

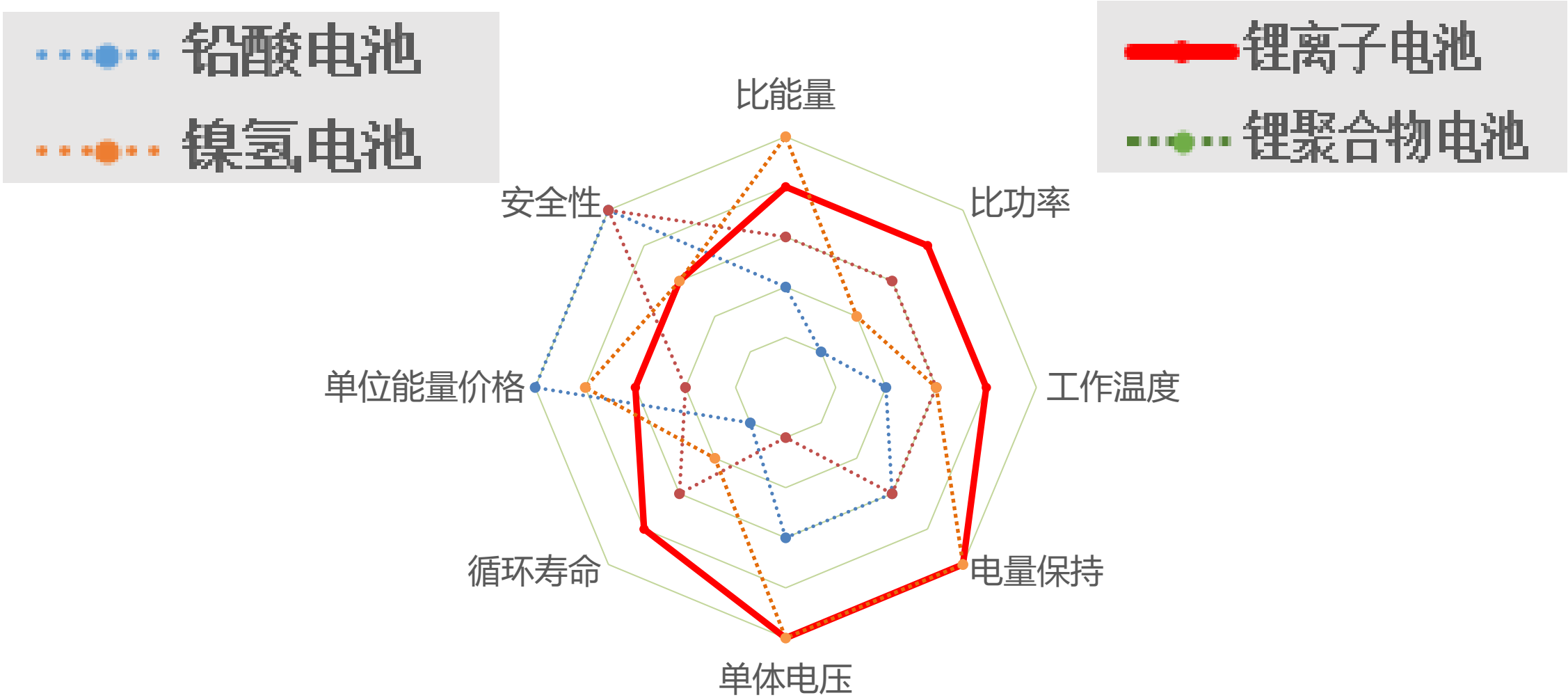
NO.076

新能源商用车电池系统轻量化设计与安全性评价

1 行业背景与技术趋势

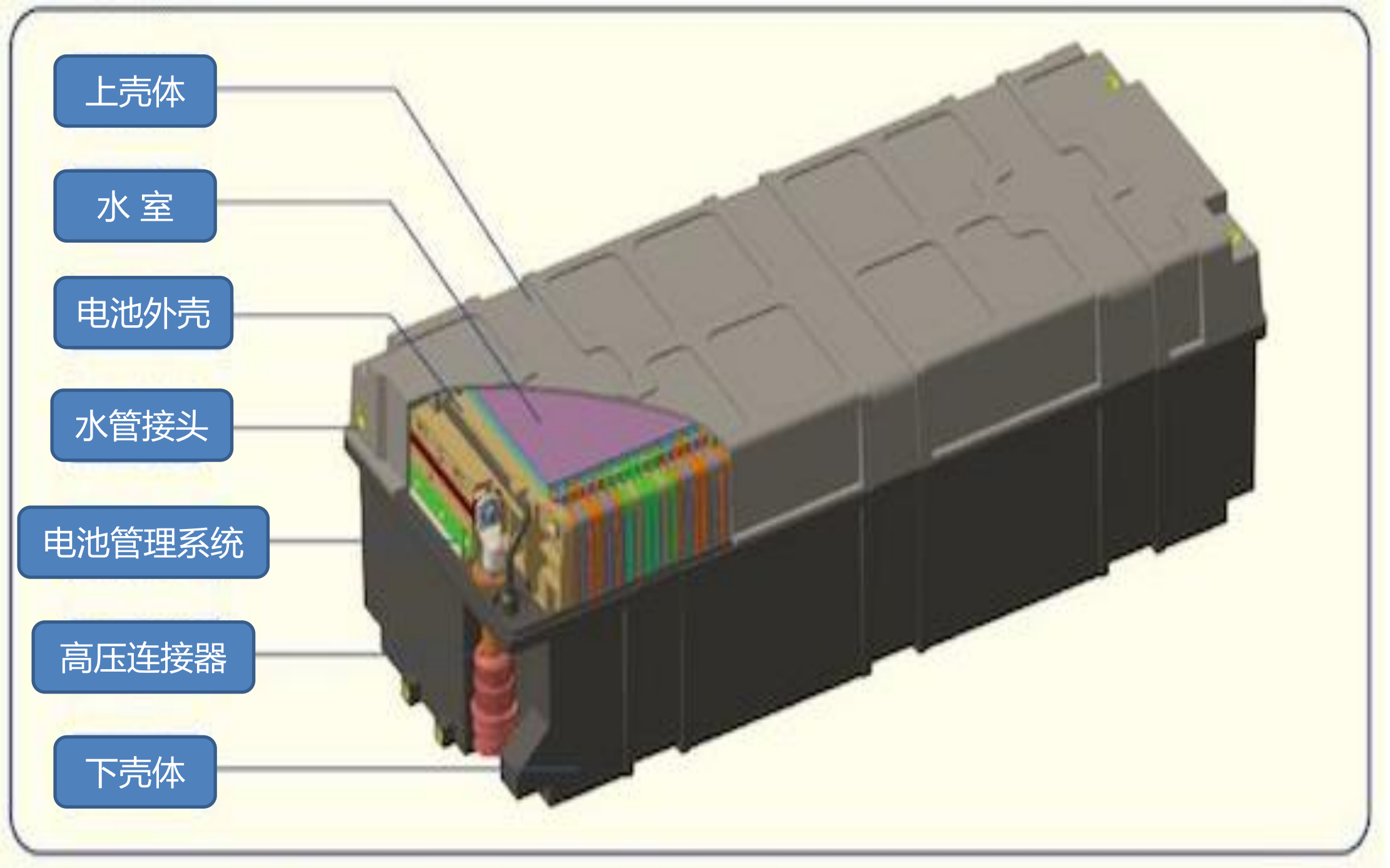
锂离子动力电池是新能源汽车的主要动力源

锂离子动力电池具有高比能量，长寿命优势，是目前新能源汽车的主要电化学动力源。诸多新能源汽车上都采用锂离子电池。



锂离子动力电池占新能源商用车重量的至少10%，以新能源大巴车为例，新能源大巴车采用的标准电池包，重量占据车辆总重的10%-20%。

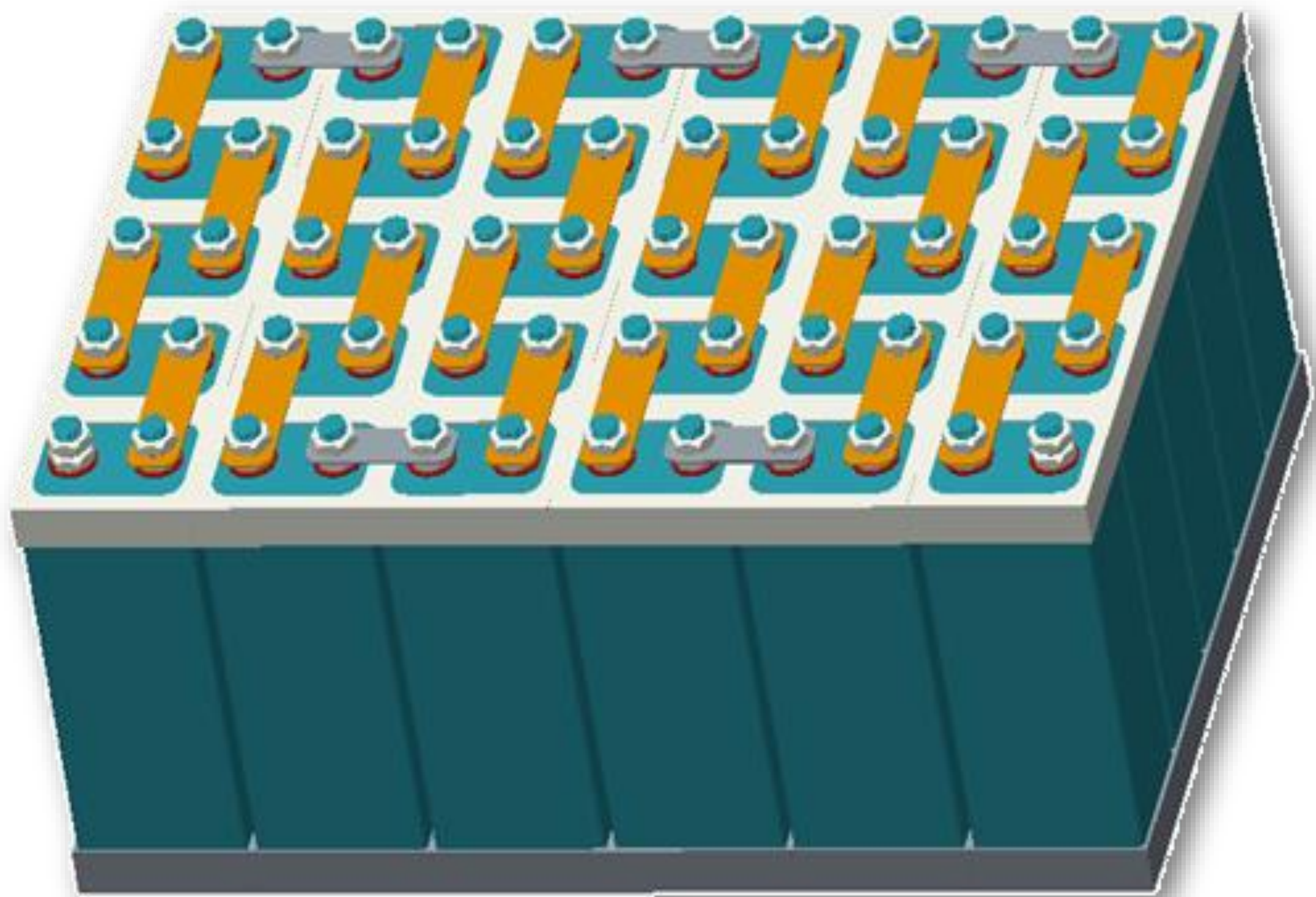
序号	类型	长度（米）	电量（kwh）	电池包个数	重量（kg）
1	轻客	6-8	64.5-87.85	4-5	800-1000kg
2	8米中巴	8	94.61-142.84	5-8	1000kg-1600kg
3	10米大巴	10	142.84-199.37	8-10	1600kg-2000kg
4	12米大巴	12	199.37	10	2000kg



锂离子动力电池的安全性是发展瓶颈

锂离子动力电池的安全性，主要是高低温和高倍率充放电等复杂工况下的适应性。

轻量化、安全性是决定动力电池性能、和环境适应性的关键因素。



动力电池

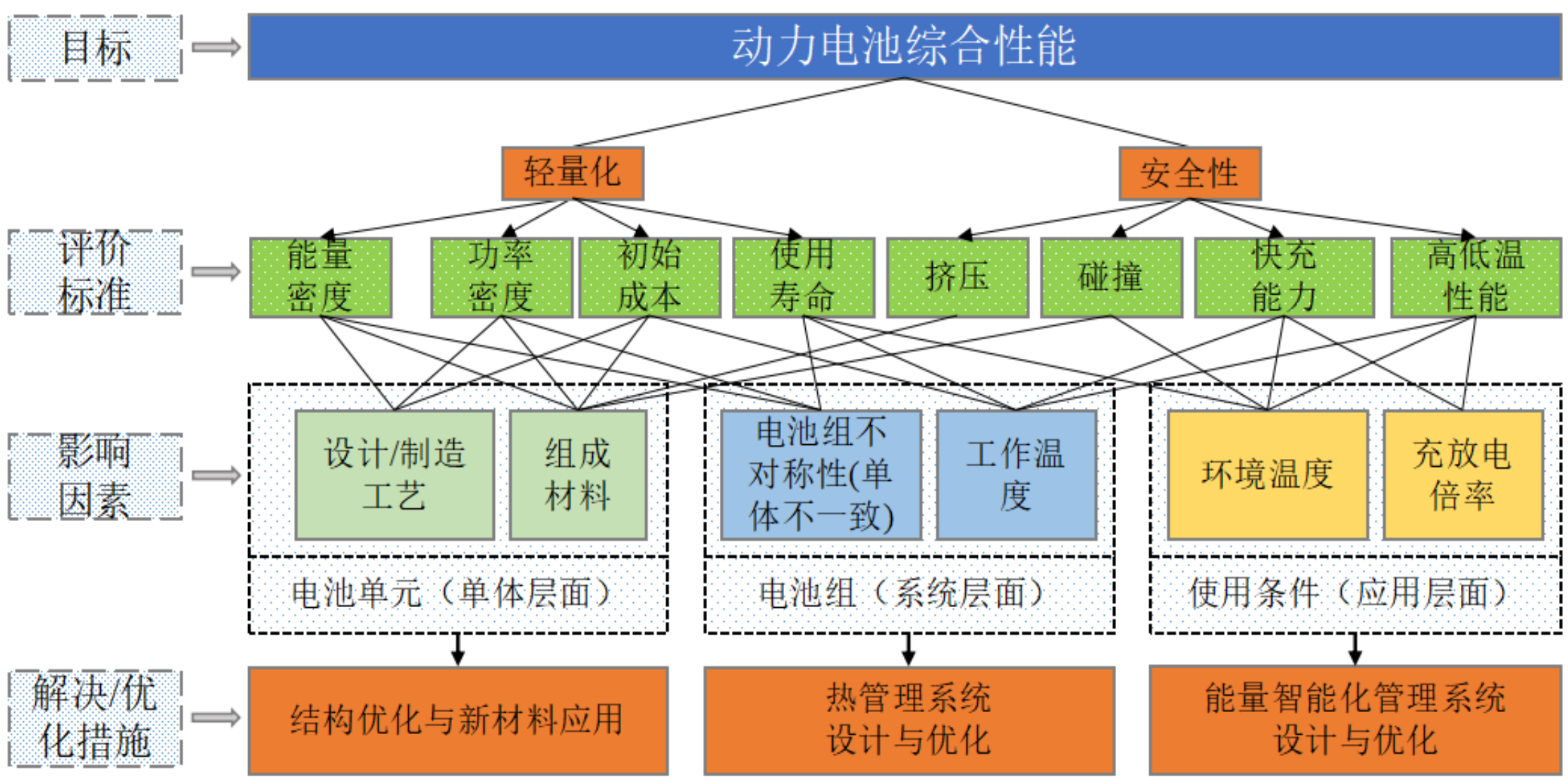
轻量化

能量密度、结构强度、重量...

安全性

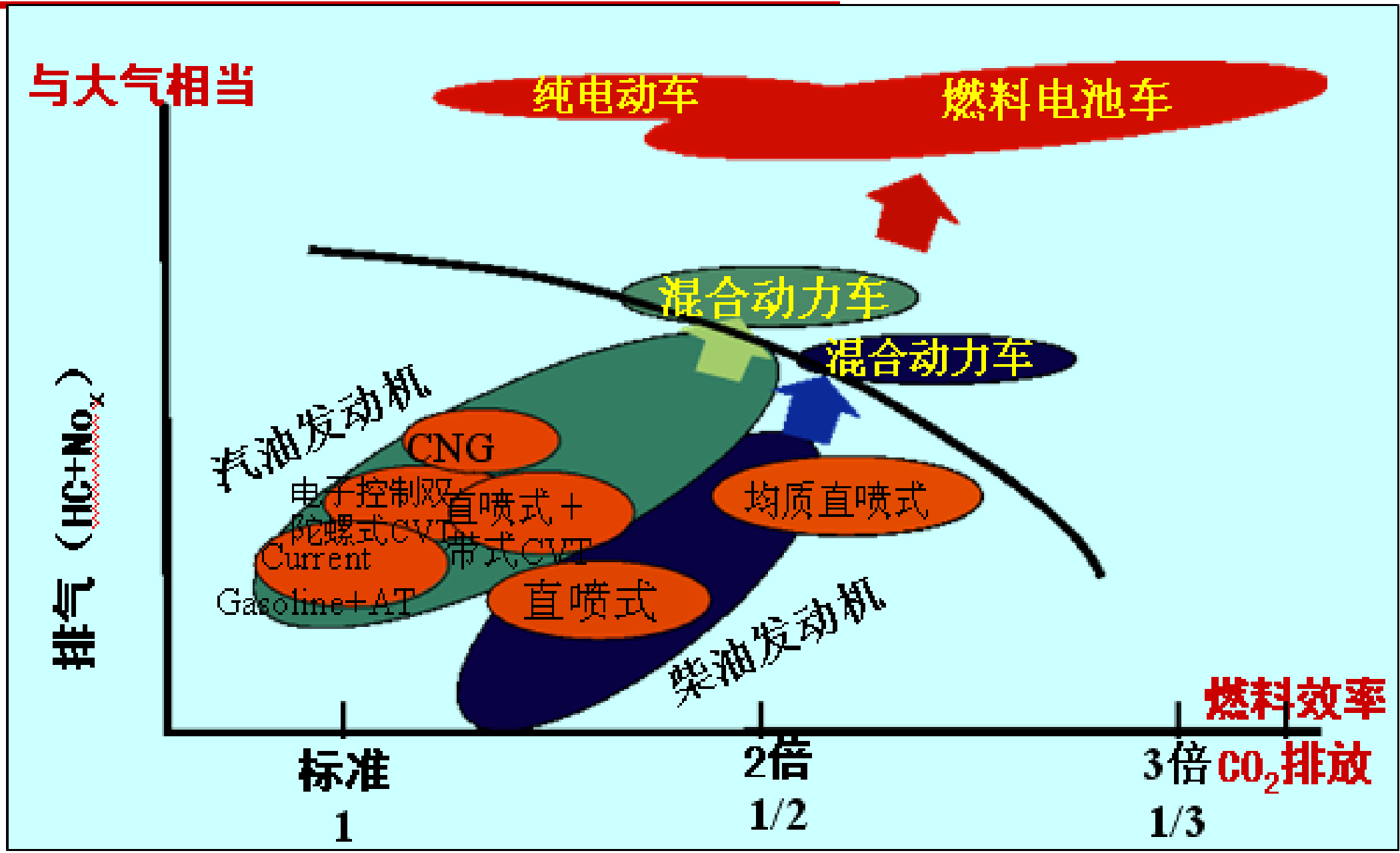
过热导致热失控、低温充放电导致短路...

