

基于赛博链的云端动力电池管理

刘琦¹ 杨璐华² 王文涛³ 杨世春³ 刘新华³

(1.北京航空航天大学航空科学与工程学院,北京 100191;2.北京航空航天大学沈元学院,北京 100191;
3.北京航空航天大学交通科学与工程学院,北京 100191)

【欢迎引用】刘琦,杨璐华,王文涛,等.基于赛博链的云端动力电池管理[J].汽车文摘,2024(11):42-52.

【Cite this paper】LIU Q, YANG L H, WANG W T, et al. Cloud Management of Power Batteries Based on CHAIN[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(11): 42-52.

【摘要】电池管理系统有助于保持汽车动力电池的安全和优良特性,实现状态估计、单体均衡、热管理和故障诊断重要功能。传统的车载设备已不能满足先进电池管理系统对算力、通信的需求,提出基于赛博链(CHAIN)的云端电池管理系统,通过“端、边、云、智”模式实现车云协同,利用分布式计算架构解决算力问题,可以提供基础设施服务(IaaS)、开发平台服务(PaaS)、软件应用服务(SaaS)、数据资源服务(DaaS)4种服务类型。最后总结了该系统可能面临的技术挑战,并展望了其广泛的应用场景。

关键词:赛博链;电池管理系统;电池模型;车云协同;边缘计算

中图分类号:U469.72 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20220187

Cloud Management of Power Batteries Based on Cyber CHAIN

Liu Qi¹, Yang Luhua², Wang Wentao³, Yang Shichun³, Liu Xinhua³

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191; 2. Shen Yuan College, Beihang University, Beijing 100191; 3. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

【Abstract】Battery management system is conducive to maintaining excellent performances and safety of the vehicle power batteries, which is able to conduct functions of state estimation, energy equalization, thermal management and fault diagnosis. However, the traditional vehicle-end facility cannot meet the demands on hash rate and communication for advanced BMS. This paper proposes a cloud battery management system based on CHAIN (Cyber Hierarchy And Interactional Network), which can realize vehicle-cloud cooperation through End-Edge-Cloud-Intelligence mode and solve the problems of hash rate in distributed computation framework. It has the ability to provide different service delivery modes, including Infrastructure as a Service (IaaS), Platform as a Service (PaaS), Software as a Service (SaaS) and Data as a Service (DaaS). At last, several technical challenges and issues are concluded and an outlook on the multi-scenario applications of CHAIN is presented.

Key words: CHAIN, Battery management system, Battery model, Vehicle-cloud cooperation, Edge computing

0 引言

相较于在交通运输中直接使用化石能源,以动力电池为载体的新型能源应用型式可以在推进绿色能源应用、降低碳排放、化解能源危机等方面发挥关键作用。锂离子电池是现阶段电动汽车中应用最广泛的电池类型。与传统铅酸电池相比,锂离子电池具有

能量密度高、无记忆效应、循环寿命长的显著优势。然而,在使用与储存过程中,锂离子电池可靠性相对较低,容易发生短路或气体泄漏,从而引发热失控,限制了其进一步广泛应用^[1-3]。因此,通过智能高效的电池管理系统(Battery Management System, BMS)实现对电池全生命周期管理十分重要。电池管理技术主要经历了3代,即无管理(仅监测电池端电压进行充放电

*基金项目:国家自然科学基金项目(52102470)。

控制)、简单管理(仅监测电池组外部参数)和高级管理(实现对电池系统动态监控)^[4]。随着传感器、5G网络、大数据技术的发展,电池管理技术也更加先进。一般认为先进电池管理系统具有电池建模、参数识别、状态估计、热管理、电池均衡、充电控制和故障诊断功能。然而传统的机载电池管理系计算能力有限,难以实现大规模数据处理,因此难以对电池的复杂状态进行实时管理。分布式计算(如云计算和边缘计算)可以解决车载端算力不足的问题^[5]。杨世春等^[6]提出下一代电池管理系统的先进框架——赛博链(Cyber Hierarchy And Interactional Network, Cyber CHAIN),采用“端、边、云、智”层次结构,可为客户(如电动汽车使用者、公司)提供定制化服务。

赛博链中,车载先进传感器采集不同尺度车辆数据,包括电池状态和驾驶模式。然后将数据发送到处理环节,由分布式计算系统(包括边缘计算和云计算)对数据进行处理^[7]。从大量数据中可以获得电池系统多尺度模型参数,为电池多状态(State of X, SOX)估计、热管理和故障诊断奠定基础。本文旨在分析赛博链框架关键组成部分及其技术挑战,并对其未来发展进行展望。

1 BMS主要功能与实现方法

1.1 基于电池模型的BMS工作原理

电池模型可以比较准确地建立外部检测量与电池内部状态的映射关系,根据所研究尺度大小,可以分别在分子层级、形态学层级、电池层级、电池系统层级和生产装配层级建立多尺度数学模型^[8]。从微观到宏观的多尺度模型提供描述电池全生命周期的完整框架,对电池循环利用和迭代更新起到指导性作用。在电池层级方面,目前应用较为广泛的是电化学模型(主要包括单粒子模型、准二维模型)、黑盒模型和等效电路模型^[9]。电化学模型属于基于物理的白盒模型,其显著特征是计算量巨大,而黑盒模型则因其易于结合大数据作数据驱动运算而受到广泛研究和快速发展,等效电路模型则是介于两者之间的灰盒模型,兼有上述2方面的特征。

准确估计模型参数是确保模型有效性的关键。不同类型参数获取方式不同,一种方法为直接进行多尺度观测,通过原位或异位的传感测量手段,可以得到电池的电极厚度和内阻信息^[10]。另一种方法是基于梯度下降算法或者遗传算法等方法对模型进行拟合得到目标参数,具体又可分为在线测量和离线测

量,前者计算量较小但准确性不够,而后者计算量大但准确度较高。

基于合适的电池模型,能够对电池现有状态做出定量估计,并利用电池特征和状态参数实现BMS对动力电池的控制和管理。GB/T 38661—2020《电动汽车用电池管理系统技术条件》规定,电动汽车电池管理系统基本功能主要包括:监测或获取电池数据、故障诊断、故障信息记录及处理、自检与预警、与其他控制器信息交互、实时通信、绝缘电阻监控、充放电高压互锁监控、过充放电/过流/过温保护和电池荷电状态(State of Charge, SOC)估算^[11-12]。BMS的核心功能主要包括状态估计、单体均衡、热管理和故障诊断,以下将介绍各功能含义与核心算法^[13]。

