

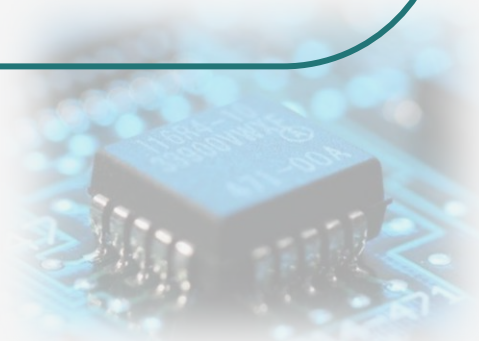
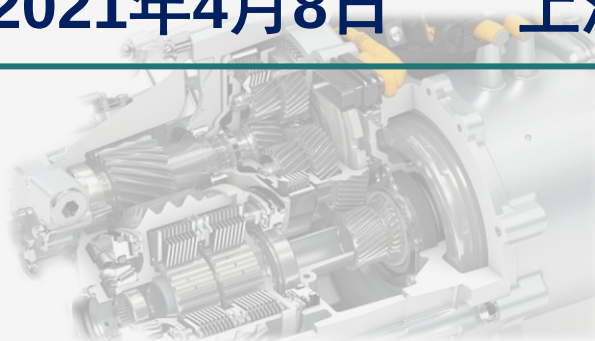
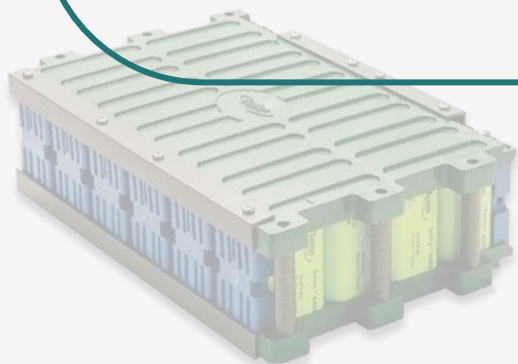
中国新能源汽车热管理技术发展报告发布仪式暨论坛

新能源汽车三电热控制技术发展

报告人：李顶根

华中科技大学 能源与动力工程学院

2021年4月8日 上海



目录

contents

PART1 电池系统热管理技术（重点）

PART2 电机驱动系统热管理技术

PART3 电控系统热管理技术





电池系统热管理技术

Thermal management of battery system

1-1 电池热管理概述

1-2 电池热管理冷却技术

1-3 电池热管理加热技术

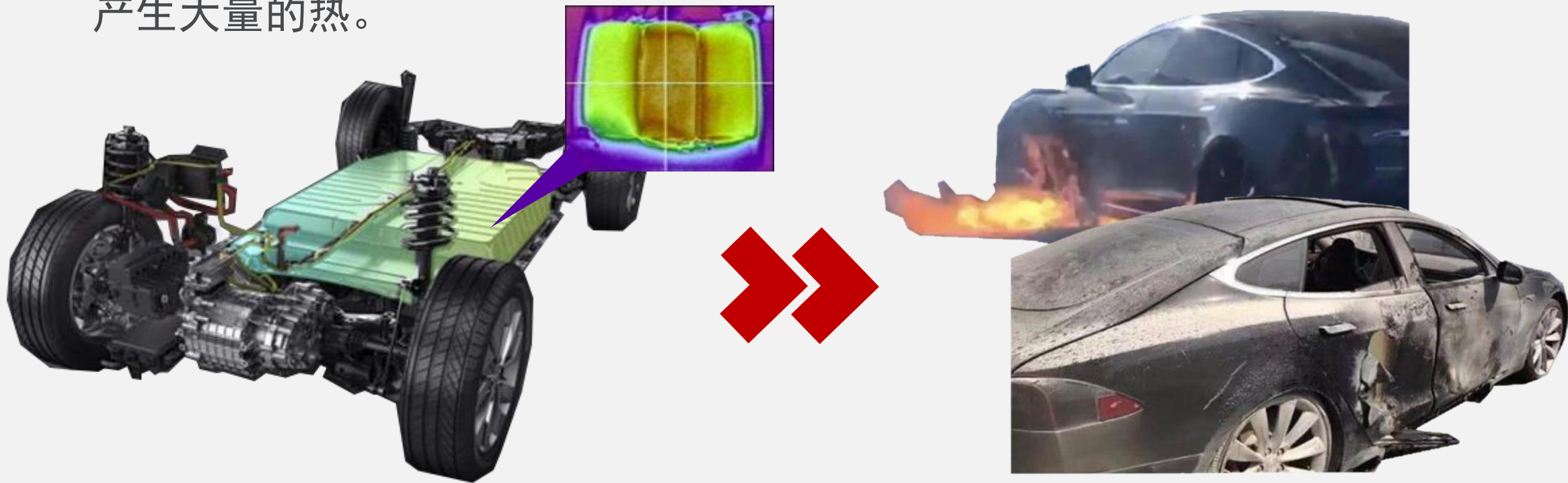
电池
热管理

电池的性能极大的影响了电动汽车的性能



整车的**功率**、**续航能力**、**使用寿命**都与电池热管理息息相关

电池在**高温环境**下使用或者在**大电流充放电**时，化学反应剧烈，产生大量的热。



可能会引发热失控，出现**漏液、放气、冒烟**等现象，严重时电池发生**剧烈燃烧**甚至**爆炸**。

当电池在**低温环境**工作时，电池的容量会随着温度的降低产生**衰减**。



图为北汽全气候电池低温测试

低温时电池**充放电性能与寿命会降低**。在 -40°C 时，
电池的能量密度仅为 20°C 的1.25%，而功率密度仅为5%。

Nagasubramanian G. Electrical characteristics of 18650 Li-ion cells at low temperatures[J]. Journal of applied electrochemistry, 2001, 31(1): 99-104.

温度不仅影响电池的循环寿命、行驶里程、充电时间，还影响电池系统的一致性、安全性及可靠性。电池热管理包括冷却和加热系统双向温控系统，主要功能包括散热、预热以及温度均衡等三个主要功能。

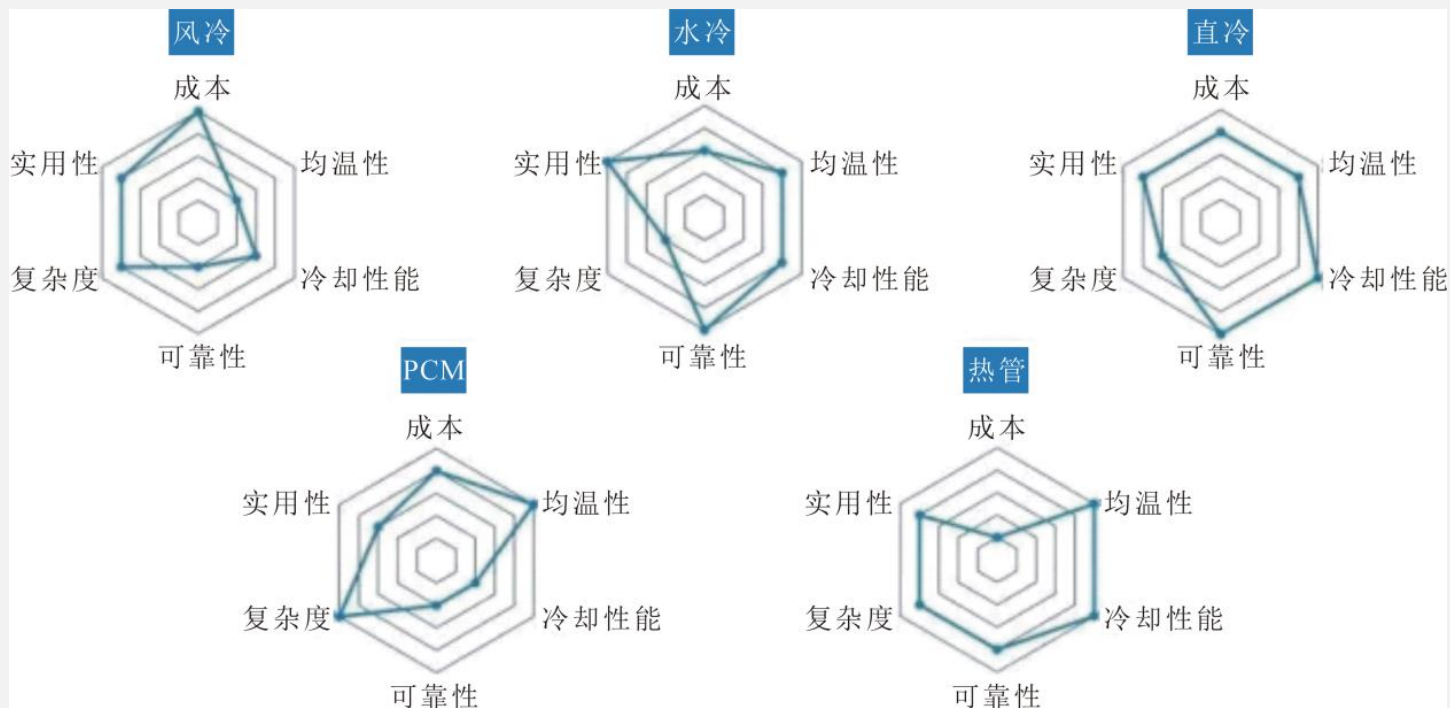
温度过高或者过低都不利于动力电池的性能发挥。

下表总结了目前锂离子电池的容量衰减与运行温度的关系。

材料	放电区间	循环速率	循环次数	循环温度 /°C	容量衰减
C/LiFePO4	3.6 ~ 2.0V	3C~C/1	600	45	25.6%
				25	14.3%
				0	15.5%
				-10	20.3%
C/LiFePO4	90%DOD	C/2	757	60	20.1%
			2628	15	7.5%
MCMB/ LiFePO4	3.8 ~ 2.7V	C/3	100	55	70%
				37	40%
				25	很小
C/LiNi0.8Co0.15 Al0.05O2	100%DOD	C/2	140	60	65%
				25	4%
C/LiCoO2	4.2 ~ 2.0V	C/9 ~ C/1	300	55	26.7%
				25	10.1%
C/LiMn2O4	4.2 ~ 2.5V	C/1	500	45	51%
				21	28%