动力电池是电动汽车的核心，影响动力电池系统性能的因素众多，轻量化、安全性是关键因素之一。

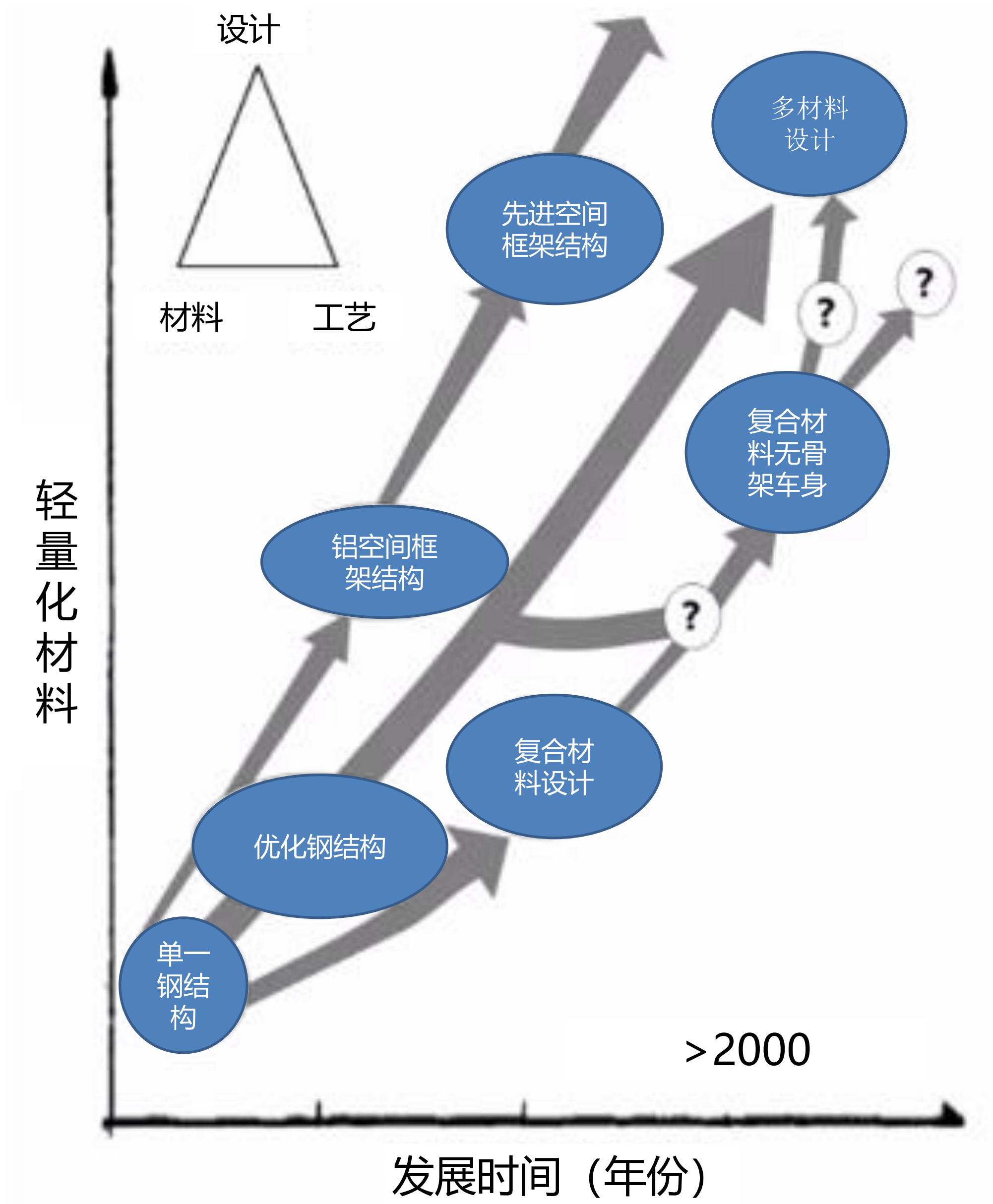


动力电池综合性能评价标准及其主要影响因素

轻量化：轻量化对车辆性能具有极其重要的影响



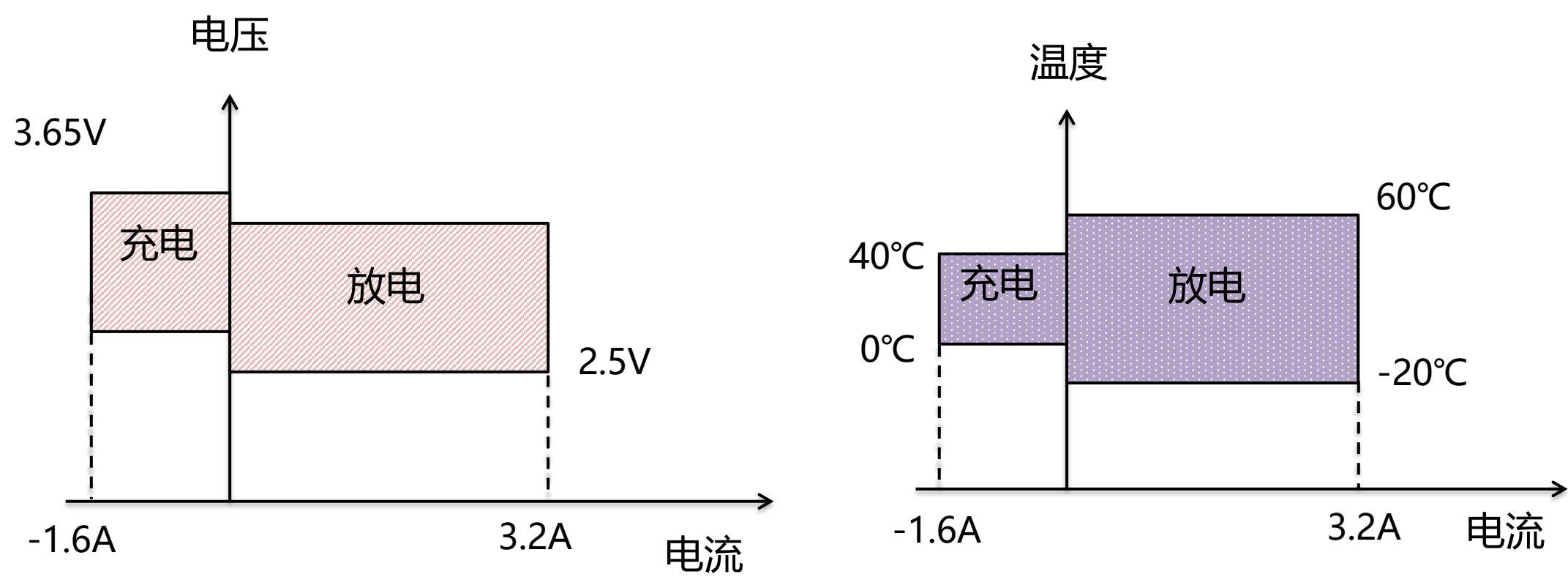
重量和能耗的关系



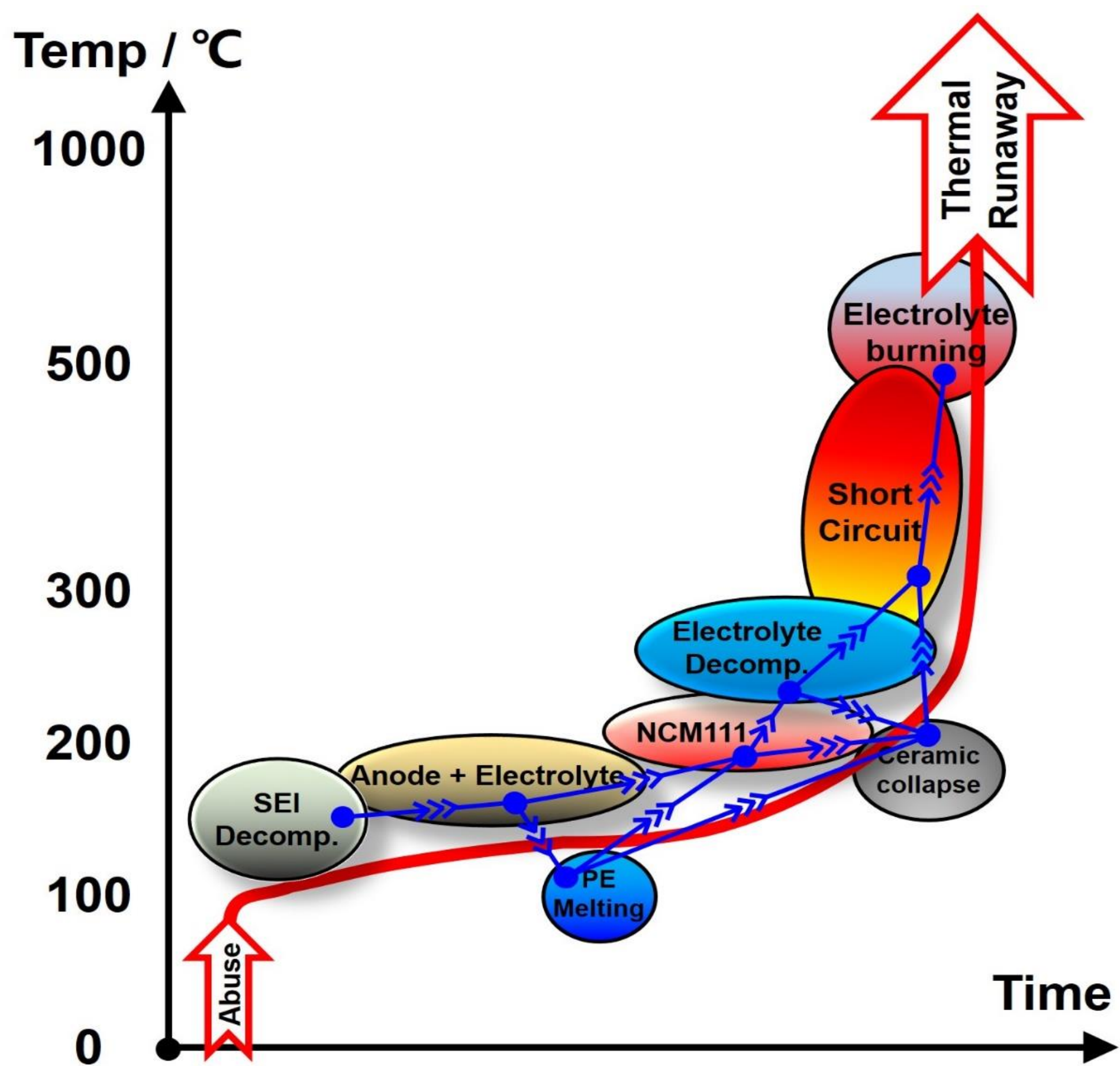
车辆新型材料的发展

轻量化是决定能量密度，续航里程以及能耗等的重要因素！

安全性：电池安全运行区域由电流、温度和电压确定



26,650型LiFePO₄锂离子单体电池的安全工作区域

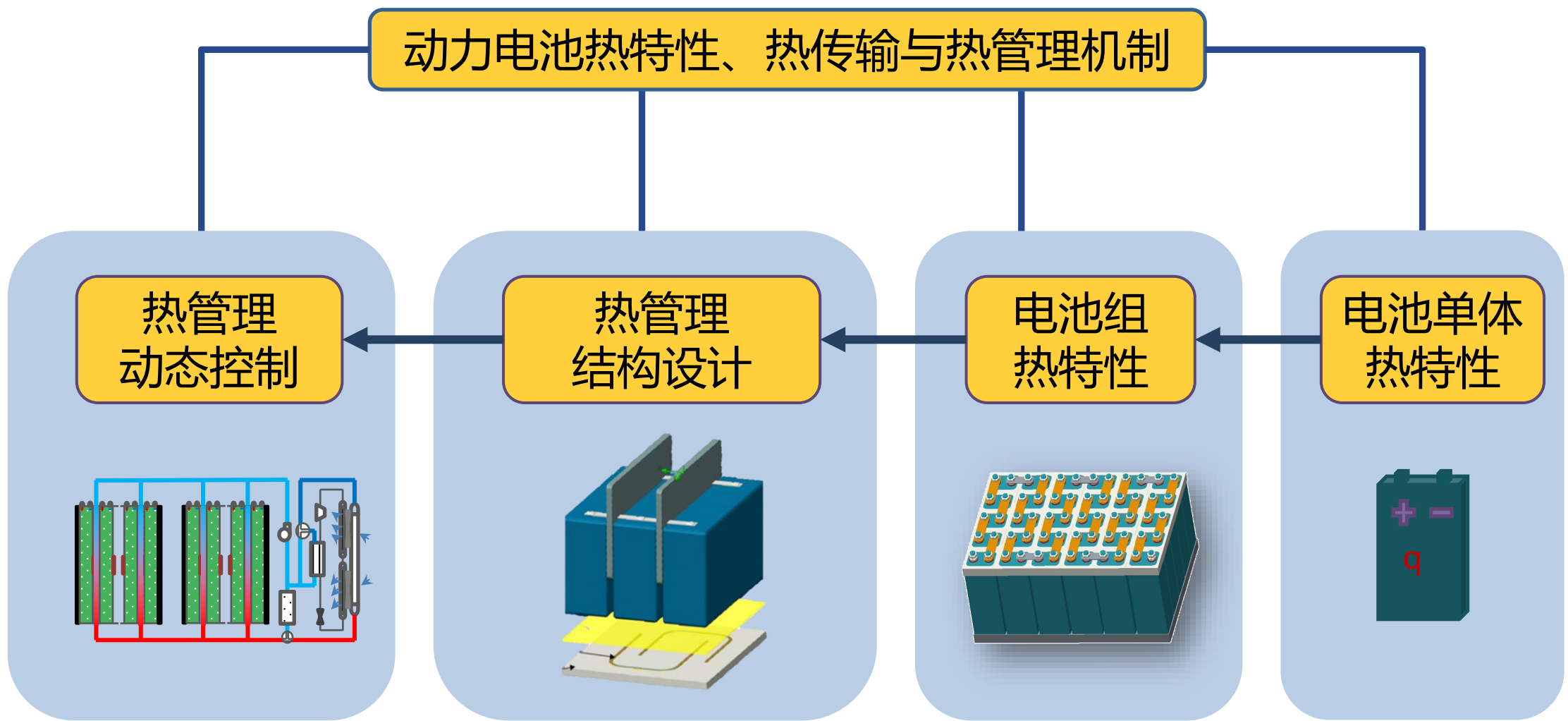


温度过高易导致电池热失控和自燃

轻量化是动力电池PACK的主要关键技术，主要包括电池成组的新材料的应用、结构优化设计以及轻量化新工艺三方面，基于材料的物理特性的结构强度是电池包结构设计的基础。



热管理是动力电池PACK的主要关键技术，主要包括电池成组的热管理结构设计和电池运行的热管理动态控制两方面，基于电池单体热特性的电池组热特性是热管理结构设计和动态控制的基础。



电池系统轻量化设计

轻量化的途径

轻量化途径：电池包轻量化技术是设计、材料与制造技术的集成应用，主要包括以下三个方面：新材料的应用、结构优化设计以及轻量化新工艺等。



轻量化的设计-新材料应用

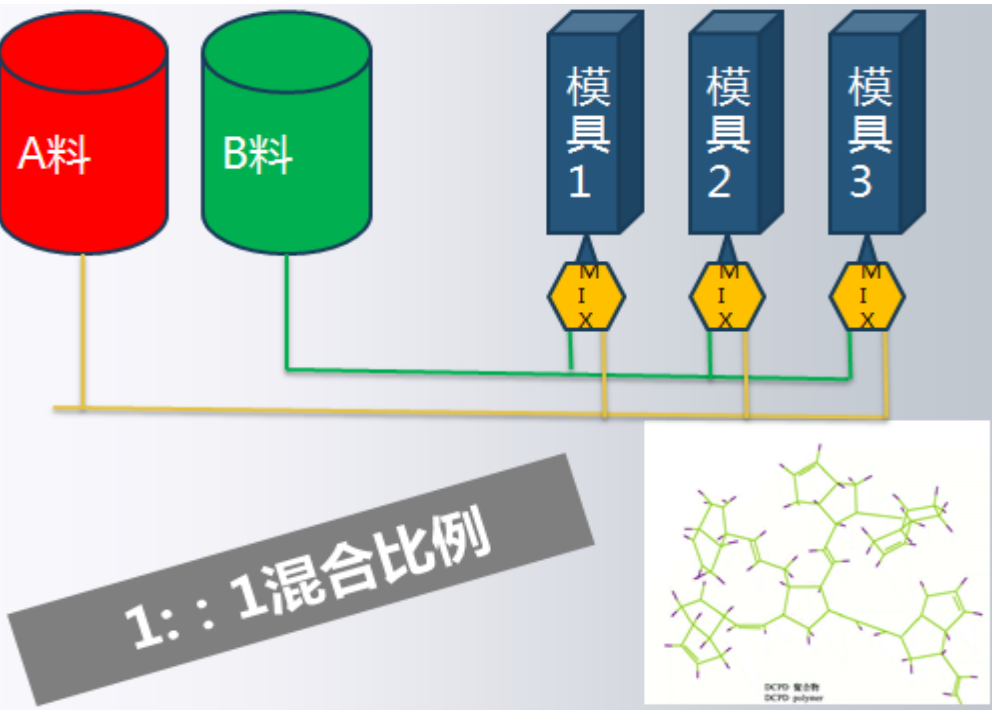
基本思想：这里的新型材料专指轻量化材料，它是能有效降低动力电池系统自重的材料。它有两大类：一类是低密度的轻质材料，如铝合金、复合材料等；另一类是高强度钢。

新材料			
种类		特点	用途
高强度钢板		1. 拉伸强度大、具有较高的屈服点； 2. 降低板厚不会对冲压件的质量造成太大影响；	一般用于需高强度、高的抗碰撞吸收能且成形要求也较严格的零件
铝合金		1. 在满足相同力学性能的条件下，比钢减少质量60%； 2. 易于回收； 3. 在碰撞中吸能多； 4. 无需防锈处理	动力电池系统覆盖件、电连接组件
复合材料	PE（聚乙烯）复合材料	密度小、易成型、耐腐蚀、隔热隔电、耐冲击、抗振、易于涂装、强度高、机械性能平衡好	动力电池系统箱体、覆盖件
	PDCPD（聚二环戊烯）复合材料		

技术途径

新型材料	结构件示例	应用说明
铝合金	压铸铝箱	1. 考虑到大面积压铸材料的流动性能，一般壁厚需要设计的较厚 > 3mm，在加强部位的壁厚 > 4.5mm，而铝合金的密度约为 2.7g/mm³，是钢材的1/3，所以压铸铝箱相比钢材的箱体减重 10%-30%。
	挤型+拼焊铝箱	
复合材料	挤型+拼焊铝箱	2. 铝型材在挤型时，壁厚一般需要 > 2.0mm，以确保足够的结构刚度和可加工性，相较而言箱体重量更轻。
	复合材料上盖	复合材料的显著特点是高强度、低密度，但是受制于成本因素，在电池包上使用的复合材料都是比较普通材料，例如SMC、改性树脂，复合材料的低密度使复合材料的轻量化效果明显，但是像SMC的延展性较差且较脆，一般使用在箱体上盖。

PDCPD材料：①PDCPD聚双环戊二烯（PDCPD:Poly-dicyclopentadience）作为一种热固性高分子材料；②具有高抗冲击强度、高弯曲模量、极好的耐腐蚀性和低密度等优异性能。