1.2 实现BMS功能的核心方法

BMS的4项功能如表1所示,下面将详细介绍各功能特点。

1.2.1 状态估计

状态估计是BMS实现各项功能的基础。针对不同场景不同需求,状态估计包括SOC、健康状态(State of Health, SOH)、功率状态(State of Power, SOP)、能量状态(State of Energy, SOE)、功能状态(State of Function, SOF)、剩余寿命(Remaining Useful Life, RUL)。其中, SOC最为关键且相关研究最为充分,目前已发展出多种SOC测量方法,如安时积分法、基于模型的智能算法、数据驱动法,其余指标也均有相应估计策略。工程上经常对2个或2个以上指标进行联合估计,例如利用卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)或改进型无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)、联合利用人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)和双卡尔曼滤波(Dual Extended Kalman Filter, DEKF)或粒子滤波器实施对SOC和SOH的联合估计并保证较高精度^[14-17]。文献[18]提出了基于伪随机二进制序列(Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS)和DEKF的SOC和SOP联合估计;文献[19]则基于二阶RC等效电路模型和UKF算法估计SOC,并在此基础上结合多约束条件对SOP进行联合估计。表1中列举了国内外一些学者提出的状态估计方法。

1.2.2 单体均衡

电池系统不断充放电的循环中,电池性能衰减会导致其内阻、SOC等一系列参数呈现出不一致的特征^[66]。电池间参数严重失衡会导致系统性能衰减加速和供电系统可用性降低,因而保持系统内各个单体电池均衡具有重要意义。单体均衡有耗散式和非耗

表1 BMS功能实现方法

| 功能名称 | 具体分类 | 实现方法 | |
|------|------|----------|--|
| 状态估计 | 状态类型 | SOC | FFMILS-MIUKF ^[20] , 随机森林回归 ^[21] , GA-DKF ^[22] |
| | | SOH | 主成分分析与WOA-Elman ^[23] , 特征优化+随机森林算法 ^[24] |
| | | SOP | Dual EKF ^[25] , DSRUKF ^[26] , MELM ^[27] , LPV-MPC ^[28] |
| | | SOE | Sage-Husa EKF ^[29] , 高斯模型+CDKF ^[30] , EPF(SOP联合) ^[31] |
| | | SOF | EKF+带遗忘因子RLS(SOC联合) ^[32] , 模糊逻辑算法 ^[33] |
| | | RUL | DBN+粒子滤波推理算法(SOH联合) ^[34] , GRU-MC ^[35] , LS-FDP ^[36] , 改进ELM ^[37] , LSTM递归神经网络 ^[38] |
| 单体均衡 | 均衡变量 | 电池电压 | 电池单体/电池包主被动融合控制 ^[39-40] |
| | | 电池电压+SOC | Buck-Boost准谐振电路+自适应分组均衡 ^[41] , Cuk电路+FLC ^[42] |
| | | SOC | 改进可重构均衡电路 ^[43] , 主被动融合策略 ^[44] , 太阳能辅助均衡 ^[45] , Buck-Boost+反激式变压器 ^[46] , 两级均衡+MPC ^[47] |
| | | 电池容量 | 双向DC/DC变换器及开关阵列主动均衡+聚类分析(串联电池组) ^[48] |
| 热管理 | 控温方式 | 风冷/液冷式 | 风冷 ^[49] , 液冷 ^[50] , 分区流量液冷+集成PTC热敏电阻 ^[51] , 间接液冷 ^[52] |
| | | 热管式 | 往复式循环液冷与平面热管结合 ^[53] , 微通道耦合微热管式BTMS ^[54] |
| | | 相变材料式 | 柔性相变材料 ^[55] , 过冷相变材料热开关 ^[56] , 沸腾传热 ^[57] , 铜金属泡沫-烷烃复合材料 ^[58] |
| 故障诊断 | 故障类型 | 不一致性 | 基于离群点检测: 3σ MSS/LOF/COF; 基于信息熵分析: 近似熵/样本熵/模糊熵/改进熵/新颖熵算法 ^[59] |
| | | 短路/热失控 | RC模型+“平差”原理 ^[60] , 基于状态表示的数据驱动方法 ^[61] , 基于电池电压差ISC在线诊断 ^[62] , 基于增量容量曲线的ISC诊断 ^[63] |
| | | 传感器/连接组件 | 基于ICC的电压异常分析 ^[64] , 基于DEKF的分布式诊断 ^[65] |

散式2种模式,其中前者更常用于小型电池组。单体均衡算法的被平衡目标参数一般是电池电压(常针对铅酸电池)、SOC或电池容量,基于电池容量的平衡算法能更充分地利用系统内单体电池的剩余容量^[13,67]。表1中列举了一些单体均衡的方法和案例。

1.2.3 热管理

单体电池和电池系统温度分布是影响电池性能的关键因素,电池温度过高容易直接引发火灾事故,而电池温度过低可能毁坏电池内部结构造成严重后果(例如低温时充电可能加速锂枝晶的生成,从而刺穿分隔层造成短路),因此动力电池的热管理相应地分为2个方面^[66]。一是不能让电池温度过高,由此发展出了多种办法,如风冷、液冷、相变材料(Phase Change Material, PCM)冷却、热管冷却;二是避免电池温度过低,电池加热技术可分为表面加热和内部加热^[13,68]。表面加热和冷却的原理类似,在表面向电池提供热量,而内部加热常利用电流热效应,是更加均匀高效的加热方法。对于BMS而言,电池系统的热管理需要在能耗和温度调节效果之间取得平衡^[69]。对此学界已有多项研究,相关成果见表1。

1.2.4 故障诊断

及时准确地对电路进行故障诊断、确保行车安全是BMS的重要任务。电池故障可分为由性能衰减缓

慢造成和由突发事故突然造成2种类型。突发事故包括多种因素,如机械触发、热触发、电路触发^[13]。从故障发生位置分类,故障可能发生在单体电池、传感器、执行器和热管理系统^[70]。因为故障类型繁多(如不一致性、短路、热失控、传感器和连接组件故障),且故障类型往往相互耦合,所以故障诊断是一项挑战性工作^[71]。Hong等^[72]提出了利用长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM),并基于电压异常状态提出了电池系统故障预测方法,首次将LSTM应用于电压预测和故障预测。陈岚等^[73]将贝叶斯网络应用于电池管理系统故障诊断,结果具有较高的区间正确率。更多故障诊断方法如表1所示。

1.3 BMS技术瓶颈与发展趋势

随着人工智能、大数据、物联网等新兴技术的不断发展,BMS功能将会在智能化、模块化、云端化的助力下得到全面提升,BMS有效性、安全性、通用性得到加强。但是,不同技术的融合发展不可避免地遇到新理论或技术瓶颈,问题和相应解决方案总结如下。

1.3.1 端侧算力问题

搜集更详细的电池信息、利用更细致复杂的电池模型和智能算法有助于BMS进行更加准确的状态估计,从而更好地实现基于状态估计的其他功能。目前较为主流的BMS均采用车载端计算,而车载端侧的设