电池热管理系统冷却方式主要包括

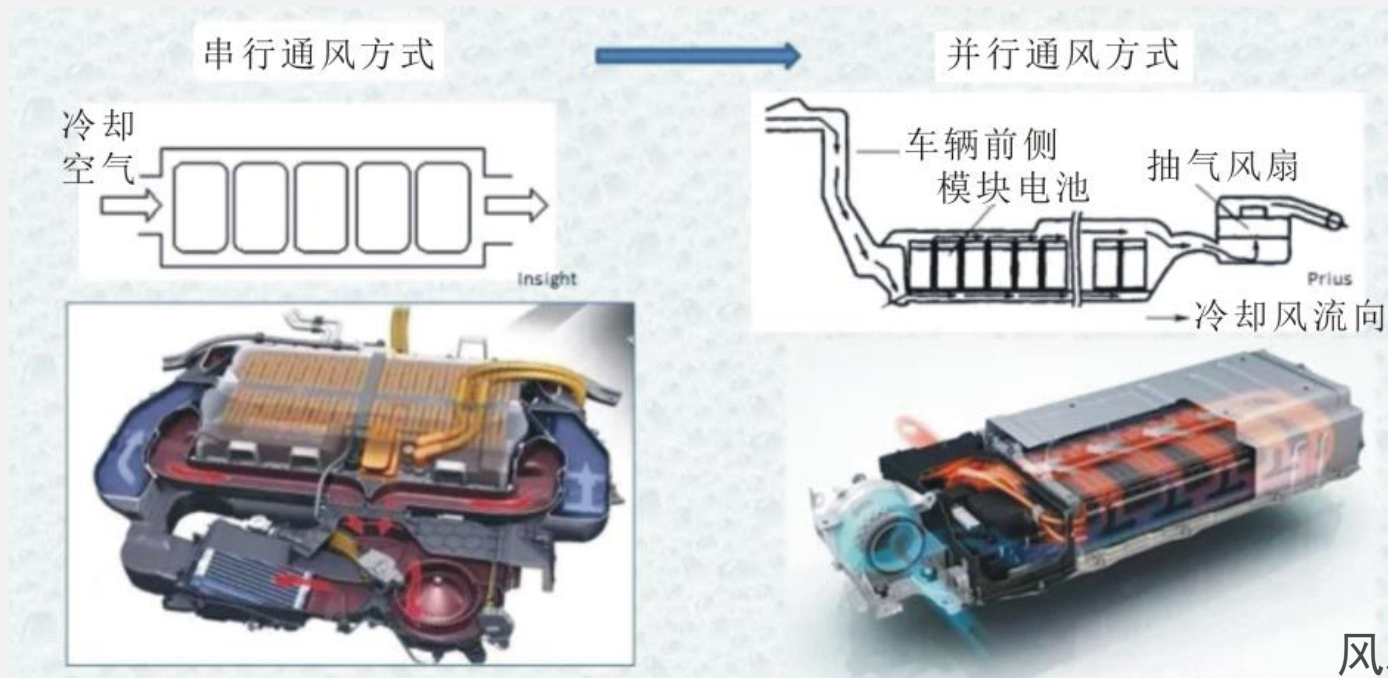
(1) 自然散热；(2) 强制风冷；(3) 液冷；(4) 直冷；(5) 相变材料；(6) 热管冷却系统；



综合电池的这5种冷却散热方式（除自然散热），从**成本、实用性、复杂度、可靠性、冷却性能、均温性**这六个维度去进行综合比较，大致得出的雷达图如上图所示，越靠外围表示该项性能指标越好，可见各种冷却方式，各有利弊，需要实际需要，进行综合优选电池的冷却方案。

风冷 Air cooling 包括被动风冷和主动风冷。被动风冷通常直接采用外部空气进行热量交换；主动风冷通过风扇将空气引入电池箱体内部，以带走热量。

主动风冷涉及内容有：风道设计、风扇选型、冷却风温控制。
其中风道设计包括：电芯间隙风冷、底部风冷、串联、并联等结构。



优点：结构简单、成本较低、无漏液；

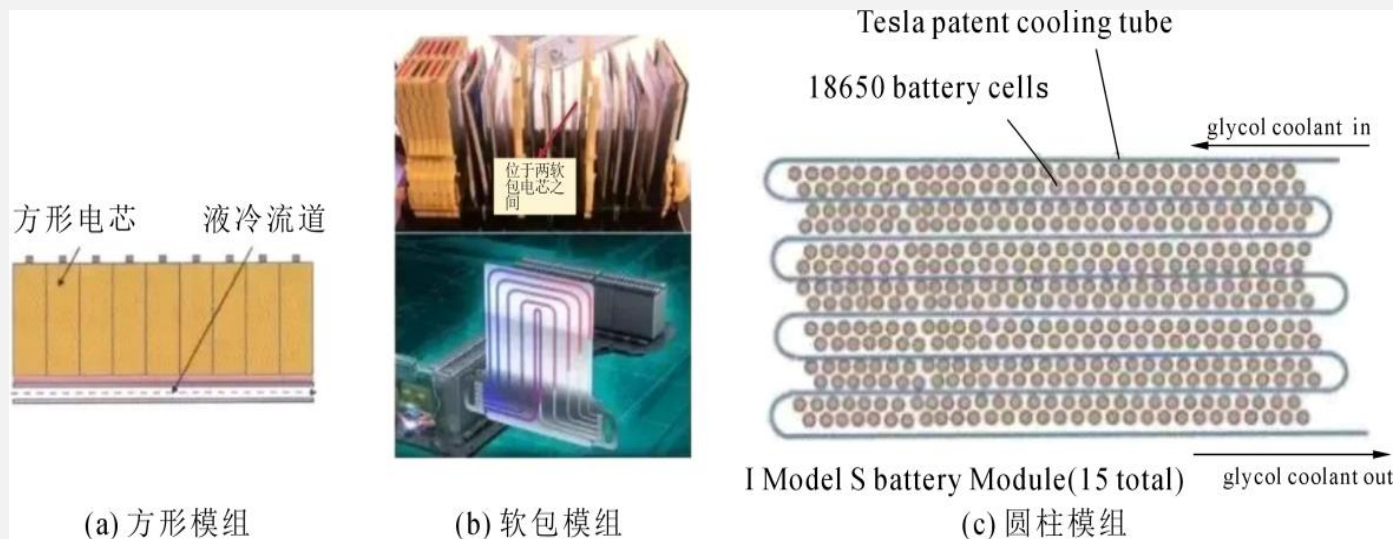
缺点：换热效率低、均温性差。

风冷难以带走电池全部发热量（特别是内部发热量）

液冷 Liquid cooling 采用液体作为热交换介质。通过液体对流换热，将电池产生的热量通过内部液冷系统带出。

液冷效果好于风冷，但结构相对复杂，成本也更高于风冷。

除了常见形式外，还有集成式液冷系统和直接接触式液冷系统。不同模组对应不同冷却设计，包括：方形、软包、圆柱冷却结构。



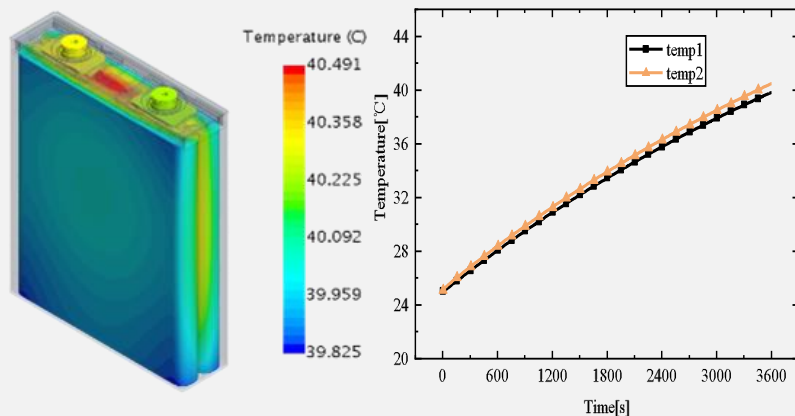
优点：冷却速度快、比容大、换热系数高；

缺点：结构复杂、成本较高、存在漏液风险。

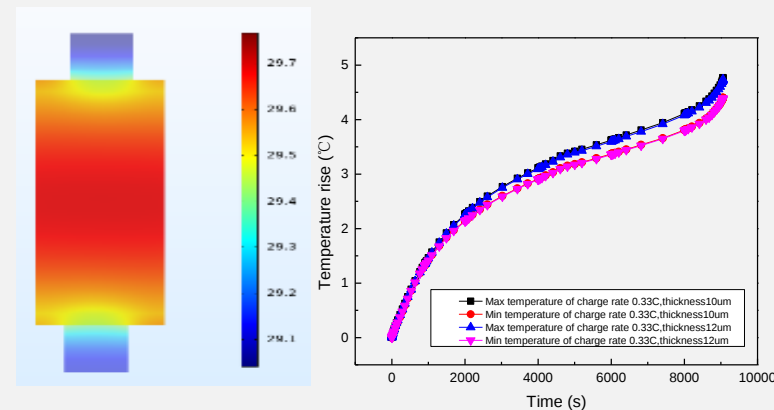
复杂结构的液冷系统设计思路：

根据不同箱体设计方案，进行冷板的选型。

在进行系统热仿真前，需先进行流道的流场仿真和设计优化，确保各流道内流量的均一性以及冷板表面良好的温度分布。



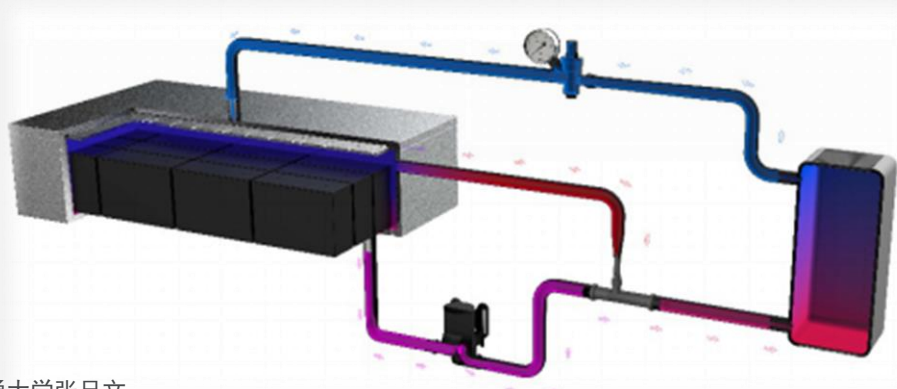
方形电芯热仿真 (SM02M)



