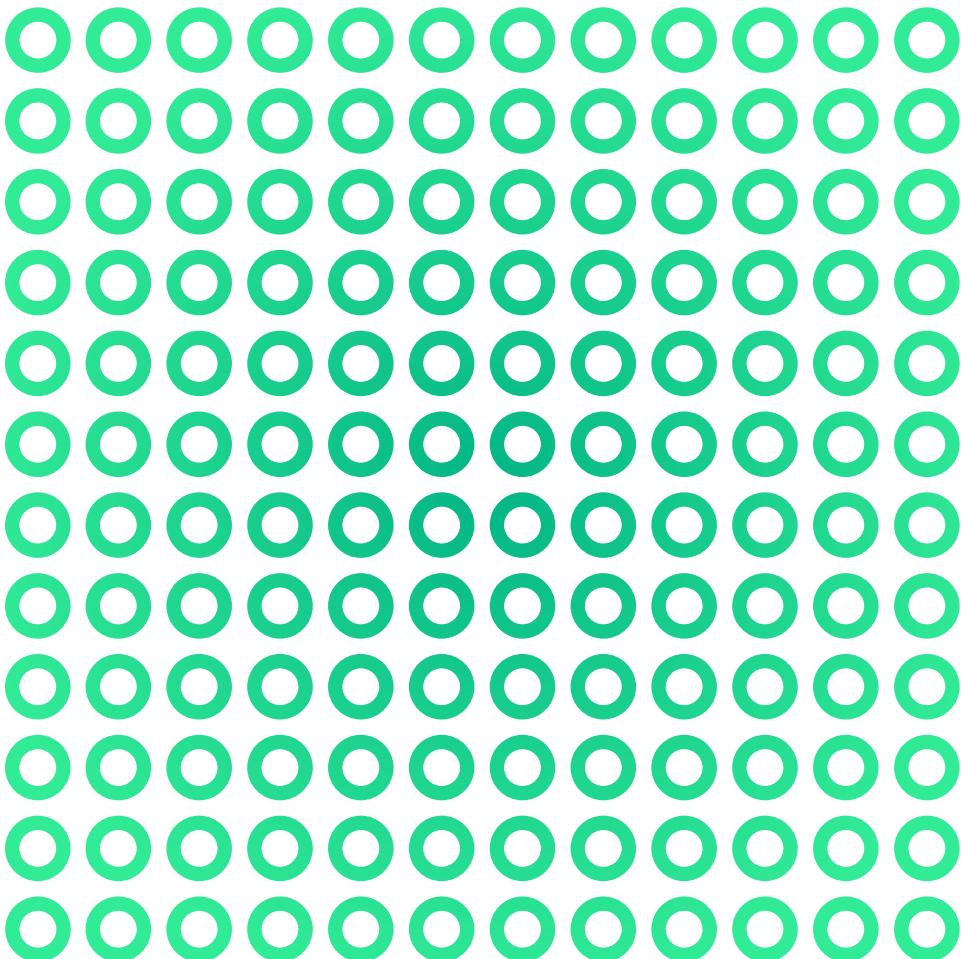




应对卫星电力系统的复杂测试挑战：储能





目录

04 电池测试挑战

05 电池组件测试方法

电芯测试/测量

装配测试

BMS测试

NI电池测试方法

NI电池测试解决方案的优势

17 结论

卫星电力系统(EPS)对卫星任务的成功起着至关重要的作用。它们负责确保在恶劣的外太空条件下为卫星子系统提供可靠、稳定的电力供应。EPS的储能功能可在发电和用电之间起到缓冲作用。虽然储存电能的选择有很多种，但燃料电池和放射性同位素电源系统通常只用于特殊任务，而可充电电池系统通常用于大多数地球轨道卫星。虽然已有多种化学成分的电池用于太空应用，但当代航天器和卫星在很大程度上依赖于各种锂电池。电芯、电池模组和整体电源系统设计取决于众多任务参数，包括卫星尺寸、电源要求、轨道路径、阴影等。尽管这些电源使用的是锂电池，由于太空环境恶劣，进入轨道的过程充满挑战以及太空旅行的相关障碍，它们的设计与日常用于电子产品的电源设计有很大不同。在太空条件下，电池要承受极端的温度、压力和应力，需要在长时间的飞行任务中保持最佳性能。在太空中，需要避免电池故障，因为没有经济有效的方法来更换已部署的电池。因此，必须在发射前对电池进行细致的设计、验证和测试。

电池包的配置取决于任务的具体需求。较小的电池包可能由单个电池模组组成，而较大的电池包可能包含多个电池模组，以便满足任务剖面中列出的电压和功率要求。在较大的系统中，电池管理系统(BMS)和电芯管理功能通常集成在电池模组中，通过最大限度地减少所需的电线数量来减轻重量和降低复杂性。这样的配置有助于将BMS组件与高压总线隔离开来，从而缓解相关的设计和测试挑战。从小型立方体卫星到需要90 kW功率的国际空间站，任务要求决定了卫星的总线电压及其相关电池包。具有更高功率需求的任务会使用更高的总线电压来降低电流处理要求，从而减轻航天器重量。但是，总线电压存在实际限制，当系统电压超过150 VDC时，很难确保实现隔离。

