

ICS 29.220.99

CCS K 96

团 体 标 准

T/CIECCPA 119—2026

动力电池运维阶段数字孪生技术规范

Technical specification for digital twin of power battery operation and maintenance phase

2025-12-30 发布

2026-01-05 实施

中国工业节能与清洁生产协会 发布

CFECCPA

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	2
5 参考架构	3
5.1 总体架构	3
5.2 数据采集与更新	5
5.3 孪生模型库	7
5.4 接口架构	9
6 动力电池数字孪生系统数据要求	9
6.1 基本要求	9
6.2 数据状态监测运行环境	9
6.3 数据精度	9
6.4 数据传输	9
6.5 数据分析	10
6.6 数据管理	11
6.7 数据可视化	11
6.8 认证与审计	11
6.9 性能指标	11
7 动力电池数字孪生系统功能要求	11
7.1 状态监测	12
7.2 故障诊断	12
7.3 寿命预测	12
7.4 热管理仿真	12
7.5 运维策略优化	12
7.6 可视化交互	12
7.7 接口功能	12
8 动力电池数字孪生系统安全要求	12
8.1 数据安全	12
8.2 系统安全	12
8.3 通信安全	13

9 测试与验证.....	13
9.1 功能测试.....	13
9.2 性能测试.....	13
9.3 安全测试.....	13
9.4 接口兼容性测试.....	13
附录 A 典型定义与示例.....	14
图 1 动力电池数字孪生系统总体架构.....	4
图 2 数据更新信息交互流程.....	7
图 3 数据血缘追踪示意图.....	11
图 A.1 基于数字孪生技术的动力电池运维示例.....	14
表 1 直接采集的物理参数.....	5
表 2 间接估算的物理参数.....	6
表 3 动态更新的参数.....	6
表 4 孪生模型及描述.....	8
表 5 数据包结构.....	10
表 6 长消息传输要求.....	10
表 7 关键接口定义.....	10
表 A.1 JSON 消息字段及说明.....	15

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

本文件起草单位：北京理工大学、北京理工新能源信息科技有限公司、中国科学院自动化研究所、南京天沅软件有限公司、招商局检测车辆技术研究院有限公司。

本文件主要起草人：李磊、王崇文、杨晓光、刘鹏、胡振宇、范思宇、王学雷、赵菲菲、谢佳雯、周亚鹏。

本文件为首次发布。

CFECCPA

动力电池运维阶段数字孪生技术规范

1 范围

本文件规定了动力电池运维阶段数字孪生平台的参考架构、数据要求、功能要求、安全要求，并描述了相应的测试与验证方法。

本文件适用于动力电池系统（如电动汽车动力电池系统等）运维阶段的数字孪生平台开发与应用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 19596 电动汽车术语

GB/T 25000.51-2016 系统与软件工程 系统与软件质量要求和评价(SQuaRE) 第51部分：就绪可用软件产品(RUSP)的质量要求和测试细则

GB/T 32960 电动汽车远程服务与管理系统技术规范

GB/T 35273 信息安全技术 个人信息安全规范

GB/T 37732 信息技术 云计算 云存储系统服务接口功能

GB/T 40855 电动汽车远程服务与管理系统信息安全技术要求及试验方法

GB/T 43441.1 信息技术 数字孪生 第1部分：通用要求

GB/T 46237 信息技术 数字孪生能力成熟度模型

ISO 15118 道路车辆—车网通信接口（Road vehicles — Vehicle to grid communication interface）

ISO 23247 面向制造的数字孪生框架（Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing）

3 术语和定义

GB/T 19596, GB/T 43441.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

运维阶段 operation and maintenance phase

动力电池投入使用后，通过实时监控、故障诊断和优化管理等手段保障其安全运行的阶段。

3.2

电池健康状态 state of health, SOH

电池当前可用容量与额定容量的百分比,取值范围0~100%，表征电池当前性能和寿命的参数。

3.3

剩余使用寿命 remaining useful life, RUL

预测动力电池从当前状态到寿命终止阈值的剩余可用时间或循环次数。

3.4

热失控预警 thermal runaway early warning

通过预测模型识别并预警动力电池内部异常热量积累所可能导致的热失控情况。

示例：当局部温度达到某一阈值（如 65℃）时，系统发出热失控预警。

3.5

运维策略优化 O&M strategy optimization

基于数字孪生分析结果，动态调整动力电池充放电、均衡、维护等策略的过程。

3.6

功能模型单元 functional mock-up unit, FMU

符合 FMI3.0 标准的仿真模型文件，包含一个 ZIP 存档和一个应用程序编程接口 (API)。FMU 以扩展名为 *.fmu 的功能模型单元 (FMU)格式，使用 ZIP 文件的形式分发，用于跨平台模型交互。

3.7

电池管理系统 battery management system, BMS

用于实时监控、控制和保护动力电池的电子系统，通过采集电池电压、电流、温度等关键参数，实现电池状态估计、均衡管理、故障诊断及安全保护等功能，并提供与应用设备通信的接口。

[来源：GB/T 19596—2017，3.3.2.1.10，有修改]

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

128位高级加密标准 Advanced Encryption Standard 128-bit, AES-128

应用程序编程接口 Application Programming Interface, API

功能模型接口 Functional Mock-up Interface, FMI

功能模型单元 functional mock-up unit, FMU

Google远程过程调用 Google Remote Procedure Call, gRPC

超文本传输协议 Hypertext Transfer Protocol, HTTP

超文本传输安全协议 Hypertext Transfer Protocol Secure, HTTPS

Hadoop分布式文件系统 Hadoop Distributed File System, HDFS

JavaScript对象表示法 JavaScript Object Notation, JSON

消息队列遥测传输协议 Message Queuing Telemetry Transport, MQTT

数控设备互联通讯协议 Manufacturing Technology Connect, MTConnect

用于过程控制的对象连接与嵌入技术统一架构 Object Linking and Embedding for Process Control Unified Architecture, OPC UA

