、电池碰撞挤压后的碰撞检测、硬件发生故障后的硬件功能检测、软件发生故障后的 MCU 运行检测等。

3 存在的问题及展望

BMS 发展至今，已经由起初的监控系统变为了管理系统。目前国内外各大烟草公司在售或在研的 HTPs 烟具主流为电加热型，均拥有自己的 BMS，且各有不同的优势，但已有的 BMS 仍然不够完善。BMS 在以下几个方面还有待完善：

(1) 在电池温度估计方面，目前为止包括英美烟草公司的 glo、菲莫公司的 IQOS、湖南中烟公司的 P 产品以及云南中烟公司的 W 产品在内的国内外各大烟草公司均以空冷、热管冷却、导热材料（相变冷却）3 种方法对电池系统进行散热，主要是考虑到烟具的体积、成本和安全性因素的影响。但是随着相关技术的发展，液冷、热管液冷、新型导热材料（相变冷却）3 种散热结构因其优良的散热效率和散热速度、长久的使用寿命，在未来必将成为 HTPs 烟具电池温度估计新的发展方向。

(2) 在烟具电池 SOC 估计方面，菲莫公司的 IQOS、英美烟草公司的 glo、云南中烟公司的 W 产品、韩国的 lil、四川中烟公司的宽窄功夫等国内外烟草公司均采用开路电压法进行 SOC 估计、LED 灯进行显示的方法。虽然 SOC 估计方法种类很多，但是目前均是采用基于经验的方法，其缺点是基于经验的方法往往需要漫长的经验积累去发现总结规律，若电池相关参数变动则需要重新总结规律，普适性较差，而基于模型和数据拟合的方法只需先建立一个简单粗糙的模型，然后用大量的数据进行填充进而使模型不断契合数据，其优点是基于模型和数据拟合的方法可以省去漫长的经验积累总结规律这一阶段，通过简单的模型和大量的数据节省漫长的研究时间，HTPs 烟具 SOC 估计以后可加大基于模型和数据拟合方法的研究力度，尤其像卡尔曼滤波法、粒子滤波法、神经网络法及模糊控制法。

(3) 在电池 SOH 估计方面，目前为止，国内外 HTPs 烟具（包括菲莫公司的 IQOS 等国内外各大企业）

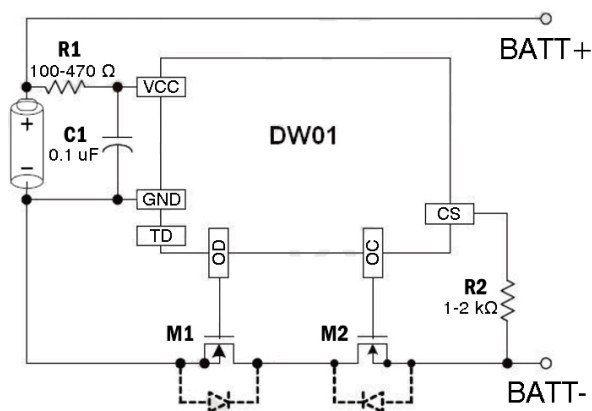


图 5 DW01 锂电保护 IC 电路原理图

Fig. 5 Schematic circuit diagram of protecting IC by DW01 lithium battery

尚无产品具有 SOH 估计功能,但在手机行业和汽车行业已有应用,如电池最大容量低于 80% 需更换电池、电池温度过高,电池过充、过放导致的隐患及其隐患的排除方式等。HTPs 烟具 SOH 估计功能关系到电池全寿命周期预测。电池的 SOH 受温度、充放电倍率、放电深度、循环区间、截止电压等多种因素影响。目前电池 SOH 的研究和建模分析虽有一定成果,但仍处于定性研究阶段。因此,未来 SOH 估计将会成为 HTPs 烟具的一个研究方向。