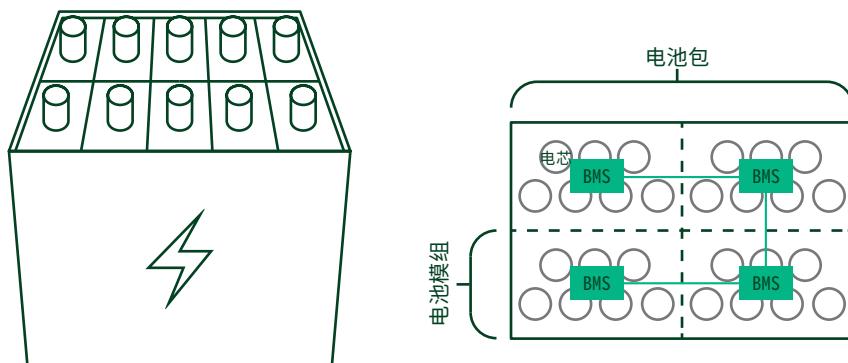


图01
电池组件

电池包括以下组件：

- 电芯 - 电池包的基本组成部分，并经过单独测试以评估性能和容量。
- 电池模组 - 通过串联和/或并联配置连接的电芯组。它们经过测试以评估整体性能和容量。
- 电池包 - 相互连接的电池模组的集合，构成了完整的电池系统。它们经过测试以评估性能、容量和安全性。在某些设计中，电池模组和电池包是同义词。

除了电池包的电气特性外，物理设计也同样重要，必须经过验证。需要优化电池模组和电池包的布局，使其与航天器和卫星相匹配，更大限度地减轻装配重量，并充分提高物理稳健性。模块组件要经过设计验证测试(DVT)，从而确保符合运行要求。这些测试可能包括振动台测试，以便验证电芯极耳、焊点、隔膜和支架的结构完整性；这可确保它们能够经受住进入轨道的过程以及其他引起应力的条件。电池模组要承受这些恶劣的条件，检查是否有损坏，并重新测试以确保其功能正常。

电池测试挑战

电池包对任务的成功起着至关重要的作用，而实现理想设计对于避免潜在问题和确保项目成功也十分重要。地面运行、发射和轨道运行过程中所经历的大范围温度和压力变化，以及在进入轨道过程中承受的负载和振动，都会对组件的使用寿命和性能产生重大影响。为确保电力储存系统在部署过程中持续发挥作用，需要进行全面的地面测试，评估各种性能参数，同时仿真太空和发射过程中的恶劣条件。这通常涉及热真空测试室、冲击/振动台和辐射测试。虽然这些测试是所有空间受限组件的标准测试，但与电气系统其他部分中的固态组件相比，电池在循环和使用过程中还面临性能下降的问题。电池设计和测试团队必须努力更大限度地降低成本、重量和尺寸，同时充分提高性能。在严格的时间和航天器寿命要求下，测试团队要确保电池包每次都能可靠运行并安全失效。这些团队必须根据以下要求验证其设计：

- 安全 - 电池必须在所有指定的运行条件下保持安全。发生故障时，无论是由制造缺陷（如电芯故障或焊接不牢）引起的，还是由于电池损坏引起的，它应能从容应对所有故障模式。
- 性能 - 电池必须满足性能设计目标，包括充电时间、峰值能量传输速率和整个生命周期的热稳定性。
- 寿命 - 电池应在预期使用模式和任务持续时间定义的循环周期内保持特定容量（例如，在2,500次充电循环后保持至少80%的原始容量）。

由于电池的特性，需要大量重复的测试单元来进行长期测试，这导致难以加速测试过程。这给系统、测试实验室和由此产生的数据的管理带来了一定困难。测试需求的不断发展增加了封闭式、依赖于供应商的测试系统在产品上市时间和成本方面的风险。

大多数电池使用液体电解质来促进电化学反应和储存电能。这些电池的物理结构非常复杂，既包含阳极和阴极，又包含液体电解质。这种设计能更大限度地增加表面积，防止电极短路，同时能够承受随时间推移的老化、循环老化和不断变化的太空运行环境的影响。由于这些因素，需要在电芯的整个生命周期内进行大量测试，直至达到失效点。在电池实验室中，经常可以看到经过十多年测试的电芯。鉴于对地静止(GEO)卫星可以运行数十年，因此对电芯进行全面测试也就不足为奇了。

GEO卫星可以无限期地留在轨道上，而近地轨道(LEO)卫星在脱离轨道之前的寿命要短得多（通常为7-10年）。由于LEO卫星的任务持续时间较短，并且通常在星座内大量部署，因此必须缩小测试覆盖范围以满足产量的需求。然而，LEO卫星的生命周期较短，卫星数量庞大，需要加快开发周期，因而带来了新的挑战。针对这些挑战，更智能的测试策略可利用测试数据见解来重点关注关键和统计故障模式。