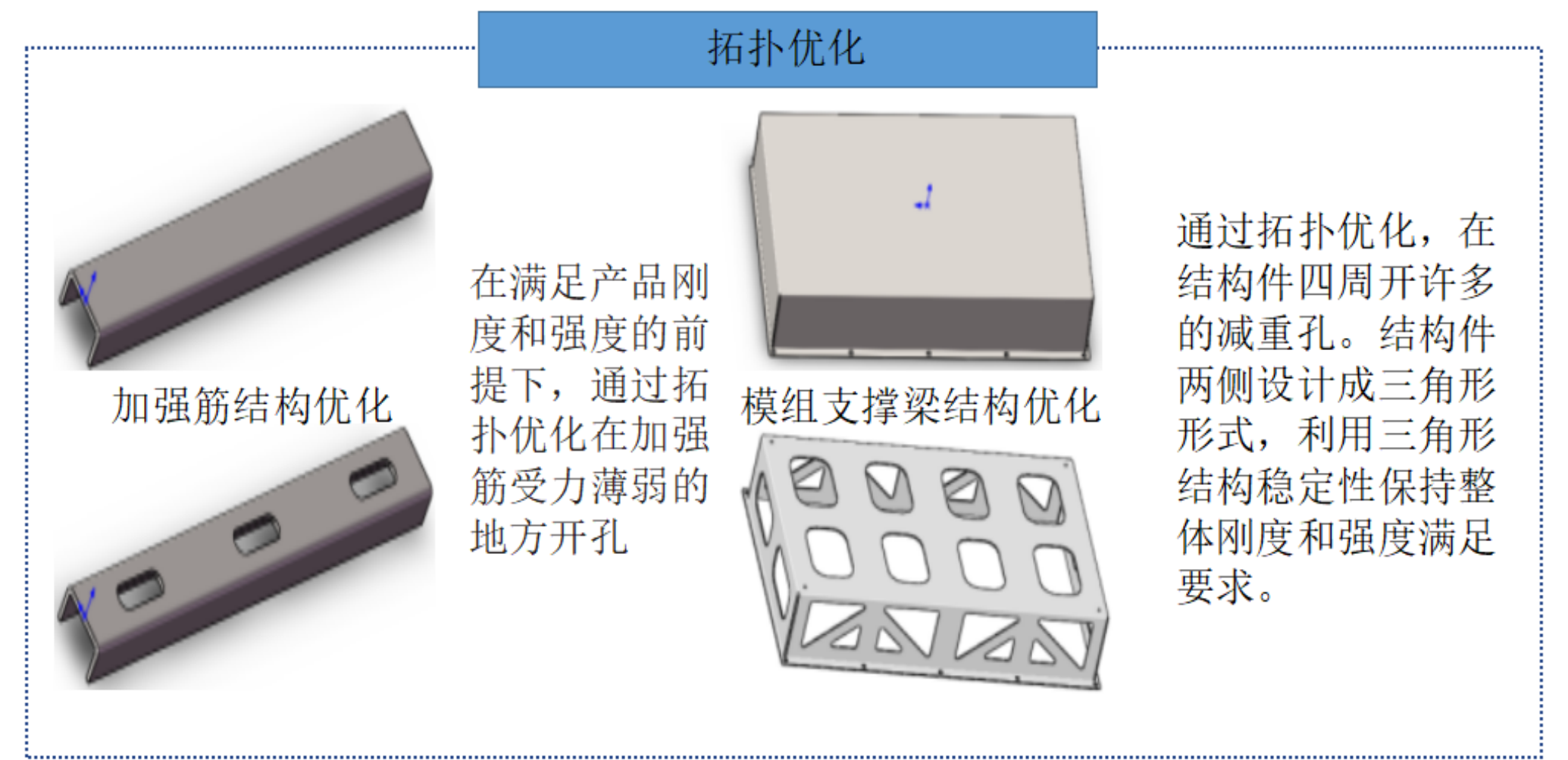
PDCPD制备过程



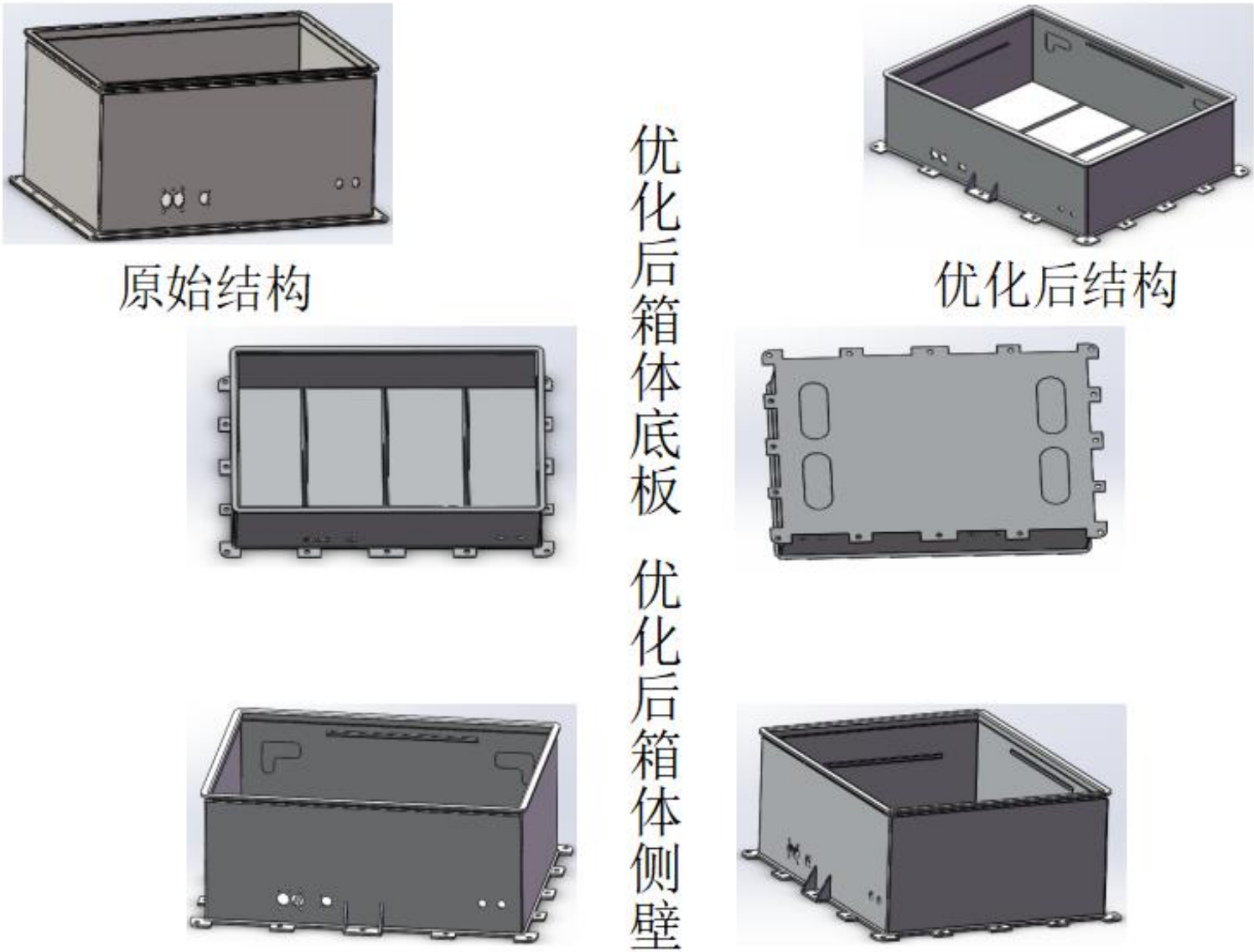
PDCPD适用领域

轻量化的设计-结构设计优化

现行的结构优化基本都要使用计算机辅助设计进行仿真以实现轻量化优化设计。通过计算机仿真洞察应力分布，在满足产品刚度和强度要求的前提下把应力集中的部位做强，把应力分散的部位切薄或者直接去除。



技术途径：①对电池组总体结构进行分析和优化，实现对电池包零部件的精简、整体化和轻质化。②通过CFD软件准确实现电池包的刚度，模态等参数检验。



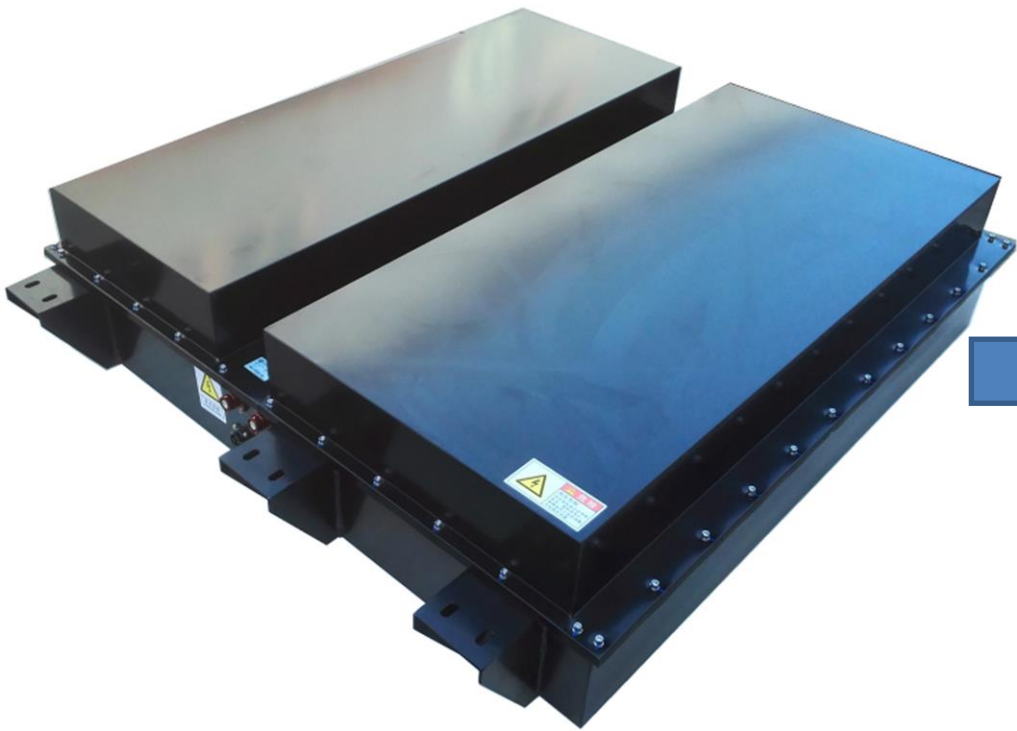
轻量化的设计-PACK轻量化新工艺

基本思想：随着新材料和新技术的逐渐应用，使动力电池系统的生产工艺发生变化。比如，冲压、板材温冲压、型材挤压和结构件铸造代替传统方法。

新工艺

分类		特点	备注
热成形	直接成形	对钢板进行比较直接的冲压工作；	材料为高强度钢板、铝合金
	间接成形	1. 板材加热前进行事先的成形工艺处理，经冷却后冲压； 2. 针对比较复杂的、变形难度大的零部件；	
焊接		把不同强度、不同厚度以及不同质地材料的零件融合在一起；	对不同硬度、不同轻度的材料进行融合，发挥不同特性，从而减轻车体重量，降低材料的消耗
液压成形		1. 把材料放在一定的模具中，利用液态水，在高压作用下铸造成形； 2. 可用作强韧度高、复杂的零部件；	主要用在不锈钢、铝合金等材料中

技术途径：①对电池组总体结构进行分析和优化，实现对电池包零部件的精简、整体化和轻质化。②通过CFD软件准确实现电池包的刚度，模态等参数检验。



箱体材料：钢
工艺方式：冷轧

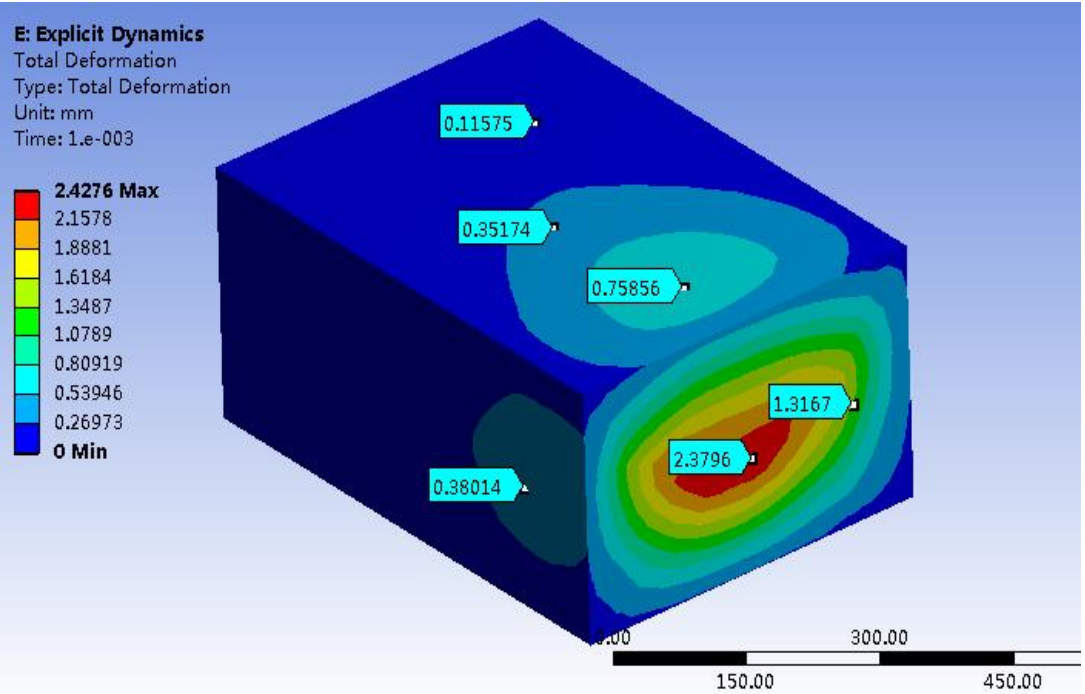


箱体材料：复合材料
工艺方式：注塑成型

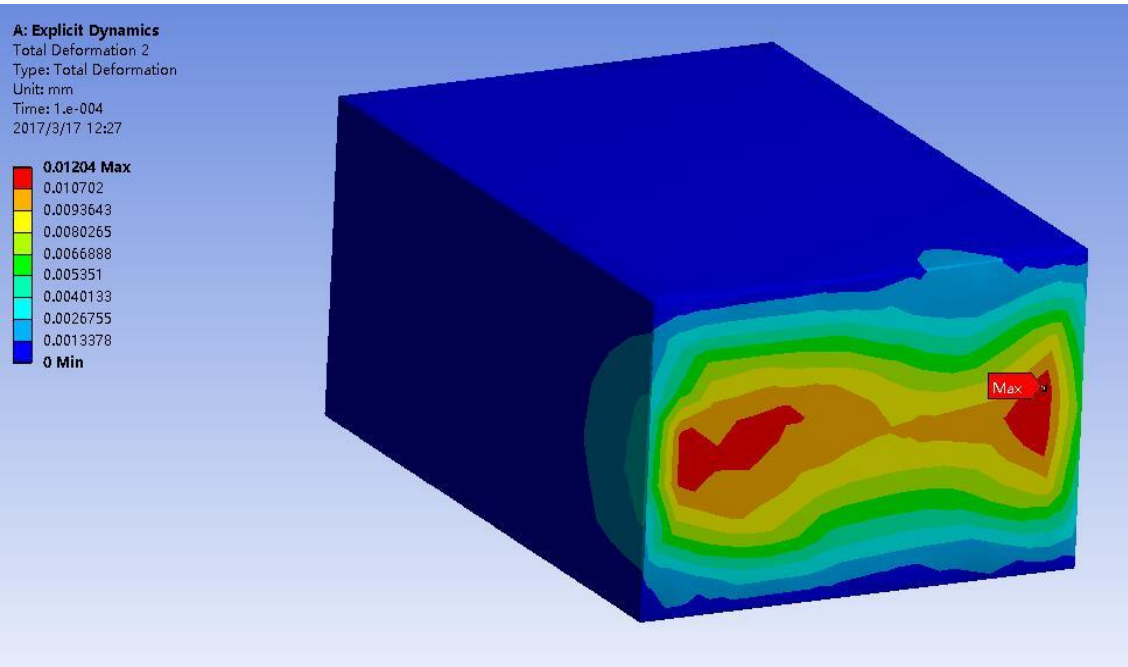
轻量化的设计-应用案例

电池包外壳案例

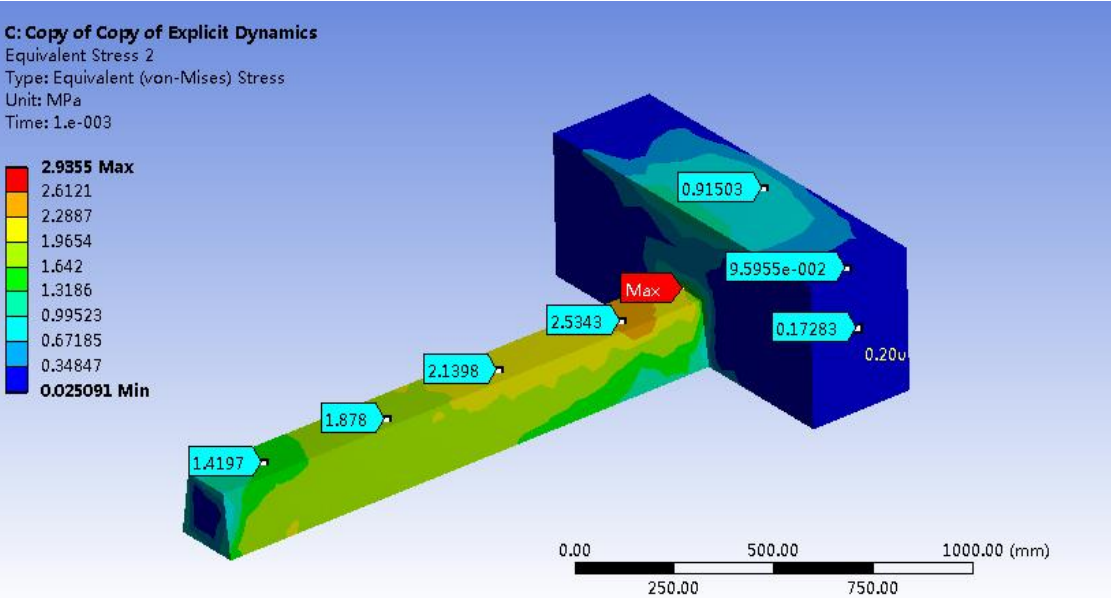
输入项目	材料1	材料2
外壳材料	Q235槽钢	PDCPD
密度	7.8g/cm ³	1.03g/cm ³
厚度	1.5mm	6mm