(4) 在 SOF、SOE 估计方面,菲莫公司的 IQOS 和云南中烟公司的 W 产品通过检测电池充放电过程中的电流、电压、时间及其电芯温度进行 SOC 估计。通过 SOC 和电芯温度的相关函数计算得到电池特性参数 (SOF 估计)。目前,菲莫公司的 IQOS 和云南中烟公司的 W 产品的 SOE 估计方法均为: 额定能量 ($W \cdot h$) = 额定容量 ($A \cdot h$) $\times$ 额定电压 (V)。随着 HTPs 烟具的逐渐发展, BMS 也将进行升级换代。下一代 HTPs 烟具 BMS 将不只是优化硬件系统的性能,而更为注重 SOF、SOE 估计软件系统的研发。近几年来尽管离线系统的机理模型研究、状态估计研究等方面取得了不错的进展,但在线系统应用方面仍有很大的研究空间。

(5) 在 IBS 参数检测方面,以菲莫公司的 IQOS 为代表的公司基本都在使用由半导体、电介质、磁性材料等固体元件构成的集成传感器。这类传感器成本低、可靠性高、性能好、接口灵活,但是缺乏自诊断功能、记忆功能、多参量测试功能和物联网功能,因此,微小型化、智能化、多功能化和网络化是今后 HTPs 烟具 IBS 参数检测的发展方向;在信息存储方面,国内外 HTPs 烟具普遍使用的 EEPROM 内存具有很强的耐用性,特别适用于小容量、高事务、低延迟的 BMS,但是随着云计算和物联网技术的不断发展,海量的数据出现标志着大数据时代的来临,传统的储存方式有些无法满足需求,因此,以云存储为代表的虚拟储存方法将更好的解决 HTPs 烟具 BMS 海量数据储存和实时调用的难题。

(6) 在电池故障诊断方面,湖南中烟公司的 P 产品和韩国的 lil 通过锂电保护 IC 对电池过充电、过放电、过电流 (短路)、过温度、电芯反接等故障进行诊断,通过 LED 灯闪烁和偏心电机振动提示故障问题。目前,HTPs 烟具 BMS 在故障诊断方面已经比较完善,但是仍然有进一步改进的空间,如: 电池或驱动漏电后的绝缘检测诊断、电池兼容性检测、电池碰撞挤压后的碰撞检测、硬件发生故障后的硬件功