电池组件测试方法

通过在验证和生产测试生命周期内复用设备和测量IP，使用软件定义仪器可以降低总体测试设备成本。软件定义仪器可提高测试的灵活性，一台设备就能实现多种功能，或者可实现整个组织的硬件标准化。此外，软件定义仪器可轻松实现测试自动化，从而更大限度地减少人工测量，并支持不断增长的产量。凭借这种灵活性，团队可以根据电压、电流、功率和定时要求选择硬件，其余的仪器行为则可以通过软件定义。例如，源测量单元(SMU)可作为电压源或电流源，通过软件控制进行各种测量。PXI模块的定时和同步功能有助于实现波形生成和采集等高级功能，从而进行复杂的测量，如电化学阻抗谱(EIS)、循环测试(库仑计数)和交流内阻(AC-IR)。通过更换软件，同一台仪器可以在不同的测试方法之间切换。除了参数测量功能外，这些仪器还可以使用VeriStand等硬件在环(HIL)软件运行仿真，使用LabVIEW和TestStand等工具执行自动化测试。

电芯测试/测量

评估EPS储能能力的第一步是对单个电芯进行鉴定。在鉴定测试中，特定电芯和化学成分在组装成电池模组或电池包之前，需要经过系统设计或筛选鉴定。此类测试涉及各种参数，包括：

- **开路电压(OCV)** - OCV是最基本的测试方法，可根据具体的测量要求使用各种仪器进行测试。常用仪器包括数字万用表(DMM)，因为它具有出色的精度和隔离能力，尤其是在测量大型电池组时。虽然数字万用表可以支持高密度配置，但它通常与开关结合使用来提高仪器仪表密度。在精度不是主要考虑因素的情况下，信号调理DAQ(SC Express)等替代仪器可能更合适，因为它们可以在保持隔离的同时进行同步测量。OCV具有多种用途，包括确定电芯的充电状态(SoC)、识别潜在的电芯问题以及监控电芯的长期性能。OCV测量是一种非破坏性方法，可在未连接负载的情况下测量电芯的电压。由于在锂电池中OCV的放电/充电曲线相对平坦，因此很难基于OCV判断SoC。事实证明，对于电芯、电池模组或电池包而言，电荷计数通常更可靠，可准确地确定SoC。
- **容量** - 对电芯、电池模组或电池包进行容量测试时，需要使用拉电流/灌电流对待测设备(DUT)进行充电和放电。现代锂电池的容量测试通常使用恒定电流充放电曲线来测试大部分容量，仅在充电/放电过程的最后几个百分点转换为电压控制。容量量化为充电/放电时间内电流或电压的积分，可通过执行测试的应用软件计算得出。总容量通常以瓦时(Wh)或安时(Ah)表示，放电率通常表示为相对于电芯/电池包容量的比率。例如，在1 A下测试的1 Ah电芯称为1C倍率测试。由于充电和放电速率取决于DUT的整体容量，因此功率要求可能会有很大差异。例如，单个电芯可能需要约5瓦特的测试能力，而大型电池包则可能需要数千瓦的测试能力。根据DUT的功率要求，测试可使用PXI SMU、RMX源/负载或NH Research (NHR)的大型再生电源，分别进行电芯、电池模组或电池包测试。

