

热建模：如何满足 EV 大功率充电要求

TE Connectivity 首席现场应用工程师 Marco Wolf

动力总成电气化、自动化和新业务模式正在塑造下一代交通工具的移动性。这些趋势将极大地影响未来车辆的电力和电子架构。

与现有车辆相比，下一代车辆将生成、处理和传递更多数据。通过移动技术（例如，5G、V2X）的无线联网能够与其他车辆或与周围的基础设施进行通信，以及使得能够通过空中下载（OTA）进行软件更新。

同时，高电流功率将在电动汽车内传输。今天的电动汽车已经拥有超过 120 千瓦的发动机功率。此性能所需的高功率电平会产生强电磁场，因此需要保护附近的信号线和电子元件免受干扰和故障（高达 20 Gbits 的高数据速率与高功率）。

简而言之，物理层将作为未来车辆功能的支柱并确保其可靠性发挥关键作用。这意味着低压数据连接网络和高压（HV）驱动系统必须同时以超可靠和安全的方式工作。

电动汽车框架

尽管全球范围内对机动性的需求增加，但动力总成电气化有助于减少车辆对化石燃料的消耗。这是在中长期内应对温室气体（CO₂）排放越来越严格限制的唯一途径。

电动汽车（EV）的长距离将通过直流快速充电和 350 kW 的未来充电功率实现，这被归类为高功率直流充电（HPC DC）。

HPC 的重要性

直到最近，人们更加关注电动汽车的驱动问题，而不是充电问题。这可归因于涉及汽车制造商（OEM）和能源生产商这两个行业领域的商业模式缺乏成熟度。

典型的 EV 用例在全球范围内各有差异。虽然欧洲电动汽车驾驶员希望他们的汽车能够偶尔进行长途旅行，但亚洲电动车驾驶员往往会在大城市中短距离使用他们的汽车。而 HPC DC 可以在所有情况下使用 EV。然而，简单地扩展市中心交流充电站网络是不够的，因为较低的电力充电时间将导致过长的等待时间和队列。

如果“更大”的电池不会导致更长的充电时间，则只能以有用的方式利用增加电池容量来延长行驶里程。充电功率为 350 kW，最大可达数分钟内可达到 300 km 的额外范围。这将使 EV “加油停车”转变为可接受的短暂休息时间（与内燃机驱动的汽车相当），并且直流充电站可以快速用于下一辆车。但是，在高达 500 A 的电流下，350 kW 的充电功率是从充电站到车辆电池的完整电流路径的峰值负载。

沿着该路径流动的高电流会导致高热损失，因为所有部件（连接器、电缆）的电阻不可避免地产生热量。这种热损失需要考虑到所有导电部件的设计和尺寸设计中以避免过载或过热，或者如果电池在充电期间开始过热则需控制充电电流的降低。虽然降容可以保护电池，但它也会延长充电时间。这种目标的分歧需要以最佳方式来解决。

热管理可以通过随时预测结构的每个部分中的所有组件的准确状态来实现。

HPC 的挑战

HPC DC 表示 EV 中电气系统的峰值负载状态。HPC DC 的高充电电流会导致所有组件的温度显著升高。当车辆不移动时，这会进一步加剧，因为没有可用于冷却的对流。因此，为了便于 HPC DC，从充电点到车辆电池的整个电气系统需要设计和规划电气和热量。

这一挑战的主要原因是电流越大，所需的电缆横截面越大，以相同的电压水平承载电力而不会过热。在车辆内，这主要是重量和可用空间的问题。例如，就成本、重量和体积而言，在入口和电池之间的 50mm^2 横截面或 95mm^2 横截面导体是否足够时，它具有相当大的差异。

一个有吸引力的选择是增加电压，因此可以在较低的电流水平下传输相同的功率。虽然规划确定电气部件可能会导致车辆中不需要的额外质量，但在固定充电电缆（模式 4 电缆）的情况下，它也接近重量限制。如果 HPC DC 是一个现实的方向，则必须避免电缆和所有其他电气元件的尺寸过大。