能检测、软件发生故障后的 MCU 运行检测等。

参考文献

- [1] 刘亚丽,王金棒,郑新章,等. 加热不燃烧烟草制品发展现状及展望 [J]. 中国烟草学报, 2018, 24(4): 91-106.
LIU Yali, WANG Jinbang, ZHENG Xinzhang, et al. Current status and prospect of heat-not-burn tobacco products[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(4): 91-106.
- [2] 周慧明, 华青, 刘广超, 等. 加热非燃烧状态下烟草制品的 TSNA 释放规律 [J]. 中国烟草科学, 2019, 40(1): 82-88.
ZHOU Huiming, HUA Qing, LIU Guangchao, et al. TSNA's release of heat-not-burn tobacco materials[J]. Chinese Tobacco Science, 2019, 40(1): 82-88.
- [3] 张洪非, 姜兴益, 庞永强, 等. 两种抽吸模式下加热不燃烧卷烟主流烟气释放物分析 [J]. 烟草科技, 2018, 51(9): 40-48.
ZHANG Hongfei, JIANG Xingyi, PANG Yongqiang, et al. Analysis of mainstream aerosol emissions of heat-not-burn tobacco products under two puffing regimes[J]. Tobacco Science & Technology, 2018, 51(9): 40-48.
- [4] 张达敏, 林辉品, 林智勇, 等. 基于神经网络预测控制的节能电梯能量管理 [J]. 仪器仪表学报, 2017(12): 3137-3142.
ZHANG Damin, LIN Huipin, LIN Zhiyong, et al. Energy management of energy-saving elevator based on neural network predictive control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017(12): 3137-3142.
- [5] 张新丰, 杨殿阁, 薛雯, 等. 车载电源管理系统设计 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 209-214.
ZHANG Xinfeng, YANG Diange, XUE Wen, et al. Automotive electrical power management system design[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 209-214.
- [6] 杨继, 赵伟, 杨柳, 等. "Eclipse" 卷烟的热重 / 差热分析 [J]. 化学研究与应用, 2015(5): 560-565.
YANG Ji, ZHAO Wei, YANG Liu, et al. Investigation of 'Eclipse' cigarette by thermogravimetry/differential thermal analyzer[J]. Chemical Research and Application, 2015(5): 560-565.
- [7] 潘靖. 锂电池智能管理系统 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
PAN Jing. Lithium battery intelligent management system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [8] Schorp M K, Tricker A R, Dempsey R. Reduced exposure evaluation of an electrically heated cigarette smoking system. Part 1: Non-clinical and clinical insights[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2012, 64(S2): 1-10.
- [9] 菲利普·莫里斯生产公司. 用于控制电加热器以限制温度的装置及方法: 中国, 105027016B[P]. 2017-03-08.
Philip Morris Manufacturing Company. Devices and methods for controlling heaters to limit temperature: CN105027016B[P]. 2017-03-08.
- [10] Mcgrath T E, Brown A P, Meruva N K, et al. Phenolic compound formation from the low temperature pyrolysis of tobacco[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2009, 84(2): 170-178.
- [11] 金鑫. 新型烟草制品发展状态及预测 [J]. 中国市场, 2019(12): 59-60.
JIN Xin. Development status and forecast of new tobacco products[J]. China Market, 2019(12): 59-60.
- [12] 陈超英. 变革与挑战: 新型烟草制品发展展望 [J]. 中国烟草学报, 2017, 23(3): 14-18.
CHEN Chaoying. Change and challenge: outlook for development of new tobacco products[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2017, 23(3): 14-18.
- [13] Ludicke F, Haziza C, Weitkunat R, et al. Evaluation of biomarkers of exposure in smokers switching to a carbon-heated tobacco