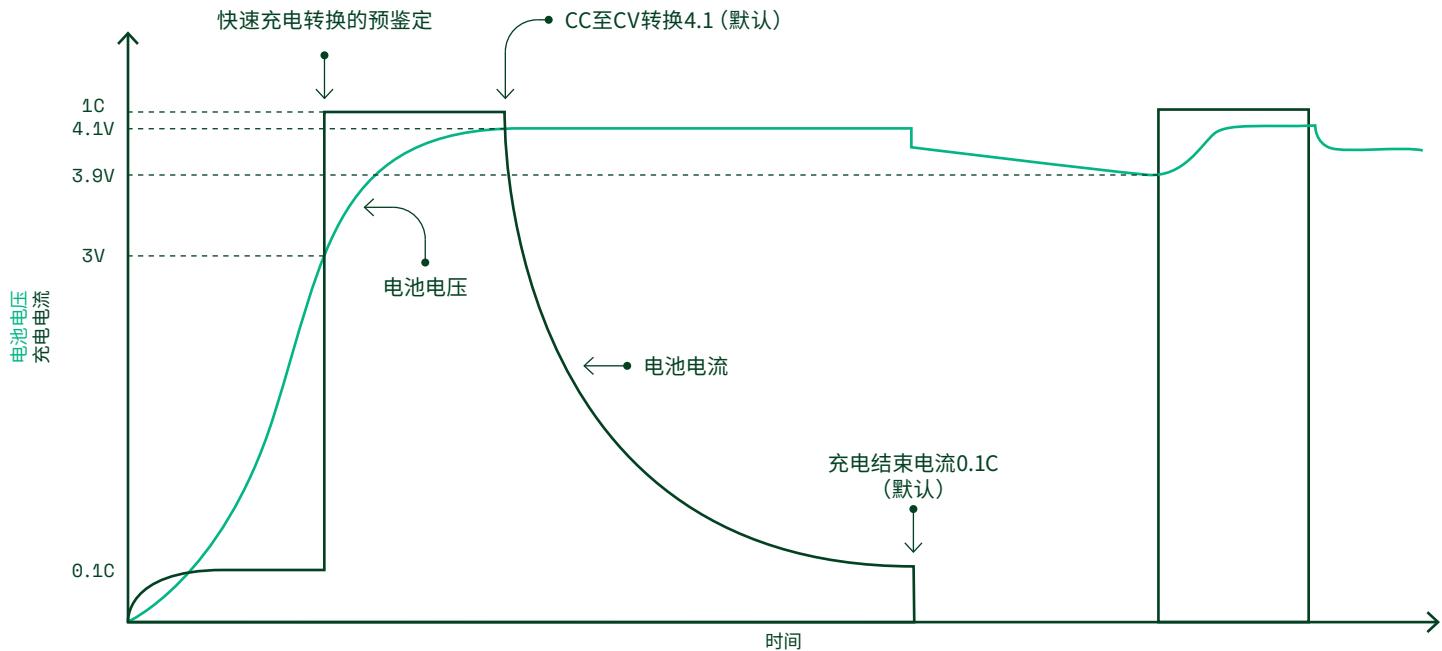


图02

充电曲线示例

- **循环寿命** - 循环寿命是指电芯在性能下降到可接受的限度或失效之前可经历的充放电循环次数。循环寿命测试包括分析电芯在不同条件下重复循环时的容量。通常，循环寿命是指在特定的放电深度(DoD)和速率下，达到原始容量80%所需的循环次数。
- **压降分析** - 压降分析检查电芯以特定速率放电时产生的压降大小。团队可根据测试装置的功率要求使用各种负载，如PXI SMU、RMX电子负载或NHR再生电源。为实现精确可靠的测量，必须为负载配置远端感应功能。[远端感应](#)可补偿测量导线上可能出现的压降，从而确保电压测量的准确性。
- **AC-IR** - AC-IR分析提供了一种非破坏性的方法来评估电芯的运行状况。该测试包括向电芯施加微小的交流电，并测量由此产生的压降。通过匹配电芯来组装电池模组或电池包时，AC-IR尤为重要，因为参数相似的电芯可以均匀地分配负载，从而提高循环寿命和整体性能。通常，该测试在电芯级别进行，所需的功率电平相对较低。SMU非常适合执行这些测量，因为它们可以生成各种电压/电流波形，同时精确测量相应的响应。然后，根据对这些波形的分析，使用欧姆定律确定内部电阻。
- **电化学阻抗谱(EIS)** - EIS包括分析施加到电芯的正弦电压激励的频率响应。对由此产生的电流响应的相位进行研究，可以揭示电芯的电化学特性。EIS可用于电极退化、电解质变化和电解质-电极接口现象检测的研究、开发和质量控制，这些方面可能会影响电池的性能和使用寿命。虽然EIS通常用于电芯研发，但它也可作为电芯生产中的有效筛选测试。EIS测量通常使用阻抗分析仪等专用设备。但是，NI的SMU能够生成和采集待测电芯的波形，因此可以提供等效的测量。NI的软件定义仪器方法扩展了现有硬件的测试功能，无需额外的专用设备即可进行EIS测量。EIS可生成奈奎斯特(Cole-Cole)图，该图显示系统在不同频率下的阻抗。阻抗是一个复数，包括电阻和电抗。借助奈奎斯特图，团队可以分析电池中发生的不同物理现象，例如电解质电阻、电荷转移电阻和扩散电阻。还可以通过分析奈奎斯特图上的电荷转移电阻来评估电池的老化程度。例如，图3A显示了对锂离子电池进行EIS测试的Cole-Cole图，频率扫描范围为1 Hz至1 kHz；图3B显示了1.1 kHz至500 kHz的高频EIS测试扫描。