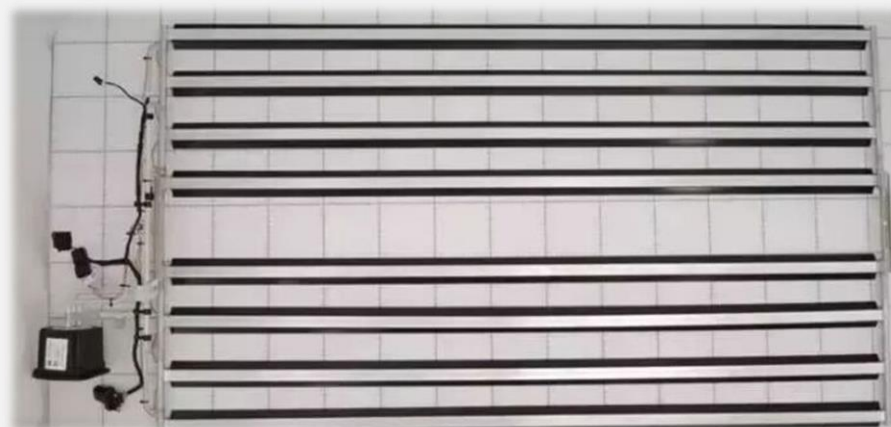
软包电芯热仿真 (MP6)

- 电芯仿真与设计优化：基于不同的材料和尺寸进行热相关参数的优化；
- 热管理系统优化分析：基于模组与系统的热仿真结果，通过优化传热路径提高热管理的效率
- 模组热失控：准确预测电芯间热蔓延的时间以及对隔热材料进行设计优化；
- 系统热失控：定性分析电池包内的温度和压力分布，为排气通道提供依据；同时耦合结构类仿真软件，预测热失控对于电池系统箱体结构的影响。

直冷 Direct cooling 制冷剂直接冷却系统，利用制冷工质的相变制冷带走热量。比传统液冷换热效率可提升三倍以上。



图为西安交通大学张兄文
电动汽车动力电池直冷技术项目图



优点：直冷热管理系统在电动汽车应用中仍处于起步阶段，其在低温冷却、高温散热、整车减重及应急热安全管控方面具有一定优势。具有较好的发展前景。

缺点：直冷热管理系统的大范围工程应用还面临诸多挑战如冷媒过热度问题，包括温度、压力、流量不易控制等问题。

近年来部分厂商开始了直冷商业化的探索



宝马i系列及奔驰部分电动汽车车型逐步应用直冷方式；



雪佛兰沃蓝达Volt开始开发防冻液和冷媒冷却复合技术；

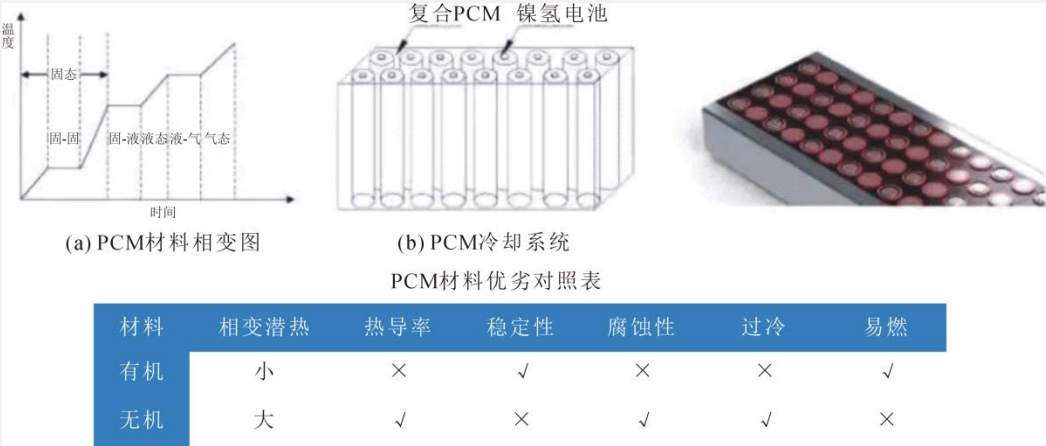


最新的特斯拉TESLA改版MODEL3计划采用直冷的LG第3代电池系统PACK技术。

最新研究表明，直冷的优势不仅仅停留在低温宽域恒温领域上，在未来应对防范过热的应急喷射气化骤冷技术的表现也值得期待，这将会进一步提升热管理的安全性。

相变材料冷却 PCM cooling 通过PCM 在相变过程中的潜热在电池升温时来吸收电池的热量，减少单体电池之间温度差。

相变材料在吸热放热过程中，系统温度比较平稳，可以达到近似恒温的效果。在实际应用过程中，整个电池组浸渍在 PCM 中，当电池组放热时，PCM 会吸收热量从而降低电池温度，热量以相变热的形式存储在PCM中。配合二次散热措施可以有效控制电池温度，在电池需要冷却时可缩短电池处于高温的时间，有效防止热失效的发生。

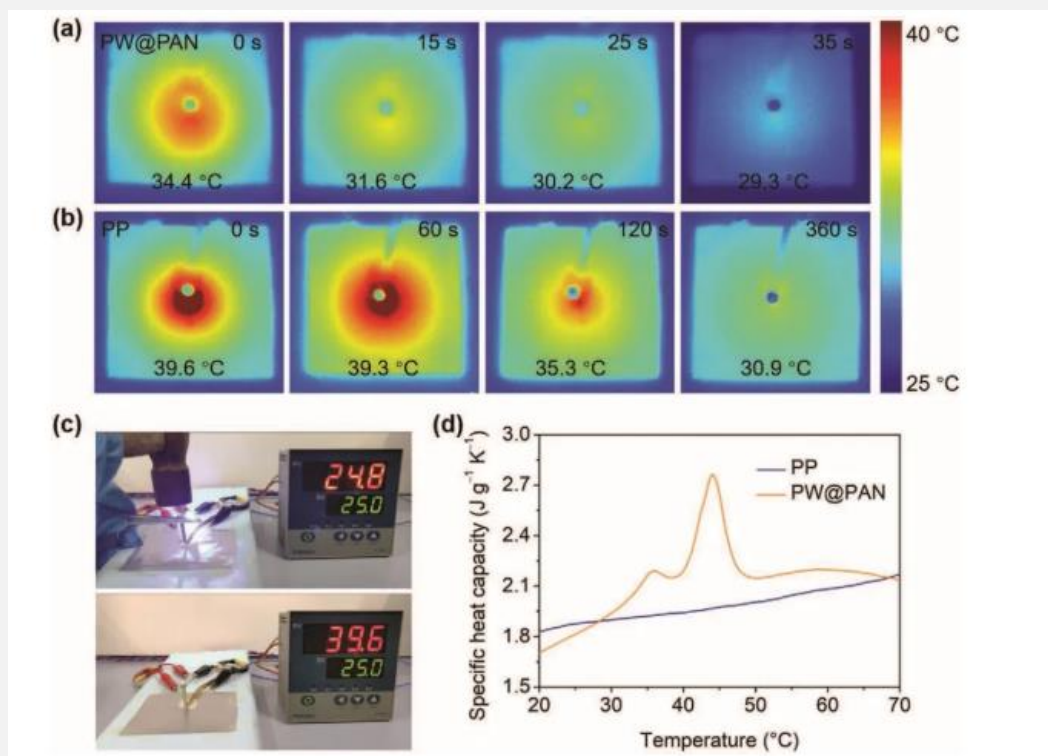


主要材料包括：有机类、无机类、混合类。

PCM均温性好且方便配套，但目前市场不很成熟

优点：体积变化小、相变潜热较大、相变温度恒定；
缺点：热导率低，散热速度慢。

2021年AM首次报道了华中科技大学胡先罗教授, 通过将具有吸热作用的PCM封装到纳米纤维膜中来制备热调节隔膜的方法。该隔膜在不牺牲电化性能的前提下, 可及时抑制LIB急剧上升的温度。

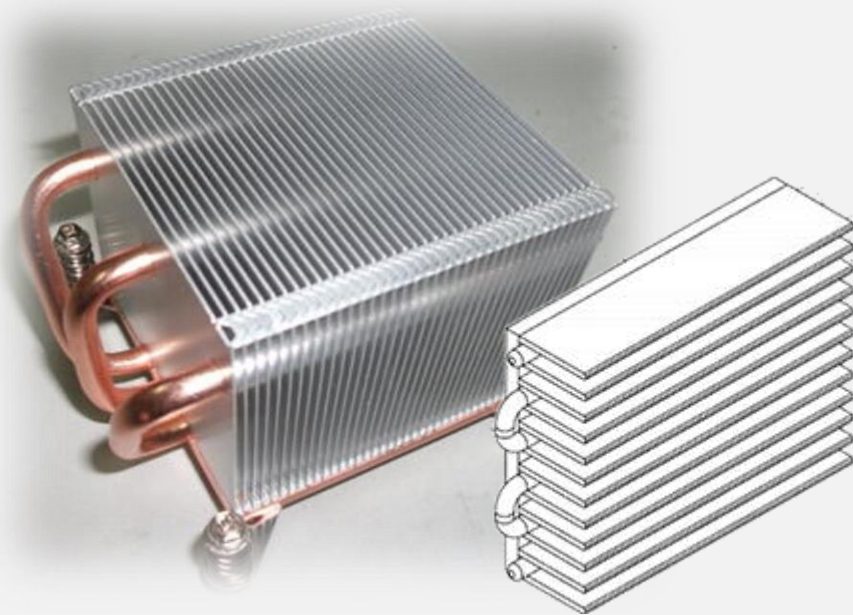


温度调节特性

使用具有合适熔点 ($\sim 45^{\circ}\text{C}$) 和巨大潜热 ($\sim 240 \text{ J g}^{-1}$) 的石蜡 (PW) 作为吸热材料。选择具有较高热稳定性和良好电解液润湿性的中空聚丙烯腈 (PAN) 纳米纤维作为纳米纤维容器。

基于PCM的纳米纤维隔膜一方面由于具有高度多孔结构和优异的电解液润湿性, 其电化性能优于市售隔膜; 另一方面, 得益于PCM隔膜的热自我调节特性, 电池内部在恶劣条件下产生的热量可以得到有效缓解。