- product: A controlled, randomized, open-label 5-day exposure study[J]. *Nicotine & Tobacco Research*, 2016, 18(7): 1606-1613.
- [14] 李哲, 韩雪冰, 卢兰光, 等. 动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(18): 115-120.
LI Zhe, HAN Xuebing, LU Languang, et al. Temperature characteristics of power LiFePO₄ batteries[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(18): 115-120.
- [15] Kang B, Ceder G. Battery materials for ultrafast charging and discharging[J]. *Nature*, 2009, 458(3): 190-193.
- [16] Fulton T A, Dolan G J. Observation of single-electron charging effects in small tunnel junctions[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 59(1): 109-112.
- [17] Lambin E F. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions[J]. *Progress in Physical Geography*, 1997, 21(3): 375-393.
- [18] 胡广侠, 解晶莹. 影响锂离子电池安全性的因素[J]. *电化学*, 2002, 8(3): 245-251.
HU Guangxia, XIE Jingying. Some consideration for lithium-ion cells' safety[J]. *Electrochemistry*, 2002, 8(3): 245-251.
- [19] Azuatalam D, Paridari K, Ma Y, et al. Energy management of small-scale PV-battery systems: A systematic review considering practical implementation, computational requirements, quality of input data and battery degradation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 112(10): 555-570.
- [20] Kim K S, Won M H, Kim J W, et al. Heat pipe cooling technology for desktop PC CPU[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(9): 1137-1144.
- [21] Sun L, Rainer B. Membrane phase transition during heating and cooling: molecular insight into reversible melting[J]. *European Biophysics Journal*, 2018, 47(2): 151-164.
- [22] Aylor J H, Thieme A, Johnso B W. A battery state-of-charge indicator for electric wheelchairs[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1992, 39(5): 398-409.
- [23] Xing Y, He W, Pecht M, et al. State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures[J]. *Applied Energy*, 2014, 113(1): 106-115.
- [24] Dang X J, Yan L, Xu K, et al. Open-circuit voltage-based state of charge estimation of lithium-ion battery using dual neural network fusion battery model[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 188: 356-366.
- [25] Nuhic A, Terzimehic T, Soczkaguth T, et al. Health diagnosis and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries using data-driven methods[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 239: 680-688.
- [26] Bizeray A M, Zhao S, Duncan S R, et al. Lithium-ion battery thermal-electrochemical model-based state estimation using orthogonal collocation and a modified extended Kalman filter[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 296: 400-412.
- [27] 庞辉, 张旭. 一种基于简化电化学模型的锂电池互联状态观测器[J]. *物理学报*, 2018, 67(22): 411-421.
PANG Hui, ZHANG Xu. An interconnected state observer for lithium-ion battery based on reduced electrochemical model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(22): 411-421.
- [28] Newman J, Thomas K E, Hafezi H, et al. Modeling of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 119: 838-843.
- [29] Skoog S, David S. Parameterization of linear equivalent circuit models over wide temperature and SOC spans for automotive lithium-ion cells using electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Journal of Energy Storage*, 2017, 14: 39-48.
- [30] 贾玉健, 解大, 顾羽洁, 等. 电动汽车电池等效电路模型的分类和特点[J]. *电力与能源*, 2011, 32(6): 516-521.
JIA Yujian, XIE Da, GU Yujie, et al. Classification and characteristics of equivalent circuit models for EV's battery[J]. *Power & Energy*, 2011, 32(6): 516-521.
- [31] HU X, LI S, PENG H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 198: 359-367.
- [32] Liaw B Y, Nagasubramanian G, Jungst R G, et al. Modeling of lithium ion cells—A simple equivalent-circuit model approach[J]. *Solid State Ionics*, 2004, 175(1): 835-839.
- [33] 牛利勇, 时玮, 姜久春, 等. 纯电动汽车用磷酸铁锂电池的模型参数分析[J]. *汽车工程*, 2013, 35(2): 127-132.
NIU Liyong, SHI Wei, JIANG Jiuchun, et al. Model parameters analysis of lithium iron phosphate battery for electric vehicle[J]. *Automotive Engineering*, 2013, 35(2): 127-132.
- [34] Andre D, Meiler M, Steiner K, et al. Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy (I): Experimental investigation[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(12): 5334-5341.
- [35] 张文华, 吴三毛, 刘平, 等. C/LiFePO₄ 动力电池电化学交流阻抗谱的研究[J]. *电源技术*, 2015, 39(9): 1838-1842.
ZHANG Wenhua, WU Sanmao, LIU Ping, et al. Study on EIS of C/LiFePO₄ power battery[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2015, 39(9): 1838-1842.
- [36] Plett G L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs (Part 1): Background[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 134(2): 252-261.
- [37] 李军, 邹发明, 涂雄, 等. 基于模糊控制策略的 PHEV 仿真研究[J]. *重庆交通大学学报 (自然科学版)*, 2013, 32(2): 329-334.
LI Jun, ZOU Faming, TU Xiong, et al. Simulation research on PHEV based on fuzzy logic control strategies[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*[J]. 2013, 32(2): 329-334.
- [38] Kim I S. The novel state of charge estimation method for lithium battery using sliding mode observer[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 163(1): 584-590.
- [39] 邓佳敏, 邹金慧, 郑绪东, 等. 低温卷烟加热装置电源能效管控系统[J]. *信息技术*, 2019, 43(9): 34-38.
DENG Jiamin, ZOU Jinhui, ZHENG Xudong, et al. Energy efficiency management and control system of low temperature cigarette heating device[J]. *Information Technology*, 2019, 43(9): 34-38.
- [40] Long H, Zhu C, Huang B, et al. Model parameters online identification and SOC joint estimation for lithium-ion battery based on a composite algorithm[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2019, 14(4): 1485-1493.
- [41] Meng J, Cai L, Luo G, et al. Lithium-ion battery state of health estimation with short-term current pulse test and support vector machine[J]. *Microelectronics Reliability*, 2018, 88: 1216-1220.
- [42] Anton J C A, Nieto P J G, Juze F J D C, et al. Battery state-of-charge estimator using the SVM technique[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(8): 3798-3805.
- [43] Fleischer C, Waag W, Bai Z, et al. On-line self-learning time forward voltage prognosis for lithium-ion batteries using adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 243: 728-749.
- [44] Gholizadeh M, Salmasi F R. Estimation of state of charge, unknown nonlinearities, and state of health of a lithium-ion battery based on