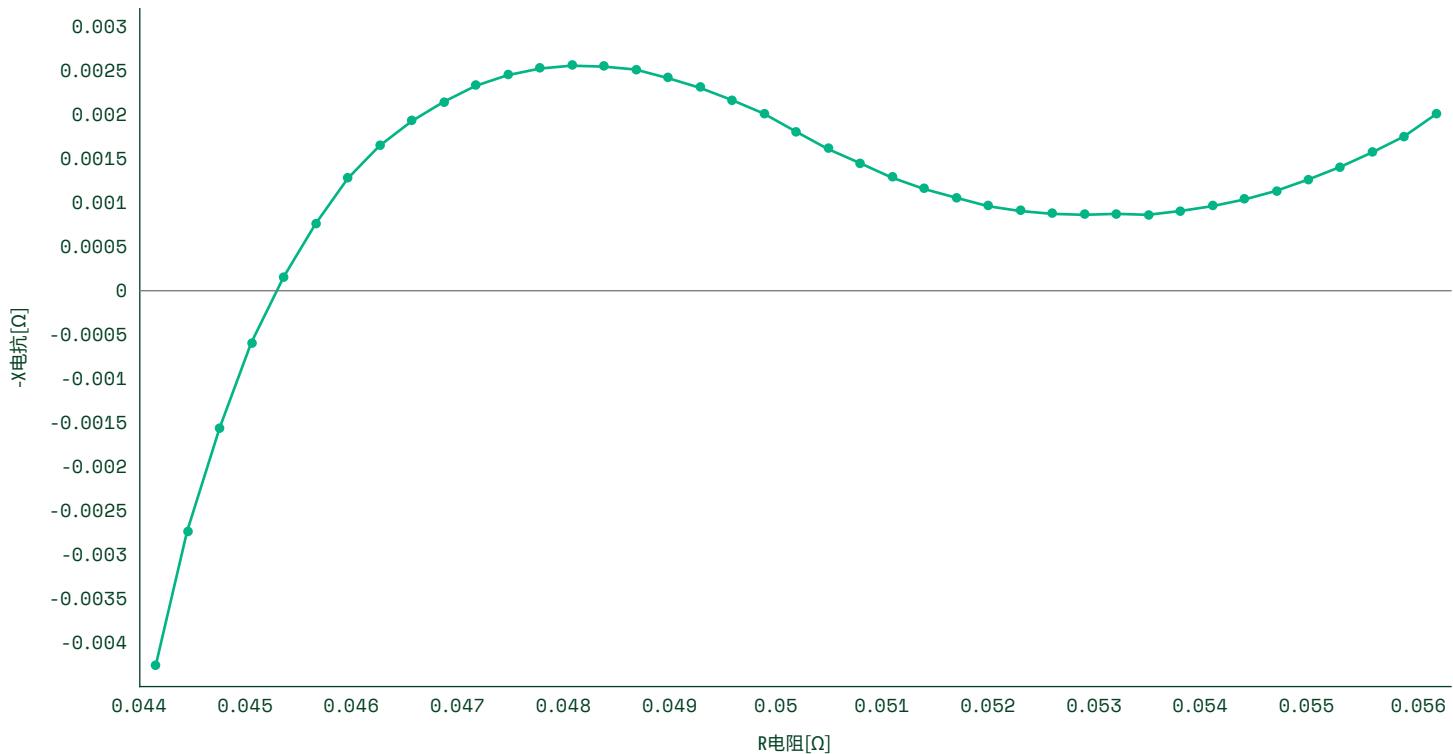


图3A

使用NI PXI仪器对锂离子电池进行低频EIS测试得到的实际Cole-Cole图。

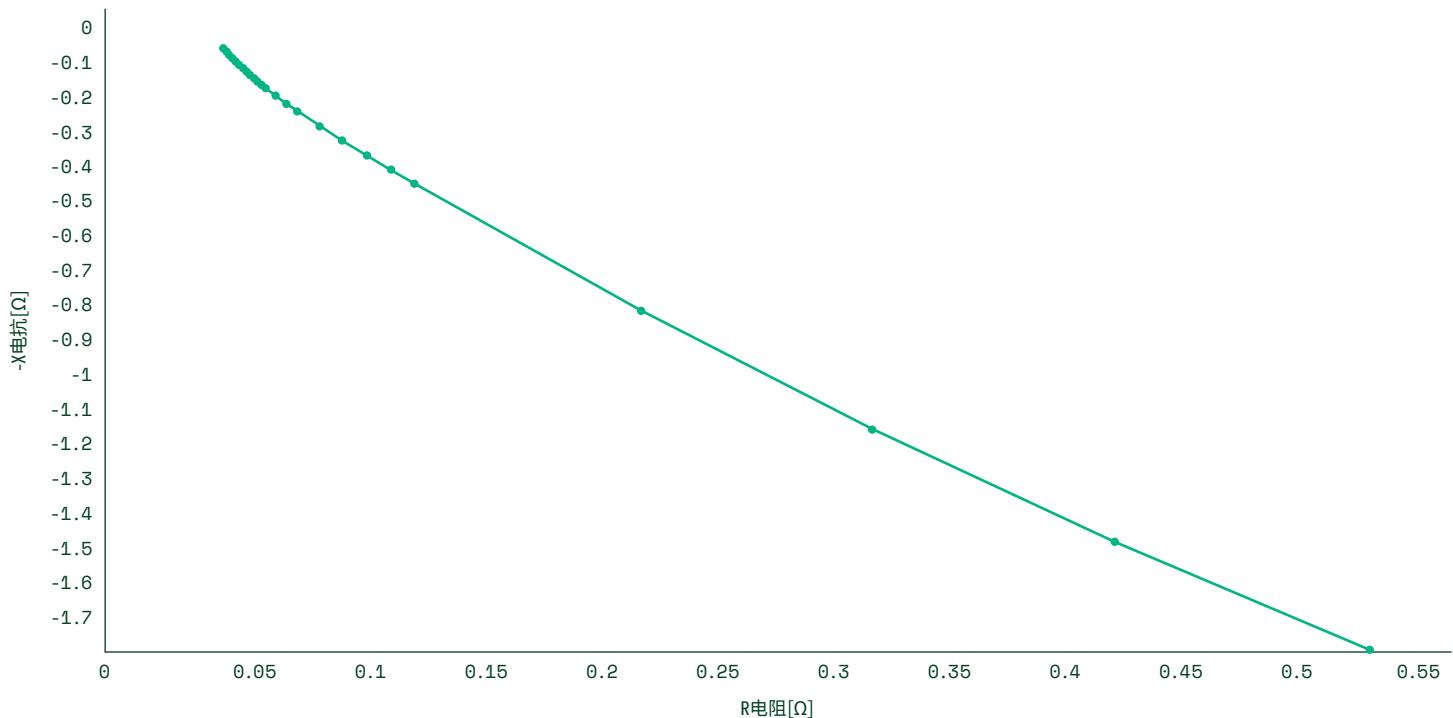


图3B

使用NI PXI仪器对锂离子电池进行高频EIS测试得到的实际Cole-Cole图。

- 故障模式测试 - 故障模式测试包括评估电池可能出现的各种故障模式。了解组件故障模式对于太空设备至关重要，因为它们一旦部署后通常就无法维修。虽然某些卫星（例如国际空间站）比其他地球卫星更易于维修，但故障带来的风险要大得多，因此必须充分了解故障模式。这些测试对于识别和降低与电池运行相关的风险至关重要。用于测试的几种主要电池故障模式包括：
 - 过度充电/过度放电 - 尽管BMS的设计旨在防止这些故障模式，但如果其他系统发生故障或电池达到其循环寿命结束，剩余容量不足以完成预期的任务，仍可能会发生过度充电或过度放电的情况。测试电池对过度充电或放电情况的响应至关重要，因为这些情况可能导致各种不利影响，例如性能下降、容量损失、损坏（例如，由枝晶形成引起的短路）、故障或安全隐患。过度充电和放电情况场景的受控仿真有助于分析电池的行为并评估其保护机制的有效性。
 - 热失控 - 在太空应用中，由于真空环境中不存在自然对流，热管理变得更加复杂。为了应对这一挑战，团队必须仿真和分析电池如何应对高温和热量积聚。热失控测试将电池置于高温条件下，以观察电池的热稳定性、排气特性以及潜在的起火或爆炸风险。
 - 内部短路 - 评估电池承受和减轻内部短路的能力，包括在电池内部故意引入短路，以评估其安全功能，例如热熔断机制和内部保护电路。
 - 机械压力测试 - 测试电池抵抗机械应力和冲击的韧性，包括评估其对振动、冲击和物理损坏的抵抗力，以确保其在实际应用中的稳健性。
 - 环境测试 - 评估电池在高温或低温、潮湿或暴露于腐蚀性物质等极端环境条件下的性能和安全性，有助于确定电池在特定运行环境中的适用性。