热管冷却 Heat pipe cooling 依靠封闭管壳内工质相变来实现换热的高效换热元件。一般由管壳、管芯及工质组成。

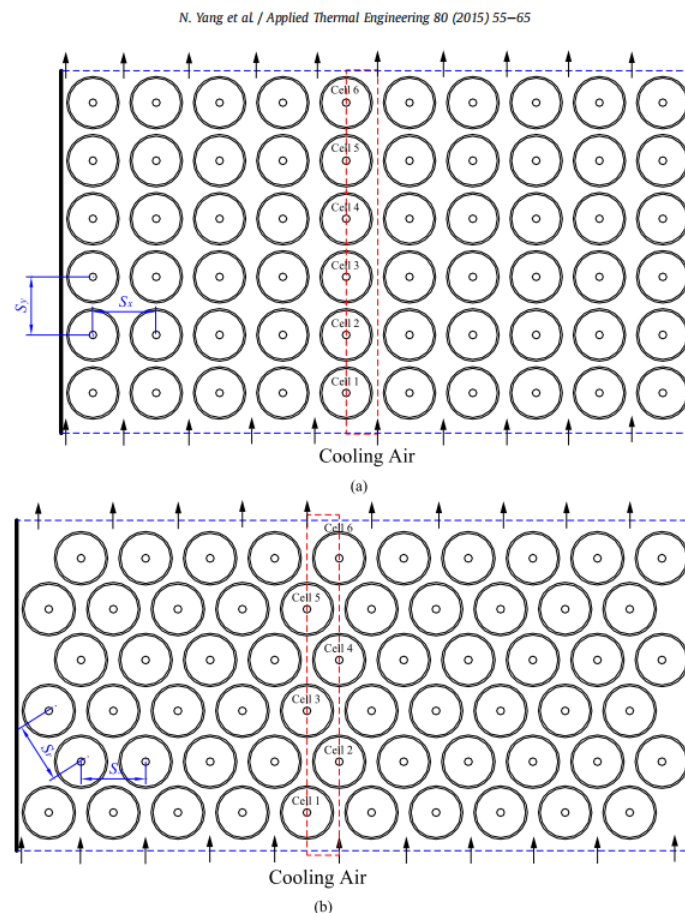


热管种类多样，包括电子器件冷却平板热管、高效反重力平板热管。

优点：高导热、等温、热流方向可逆、热流密度可变；
缺点：成本较高。

适当的电池布置对锂离子电池组的冷却系统起着重要作用。

如圆柱形电芯排布随着纵向间隔的增加，单个电池的平均温升减小。电池的平均温升与交错电池排列的纵向间隔呈正相关。增加横向间隔会导致电池温升的增加，但提高了温度均匀性。



车用电池冷却系统应根据特定的PACK结构设计方案

Design

Simulation

Test

- ◆ 3D建模3D model determination
 - 热转移路径Thermal transfer path
- ◆ 组构优化Component optimization
 - 冷却板类型Cooling Plate type
 - 管道连接Pipe connection
 - 流路Flow channel
 - 导热材料Heat conducting materials
 - 保温材料Thermal insulation materials
- ◆ 热分布Thermal strategy

- ◆ 数据收集、模型与仿真Data Collection, Modeling and Simulation
 - 寿命life and aging
 - 热失效模拟Thermal failure simulation
- ◆ 热模拟Thermal simulaton
 - 模组热模拟Module thermal simulation
 - 电池包热模拟Pack thermal simulaton
 - 流路模拟Flow channel simulation
 - 热失控Thermal runaway

- ◆ 热测试Thermal test
 - 冷却与加热Cooling/Heating
 - 绝热Thermal insulation
 - 热失控Thermal runaway
- ◆ 液体冷却系统测试Liquid Cooling system test
 - 气密性测试Gas leak inspection
 - 通道腐蚀测试Channel corrosion test
 - 爆炸测试Blasting test
- ◆ 关键部件可靠性试验方法研究Research on reliability test method of key component

电池加热技术可以分为内/外加热。外部加热方式：

基于空气介质的电池加热方法

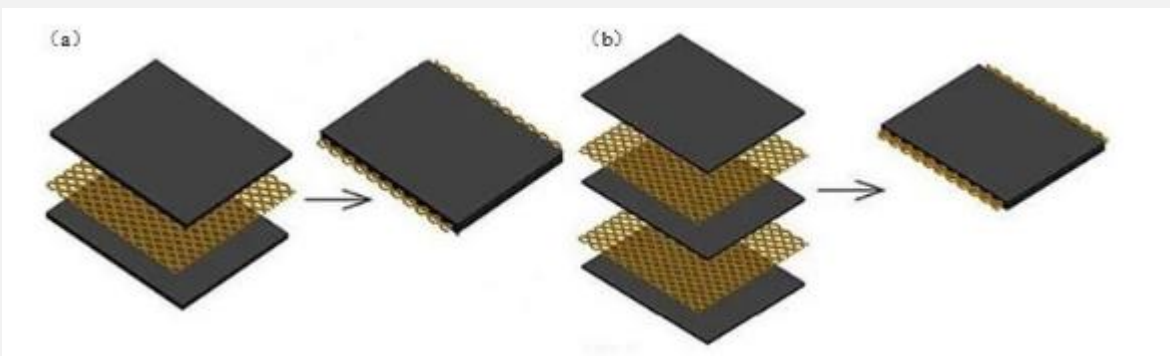
通过将已加热的空气流过按照设计的流道与电池单体或模组进行热交换，从而达到加热电池的目的。按照空气流动是否需要动力源分为被动式和主动式，依据电池包内电池单体或模组排列形式分为串行式和并行式。

基于液体介质的电池加热方法

基于空气介质的电池加热方法应用较早，技术成熟，但是空气加热目前已无法满足新能源汽车高续航里程、短快充时间的要求，为此，主流车企基本倾向采用具有更高换热效率、空间更紧凑的液体间接接触式电池加热方法

基于相变材料的电池加热方法

基于流体介质的传统电池热管理方法均存在系统相对复杂，且未能充分利用电池自身热能的缺点，而使用能够吸收和释放潜热的相变材料电池热管理系统具有结构简单、耗能低等优点，能为车辆电池包轻量化设计以及提升电池包系统质量能量密度做出一定贡献。



增强型相变材料结构示意图

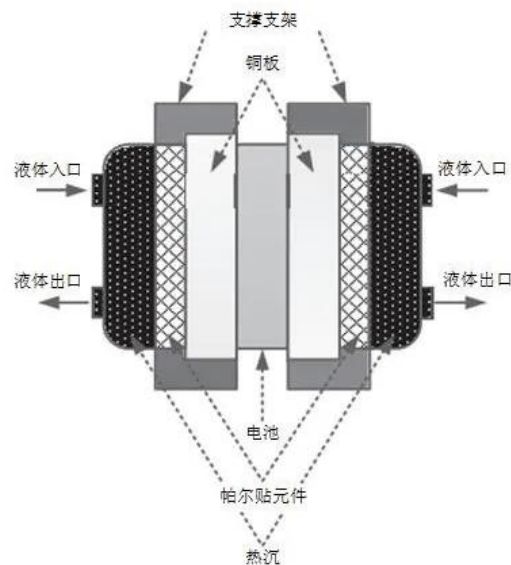
基于热电效应的电池加热方法

电池外部加热方法除了以传热介质为基础之外，还有基于热电效应原理实现加热电池的方法，主要包括帕尔贴效应加热（Peltier element）、电热效应加热和电阻温度效应加热方式。

研究表明利用帕尔贴元件实现控制电芯温度梯度,两端温度梯度最大可达 40°C ，并试验研究电芯温度梯度对电芯性能的影响

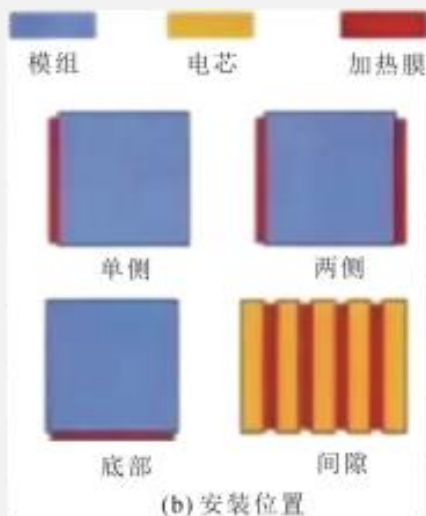
曾爽,陈平等提出了一种基于电池组供电的电加热膜自加热装置。测试结果表明，电池包表面温度从 -20°C 加热至 0°C 用时约10min，从 -20°C 加热至 10°C 耗时约15min，电池平均加热速率为 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

刘菲菲等研究分析了两种不同形状尺寸的硅橡胶电加热膜安装方式对微热管电池包低温电池热管理性能的影响。试验结果表明，“三明治”电加热膜安装结构的电池加热效率高于电加热膜贴于微热管翅片的安装结构，前者的平均加热功率约为后者的1.35倍，前者所需的最优电池加热功率为100W，后者需要180W。



帕尔贴元件示意结构

电加热膜、PTC、高压电加热系统HVH热层技术等若干种加热技术已开始使用，新型热电及电热材料的研制还在研究之中，还未投放市场。



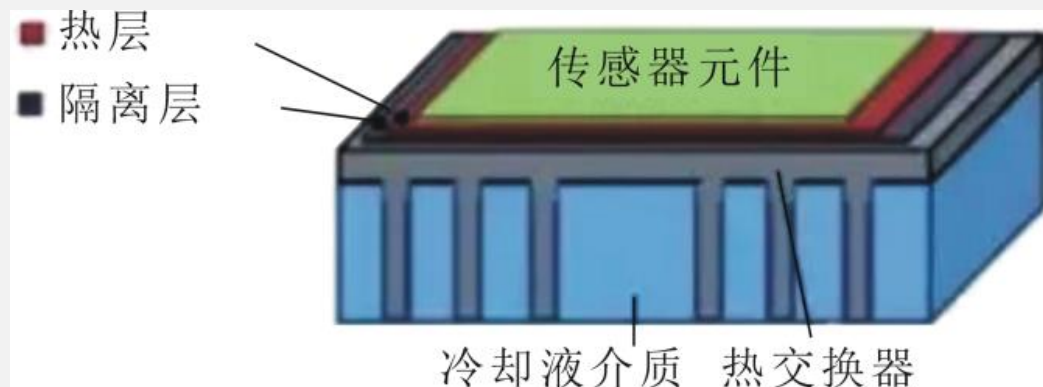
电加热膜一般由电阻丝、绝缘包覆层、引出导线和接插件组成。安装位置有：单侧安装、双侧安装、底部安装和间隙安装。