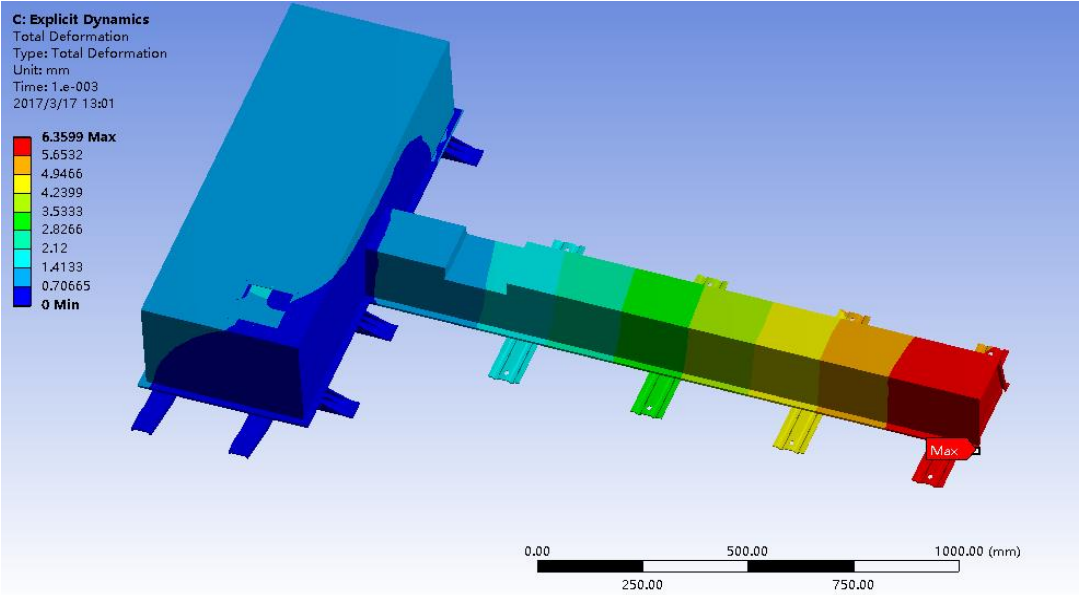
PDCPD材料方壳体Y方向挤压形变



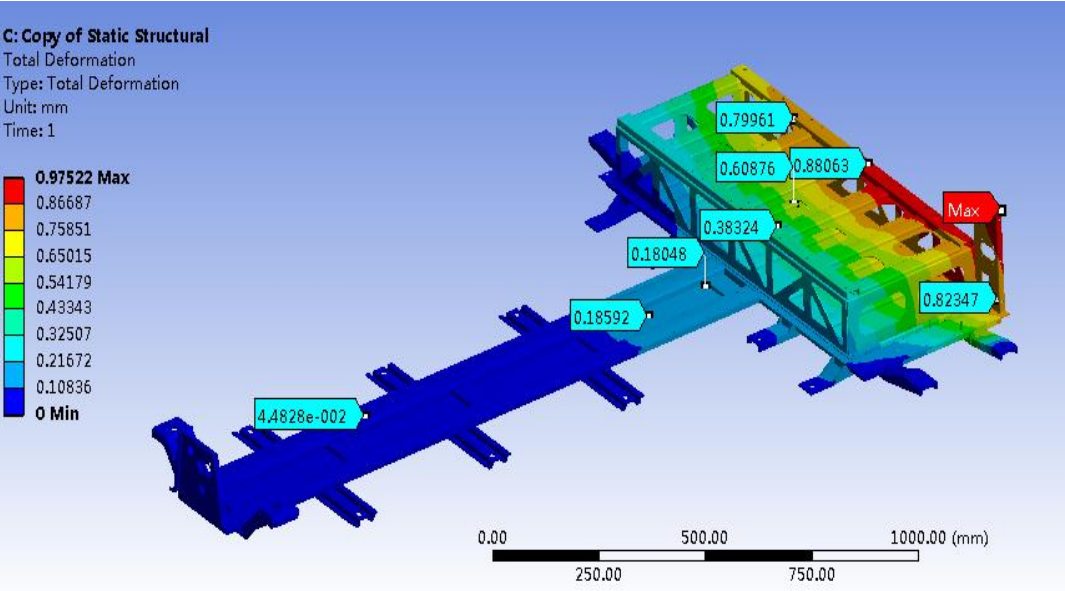
钢材方形壳体Y方向挤压形变



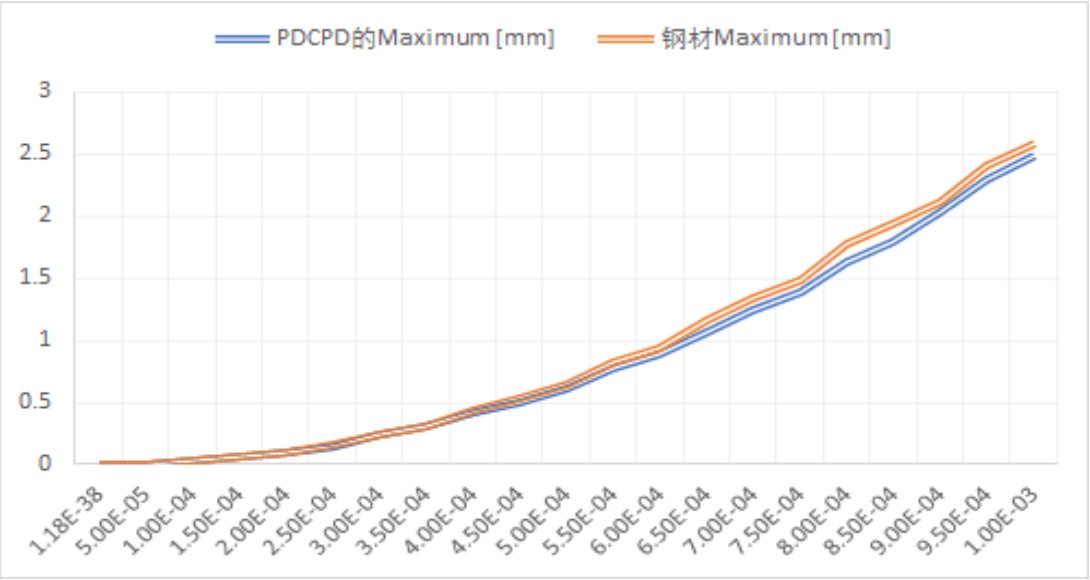
PDCPD材料T形壳体Y方向挤压形变



钢材T形壳体Y方向挤压形变



PDCPD材料T形壳体整体位移分布图



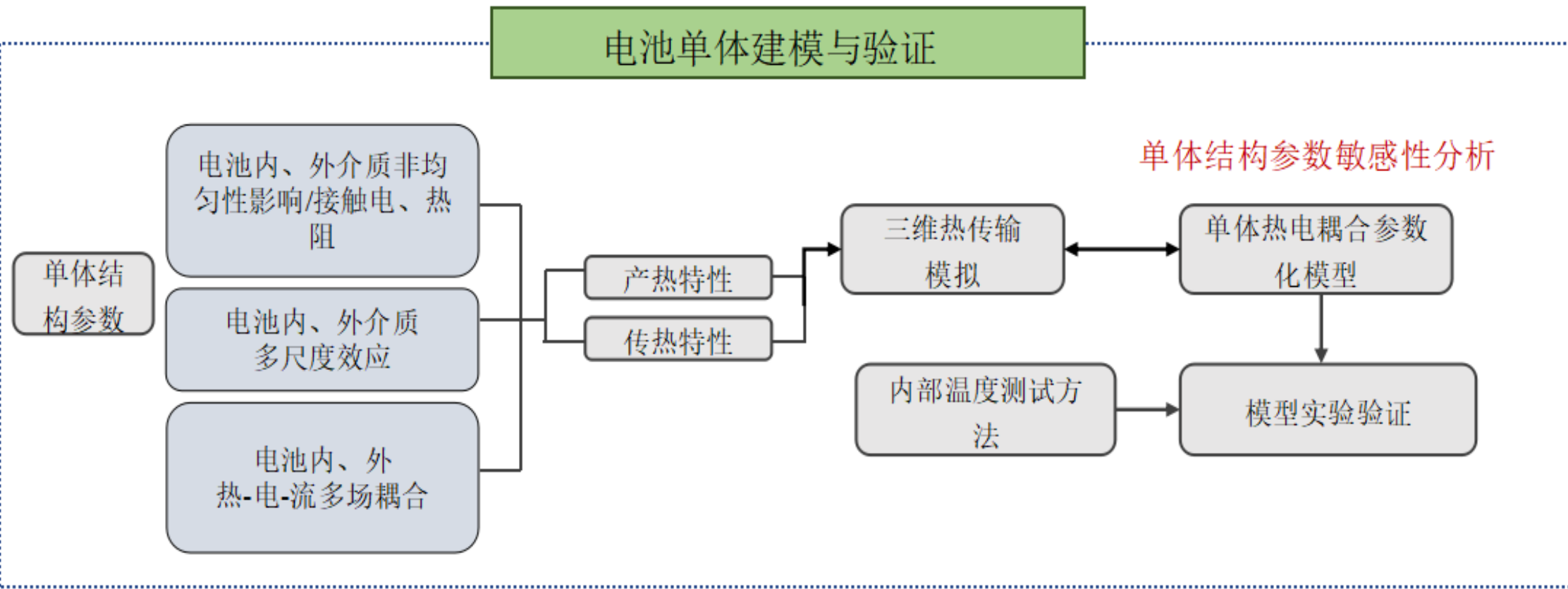
PDCPD与钢材壳体最小形变

电池系统安全性设计

主要内容：在流速和流体的物理性质给定的条件下，对流换热换热界面上的换热强度不仅取决于速度场和温度梯度场本身，而且还取决于它们之间的夹角（即不仅取决于速度场、温度梯度场、夹角场的绝对值，还取决于这三个标量值的相互搭配）

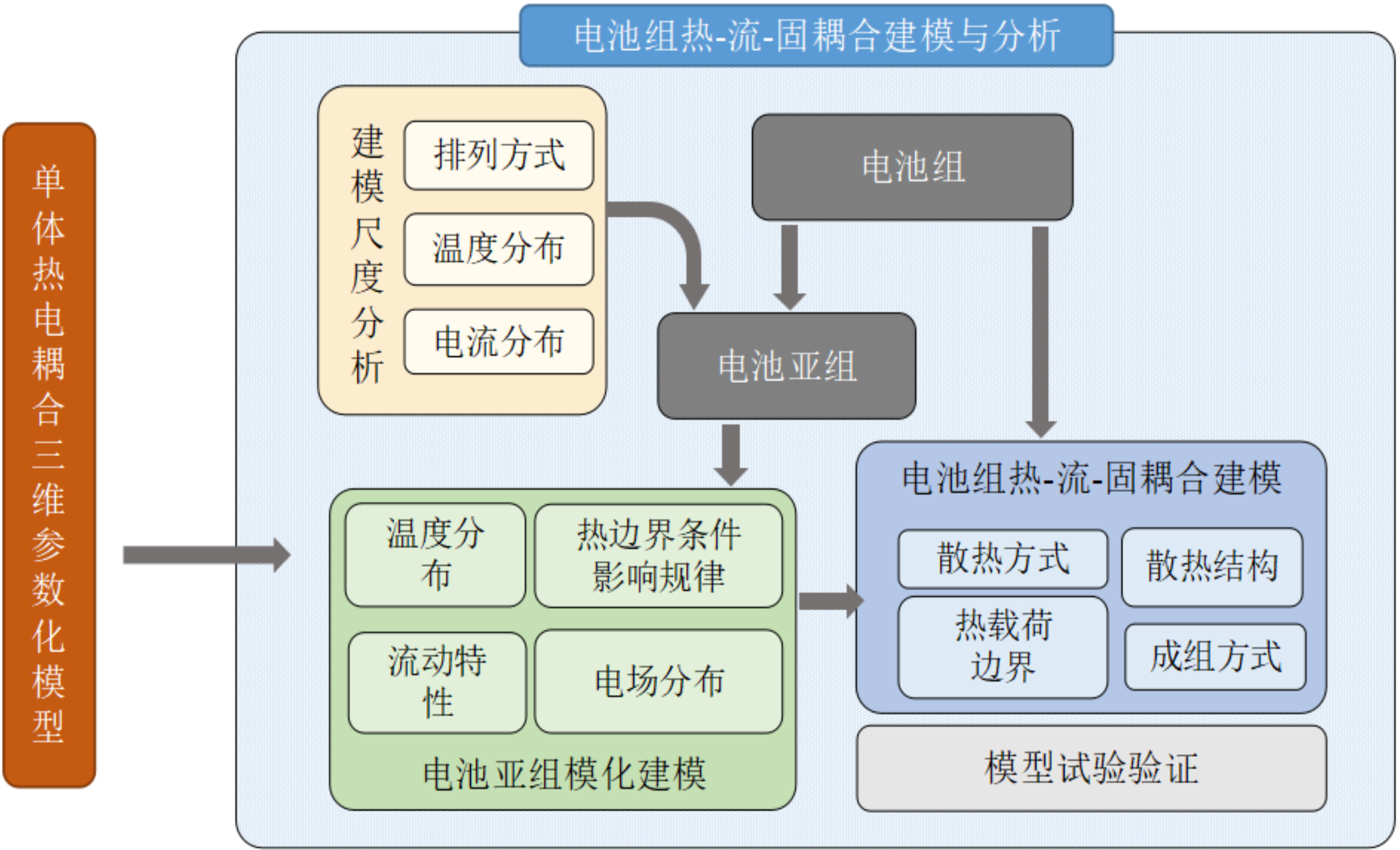
电池单体热电耦合多维参数化建模

技术途径：①基于单体热电耦合一维产热模型，建立热电耦合的单体三维热传输模型。②通过结构参数的敏感性分析，探讨具有全局影响的关键特征结构参数及其对性能的影响机制和规律。③以关键特征结构参数为变量，建立电性能和产热特性一维、热传输三维的电池单体热电耦合多维参数化热模型，并进行相应的实验验证。



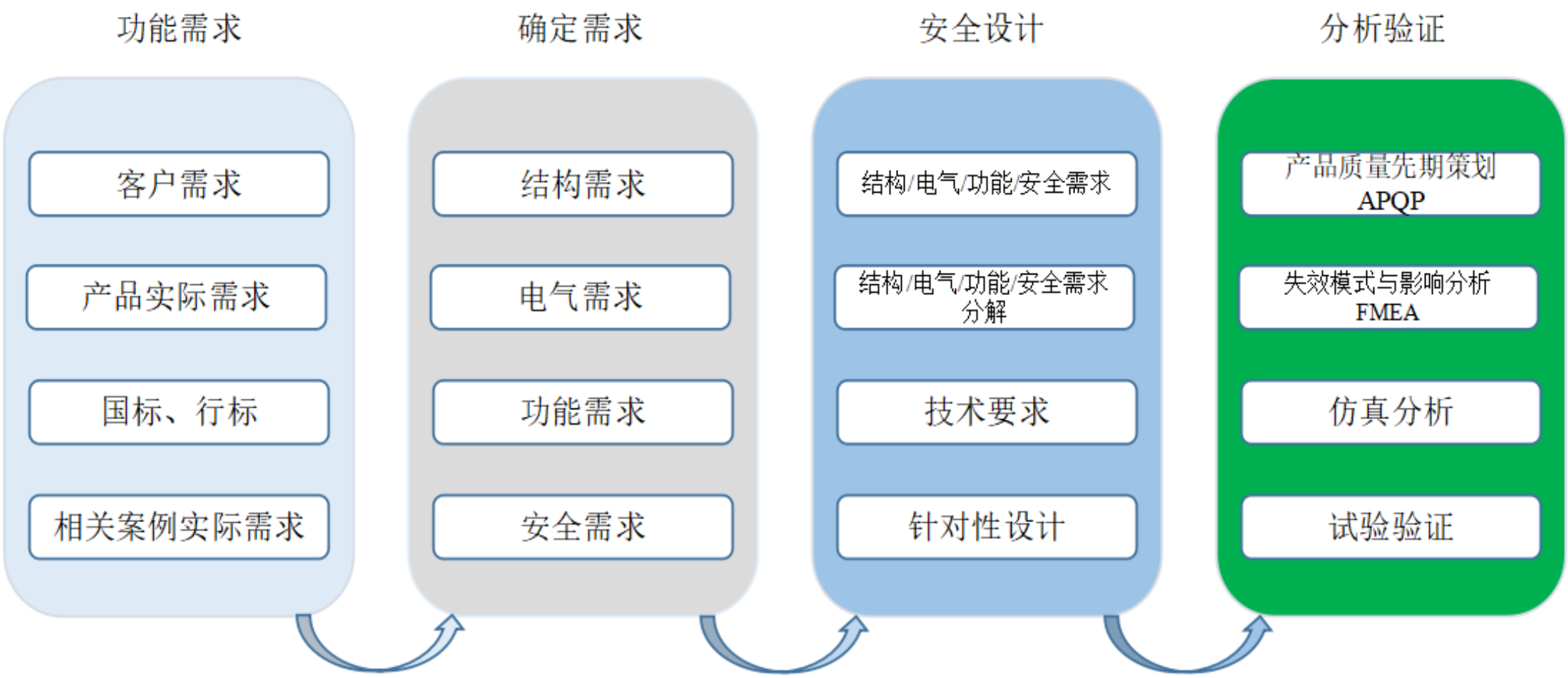
电池组多维多层多场耦合建模

技术途径：①电池组进行层次分解，耦合单体参数化模型，建立不同层次电池亚组的电-热-流耦合模型。②通过层次间耦合，建立电池组电-热-流多层次耦合模型和仿真平台。③系统分析不同成组方式、不同工况和外部热边界条件对电池组整体电、热性能的影响规律，并对模型进行验证。



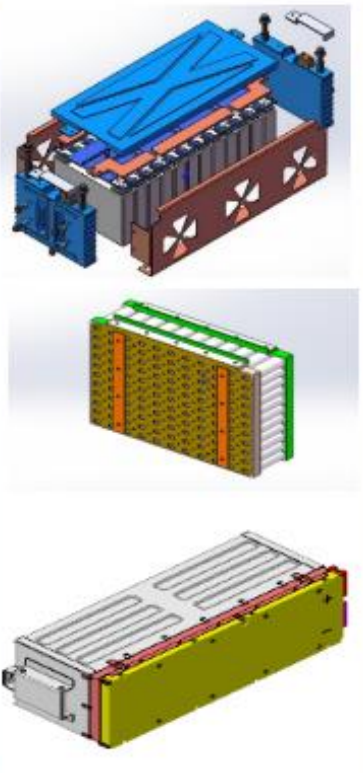
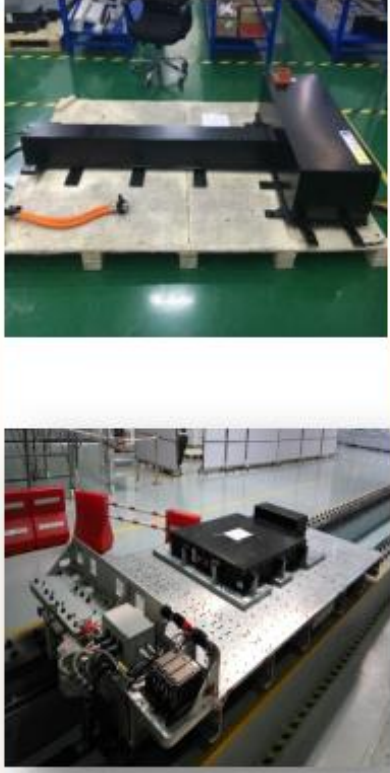
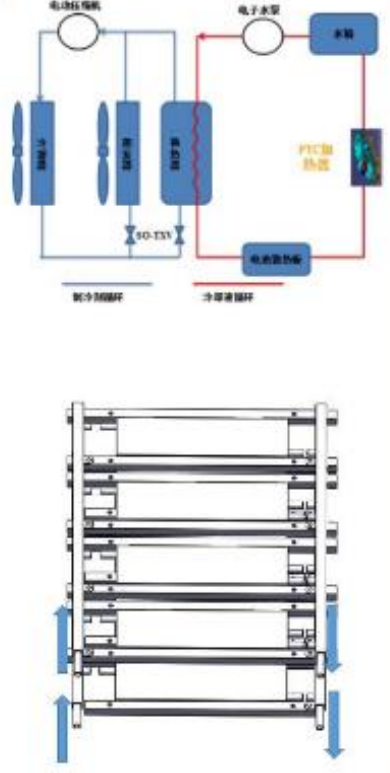
产品设计依据

技术途径：产品安全的设计是从客户的需求出发，综合考虑电芯、模组、材料、热管理、结构、软硬件、安全性、轻量化、高效能等多维度；从开发设计角度（APQP、FMEA、仿真验证、试验验证）验证，设计出符合客户要求的产品。

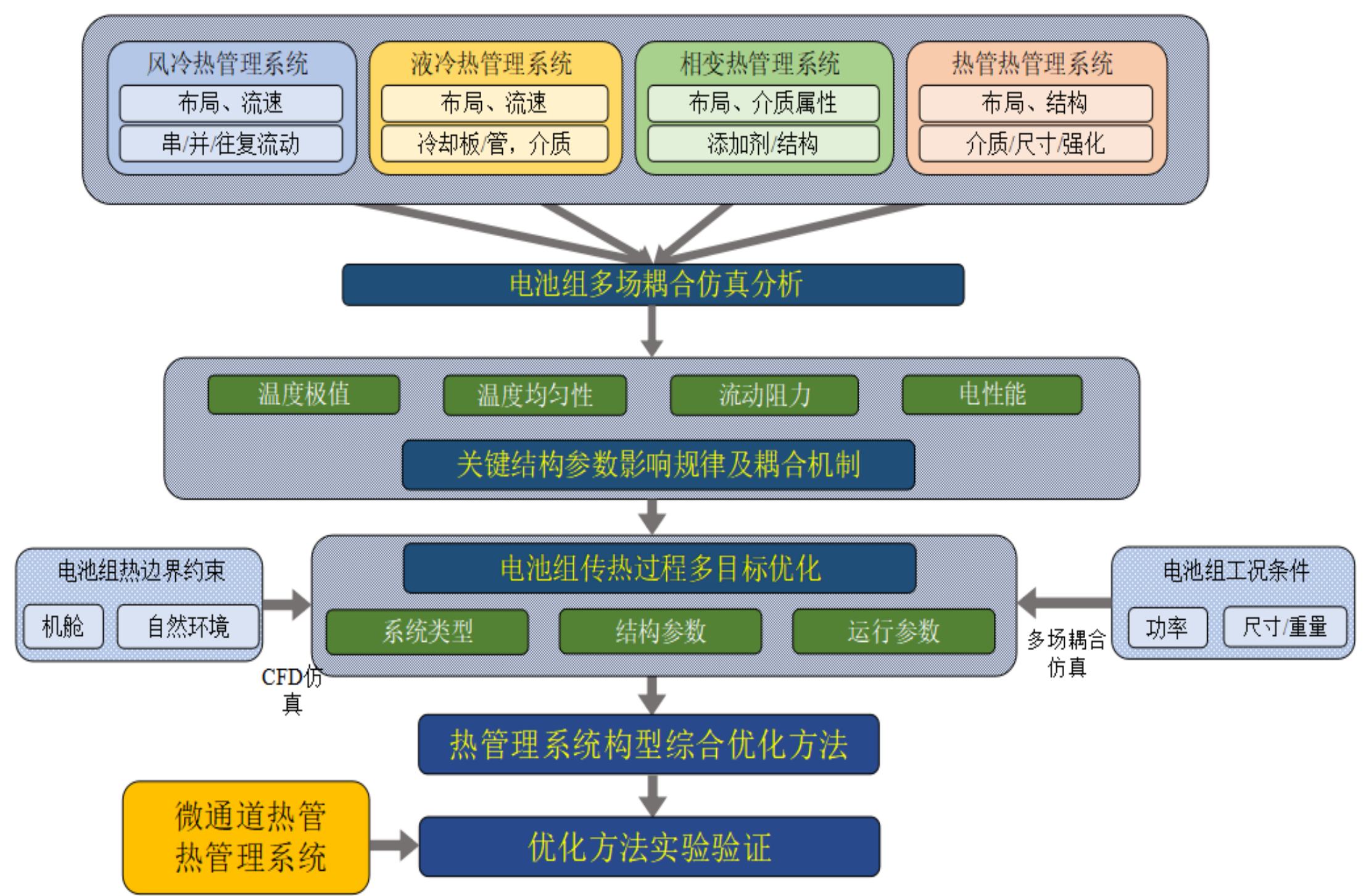


单体热特性分析研究的核心，在于单体产热和传热的建模。

热管理系统部件选型

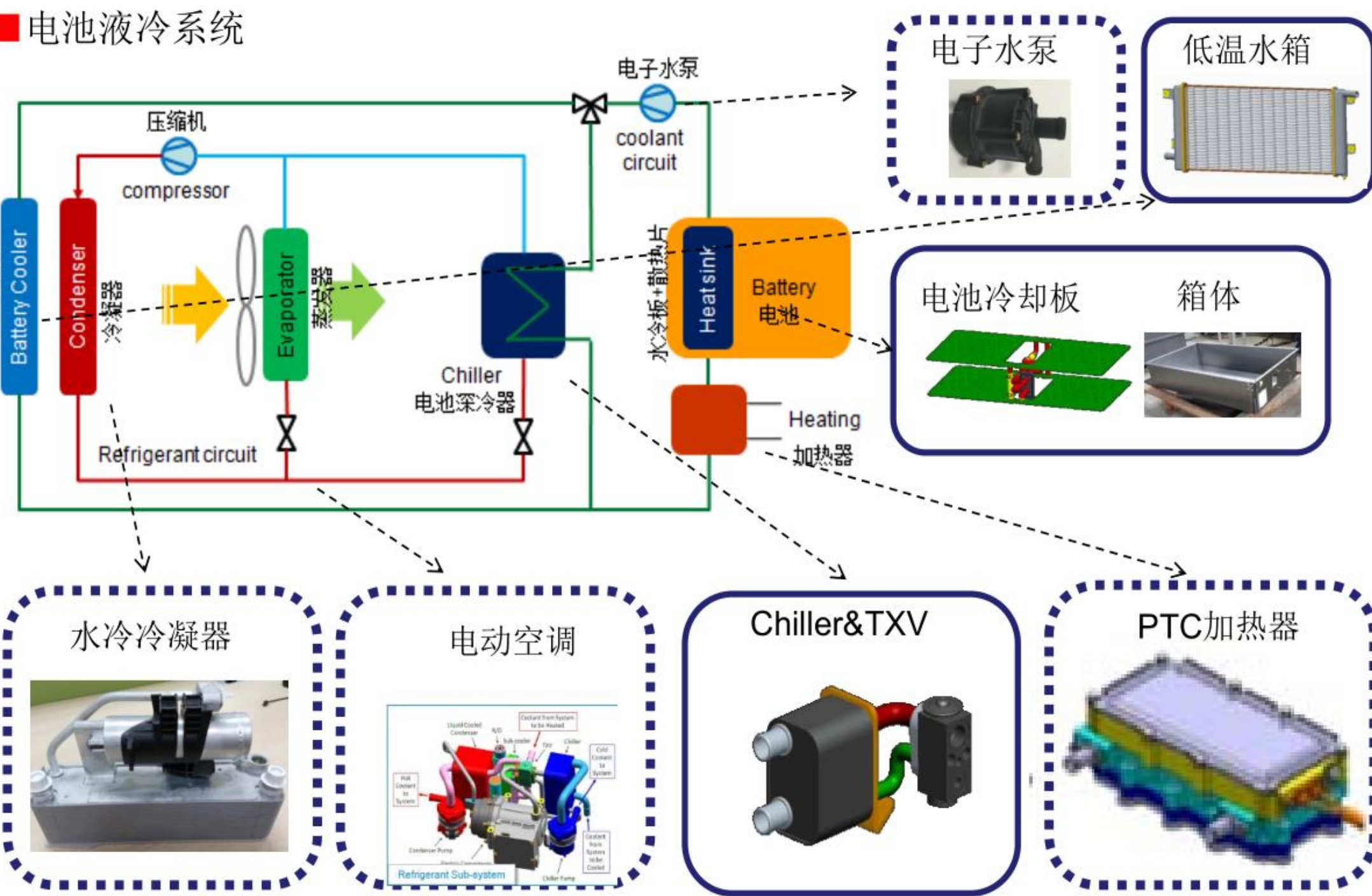
电芯选型	模组设计	箱体设计	电气设计	热管理设计
● 方壳电芯 ● 圆柱电芯 ● 软包电芯	● 方壳模组 ● 圆柱模组 ● 软包模组	● 钣金箱体 ● 铝合金箱体 ● 复合材料箱体	● 方壳电芯 ● 圆柱电芯 ● 软包电芯	● 自然风冷 ● 液冷/液热 ● PTC加热
				