备已不能满足BMS快速增长的算力需求。较为主流的解决方案是通过车云协同来减轻车载端侧计算负载,借助数据传输技术,通过云端和车载端的分工合作来完成BMS的大规模计算任务^[74-75]。在具体实现方式上,“端、边、云、智”是一种有发展前景的汽车动力电池管理架构^[76]。

1.3.2 实时通信问题

实现分布式计算的前提条件之一是使海量数据得到即时、稳定地传输,要求通信网络具有足够低的延迟和批量处理能力,以满足BMS对于计算速度和算力的要求^[6]。5G、区块链技术在工业领域有广阔的应用前景,有望为BMS提供满足需求的通信链路^[77-78]。

1.3.3 系统安全问题

BMS安全分为信息安全和功能安全2方面,二者相互耦合、共同作用。在功能安全领域已有多种标准,如ISO 26262、SAE J2980、UL 4600,但是这些标准并不能适应现阶段各类BMS快速迭代更新和快速发展需求,因此适当的行业标准和相应的技术更新是保证BMS功能安全的必要条件^[79]。信息安全是基于云的BMS必须要面对的重大问题,数据存储、传输、处理、车云协同、车车协同环节均需防止信息泄露和非法利用。一方面要发展新的加、解密技术以实现更高水平的信息网络安全防护;另一方面信息安全防火墙的全面构建离不开来自政府、行业、企业和产品研发多方面主体共同发力^[80-81]。

2 基于赛博链的云端电池管理系统架构

2.1 多尺度建模

电池模型是实现系统精确预测和最优实时控制的关键。为了全面准确地评估整车电池系统运行状况,需要获取多个层面的详细信息,如分子、形态、电极、电解质、电池、系统、加工制造。通常需要多尺度模型来捕捉电池在不同尺度下的行为^[82]。不同模型之间的参数识别所需计算能力和先进算法可能会有很大差异。车载设备能力有限的情况下,参数精度至关重要。具有大数据处理能力的云计算技术可以作为解决这一计算问题的方案。通过多尺度建模,一方面可以明确电池微观机理与宏观性能的关系,分析复杂的电化学机理和电-热-机械的多因素耦合过程;另一方面,通过开发多尺度云数据模型,实现“材料-电池-材料”全电池寿命闭环循环,为产品设计、开发和制造提供系统迭代指导。

2.2 车云协同框架

为了实现对电池的高效监测和管理,需要对大量电池数据进行采集、传输、存储和分析。这个过程需要强大的算力,而目前车载端难以实现。杨世春等^[6]提出的赛博链,将材料的物理和电化学参数上传到云端共享,实时进行模型计算,实现从原材料到产品的溯源。赛博链基于云平台,建立闭环设计优化系统,通过同步调整参数,预测电池性能并提供优化管理方案。赛博链开发了“端、边、云、智”的车云协同框架,由云到物的框架如图1所示。该框架配合深度学习算法,可以实现传统电池管理系统难以实现的复杂状态监测、估计和优化功能,进而可实现电池的热管理、充电控制、故障诊断功能,提升电池安全性和性能。

2.2.1 端侧

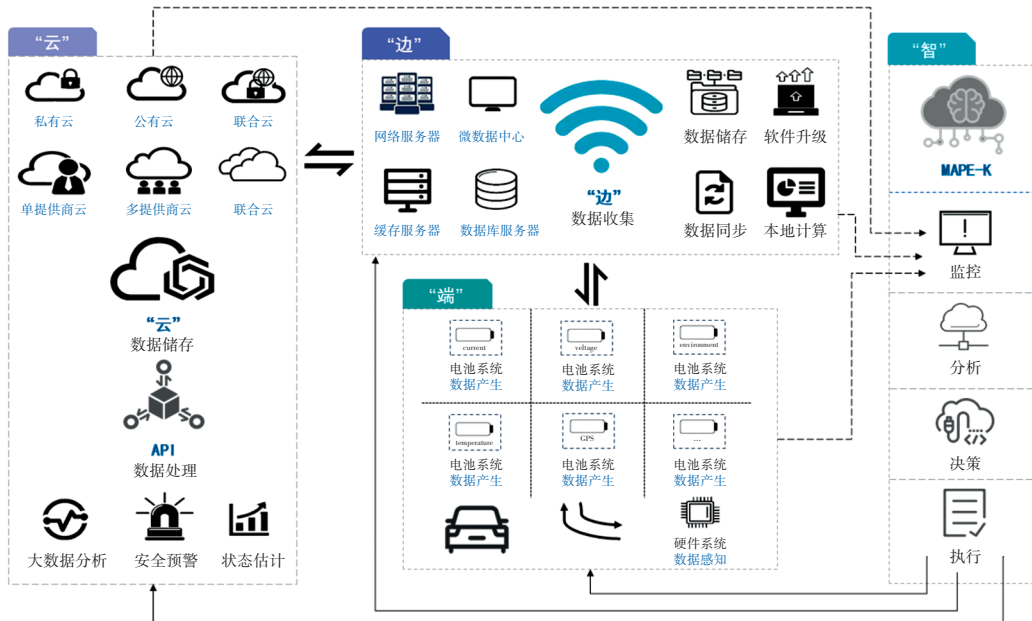
端侧主要负责采集电池数据,通过高实时性算法,完成电池管理系统中基本的热管理功能,保证电池体系正常运转。电池的典型数据包括电池在正常工作状态时的充放电时间、温度、电流、电压、位置和电池的通信地址。准确的电池数据是电池管理系统实现能量均衡、状态估计、热管理和故障诊断功能的基础^[83]。因此,采集数据的准确性和速度对基于赛博链的电池管理系统的性能有很大影响。目前,主要通过装有电压、电流和温度传感器的车载端电池管理系统采集电池数据。

随着传感器技术的不断发展,未来将实现对各种电池数据的高精度采集,嵌入式传感器、压力传感器、气体传感器、声学传感器等新型传感器将提供丰富且准确的电池运行状态新信息,例如电池所承受的机械应力、声阻抗等,显著提高故障诊断准确性,进一步促进电池管理系统发展^[84]。

2.2.2 边缘计算

边缘侧为数据传输的过渡节点,对数据进行过滤处理,上传到云端,也负责部分计算任务^[85]。电池管理系统要实现对电池状态的实时估计,对电池故障进行快速响应,对数据的实时处理尤为重要。虽然云中心提供了巨大的计算能力,但数据传输耗时和网络延迟,响应速度较低。利用边缘节点对数据进行预处理与过滤,可以减少中间数据传输过程,保证数据快速处理,在电池实时监测和状态估计过程中起重要作用^[86-87]。边缘节点由Web服务器、数据库服务器、缓存服务器和微数据中心组成。