PTC加热器，采用PTC陶瓷发热元件与铝管组成。该类型PTC发热体有热阻小、换热效率高的优点，是一种自动恒温、省电的电加热器。

高压电加热系统HVH热层技术

采用热喷涂方法将电隔离层、热层和传感器元件涂覆在铝质热交换器上。覆层的总厚度大约为0.7mm。



图为伟巴斯特HVH100高压电加热器

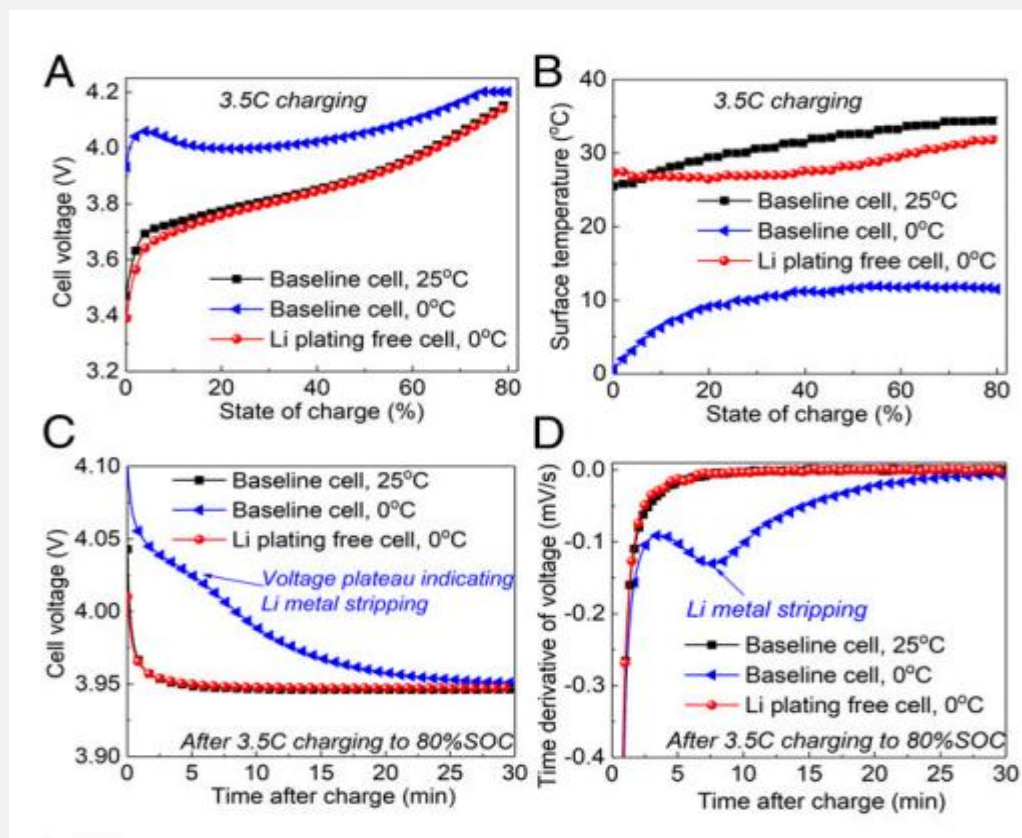
与现有加热器系统相比，热层技术的热量传递速度更快；由于热阻较低，因而允许更低的最高温度；具有更高的转换效率。且高压电加热系统HVH比PTC加热器更为紧凑

今天的EVS仍然难以在低温下快速充电。

Lithium plating-free (LPF) fast charging 是现阶段解决方法之一。也是一种**内加热方式**

低温下若简单外部加热均温性差，应引入内加热方式
美国宾大州立大学Xiao-Guang Yang和王朝阳

LPF快速充电的关键思想是将电池充电到能够防止析锂的温度之上。使用自热LiB结构，将薄镍(Ni)箔嵌入在电池内，可以实现快速且均匀的加热。插入Ni箔的方法使内部加热速度和均匀，无论电池有多大(加热均匀性可以通过添加多个Ni箔来保证)。该方法还可应用于其他单元几何图形。



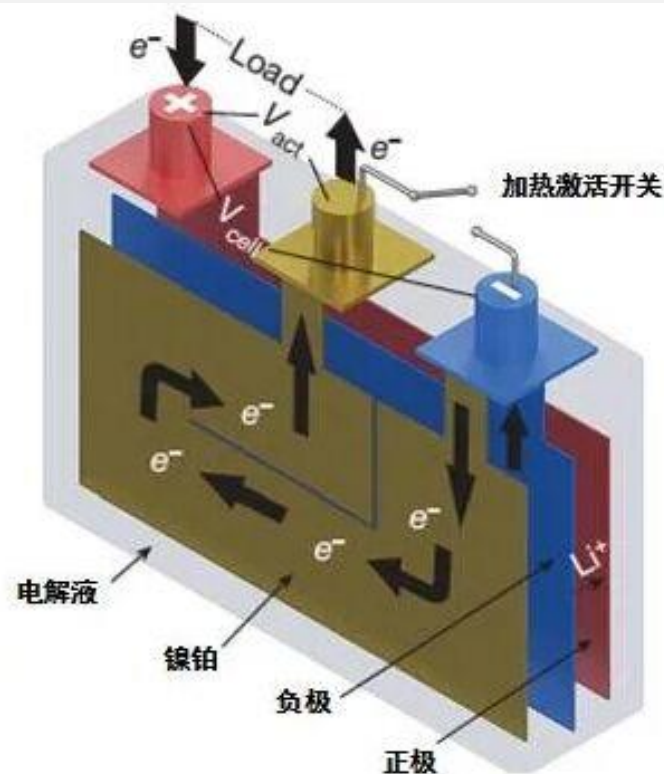
消除析锂技术可显著提高低温下的充电表现。

基于内部短路的电池自加热方法

镍铂片的一端与锂电池负极连接，另一端与锂电池的加热极耳连接，并在锂电池负极与加热极耳之间设置加热激活开关。当锂电池内部温度 $<0^{\circ}\text{C}$ 时，加热激活开关断开，导致形成电流的电子从正极耳经负极耳流过镍铂片，再到镍铂片的加热极耳，从而使得镍铂片发热加热锂电池；当锂电池内部温度 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 时，加热激活开关闭合，形成电流的电子旁通绕过镍铂片，从而恢复到正常的锂电池。

基于外部电流激励的电池加热方法

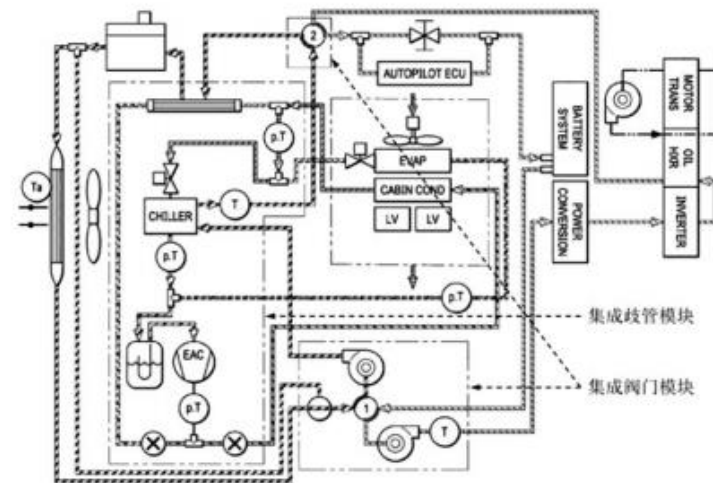
相比于基于内部短路的自加热电池需要改变现有电池结构和生产工艺等缺陷，外部电流激励的电池加热方法具有更好的电池适应性和电芯温度一致性等优点，主要类型包括交流电流加热、脉冲电流加热和直流电流加热。



以特斯拉最新热管理系统设计为例

特斯拉首次引入热泵空调系统。该空调系统主要是负责乘员舱的采暖和制冷功能。在结构上，该空调系统没有单独设置外置冷凝器，通过热交换器和管路连接，与电池回路和电机回路进行耦合，实现整个热管理系统的热量交互。

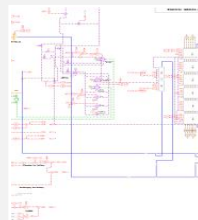
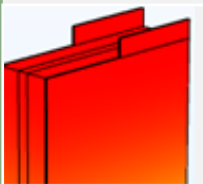
在极端低温启动情况下，控制空调压缩机和鼓风机的电机进入低效制热模式，作为电加热器使用。由于该热泵系统与电池回路通过热交换器实现耦合，而动力电池又具有质量大热容高的特点，动力电池也作为该热泵系统的 1 个热量存储装置，根据整车实际运行工况，判定是否为动力电池加热或从动力电池吸热。



引入了热泵空调，集成程度很高，热利用率高。用于Model Y上，为特斯拉第四代热管理技术。

基于电芯本征特性的系统传热设计

- 电芯热特性参数的表征
- 电芯温度特性的模拟

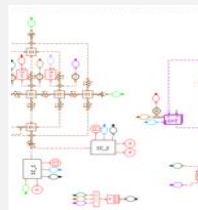
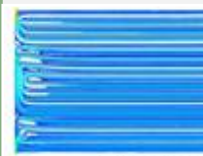