当下的电气元件设计

迄今为止，沿着高电流路径的电气部件的设计通常是基于不完全适合于驱动的动态负载曲线或 HPC DC 的要求的假设。现有标准基于最初用于设计继电器和（开关）熔断器的静态负载点，这些负载点由统计方法确定，反映了它们出现的频率及其重要性。这就产生了表示静态条件的均方根（RMS）值（图 1）。

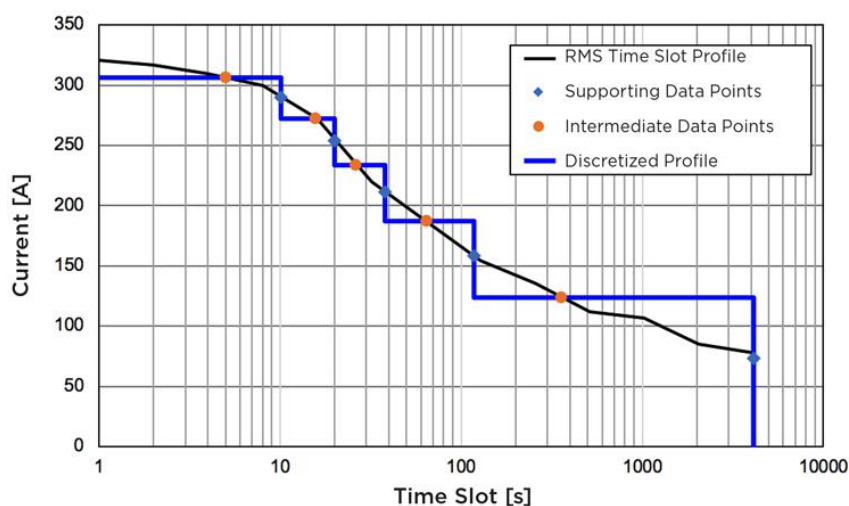


图 1. 这是图 2 中电流剖面背后的量化方法。

电气互连组件是根据这种类型的负载曲线进行设计的——不能反映实际情况——并且增加了 20% 的安全裕度。然而，EV 中的实际负载曲线与以前的车辆应用及其 RMS 值有很大不同（图 2）。

