



**SIEMENS**

*Ingenuity for life*

## 推动先进汽车电池的 未来发展

此白皮书将介绍计算机辅助电池设计（CAEBAT）项目中开发的方法，这些方法现在可通过 Siemens PLM Software 的 Simcenter STAR-CCM+™ 软件和 Battery Design Studio™ 软件使用。这些解决方案为电池设计过程中的电化学工程师和热能工程师提供了无缝集成。此项目已经为江森自控（JCI）这样的制造商提供了顶尖技术，助其设计创新式电池系统并实现汽车的新式节油技术。

# 内容

|               |    |
|---------------|----|
| 高层摘要.....     | 3  |
| 电池设计中的难题..... | 3  |
| 仿真的作用 .....   | 4  |
| 项目.....       | 4  |
| 团队.....       | 5  |
| 电池建模过程.....   | 6  |
| 验证和应用 .....   | 8  |
| 结论.....       | 10 |

# 高层摘要

对于商业化电动车（EDV）的追求能否成功，很大程度上取决于最根本的电池技术的成本、寿命、安全性和可靠性。如今，仿真技术对于将切实可行的汽车电池推向市场已经起到了重要影响，从集成小规模电化学模型到系统级老化、性能和退化建模，帮助完全理解整个系统。此白皮书将介绍以汽车和锂离子电池行业为目标的 CAEBAT 开发项目，旨在缩短开发时间并促进高级 EDV 动力系统的大面积市场渗透。我们还与 JCI 电源解决方案设计分析主管 Brian Sisk 博士一起探讨了仿真和 CAEBAT 这样的项

目在该公司电池技术发展中的重要作用。

## 电池设计中的难题

成本、里程、充电时间、安全性、性能和电池寿命都是 EDV 实现商业性和可行性所必须面对的难关。长期以来，原型驱动的电池设计和循环测试（电池在很长一段时间内反复接受充电和放电循环的测试）这样的合格性试验一直被奉为电池设计的黄金准则。尽管预计寿命为 10 到 15 年，真正树立对 EDV 电池寿命的信心仍是非常具有挑战性的工程问题，因为它高度依赖于诸多不确定因素，例如不断变化的运行温度和环境条件。

Sisk 博士主管 JCI 的全局建模功能，包括电化学、系统和车辆建模以及需求分析、车辆实验室和分析实验室。他所带领的团队主要负责支持电池和构件设计工程师，其中包括帮助他们了解产品技术所需的元件并探索新的技术机会。

“汽车电池行业目前正处于十字路口，” Sisk 博士说。“汽车电池起先只需要提供发动、照明和点火功能，如今却面临着前所未有的重任。电池需要支持更高的附件载荷、允许复杂的电池管理策略、提供启动停车操作，甚至要为混合动力或纯电动动力系统提供电源。”

市场的千变万化，刺激了 JCI 的大量创新工作，促成了产品种类在广度上的增加，以便满足汽车制造商在成本、大小和省油方面的需求。

Sisk 还说，“市场上的电池技术数量激增，其驱动因素包括消费者需求和全球强烈的节油需求，而仿真在这些方面起到了至关重要的作用。”

# 仿真的作用

最先进的仿真工具包括流、热和电化学模型，这些工具已经让 EDV 设计成为可能，同时还兼顾了该系统可扩展的众多优势，包括微结构电化学、详细电池单体设计、模块和电池包分析以及总体系统设计和电池研究。

“汽车制造商需要电池供应商灵活多变，这样才能满足不断变化的需求，” Sisk 说。“此外，电池空间方面的激烈竞争意味着，过度设计或提高容错率都不能解决技术难题。这种环境助推了技术变化步伐，却没有为执行每个需求的物理实验预留时间，因而也就意味着仿真不再是一种奢侈。仿真成为一种绝对需求。”

仿真对 JCI 公司大有裨益，而最大的益处往往是无形的，难以量化。Sisk 提到，“时间就是金钱，但是并非所有时间的价值都相同。当仿真成为按期完成任务或者在极其紧张的时间约束下赢得客户的唯一出路时，其价值尤为明显。”

显而易见的是，JCI 这样的公司不仅看重成本节约底线，还关注仿真的真正价值。他们时常会问自己这样的问题：如果没有仿真功能，我们赢得的哪些业务可能会丢失？如果没有仿真功能，哪些盈利的项目可能亏钱？我们成功保留的哪些关系是因为我们能够迅速执行仿真，而当时物理实验完全没有可能？

