



星闪无线电池管理系统白皮书

2023 年 11 月

参编单位

中汽研汽车检验中心（天津）有限公司、吉利汽车集团有限公司、中国第一汽车集团有限公司、比亚迪汽车工业有限公司、华为技术有限公司、广汽埃安新能源汽车股份有限公司、中国标准化研究院、中国信息通信研究院、蜂巢能源科技股份有限公司、利尔达科技集团股份有限公司、深圳市极致汇仪科技有限公司、北京中科晶上科技股份有限公司、紫光展锐（上海）科技有限公司、南京英锐创电子科技有限公司、成都爱旗科技有限公司、迈来芯电子科技（上海）有限公司、上海创造软件系统有限公司、佰路威科技(北京)有限公司、深圳市三旺通信股份有限公司、中国重型汽车集团有限公司、泛亚汽车技术中心有限公司、重庆长安汽车股份有限公司、深圳壹连科技股份有限公司、上海巨微集成电路有限公司

执笔人

秦孔建、姜国凯、张起朋、赵猛、施喆晗、欧阳威、何锋、甄斌、李长龙、孔祥明、雷奥、张兴瑞、王旭、黄兵、张广浩、黄建、郭琼、王薪强、刘钦、徐平红、王键、王勇、刘光、王军、王琰、肖凌云、谢志利、李文昭、王智玮、葛雨明、王焕丽、廖臻、郭美英、刘雪涛、张玉龙、刘建、顾超杰、陈禹、樊智超、杨小军、钱蔓藜、万建超、周晓萌、温立、张章、王俊、张帅、门强、刘鑫、高一颠、高崧林、沈姣姣、李浩、王玲、曹华、许刚

版权声明

本白皮书版权属于国际星闪联盟并受法律保护。转载、摘编本白皮书文字或者观点的应注明来源：“星闪无线电池管理系统白皮书”，以其他方式使用本白皮书应取得版权方书面同意。违反上述声明者，国际星闪联盟将追究其相关法律责任。

前 言

电池管理系统（Battery Management System, BMS）是电池系统的重要组成部分，是电池“管家”和“保姆”。电池系统由多个电池单体以串并联方式组成，为整车提供驱动电能。BMS是整车实现控制系统对电池包安全保护及信息交换的路径，让电池更加安全、高效、长寿命地工作。在换电模式下，电池系统也可以作为可分离的资产，独立于新能源整车，催生出新的共享化和分时租赁的商业模式和生态。同时，随着风电和光伏为主导的新能源对传统能源的替代加速，配套储能系统是提高新能源消纳、缓解电网压力的有效手段。

电池管理系统BMS的市场规模将与新能源汽车和电化学储能的市场同步扩张。近年来，全球电动汽车销量持续强劲，2022年共交付了1050万辆纯电动汽车和混合电动汽车，较2021年增长55%。新能源汽车中，动力电池成本占比约40%~60%，其中动力电池中BMS及热管理系统合计成本占比约10%，每个BMS的BOM（Bill of Materials）成本大约是100美元。根据工信部数据，2021年BMS市场规模为65.12亿美元，至2026预计为131亿美元，复合年增长率为15%。

根据中国能源研究会储能专委会数据，2021年，我国新增电化学储能新增装机1.8GW，占比24.9%，较2020年占比9.2%增幅较大，电化学储能累计装机规模5.1GW，同比增长56.5%，2016-2021年复合年增长率高达79.3%，其中锂电池储能规模占比超九成。电化学储能系统的成本构成中，电池系统成本占比60%，BMS成本占比5%。

围绕碳达峰和碳中和的“双碳”目标，各国纷纷出台法律法规以保障和推广清洁能源及动力电池的梯次利用和再生利用。2023年7月10号，欧盟《欧盟电池与废电池法规》（新电池法）已经正式生效，这是全球首个针对电池全生命周期阶段（从生产到再生利用和回收）进行规范的法律文件。新电池法将电动汽车电池作为单独一类进行管控，要求其必须包含电池健康和预期寿命状态的管理系统。2021年，我国工信部发布《新能源汽车动力蓄电池梯次利用管理办法》，梯次利用中需要共享电池信息，如产品的容量、性能、用途、化学成分和可回收内容物等，这些都离不开BMS。

近年来，基于新能源汽车中动力电池包分布式拓扑结构，芯片厂商与电池供应商提出了无线电池管理系统（wireless Battery Management System, wBMS）概念。与传统BMS相比，首先，wBMS可扩展性强，可减少包内线束达90%，简化Pack结构，节省空间达15%，提升整包能量密度。其次，汽车内工作环境非常恶劣，壳体内高温会加快线束老化，频繁振动容易造成线束松动。wBMS通过无线通信取代线束，可以减少线束老化和松动导致的电池管理系统瘫痪风险，提高安全性和可靠性。此外，wBMS可以使能更加简洁和模块化的电池系统设计，使得电池包组装、维修工序、梯次利用变

的更加简单高效。然而，目前业界缺乏标准化的wBMS解决方案，不利于跨厂家和跨领域的应用和服务。

星闪NearLink是新一代全栈式的无线短距通信技术，星闪支持两种空口接入技术：星闪基础接入技术SLB和星闪低功耗接入技术SLE。其中，星闪SLE工作于非授权的ISM频谱，可支持250 μ s时延的双向交互、低至-110dBm的接收机灵敏度、多达256个用户的并发接入、微秒级别的多设备同步、mesh网络、包括双向认证的高等级安全机制和抗干扰设计。因此，星闪SLE特别适合面向新能源汽车和储能系统的wBMS设计与实现。

为推动wBMS产业的发展，提升动力电池管理的标准化和智能化水平，星闪联盟组织产业内优秀企业和专家，经过讨论、调研与评估，形成了《星闪无线电池管理系统白皮书》。白皮书旨在促进业界对wBMS和星闪NearLink技术的了解，为新能源汽车不同场景下的wBMS技术创新和应用实践等提供分析和讨论。最后，希望白皮书能够为新能源汽车和电化学储能领域的工程师、企业、研究机构和政府机构提供参考，以协调技术、标准、产业、市场和政策。

目 录

第一章 动力电池系统发展	1
1.1 动力电池系统进展	1
1.1.1 动力电池结构进展	1
1.1.2 动力电池高压发展	1
1.2 动力电池传感器进展	2
1.2.1 电流传感器	2
1.2.2 温度传感器	3
1.2.3 压力传感器	3
1.2.4 烟雾传感器	3
1.2.5 智能熔断器	3
1.2.6 智能电芯/电池传感器	4
1.3 未来趋势：一体化传感	5
第二章 电池管理系统及其无线化	6
2.1 BMS 发展历史	6
2.2 “电池保姆” BMS	6
2.2.1 感知电池参数	7
2.2.2 电池状态估计与决策	7
2.2.3 电池管理系统执行与协同	8
2.3 BMS 关键技术及其发展	8
2.3.1 高精度 SOC 算法	8
2.3.2 电芯充放电均衡管理	9
2.3.3 有线 BMS 拓扑结构	11
2.3.4 有线 BMS 通信	12
2.3.5 无线电池管理系统 wBMS 的优势	14
第三章 无线电池管理系统技术方案	16
3.1 BMS 通信需求	16
3.1.1 BMS 安全需求	16
3.1.2 BMS 性能指标	16
3.1.3 BMS 系统级测试	21
3.2 私有 wBMS 通信方案	22
3.3 星闪 SLE 技术 wBMS 通信方案	23
3.3.1 星闪 SLE 优势及特性	23
3.3.2 星闪 SLE 安全机制	23
3.3.3 星闪 SLE 性能	24
3.3.4 星闪 SLE 测试	24
第四章 基于星闪 SLE 技术的全生命周期无线电池管理系统	28
4.1 星闪 SLE 高通信速率设计	28
4.2 星闪 SLE 抗干扰设计	28

4.2.1	信道编码 polar 码.....	28
4.2.2	跳频算法.....	30
4.3	星闪 SLE 高密度组网设计.....	31
4.4	星闪 SLE 高信息安全设计.....	33
4.4.1	空口通信安全.....	33
4.4.2	星闪设备安全.....	34
4.5	基于星闪 SLE 的 WBMS 功能安全设计.....	35
4.6	基于星闪 SLE 的 WBMS 部署示例.....	36
第五章	总结与展望.....	38

缩略语

AES	Advanced Encryption Standard	高级加密标准
ASIL	Automotive Safety Integrity Level	汽车安全完整性等级
BCU	Battery Control Unit	电池控制单元
BIC	Bus Interface Controller	总线接口控制器
BMS	Battery Management System	电池管理系统
BMU	Battery Management Unit	电池管理单元
BPSK	Binary Phase Shift Keying	二进制相移键控
CAN	Controller Area Network	控制器局域网
CRC	Cyclic Redundancy Check	循环冗余校核
CSU	Cell Supervisor Unit	电芯监测单元
CTB	Cell to Body	电芯到车体
CTC	Cell to Chassis	电芯到底盘
CTM	Cell to Module	电芯到模组
CTP	Cell to Pack	电芯到电池包
CTV	Cell to Vehicle	电芯到车辆
ECU	Electronic Control Unit	电子控制单元
EE	Electrical- Electronic	电力电子
EVM	Error Vector Magnitude	误差向量幅度
FBG	Fiber Bragg Grating	光纤布拉格光栅
FSK	Frequency Shift Keying	频移键控调制
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying	高斯频移键控调制
MCU	Microcontroller Unit	微控制单元
MEMS	Microelectromechanical Systems	微机械系统
PCB	Printed Circuit Board	印制电路板
PSK	Pre-shared Key	预共享密钥模式
QoS	Quality of Service	服务质量
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	四进制相移键控
RSSI	Received Signal Strength Indicator	接收信号的强度指示
SLE	SparkLink Low Energy	星闪低功耗接入技术
SoC	System on Chip	片上系统, 系统级芯片
SOC	State of Charge	电池荷电状态

SOE	State of Energy	电池剩余能量
SOH	State of Health	电池健康状态
SOx	State of x	电池xx状态
TSCH	Time Slotted Channel Hopping	时间同步通道跳变
UWB	Ultra-Wideband	超宽带
wBMS	Wireless Battery Management System	无线电池管理系统

第一章 动力电池系统发展

1.1 动力电池系统进展

1.1.1 动力电池结构进展

长期以来，电动汽车最大的问题就是续航，要想提高电池的续航能力，最好的方法就是在相同的体积之下堆放更多的电芯，通过提高数量来达到增加电池的容量和提升续航的目的。动力电池企业和整车厂们通过对电芯、模组、电池包等环节的改进和精简，最大化提升电池包的体积利用率。

传统的集成方式CTM，即“Cell to Module”，它代表的是将电芯集成在模组上的集成模式。模组是针对不同车型的电池需求不同、电池厂家的电芯尺寸不同而提出的统一发展路径，这有助于产品统一及规模经济的形成。电池系统CTM集成方式的重点就是不断提升标准化电池模组的尺寸，总的配置方式是：电芯-模组-PACK-装车，比较典型的是355、390、590模组。但这种方法存在一个弊端，即模组的存在占用电池包体积，体积利用率只有40%左右，这很大程度地限制了其他部件的空间。为了提高体积利用率，出现了直接将电芯集成在电池包上的集成方式CTP即“Cell to Pack”，可有效提升电池包的体积利用率和能量密度。CTP集成方式可较传统CTM集成方式体积利用率提高约10%以上，零件大幅减少。为进一步提升体积利用率，电芯直接集成于车辆底盘CTC，即“Cell to Chassis”，或者CTB，即“Cell to Body”，应运而生。该集成方法可进一步提高电池系统与动力系统、底盘的集成度，减少零部件数量，进而大幅度降低车重，提升续航能力。

电池系统从CTM、CTP发展到CTC或CTB，零件的外形、材质、组合形式等都伴随电池集成技术的进步发生了改变，整体的方向是一体化、集成化，提升体积利用率。对于空间的布置要求更高，不同的零件集成到一个零件中去，减少相互之间的连接关系，甚至采用无线连接，形成更集成、功能多元的系统成为未来的发展趋势。

1.1.2 动力电池高压发展

目前动力电池系统大多采用的是400V电压平台，部分高端电动车已推出800V平台，比如保时捷Taycan，柯尼塞格Regera等。800V平台架构可以有效解决电动汽车的两大痛点：补能焦虑与里程焦虑。实现大功率快充可以通过增加电流或者电压，来提升充电功率。其中大电流快充的热损失较大，且充电桩与充电枪的热管理成本更高，而高电压快充通过提升了充电电压，进而减小了充电电流，降低了对于充电热管理的要求，逐渐成为快充的主流。同时800V电压平台由于串入了更多的电池，其电池系统电量会更多，因此续航相应也会得到提升。

但800V高压架构下电池串联数较400V系统增加了一倍，因为电芯内阻的差异，单体电芯表现的电压不同。内阻比较大的电池在充电时会提前充满或优先到达上限电压，放电时则会提前到达下限电压，为了避免过充过放，电池管理系统就会截止充放电，而此刻其他电芯还未充满或充分发挥容量，从而导致电池容量的浪费。内阻高的电芯完全充放电的频率更高，使其衰减更快，久而久之，这颗电芯就更可能发生失效或安全故障。串数越多，电芯产生失效的概率就越高，对于电芯一致性的要求也相应提高。同时随着串数的增加，电池管理系统的数据传输量也会成倍增加，对于系统成本、数据传输速率、电池管理等性能要求也随之提升。

1.2 动力电池传感器进展

动力电池是封闭体系电化学系统，封装后只能测量外特性：如电流、端电压、表面温度、表面压力等。应用也主要是根据电芯的外特性根据一定的工况和策略算法，对电池内部状态进行预测估算，依靠电池管理系统BMS（Battery Management System）通过各种类型的传感器，来采集电芯电压、模组温度、母线电流、包内压力等，来实现对电池状态的估计和控制。