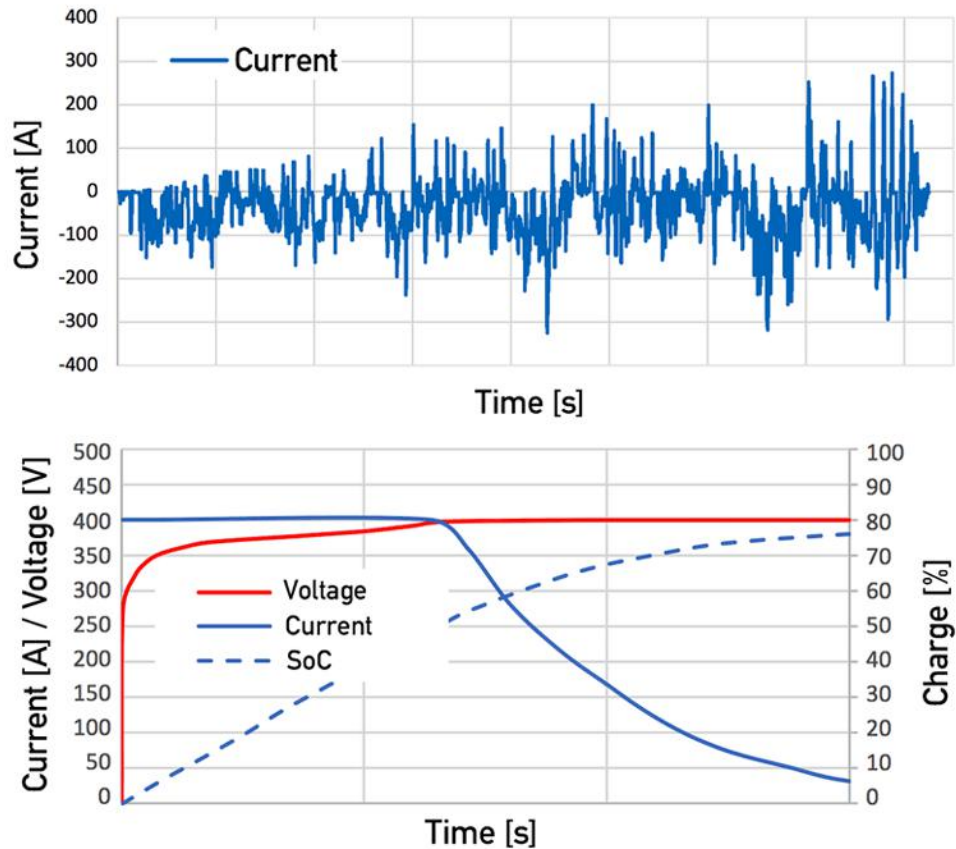


图 2. 与 HPC 负载配置文件相比的驱动配置文件。

图 2 解释了为什么热设计对充电至关重要。驱动会导致非常动态的电流曲线，包括高峰和低峰之间的负载变化，HPC DC 期间的恒定高负载根本不会反映在驱动导致的负载曲线中。为了促进 350kW 的峰值负载，充电功率需要采用不同的方法来设计电气元件。

虽然存储在电池中的电能通常在驱动期间在几个小时的时间跨度内被回收，但是在 HPC DC 期间，三到四倍的能量在几分钟内流入电池。因此，必须在系统级分析完整的高压/高电流路径，以了解其在充电期间的行为（图 3）。如前所述，均方根对此没有多大帮助。

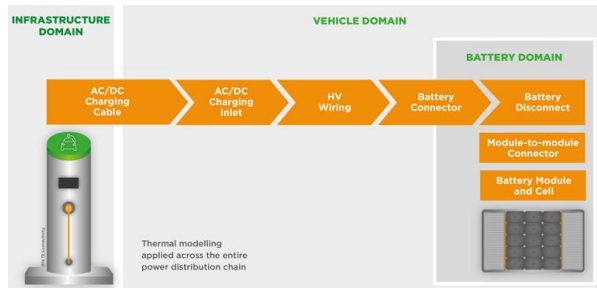


图 3. 示出了沿 EV 的电流路径的不同应力分量。

了解恒定负载可能导致过热的情况是至关重要的，因为这可能会导致一个关键的系统状态。所以必须更密切地分析该热角。但目前采用的方法无法提供所需的答案。

结果，出于安全考虑，当前系统尺寸静态地过大。在 350 kW 的充电功率方面，这种方法由于对重量、安装空间和可用性的影响而无法持续。

为了应对这一挑战，TE Connectivity 正在其 ZVEI 项目（德国电气和电子制造商协会）内开发一种新的设计方法。该方法的主旨是通过已建立的仿真原理（用于电气系统）动态确定由元件引起的温度升高以及系统中的散热。该方法可以更早地检查组件设计，以预测其在运行期间的性能。

基于模型的热仿真为未来的负载曲线提供了可验证的基础，有助于证明沿高压/高电流路径的所有互连组件的安全性、可靠性和可用性。

热仿真的重要性

传输电能的物理特性会导致以热损失的形式沿着有线能量流的耗散功率。根本原因在于所有金属导体的电阻（以欧姆为单位）。

这种电阻对于高压路径的每个元件都是已知的。然而，欧姆电阻随着操作期间的温度升高而变化。可以针对特定电流、电压和温度，计算在特定组件处发生的功率耗量——虽然所有散热路径均衡，但仅适用于静止状态。

在系统级动态计算完整高压路径的现有方法不是很实用。为了应用诸如有限元分析（FEA）的众所周知的方法，有必要对每个操作点以快速顺序进行多次计算。很明显，实时（车辆中）的持续热量计算需要一种只需更少计算能力的不同方法。