# 项目

2011 年 6 月，CD-adapco（如今已成为 Siemens PLM Software 一员）开始着手由美国能源部车辆技术办公室共同出资的软件开发项目。项目起源要追溯到美国国家可再生能源实验室（NREL）授权的一个名为“计算机辅助汽车电池设计工具开发”的征求建议书（RFP）。这与 Siemens PLM Software 的 Simcenter STAR-CCM+ 功能不谋而合，因此被用于锂离子聚合物电池的流、热和电化学分析。该提议的初衷是改进现有功能，将其应用到所有电

池形状因素中，尤其是更具挑战性的螺旋结构设计中。

# 团队

担任这样费心的项目工作，需要合作伙伴具备必要的技术并能够验证提议方法的价值和准确度。帮助确定数学和问题定义的不二之选正是 CD-adapco 在电池分析领域与 Battery Design LLC 的长期合作关系。JCI 也参与了进来，因为该公司生产各式各样的卷绕式电池，它们正是验证此项技术的理想选择。团队组建完毕并增加了对于 A123 聚合物电池的研究，确保制定的方法适用于所有电池形状。

“参与 CAEBAT 对于我们而言尤为受益，” Sisk 说。“CAEBAT 成功汇聚了大量相互关联的责任方，包括电池制造商、软件供应商、车辆制造商、高等教育机构、国家实验室和政府机构。携手合作让我们可以统一优先目标、提高忠诚度、务实地看待仿真功能。”

JCI 的切实受益就是让 CAEBAT 研究活动对其技术进行了建模和验证，包括其特有的电极材料、电池单体和电池包等。这样可以确保所用工具的相关性。Sisk 说，“渐渐地，我们已经将电池视为一个整体系统，而非只是一个个电极或电池单体；我们更加关注如何在这个整体中优化系统。因此，电池化学、电子、热设计、算法和管理策略都需要一起协调。考虑到这样的侧重点以

后，我们使用 CAEBAT 的主要用途就集中在整个系统范围内，对于热能优化尤其如此。”