1.2.1 电流传感器

电流传感器用于测量母线电流，保证电池剩余容量（State of Charge, SOC）计算的精确性以最大化地使用电池容量。通常电流传感器基于以下物理学原理进行电流测量：（1）基于欧姆定律的分流器；（2）基于安培环路定律的电流传感器；（3）间接测量技术的电流传感器，包括基于霍尔（HALL）电流传感器、磁通门（Flux Gate）电流传感器、磁电阻（Magneto-Resistance）电流传感器、罗氏线圈、电流互感器等。

1) 电阻分流器

应用于动力电池中的分流器，实质是一个电阻器，用来检测流过的电流值，采用测量的电压的方式进行，即当通过电流时，电阻器产生压降，对电压值进行检测，即可计算得出通过的电流值，依据是 $U=IR$ （电压= 电流 x 电阻）。

2) 霍尔电流传感器

霍尔效应传感器将变化的磁场转化为电压，是一种间接测量方式。霍尔电流传感器直接连通直流电源正负极，通过将被测电流母线穿过传感器完成主电路和控制电路的隔离检测。霍尔电流传感器具有互感器和分流器的优点，而且结构简单，但是易受干扰。

3) 磁通门电流传感器

磁通门原理即易饱和磁芯在激励电流影响下，激励电流大小改变电感强度，进而改变磁通量大小，磁通量则如同门那样打开或者闭合，磁通门电流传感器是一种高精度电流传感器。

1.2.2 温度传感器

温度传感器是保证电池安全的关键组件。在电池管理系统中，为了使电池在规定的工作范围内可实现最佳的能源效率，BMS需要可靠的监测并控制电池温度，防止电池过热。因此，温度传感器需要被放置在电池包内在多处（电池本体、接线柱、冷却液）以电压的形式测量温度并将数据发送到BMS，用于保证电池在充放电循环期间处于最佳状态所需的临界温度。对温度准确监控，可以防止电池过度充放电，进一步提升电池利用率，增加电池的使用寿命及充电经济效益。温度传感器主要分为：电阻温度传感器（Resistance Temperature Detector, RTD）、热敏电阻、热电偶和光纤Bragg光栅传感器等。目前使用较多的是热敏电阻，热敏电阻其一版安装在电芯顶部，通过其电阻与温度的对应关系来反映电芯的实时温度。

1.2.3 压力传感器

电池热失控是锂离子电池的最大风险之一，预测电池压力对判断热失控具有一定的意义，为了能够及时检测到包内压力变化，需要通过压力传感器时刻监测电池包的内部压力。目前压力传感器产品主要有陶瓷压阻式、陶瓷电容式、MEMS式、BPS压力传感器（Bourns Precision Sensor）等几类。其中BPS压力传感器可以在汽车处于行驶或充电状态的时候，当压力出现异常符合电芯热失控特征是，通过BMS发出热事件报警信号。同时也可以汽车处于停车状态时，针对压力异常实时预警并唤醒BMS，进行热事件的综合判断、报警和处理，进而实现全天候电池包的内部压力监测和异常诊断。

1.2.4 烟雾传感器

烟雾传感器属于气体传感器中的一种，其是通过烟雾敏感元件受烟雾浓度的影响，进而改变阻值的大小，并向主机发送烟雾浓度相应的模拟信号。锂电池在发生热失控导致起火的初期阶段，往往会由于过热或电解液泄露逐步释放出微量的可燃气体，比如一氧化碳（CO）、磷酸二甲酯与氢气等。因此，在封闭的电池包内布置一个或多个烟雾传感器可以对电池包内的气体成分、烟雾浓度、电池包内压力进行实时探测和监控，目的是尽可能更早的判断出电池热失控的发生。

1.2.5 智能熔断器

传统的熔断器(fuse)为过热保护，依靠保险丝物理材料的温度特性来进行工作的，通常在电流达到分断电流或当电流超过一定的大小（但未达到分断电流），持续一定的时间，保险丝熔断。并且传统的熔断器其承受冲击电流的次数是一定的，不同的使用场景和使用习惯均会导致其寿命存在差异。

而智能熔断器Pyrofuse是一种由软件触发、通过爆破方式切断电路的保护装置。在电流过载或者非电流故障（碰撞/过热等）下均可带载切断、分断电流高达10kA，对乘员和车辆可全面保护，且不受电流冲击影响、使用寿命长。Pyrofuse通过软件进行精准的控制，能根据碰撞、短路、绝缘等故障在几毫秒内断开高压，起到更好的保护作用。

1.2.6 智能电芯/电池传感器

近年来，动力电池的大规模应用对现有的动力电池的状态监测与安全预警提出了更高要求，亟待研发锂离子电池智能传感技术，突破电池传感信息实时监测与预警技术，覆盖动力电池自主检测、自主管理和自主预警技术瓶颈。因此将智能嵌入式传感技术和功能嵌入到电池中，实现每一个电芯层级数据测量，已经成为未来的发展方向。

将多维传感器（包括电芯电压、温度、内部压力、参比电位等）放置于电芯内部，采用无线通讯等通讯方式传递电池物理参数，直接捕捉内部电化学反应的细微变化，更及时监测电池状态，提高电池全生命周期应用管理水平，提高整体安全性，延长使用寿命。

该技术可能的主要挑战较多较复杂，比如需要获取的内部信息类型种类、信息处理传感方式、精度、传感器本体研发、植入传感器对电芯本体的影响、工艺可智造性、相适应的应用策略等等，融合了电芯机理、机械结构、材料以及电子电气等多种学科的设计、开发，是一个大型的工程，需要行业内多机构联合研究开发。

1) 电化学传感器

电化学传感器主要用于检测电池化学方面，如SEI（Solid Electrolyte Interface，固体电解质界面）生长、氧化还原物种类和金属溶解，可以被视为用于检测各种物质的电化学传感器。但小型化是一直困扰电化学传感器的问题。随着物理/化学领域的最新进展，这一点正在发生变化，因此电化学传感器现在非常适合使用多种机械、化学和电化学协议来防止环境伪影，将其小型化至微米甚至纳米尺度。先进的电化学技术与传感器小型化和电极修饰的独特适用性相结合，为设计功能强大的新型检测微系统提供了极好的基础。

2) 光学传感器

光纤布拉格光栅FBG（Fiber Bragg Grating）是迄今为止研究最多的光学传感器类型，他将发射信号的波长依赖性与局部温度、压力和应变相关联。基于使用FBG传感器测量应变的准确性，在不同温度条件和动态循环下，SOC的估计误差小于2.5%。此外，还可以预测电池容量长达十个周期，误差约为2%。然而使用FBG的一个技术难点在于如何将压力和温度进行解耦。

3) 声传感器

同动物一样，电池也会呼吸，在充放电过程中会膨胀和收缩，体积变化可达10%。这会导致电池内部产生机械应力，从而发出声音。长期以来，倾听和分析电池材料在充放电过程中产生的声波一直是电池研究的潜在领域。声波发射（Accoustic Emmission）技术被用于监测多种类型的电池化学物质。然而声波发射受到一些重要的限制，这些限制包括产生声波所需的最小阈值应力，以及缺乏作为传感技术的空间识别。

1.3 未来趋势：一体化传感

车用传感器内部结构组成包括电源、传感、通信等模块，将测量到的信号通过规定形式的输出给BMS，用来进行精确的电池管理。随着电池系统的集成化、一体化发展，电压数据、温度数据、压力数据等多维度、多速率数据采集与处理提出了新的要求，同时对通信的方式也提出了新的挑战，如何将多维度、多速率、大数据量的数据简单高效地传输，传感一体化是电池用传感器方面未来的发展方向。

第二章 电池管理系统及其无线化

2.1 BMS发展历史

电池管理系统BMS是用来对蓄电池或蓄电池组进行安全监控及有效管理，提升蓄电池使用效率的装置，是电池的管家和保姆，让电池更加安全、高效、长寿命地工作。特别是在新能源车辆中，是连接动力电池和新能源整车的重要纽带，通过监测电芯的状态参数，如电压、电流和温度等，来估算整个电池系统的状态，并根据计算得到的电池状态对动力电池系统进行相应的控制调整和策略实施，实现对动力电池系统及各单体电芯的充放电管理以保证动力电池系统安全稳定地运行。

早期锂电池保护板主要用于消费类电池，功能较为单一，主要实现电池状态监测和安全分析功能。随着新能源汽车的快速发展，复杂、大型的锂电池组被广泛应用，简单的保护板已经不能满足需求。在保护板功能的基础上，BMS扩展了通信、均衡管理、电池剩余容量估计等功能。

随着电池数量的增长，动力电池工作时，对充电电流、放电电流、工作温度和单体电压等都有使用限制条件，基于以上参数将电池工作条件分“合理区域”和“临界区域”。当电池工作状态位于“合理区域”时，电池寿命最长。当电池工作条件越过“临界区域”时，发生安全事故的概率就会大增。BMS要做的是尽量让电池工作在“合理区域”以提高电池的使用寿命，当电池越过“合理区域”后要给用户报警提示，或是执行保护功能（如冷却，限制功率等）让电池回归“合理区域”。

同时，电池价值就在于其“有效储能”，电池包或者模组的放电受限于串联中电压最低的电池，其充电受限于电压最高的电池，过放和过充都是电池的两种极度危险状态。电池包中各电池之间总是存在差异，因此BMS还需要抑制和减缓电池包内各电池“一致性”变差，使其有效能量更加接近理论能量，提高电池包或者模组的使用效率。

2.2 “电池保姆” BMS

BMS在电池系统中充当“电池保姆”角色，对电池模组中电芯（组）的监控、指挥及协调，如下图所示。

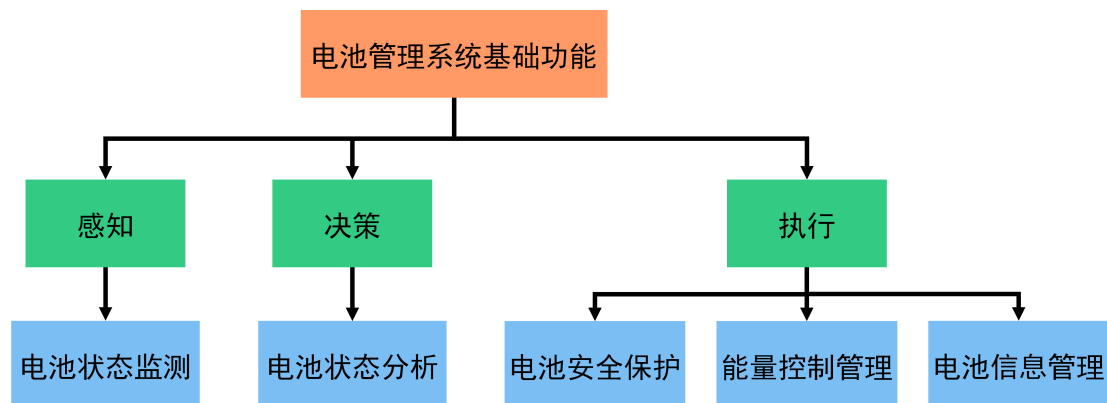


图 1 电池管理系统基础功能分类

2.2.1 感知电池参数

电池状态监测主要通过对应的传感器进行数据采集，是BMS最基本的功能。电池状态一般包括电池电压（电芯电压和总电压）、电池电流和温度等三种物理量，分别对应相应的传感器。电压监测通过对应的采样电路采集每个电芯和电池包的总电压，温度监测可通过NTC温度传感器（Negative Temperature Coefficient Sensor）进行测量，温度检测包括环境温度、电池包的温度、热管理系统进出水口的温度等，通常电压和温度采样一起集成在电芯连接系统（Cell Connection Systems, CCS）中，电流通过电流传感器进行监测，常见的电流传感器有分流式和霍尔式。

未来安全法规将日趋严格，BMS后续需要考虑监测压力变化和气体信号，提供热失控预警功能。

2.2.2 电池状态估计与决策

电池状态SOx（State of x）估计是BMS算法控制的核心，常用的电池状态包括SOC和SOH（State of Health），其中SOC是其他状态分析的基础，电动汽车用户需要知道剩余的电量还有多少，SOC是对电池老化状态的评估，常用一个百分比来反映。电池在刚出厂的时候的最大容量为1，经过多次循环，电池所能容纳的最大容量相对于刚出厂时容量的百分比SOH，就反应了电池的老化状态。SOH受动力电池使用过程中的工作温度、放电流的大小等因素影响，需要在使用过程中不断评估和更新，以获得更为准确的信息。一般来说，经过几百上千个深度充放电循环使用以后，动力电池的SOH要求要在80%以上，以匹配新能源汽车使用寿命。

动力电池组中电芯间的一致性越高，SOx估算就越精准。单个电芯的SOx估算可以采用历史数据模拟，相对简单；电池组由多个单体电芯串并联而成，电池数目越多，电池之间的差异也就会越大，SOC估算要考虑电池组中每个电池的状态，这非常困难。实际中，通常将整个电池组视为一个单体进行估算。这就意味着电池的一致性越高，估算的累计误差会越小。在电芯确定的情况下，BMS对

电池组SOx的估算越精确，充放电管理和控制策略就越精准，就越能延长动力电池组的寿命，最大化提高能量利用效率。

2.2.3 电池管理系统执行与协同

采集电池组参数后，BMS对电池的状态进行评估，通过自身或与其他零部件协同将电池组的状态调节到“合理区域”，主要的执行动作包括保障安全、充放电控制、热管理和故障预警。