装配测试

单个电芯完成鉴定过程后，就会被组装成电池包。然后，电池包会通过严格的测试，以确保其符合卫星的任务要求。虽然在电芯层面进行的一些测试可以在组装好的电池包上重复进行，但仍有必要进行额外的测试，以解决组装过程中增加的复杂性和潜在的故障点。测试范围可能因具体的任务而异。在某些情况下，为了保持循环寿命或由于大批量生产的限制，可能会进行有限的测试。但是，常见的测试程序包括：

- 热管理和测试 - 确保电池包在太空中的大温度范围内有效运行至关重要。热分析通常采用建模技术，然后通过热室或真空热室中的物理测试进行验证。在整个充电和放电周期中，电池包的温度必须保持在可接受的范围内。卫星采用各种热管理策略，包括加热器和隔热罩，以保持运行温度范围。随着集成度的提高，尽管每个阶段的充放电曲线可能不同，但仍需要对EPS进行测试。无论是被动还是主动，电池包的热管理系统（利用加热或冷却）必须能够将电池包温度保持在指定的运行范围内。在此温度范围之外运行可能会导致性能下降、电芯或电池包容量降低或发生不可逆故障。
- 电池包机械结构 - 电池包必须能够承受发射过程中的机械应力和苛刻的太空条件。结构验证可确保电池包符合设计要求，并防止可能危及任务的与组装相关的故障（例如，电芯极耳焊接故障）。
- 电芯焊接 - 焊接是连接电芯的常用方法，旨在建立坚固的低阻抗连接，更大限度地提高电流容量和强度，同时保持更轻的重量。破坏性测试可评估焊接参数，而非破坏测试对于电池包组件至关重要。因此，焊点阻抗测量可作为一种有效的非破坏性评估技术。由于电池焊点通常在毫欧或微欧范围内，因此精确测量具有挑战性。为了提高测量精度，施加更高的电流有助于评估焊点阻抗。与标准数字万用表相比，使用PXI SMU（图5）进行电阻测量可提供更高的电流能力。或者，搭配使用数字万用表和外部电流源，如RMX电源（图4），可提供更大的激励电流，以提高阻抗测量的精度。无论采用哪种方法，4线测量配置均可确保引线电阻不会引入任何可能影响结果精度或可靠性的不利影响。