单体热特性分析研究的核心， 在于单体产热和传热的建模。

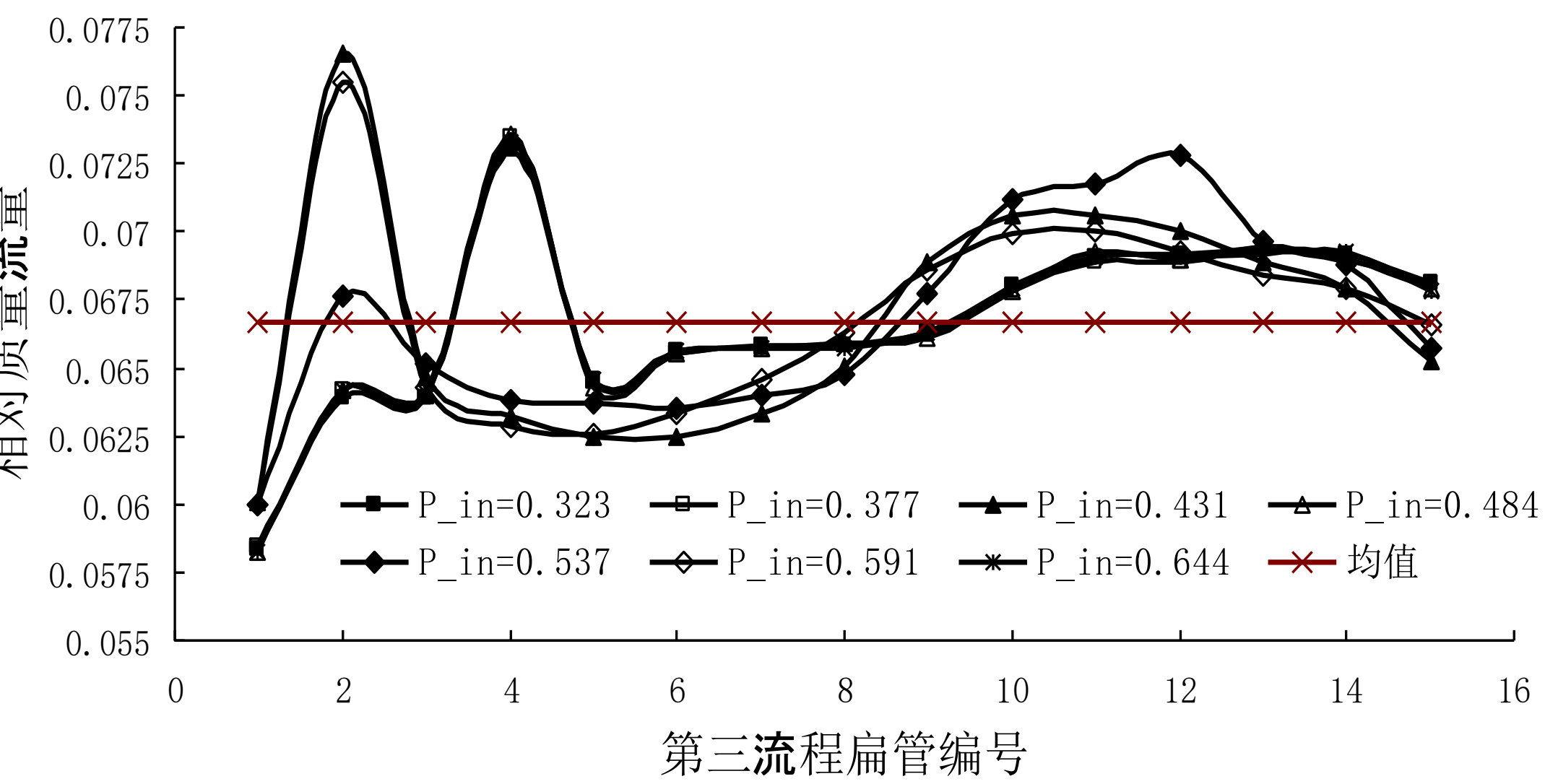


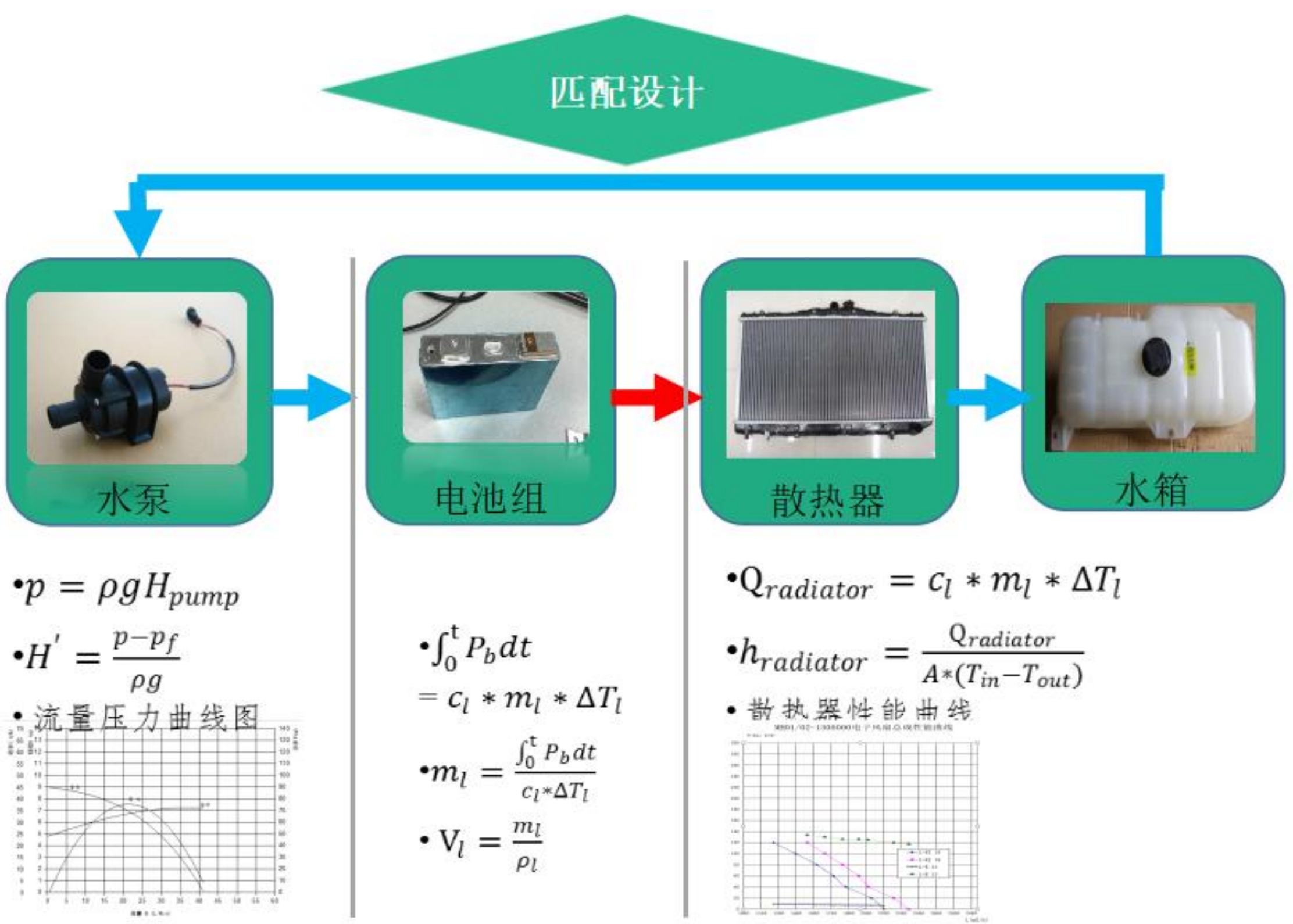
电池组热管理系统匹配

对于满足常规性能要求的热管理系统的开发，重视工程经验的积累，熟悉动力电池热管理系统的结构及其工作原理，并在此基础上进行匹配设计，最终实现稳定、可靠、满足常规性能的热管理系统。