# 电池建模过程

图 1 显示项目不同阶段示意概览。

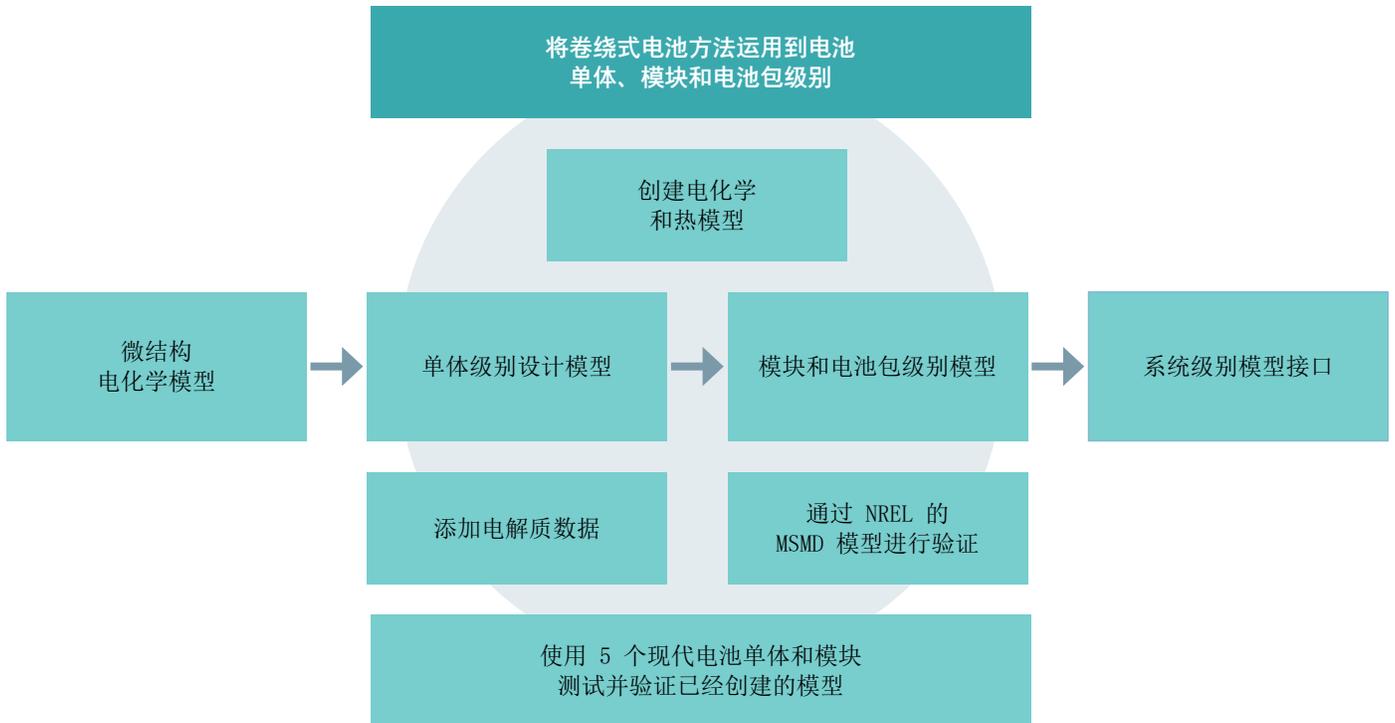


图 1: CAEBAT 项目概览。

第一阶段涉及详细软件开发、生成行业相关的易用电化学和热模型，这些模型可以应用于各种卷绕式电池类型。相关仿真技术可以应用于单体和模块级别分析，模型保真度可以由用户根据所需的输出和精确级别进行控制。

图 2 概括了电池建模过程的三个步骤。

该过程的第一步是电池制造商提供的单体数据，例如电池的物理尺寸及其化学特性数据。单体模型级别会使用这些数据来微调一些不确定的建模参数，这些参数会在电池整个温度、荷电状态 (SOC) 和里程范围内影响模型的性能以及鲁棒模型的构建。要确保模型性能各个方面都能恰当平衡，必须进行迭代校正循环。图 3 显示这种校正过程的一个结果示例。此图中的电压预测是根据 20 摄氏度 (°C)，即美国先进电池联盟 (USABC) 高脉冲功率特



图 2: 电池建模过程的三个步骤。

性 10 度时的电池模型（红色）与实验测试（绿色）数据绘制的。绘制涵盖整个温度、SOC 和里程范围。

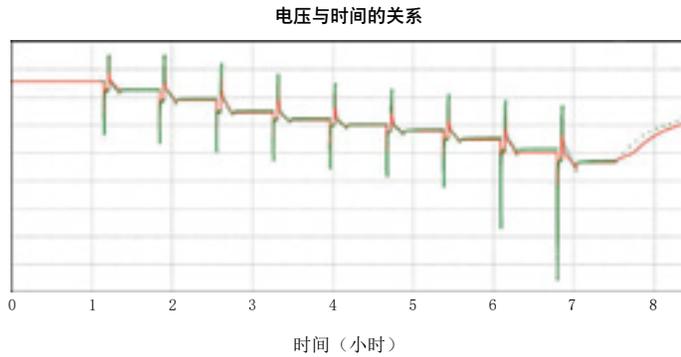


图 3: 根据校正的电池模型（红色）与实验电池（绿色）进行电压预测。

一旦使用抽象电池特性数据生成初始模型之后，此模型就会根据更为现实的行驶周期预测电池性能。这些行驶周期一直以不断变化的电流或功率为参照特性，因此能够提高特性数据所考虑的复杂水平。这些结果可以与适当的测试工作进行比较，以便在 STAR-CCM+ 中对电池进行三维表示之前进一步验证模型。

随后，构建三维仿真模型，此时电极已经具备所需的解析度，能够解析电化学和温度梯度。这不仅会影响模型运行时间，随后还会提升模型保真度，这对于细节设计至关重要。在 3D 模型中，每个电极区域都可能在不同的温度下运行，因此会对电池产生不同的电化学响应。将所有这一切结合起来考虑，就能准确预测电池在给定冷却系统设计中的性能。此外，使用 Simcenter STAR-CCM+ 可以堆叠或排列电池单体形成实际的模块/电池包，以便进一步研究。

# 验证和应用

在项目的第二阶段，为了在单体和模块级别验证使用真实世界行驶周期开发的计算模型，采用了两个不同厂家的五种电池以及相应的三种不同电池形状（堆叠、圆柱和棱柱卷绕式电极）。

图 4 显示一个标准行驶周期过程中单个 JCI VL6P 电池分析的电压和温度变化。分析（红色）和测试数据（绿色）之间的相关性显示了电压预测的准确匹配。温度变化（蓝色为分析数据，绿色为测试数据）也显示了电池中热量预测的准确性。