电池/整车交互的热管理策略

- 基于1D模型的热策略仿真技术
- 电池热管理与整车热系统联动

冷却形式的多样化解决方案

- 自然散热/风冷/液冷
- 冲压板/口琴管/吹胀板/铝挤/压铸集成

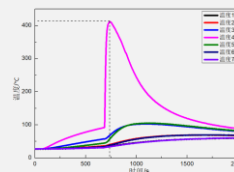


耦合热因子的综合寿命预测

- 预测精度达90%
- 综合考虑热管理控制策略

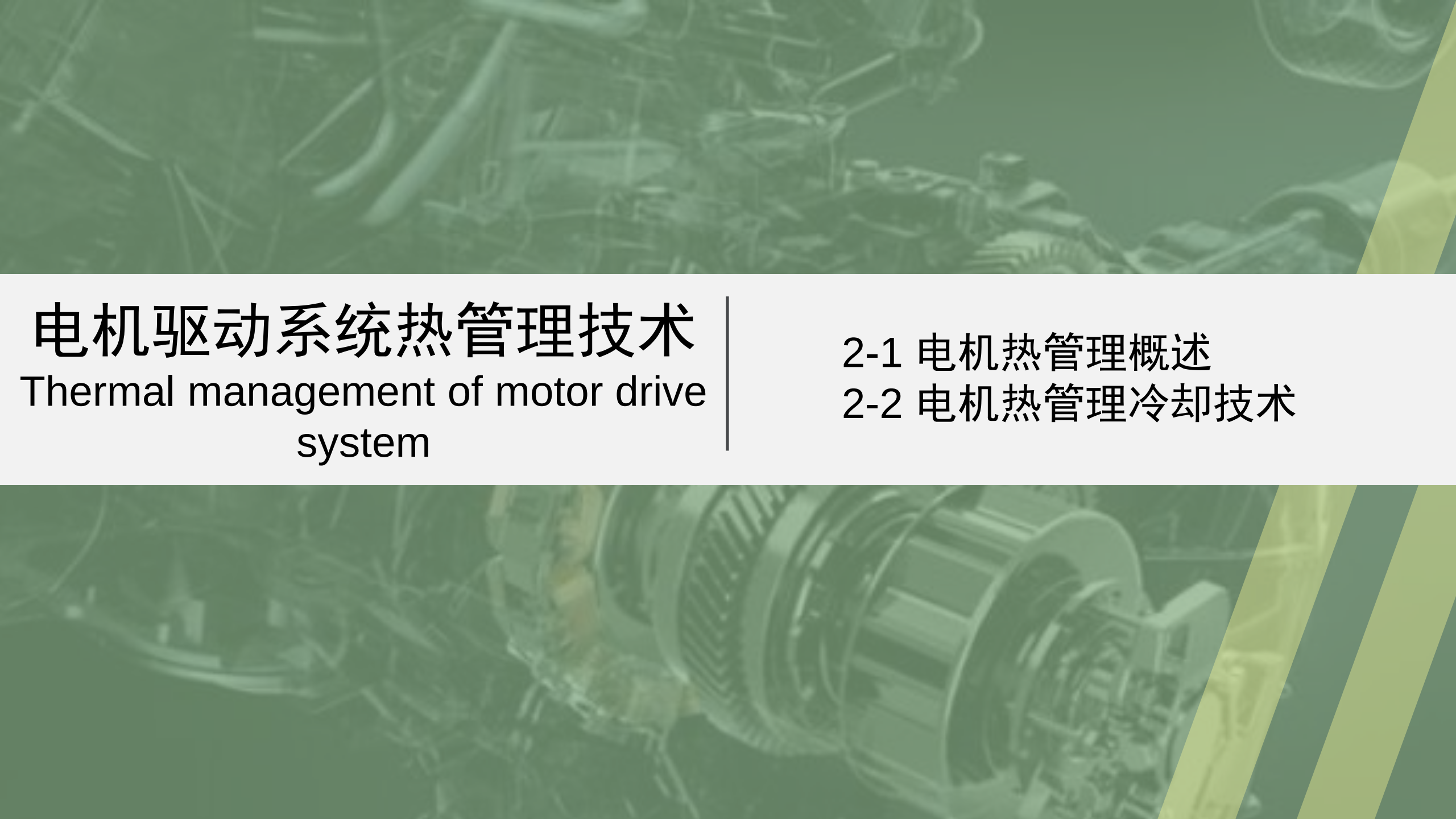
前沿热管理技术开发

- 脉冲自加热
- 相变/沉浸式热管理
- 热泵系统/直冷系统



热安全分级保障措施

- 三元方形模组实现无热蔓延
- 高效阻热/隔离技术
- 多维度的预警技术



电机驱动系统热管理技术

Thermal management of motor drive
system

2-1 电机热管理概述

2-2 电机热管理冷却技术

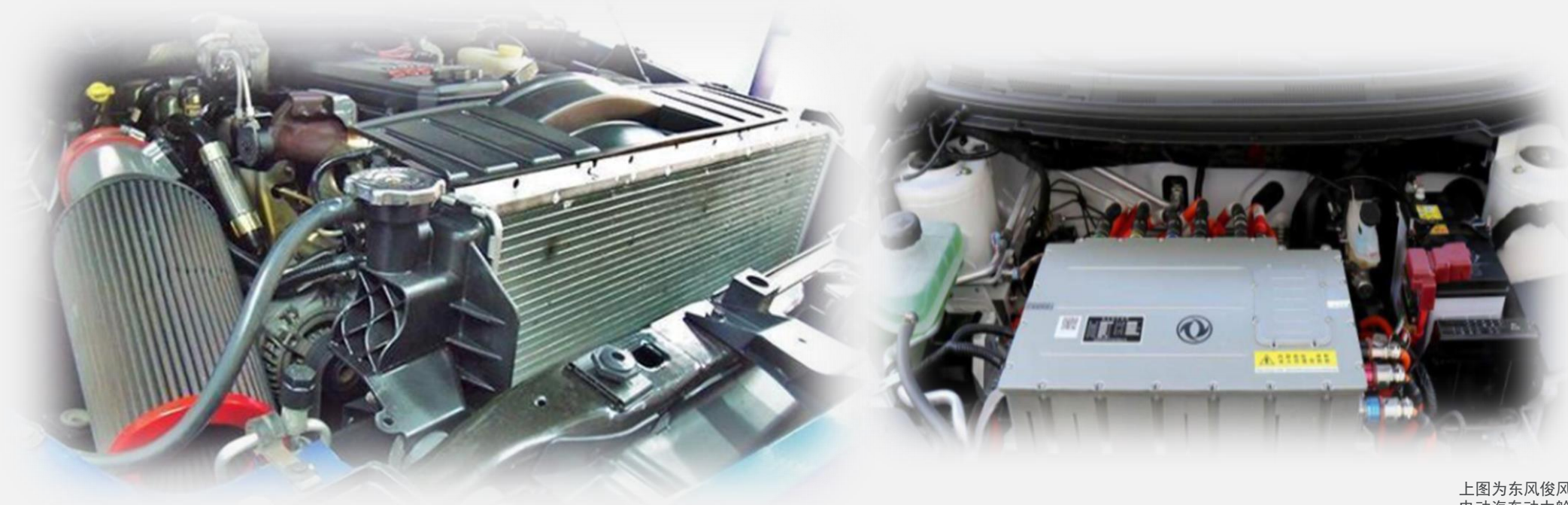
电机
热管理

电机的性能直接影响到汽车的动力、效率、舒适度等性能



新能源汽车驱动电机和电控装置在工作中会产生很多热量，热量不及时散热会**降低驱动电机性能、降低电机寿命**，严重地可能会引起线路短路造成**车辆自燃**

采用了**风冷散热**方式的电机，自带同轴风扇来形成内风路循环或外风路循环，通过风扇产生足够的风量，以带走电动机所产生的热量。



上图 of 东风俊风E11K型
电动汽车动力舱

风冷的特点是结构相对简单，电机冷却成本较低，但是散热效果和效率都不太好，工作可靠性差，并且对天气和环境的要求也比较高。

采用了**水冷散热**方式的电机，会将冷却液通过管道和通路引入定子或转子空心导体内部，带走电机转子和定子产生的热量。

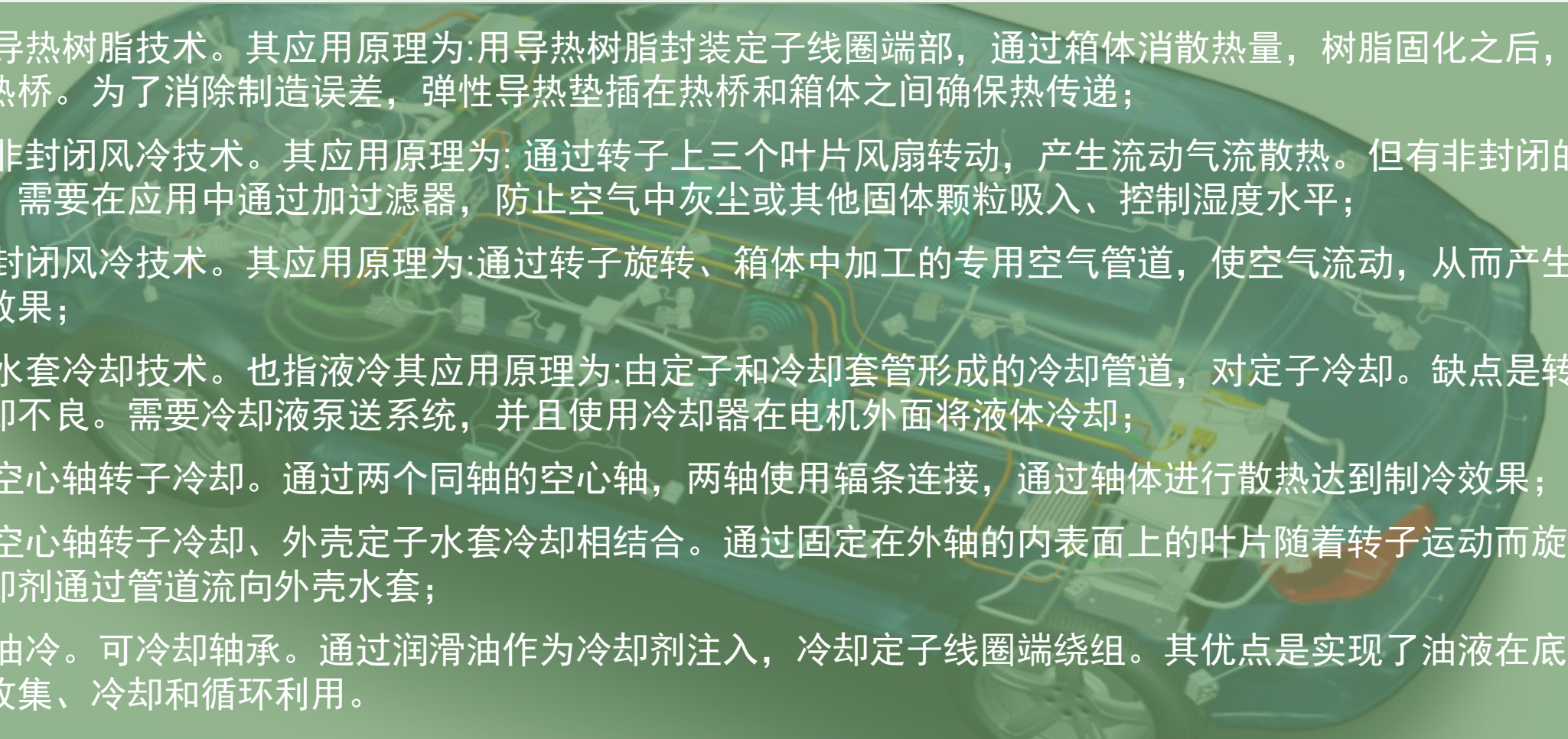


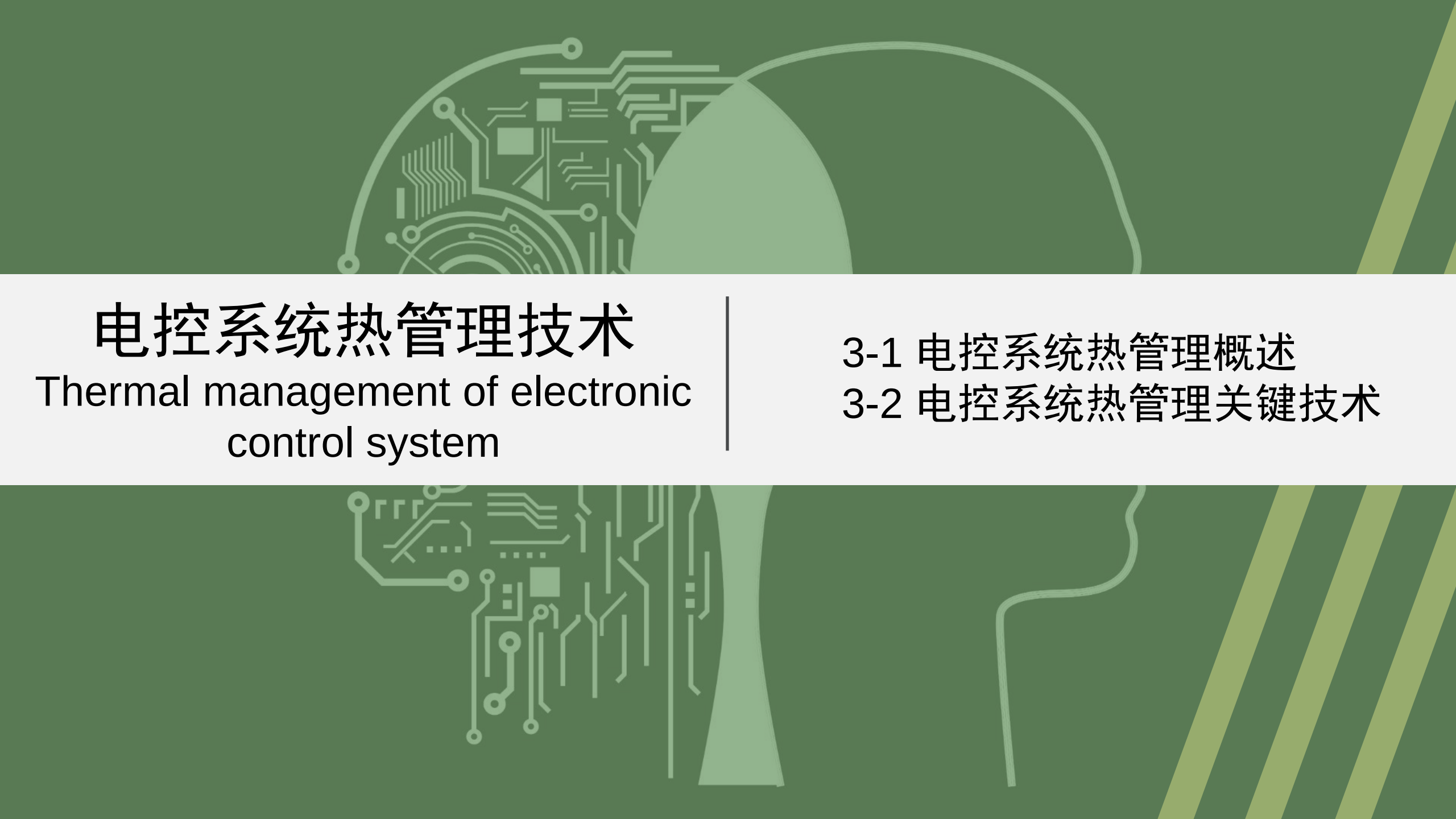
上图为东风风神E70型电动汽车动力舱



