

题目：新能源汽车电池包结构建模与响应分析

1. 问题描述

动力电池系统是新能源汽车的核心安全组件。在车辆实际使用中，电池包可能面临来自路面异物撞击、侧面碰撞等极端机械载荷的威胁。这些载荷可能导致电池包结构破裂、内部电芯发生剧烈变形，进而引发内短路、热失控，严重威胁驾乘人员安全。采用有限元法精准模拟电池包在多种典型危险工况下的力学响应、失效模式，并预测其安全边界，是现代电池包设计流程中的关键环节。电池包在结构上大体可以分为电池模组、下箱体、上箱盖、高低压线束、电池管理系统等功能组件，如图 1 所示。



图 1 电池包结构

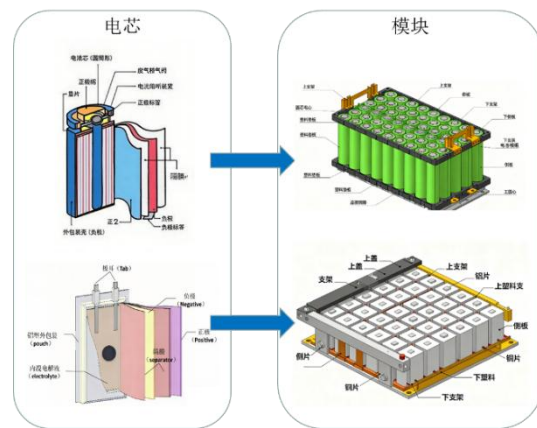


图 2 圆柱形和方形电芯及对应模组结构示意图

新能源汽车电池包是一个复杂的集成系统，其构成遵循着明确的层级关系，从最小的单元逐级组装而成。其最基本电池单体的常见形态有圆柱形和方形，为满足更高的电压和容量需求，通常将多个电池单体通过导电连接件在端板、侧板的固定下集成为一个电池模组。图 2 是圆柱形和方形电池从单体到模组的常见排布结构示意图。在新能源电池包中，电池管理系统如同其“大脑和神经系统”，通常包含一个主控单元和多个从控单元，如图 3 所示。从控单元（安装在模组上）管辖模组内每个电芯的电压和温度；主控单元则负责汇总全盘数据，进行复杂的状态估算和发出控制指令，主从单元之间通过线缆连接通信。箱体是容纳电池模组、提供全方位保护并集成关键系统的核心结构件。如图 4 所示，电池包箱体通常由三大部分组成：下箱体、上盖以及内部框架（用于支撑和固定模组）。

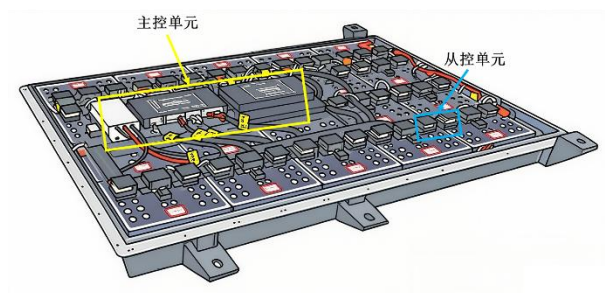


图 3 电池管理系统示意图

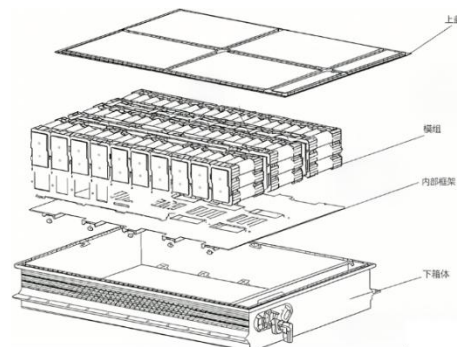


图 4 电池包箱体结构示意图^[1]

电池包的具体形状和样式并非一成不变，而是高度依赖于内部电池模组的排列方式。如图 5 所示，根据车辆底盘的实际空间布局和整车的能量需求，将多个电池模组进行排布。正是这种灵活的模组排布方案，使得电池包箱体可以被设计成多种不同的样式和形状，从而实现车辆空间利用率和能量密度的最优化。

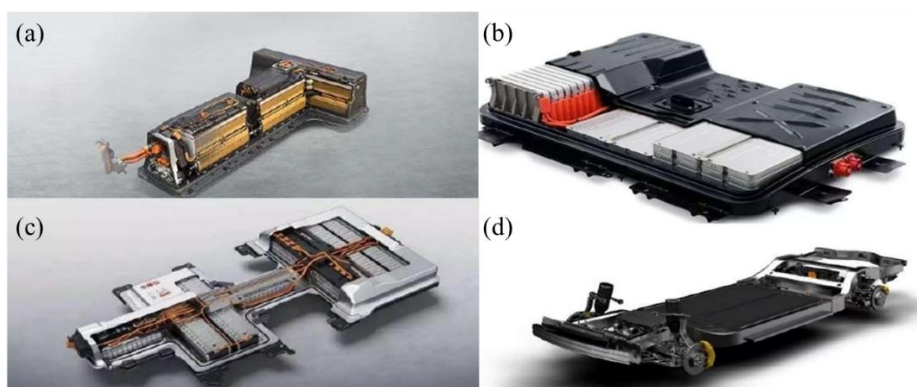


图 5 异性电池包结构示意图^[1]: (a) T 型 (b) 凹字型 (c) 土字型 (d) 一体式

新能源汽车电池包在碰撞、挤压、跌落等极端工况下可能发生结构失效，主要表现为：

- 1) 外壳破坏：外壳开裂或被压入至基础模组；
- 2) 承载失效：主要结构应力超过屈服强度，失去承载或密封功能；
- 3) 内部损坏：模组/电芯变形超限，存在短路风险；
- 4) 连接失效：模组与箱体/框架连接超出设计强度。