边缘计算用于对电池采集到的数据进行预处理和过滤,如数据同步、本地计算、数据更新、数据缓存

图1 赛博链(CHAIN)的车云协同框架^[7]

等^[88]。在边缘节点上进行数据处理,可以大大减少发送到云的数据量,从而降低网络流量负载和云计算中心的能耗^[89-90]。边缘计算的另一个关键功能是对存储在节点中的电池数据进行加密,可以提高数据私密性,保证数据安全性。

2.2.3 云计算

由于边缘设备存储和计算能力有限,一般不可能进行复杂数据处理。而云计算是一种特殊形式的分布式计算,通过引用效用模型来远程提供可伸缩和可测量的资源,具有几乎无限的存储和处理能力,可以实现物联网设备的可扩展性和实时数据分析^[91]。通过深度学习高复杂度、高性能的数据驱动算法,将计算结果下发到边缘侧,边缘侧再通知端侧,或者直接下发端侧。云连接的电池管理系统可以实现多种功能,主要包括状态估计、寿命预测、热管理和安全预警。基于云的电池管理系统可以设置各种应用程序接口(Application Programming Interface, API)与Python等语言连接,实现功能升级。

云计算有多种分类方法。按所有权分为私有云、公有云和混合云;按提供商分为单一提供商、多提供商。云计算比边缘计算费用更低、更安全,是存储电池系统大量历史数据的最佳选择^[92]。

2.2.4 智慧决策

智慧决策无实体,贯穿于整个车云协同,是电池管理系统各种功能的整合和虚拟载体。与传统电池管理系统简单的单侧电池管理不同,基于端边云架构的电池管理系统能更好地获取电池的实时状态,通过

高实时性、高精度算法,实现对电池智慧管理。在实现对电池状态估计过程中,车载端通过电流、电压传感器采集电池的电流、电压数据,并将原始数据上传到边缘侧。边缘侧负责一部分数据的运算任务,并对数据进行预处理,将数据发送到云端。云端通过高精度算法对数据进行处理,得到电池SOC、SOH参数,做出相应决策,并将决策结果下发至边缘侧与端侧。端侧做出反应,例如调节电池的电压、电流,实现对电池状态估计与管理。这种被称为监控-分析-计划-执行(MAPE-K)循环的控制模式被认为是自动化和自适应控制中最有前景的路径之一^[93-94]。

2.3 多服务模式

目前,不同电池厂商开发的电池管理系统基本上都是独立、自主和分散的系统,导致多个传感器收集的大量数据利用效率低下。为了彻底解决该问题,赛博链框架提供了集基础设施、软件平台、应用和数据资源于一体的分层综合服务。图2所示为赛博链多服务模式,具体包括基础设施服务(Infrastructure as a Service, IaaS)、开发平台服务(Platform as a Service, PaaS)、软件应用服务(Software as a Service, SaaS)和数据资源服务(Data as a Service, DaaS)。

2.3.1 基础设施服务(IaaS)

IaaS提供有关计算、存储、安全和其他基础设施服务,让客户能够控制操作系统,供用户开发定制化电池管理系统,以满足特定应用需求,允许用户对资源进行分配控制,同时接管系统维护的职责^[88]。

IaaS的基本结构是数据资源池,可以在数据池中

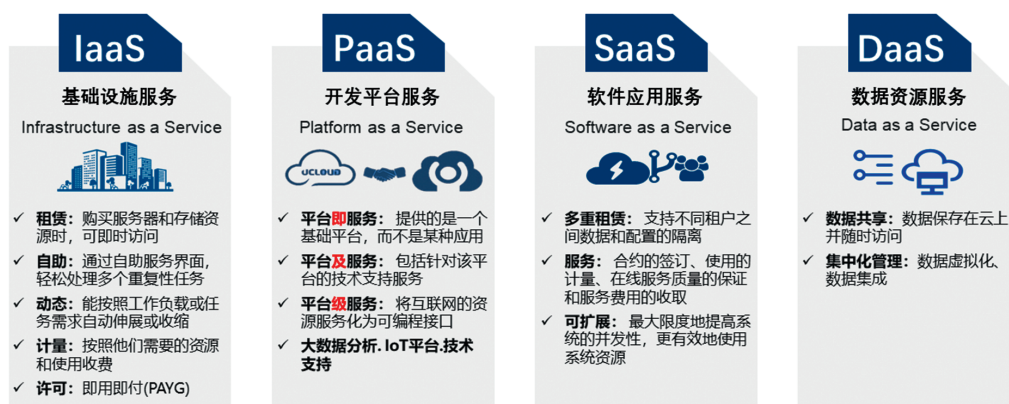


图2 赛博链(Cyber CHAIN)多服务模式

当前数据和历史数据库的支持下数据进行数据融合、数据迭代和边缘计算。通过5G和其他通信技术定期将传感器采集到的电池多尺度数据上传到赛博链平台,实现数据资源池的更新迭代。可扩展和可定制的IaaS也可以支持“随走随付”模式,从而节约使用费用。然而,IaaS也带来了一些潜在的安全风险^[95]。

任何非法访问敏感资料或操纵数据库的行为都可能造成重大财产损失,甚至严重事故。因此,安全是云计算技术的关键问题,尤其是作为其他服务层基础的IaaS^[6]。

2.3.2 开发平台服务(PaaS)

PaaS可以为用户提供随时可用的环境以运行软件或其他应用程序。便于用户在电池管理系统设计过程中调用所需功能,提供大数据分析、物联网平台、决策树算法驱动的人工智能平台、逻辑回归、强化学习模块化服务,使车辆电子设备和高级控制服务之间的连接成为可能^[96]。

PaaS模型允许不同企业用户协同开发应用程序,平台可以将不同品牌车辆的数据集成在一起进行统一分析,扩大可访问数据范围,为智能算法提供大量训练数据,提高算法性能^[97]。

2.3.3 软件应用服务(SaaS)

SaaS允许潜在用户在任何时间、任何地点、任何设备经过授权访问,建立电池多尺度模型,直接为企业用户提供软件应用服务。安全性是SaaS不可忽视的问题。权限层用户的认证和API网关是SaaS的关键,任何错误都可能导致对云服务器的错误访问或非法访问,从而导致BMS决策错误或隐私信息泄露。

2.3.4 数据资源服务(DaaS)

DaaS将传感器采集到的车辆电池数据集成存储在云中,以API的形式对数据进行供给、管理和增值处理,为用户提供数据资源服务。例如,电池全生命

周期管理中,基于电池状态数据,进行电池状态的优化管理,实现实时数据同步,提升电池性能,延长电池寿命^[98]。然而,隐私与安全是阻碍DaaS发展的一大挑战,文献[99]中提出了一种实现DaaS服务的隐私感知组合方法,允许指定服务隐私要求和策略,并验证了其组合中涉及服务的兼容性,为解决DaaS隐私问题提供了可行方案。