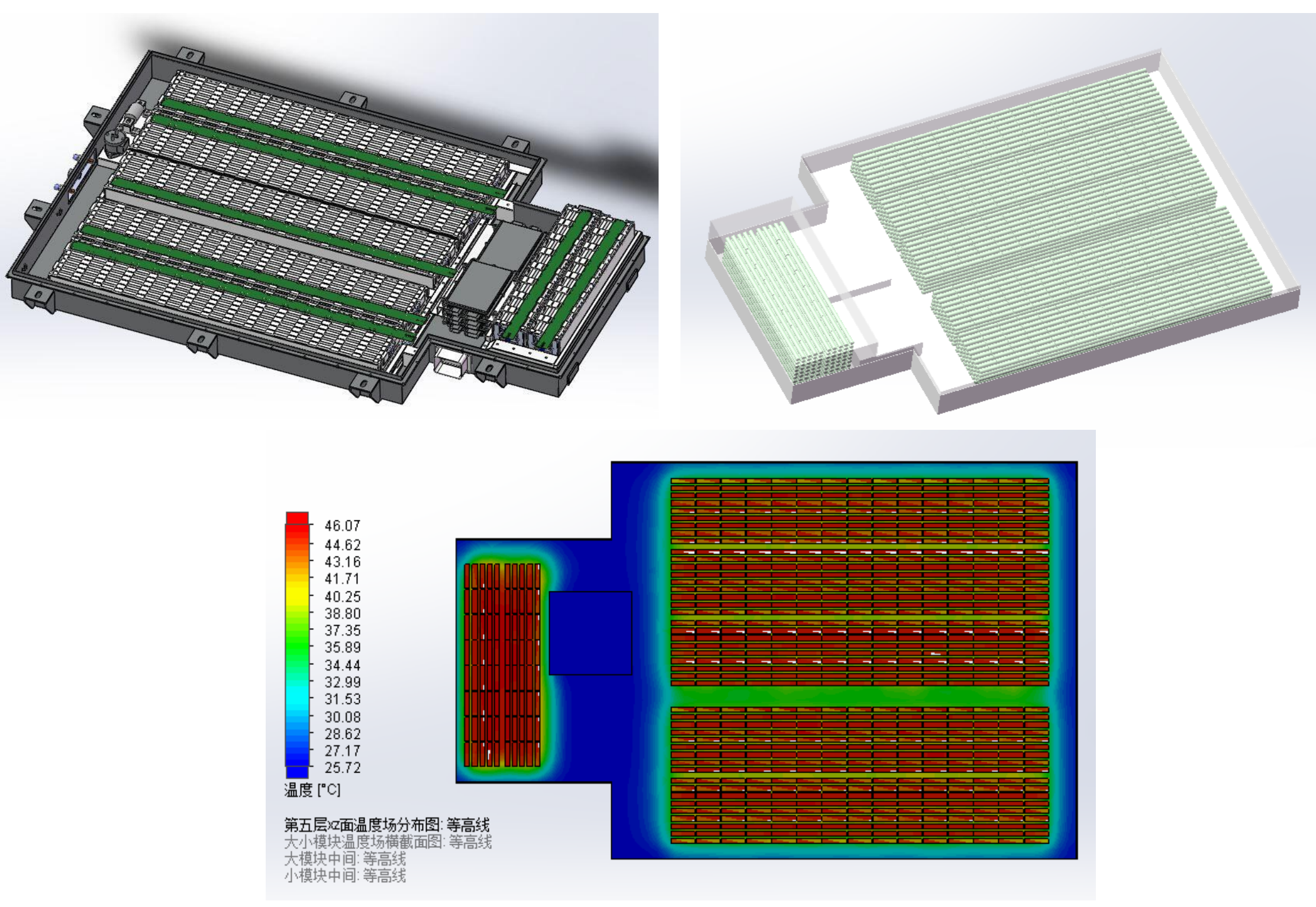


电池组热管理系统部件选型

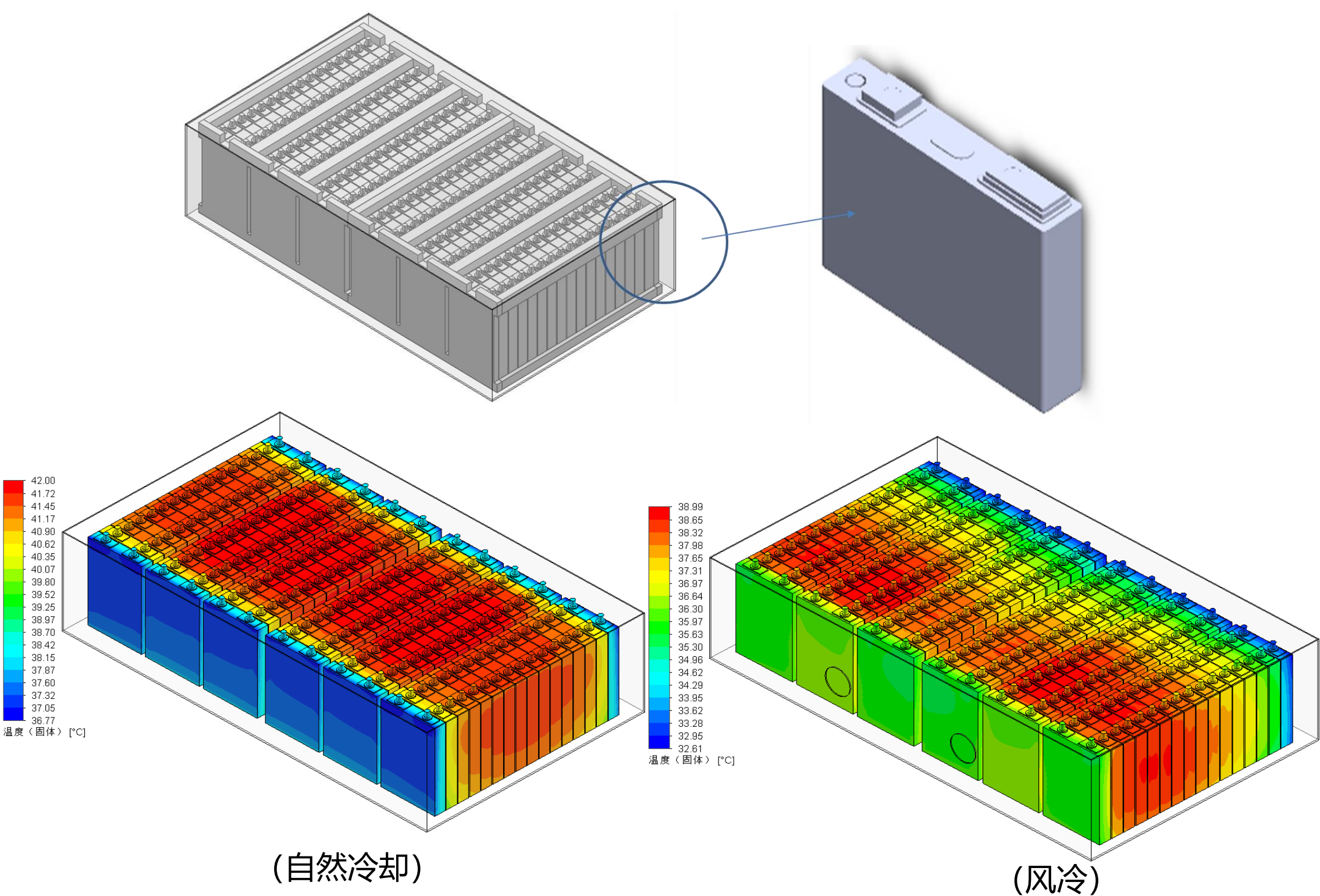




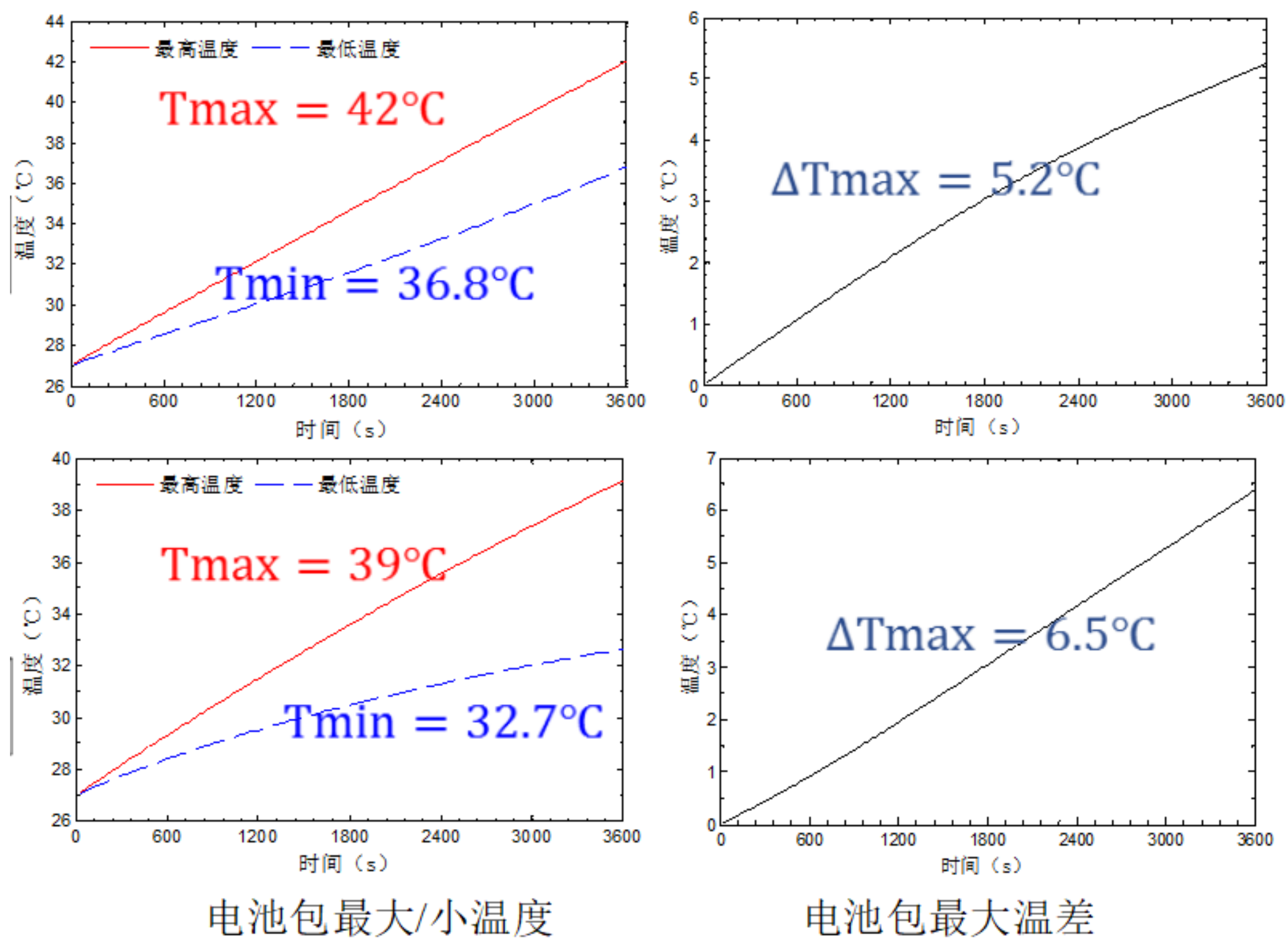
电池组热特性分析--热特性CFD分析研究--车用动力电池包温度场分析



◆ 不同冷却形式CFD计算

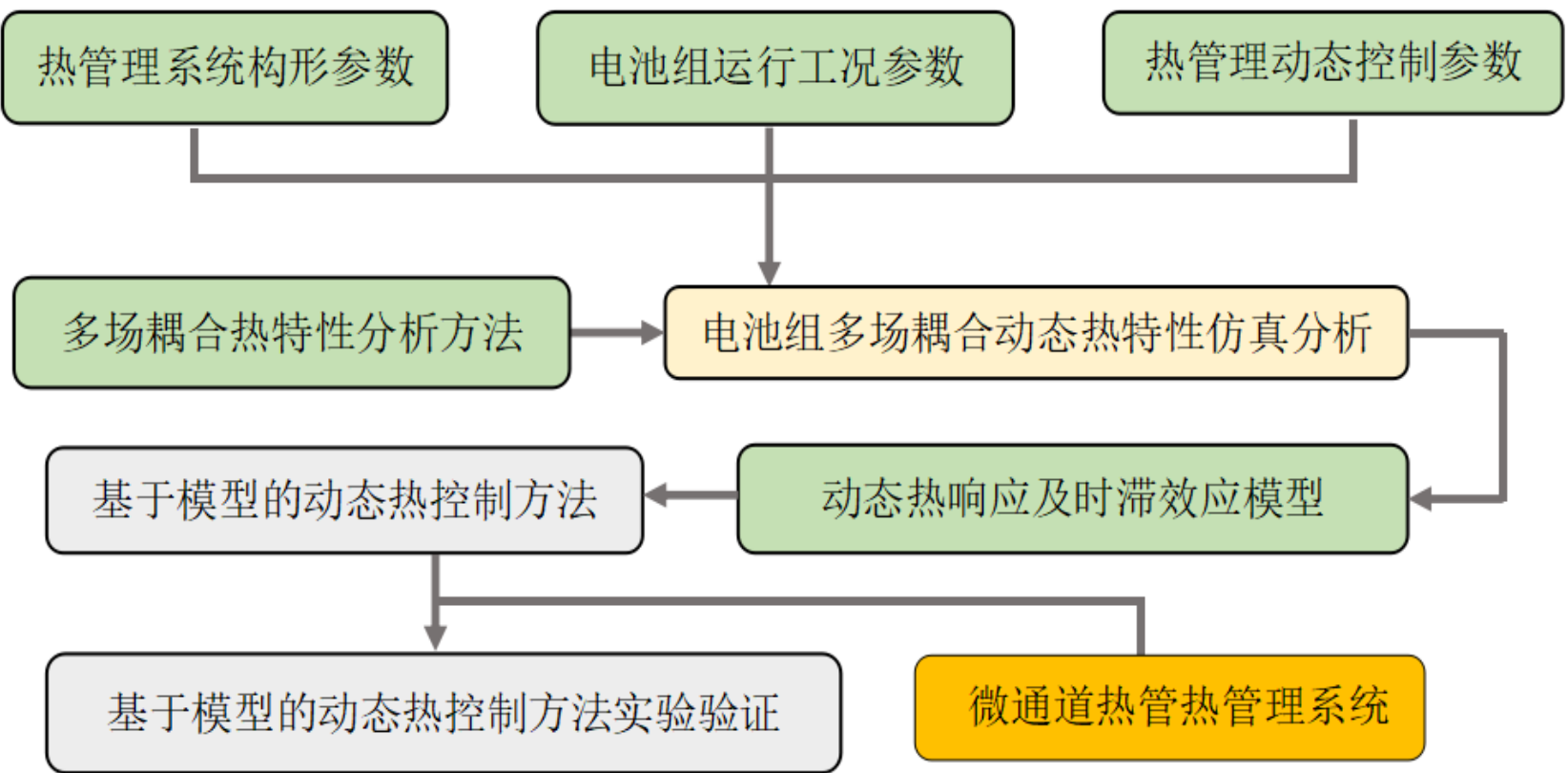


电池包温度分布云图



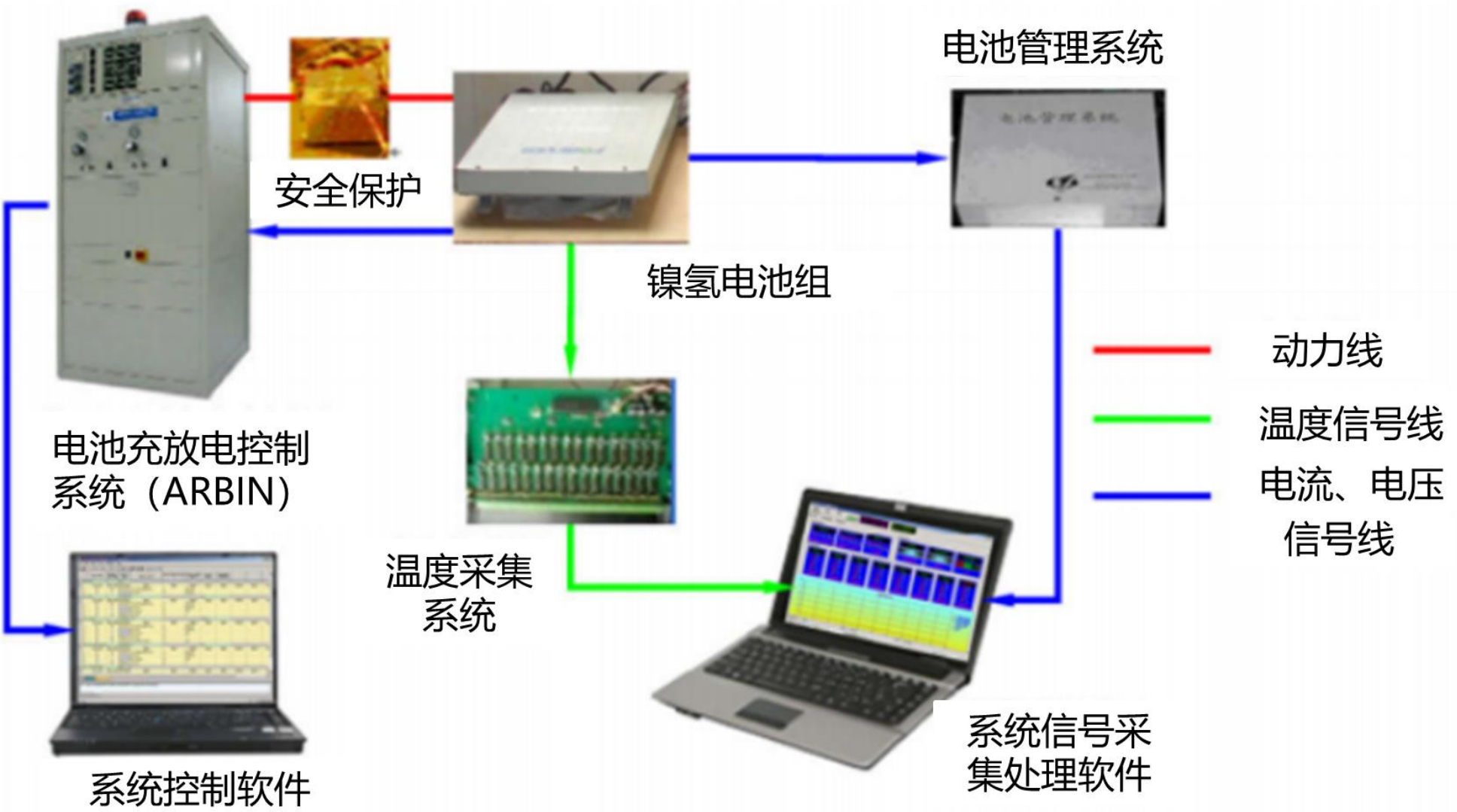
BMS设计开发

技术途径：①分析热管理系统构形对电池组动态热特性的影响，揭示电池组温度动态变化及时滞效应的变化规律及影响机制；②建立动态热响应及时滞效应预测模型，建立基于模型的热管理动态控制方法，耦合到BMS系统中，利用所设计的微通道热管热管理系统等进行实验验证。



电池组热管理系统集成与实验验证

通过电池台架热管理试验以及实车夏季高温试验验证，可以实现在任何情况下电池温度控制48℃以内，常规工况控制在45℃以内。



电池实验测试系统原理

电池单体热特性分析--电池单体产热建模

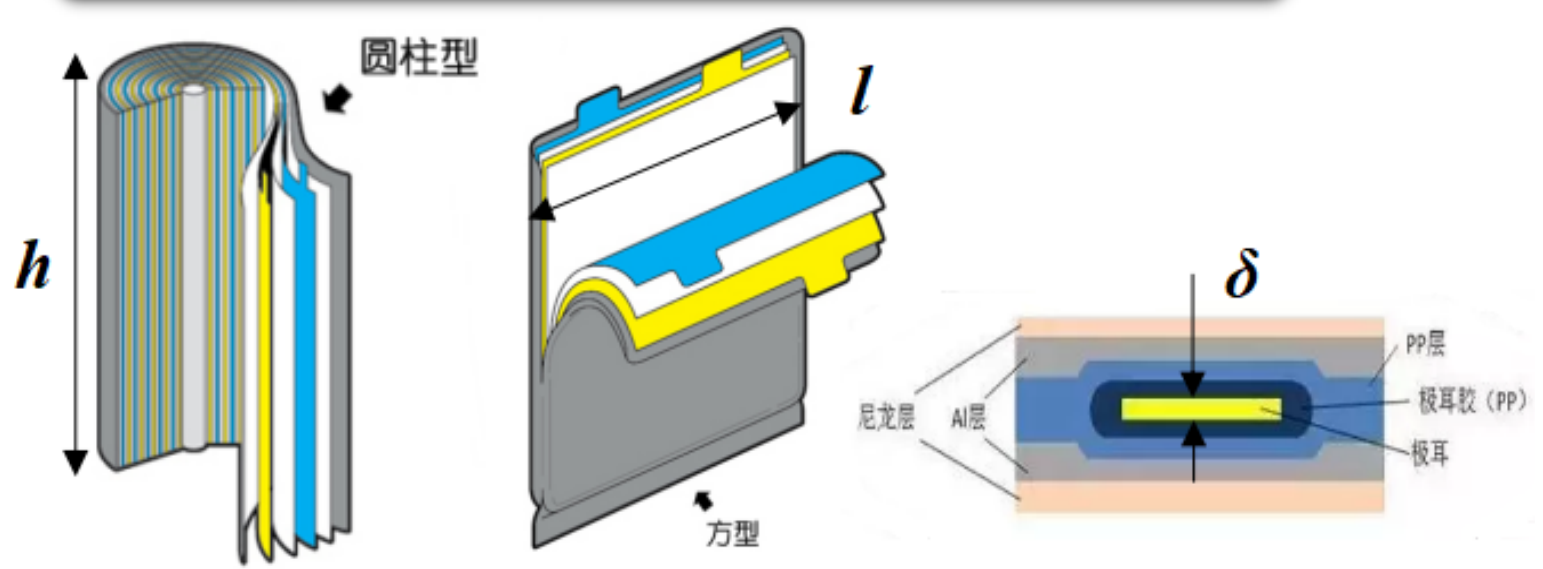
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q$$

电池单体产热可由Bernardi方程确定，通过电流、电压确定产热率，目前产热研究主要集中在等效内阻的研究。

Bernardi产热方程 $q = I(U - V) - I(T \frac{dU}{dT})$



计算可逆热 $I(T \cdot \partial U / \partial T)$ 可采用能量法，计算不可逆热 $q = I(U - V) = I^2 R$ ，求解等效内阻是关键！

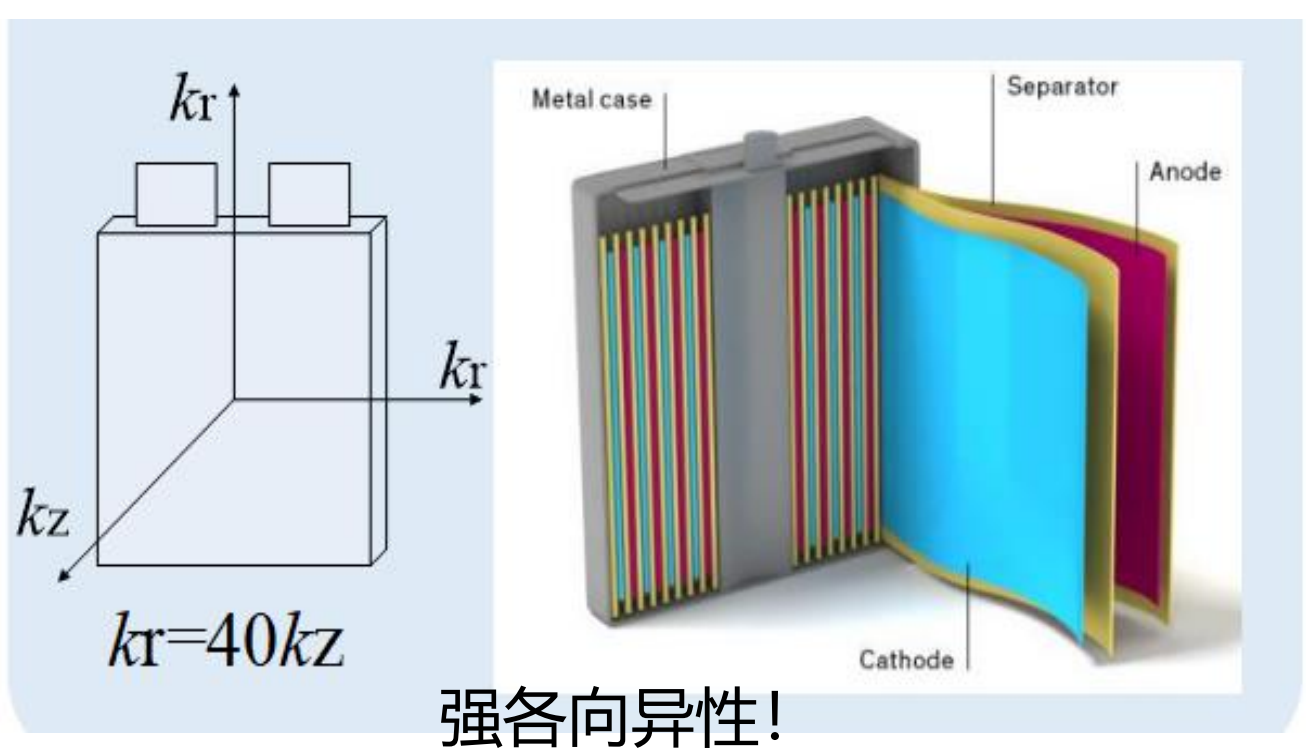


电池内部结构是决定等效内阻和产热率的关键因素，相关研究尚未见文献报道。难点及瓶颈：建模中如何考虑内部结构参数对内阻的影响？

热失控防范技术--电池单体热特性分析--电池单体传热建模

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q$$

□ 电池单体传热研究的核心在于确定导热系数从而获得温度分布。

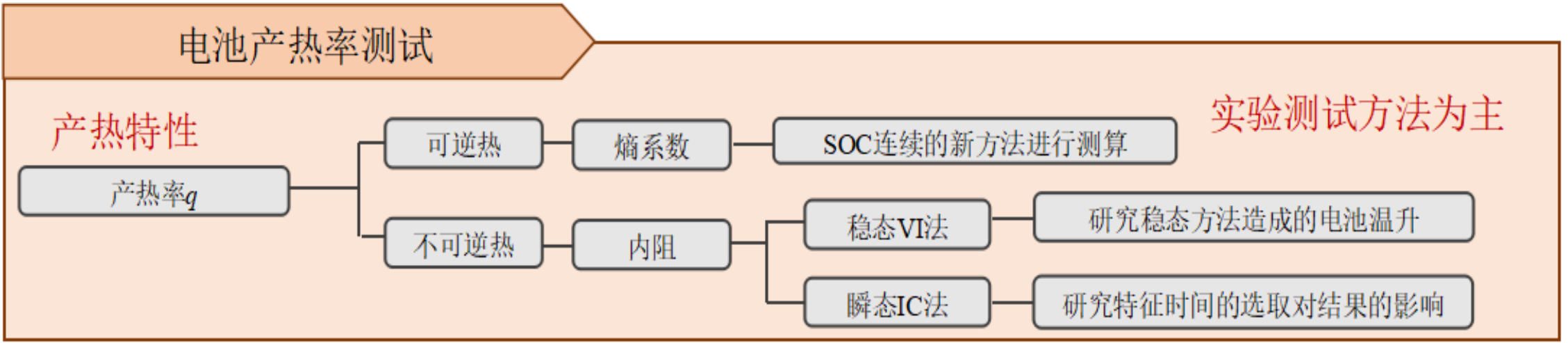


强各向异性！

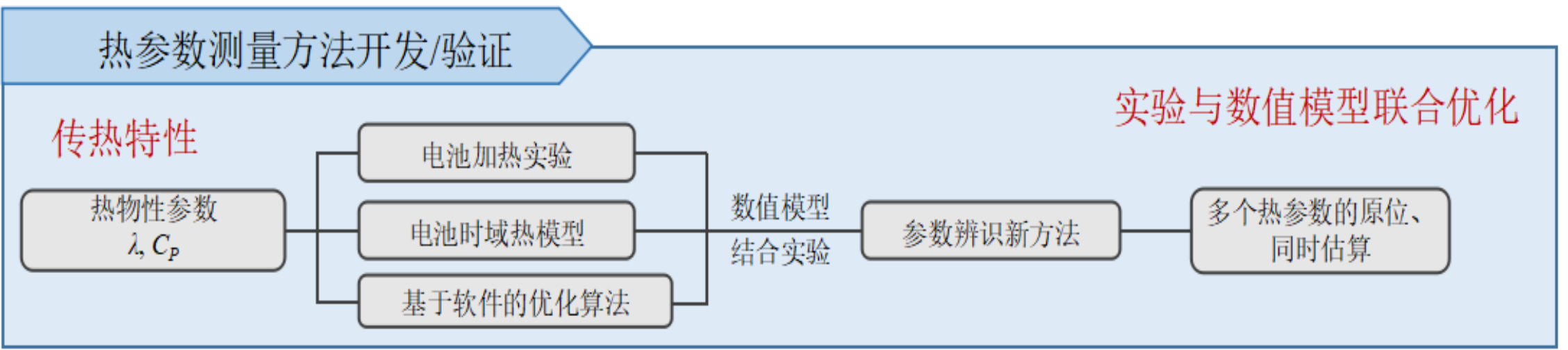
传统的导热系数测试方法和计算方法不再适用，电池单体内部层状结构和浸润性导致的导热系数各向异性特性，是影响单体传热过程的关键因素，相关研究有待进一步深入。难点及瓶颈：建模中如何考虑内部结构参数对导热系数的影响？