图04

将数字万用表与外部电流激励相结合，可实现精确的低阻抗电池焊接测量，本质上是使用两台测试设备进行大电流四线测量。

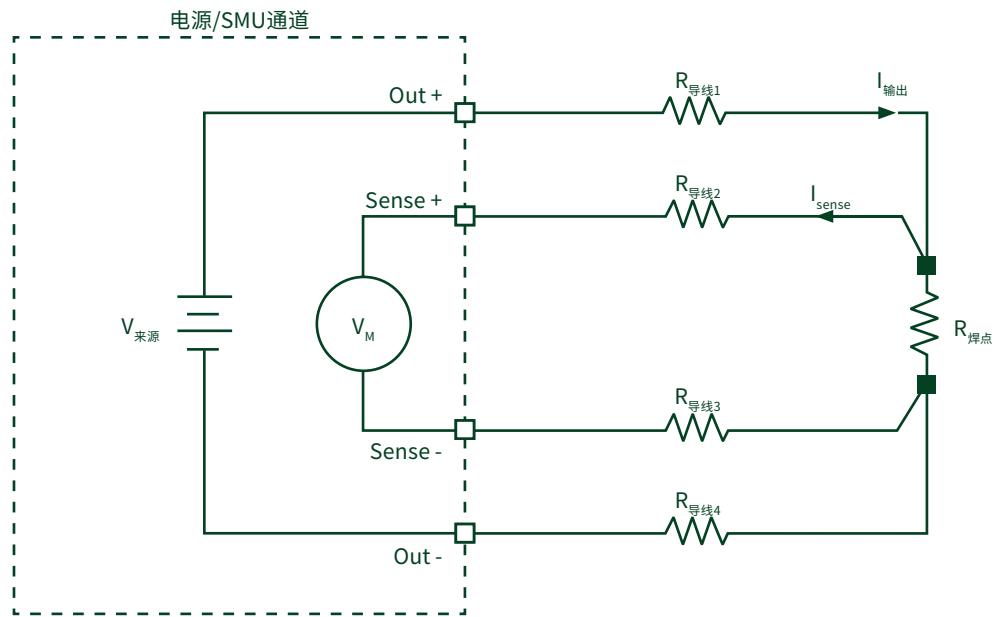


图05

配置了远端感应的SMU支持使用单台仪器执行大电流四线电阻测量。精确测量低阻抗焊点需要更高的激励电流。

- **电池包级故障测试** - 全面测试可识别潜在的故障模式并降低任务风险。根据电池包的容错能力，测试应确保电池包在发生故障（例如，电芯短路、高电芯阻抗或焊接故障）后仍能继续运行。
- **冲击和振动** - 电池包的完整性对于承受发射过程中的振动和空间碎片的潜在影响至关重要。通常，组件在振动台上进行严格的冲击和振动测试之前和之后都要进行功能测试。这些测试仿真了组件预期承受的应力水平。虽然在振动台上测试设备时执行功能测试的情况并不常见，但标准做法是监控测试过程以确保测试曲线的精度。NI提供了多种基于PC和PXI的系统，这些系统具有固定功能的即插即用DAQ设备，或可让您混合搭配硬件的可配置系统。将其与FlexLogger™软件（NI用于确认与验证测试应用的无代码数据采集软件）相结合，可监控测试过程，确保测试曲线的精度。
- **电池包组装的电芯匹配** - 在将电芯组装成电池包之前，必须分别对每个电芯进行单独鉴定，以实现出色的电池包性能和使用寿命。匹配电池包中电芯的容量和阻抗对于确保均匀的能量利用率和负载平衡至关重要。这种方法可防止单个电芯承受过大的压力，避免容量下降，并延长循环寿命，从而保持电池包的整体性能。在电芯级别进行容量和内阻测试，以收集相关数据，然后利用这些数据在电池包中策略性地定位电芯，优化电芯排列以提高性能。
- **初始电池包平衡** - 实现电池包内的平衡对于确保所有电芯对总体功率输出做出同样的贡献至关重要。虽然不平衡的电池包可能会在多个充电周期内实现自平衡，但根据BMS的功能，电池包在完成适当的平衡之前不会达到全部容量。为防止组装

后出现不平衡状态，可对单个电池进行顶部平衡。该过程可确保在组装电池包前电芯充满电并达到相同的充电状态，从而促进电池包的平衡并实现出色性能。

- **BMS通信测试** - 电池模组通常包含用于BMS的组件，这些组件至少可提供关键的电芯电压信息。电池模组组装好后，通常无法直接进入测试点以测量单个电芯的电压。因此，必须从BMS查询电芯电压。值得注意的是，BMS可使用多种标准通信协议，如SPI、I2C或UART。或者，它也可以采用自定义数字协议，这对于为空间应用设计的组件来说很常见。与BMS建立通信通常需要利用[基于FPGA的接口](#)，因为它十分灵活，特别是对于具有自定义接口的设备。但是，维护自定义FPGA实现可能很麻烦。因此，建议使用可高效处理数字通信的NI Reconfigurable I/O Module (即NI FlexRIO) 等平台。这些设备的生命周期很长，由NI管理，并提供多种编程语言的现有软件支持，更大限度地减少了对大量新开发工作的需求。

BMS测试

BMS在监控和维护电池包的健康状况以及控制其运行方面发挥着至关重要的作用。BMS的主要功能之一是确保电池包在循环过程中保持平衡，使所有电芯能够继续为系统能量容量和功率性能做出贡献。BMS功能可分为主动平衡系统和被动平衡系统。被动式BMS通常用于较小的卫星电源系统，可从具有较高电荷的电芯组释放能量，以保持电池包的平衡和理想容量，并将多余的能量通过电阻以热量的形式散发出去。另一方面，主动式平衡BMS采用额外的电路在电芯组之间主动重新分配电荷，从而确保电池包平衡和容量。主动式系统效率更高，维护电池包的能力也更强。虽然平衡维护是BMS的主要任务，但它也执行状态监控（例如，SoC、充电/放电率和库仑计数）等任务。BMS必须经过测试，以确保其能够履行相应任务职责，其中包括：