3 挑战和应用

3.1 现存的挑战

基于赛博链的电池管理系统与生命财产安全密切相关,主要面临传感器精度、精准建模和信息安全相关问题的挑战。

3.1.1 传感器精度

纳米级微材料和宏观性能的感知需要具有高采样精度和精细模型的传感器,以生成多维、多状态、多因素层次数据,这是评估电池系统运行状态的基础,也是诊断某些电池缺陷的基础。而目前车载端传感器采集数据精度不足,缺乏关于高精检测方法和工具的深入研究。

3.1.2 精准建模

精准的电池模型是电池管理系统实现准确预测与安全管理的基石。实时建模时,需要具体分析复杂的电化学机理和电-热-机械多因素耦合过程,以获得电池微观机理与宏观性能映射关系的精确图像。然而,目前还缺乏可实施的模型来精确地模拟和理解电化学反应过程。

3.1.3 信息安全

赛博链的“端、边、云、智”BMS框架中,每个步骤都涉及到大量数据传输与计算处理,存在信息安全风险。由于智能车载系统的复杂性和产品的不断迭代,目前缺乏一套普遍认可的信息安全标准和法规。赛

博链必然需要面对各种信息安全风险带来的更加严峻的考验和艰巨的挑战。

3.2 扩展应用场景

基于赛博链的BMS系统可以较好地实现系统各项功能,为用户提供个性化服务。同时,由于动力电池管理领域与其他工业应用场景下需要解决的问题存在共同之处,因此基于赛博链的、更广义的云端管理系统可以超越动力电池管理领域而广泛迁移应用,这是由于其跨平台性好、模块化程度高、计算能力和通信能力强的特点决定的。在现代工业领域,众多应用场景都具有多尺度结构特征且适于建立数字孪生模型,主要包括智能材料研发、智能制造支持、智慧医疗应用、智能能源管理、智慧交通协同领域,则基于赛博链的车云协同框架将很好地发挥其功能优势。

4 结束语

本文提出了一种基于赛博链框架的电池全生命周期管理功能。赛博链框架通过对电池数据、人工智能算法和电池多尺度云数据模型集成,可以对产品研发与制造体系进行系统性的优化迭代指导。同时,赛博链框架采集的数据类型涵盖了从电池材料、单体、模组、系统到整车级别,以及从微观到宏观的多尺度信息,而且还包括电池温度、电流、电压数据,电动汽车有望在多种复杂情况下实现全面的精细化监控管理。

赛博链框架独特的分层、交互的“端、边、云、智”BMS框架可以解决车载端算力不足的问题,根据不同应用场景承担不同计算任务,随着下一代通信技术的突破性发展,具有广阔的发展前景。整个系统可以为有不同需求和不同管理权限用户提供个性化服务,包括IaaS、PaaS、SaaS和DaaS服务模型。除此之外,赛博链框架具有广泛兼容性和可移植性,适用于多种应用场景,具有很好的发展前景。然而,基于赛博链的电池管理系统仍面临一些问题和挑战,未来相关技术发展将为解决这些问题提供更多的解决方案。

参考文献

- [1] 王其钰,王朔,张杰男,等. 锂离子电池失效分析概述[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(5): 1008-1025.
- [2] HASIB SHAHID A, ISLAM S, CHAKRABORTTY RIPON K, et al. A Comprehensive Review of Available Battery Datasets, RUL Prediction Approaches, and Advanced Battery Management[J]. IEEE Access, 2021, (99):1-1.
- [3] LU L G, HAN X B, LI J Q, et al. A Review on the Key Issues for Lithium-ion Battery Management in Electric Vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 226(6): 17.
- [4] DAI H, JIANG B, HU X, et al. Advanced Battery Management Strategies for A Sustainable Energy Future: Multilayer Design Concepts and Research Trends[J/OL]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2020-10-29) [2022-07-24]. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110480>.
- [5] HOSSAIN LIPU M S, HANNAN M A, KARIM T F, et al. Intelligent Algorithms and Control Strategies for Battery Management System in Electric Vehicles: Progress, Challenges and Future Outlook[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292(prepublish): 126044.
- [6] YANG S, HE R, ZHANG Z, et al. CHAIN: Cyber Hierarchy and Interactional Network Enabling Digital Solution for Battery Full-Lifespan Management[J]. Matter, 2020, 3(1): 27-41.
- [7] Ma B, Yu H, Yang L, et al. Toward a Function Realization of Multi-scale Modeling for Lithium-ion Battery Based on CHAIN Framework[J]. Rare Metals, 2023, 42(02):368-386.
- [8] 冯刘中, 张雅文, 张舟. 电动汽车BMS系统架构与发展趋势[C]//2021中国汽车工程学会年会论文集(2), 2021: 276-281.
- [9] 卢婷, 杨文强. 锂离子电池全生命周期内评估参数及评估方法综述[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 657-669.
- [10] GAO X L, LIU X H, XIE W L, et al. Multiscale Observation of Li Plating for Lithium-ion Batteries[J/OL]. Rare Metals. (2021-05-15) [2022-07-22]. <https://doi.org/10.1007/s12598-021-01730-3>.
- [11] GB/T 38661-2020, 电动汽车用电池管理系统技术条件[S]. 中国: 国家标准化管理委员会, 2020.
- [12] 王彩娟, 朱相欢, 田宏锦, 等. 解析电动汽车电池管理系统新国标 GB/T 38661-2020[J]. 电池工业, 2021, 25(3): 160-164.
- [13] SHEN M C, GAO Q. A Review on Battery Management System From the Modeling Efforts to Its Multiplications and Integration[J/OL]. International Journal of Energy Research. (2019-04-10) [2022-07-22]. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-review-on-battery-management-system-from-the-to-Shen-Gao/c29d6189d175880697184d331944072fead75854>.
- [14] TOPAN P A, RAMADAN M N, FATHONI G, et al. State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation on Lithium Polymer Battery via Kalman Filter[C/OL]// Proceedings of 2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer, New Delhi: Springer, 2016 [2022-07-22]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7877354>.