1) 电池安全保护是电动汽车BMS首要的、最重要的功能，过流保护、过充过放保护和过温保护是最为常见的安全保护。过流保护指的是在充、放电过程中，在工作电流超过安全阈值情况下，采取限制功率的安全保护措施，极端情况下通过熔断主回路Fuse以保护高压零部件的安全。过充保护指的是在电池电量为100%的情况下，为防止继续充电损坏电池，切断电池充电回路的保护措施；过放保护指的是在电池的剩余电量为0的情况下，切断电池的放电回路的保护措施，若继续对电池放电，也会对电池造成损坏。

2) 电池充放电控制是指BMS在电池充放电过程中，对充电电压、充电电流等参数进行实时优化控制，优化目标包括充电时长、充电效率以及充电的饱满程度等。电池放电控制管理是指BMS在电池的放电过程中，根据电池的状态对放电电流大小进行控制。电池放电控制管理在某些系统中常被忽视，通常这些系统都较为简单，电池包被认为只需要提供电能，不产生安全问题即可。然而，在较为先进和完善的系统中，充放电控制管理可以使动力电池组发挥更大的效能。

3) 热管理是电池系统持续高效的重要保障，动力电池在充放电过程中会放出大量的热量，而锂离子电池的性能、寿命和安全性对温度十分敏感。通常动力电池最佳的工作温度范围在15~35℃之间，温度过高会造成电池寿命降低，温度过低则会导致电池电化学反应活性降低，充放电效率下降，严重时甚至会发生热失控的现象。此外，如果电池系统中电芯间温差>10℃，电池组的性能由最差的电芯单体决定，其使用效率会大大降低。

4) 故障预警是电池系统安全的最后保障。随着新能源汽车渗透率不断攀升，新能源汽车安全事故时有发生，故障预警可有效保障驾乘者的生命财产安全；法规方面安全要求加码，GB18384和GB38031等多个法规强制要求，在电池系统发生热失控的安全事故前，应通过一个明显的信号（如声音或光信号）装置向用户做出提示；对于整车厂商，预警监控提醒及时救援及售后工作推进能够提升品牌安全形象。

2.3 BMS关键技术及其发展

2.3.1 高精度SOC算法

高精度算法是BMS的核心，动态高精度SOC估计是行业难题，影响SOC估算精度的因素众多，主要因素包括：1) 电池类型：电池类型主要影响开路电压OCV特性（Open Circuit Voltage），电池类型不单指材料体系，如三元电池和磷酸铁锂电池的电化学特性不一致，还包括电池的封装结构，方形、软包和圆柱电池的内部特征参数也不一致；2) 充放电倍率与端电压对应关系：工作状态下测得的电池电压实际上是端电压，在温度和电流恒定状态下，它们的关系还是相对稳定的，但在电池非常复杂的实际工况下，其对应关系通常会被打乱；3) 温度：温度对电池多个参数都有影响，不同材料体系的电池对温度的敏感性不一样；4) 电池寿命：电池在使用过程中寿命将逐渐衰减，衰减机理主要在于正负极材料晶格的塌陷导致可逆锂离子的损失，SOC估算还要考虑电池寿命对总容量的影响。

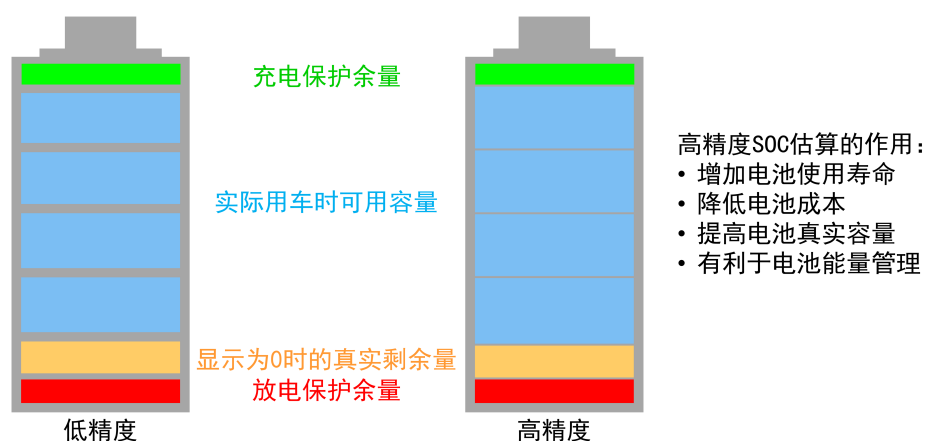


图 2 高精度SOC算法的作用

开路电压+安时积分联用是目前主流的SOC算法，基于卡尔曼滤波法和神经网络的高精度算法也逐步地被应用。经典SOC估算采用安时积分法，即通过计算一定时间内充放电电流和对应时间的积分，计算变化电量的百分比，最终求出剩余电量。该方法随着使用时间的增加累计误差会越来越大，单独采用进行估算并不能取得很好的效果。电池在长时间静置的条件下，电池的开路电压与SOC存在相互映射的关系，开路电压法根据开路电压来估算电池SOC，但该方法仅在电池静置足够长时间的情况下精度较高，在车辆实际工况下并不适用。因此一般将开路电压法与其他方法结合起来，业内用的最多的是开路电压+安时积分法。神经网络算法和卡尔曼滤波算法是目前领先的高水准算法，二者各具特点：神经网络算法需要大量数据进行训练学习，并能够实时修正参数；卡尔曼滤波算法在电池标定阶段便能确定参数，但计算量偏大且开发难度较高。

与三元锂电池相比，磷酸铁锂电池SOC估计对精度要求更高。

2.3.2 电芯充放电均衡管理

电池组中电芯单体间的特性参数存在差异，这种不一致性主要有2个来源，1) 生产制造过程中工艺问题和材质的不均匀性；2) 装车使用中安装位置、散热、自放电程度等不同。因此，在车辆使用过程中必须进行对电池组进行均衡管理，以避免单个电芯出现过充电或过放电，并最大限度的保证每个电芯单体的容量相当，保证整个电池系统的使用寿命和可靠性。

BMS均衡方法包括被动均衡和主动均衡两大类，其工作原理如下图所示。被动均衡也被称为耗散型均衡，其实现是在每一个单体电芯上并联一个可控的电阻，将容量较高的电芯中的多余能量消耗掉，实现整组电芯电压均衡。主动均衡也被称为能量转移均衡，其实现是将容量较高的电芯中的能量转移到容量较低的电芯中，在实施过程中需要储能环节（如电容或电感）进行能量重新分配。

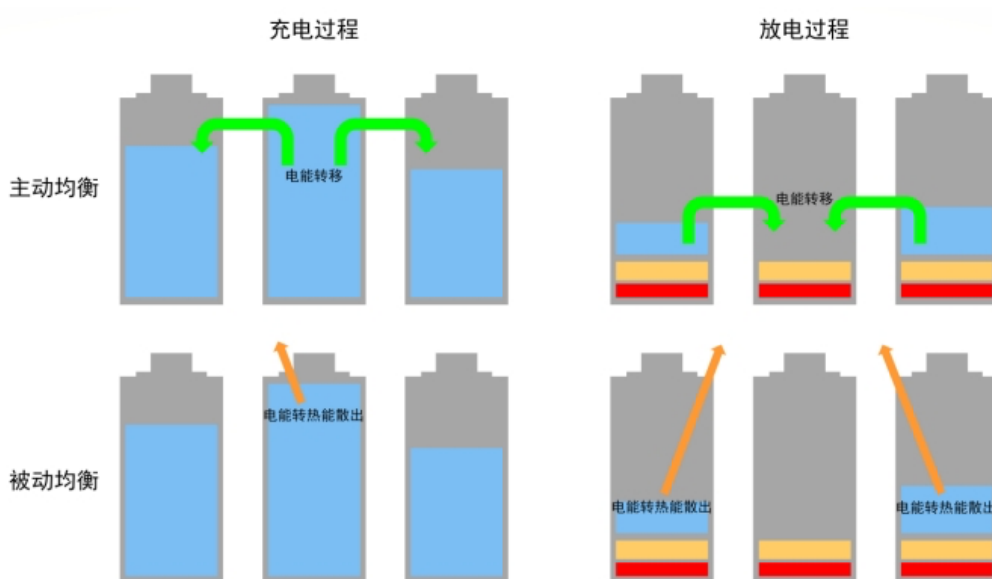


图 3 主动均衡和被动均衡的工作原理

两种均衡管理模式的对比如下表所示，在被动均衡时，一旦各电芯间一致性较差，大量的电量将被耗散掉，造成电能使用效率下降。此外，电能转变为热量耗散带来一个两难问题：如果均衡电流过大，产生热量多，电池系统散热就成为问题；如果均衡电流太小，完成均衡需要很长时间。随着电芯制造工艺不断提升，电芯间的一致性越来越高，电池厂家出于电路结构和成本考虑，被动均衡是各厂商的主流选择。在主动均衡时，能量是高低转移，电能使用效率高，产生热量低，均衡速度快，但需要复杂的均衡电路和储能器件，导致成本居高不下。

表 1 BMS主动均衡与被动均衡管理模式¹

	主动均衡	被动均衡
工作原理	充电时将多余电量转移至高容量电芯,放电时将多余电量转移至低容量电芯	电量高的电池中的能量变成热耗散掉

¹ 招商银行行业研究报告, https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202210141579164139_1.pdf

均衡元器件	电容、电感、变压器、DC/DC	电阻
均衡电流	1-10A 级别	百毫安（100mA）级别
电池使用效率	高	低
复杂度	高	低
成本	高	低
故障率	高	低

2.3.3 有线 BMS 拓扑结构

目前主流的BMS采用有线通信方式，其拓扑结构分为集中式和分布式两类。集中式BMS将的电压和温度采集等模块和均衡功能全部集成在一块PCB板上，采集模块和主控模块的信息交互在PCB板上直接实现。分布式BMS由一个主控板和多个从控板共同组成，从控负责对每一个电芯进行电压和温度检测、均衡管理以及相应的诊断工作，主控负责接收从控采集的数据并进行电池系统的状态评估、充放电管理、热管理以及与整车的通信等。

集中式BMS所有模块都在一块PCB板上，简化了模块间的通信，成本低，一般用于总电压低体积小电池系统中。集中式BMS的缺点也比较明显：1) 采样线束较复杂，BMS采样需要与每个电芯直接相连，线束比较长，导致采样线的设计较为复杂；2) 产生额外的电压差，由于每个电芯分布在不同位置，BMS与电芯连接的采样线长短不一，导致在采样或均衡的时候产生额外的电压差，影响BMS的精度；3) 适用性较差，BMS所能支持的最大采样通道有限。

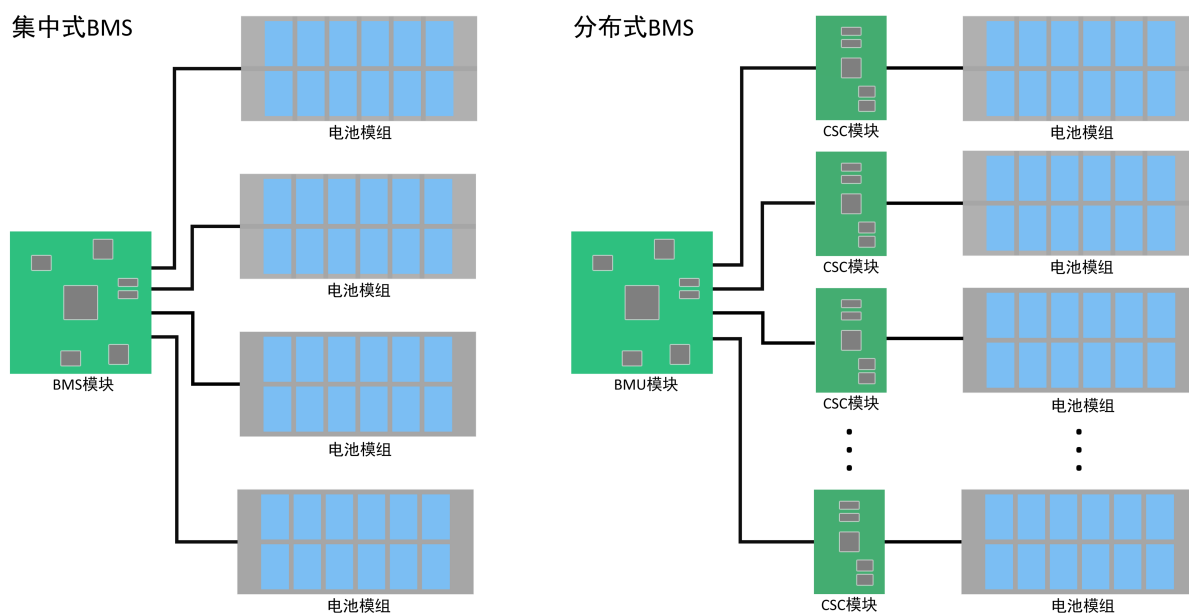


图 4 集中式BMS与分布式BMS的对比

下游需求驱动新能源汽车不断朝着高续航、高电压和平台化发展，动力电池系统向CTP、CTC和CTV（Cell to Vehicle）进阶，因此分布式BMS是主流方向，如下表所示。分布式BMS的架构能够