热失控防范技术-电池单体热电耦合多维参数化建模-技术途径

内阻与产热率测算：稳态VI与瞬态IC方法相结合。

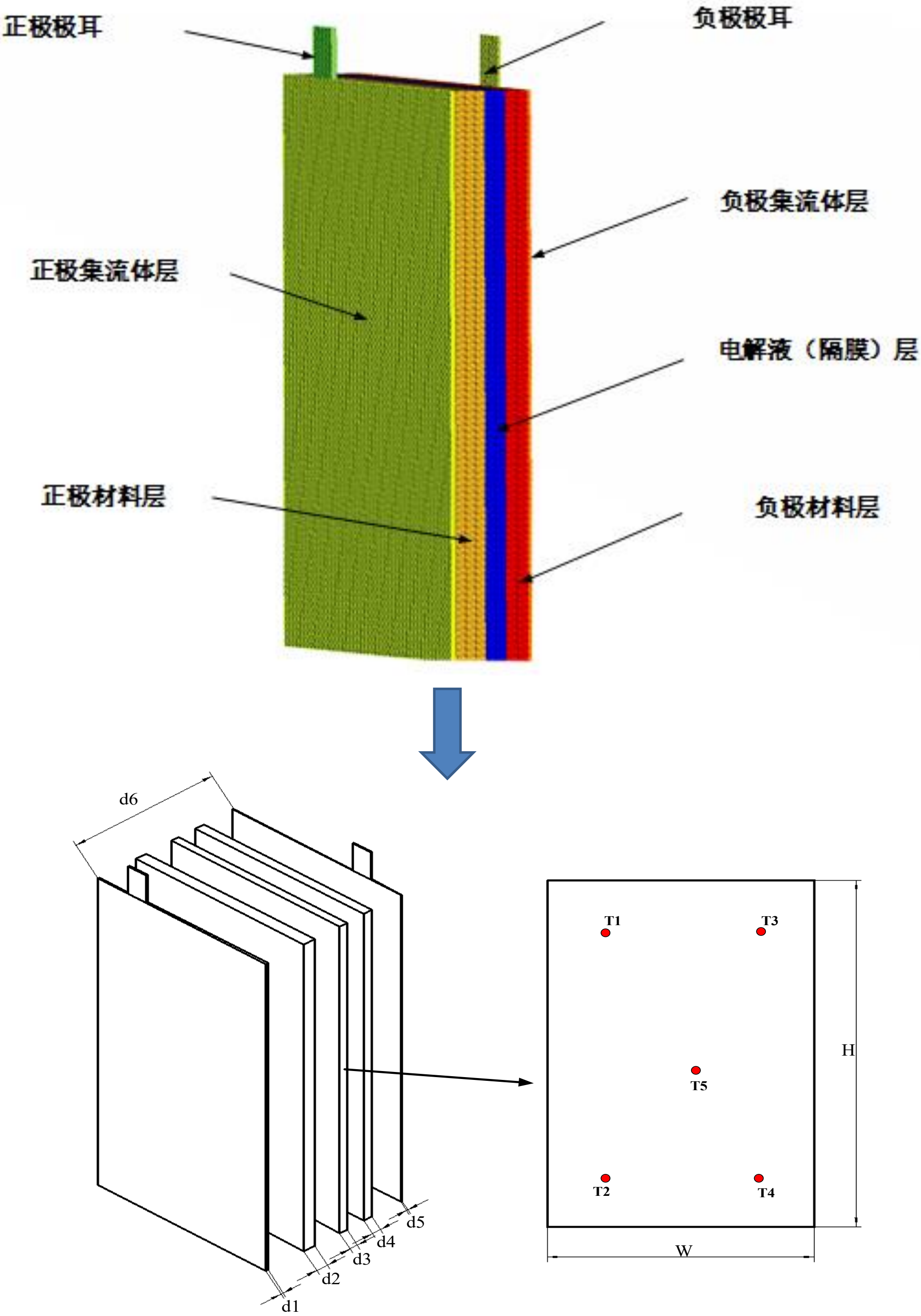


导热系数等热物性参数测算：电池加热、电池时域热模型、优化算法三者相结合。

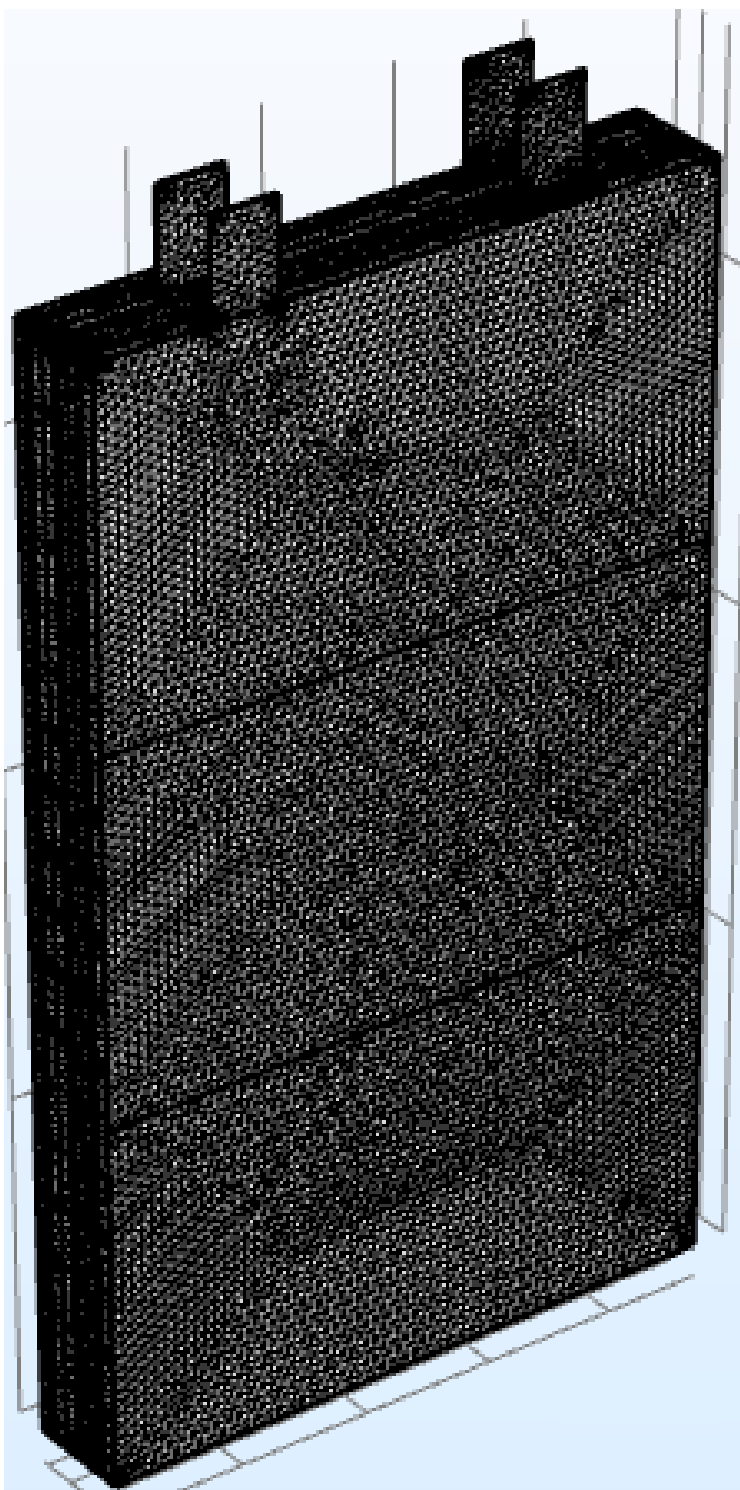


热失控防范技术--电池单体参数化建模仿真验证--技术途径

● 仿真模型



● 网格划分

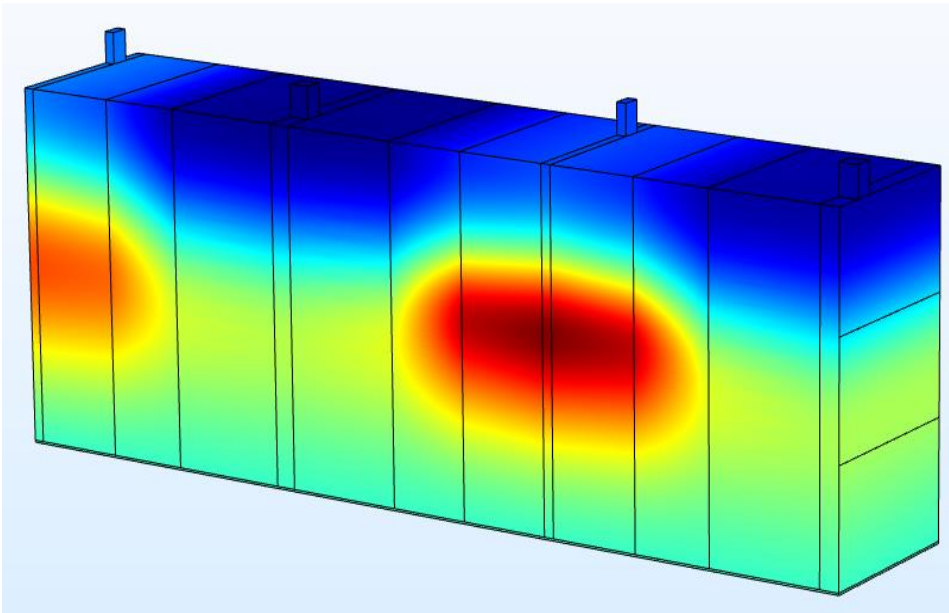
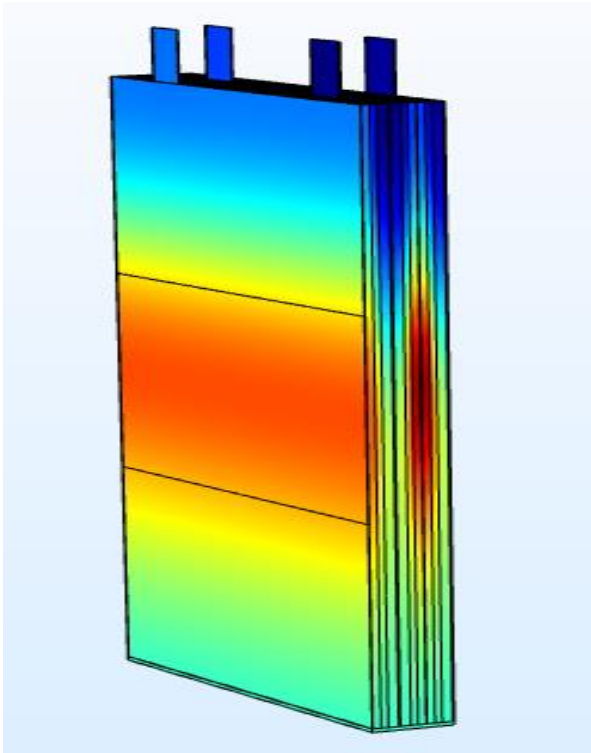
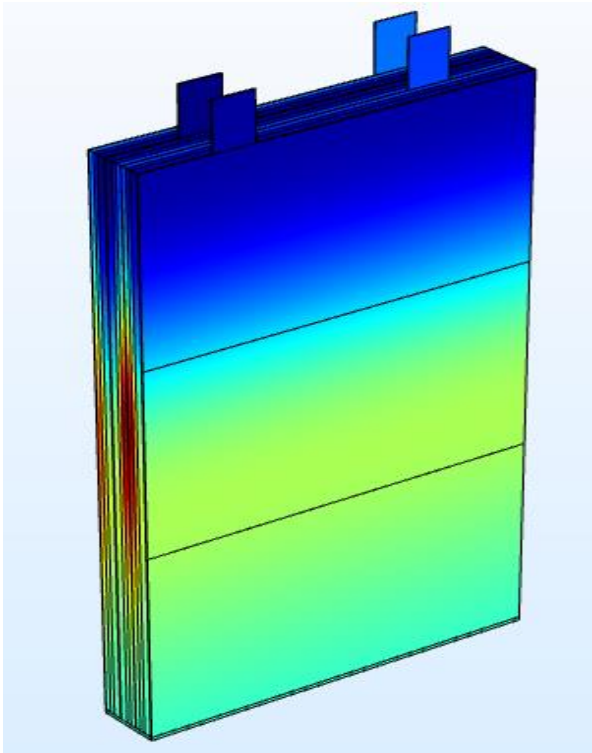


- 不同层网格划分
- 计算域定义
- 两层单元

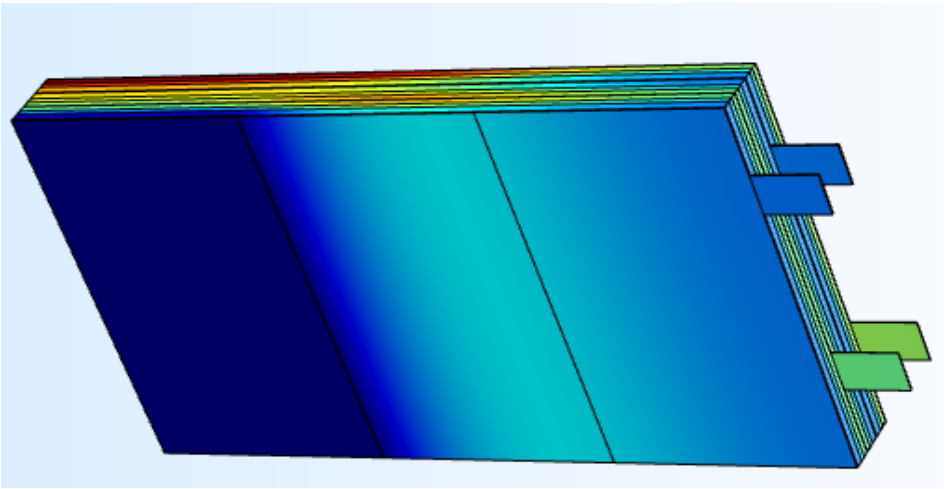
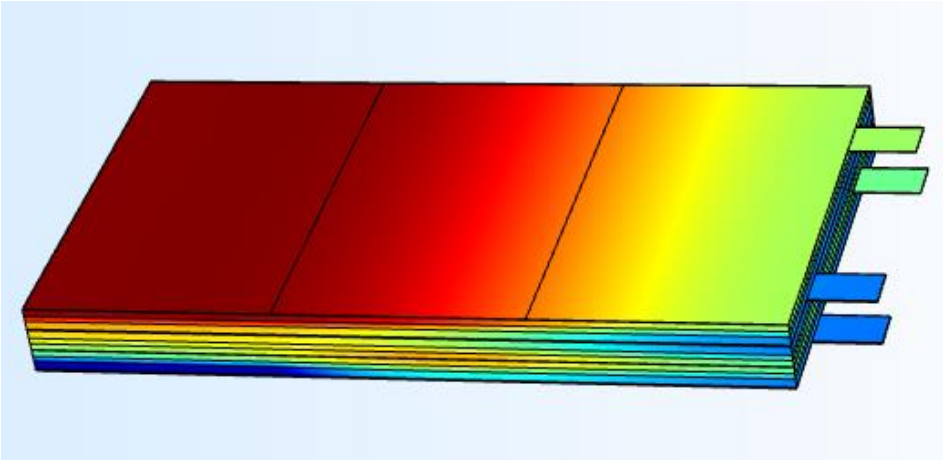
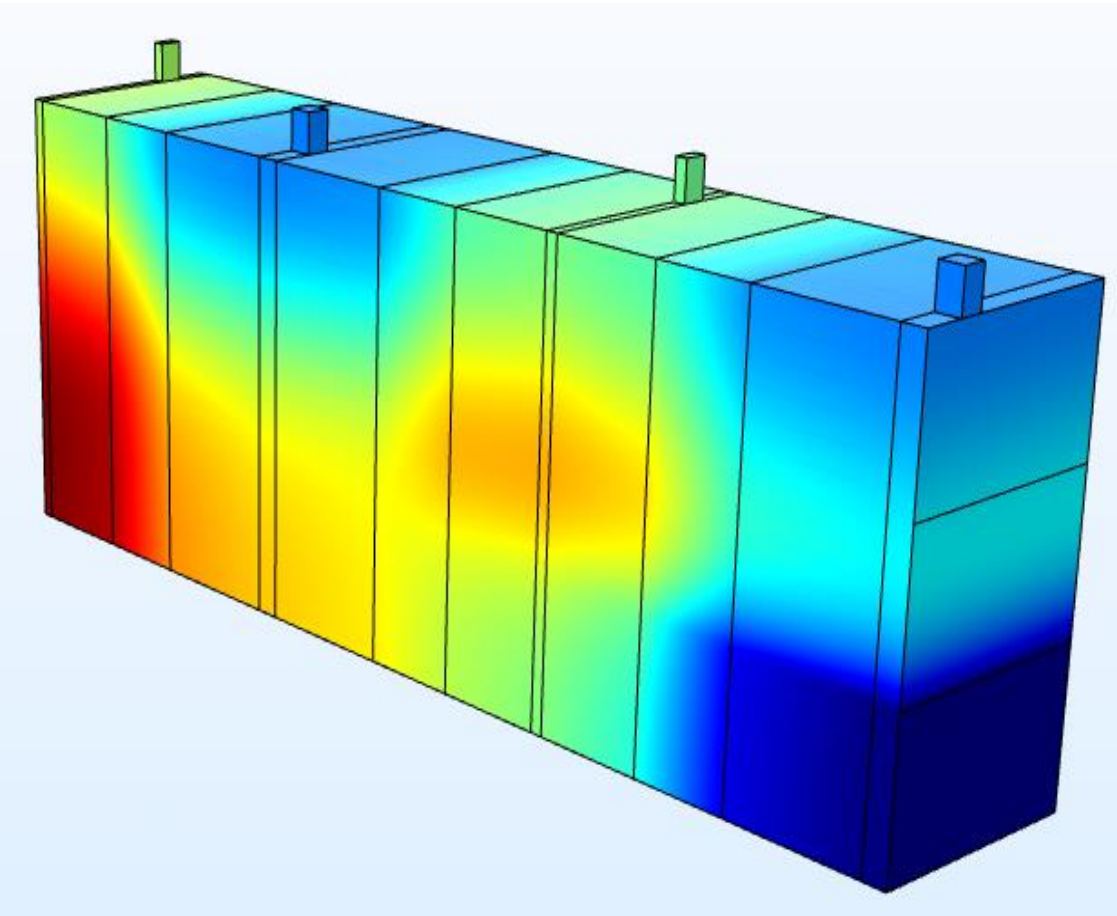
热失控防范技术--电池单体参数化建模仿真验证

电池热特性分析研究

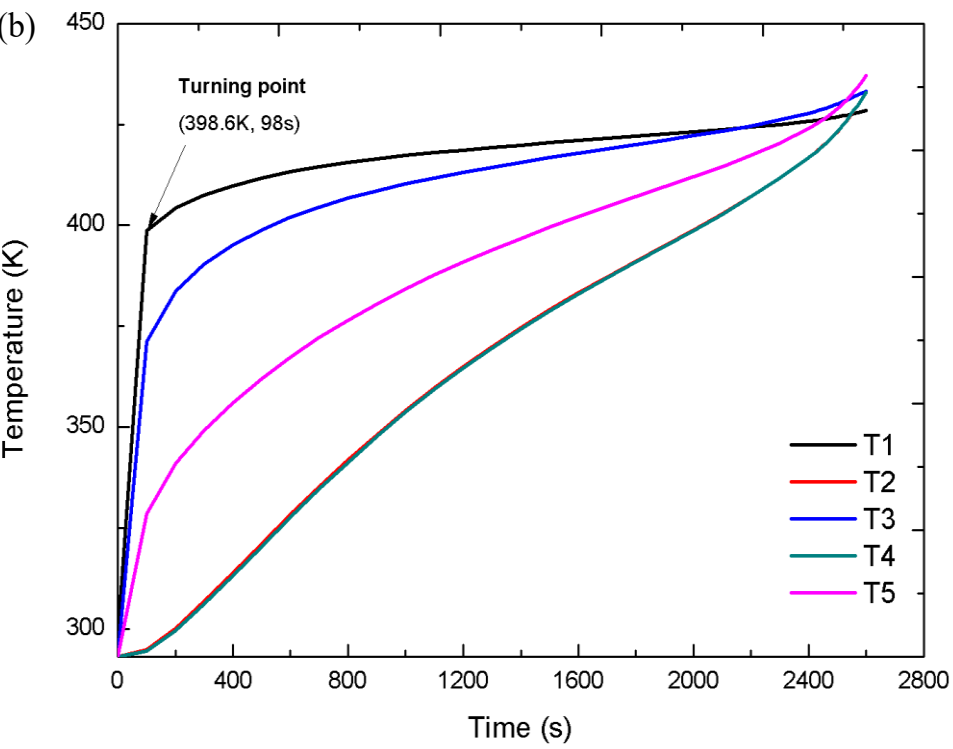
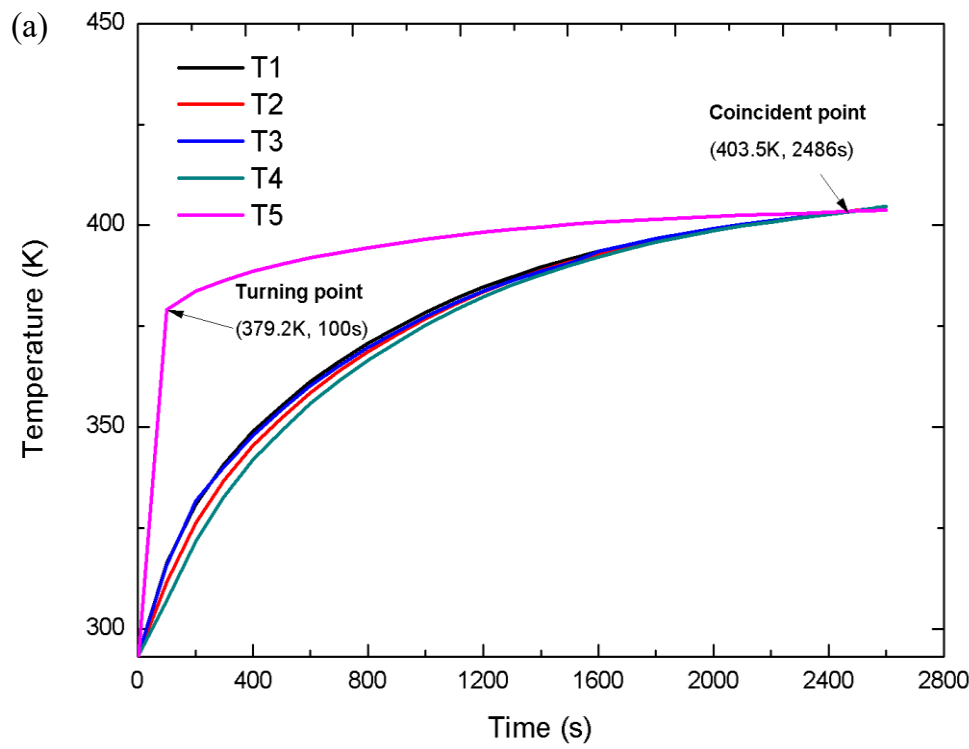
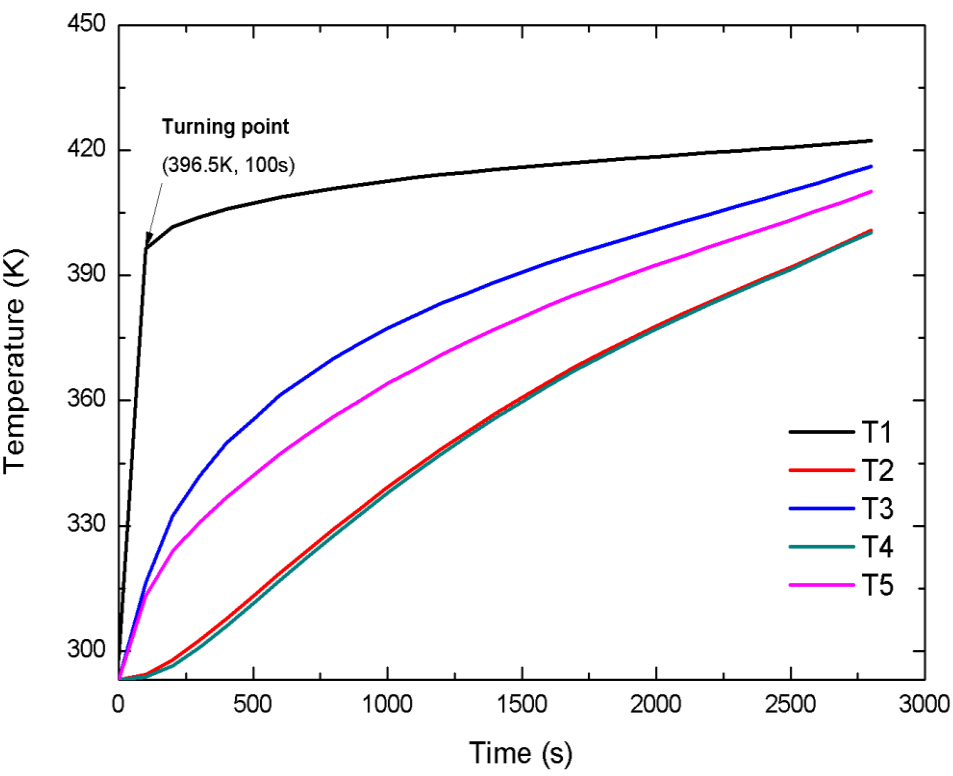
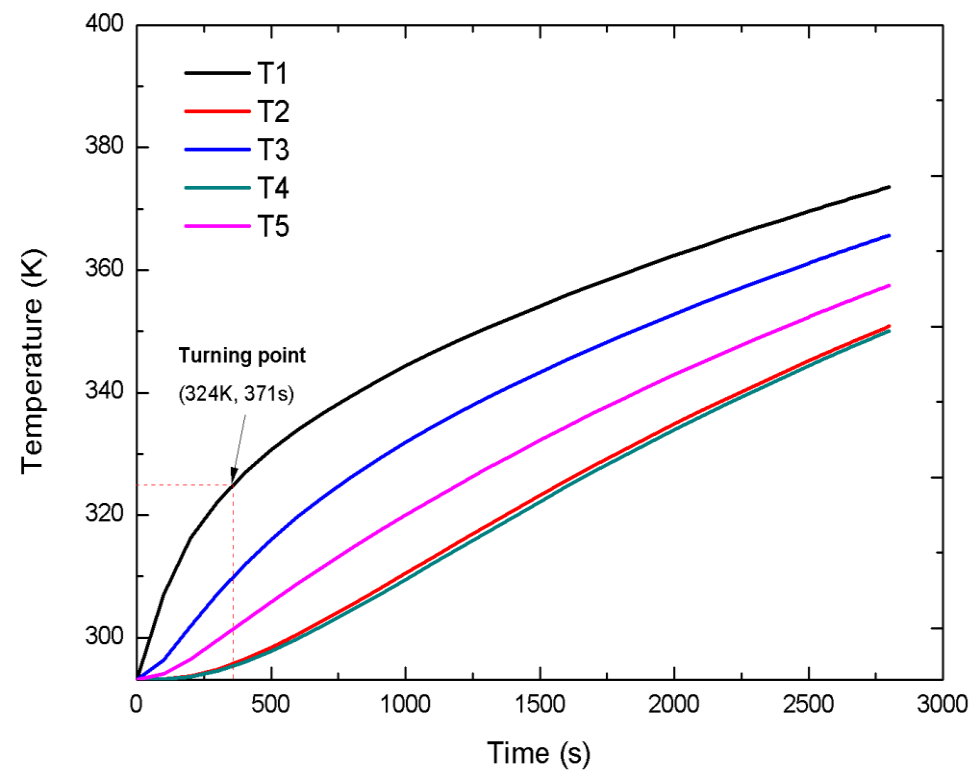
◆ 电池温度场分析