- [15] ANDRE D, APPEL C, SOCZKA-GUTH T, et al. Advanced Mathematical Methods of SOC and SOH Estimation for Lithium-ion Batteries[J/OL]. Journal of Power Sources, (2013-06-15) [2022-07-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SJES14010600307448&DbName=GARJ2013>.
- [16] BAI G X, WANG P F. A Self-cognizant Dynamic System Approach for Battery State of Health Estimation[C/OL]//2014 International Conference on Prognostics and Health Management, 2014: 1-10[2022-07-22]. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-self-cognizant-dynamic-system-approach-for-state-Bai-Wang/51584928582a24b580e8475bd4f4f49b8c22b426>.
- [17] ZHANG X, WANG Y J, LIU C, et al. A Novel Approach of Battery Pack State of Health Estimation Using Artificial Intelligence Optimization Algorithm[J/OL]. Journal of Power Sources. (2018-02-01) [2022-07-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SJES21055780340084F409C747E588BB16C&DbName=GARJ2018>.
- [18] NEJAD S, GLADWIN D T. Online Battery State of Power Prediction Using PRBS and Extended Kalman Filter[J/OL]. IEEE Transactions on Industrial Electronics.(2020-05-01) [2022-07-22].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=XJAZ09F05842CD512E29A8A786CF73298716&DbName=GARJ2020>.
- [19] 张宵洋, 张振福, 毛顺永, 等. 锂电池SOC与持续峰值SOP的联合估计[J/OL]. 控制工程. (2020-11-17)[2022-07-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=JZDF202207014&DbName=DKFX2022>.
- [20] 邢丽坤, 詹明睿, 郭敏, 等. 基于FFMILS-MIUKF算法的锂电池SOC估计[J/OL]. 电子测量技术. (2022-07-26) [2022-07-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2175.TN.20220725.1815.030.html>.
- [21] LI C J, CHEN Z W, CUI J, et al. The Lithium-ion Battery State-of-Charge Estimation Using Random Forest Regression[C/OL]//Proceedings of 2014 Prognostics and System Health Management Conference(PHM 2014), IEEE, 2014: 336-339[2022-07-22]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6988190>.
- [22] 罗雪松, 朱茂桃. 一种GA-DKF的锂离子电池SOC估计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(3): 63-71.
- [23] 李旭东, 张向文. 基于主成分分析与WOA-Elman的锂离子电池SOH估计方法[J/OL]. 储能科学与技术. (2022-07-25) [2022-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CNKX202212029&DbName=CJFQ2022>.
- [24] 武骥, 方雷超, 刘兴涛, 等. 基于特征优化和随机森林算法的锂离子电池SOH估计[J/OL]. 机械工程学报. (2022-06-15) [2022-07-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220613.1735.004.html>.
- [25] 柴建勇, 侯恩广, 李岳炆. 基于双卡尔曼滤波的梯次利用电池SOP估算研究[J]. 电源技术, 2021, 45(6): 732-735.
- [26] 徐志杰. 基于无迹卡尔曼滤波器的三元锂电池SOC与SOP估计算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [27] TANG X P, YAO K, LIU B Y, et al. Long-term Battery Voltage, Power, and Surface Temperature Prediction Using a Model-based Extreme Learning Machine[J/OL]. Energies. (2018-01-03)[2022-07-28]. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/86>
- [28] XAVIER M A, KAWAKITA A, TRIMBOLI M S. An LPV-MPC Inspired Battery SOP Estimation Algorithm Using a Coupled Electro-Thermal Model[J]. 2021, 5(1): 4421-4426.
- [29] 李晓涵, 孙磊, 马勇, 等. 基于Sage-Husa EKF算法的锂离子电池能量状态估计[J/OL]. 储能科学与技术. (2022-06-29) [2022-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CNKX20220627001&DbName=CAPJ2022>.
- [30] HE H W, ZHANG Y Z, XIONG R, et al. A Novel Gaussian Model Based Battery State Estimation Approach: State-of-Energy[J/OL]. Applied Energy. (2015-06-15) [2022-07-28]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.062>.
- [31] 范汝新, 张宵洋, 张振福, 等. 锂电池能量状态与功率状态的联合估计[J]. 电源技术, 2021, 45(10): 1252-1255+1259.
- [32] SHEN P, OUYANG M, LU L, et al. The co-estimation of State of Charge, State of Health, and State of Function for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles[J/OL]. IEEE Transactions on Vehicular Technology. (2018-01-01) [2022-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=XJAZ5E4559D6E3A2071CD07427735C1A3DAB&DbName=GARJ2018>.
- [33] 欧阳剑. 电动汽车用锂离子动力电池SOC估算和SOF评估的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [34] DONG G Z, HAN W J, WANG Y J. Dynamic Bayesian Network-Based Lithium-Ion Battery Health Prognosis for Electric Vehicles[J/OL]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. (2021-11-01) [2022-07-28]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Dynamic-Bayesian-Network-Based-Lithium-Ion-Battery-Dong-Han/be54f3c98d717ea46b140783723658382e959782>.
- [35] 姚远, 陈志聪, 吴丽君, 等. 采用GRU-MC混合算法的锂