基于角色的权限管理 Role-Based Access Control, RBAC

表述性状态迁移 REpresentational State Transfer, REST

李维斯特 萨莫尔 阿德曼算法 Rivest Shamir Adleman algorithm, RSA

剩余使用寿命 remaining useful life, RUL

安全哈希算法256位 Secure Hash Algorithm 256-bit, SHA-256

电池荷电状态 State Of Change, SOC

电池健康状态 state of health, SOH

时间敏感网络 Time-Sensitive Networking, TSN

虚拟专用网络 Virtual Private Network,VPN

一次写入，多次读取 Write Once Read Many, WORM

5 参考架构

5.1 总体架构

5.1.1 总体要求

5.1.1.1 本架构应符合 ISO 23247 给出了关键接口位置的典型国际接口，并需符合 GB/T 46237 与 GB/T32960.1 要求。

5.1.1.2 动力电池数字孪生系统总体架构如图1所示。动力电池运维阶段数字孪生平台自下而上分为感知与资产层、数据采集与存储层、孪生模型与运行层、智能分析与决策层、可视化层，并形成“采集—建模—分析—决策—反馈—再采集”的闭环。

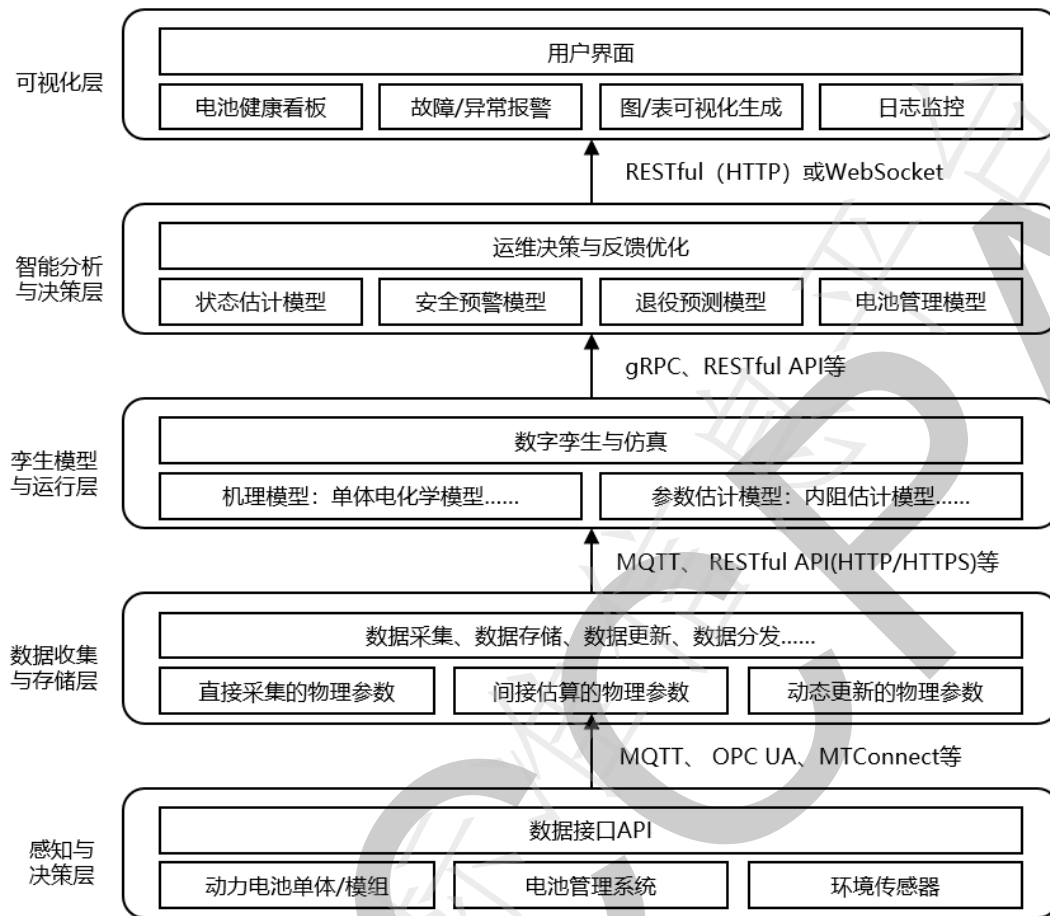


图1 动力电池数字孪生系统总体架构

5.1.1.3 对动力电池进行数字孪生时，要求虚拟空间中对动力电池及其运行环境建立与物理实体高度一致的数字化孪生模型，并能通过实时数据驱动和模型交互，实现对电池运行状态的映射、预测和优化。系统功能应满足 GB/T 43441.1 中数字实体构建、测量与感知、实时仿真、数据分析、预测优化与决策、反馈与控制、可视化交互、数字资产管理等基本要求外，应实现剩余寿命预测、故障预警、状态估计等功能，保障动力电池的安全可持续运行，辅助运维决策。

5.1.2 感知与资产层

感知与资产层位于系统最底层，接入部件包含动力电池单体/模组/电池包、BMS以及环境温湿度、流量、压力与振动等传感器，并配备边缘网关完成基础预处理。该层要求原始数据的接入与下行控制指令的转发，是物理系统与平台的桥梁。