- a comprehensive unobservable model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1335-1344.
- [45] Coleman M, Hurley W G, Lee C K. An improved battery characterization method using a two-pulse load test[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 708-713.
- [46] Andre D, Nuhic A, Soczkaguth T, et al. Comparative study of a structured neural network and an extended Kalman filter for state of health determination of lithium-ion batteries in hybrid electricvehicles[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(3): 951-961.
- [47] Andre D, Appel C, Soczka-Guth T, et al. Advanced mathematical methods of SOC and SOH estimation for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2013, 224: 20-27.
- [48] Hu C, Youn B D, Chung J. A multiscale framework with extended Kalman filter for lithium-ion battery SOC and capacity estimation[J]. Applied Energy, 2012, 92: 694-704.
- [49] Xing Y, Ma E W M, Tsui K L, et al. An ensemble model for predicting the remaining useful performance of lithium-ion batteries[J]. Microelectronics Reliability, 2013, 53(6): 811-820.
- [50] Zheng J, Chen J, Ouyang Q. Variable universe fuzzy control for battery equalization[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2018, 31(1): 325-342.
- [51] Kim I S. A technique for estimating the state of health of lithium batteries through a dual-sliding-mode observer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(4): 1013-1022.
- [52] 赖国书. 基于自回归求和滑动平均模型的居民区电动汽车负载特性分析 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 176-182.
- LAI Guoshu. Analysis on load characteristics of electric vehicles in residential areas based on auto regressive integrated moving average model[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 176-182.
- [53] 罗玲, 宋文吉, 林仕立, 等. 电池 SOE 估算法及在电动汽车工况下的应用 [J]. 电池, 2016, 46(1): 31-34.
- LUO Ling, SONG Wenji, LIN Shili, et al. SOE estimation method and its application in electric vehicle condition[J]. Battery Bimonthly, 2016, 46(1): 31-34.
- [54] 丁冠军, 丁明, 汤广福, 等. 新型多电平 VSC 子模块电容参数与均压策略 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 1-6.
- DING Guanjun, DING Ming, TANG Guangfu, et al. Submodule capacitance parameter and voltage balancing scheme of a new multilevel VSC modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 1-6.
- [55] 洪群业, 郑路, 程多福, 等. 国内加热不燃烧型卷烟专利技术统计分析 [J]. 烟草科技, 2017, 50(11): 66-74.
- HONG Qunye, ZHENG Lu, CHENG Duofu, et al. Statistical analysis of patents related to heat-not-burn cigarette in China[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(11): 66-74.

Battery management system (BMS) for heated tobacco products (HTPs): a review

DENG Jiamin¹, ZOU Jinhui¹, ZHENG Xudong², LI Zhiqiang², TANG Jianguo²

¹ College of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China;

² Technology Center of China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Kunming 650202, China

Abstract: As the most promising product in the field of new tobacco products, heated tobacco products (HTPs) represented by IQOS are developing rapidly. In order to further promote the research and development of HTPs products of domestic enterprises, this paper analyzes the design schemes and functional parameters of the existing tobacco battery management systems (BMS) of some tobacco companies at home and abroad. Moreover, this paper reviews the general framework of BMS, battery temperature estimation methods, SOC (State of charge) estimation methods, SOH (State of health) estimation methods, SOF (State of function) estimation methods, SOE (State of energy) estimation methods, IBS (Intelligent battery sensor) parameter detection and information storage, theoretical research and technical points in fault diagnosis and alarm, summarizes the existing BMS research difficulties, and put forward development suggestions based on problems in theoretical research.

Keywords: heated tobacco product; battery management system; smoking-set; lithium-ion battery; design scheme; functional parameter

*Corresponding author. Email: 553723956@qq.com