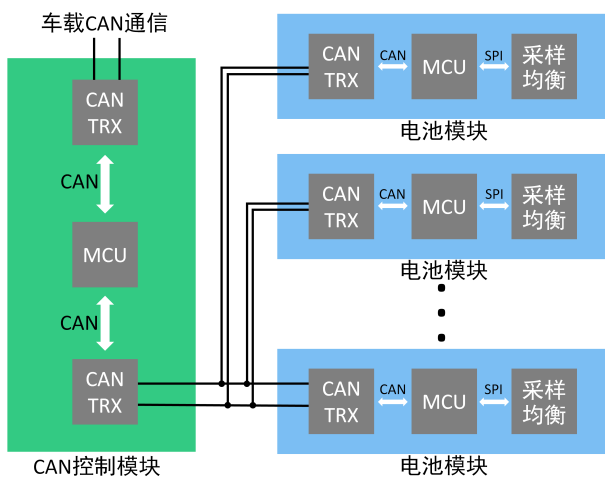
实现模块层面和系统层面的分级管理，主控和从控功能独立，虽然系统成本较高，但优点较突出：1) 电池系统内部布局简单，模组装配过程简化，采样线束固定相对容易，BMS与电池间线束长度相对均匀，减少了因为线束导致的压降不一致的问题；2) 可拓展性强，分布式架构允许根据不同的电池系统串并联设计进行高效配置，支持体积更大，集成度更高的电池系统。

目前采用集中式BMS的车型较少，典型代表如上汽通用五菱的宏光Mini EV，整个电池系统的带电量仅为9.2kWh，需要连接和管理的电芯数量较少，整体电池系统设计较为简单。相对的，大部分的整车厂的车型采用的是分布式BMS，例如特斯拉 Model 3， Model Y，比亚迪的汉 EV等，这些车型的电池系统带电量较大，一般为60~100kWh左右，系统集成度高，对电池系统的设计要求更高。

2.3.4 有线 BMS 通信

如下图所示，当前有线BMS系统的通讯方式主要有两类，CAN（Controller Area Network，控制器局域网）总线是使用最广泛的通讯技术，但随着对成本控制压力越来越大，厂家在向菊花链串行通信方式转变。

CAN总线通讯的BMS架构



菊花链通讯的BMS架构

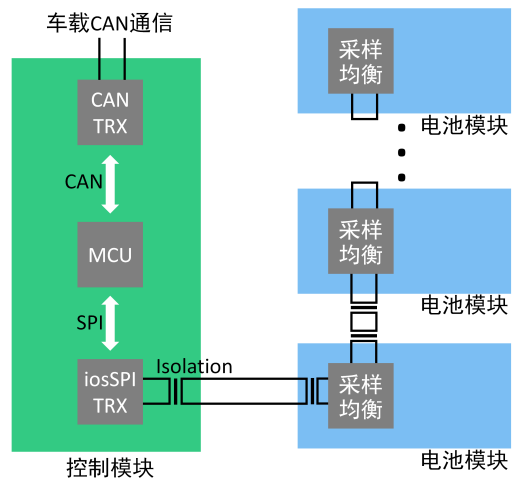


图 5 CAN总线通信的BMS架构和菊花链通讯的BMS架构

CAN总线既可用于长距离通讯（如大巴车、储能等），也适用于短程通信（如乘用车）。CAN总线由德国BOSCH公司开发并最终成为国际标准（ISO 11898，ISO 11519），基于CAN总线的BMS具有以下特点：1) 数据通信稳定可靠，主控可与从控模块单独通讯，数据通信实时性强，容易构成冗余结构，系统可靠灵活；2) 开发周期短，CAN通信协议可由CAN控制器芯片及其接口芯片来实现，技术成熟，开发难度低，开发周期短；3) 系统成本较高，主控需要附带CAN通讯模块，主控和从控模块需要额外配置电源芯片及隔离电路，导致系统成本较高。

菊花链ISO SPI通信仅适用于小尺寸的乘用车的短程通信，具有以下特点：1) 综合成本低，菊花链通信使用各家对应的转换芯片和通信隔离芯片，不需要CAN芯片和从板上的MCU，这些转换芯片的成本比CAN芯片更有优势，而且线束明显减少；2) 稳定性方面相对较差。考虑成本因素，厂家转向菊花链通信，一般会采用2条甚至更多的菊花链来增强通讯稳定性。

在主流的有线BMS架构中，无论是CAN总线还是菊花链通信，都是通过实体线束连接电池采样芯片，这种有线数据传递存在以下问题：1) 冗余性较差，一旦链路中的某个节点出现问题，整个系统都会瘫痪，导致数据无法传递；2) 重量和成本的增加，每个模块都需要线束连接，节点的增多导致更多的导线，带来重量和成本增加，占据了电池系统内部宝贵的空间；3) 可靠性较差，线束或连接器可能因为老化、外部振动影响连接可靠性等。

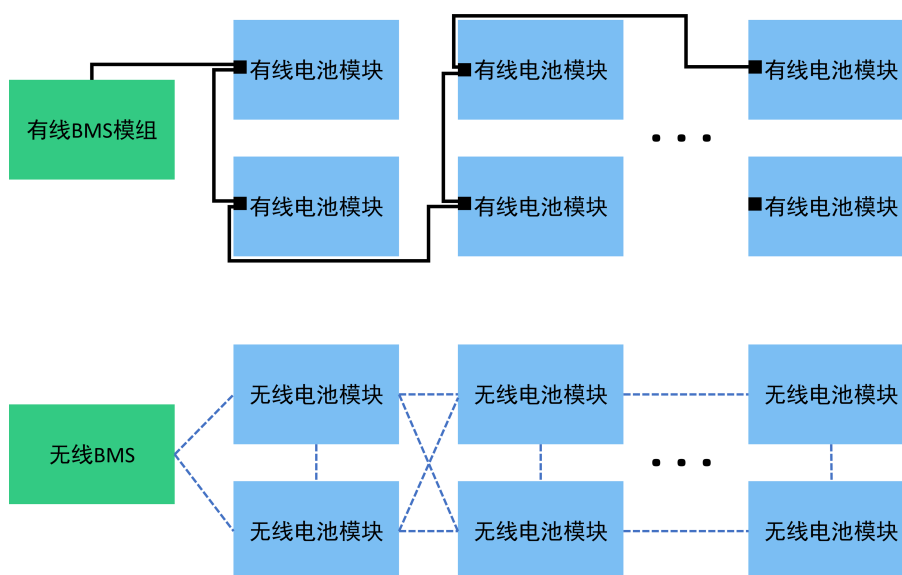


图 6 采用有线（CAN或菊花链）通讯的BMS和采用无线通讯的BMS

随着动力电池系统朝着无模组化（Cell to Pack, Cell to Vehicle）发展，无线电池管理系统wBMS的优势凸显：

- 1) 系统冗余性更好：有线的CAN总线和菊花链，链路中的某个节点失效有可能引起整个链路通讯中断。而wBMS中单点失效对整体的影响不大，系统冗余性更好。
- 2) 可拓展性更强：wBMS在网络中添加和删除节点比较灵活，可拓展性较强，能很好地与CTP、CTC、CTV及巧克力换电等做适配。
- 3) 高压和低压能有效隔离：汽车中大多数电子控制单元ECU都是出于低压（9~14V）系统，而BMS则连接着高压（>400V）和低压（9~14V）的模块，因此BMS设计中首要考虑的问题就是如何有

效地将高压和低压单元隔离，减少高压系统对低压系统的干扰，而采用无线通信方式就能够天然地将高压单元和低压单元有效隔离。

4) 综合成本较低：对于有线BMS，采用集中式架构使得电池单体到BMS的采样线束比较长，影响动力电池的空间和重量，采用分布式架构导致成本显著上升。而采用无线通信，既能让从控模块更靠近电池模组，又能省去通信线束，综合成本较低。

2.3.5 无线电池管理系统 wBMS 的优势

无线电池管理系统wBMS具有以下优势：

- 1) 轻量化：相比现有方案，wBMS的电池包低压线束数量减少10%，满足汽车轻量化趋势。
- 2) 设计灵活度：无线连接通过减少线束增大了可用空间，使得电池组位置摆放更加灵活，使得可替换、可升级的电池模组成为可能，具备更好的可扩展性。增大的可用空间提高了整包电池能量密度，还可用于增加排气通道和安全阀，增强电池从模组到包级别的热扩散能力，提升电池系统的安全性。
- 3) 减少故障和售后维护：有线连接器可能会出现机械故障，如震动过程接插件松动或者短线，降低了机械可靠性。
- 4) 生产便利性：电池线束进行端接需要手动操作，使得电池包的组装困难。这是一个高成本且危险的过程，因为电动汽车的高压电池模组是充电的。wBMS中取消通信线束，电池模组唯一需要的连接是电源端子，可以由机器人自动化完成。
- 5) 提升可维护性：安全的无线功能意味着电池包的状况可以通过授权修理厂中的诊断设备方便地分析，而无需接触电池包。如果检测到故障，有故障的模组可以轻松移除和更换。无线配置简化了电池系统中新模组的安装，更换模组更容易，电池系统安装及维修更加方便。
- 6) 简化拆卸处理：电池包内可回收金属和潜在危险材料的处置需要批准和监管，简单连接和通信线束的取消，使得电池模组的拆卸比有线电池更容易且更快速。
- 7) 梯次利用：wBMS技术支持读取每个模组的关键电池数据，可以单独确定每个电池的状况。结合模组最初生产时的数据，二次电池模组将能在下一应用中得到优化使用。在换电和电池作为储能二次利用等场景中，因数据的易获得使得电池模组梯次利用更容易实现。
- 8) 全生命周期管理：在电池包的整个生命周期中，从初始组装到处置再到梯次利用，电池包的wBMS功能可确保车辆制造商及其所有者能够轻松跟踪电池状况，保持性能和安全，并使其价值最大

化。wBMS技术还可以通过边缘技术和云技术来支持可追溯性、生产优化、储存运输中的监控、早期故障检测和延长寿命。

第三章 无线电池管理系统技术方案

3.1 BMS通信需求

3.1.1 BMS 安全需求

无线电池管理系统wBMS的安全需求分为功能安全需求和信息安全需求。功能安全需求主要是防止或减轻由wBMS的某一失效所带来的不合理风险，这主要包括单个或整体电池的过电压、过电流、欠电压、欠电流、热管理失效等带来的风险。在乘用车和商用车上，整个wBMS系统应该满足国际标准ISO 26262的ASIL D等级。同时，由于内部无线短距通信要求低时延、高可靠、精同步和高并发，wBMS势必会比有线BMS的功能安全需求更多。例如，wBMS应该准确监测电池状况并在监测到危险事件时快速、可靠和安全地作出响应，以减轻危险或破坏；wBMS要求无线通信具有足够的抗干扰性，来抵抗汽车行驶过程中外部干扰源的干扰，这些干扰源来自于行驶的地点以及附近其他相同频段的无线设备；如果wBMS通信以某种方式中断，汽车可以恢复到性能降低的“安全模式”以允许驾驶员采取行动，或在wBMS完全失去通信的情况下安全停车。信息安全需求主要是防止或减轻由wBMS的漏洞所造成的损失，主要包括安全存储、安全启动、安全调试、安全审计日志、安全诊断、安全刷写等一整条使用链路的需求。wBMS信息安全的目标是保证系统的可用性、身份真实性，完整性、保密性、隔离性等。在乘用车和商用车上，整个系统应该满足国际标准ISO/SAE 21434的SIL 4等级。为了实现这些目标，需要通过一系列加密算法和密钥。例如，使用基于AES的加密来扰乱数据，以防止信息泄露给任何潜在的窃听者；算法需要经过充分测试且符合无线通信标准；算法和密钥大小符合最低128bit的安全强度，且适用于静态数据保护；利用双密码算法在汽车长生命周期内提供双保险，避免一破通破；算法协商机制支持加密和完整性保护算法的协商，方便后续引入新的算法等。

另外，在大规模的储能应用中，如火力发电储能、太阳能发电储能和风能发电储能，其数据量、功率和电池用量远高于商用车和乘用车，但是其使用工况是较稳定的，因此需要wBMS在成本和安全需求方面作相应的协调。

3.1.2 BMS 性能指标

动力电池管理系统无线通信技术减少了从控（Cell Supervisor Unit, CSU）之间、从控CSU与电池管理系统主控（Battery Management Controller, BMC）之间的连接线，但是从控CSU与电芯之间的电压&温度的采样线束、电池管理系统与接触器、电池管理系统与Pyrofuse、电池管理系统与整车

控制单元（Electronic Control Unit, ECU）之间的控制连接线不受影响。如下图绿色线束即为减少线束部分。

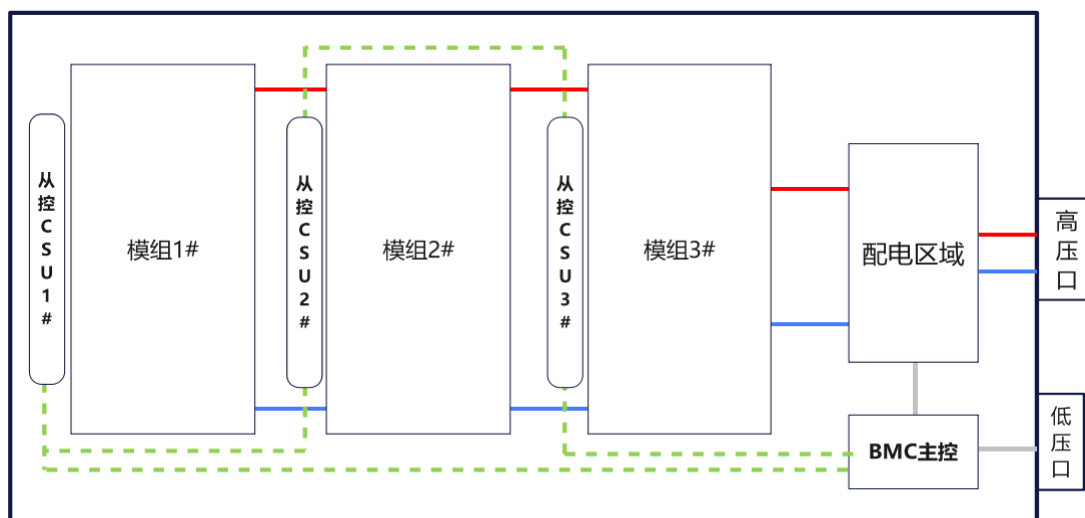


图 7 动力电池包体示意图

3.1.2.1 通信指标

表 2 车载wBMS通信指标

索引	项目	描述
1	有效通信距离	低功耗情况下，无线通信的通信直线距离应不低于 15 米
2	链路预算	链路预算不低于 95db
3	数据吞吐量	每个无线器件多达 400 字节
4	通信时延	通信时延小于 10ms
5	传输可靠性	99.9999%
6	节点数量	最大节点数量不低于 32
7	故障恢复时间	系统无线通信故障恢复时间应小于500ms
8	生存时间	系统无线通信生存时间应小于10s
9	接入认证	主控板可对网络中设备进行身份验证
10	无线通讯功耗	主控板或从板因无线通信增加的工作功耗低于5mA，增加的休眠功耗低于10μA
11	组成网络时间	系统无线通信组成网络时间应小于200ms
12	网络重启时间	无线通信网络重启时间应小于100ms
13	消息完整性	传输的数据通过消息身份验证代码进行保护校验
14	首次采样上传时间	首次采样上传时间不超过300ms
15	采样遍历周期	系统采样遍历周期不超过50ms