虽然水冷的成本比风冷略高，但它的冷却效果却比风冷更加显著，而且**散热均匀、效率高**，工作**可靠性强**，**噪音小**。在保证装置拥有良好的机械密封性时，可以在多种环境下使用。

目前常用的电机冷却方式具体有：

- 
- (1)导热树脂技术。其应用原理为:用导热树脂封装定子线圈端部，通过箱体消散热量，树脂固化之后，形成热桥。为了消除制造误差，弹性导热垫插在热桥和箱体之间确保热传递；
 - (2)非封闭风冷技术。其应用原理为: 通过转子上三个叶片风扇转动，产生流动气流散热。但有非封闭的缺点，需要在应用中通过加过滤器，防止空气中灰尘或其他固体颗粒吸入、控制湿度水平；
 - (3)封闭风冷技术。其应用原理为:通过转子旋转、箱体中加工的专用空气管道，使空气流动，从而产生制冷效果；
 - (4)水套冷却技术。也指液冷其应用原理为:由定子和冷却套管形成的冷却管道，对定子冷却。缺点是转子冷却不良。需要冷却液泵送系统，并且使用冷却器在电机外面将液体冷却；
 - (5)空心轴转子冷却。通过两个同轴的空心轴，两轴使用辐条连接，通过轴体进行散热达到制冷效果；
 - (6)空心轴转子冷却、外壳定子水套冷却相结合。通过固定在外轴的内表面上的叶片随着转子运动而旋转，冷却剂通过管道流向外壳水套；
 - (7)油冷。可冷却轴承。通过润滑油作为冷却剂注入，冷却定子线圈端绕组。其优点是实现了油液在底部的收集、冷却和循环利用。



电控系统热管理技术

Thermal management of electronic
control system

3-1 电控系统热管理概述

3-2 电控系统热管理关键技术

电控 热管理

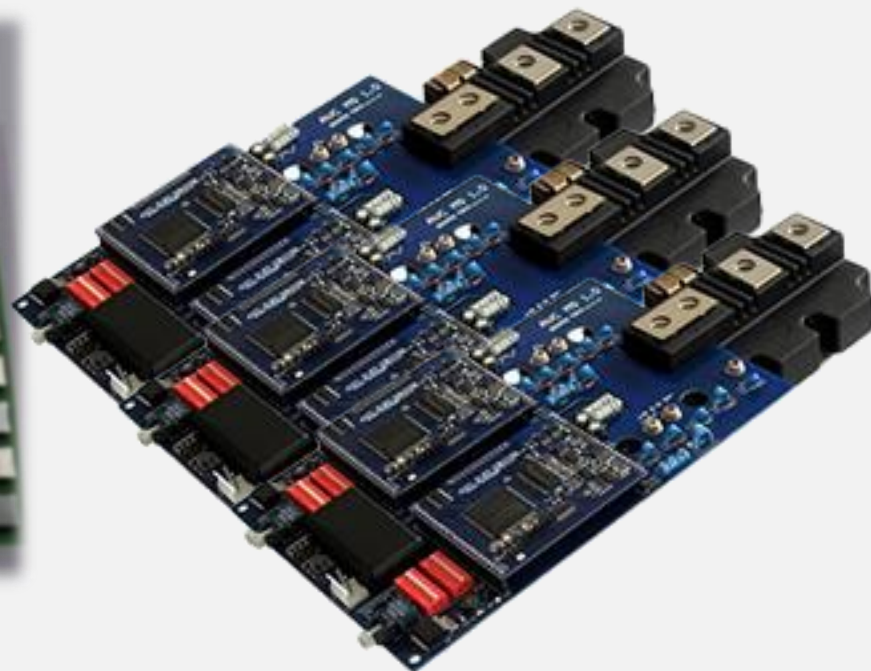
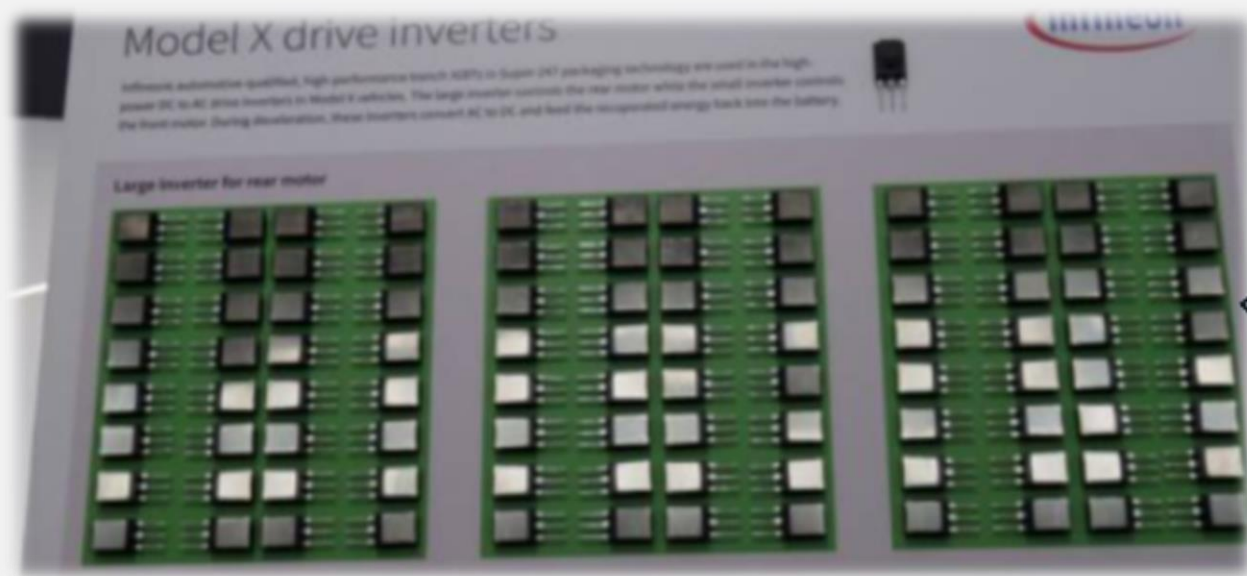
电控系统在新能源汽车的车载电机等产品中均有应用，通过功率半导体、微处理器等电力电子器件，采用中低压变频等方式实现对车用空调压缩机、转向助力泵电机等进行调控的功能。