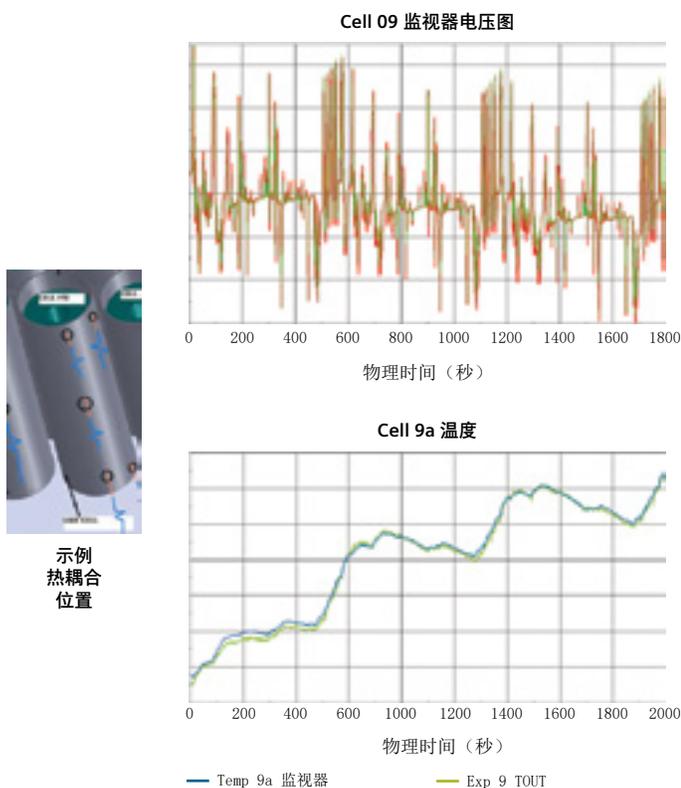


图 4：一个标准行驶周期中 JCI VL6P 电池的电压（红色为分析数据，绿色为试验数据）以及温度变化（蓝色为分析数据，绿色为试验数据）。

图 5 显示使用 12 个堆叠式 JCI VL6P 电池单体形成的模块在液态冷却系统中进行热管理的仿真结果。尽管这种应用方式更为复杂，但仿真再次捕获了实验趋势以及电子和热结果之中的小幅波动。图 6 显示 30 分钟 US06 行驶周期仿真结束时的温度分布。