通过有限元仿真，可对上述潜在失效模式进行预测与优化。

2. 计算要求

基于电池包的 actual 结构，构建其三维有限元简化模型，模型主要包括外壳、内部框架、电池模组、电池控制系统、四周安装件等组件。模型整体尺寸参考典

型电池包，长度不超过 2000 mm，宽度不超过 1500 mm，高度不超过 200 mm。外壳通常约为厚 2 mm 铝合金，弹性模量为 70 GPa，泊松比为 0.33，密度为 2.7 g/cm³。内部框架厚度为 3 mm，材料为钢，弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.3，密度为 7.85 g/cm³。内部电池模组不少于 8 个，每个模组的电芯数量不少于 10 个（电芯尺寸参考 GB/T 34013-2017 电动汽车用动力蓄电池产品规格尺寸）。排布方式与箱体外形不限，电池模组主要部件和电池管理系统的常用材料及其关键力学参数可自行查找，合理即可。

（1）参考相关资料建立电池包有限元模型。要求至少包括外壳、内部框架、含一种单体的电池模组、电池管理系统、安装连接件等，并说明部件材料选用情况及合理性。对电池包进行自由状态和约束状态（约束外壳安装点）的模态分析，获取前五阶频率与振型。

（2）电池包跌落分析如图 6。设置跌落高度为 1 m 自由落向地面，前端和侧面触地且角度在 0° 至 30° 范围内变化，计算电池包箱体跌落触地时的最大应力和变形，对电池包失效情况进行研究。

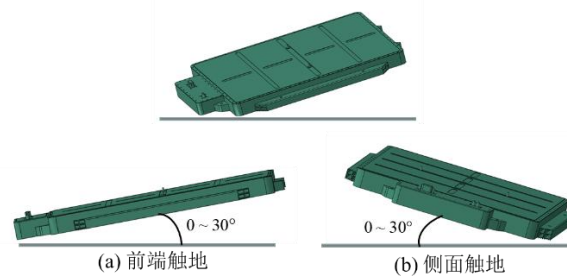


图 6 跌落触地示意图

（3）电池包底部动态冲击和准静态挤压分析。

- 模拟行驶中撞击路面异物，电池包箱体通过安装连接件固定，一个直径为 100mm 的刚性球体冲击底面。通过不同初速度以垂直角度撞击电池包下托盘底面不同区域的冲击过程模拟，分析电池包可能存在的失效情况。
- 模拟汽车侧碰或挤压场景，试验如图 7。电池包箱体通过安装连接件固定，一个半径 75 mm 的刚性圆柱体压头，半圆柱体的长度大于测试方向电池的长度，垂直挤压电池包前后或侧面的中心位置。挤压方向为 x 和 y 方向（汽车行驶为 x 轴，另一垂直于行驶方向的水平方向为 y 轴），请分析电池包在 x 和 y 向挤压下可能发生的失效模式，并针对失效模式探讨相应的设计策略与优化思路。

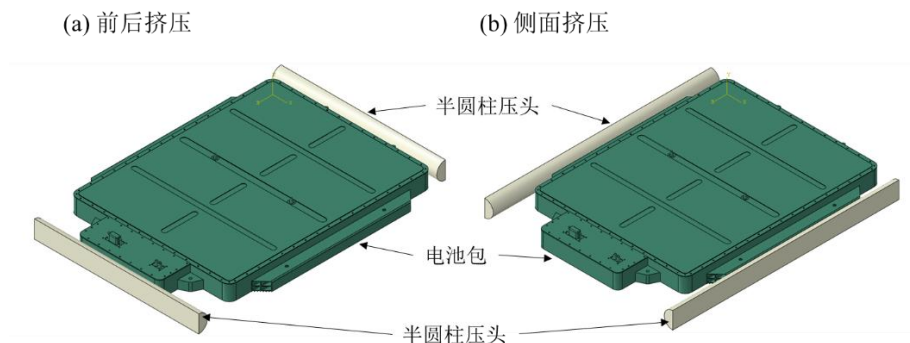


图 7 挤压试验示意图

提示：为简化计算，外壳和内部框架可以采用实体单元模拟，材料视为各向同性；电芯简化为均质圆柱体或块体，并且通过端板结构组合成电池模组，可以采用实体单元模拟，材料模型考虑各向同性弹塑性行为；电池管理系统的主控单元与从控单元可分别简化为独立的均质质量块。其几何外形可合理简化，但建模时应确保各单元通过恰当的连接关系相连。

参考文献

[1] 蔡扬扬, 殷莎, 赵海斌, 等. 新能源汽车电池包箱体结构的轻量化研究现状[J]. 汽车技术, 2022, (2):55-62.

（注：上述信息仅供参考，更多信息和资料请自行查找）