◆ 不同冷却形式CFD计算

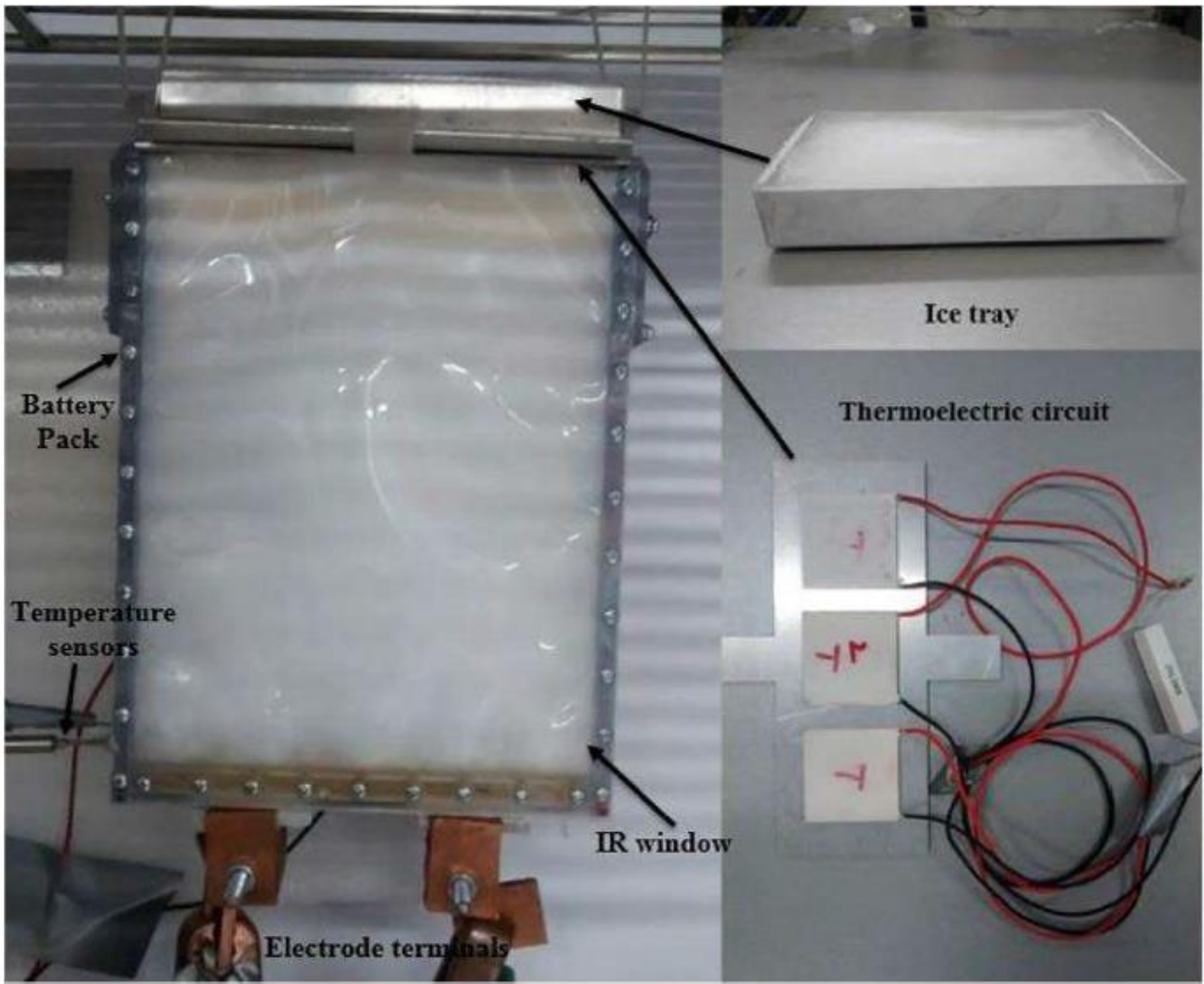


电池温度分布云图

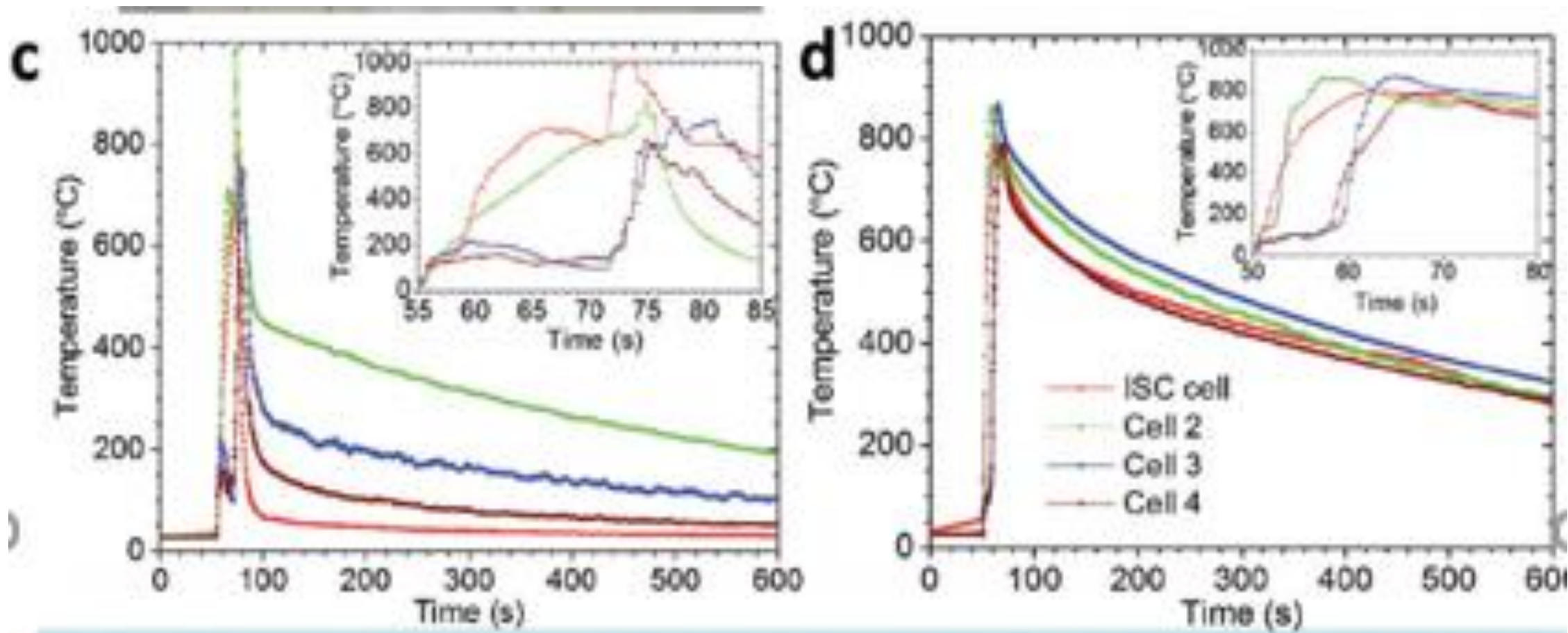


热失控防范技术--电池单体参数化建模实验验证

◆ 通过对电池的热失控试验验证，电池的温度曲线符合模型趋势。



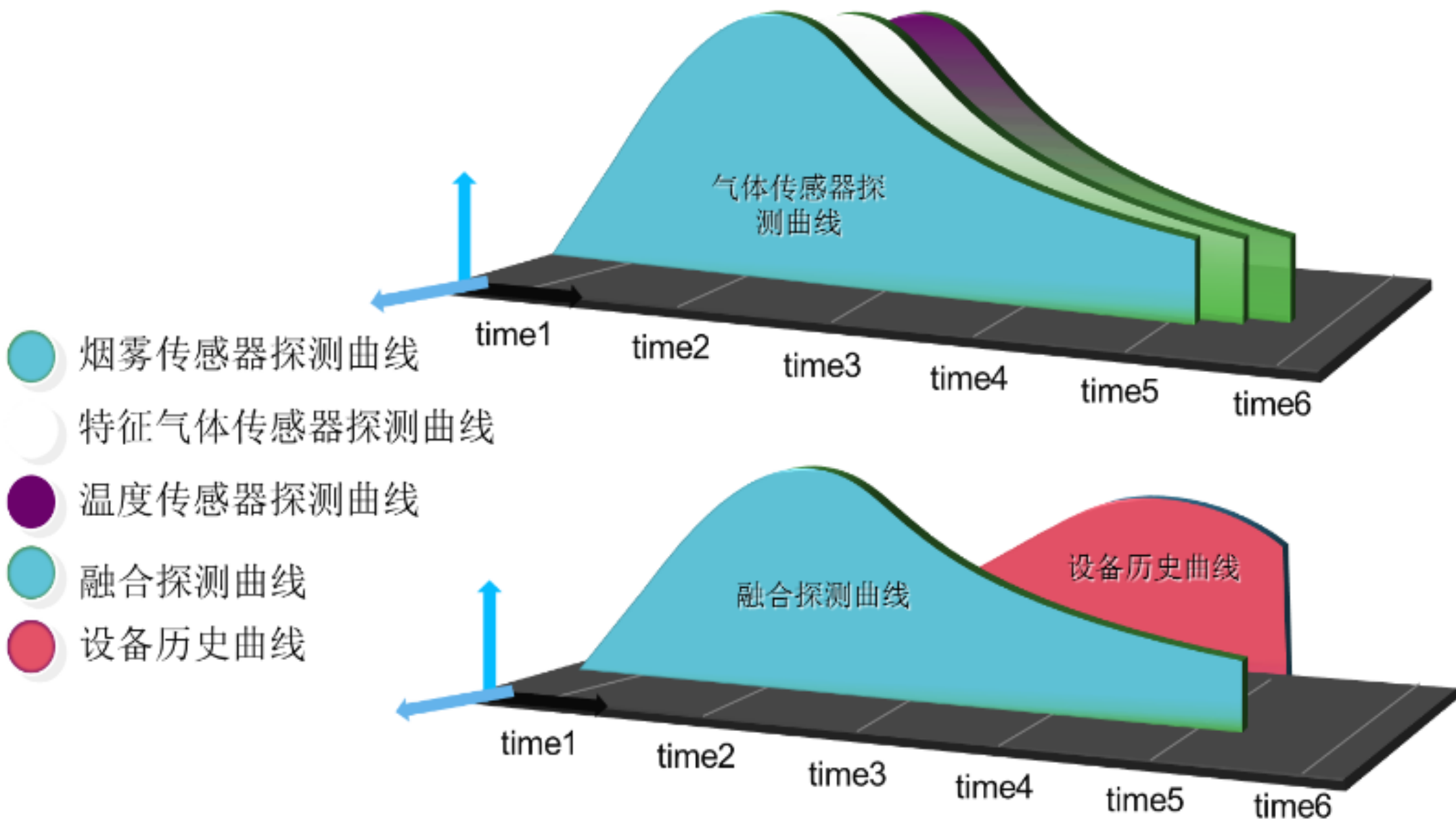
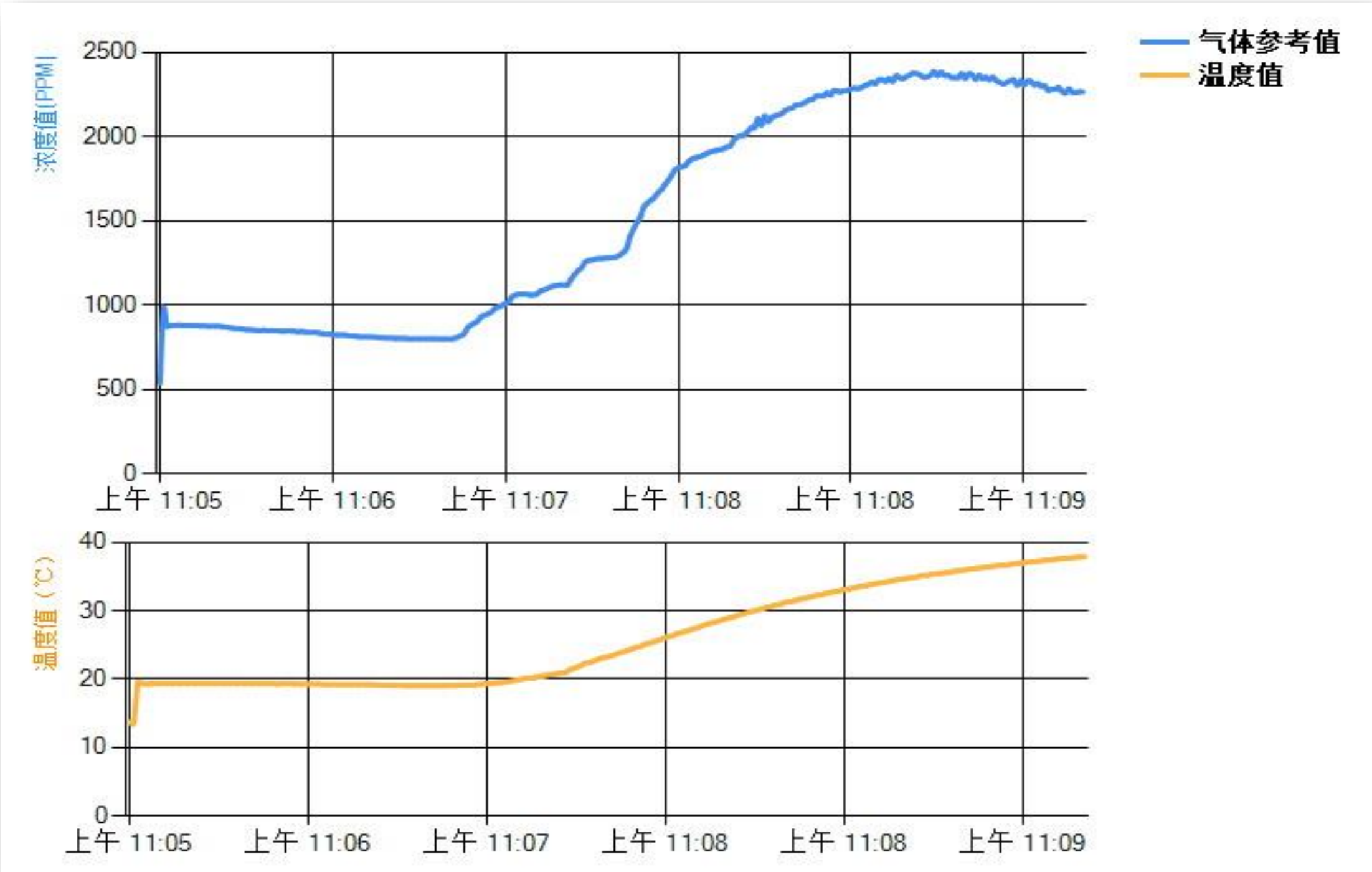
实验电芯



热失控防范技术--电池热失控预警模型建立

技术途径

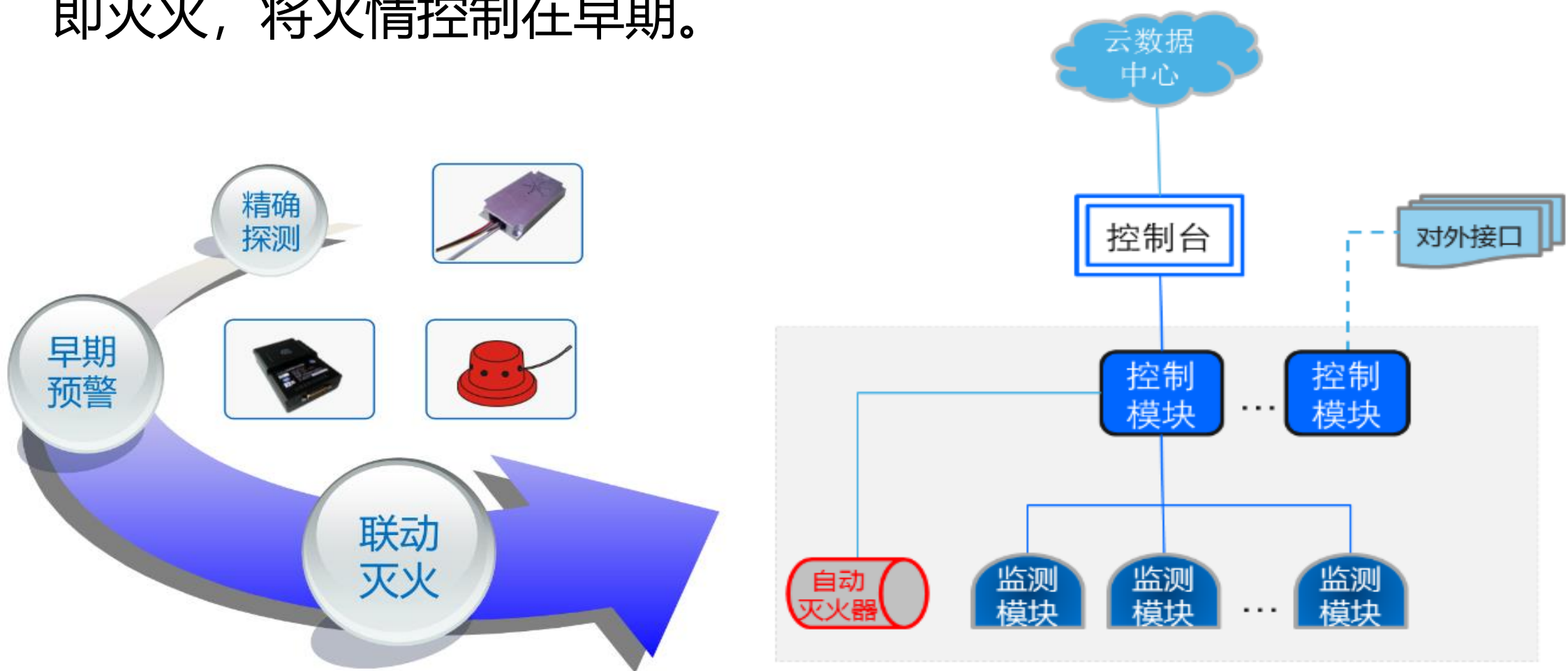
◆ 根据仿真以及实验数据，建立电池热失控预警模型。



◆ 热失控模型，应用控制算法，能够早期探测电池热失控迹象

热失控防范技术--电池热失控灭火系统设计

直接将电池异常早期探测模块和联动灭火装置安装在新能源汽车的电池仓或电池箱内，发现热失控迹象，早期预警，发现火情立即灭火，将火情控制在早期。



热失控防范技术--电池热失控灭火系统选型

灭火系统由探测控制器和灭火器组成，其中探测控制器内包含：各类传感器、探测线束等；灭火器内包含：探火管、灭火剂、灭火剂喷头等。