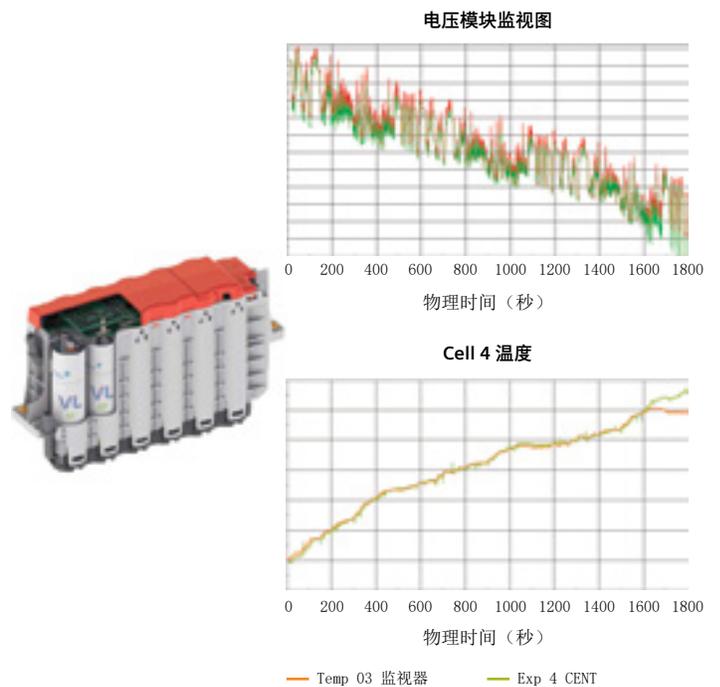


图 5：一个标准行驶周期中由 12 个 JCI VL6P 单体组成的模块电压和温度变化（红色为分析数据，绿色为试验数据）。

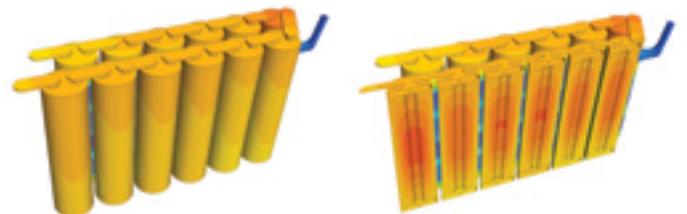


图 6：由 12 个 JCI VL6P 单体组成的模块在 30 分钟的 US06 周期后表面（左侧）和剖面（右侧）温度分布。

图 7 和图 8 显示了更多仿真结果，都是针对三个单体测试装置进行的。图 7 显示耦合热/电化学模型试验验证所用的模型几何体。

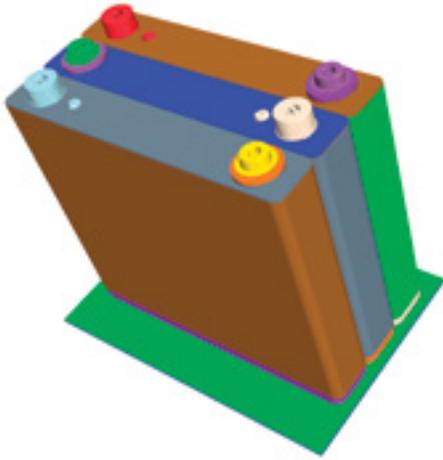


图 7：三个单体测试装置进行耦合热/电化学模型试验验证所用的模型几何体（不同颜色只为清晰显示几何体）。

图 8 显示与红色最高温度和蓝色最低温度循环之后的仿真热图。

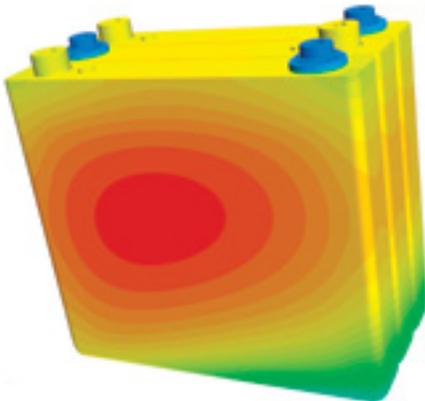


图 8：与红色最高温度和蓝色最低温度循环之后的热图。

为进一步改进仿真技术，该软件还增加了一个数据库，其中包括以 12 种现代化锂离子电池通常使用的电解质配制剂。这也让基于物理场的仿真更为完整。此外，软件还配有随时间老化的模型，与电池性能模型一同工作，预测其老化状态。这种方法还通过电化学技术或降阶模型延伸到了系统级空间。最后，用户形成了当代电化学未来技术的最佳实践方法，仿真模型集成到 STAR-CCM+ 软件中，可混合流、热和电化学仿真进行大范围扩展而不会产生冗余。

# 结论

CAEBAT 项目开发的方法如今已用于 Siemens PLM Software 的 Simcenter STAR-CCM+ 软件以及特定于应用程序的工具 Battery Design Studio。这些解决方案为电池设计过程中的电化学工程师和热能工程师提供了无缝集成。通过将流、热和电化学仿真融合在一个环境中，我们获得了高度准确的解算方案，将多种范围和计算领域从系统模型扩展至高度解析的复杂 3D 模型。此项目已经为 JCI 这样的电池制造商提供了顶尖技术，助其设计创新式电池系统并实现汽车的新式节油技术。

## Siemens PLM Software

### 总部

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
+1 972 987 3000

### 美洲

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
+1 314 264 8499

### 欧洲

Stephenson House  
Sir William Siemens Square  
Frimley, Camberley  
Surrey, GU16 8QD  
+44 (0) 1276 413200

### 亚太地区

Suites 4301-4302, 43/F  
AIA Kowloon Tower, Landmark  
East  
100 How Ming Street  
Kwun Tong, Kowloon  
Hong Kong  
+852 2230 3308

## 关于 Siemens PLM Software

Siemens 数字化工厂事业部旗下业务部 Siemens PLM Software 是全球领先的软件解决方案提供商，致力于推动行业数字化转型，为制造商创造新的机会并实现创新。Siemens PLM Software 的总部位于美国得克萨斯州普莱诺市，在全球拥有超过 140,000 个客户，并与所有规模的企业协同工作，帮助他们转变将想法变成现实的方式、产品实现方式以及使用和了解运行中产品和资产的方式。有关 Siemens PLM Software 产品和服务的详细信息，请访问 [www.siemens.com.cn/plm](http://www.siemens.com.cn/plm)。

## [www.siemens.com/plm](http://www.siemens.com/plm)

© 2017 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. Siemens 和 Siemens 徽标是 Siemens AG 的注册商标。Femap、HEEDS、Simcenter 3D 和 Teamcenter 均为 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 或其附属公司在美国及其他国家/地区的商标或注册商标。Simcenter、Simcenter Amesim、LMS Santech Samcef、LMS Samcef Caesam、LMS SCADAS、LMS SCADAS XS、LMS Smart、LMS Test.Xpress、LMS Soundbrush、LMS Sound Camera、LMS Test.Lab 和 LMS Virtual.Lab 均为 Siemens Industry Software NV 或其任何附属公司的商标或注册商标。STAR-CCM+ 和 STAR-CD 是 Siemens Industry Software Computational Dynamics Ltd. 的商标或注册商标。所有其他商标、注册商标或服务商标均属于其各自持有方。

66253-A4-CN 12/17 H