- 离子电池 RUL 预测[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2022,50(2): 169-174.
- [36] NIU G X, WANG X, LIU E H, et al. Lebesgue Sampling Based Deep Belief Network for Lithium-Ion Battery Diagnosis and Prognosis[J/OL]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. (2022-08-08)[2022-07-28]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9531345>.
- [37] 唐婷, 袁慧梅. 基于改进 ELM 的锂离子电池 RUL 预测[J]. 电池, 2021, 51(6): 548-552.
- [38] ZZHANG Y, XIONG R, HE H, et al. Long Short-Term Memory Recurrent Neural Network for Remaining Useful Life Prediction of Lithium-Ion Batteries[J/OL]. IEEE Transactions on Vehicular Technology. (2018-07-07)[2022-07-28]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8289406>.
- [39] 朱浩, 赵策, 刘云峰, 等. 一种新型动力电池组能量均衡系统研究[J]. 电源技术, 2015, 39(11): 2387-2390.
- [40] 陈展, 周庆辉, 邱星慧, 等. 电动汽车动力电池均衡系统的设计和试验[J]. 电源技术, 2017, 41(9): 1358-1360+1373.
- [41] 姚芳, 王晓鹏, 陈盛华, 等. 基于 Buck-Boost 准谐振电路的电池自适应分组均衡方案研究[J/OL]. 中国电机工程学报. (2021-12-24)[2022-07-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20211223.1854.016.html>.
- [42] 齐火箭, 张新瑞, 王嘉宏, 等. 动力锂离子电池组均衡策略研究[J/OL]. 电源学报. (2022-02-15)[2022-07-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220215.0853.002.html>.
- [43] 魏业文, 解园琳, 李梅, 等. 改进的可重构均衡电路及控制策略研究[J]. 电源技术, 2022, 46(4): 420-424.
- [44] 马春艳, 王庆龙, 张迪, 等. 基于 SOC 的串联连接锂电池能量均衡控制研究[J/OL]. 电源学报. (2022-02-15)[2022-07-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220215.1535.010.html>.
- [45] DUAN C, WANG C S, LI Z Z, et al. A Solar Power-Assisted Battery Balancing System for Electric Vehicles[J/OL]. IEEE Transactions on Transportation Electrification. (2018-06-02)[2022-07-28]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8319452>.
- [46] TSENG K C, HUANG H S, CHENG C A. A Power Conversion Technique with Hierarchical Equalization Charging Topology for Lifepo4 Batteries[J/OL]. Micromachines, (2021-08-26)[2022-07-28]. <https://www.mdpi.com/2072-666X/12/9/1014>.
- [47] 李久超. 考虑 SOC 均衡的锂离子电池组散热结构研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [48] 刘威, 唐传雨, 王天如, 等. 串联电池组主动均衡拓扑及控制策略研究[J]. 电源学报. 2022,20(3):161-169.
- [49] BIBIN C, DEVAN P K, SENTHIL KUMAR S, et al. Thermal Performance of Lithium-Ion Battery Pack Using Forced Air Circulation System[C/OL]//Materials Today: Proceedings. Amsterdam: ELSEVIER, 2021: 3670-3676 [2022-07-28], DOI:10.1016/j.matpr.2021.01.823.
- [50] WANG L, WANG L, YUE Y, et al. Research on Thermal Management System of Lithium Iron Phosphate Battery Based on Water Cooling System[C/OL]// : Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT) 2017. Springer: Singapore, 2018: 341-349[2022-07-28]. https://www.researchgate.net/publication/324117406_Research_on_Thermal_Management_System_of_Lithium_Iron_Phosphate_Battery_Based_on_Water_Cooling_System.
- [51] 曾祥兵, 谢堃, 张伟, 等. 新型动力电池热管理系统设计及性能研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(4): 476-481.
- [52] 杨林. 纯电动汽车动力电池热管理系统设计及仿真优化[D]. 浙江大学, 2021. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2021.002459.
- [53] 唐伟. 往复式循环液冷与平面热管结合的动力电池热管理系统热均匀性研究[D]. 镇江:江苏大学,2020.
- [54] 王振, 李保国. 电池热管理系统散/加热特性研究及保温安全设计[J]. 包装工程, 2022, 43(11): 174-182.
- [55] ZHANG Y F, HUANG J H, CAO M, et al. A Novel Flexible Phase Change Material with Well Thermal and Mechanical Properties for Lithium Batteries Application[J/OL]. Journal of Energy Storage. (2021-12-01)[2022-07-28]. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-novel-flexible-phase-change-material-with-well-Zhang-Huang/5a0ea1ecaf92fbdc88ed0e0a09a744f16876fb14>
- [56] 王泽旭, 李冰辰, 许瑶, 等. 基于过冷相变材料热开关的锂离子电池热管理系统[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 328-340.
- [57] AL-ZAREER M, DINCER I, ROSEN M A. A Novel Phase Change Based Cooling System for Prismatic Lithium Ion Batteries[J/OL]. International Journal of Refrigeration. 2018, 86. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700717305030>.
- [58] ZHANG ZQ, LI Y. Experimental Study of a Passive Thermal Management System Using Copper Foam-paraffin Composite for Lithium Ion Batteries[C/OL]//Energy Procedia. Songapore: Elsevier, 2017: 2403-2408[2022-07-28]. https://www.researchgate.net/publication/322837010_Experimental_study_of_a_passive_thermal_m

- anagement_system_using_copper_foam-paraffin_composite_for_lithium_ion_batteries.
- [59] 陈英亮. 电池单体不一致性诊断算法比较研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [60] 赵帅. 锂离子动力电池内短路机理与诊断方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [61] JIANG L L, DENG Z W, TANG X L, et al. Data-Driven Fault Diagnosis and Thermal Runaway Warning for Battery Packs Using Real-World Vehicle Data[J/OL]. Energy. (2021-11-01)[2022-07-28]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SJES37AB8D429EC1A6F7E950B7D9381DA1E8&DbName=GARJ2021_1.
- [62] GAO W, LI XY, MA M N, et al. Case Study of an Electric Vehicle Battery Thermal Runaway and Online Internal Short-Circuit Detection[J/OL]. IEEE Transactions on Power Electronics. (2021-03-01) [2022-07-28]. <https://www.x-mol.com/paper/1320893399325446144?adv>.
- [63] QIAO D D, WANG X Y, LAI X, et al. Online Quantitative Diagnosis of Internal Short Circuit for Lithium-Ion Batteries Using Incremental Capacity Method[J/OL]. Energy. (2022-03-15)[2022-07-28]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SJES0EF904E88A8FCA81F4A65E94F3B39BC5&DbName=GARJ2021_2.
- [64] 李庭杰. 车用锂离子动力电池组不一致性及连接故障诊断方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [65] LIN T T, CHEN Z Q, ZHENG C W, et al. Fault Diagnosis of Lithium-Ion Battery Pack Based on Hybrid System and Dual Extended Kalman Filter Algorithm[J/OL]. IEEE Transactions on Transportation Electrification. (2020-01-01) [2022-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=6072ED4A67D57EF9374BE38DF8F1A1C9&DbName=GARJ2020>.
- [66] HAN X, LU L, ZHENG Y, et al. A Review on the Key Issues of the Lithium Ion Battery Degradation Among the Whole Life cycle[J/OL]. eTransportation. (2019-02-28) [2022-07-28]. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100005>.
- [67] 郑岳久. 车用锂离子动力电池组的一致性研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [68] WANG Q, JIANG B, LI B, et al. A Critical Review of Thermal Management Models and Solutions of Lithium-Ion Batteries for the Development of Pure Electric Vehicles [J/OL]//Renewable and Sustainable Energy Reviews. (2016-10-15) [2022-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SJES61A586EFACBBA43582AF0FF509E5B32D&DbName=GARJ2016>.
- [69] 马彦, 李佳怡, 马乾, 等. 基于迭代动态规划的动力电池组热管理优化策略[J]. 汽车工程, 2022, 44(5): 709-721.
- [70] 杨静, 林振康, 汤君, 等. 电池系统的故障特征以及多故障的诊断与识别[J/OL]. 化工学报. (2022-07-20) [2022-07-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1946.TQ.20220720.1028.004.html>.
- [71] 苏伟, 钟国彬, 沈佳妮, 等. 锂离子电池故障诊断技术发展[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(2): 225-236.
- [72] HONG J C, WANG Z P, YAO Y T. Fault Prognosis of Battery System Based on Accurate Voltage Abnormality Prognosis Using Long Short-Term Memory Neural Networks[J/OL]. Applied Energy. (2019-10-01)[2022-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SJES51278D1206AC3DA1A12068B4FBEOA664&DbName=GARJ2019>
- [73] 陈岚, 范永清, 张谦, 等. 基于贝叶斯网络的电池管理系统故障诊断方法[J]. 电源技术, 2016, 40(7): 1396-1398+1415.
- [74] 赵熙, 候亚虹, 汪贵平, 等. 基于云平台的电池管理系统设计与实现[J]. 机械与电子, 2019, 37(12): 51-55.
- [75] KIM T, MAKWANA D, ADHIKAREE A, et al. Cloud-Based Battery Condition Monitoring and Fault Diagnosis Platform for Large-scale Lithium-ion Battery Energy Storage Systems[J/OL]. Energies. (2018-01-04)[2022-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SJMD44B4021D25BF3D714C08A26A781D92E8&DbName=GARJ2018>.
- [76] 李启锐. 面向云边端协同的高性能移动边缘计算理论与方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2021.
- [77] FLOREA B C, TARALUNGA D D. Blockchain IoT for Smart Electric Vehicles Battery Management[J/OL]. Sustainability (Switzerland). (2020-05-13) [2022-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SJMDBDA491684E22BF90660D273B977A090E&DbName=GARJ2020>.
- [78] AENUGU I R, BERE G, OCHOA J J, et al. Battery Data Management and Analytics Platform Using Blockchain Technology[C/OL]//2020 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo(ITEC 2020), 2020: 153-157 [2022-07-28]. https://www.researchgate.net/publication/343520712_Battery_Data_Management_and_Analytics_Platform_Using_Blockchain_Technology
- [79] 付莹莹, 孙德龙, 王胜放, 等. 汽车功能安全发展趋势[J]. 重型汽车, 2022(03): 42-43.
- [80] 贾先锋, 王鹏程, 刘天宇. 基于智能网联汽车车载网络防护技术的研究[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(1): 3 2-35.
- [81] 刘金松, 杜宏生, 林毅. 中国汽车行业信息安全体系可