5.1.3 数据采集与存储层

该层承担数据采集、数据存储、数据更新、数据分发等功能，形成“直接采集—间接估算—动态更新”的多类型数据资产，具体数据类型见 5.2 数据采集与更新。该层同时提供高吞吐的消息、订阅分发能力与历史数据回放能力，为上层建模与分析提供一致、可追溯、可共享的高可用数据服务。

5.1.4 孪生模型与运行时

该层面向多尺度多物理场构建机理模型、参数估计模型，并以容器化/模型服务方式运行，支持 FMU 等标准模型加载、在线校准与版本管理。运行时引擎将实时与历史数据注入模型进行推演，为上层提供状态量、特征量与预测量（如温度场、功率能力、退化趋势等），并支持模型版本管理与在线校准，保持虚实一致的动态同步。模型类型详见 5.3 孪生模型库。

5.1.5 智能分析与决策层

该层包括状态估计模型、安全预警模型、退役预测模型与电池管理模型等，在模型输出与数据资产之上构建状态监测、故障诊断、安全预警、退役预测与运维策略优化等应用。该层不断吸收反馈结果进行效果评估与增量学习，形成“采集—建模—分析—决策—反馈—再采集”的持续优化闭环。

5.1.6 可视化层

面向不同角色提供统一的人机界面，包含电池健康看板、告警与事件中心、交互式图表与三维可视化、报表生成与日志审计等功能，支持多租户与基于角色的访问控制、历史工况回放与策略效果对比，帮助运维人员高效协同与决策。

5.2 数据采集与更新

5.2.1 总体要求

数字孪生系统应从物理实体中实时采集数据、动态更新，以实现动力电池状态的实时映射。主要包括 5.2.2 到 5.2.4 部分参数的获取和更新。同时数据采集满足 GB/T 32960.2 相关要求。

5.2.2 直接采集的物理参数

直接由传感器或BMS采集的原始物理参数包括电学、热学、机械和系统、环境等多种类型。直接采集的物理参数如表1所示，这些数据应能通过数据采集模块实时上传，为数字孪生模型提供输入。

表1 直接采集的物理参数

参数类别	参数名称	数据类型	符号	单位
电学参数	单体电压	标量	V_cell	V
	模组电压	标量	V_mod	V
	总电压	标量	V_pack	V
	总电流	标量	I_pack	A
	绝缘电阻	标量	R_iso	MΩ
热学参数	表面温度	函数	T_surf	℃
	极柱温度	标量	T_term	℃
	冷却液入口温度	标量	T_in	℃
	冷却液出口温度	标量	T_out	℃
机械参数	应变/压力	张量	ε / P	$\mu\text{e}/\text{Kpa}$
系统/环境	冷却液流速	标量	f	L/min
	环境温度	标量	T_amb	℃

5.2.3 间接估算的物理参数

系统应能通过分析计算和模型推算获得的电池状态参数为间接估算参数，如SOC、SOH、RUL等。表2列出了常用的间接参数及其含义。

表2 间接估算的物理参数

参数类别	参数名称	数据类型	符号	单位
通用核心参数	荷电状态	函数	SOC	%
	健康状态	函数	SOH	%
	剩余使用寿命	函数	RUL	周期 / 天
	功率状态	函数	SOP	kW
	能量状态	函数	SOE	kWh
	内部核心温度	函数	T_core	℃
等效电路模型参数	欧姆内阻	函数	R_o / R_o	mΩ
	极化内阻	函数	R_p	mΩ
	极化电容	函数	C_p	F
	开路电压	表格	OCV	V
电化学模型参数	固相/液相扩散系数	函数	D_s / D_e	m ² /s
	SEI膜电阻/厚度	函数	R_{sei}/L_{sei}	Ω·m ² /nm
	析出锂量	函数	n_Li	mol
	活性材料损失量	函数	$\Delta \epsilon$	-
	电极孔隙度	函数	$\epsilon \epsilon$	-
热/力学模型参数	产热速率	表达式	Q_gen	W
	电芯应力/应变	张量	σ/ϵ	Pa/-

5.2.4 动态更新的参数

系统应定期或实时地更新部分关键参数，应能反映电池的当前运行状态和退化特征。表3列出了不同更新频率下的关键参数。

表3 动态更新的参数

	参数名称	数据类型	符号	单位	更新周期示例
高频实时更新	电流	标量	I	A	持续实时采集
	单体电压	标量	V_cell	V	持续实时采集
	表面温度	函数	T_surf	℃	实时或秒级
	总电压	标量	V_pack	V	实时或秒级
中频动态更新	荷电状态	函数	SOC	%	每分钟—每小时
	功率状态	函数	SOP	kW	每分钟—每小时
	内部核心温度	函数	T_core	℃	每分钟—每小时
	能量状态	函数	SOE	kWh	每分钟—每小时
低频自适应更新	健康状态	函数	SOH	%	1次 / 周
	欧姆内阻	函数	R_o / R_o	mΩ	1次 / 月
	极化内阻	函数	R_p	mΩ	1次 / 月
	极化电容	函数	C_p	F	1次 / 月—每季度
	开路电压曲线	表格	OCV	V	每季度或每重大车型/批次变更时