上图为海格电控混合动力高压控制柜

目前新能源汽车电机以交流感应电机和永磁同步电机为主，电控方面多有AC-DC变换、电机调速、转矩控制等要求。

为保证合适的工作条件，电控系统的热管理技术十分关键。其中电机驱动控制部分的核心元件 **IGBT** (Insulated Gate Bipolar Transistor，绝缘栅双极型晶体管芯片) 是最需要重视的。



上图特斯拉Model X 使用的英飞凌IGBT管

IGBT具有以下特点：**高输入阻抗，可采用通用低成本的驱动线路；高速开关特性；导通状态低损耗。**

IGBT的关键技术之一就是**散热工艺**

粗铝线键合



铝线键合



铜线键合



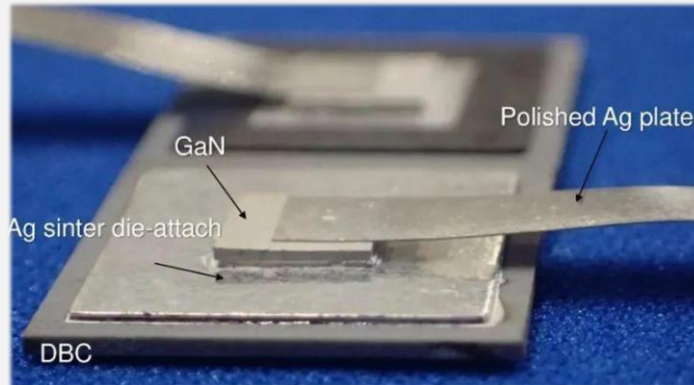
提高 IGBT模块内部的导热导电性能、耐
受功率循环的能力，散热性能更加出色。

最新IGBT的背面散热工艺通过减薄6-8毫米，在维持了可靠性的同时也提高了散热能力。再者可以注入一层薄磷做缓冲层，提高背板强度。

新的焊接工艺：低温银烧结技术和瞬态液相扩散焊接。

银烧结技术的导热性、耐热性更好，具有更高的可靠性；

瞬态液相扩散焊接通过特殊工艺形成金属合金层，熔点比传统焊料高，机械性能更好。





燃料电池热管理

Fuel cell thermal management

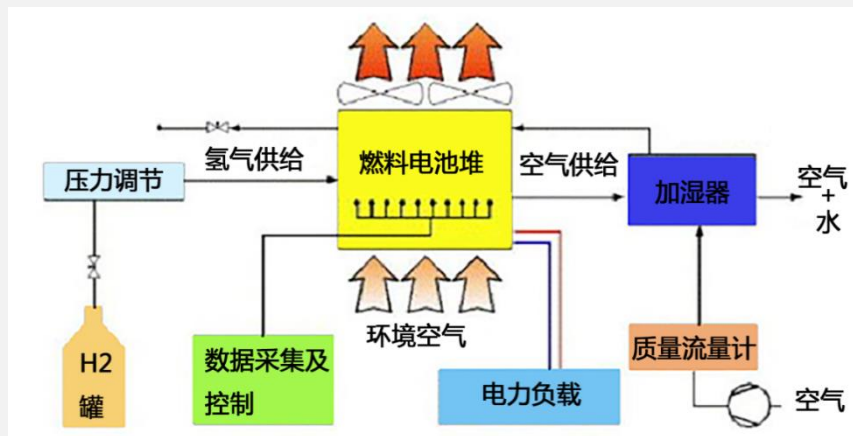
4-1 单相冷却方式

4-2 相变冷却方式



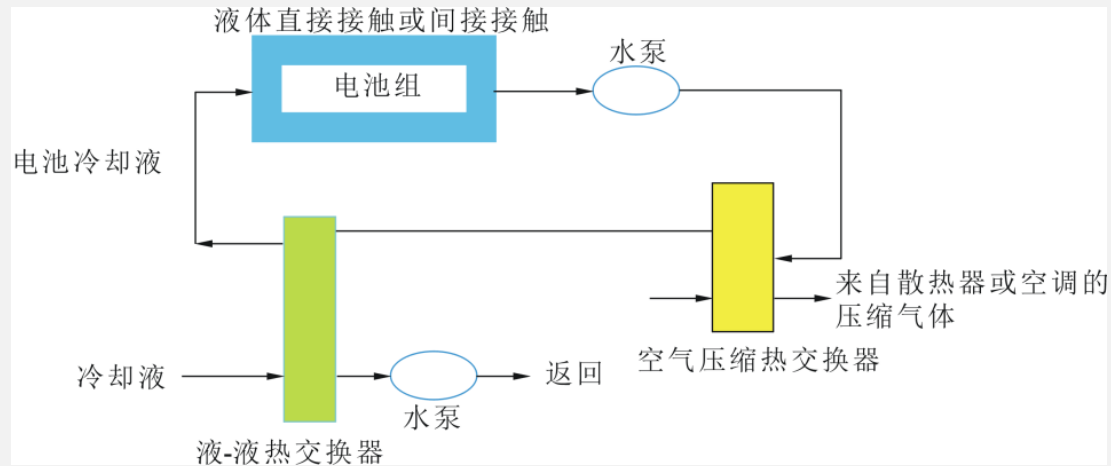
目前对于燃料电池热管理系统中的冷却系统，根据冷却介质带出热量的时是否发生相变，可分为**单相冷却方式**和**相变冷却方式**两类。

单相冷却方式是目前应用最为广泛的冷却方式，主要分为空气冷却和液体冷却两种类型。



风冷型燃料电池系统

空冷散热方式**结构简单，零部件少**；但是对流换热系数低，冷却流道进出口温差大，电堆温度分布不均匀，风扇工作导致迎风面不同区域风速不一致

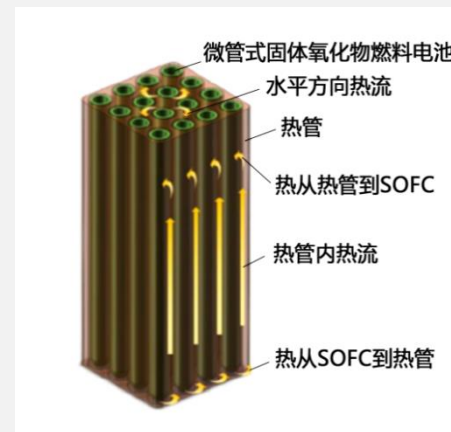
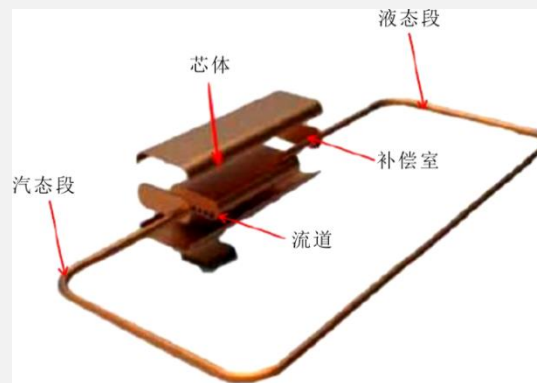
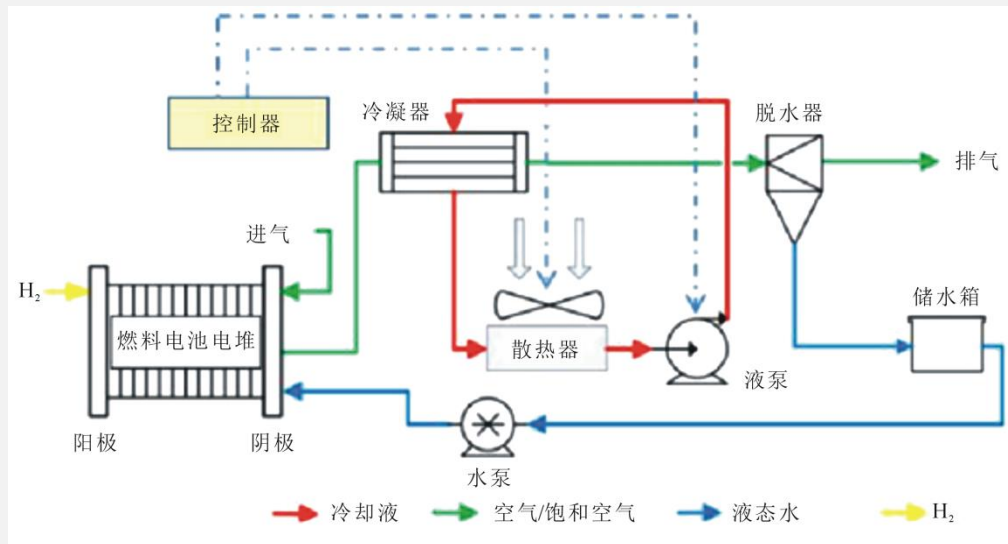


液冷型燃料电池系统

液冷散热方式**效果相对较好**；但燃料电池结构轻量化设计带来了很大的挑战，且冷却介质进出口温差要求高，对温控系统的要求高。

相变冷却方式原理是利用冷却介质在相变过程中吸收、释放大量相变潜热的特性进行热量的转移。

目前相变冷却形式主要有**蒸发冷凝**、**流动沸腾**、**热管技术**等换热技术。



Fly A 等人将蒸发冷凝技术应用于燃料电池的冷却系统中，提出了中间冷却回路蒸发冷却模式，综合了液冷和蒸发冷凝式冷却系统的优势

热管技术相较于传统的单相冷却技术优势明显，换热效率极高，热阻低，且冷却液的循环无需外界动力元件参与

感谢聆听
欢迎各位专家指正

Tel: 13971499256

E-mail: lidinggen@hust.edu.cn