表3 储能wBMS通信指标

索引	项目	描述
1	有效通信距离	低功耗情况下，无线通信的通信直线距离应不低于100米，具体应用场景参考电池模组数量综合考虑自定义
2	链路预算	链路预算不低于95db
3	数据吞吐量	每个无线器件多达400字节
4	通信时延	通信时延小于30ms
5	传输可靠性	99.9999%
6	节点数量	最大节点数量不低于32
7	故障恢复时间	故障恢复时间应小于2s
8	生存时间	生存时间应小于20s
9	接入认证	主控板可对网络中设备进行身份验证
10	无线通讯功耗	主控板或从板因无线通信增加的工作功耗低于5mA，增加的休眠功耗低于10 μ A
11	组成网络时间	系统无线通信组成网络时间应小于1s
12	网络重启时间	无线通信网络重启时间应小于1s
13	消息完整性	传输的数据通过消息身份验证代码进行保护校验
14	首次采样上传时间	系统首次采样上传时间建议不超过300ms，具体应用场景根据电池模组数量综合考虑自定义
15	采样遍历周期	系统采样遍历周期建议不超过100ms，具体应用场景根据电池模组数量综合考虑自定义

3.1.2.2 电池系统可行性

wBMS与无线从控CSU在信息传输过程中，路径损耗和障碍物衰减会减弱信号强度，属于信号衰减范畴；环境中的干扰和噪声同样会减弱原信号强度，属于信号干扰的范畴。动力电池系统网络覆盖设计时应尽量减少不必要的信号衰减和干扰，提升信号强度，增加信号有效传输距离。

例如电池包在进行结构件设计时，需要考虑尽量规避BMS与CSU之间的结构障碍物，如塑胶件、支架、横梁等结构形式对信号的阻碍，尤其是金属障碍物，有可能完全阻隔、反射掉无线信号的传播；电池包在进行BMS与CSU产品结构布置时，在尺寸允许情况下，尽量缩短两者之间的空间距离，减少因传输距离增加带来的信号衰减。

除了信号衰减会影响接收端对无线信号的识别外，干扰和噪声也会在一定程度上产生影响。因此布置wBMS时需要避开电池包的高频开关、高压回路等易产生干扰源的产品。

3.1.2.3 成本收益

wBMS适用于换电系统、储能系统、乘用车、商用车等领域；基于不同的使用场景，wBMS的适用性和收益有所差异。

对于换电系统，动力电池作为拆卸频繁的零部件，对高低压接口使用寿命的要求明显提高，同时开发难度大，结构复杂，成本高。针对这种情况，建议应用wBMS方案，实现无线通信，一方面减少接口产品开发成本，另一方面降低接口产品设计开发难度，提高使用频率。在换电过程中，wBMS作为非更换件使用。

对于储能系统，动力电池/模组数量多，有线BMS拓扑结构复杂，存在线束成本高、线束布置复杂、装配时间长等问题。若使用wBMS，如星型、树型拓扑结构，将大量减少线束使用，实现大面积通信覆盖。

对于新能源汽车，相对模组/电池数量少、体积较小，为提升电池包模块化、智能化及便利性，建议使用wBMS，实现控制器之间的数据传输、便于协同管理，提升电池包能量密度。相比现有方案成本会有所增加，需综合考量。

3.1.2.4 拓扑结构和EE架构

电池管理系统无线通信网络应支持星型组网、树型组网、网状组网。星型组网中，主控板作为中心节点，从板作为深度1级的分节点。树型组网中，顶端是树根，树根以下带分支，每个分支还可以再带分支。网状组网中，从板不但可以和主控板通信，也可以和附近的从板通信。根据模组电池数量结合成本，选择星型组网、网状组网、树形组网。

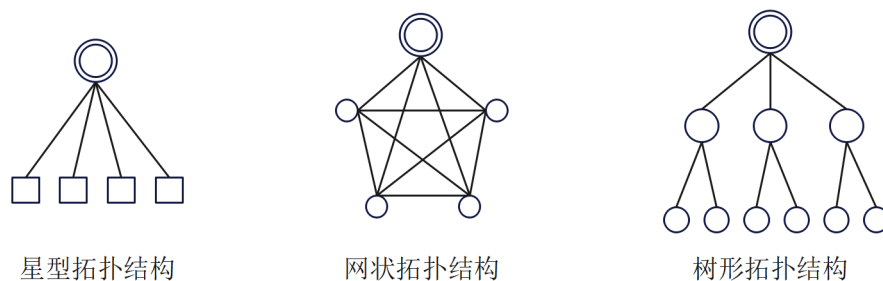


图 8 电池管理系统无线通信拓扑结构

图9~图12为电池管理系统应用无线电池管理系统的EE架构图。如图 9所示，电池管理系统主控单元外置，通过无线通信与动力电池内的wBMS实现信息交互，实现成本较高，建议在换电系统上应用。

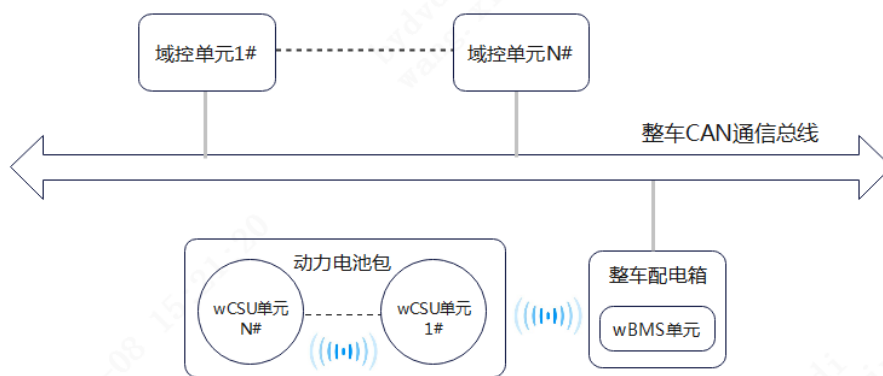


图 9 电池管理系统主控单元外置应用拓扑

如图 10所示，电池管理系统主控单元内置，电池包外设计无线通信转换模块，实现wBMS与整车系统的信息交互，实现成本较高，建议在换电系统上应用。

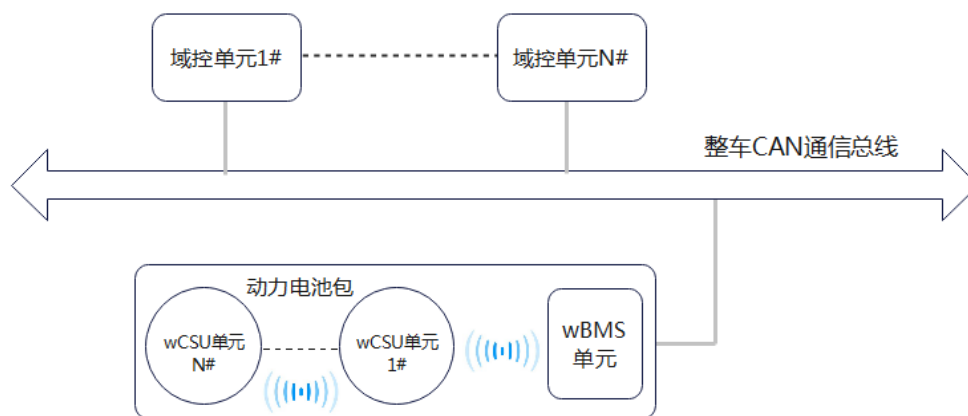


图 10 电池管理系统主控单元内置应用拓扑应用拓扑

如图 11所示，根据无线通信发展趋势，未来整车实现全区域覆盖无线网络，各域控及控制单元之间实现无线通信，实现整车去线束化目标。

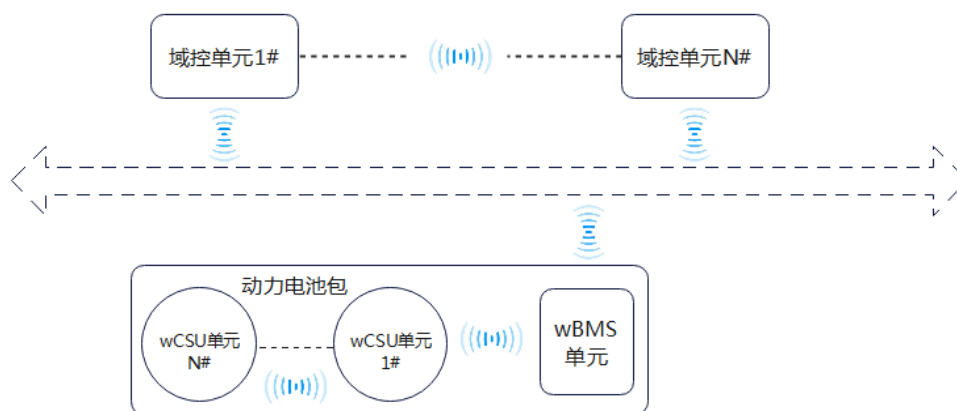


图 11 整车实现全区域覆盖无线网络应用拓扑

如图 12和图 13所示，为树型和星型网络拓扑结构，建议适用于储能系统。

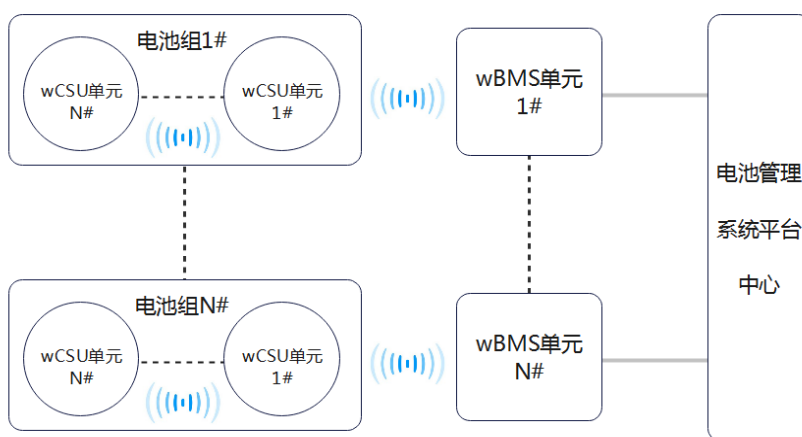


图 12 储能树型应用拓扑

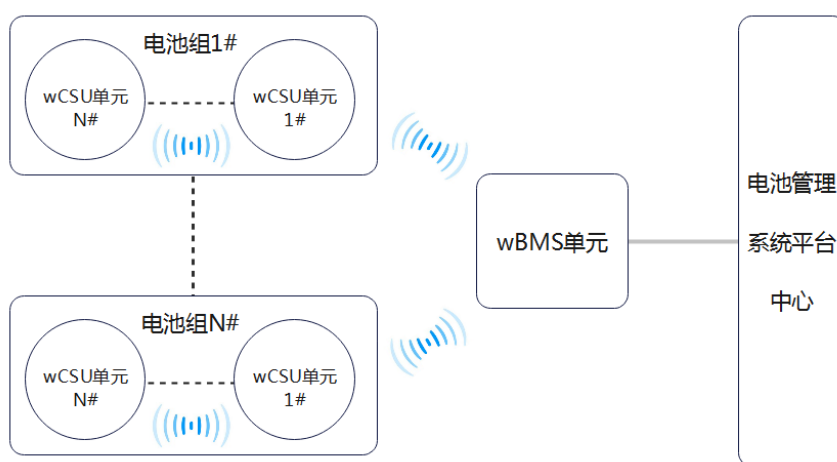


图 13 储能星型应用拓扑

3.1.3 BMS 系统级测试

BMS在整车开发过程中需经过零件、系统、整车三个层级的测试验证。

在零件级验证中，分别对BMS硬件设计和软件设计进行测试。

通过测试BMS产品的电气特性、机械负荷、气候负荷、化学负荷、电磁兼容特性及其他技术要求中规定的产品特性，评估产品是否满足需求。目前对于BMS的测试标准遵循国标GB/T 28046 《道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验》展开，各整车企业经过产品迭代开发和技术积累，部分企业会按照自己的企业标准来进行测试。

通过BMS软件合格性测试，结合产品软件需求、软件架构对BMS软件质量进行评估。在软件质量认可通过后，对软硬件进行集成，依据BMS产品系统需求对集成后的BMS软硬件总成进行测试评估。

在系统级验证中，测试对象为搭载被测BMS的动力电池总成。测试主要考核BMS与电池本体电化学反应相关的控制功能。主要包括动力电池SOC估算、SOP估算、SOH估算及相关的采样功能性能测试。