5.2.5 数据更新与信息交互

5.2.5.1 总则

动力电池运维阶段数字孪生系统的数据更新与信息交互流程见图2。系统应以物理实体（动力电池系统）为起点，通过数据采集、存储、建模、分析与反馈，形成闭环控制。

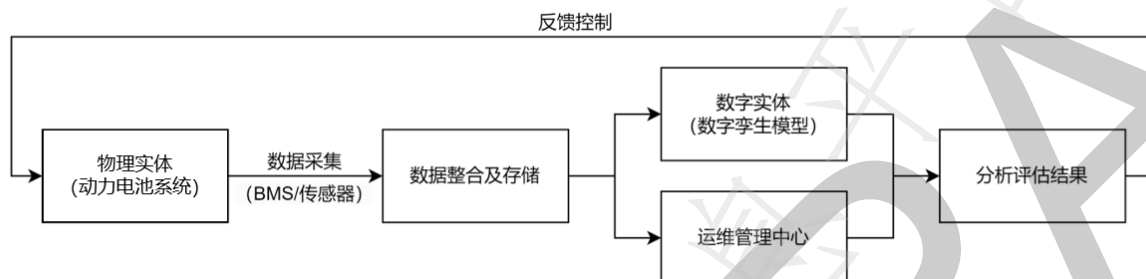


图2 数据更新信息交互流程

5.2.5.2 数据采集

在运行过程中，电池会产生电压、电流、温度等原始数据，数据采集模块（如电池管理系统BMS或传感器）应对其进行实时采集。采集到的数据在数据聚合与存储平台完成清洗、标定和融合等预处理，并进行分析计算，得到一系列间接估算的物理参数，为孪生模型计算和后续分析提供高质量的数据支撑。每隔固定时间，对部分参数通过动态更新机制进行更新（参数分类见表1～表3）。

5.2.5.3 数据输出

孪生模型（机理/数据驱动）以聚合数据为输入，动态推演电池的健康状态、性能参数和退化趋势，并通过参数更新机制保持虚拟孪生体与实际电池的一致性。模型输出结果传递至运维管理中心（分析与决策），由其进行多维度的性能评估、安全分析和寿命预测，并生成相应的运维优化策略。

5.2.5.4 数据运维

运维管理中心根据分析结果通过控制策略对物理电池系统实施反馈，调整充放电策略、优化热管理或制定维护计划等。由此，系统应完成“采集—建模—分析—反馈”的闭环过程，应实现数字孪生在动力电池运维阶段的实时更新与智能决策功能。

5.3 孪生模型库

5.3.1 孪生模型库包含一系列仿真模型和计算模型，应能用于多尺度、全生命周期地描述动力电池行为。典型模型包括机理模型、参数估计模型、状态估计模型、安全预警模型、退役预测模型、电池管理模型等主要类型，具体孪生模型及描述见表4。

表4 孪生模型及描述

模型类型	模型名称	模型功能
机理模型	单体电化学模型	基于固相扩散、离子传输、界面反应动力学，精确描述电芯内部反应过程
	单体热模型	基于均匀温度模型/分布式温度模型描述电芯内部发热与散热过程
	单体等效电路模型	基于Rint模型、Thevenin模型、二阶RC模型等，用电压、电流关系近似描述电芯动态特性
	单体力学模型	描述电极颗粒体积膨胀/收缩、SEI膜应力演化、锂枝晶生长导致的机械损伤，揭示循环过程中的应力分布、裂纹扩展，解释容量衰减和寿命缩短机理
	单体电-热-力耦合模型	综合考虑电化学反应、发热效应和材料力学应力，动态模拟电芯在不同工作条件下的电压-温度-应力演化，预测单体在高倍率充放电或极端工况下的热-力失效风险
	模组热耦合模型	考虑电芯间热传导、对流耦合效应，模拟模组内部温度分布与热点形成，用于模组冷却设计、热均衡优化
	电池包热模型	考虑冷却系统（风冷、液冷、相变材料等），预测电池包全局与局部温度场
	电池包结构动力学模型	描述电池包在振动、冲击、碰撞、跌落等外部工况下的力学响应
	多物理场耦合模型	电-热-力学三场耦合，预测电池包在外部冲击、挤压、热滥用工况下的响应
参数估计模型	内阻估计模型	通过电池在充放电过程中的电压、电流等可测量量来反推出内部的欧姆阻抗及极化阻抗，用于反映电池的衰退过程或安全预警
	开路电压-SOC曲线估计模型	利用端电压反映电池的热力学平衡电势，建立电池荷电状态（SOC）与开路电压之间函数关系
	全生命周期退化模型	描述电池包在实际运行工况下的容量衰减、内阻增加、热性能劣化过程
	参数辨识与自适应控制模型	通过实时估计电池等效电路参数（如内阻、极化电阻、电容）或热参数，动态修正BMS算法的输入参数，保证模型与实际电池状态一致
状态估计模型	SOC估计模型	通过电流积分、等效电路建模或基于数据驱动的滤波方法来估算电池在某一时刻的荷电程度，为能量管理和续航里程预测提供准确依据
	SOH估计模型	基于容量衰减和内阻增加的物理机制，结合实验特征参数提取、等效电路参数辨识或机器学习方法来推断电池健康状态，反映电池性能退化程度，指导维护和更换
	SOP估计模型	通过热-电耦合模型、内阻与极化特性估算电池在安全范围内的瞬时可用功率，限制电池充放电功率，避免过载引发安全问题
	剩余使用寿命(RUL)估计模型	基于退化趋势建模与预测电池达到报废阈值的剩余时间或循环次数，实现全生命周期管理和预测性维护，提升系统的可靠性与安全性
安全预警模型	单体异常检测模型	对电池模组或包内的单体电芯进行电压、电流、温度和SOC一致性分析，利用统计阈值、变化率检测或数据驱动异常检测算法识别偏离正常行为的单体
	电气安全预警模型	监测电池包及模组的端电压、电流、内阻、电压不一致性和绝缘电阻等电气参数，结合等效电路模型或统计异常检测方法判断潜在电气故障，如内短路、接触不良、绝缘下降等
	故障预警模型	利用阈值判断、变化率分析、统计特征、机器学习或深度学习等方法，将异常信号映射到具体的故障类型，如单体低压、单体高压、内短路、外短路、绝缘下降、温控失效等
	热失控预警模型	基于电池热-电耦合模型，实时监测电池温度、电流和内阻等参数，结合热生成和散热计算，预测温度异常或热失控趋势。当温升速率超过阈值或局部热点温度达到警戒值时触发预警
退役预测模型	基于物理机理的退役模型	基于电化学和热力学机理，模拟电池在循环、储存和极端工况下的退化过程，包括容量衰减、内阻增加、SEI膜生长、电极材料粉化等，预测电池在特定工况下的衰减曲线
	基于经验和统计的退役模型	通过分析历史循环数据、容量衰减曲线、内阻增长曲线等经验数据，利用回归模型（线性/非线性回归、指数衰减模型）拟合电池退化趋势
电池管理模型	能量管理优化模型	实时监测车辆动力需求、SOC、温度、SOH及功率约束，利用优化算法（计算电池在整个运行周期内的最优能量分配策略，平衡电池能量消耗、寿命损耗和功率输出需求
	充放电策略优化模型	以电池安全约束、温度限制、SOC/SOH状态和功率需求为输入，设计充电电流、电压和放电功率的动态策略，满足功率需求和安全限制的同时，优化充电时间、充电效率和寿命消耗