挑战的一部分是沿着高压路径的散热会导致系统相对变慢。根据单个组件的质量和相邻的可用散热器，单个组件将对不断变化的负载曲线做出不同的反应。

散热量有限的轻质部件可能成为热管理的瓶颈。如果产生的热量不能充分消散，则该部件将暂时变成绝热元件（即与环境没有热交换的状态），而没有任何外部影响其加热过程的机会。需要理解该类型的热瓶颈，以便不基于系统进行不必要的限制或压力。

此外，散热发生在几个路径上。除了材料内的导热散热外，还有通过冷却空气或冷却剂流（对流）的热辐射和散热的份。对于沿高压路径的每个组件，这三个元件的混合将是不同的。

当电子元件升温时，它们也经历老化过程，这会随着时间的推移改变组件的电气特性。热量进入越强，老化过程越快，组件的残余性能水平越小。

HPC 的挑战

因此，有必要找到一种不同的工具，能够及时为 HPC DC 提供安全且经济可行的电流路径设计，并提供其安全性证明。使用经过验证的系统热仿真，可以提前自动测试几乎无限数量的可能负载曲线。这将揭示系统中可能通过设计变更解决的潜在热量瓶颈。

采用这种方法可以减少后续的故障排除工作。减少的调查工作量可能相当大，因为热系统非常复杂。确切的根本原因可能不在最初诊断的组件中，而是在沿着热路径的相邻组件中。

系统仿真方法

这种先进的系统仿真方法是基于 Kirchhoff 的电路定律，计算在动态变化的负载条件下沿高压路径的热损耗。它的“点规则”和“循环规则”表明“点”处的所有电流之和以及“环路”中所有电压的总和必须为零。

同时，该规则规定能量始终是守恒的。这意味着由于电阻而转变为热量（热量损失）的电流不会丢失。相反，这种热能恰好等于流入电路的电能与目标系统可用的能量之间的差异。等效电路图显示了电和热行为之间的直接和线性关系（图 4）。

| Electrical | Thermal |
|---------------------|--|
| Current I | P Heat Flow |
| Voltage U | T Temperature |
| Resistance R | R_{th} Thermal Resistance |
| Capacity C | C_{th} Heat Capacity |

图 4. 电气和热值之间的相关性构成了等效电路图的基础。

因此，等效电路图（图 5）用于仿真连接的电气和热行为。与电压通过电阻器发送电流的方式相同，温差导致热传输。不同的物理运输形式（传导、对流、辐射）均由电阻器表示。元件模型中存储的代数方程会根据施加的电流和电压以及环境温度不断计算发热量。