动力电池总成的测试中涉及电池安全的部分遵循国标GB 38031《电动汽车用动力蓄电池安全要求》展开，其中过温保护、过流保护、过充电保护、过放电保护为国标要求项目，与电池安全相关性极强，需重点关注。

动力电池总成SOC估算、SOP估算、SOH估算作为BMS的核心功能，估算精度是BMS开发的重中之重。估算精度及估算所需的采样功能测试与算法本身关系密切，测试方案的合理性和覆盖度也是行业关注的重点内容。

在整车级验证中，测试对象为搭载被测BMS的整车。测试主要考核整车层级需要BMS实现的功能形成是否正常。主要包括充电功能、接触器控制功能及电池故障诊断等支持车辆使用的功能。

BMS作为三电系统核心控制器，需通过控制电池包内接触器为车辆驱动提供能量。整车测试暂未形成行业统一的测试要求，各车企依据自身功能实现情况进行针对性测试。

3.2 私有wBMS通信方案

基于电池包分布式拓扑结构，部分芯片厂商与电池供应商提供wBMS的私有通信解决方案，这些方案多是基于典型的低功耗无线协议，如IEEE 802.15.5和低功耗蓝牙，增强通信性能和安全方面的考虑，满足车载需求。

ADI的wBMS方案包括电源、电池管理、射频通信和系统功能²，支持ASIL-D安全性和模块级安全性，通过ISO/SAE 21434产品认证。由包括电池模组监视终端和电池控制器终端组成SmartMesh网络，SmartMesh符合WirelessHART (IEC 62591)和IEEE 802.15.4e技术标准，工作于2.4GHz非授权频谱，使用时间同步通道跳变（TSCH, Time Slotted Channel Hopping）链路层，通信数据速率为1 Mbps和2 Mbps，网络节点工作于同步模式，网络通信被组织成时隙，支持多跳通信，通过信道跳变和冗余路径对抗干扰、物理遮挡和多径衰落。ADI方案已经供货通用汽车Ultium电池平台，达到节省约线束和减少电池组体积的目标。

德州仪器TI的wBMS方案为通过汽车认证的SimpleLink³，整体方案满足ASIL-D功能安全要求和IEC 62280-2014标准的安全性。SimpleLink系统采用德州仪器的私有无线协议，工作于2.4GHz非授权频谱，数据速率为2 Mbps，信道划分与低功耗蓝牙类似，但不包含三个广播信道，以实现最小化干

² 根据 ADI 官方网络资料总结

³ 根据 TI 官方网络资料总结

扰。由主节点BCU和从节点CSU组成星型架构网络，可支持多达100个节点，节点延迟低于2ms，并且每个节点的测量均可实现时间同步，数据可靠性为99.999%。

3.3 星闪SLE技术wBMS通信方案

3.3.1 星闪SLE优势及特性

星闪无线短距通信技术是标准化的新一代无线短距通信技术，可广泛满足不同应用场景对低时延、高可靠、精同步、多并发的技术需求。目前动力电池退役年份、退役时容量、电池厂家等信息不全，普遍以孤岛形式存在，无法互联互通，导致梯次利用残值评估困难，梯次利用成本高。相较于私有技术，标准化的星闪无线短距离通信技术，通过搭载到无线电池管理系统上，更有利于动力电池数据和信息共享，助力跨领域电池梯次利用。星闪无线短距通信技术主要由星闪联盟制定，作为全栈原创的新一代无线短距通信技术，定义了从星闪接入层到基础应用层的端到端标准体系。截止日前，星闪联盟的成员已经超过476家⁴。

现有主流无线短距通信技术在无线电池管理系统应用场景下，会面临或多或少的短板问题，如传统的蓝牙的容量和时延等劣势、WiFi的异步和系统效率等问题、UWB的成本和组网问题。星闪的多节点并发和多业务并发组网机制，可以更好地适配无线BMS应该场景，具有高通信速率、高密度组网、低传输时延、抗干扰等优势。电池是新能源汽车的核心零部件，占整车成本40%~50%。为了让电池实现更高能量密度、更安全、长寿命、低成本的目标，电池数据的最大化采集和挖掘、新型传感器的应用、基于电芯级无线电池管理系统已经成为产业发展的热点，以解决电芯内部温度难采集、SOC和SOH状态估算误差较大、大数据安全预警和报警检出率和准确率有待提升等痛点问题。另外，和动力电池不同，储能系统电池数量更多、系统更复杂、运行环境恶劣。这些业务和诉求对无线通信技术的性能和安全等方面提出了更高的要求。星闪SLE模式作为一种高并发、高通信速率、低时延、高可靠、低功耗的无线短距通信技术，可以支持最高12Mbps物理层传输速率、1024用户接入和高密度组网、Polar码技术和新调频算法、国密SM4算法和国际AES算法和企业使用自定义的安全算法，可以更好的匹配这些核心业务需求和发展趋势。

3.3.2 星闪SLE安全机制

星闪SLE定义了节点之间安全通信所需的安全技术，包括配对和鉴权管理、密码算法协商、信息加密和信息完整性保护等技术，可为无线电池管理系统的安全提供有效保障。考虑到无线电池管理系统的高安全需求和场景限制，可以使用PSK方式进行配对和鉴权。传统的蓝牙和WiFi技术仅支持国际AES算法，而星闪SLE技术支持的加密算法和完整性保护算法有国密SM4算法和国际AES算法。同

⁴ 国际星闪联盟提供的会员数，截止到报告完成时间 2023 年 11 月。

时也支持企业使用自定义的算法。同时，为了提高星闪无线通信系统抵抗攻击的能力，星闪还定义了星闪无线通信终端设备应满足的设备安全要求，包括安全存储、安全执行、安全防护和安全管理等方面。

3.3.3 星闪SLE性能

星闪SLE技术（Sparklink Low Energy，星闪低功耗接入技术）采用Polar信道编码提升传输可靠性，减少重传节省功耗，同时支持最大4MHz传输带宽、最大8PSK调制，支持1对多可靠组播，支持4KHz 短时延交互等特性。星闪技术凭借突出的传输性能满足了新兴车载应用的通信需求。其中，SLE可提供低成本、低功耗的空口接入。SLE 使用单载波传输，带宽支持1MHz、2MHz和4MHz，调制方式支持GFSK、BPSK、QPSK和8PSK。相比现有低功耗无线短距技术，SLE在相同深覆盖条件下可稳定支持 128kbps 音频传输，支持更高速率（峰值 12Mbps），支持无损音频传输，支持可靠组播传输，支持数百量级节点接入。SLE 的标准化工作于2021年底完成，性能指标分析见表4。

表 4 星闪SLE性能指标

索引	项目	描述
1	峰值速率	最高支持12Mbps数据传输
2	时延	支持250微秒完成一次数据交互
3	多用户能力	支持1024用户接入
4	网络覆盖及拓扑	支持一对一单播及一对多组播
5	安全性	高（支持双向认证，算法协调保障）

3.3.4 星闪SLE测试

除3.1.3节所述系统级测试，不管采用有线BMS技术还是无线BMS技术，BMS系统对于信号传输的实时性可靠性的要求是一致的。对于可靠性来说，相较于传统的有线BMS，wBMS的测试除了传统的监测和管理电池组的工作状态、监控电池组的异常状态、管理电池组故障等测试外，对于无线组网的稳定性测试也尤为重要，特别是在汽车的复杂电磁环境中，不仅存在车载蓝牙、车载WiFi和蜂窝信号等各种网络型号，还有电机等大功率设备工作带来的底噪抬升。在这些复杂的环境中能够避免干扰保证通信稳定可靠是非常重要的。另外wBMS本身的通信的EMI辐射测试也必要的，降低对其他电子设备的干扰，符合无线的规范法规。在实时性这一方面也要求wBMS能实现高速率高并发，降低通信的延迟，保证电池数据的实时性。

在基于星闪SLE技术的wBMS中，SLE无线通信模块需要满足一定的指标要求。本节主要介绍wBMS无线模块射频物理层的测试项目、指标和测试案例。

3.3.4.1 星闪SLE通信测试项目

根据《星闪无线通信系统接入层低功耗技术要求和测试方法》，SLE模块需要对其发射机、接收机的如下项目进行测试。

表 5 wBMS射频测试项目

	测试项	测试条目
发射机	发射功率	○ Power
	调制精度 (FSK)	○ Delta F1 ○ Delta F2 ○ Delta F2/F1 ○ Zero Crossing Err
	调制精度 (PSK)	○ RMS EVM ○ 99% EVM ○ Peak EVM
	频率容限	○ Init Freq Error ○ Freq Drift ○ Freq Drift Rate
	发射杂散	○ ACP
接收机	接收功率范围	○ 参考灵敏度 ○ 最大输入电平
	接收机选择性	○ 频段内选择性 ○ 频段外选择性 ○ 干扰互调
	接收机RSSI测量精度	○ RSSI 精度

3.3.4.2 星闪SLE通信测试指标

对于抗干扰测试，最主要的难点在于需要模拟汽车真实的电磁环境，在这个基础上做测试对应的抗干扰测试，要求在这样的电磁环境下能够稳定通信。对于模拟汽车真实的电磁环境而言我们可以设计多种典型场景，对这些场景的电磁环境进行录播然后用于测试wBMS模组的通信可靠性。

另外对于辐射EMI测试，这个需要符合应用当地的法律法规。在GB/T 12572-2008中规定杂散域发射功率限值适用频率范围是9kHz~300GHz。但在实际测量中，杂散域是有限制的。各种无线电发射设备的杂散发射测试频段的建议要求见表6。

表6 无线电发射设备杂散发射测量频段

基频频段	杂散发射测量频段	
	下限频率	上限频率
9kHz~100MHz	9kHz	1GHz
100MHz~300MHz	9kHz	10次谐波频率
300MHz~5.2GHz	30MHz	5次谐波频率

基频频段	杂散发射测量频段	
	下限频率	上限频率
5.2GHz~13GHz	30MHz	26GHzHz
13GHz~150GHz	30MHz	2次谐波频率
150GHz~300GHz	30MHz	300GHz

规定杂散发射功率电平的测量带宽定义为参考测量带宽，表7是各测量频段的参考测量带宽建议值。

表7 各测量频段的参考测量带宽建议值

测量频段	参考测量带宽
9kHz~150kHz	1kHz
150kHz~30MHz	10kHz
30MHz~1GHz	100kHz
1GHz以上	1MHz

对于并发测试，基于有线的BMS要求，以使用较多的CAN总线为例，一般最大的传输速率可达1Mbps，这也要求wBMS的无线通信速率也需要大于1Mbps。

3.3.4.3 星闪wBMS通信射频测试例

1) 组网：WT-328E综测仪支持全部SLE射频性能测试，典型测试组网如下

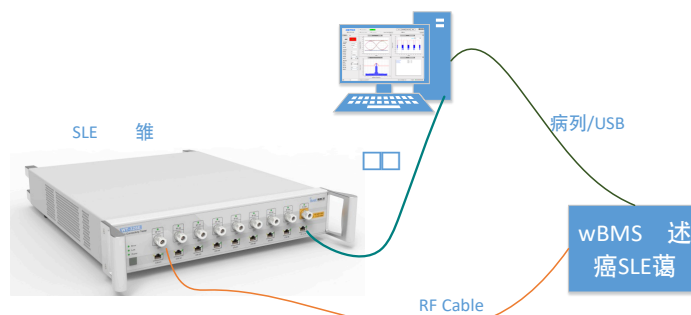


图 14 典型测试组网示意图

2) 研发场景的图形化测试UI如下所示：切换不同视图可以展示不同的测试结果；

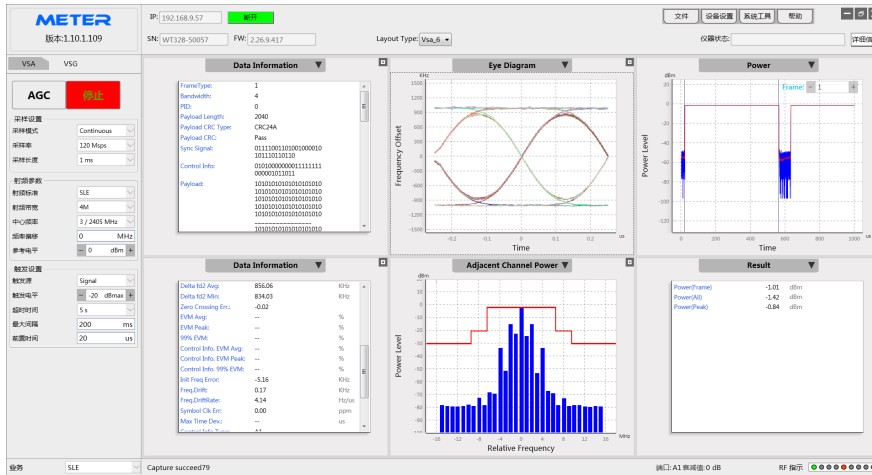


图 15 研发场景下的图形化测试

3) 面向SLE模块生产测试的自动化测试程序;



图 16 面向SLE模块生产测试的自动化测试程序示意图

第四章 基于星闪SLE技术的全生命周期无线电池管理系统

4.1 星闪 SLE 高通信速率设计

星闪无线通信标准体系包括空口接入层，基础服务层，星闪网络和传输层，星闪基础应用层和星闪具体应用实例。

星闪低功耗通信工作模式SLE (Sparklink Low Energy)支持1MHz工作带宽，2MHz工作带宽和4MHz工作带宽，支持GFSK、BPSK、QPSK和8PSK调制。基于大工作带宽和高阶调制，星闪SLE模式可以支持最高12Mbps物理层传输速率。