表 4 孪生模型及描述（续）

	热管理模型	构建电池热生成与散热模型，通过有限元、集中参数或分布式模型计算电池温度分布，优化冷却/加热策略保证电池在安全温度范围内工作
	平衡与均衡控制模型	通过监测模组内单体电压或SOC差异，利用主动均衡（电荷转移电路）或被动均衡（耗能电阻）算法调整各单体能量，使模组单体状态一致，避免局部过充/过放导致的性能衰减和安全风险，提高整体能量利用率。

5.3.2 各类模型根据实际运行数据进行在线更新和校准，保持数字孪生模型的高精度和一致性。孪生模型库还应支持模型的版本管理和联合仿真，使不同物理场的模型能够协同工作。

5.4 接口架构

系统接口架构应确保平台内部各模块以及与外部平台的兼容与交互操作。数字孪生平台应提供标准化的数据接口（如 RESTful API、MQTT 等）用于与外部系统或设备通信，并支持加载和使用符合 FMI 标准的 FMU，兼容 Ansys、MATLAB、COMSOL 等仿真工具生成的模型，实现仿真系统之间的互联互通。信息通信安全及加密要求符合 GB/T 40855 标准。

6 动力电池数字孪生系统数据要求

6.1 基本要求

6.1.1 实时性

对于新能源汽车的实时性要求应满足 GB/T32960 要求，其他载运工具按照实际情况执行。

6.1.2 安全性

6.1.2.1 数据加密：采用AES-256算法。

6.1.2.2 访问控制：采用RBAC等机制，确保不同用户权限的安全隔离。

6.1.3 可靠性

6.1.3.1 数据存储冗余度： ≥ 3 副本。

6.1.3.2 平台连续无故障运行时间 $\geq 99\%$ 。

6.2 数据状态监测运行环境

6.2.1 支持Linux/Windows系统，容器化部署需符合Kubernetes v1.20及以上标准。

6.2.2 云平台部署需满足 GB/T 37732 要求。

6.2.3 边缘计算节点需支持轻量化部署，资源占用率 $\leq 15\%$ 。

6.3 数据精度

6.3.1 电压测量误差 $\leq \pm 1\text{mV}$ ，温度测量误差 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ ，电流采样频率 $\geq 1\text{kHz}$ 。

6.3.2 数据存储精度要求：原始数据保留全精度，分析结果保留小数点后四位。

6.3.3 模型仿真精度要求：电化学模型误差 $\leq 3\%$ ，热力学模型误差 $\leq 2\%$ 。

6.4 数据传输

6.4.1 数据包结构

6.4.1.1 数据传输遵循分层协议架构，由起始符、命令单元、识别码、数据加密方式、数据单元长度、数据单元和校验码组成，满足 GB/T 32960.3 要求，具体数据包结构字段定义见表 5。

表5 数据包结构

字段名称	长度（字节）	描述	示例值
起始符	2	固定值0xAA55	0xAA55
命令单元	1	指令类型（如0x01为控制指令）	0x01
加密标识	1	加密算法标识（AES=0x01）	0x01
数据单元长度	4	数据内容长度（大端模式）	0x00000100
数据单元	可变	加密后的业务数据	-
校验码	2	CRC16校验值（校验范围为起始符至数据单元字段）	0x3A7F

- 6.4.1.2 实时性：车辆正常行驶状态下数据采集周期 ≤ 30 s，报警状态下 ≤ 1 s，传输延迟 ≤ 100 ms。
- 6.4.1.3 可靠性：采用大端模式网络字节序传输，数据存储冗余度 ≥ 3 副本，连续无故障运行时间 $\geq 99\%$ 。
- 6.4.1.4 加密方式：支持 RSA、AES-128 等算法，数据单元加密密钥与通信协议密钥分离。
- 6.4.2 通讯协议
- 6.4.2.1 支持MQTT v5.0、OPC UA 1.04、Modbus TCP、IEEE 802.1AS等TSN协议，兼容GB/T 32960.3。
- 6.4.2.2 实时数据传输时延 ≤ 100 ms，重传机制需确保丢包率 $< 0.1\%$ ，采用滑动窗口协议，窗口大小 ≥ 8 帧。
- 6.4.2.3 长消息传输需符合分层协议，支持分包重组与虚拟连接管理，长消息传输要求见表6。