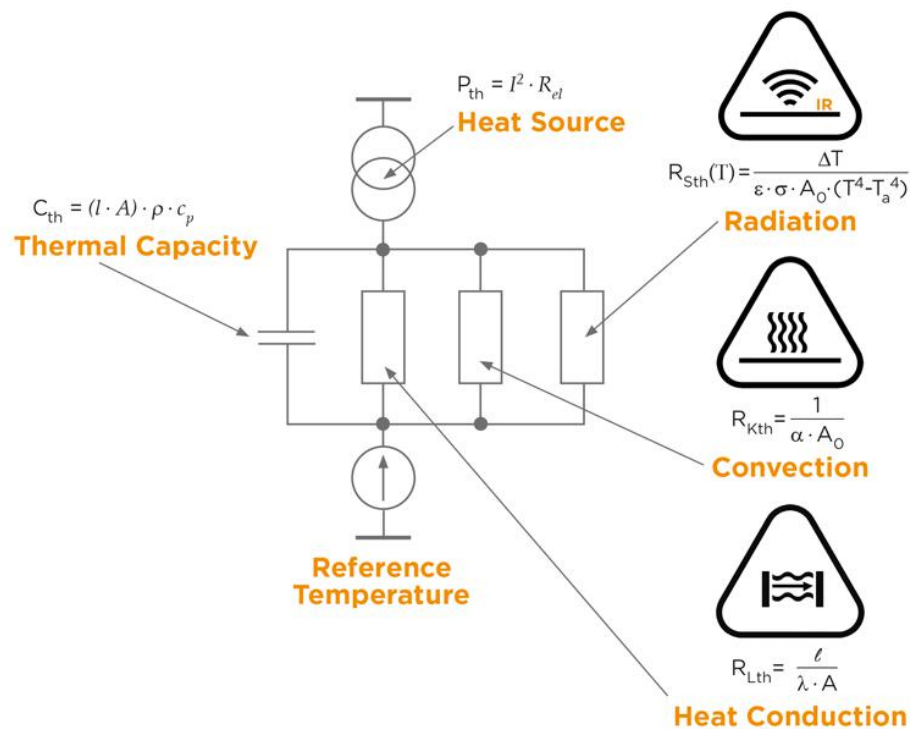


图 5. 如热等效仿真等效电路图所示，电阻代表三种散热方式。

基于这种热量产生，散热的不同可能性由等效电路图中的电阻器（热障）和热质量/容量表示。该图表示通过材料内的传导、通过辐射和通过对流，热传输可在空中散掉。

使用这种相当简单的方法，可以仿真单个组件（例如触点），整个产品（例如如图 6 连接器）或高压路径，因为通过回路形成可以预测热量的产生和散热。

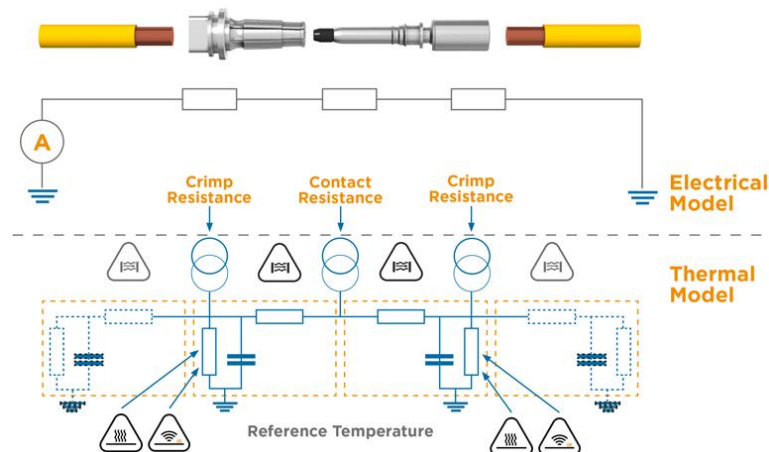


图 6. 连接器分解为环路：连接器中的电气接触点与热仿真之间存在等效性。

一旦电缆制造商提供电缆型号，也可以计算中间部分。此外，可以集成来自不同制造商的组件（根据板载网络）——所需要的是输入制造商特定的电气参数。在模型中，这些参数应用于遵循基尔霍夫电路定律的代数方程。本质上，该模型描述了与环境的热量产生和热交换。

该仿真可以确定例如热源和散热器的位置；当温度水平变得严重并开始缩短部件的使用寿命时；组件如何集成到更大的集群中；并且可以找到绝热状态以及它们正在产生什么影响。

在原始模型开发期间，仿真和测试之间的迭代（来自实验室测试的原始数据）被用于改进模型的代数部分，直到预测的准确性与测试结果匹配。

利用最终的仿真方法，可以以最小的计算能力测试高压路径上每个组件的动态负载曲线。

安全收益

基于等效电路图的热仿真所需的计算能力非常低，因此将该程序作为典型汽车电子控制单元（ECU）上的连续例行任务运行是可行的。因此可以实时计算实际驾驶的实际负载曲线。

仿真提供的数据有助于提高功能安全性。仿真和传感器数据相互补充，作为异构诊断程序。对于出于安全原因需要多个冗余的自动车辆，这可以有助于安全概念。

为车辆设计高压元件

系统热仿真有力地推动了车辆高压部件的负载导向设计朝向实际运行条件。正如制造商所知，能够在开发阶段预测组件的性能是非常有价值的。系统和动态热仿真精确地揭示了在操作期间由磨损和老化引起的预期效果。因此，可以仿真像高压路径这样的复杂系统，并且可以预测其行为。此外，仿真可以涵盖测试实验室永远无法实现的广泛测试。