星闪SLE数据链路层支持同步数据链路和异步数据链路，支持控制面信令和数据面信息复用传输。星闪基础服务层控制面通过QoS管理和连接管理，可以针对不同QoS要求的数据传输配置不同的传输通道。星闪基础服务层数据面支持基础帧、流传输帧和可靠帧，通过灵活动态可扩展的报文头支持不同的传输模式，支持低报文头开销的高效率传输。

4.2 星闪 SLE 抗干扰设计

4.2.1 信道编码 polar 码

Polar码是基于信道极化理论构造的一种信道编码，是经过理论分析论证可以达到香农极限的信道编码，且具有可实用的线性复杂度编译码能力而受到业界重视，它可以较好的对抗随机错误。

信道极化包括信道合并和信道分解。信道经过合并分解后，不同的信道会呈现其容量不一致的情况，有些信道容量增大甚至趋于无噪声信道，有的信道容量减小趋于全噪声信道。Polar码的编码策略就是应用了这种极化现象，利用信道容量大的信道传输有用的信息，利用信道容量小的信道传输已知的信息或不传信息，以此来提升传输的可靠性。

在星闪SLE接入技术中，划分了4种无线帧类型，他们都包含以下字段，如表8所示，其中Polar码用于编码无线帧中的物理层控制信息和物理层数据信息、完整性保护字段(可选)和循环冗余校验字段。

表 8 4种无线帧类型

前导信号	同步信号	物理层控制信息	物理层数据信息	完整性保护字段	循环冗余校验 字段
------	------	---------	---------	---------	--------------

对于物理层控制信息，其编码信息如表9所示：

表 9 Polar码物理层控制信息编码信息

无线帧类型	控制信息	控制信息比特	Polar信道编码比特	调制方式
无线帧类型1	无编码			GFSK
无线帧类型2	控制信息 A1/A2/A5	40比特	64比特	QPSK
	控制信息 A3/A4/A6/A7	48比特	64比特	QPSK
无线帧类型3	控制信息 B1/B2/B3/B4/B5	51比特	256byte	QPSK
无线帧类型4	控制信息 B1/B2/B3/B4/B5	51比特	256byte	BPSK

除无线帧类型1以外，无线帧类型2，无线帧类型3和无线帧类型4的物理层数据信息、完整性保护字段(可选)和循环冗余校验字段的比特序列都通过极化码进行信道编码，并经过PSK调制产生数据信息符号，其中无线帧类型2通过不进行分段CRC的码块分段进行极化编码，无线帧类型3和无线帧类型4对输入比特序列进行分段并对每个分段增加循环冗余校验再进行极化编码，从而进一步提升了系统可靠性。

星闪SLE使用低功耗高性能的极化码(Polar)作为信道编码，支持13种编码调制方式，具体如表10所示：

表 10 星闪SLE编码调制表格

调制编码索引	调制方式	传输效率	编码速率(R)
0	BPSK	0.2500	1/4
1	BPSK	0.3750	3/8
2	QPSK	0.5000	1/4
3	QPSK	0.7500	3/8
4	QPSK	1.0000	1/2
5	QPSK	1.2500	5/8
6	QPSK	1.5000	3/4
7	QPSK	1.7500	7/8
8	QPSK	2	1
9	8PSK	1.8750	5/8
10	8PSK	2.2500	3/4
11	8PSK	2.6250	7/8
12	8PSK	3.0000	1

基于1024长度的极化码母码，星闪原创性地提出了低时延、低复杂、度低功耗的速率适配方法，根据信息比特长度，选择性能最优、时延最短的512/256/128/64等编码长度。

基于低时延、低功耗、高性能的Polar信道编码，在强干扰/深覆盖场景下，星闪可以支持128kbps信号可靠传输，是现有无线短距系统传输速率的两倍，并获取约50%传输功耗收益。在常规干扰/常规覆盖场景，相比现有无线短距系统，可获取约55%-70%传输功耗收益，可提供9dB抗干扰增益。具体如图17所示。

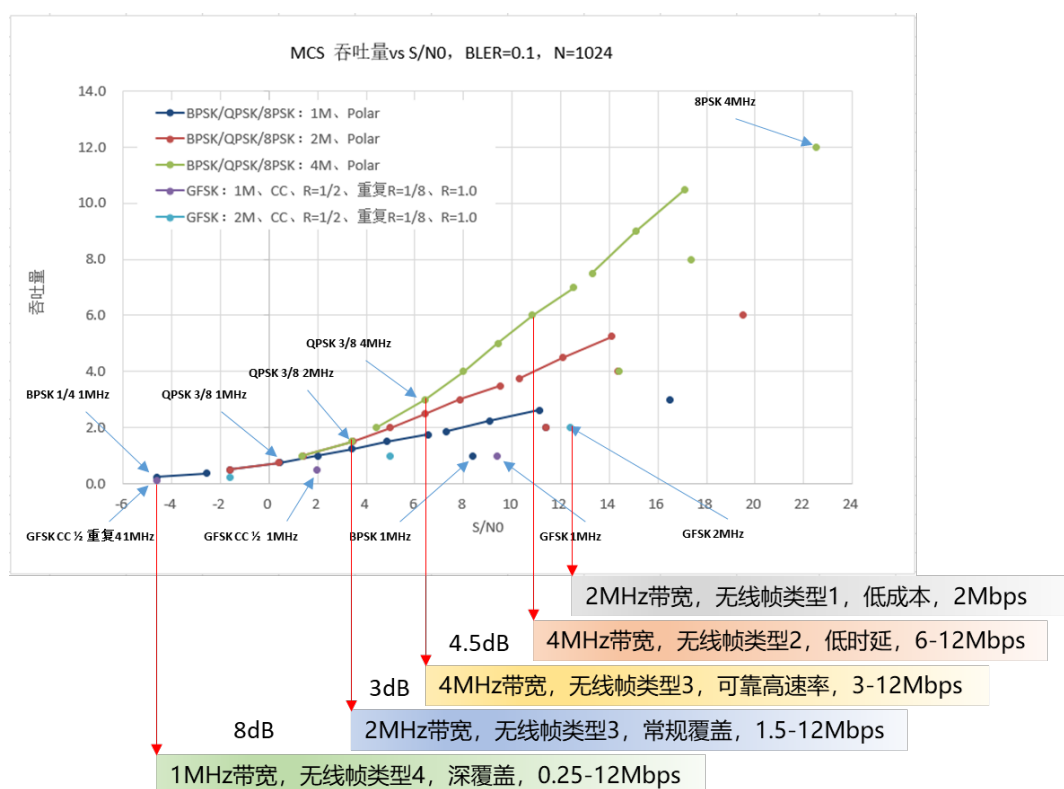


图 17 星闪调制编码等级和性能

另外，SLE系统还支持基于物理层ACK/NACK反馈的重传合并。当数据包第一次接收失败时，接收端可以反馈NACK信息，指示发送端重新发送数据包。当接收端接收到发送端的重传包时，可以将接收的初传包信息与重传包信息合并译码，增加抗干扰能力，提高传输可靠性。

4.2.2 跳频算法

星闪SLE接入技术采用跳频的通信方式，尽可能降低网内通信造成的互相干扰。在星闪系统中，广播链路和数据链路都设计了跳频机制，其中广播链路预定义3个广播信道，允许只使用部分广播信道进行广播，同时设置发现设备或者接入设备在所有广播信道上进行接收，这样既能减少信道占用导致的互相干扰，也能及时发现设备和接入设备做响应。

数据链路的跳频流程主要分为三个部分，分别为伪随机数生成过程，初次频点映射过程和可用频点映射过程。数据链路跳频的输入参数给伪随机数生成器之后，输出16比特的随机数，作为初次频点映射过程的输入。初次频点映射过程将随机数取模并映射后输出对应的跳频频点。如初次频点映射过程的结果为有效频点，则直接输出，如判断为无效频点，则继续使用可用频点映射过程确定跳频频点。

采用这样的随机跳频机制可以有效的避开干扰，发挥通信效能，提升通信的稳定性。

4.3 星闪 SLE 高密度组网设计

现有主流无线短距通信技术并不适用于wBMS高密度组网的应用场景。如传统的蓝牙具有容量和时延等劣势，WiFi具有异步和系统效率等问题，UWB技术具有成本和组网等短板，种种的问题导致这些主流无线短距通信技术无法适用于wBMS高密度、低时延、高可靠的应用场景下。

星闪系统的多节点并发和多业务并发组网机制，可以很好地适配电芯级wBMS的高密度组网需求。这种应用场景中需要实现电池单体监测功能，需要无线短距通信技术通讯能满足电芯信号采集和传输高度密集的技术特点，如图18所示。

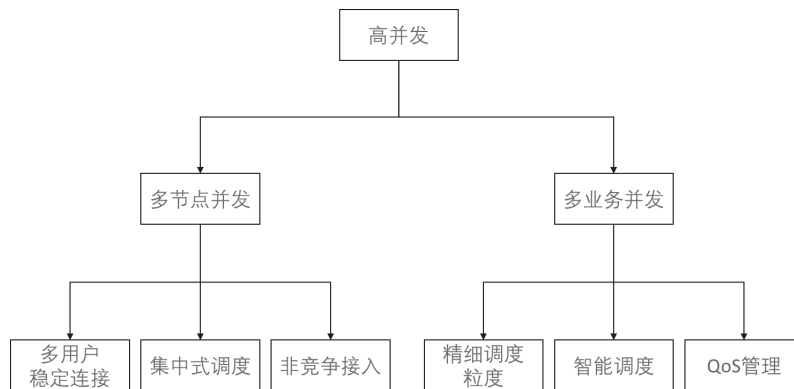


图 18 星闪系统的多节点并发和多业务并发组网机制

其中多节点并发是指单个G节点可以同时支持与多个T节点的连接，支持单个G节点同时为多个T节点提供服务。多业务并发是指对于单个T节点，支持单个T节点上同时存在多种不同类型的业务，星闪系统允许T节点进行必要的业务特征信息上报，辅助G节点进行智能调度。通过星闪网络层，多个节点可以组成多跳网络，并实现数据在多跳网络中的路由传输。星闪多跳组网中，管理节点负责星闪网络地址的分配和管理，当节点加入星闪网络中时，需要与管理节点进行交互获取星闪网络地址。同时，管理节点还可以提供基于服务的地址查询功能，星闪网络中的节点，可以通过与管理节点进行交互发现星闪网络中的服务和该服务的地址，根据该地址，星闪网络中的节点可以经过多跳

通信获取星闪网络中的服务。星闪网络层支持星闪端到端的数据传输，支持面向连接的可靠传输协议，也支持轻量级无连接的传输协议。

因此，星闪组网支持简单的星型网络，此时星闪G节点可以连接多个T节点，G节点和T节点间进行单跳通信。星闪还支持多跳网络，其中又可分为复杂的多跳自组织网络，和简单树网络。如图19所示，在简单树网络中，网络第一层是一个根节点，根节点的下一层是网络第二层，有N个节点。网络中，除根节点外的每个节点都向上有一个父节点，除最下一层的节点外，都向下最多有N个子节点。

在简单树网络中，当确定网络的层数L和叶子节点数N时，该网络中每个节点的地址可以唯一确定，同时在该网络中，从任何一个节点发起，到任何一个节点结束的路由，也唯一确定。在wBMS系统应用场景中，通过简单树可以极简化网络地址分配方法和路由计算方法。

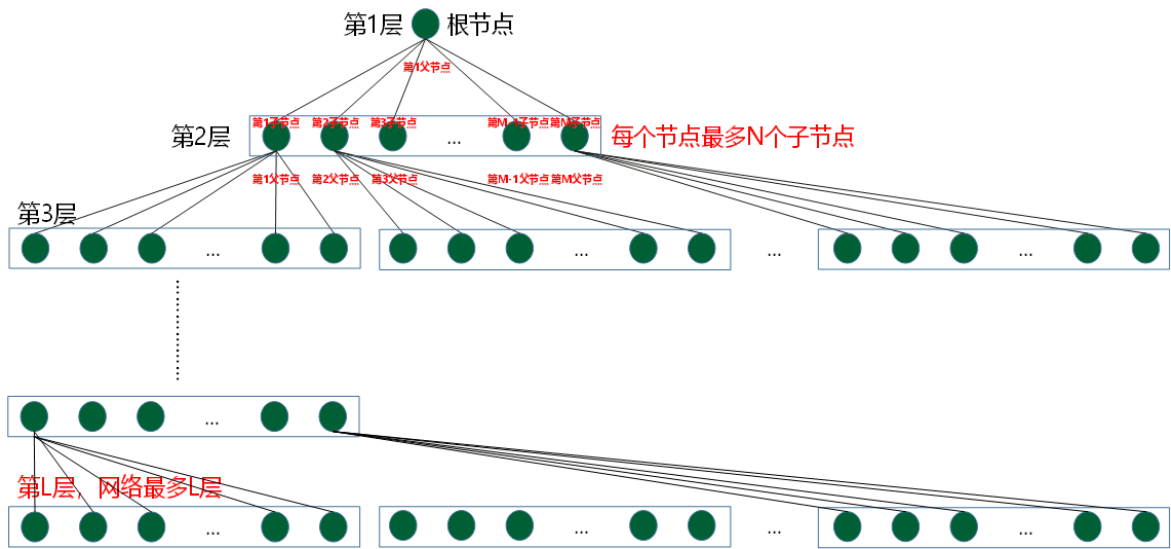


图 19 星闪SLE简单树网络

另外，星闪通过事件和事件组的时间资源配置，可实现一个节点对多个节点的数据组播传输，具体如图20所示。时间资源分配中的事件内间隔为配置值，后发节点的发送时刻由该值严格确定。其中事件间隔和事件组间隔是约束值，只需设置好后发节点的发送结束时刻与先发节点的发送开始时刻中间的时间间隔即可。时间域的分配有利于增大星闪系统的并发量。