表6 长消息传输要求

参数	要求
单帧最大长度	1785字节
帧间隔时间	$5 \text{ ms} \leq T1 \leq 10 \text{ ms}$
超时重传时间	$T2=100 \text{ ms}$, $T3=10 \text{ s}$
虚拟连接管理	同一时间仅允许单连接

- 6.4.3 接口规范
- 6.4.3.1 提供标准化API接口（RESTful/JSON），支持FMU动态加载与联合仿真。
- 6.4.3.2 接口兼容性：支持Icomm（公共信息交换）、Iserv（业务信息交换）等接口类型，接口兼容性要求见表7。
- 6.4.3.3 接口响应时间：查询类 ≤ 200 ms，控制类 ≤ 500 ms，仿真类 ≤ 1 s。

表7 关键接口定义

接口名称	功能描述	协议要求
Icomm	公共信息发布与同步	订阅/发布模式，支持MQTT
Iserv	业务策略与订单交换	请求-应答模式，HTTP/2
Idev	设备状态监控	Modbus TCP

6.5 数据分析

- 6.5.1 状态监测：实时采集SOC、SOH、温度分布、内阻等关键参数，支持异常阈值动态调整（ $\pm 5\%$ 自适应）。
- 6.5.2 故障诊断：应基于电化学、热力学、机械等多源数据融合的分析方法，识别短路、过充、容量衰减等故障模式，诊断准确率应 $\geq 95\%$ 。
- 6.5.3 寿命预测：RUL预测误差 $\leq 5\%$ ，支持在线校准与增量学习。

6.5.4 热失控预警：基于热传播仿真预测热失控风险，预警响应时间 ≤ 2 s，误报率 $\leq 1\%$ 。

6.6 数据管理

6.6.1 数据存储服务

6.6.1.1 采用分布式存储架构（如HDFS/Ceph），冷热数据分级存储，数据冗余度 ≥ 3 副本。

6.6.1.2 全生命周期日志保留 ≥ 5 年，日志文件需附加数字签名（SHA-256）防篡改。

6.6.2 数据监控服务

6.6.2.1 对运行中的容器或应用进行实时监控，或对大量同类数据进行集群监控。

6.6.2.2 根据用户设置及时有效地将数据库的异常进行报警，并且对监控、性能数据进行统计分析。

6.6.3 数据共享

6.6.3.1 跨平台数据交换需符合GB/T 35273，敏感数据脱敏处理。

6.6.3.2 支持数据血缘追踪，提供数据溯源图谱，数据血缘追踪示意图3，变更记录保留 ≥ 3 年。

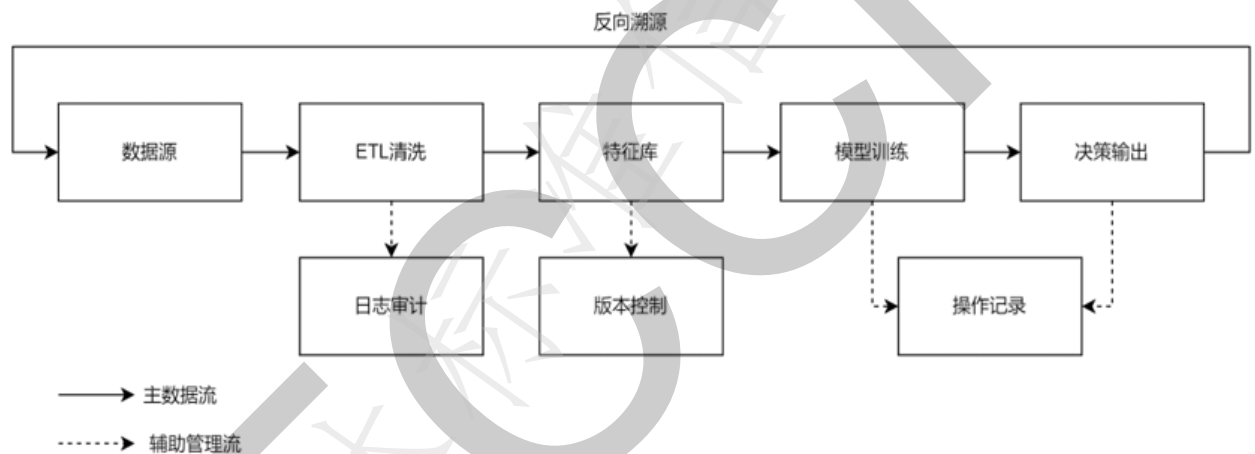


图3 数据血缘追踪示意图

6.7 数据可视化

6.7.1 交互界面：提供多维度参数监控界面（如热失控传播路径动态模拟、历史数据回溯）。

6.7.2 告警管理：支持分级告警可视化（如颜色标识、弹窗提示），告警推送延迟 ≤ 5 秒。

6.7.3 仿真结果展示：通过三维模型动态展示电池充放电曲线优化策略及热管理仿真结果。

6.8 认证与审计

6.8.1 操作日志：记录全生命周期事件（包括时间戳、操作主体、事件类型），日志存储采用WORM机制。

6.8.2 审计周期：安全日志每周审计，性能日志每日汇总，异常事件实时告警并纳入审计。

6.9 性能指标

6.9.1 并发处理能力：支持多终端设备同时在线访问，系统在高负载下CPU占用峰值 $\leq 70\%$ 。

6.9.2 系统可用性：全年无故障运行时间 $\geq 99.95\%$ ，灾备切换时间 ≤ 5 分钟。

7 动力电池数字孪生系统功能要求

7.1 状态监测

平台应具备实时监测动力电池关键运行参数的功能，包括 SOC、SOH、温度分布和内阻等，并提供可视化展示。

7.2 故障诊断

平台应基于多源运行数据，识别并诊断常见故障类型，如短路、过充、容量衰减等。

7.3 寿命预测

RUL预测总体误差 $\leq 10\%$ ，初期（ $SOH \geq 95\%$ ） $\leq 15\%$ ，稳定期（ $95\% \geq SOH \geq 80\%$ ） $\leq 8\%$ 。