- 信赖度评估机制研究[J]. 中国信息安全, 2022(5): 79–81.
- [82] ZHANG L S, GAO X L, LIU X H, et al. CHAIN: Unlocking Informatics-aided Design of Li Metal Anode from Materials to Applications[J/OL]//Rare Metals. (2022–05–15)[2022–07–28]. <https://kns.cnki.net/kns8/manage/export.html?displaymode=elarning>.
- [83] 陈琦龙, 孙建国, 陈凯, 等. 纯电动汽车电池管理系统国内外研究现状和发展趋势[J]. 现代车用动力, 2022(1):7.
- [84] RAMILLI R, CRESCENTINI M, Traverso P A. Sensors for Next-Generation Smart Batteries in Automotive: a Review [C]//2021 IEEE International Workshop on Metrology for Automotive (MetroAutomotive). IEEE, 2021: 30–35.
- [85] XIA S C, YAO Z X, LI Y, et al. Online Distributed Offloading and Computing Resource Management with Energy Harvesting for Heterogeneous MEC-Enabled IoT[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(10): 6743–6757.
- [86] ABNER M, WONG P K Y, CHENG J C P. Battery Lifespan Enhancement Strategies for Edge Computing-Enabled Wireless Bluetooth Mesh Sensor Network for Structural Health Monitoring[J]. Automation in Construction, 2022, 140(8): 104355.
- [87] YOUSAFZAI A, YAQOOB I, IMRAN M, et al. Process Migration-Based Computational Offloading Framework for IoT-supported Mobile Edge/cloud Computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 7(5): 4171–4182.
- [88] PADIDEM P, LEE A. Studying Offloading Optimization for Energy-Latency Tradeoff with Collaborative Edge Computing[C]//2022 16th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM). IEEE, 2022: 1–6.
- [89] FAN Z Y, YANG W, TIAN K J. An Edge Computing Service Model Based on Information-Centric Networking[C/OL]//Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Systems – ICPADS. IEEE, 2019: 498–505[2022–07–28]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8975790>.
- [90] CHEN S C, LI Q J, ZHOU C, et al. Recent Advances in Collaborative Scheduling of Computing Tasks in an Edge Computing Paradigm[M/OL]//Sensors (Switzerland). (2021–01–24) [2022–07–28]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SJMDAD5518B61618089D453FD49C8256B3E6&DbName=GARJ2021_1.
- [91] KHAN A M, FREITAG F, RODRIGUES L. Current Trends and Future Directions in Community Edge Clouds[C/OL]//2015 IEEE 4th International Conference on Cloud Networking(CloudNet 2015). IEEE, 2015:239–241.<https://ieeexplore.ieee.org/document/7335315>.
- [92] 袁梓涵. 计算机大数据分析 with 云计算网络技术应用研究[J]. 网络安全技术与应用, 2022(5): 81–82.
- [93] VIZCARRONDO J, AGUILAR J, EXPOSITO E, et al. MAPE-K as A Service-oriented Architecture[J/OL]. IEEE Latin America Transactions. (2017–06–02)[2022–07–28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SFJG9BBC059A3B39D969963191E637FED9D4&DbName=GARJ2017>.
- [94] OUARETH S, BOULEHOUACHE S, MAZOUZI S. A Component-Based MAPE-K Control Loop Model for Self-Adaptation[C/OL]//Proceedings of International Conference on Pattern Analysis and Intelligent Systems(PAIS). IEEE, 2018: 1–7[2022–07–28].<https://ieeexplore.ieee.org/document/8598529>.
- [95] CHAWKI E B, AHMED A, ZAKARIAE T. IaaS Cloud Model Security Issues on Behalf Cloud Provider and User Security Behaviors[J/OL]. Procedia Computer Science. (2018–08–13) [2022–07–28]. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.180>. DOI:10.1016/j.procs.2018.07.180.
- [96] AL AMRI S M, GUAN L. Infrastructure as a Service: Exploring Network Access Control Challenges[J/OL]. Proceedings of 2016 SAI Computing Conference. (2016–09–01) [2022–07–28]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Infrastructure-as-a-service%3A-Exploring-network-Amri-Guan/d1bba86bfe23a8d255a6494ffa2210a241210020>.
- [97] CUNHA D, NEVES P, SOUSA P. PaaS Manager: A Platform-as-a-Service Aggregation Framework[J/OL]. Computer Science and Information Systems. (2014–01–01) [2022–07–28].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=5140988A8DD93D90D43DC3F6A5160548&DbName=GARJ2014>.
- [98] SILVA N, RIBEIRO E L F, CLARO D B. Daas Repository Through MIDAS Web Crawler[C/OL]//ACM International Conference Proceeding Series. New York: Association For Computing Machinery, 2018: 1–8[2022–07–28]. https://www.researchgate.net/publication/329331700_DaaS_Repository_through_MIDAS_Web_Crawler.
- [99] TBAHRITI S E, GHEDIRA C, MEDJAHED B, et al. How To Enhance Privacy within DaaS Service Composition?[J/OL]. IEEE Systems Journal. (2013–01–01)[2022–07–28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=NSTL08A6464603E3786A709D7A661145D024&DbName=GARJ2013>.

(责任编辑 梵玲)