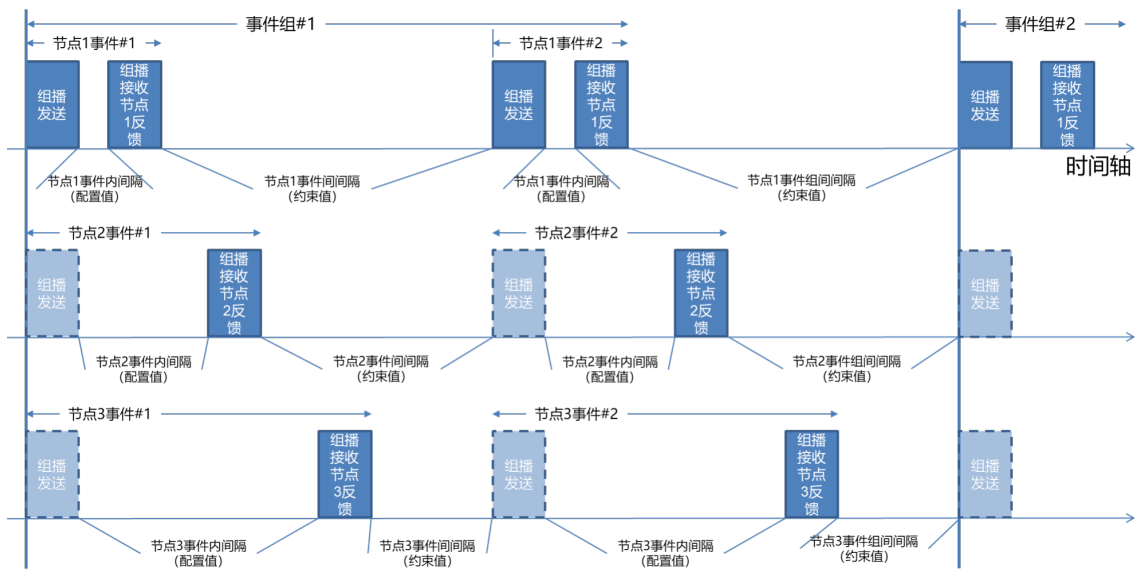


图 20 时间资源分配机制

4.4 星闪 SLE 高信息安全设计

星闪SLE定义了节点之间安全通信所需的安全技术，包括配对和鉴权管理、密码算法协商、信息加密和信息完整性保护等技术，可为无线电池管理系统的安全提供有效保障。

4.4.1 空口通信安全

1) 配对和鉴权管理

星闪SLE支持六种配对和鉴权方式，如表11所示：

表 11 星闪SLE配对和鉴权方式

索引	配对和鉴权方式	描述
1	数字比较	比较G节点和T节点上显示的数字是否一致
2	通行码输入	一个设备显示一组数字，另外一个设备通过键盘输入该数字
3	口令验证	用户在G节点和T节点的用户界面上输入相同的、满足复杂度要求的数字或字符的组合（口令）
4	带外方式	通过额外的技术来进行身份鉴权，如NFC（near filed communication，近场通信）
5	PSK方式	将256比特共享密钥PSK预配置在G节点和T节点上，G节点和T节点基于该PSK进行身份鉴权
6	免输入	G节点和T节点直接配对，不能支持抗中间人攻击。建议使用该方式时做些限制，比如需要用户按特定按键

考虑到无线电池管理系统的高安全需求和场景限制，可以使用PSK方式进行配对和鉴权。厂商将256比特共享密钥PSK预配置在无线电池管理系统中的G节点和T节点上，G节点和T节点基于该PSK进行身份鉴权。从而实现无线电池管理系统内通信的接入身份认证，保证合法的用户才能接入系统。

密码算法协商

在配对过程中，G节点和T节点同时会协商安全算法，包括加密算法和完整性保护算法。加密算法和完整性保护算法的协商从双方都支持的算法中协商出优先级最高的算法。星闪SLE支持的加密算法和完整性保护算法有国密SM4算法和国际AES算法。同时也支持企业使用自定义的算法。

信息加密和信息完整性保护

配对和鉴权管理完成之后，G节点和T节点开始启动安全控制流程对空口通信进行安全保护。安全控制流程包括启动安全流程和暂停安全流程。启动安全流程开始后，G节点和T节点都需要将本地的用户数据和其他控制消息的收发暂停发送。G节点和T节点协商会话密钥，后续将在安全状态下继续用户和其他控制消息的收发。暂停安全流程的目的是重新生成连接的会话密钥，以支持在不断开连接的情况下对通信双方的密钥进行动态刷新，从而实现更好的安全性。

星闪SLE支持加密和完整性保护的灵活开启或者关闭。考虑到无线电池管理系统的高安全需求，建议将加密和完整性保护都同时开启，并建议选择业界主流的安全算法（如SM4或AES）。

4.4.2 星闪设备安全

为了提高星闪无线通信系统抵抗攻击的能力，星闪还定义了星闪无线通信终端设备应满足的设备安全要求，包括安全存储、安全执行、安全防护和安全管理等方面，如表12所示。

星闪设备应支持敏感信息的安全存储，防止敏感信息泄露或篡改。敏感信息包括密钥、口令、用户身份、安全上下文、白名单、黑名单等。星闪设备存储不同用户的数据时，应支持不同用户数据的安全访问控制机制。星闪设备的安全敏感操作（如加密、解密、完整性验证等）应在安全环境中执行。同时建议支持安全启动。星闪设备的调试接口应在上市产品中禁用或进行安全访问控制。同时应该禁用闲置的物理端口。星闪设备应支持安全事件的安全日志记录功能和安全升级。

表 12 设备安全要求

设备安全	安全要求举例
安全存储	<ul style="list-style-type: none"> 敏感信息安全存储 用户数据的访问控制，防止未授权访问
安全执行	<ul style="list-style-type: none"> 安全敏感操作应在安全环境中执行 宜支持安全启动
安全防护	<ul style="list-style-type: none"> 调试接口禁用或进行安全访问控制

	<ul style="list-style-type: none"> 禁用闲置的物理端口
安全管理	<ul style="list-style-type: none"> 安全日志记录 安全升级

4.5 基于星闪 SLE 的 wBMS 功能安全设计

从功能安全角度，BMS系统要防止因电池单体过充电、过放电后再充电、过温以及动力蓄电池过流等危害行为导致的热失控事件，从而引发整车危害。根据GB/T 39086-2020《电动汽车用电池管理系统功能安全要求和试验方法》要求，BMS系统的安全目标和对应的安全需求，如表13所示：

表 13 BMS功能安全安全目标及对应的安全需求

序号	安全目标	ASIL	安全状态
SG1	防止电池单体过充电导致热失控	C	断开高压回路
SG2	防止电池单体过放电后再充电导致热失控	C	断开充电回路
SG3	防止电池单体过温导致热失控	C	断开高压回路
SG4	防止动力蓄电池系统过流导致热失控	C	断开高压回路

针对wBMS系统，需要重点考虑无线化通信模块的引入，不能违背整个管理系统的安全目标及对应的ASIL等级。将功能安全目标进行分解，分解到无线通信模块的功能安全要求，如表14所示：

表 14 BMS分解到无线通信模块的功能安全要求

序号	安全目标	分解到无线通信的功能安全要求
FSR1	防止电池单体过充电导致热失控	wBMS内部无线通信模块应保证BMU、BCU和充电机之间的正常通信和数据完整传输；
FSR2	防止电池单体过放电后再充电导致热失控	wBMS内部无线通信模块应保证BMU和BCU之间的正常通信和数据完整传输；
FSR3	防止电池单体过温导致热失控	wBMS内部无线通信模块应保证BMU和BCU之间的正常通信和数据完整传输；wBMS与VCU之间实现可靠的信息交互，温度越限需向VCU发送预警信号；
FSR4	防止动力蓄电池系统过流导致热失控	wBMS内部无线通信模块应保证BMU和BCU之间的正常通信和数据完整传输；

从上表可以看出，wBMS系统对于无线通信模块的功能安全要求主要是要保证主控单元与从控单元之间的正常、可靠的通信以及数据传输的完整性，从而避免通信失效。造成通信失效的原因有很多，可能是由软件故障引起，比如协议栈故障；也可能是由硬件故障导致的，比如发送接收寄存器破坏等；或者由外界干扰引起的故障，比如电磁干扰等。IEC62280-2014标准归纳了七种引发通信失

效的与消息错误相关的危害事件，包括非预期报文重复、报文丢失、报文插入、报文顺序错误、报文破坏、报文延迟、寻址错误。

为了应对无线通信系统面临的失效风险，可以采用多种不同的安全措施来保障通信的安全性，降低参与失效率，常见的通信安全措施主要包括如表15所示：

表 15 常见的通信安全措施

序号	安全措施	内容
1	时间戳的使用	时间戳可有效记录电池中电压、电流等相关参数的时间，也可以用来判定消息的顺序是否正确，最重要的是可以用于检查信息上报和下发是否满足时延要求。
2	序列号	序列号对于避免消息的乱序，插入等具有重要作用，建议在接入层或应用层消息中携带序列号。
3	密码技术和数字签名	推荐采用主流国密算法和完整性保护算法，保障通信链路的安全性；推荐对接入wBMS的用户实行白名单管理，避免非授权接入；推荐采用数字签名技术，保障收发两端身份的可靠。
4	纠错码	推荐采用检错机制，用于发现其中的错误，例如，CRC校验码，其中校验码长度基于通信传输可靠性设置。
5	看门狗机制	wBMS状态信息上传和相应的电池管理信息的下发是保障电池管理系统正常运行的关键。对于关键的总电流和总电压信息，当电池管理系统连续5个周期未收到响应信息时，则应通过警告信号或者提示信息的方式警告驾驶员，且应尽量断开高压回路或者充电回路。

4.6 基于星闪 SLE 的 wBMS 部署示例

星闪无线通信系统可以组建多级多跳网络，在满足BMU-BCU数据传输时延的要求下，将电芯级信号采集的数据传输，经过中继节点传输汇聚到BCU节点中。

每个电芯采集电芯电压、电芯温度、电芯内压等传感信息，并增加电芯标识信息和传感器采集的时间戳信息，在一个50ms轮询周期内，电芯需发送的数据小于16字节。采用4MHz信道带宽，无线帧类型1，以及8PSK调制时，电芯上的T节点数据传输时间小于46.5us，射频收发切换小于75us情况下，可以在125us系统传输间隙内完成数据报文的传输，可以在250us内实现数据传输和确认。

当1个G节点管理64个T节点，每个T节点预留1次重传资源时，G节点可以在32ms内收集64个T节点采集的传感数据。G节点将采集的所有数据组包传输给BCU，采用4MHz信道带宽，无线帧类型1，

8PSK调制，并预留1次重传资源时，G节点可以在2ms内完成数据传输和确认。系统最多可支持9个G节点同时工作，可支持576个电芯节点的数据采集。

当1个G节点管理32个T节点，每个T节点预留1次重传资源时，G节点可以在16ms内收集32个T节点采集的传感数据。G节点将采集的所有数据组包传输给BCU，采用4MHz信道带宽，无线帧类型1，8PSK调制，并预留1次重传资源时，G节点可以在1ms内完成数据传输和确认。系统最多可支持34个G节点同时工作，可支持1088个电芯节点的数据采集。

系统支持多个G节点同时工作时，多个G节点的跳频资源应正交，确保不发生系统间干扰。

第五章 总结与展望

电池管理系统BMS通过对电压、电流、温度等参数的实时检测和计算，实现对动力电池的状态监测、均衡管理、充放电及预充管理、热管理、高压及绝缘检测、故障诊断及预警等，并进一步地将这些信息及时的发送给整车控制器，方便驾驶人员了解新能源汽车运行情况，并在电池运行状态出现异常时及时预警并反馈故障信息。BMS对提升电动车辆的安全性、可靠性、动力性能与使用寿命至关重要。对电动汽车来说，BMS作为连接动力电池组与电动车辆的重要纽带，对于电动汽车的推广使用和发展起到必不可少的作用。业界正在考虑将更多的传感器和功能加入BMS系统。

更轻巧、模块化、高压化和紧凑型动力电池组是未来的趋势，业界提出了无线电池管理系统wBMS概念和解决方案。相较于传统BMS系统，wBMS可以减少低压线束，满足整车轻量化趋势，同时减少连接器和线束老化、松动和短路的风险，提升整车安全性；最大化空间利用率，使能更灵活的电池系统设计方案，有利于提升电池能量密度；提升生产自动化率和便利性，提升可维护性，有利于电池梯次回收和全生命周期管理。进而帮助改善消费者对于电动汽车的安全焦虑和里程焦虑。当前，基于已有的短距离无线通信技术，芯片厂商与电池供应商已提供或者在研wBMS系统，但业界尚未对标准化的wBMS解决方案达成一致，标准化的wBMS方案有利于降低系统成本，使能多厂家和跨领域的应用。

短距离无线通信技术是wBMS性能表现的重要影响因素，相当于wBMS的神经管道。新一代的星闪SLE技术具有低时延、高并发、高可靠性、抗干扰、精同步和高安全等特性，特别适合作为面向新能源汽车和电化学储能的wBMS底层技术。白皮书给出了基于星闪SLE技术的wBMS系统设计，包括业务模型、抗干扰、安全、拓扑组网、测试和适配新能源汽车EE架构的部署示例。

智能汽车、智能终端、智能家居和智能制造等领域不断演进的应用需求对短距离无线通信技术提出了新的技术挑战，星闪联盟将持续演进星闪无线短距通信技术NearLink，完善技术指标，丰富技术特性，对接和适配更多行业应用和场景需求，星闪2.0技术的标准化工作正在进行中。未来，星闪联盟将进行wBMS的标准化工作。