7.4 热管理仿真

平台应支持对电池热失控过程的仿真模拟，并基于仿真结果提出相应的缓解和控制策略。

7.5 运维策略优化

平台应根据电池状态与寿命预测结果，动态优化电池充放电策略、均衡管理策略及维护计划等运维策略。

7.6 可视化交互

平台应提供交互式可视化界面，支持实时监控参数的图形化展示以及历史数据查询和回放功能。

7.7 接口功能

7.7.1 支持加载、解析符合 FMI 标准的FMU，并进行联合仿真，实现电化学、热力学等多学科耦合仿真。

7.7.2 数据转换接口（如JSON、Protobuf）应具备兼容性与实时性，兼容OPC UA、MQTT、Modbus协议。

8 动力电池数字孪生系统安全要求

8.1 数据安全

8.1.1 加密传输应满足平台间数据传输采用AES-256或更高强度的加密算法，数据存储符合 GB/T 35273。

8.1.2 完整性保护应满足关键参数（如SOC）需附加数字签名，防止恶意篡改。

8.1.3 访问控制应满足基于RBAC模型分角色管理权限，支持双因素认证，最小权限原则控制接口调用。

8.1.4 边缘计算节点需支持轻量化部署，资源占用率 $\leq 15\%$ 。

8.2 系统安全

8.2.1 模型安全应满足FMU模型加载前需验证数字签名，所有外部输入需经白名单过滤，禁止未授权代码执行。

8.2.2 漏洞管理应满足平台及终端软件需定期（ ≤ 30 天）更新，确保无权威漏洞平台公布的高危漏洞（6个月内未修复），系统补丁兼容性测试覆盖率 $\geq 75\%$ 。

8.2.3 日志审计应满足记录全生命周期操作日志（含时间戳、操作主体、事件类型），日志存储采用防篡改机制，并加密上传至企业平台。日志审计周期 ≤ 7 天。

8.3 通信安全

- 8.3.1 协议要求应满足平台间通信采用 TLS 1.2 及以上协议，禁用 SSL 3.0 及以下版本。
- 8.3.2 双向认证应满足客户端与服务端平台建立连接前需完成双向身份鉴别，所用证书有效期不应超过 365 天。
- 8.3.3 数据隔离应满足通过 VPN 或其他隔离技术，确保业务数据与运维数据分离传输，避免在公网直接暴露敏感信息。

9 测试与验证

9.1 功能测试

验证平台状态监测、故障诊断、寿命预测、热管理仿真、运维策略优化、可视化交互、接口功能等功能正确性和稳定性，确保功能符合预期指标。检测指标符合 GB/T 25000.51 标准。

9.2 性能测试

通过压力测试评估系统性能，验证系统响应时间满足指标要求，响应延迟达标率 $\geq 85\%$ ；并发处理能力满足要求，支持多终端设备同时在线访问，系统在高负载下 CPU 占用峰值 $\leq 70\%$ ；系统可用性满足要求，全年无故障运行时间 $\geq 89.85\%$ ，灾备切换时间 ≤ 5 分钟。检测指标符合 GB/T 25000.51 标准。

9.3 安全测试

模拟网络攻击和异常场景，验证访问控制、加密传输、漏洞管理、日志审计、双向认证和数据隔离等安全防护措施的有效性。

9.4 接口兼容性测试

9.4.1 协议兼容性：验证 Ansys CFX、MATLAB Simulink、COMSOL Multiphysics 等仿真工具生成的 FMU 模型能够在平台正确加载并联合仿真。检测指标符合 GB/T 25000.51 标准。

9.4.2 实时性测试：在压力测试下，验证平台响应时延满足要求：告警推送延迟 ≤ 5 秒，视频预览延迟 ≤ 3 秒，按钮响应 ≤ 1 秒。检测指标符合 GB/T 25000.51 标准。

附录 A
(资料性)
典型定义与示例

A.1 数字孪生运维示例

本附录给出了基于数字孪生技术的动力电池运维示例过程。基于数字孪生技术的动力电池运维示例如图 A.1 所示。

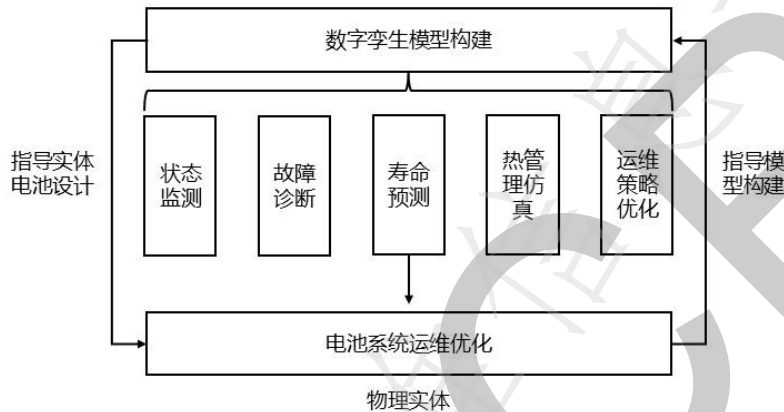


图 A.1 基于数字孪生技术的动力电池运维示例

A.1.1 数字孪生模型构建

按材料-单体-模组-系统 4 个层级建立与物理实体相映射的电池模型。

- a) 在材料层级包括正负极材料及缺陷构造、电解液浓度及离子浓度分布、隔膜孔隙率缩小或破坏、SEI 膜增厚或分解等子模型。
- b) 在单体层级包括电池正负极离子扩散、电势产生、电化学-热产生等子模型。
- c) 在模组层级，耦合电池产热传热机理，包括散热系统及其他电附属元件、均衡管理系统等。
- d) 在系统层级，包括电池系统内的箱体结构设计、线束布置、焊接情况、铜排布置等。

通过将材料-单体-模组-系统的不同类型、不同尺度、不同物理场的模型进行耦合和加权、参数传递、物理场融合，实现了从材料到系统层级的模型深度融合。

为便于实现材料—单体—模组—系统四层模型间的协同与参数传递，本节给出一条简化的接口示例。示例说明如下：单体层级向模组层级传递“单体最大温度（single_cell_max_temperature）”参数，接口采用 JSON 格式传输，并带有时间戳、数据来源与版本信息，以便模组层进行聚合/决策使用。表 A.1 展示了 JSON 消息字段及说明，JSON 消息可包含表 A.1 的字段。

表 A.1 JSON 消息字段及说明

字段名称	描述
message_id	消息唯一标识
timestamp	消息产生或发送时间（UTC格式）
source_level / source_id	来源层级与标识（如单体/单体编号）
target_level / target_id	目标层级与标识（如模组/模组编号）
parameter	参数对象
model_version	来源模型版本

A.1.2 模型交互与更新

数字孪生模型通过实体电池上传的电压、电流、温度、故障数、车速、位置等信息，在对实体电池组状态、参数等进行迭代优化后，可实现以下参数的更新：

- a) 电池膨胀/铜排老化等几何构型更新。
- b) 电池内部微观参数更新(包括电池正负极材料的膨胀、电解液分解、气体析出、隔膜损伤或收缩、孔隙率下降、正负极材料固相损失、SEI 膜增厚或分解、电极的扩散诱导应力、负极表面锂的析出和电解液内活性锂离子的损失、集流体腐蚀等)。
- c) 宏观性能的衰退(包括内阻增长、可用容量损失、电池充电边界下降、可用容量区间缩短、极化电压加剧等)。
- d) 全生命周期性能模拟(包括剩余寿命、最大可用容量、电池组安全性、可靠性衰退图谱等)。

A.1.3 基于数字孪生模型的电池管理

基于数字孪生模型的电池管理可为传统动力电池管理提供扩展性功能，有助于提高电池全生命周期全气候全工况的健康和安全管理能力。主要实现如下功能：

- a) 通过数字孪生模型在全生命周期的性能演化和模拟仿真，可以分析得到与电池使用工况呈强相关的电池内部参数的劣化特性。
- b) 通过与神经网络算法相结合，采用模型+数据融合驱动的方法建立电池管理算法，从而实现电池系统的高安全动态充电边界管控。
- c) 通过与 ISO 15118 国际车联网通信核心标准相结合，实现车辆到电网（Vehicle-to-Grid, V2G）的应用，助力全球智能电网集成。
- d) 基于电池极端工况下失效边界预判的长时热失控预警等功能。

A.1.4 跨平台模型交互

动力电池建模从等效电路向多物理场耦合、从单体扩展至模组与系统层级发展，单一仿真软件难以同时兼顾电化学、传热、结构力学与系统级控制等多样化物理场与求解器需求。跨平台模型交互能够实现“工具适材适用”与“模型复用”等目标，因此，本规范提供以下跨平台交互的典型实现路径用于参考。

示例 1：基于 FMI/FMU 的模型交换与联合仿真

- a) 在源工具中准备子模型：在 MATLAB/Simulink、Ansys 或其他支持导出 FMU 的工具中建立电化学、热或等效电路子模型，并完成边界条件与 I/O 定义（例如电流输入、温度场输出、状态量输出）。
- b) 导出 FMU：按 FMI 标准（Model Exchange 或 Co-Simulation 模式）导出 FMU 文件，记录

导出时的求解器类型、时间步约束、变量命名与单元。

- c) 在目标平台中导入：在数字孪生平台或支持 FMU 的仿真环境中导入 FMU，配置输入/输出映射与初始条件。
- d) 统一仿真配置：在联合仿真中设定统一或兼容的时间步长、求解容差与同步策略（Co-Simulation 下需注意步长同步与插值策略）。
- e) 联合仿真与校验：运行联合仿真并与各源工具的基准仿真结果对比。

示例 2：COMSOL Multiphysics 与 Simulink 的共仿真

- a) 在 COMSOL 中建立多物理场模型（电化学—热—结构等），并确认需与控制/系统级模型交换的边界量（如电流密度、温度、热通量）。
- b) 配置共仿真接口：使用 COMSOL 的 LiveLink for Simulink 或 COMSOL 的 Co-simulation 接口，在 Simulink 中添加相应的 Cosimulation Block 或配置数据交换端点。
- c) 同步策略制定：确定时间步同步策略（同步步长、数据缓冲/插值方式），并在 Simulink/COMSOL 两侧统一或设定兼容参数。
- d) 运行共仿真并监控：在联合仿真运行中实时监控数据交换延迟、求解器稳定性与边界条件一致性。