- 平衡电池包以在运行期间保持可用存储容量。
- 保护电池包免受过压、过流和欠压的影响。
- 维护状态信息，例如充电状态，以使任务系统能够正确利用储存的电能。
 - 防止过度充电/过度放电，以在任务生命周期内保持电池的性能和容量。
 - 将电池包循环限制在容量的80%，以更大限度地延长循环寿命，并为紧急能源供应留出余量。
- 检测和诊断电芯问题以方便电池包维护，包括绕过故障电芯以继续运行。

BMS功能测试的难度取决于其复杂程度。测试系统至少必须与BMS建立通信并提供仿真电芯电压。对于被动式系统，仿真电芯电压可由1象限直流电源供电，而主动式系统则需要2/4象限电源，例如SMU。此外，SLSC机箱中的特定开关、负载和信号调理(SLSC)模块与PXI测试系统相结合，也可为BMS提供仿真电芯电压。使用NI基于直流电源的SMU可对电芯电压进行精确控制和监测，以进行全面的BMS测试，而这对于实际电池包来说是不切实际的。与汽车应用相比，高压隔离在太空应用中并不是一个大问题，因为大多数高功率卫星系统的总线电压通常低于150 V (如国际空间站为120 VDC)。

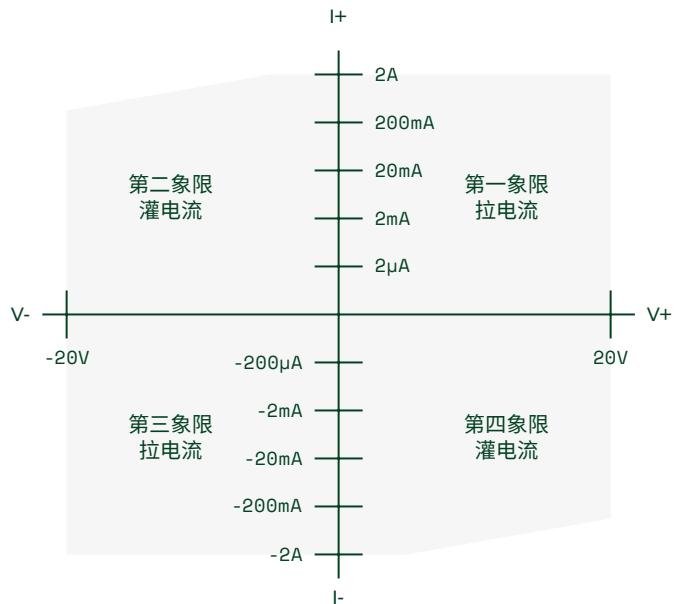


图06

简化的SMU IV运行边界

设计BMS测试系统时，有四个标准可帮助选择合适的硬件。这些标准包括：

- 被动式或主动式平衡BMS架构 - 这决定了系统是需要单象限直流电源还是需要两个或四个象限SMU来仿真电芯电压，具体取决于所采用的平衡方法。
- 电芯电压范围 - 理想的电源电压范围取决于电芯的标称电压范围，对于大多数锂电池而言，通常为2-4 V左右。
- 电池包中串联的电池组 - 考虑到电池的串联布置，了解电芯仿真所用电源的隔离要求至关重要。
- 最大平衡电流 - 确定电源的拉电流/灌电流能力对于在测试期间处理预期平衡电流是必要的。

值得注意的是，用于BMS测试的电源是软件定义的，除了用于BMS测试（例如太阳能仿真）的电芯仿真之外，还可以发挥其他作用。这些额外的要求将增加所选电源的选择标准。

例如，假设有一个被动式平衡BMS，其中有4个电芯串联，平衡电流为200 mA。为了满足这些要求，我们可以相应地设计一个系统。假设电芯的标称电压为3.6 V，运行范围为2.8 V至4.5 V，则可以选择合适的电源。在这种情况下，[PXIe-4113](#)直流电源是合适的选择。它为BMS提供了必要的电压和电流范围，其150 VDC接地隔离足以满足该BMS设计中18 VDC电池组电压的要求。需要注意的是，PXI电源为浮接电源，便于堆叠，如图8B所示。但是，应避免将直流电源并联（如图8C所示），以防止单象限电源因被迫灌电流而超出其运行范围。对于具有相同参数的主动式平衡系统，硬件选择遵循相同的标准，但需要能够在象限1和象限2中运行的电源。考虑到电芯电压(2.5 V – 4.5 V)和平衡电流(200 mA)要求，[PXIe-4139](#)是一款合适的电源。

由于PXIe-4139具有多个电压和电流范围，因此该设备的6 V/1 A范围（图7）最适合更大限度地提高该BMS示例的SMU精度。如果需要堆叠更高的电池包电压，两个电源均具有150 VDC隔离电压，最多可堆叠33个电芯。要在主动式平衡BMS测试中实现更高密度，可使用PXIe-4147或PXIe-4162等多通道SMU。不过，要考虑到这些SMU的所有通道都共用一条电流返回路径。使用PXIe-4147或PXIe-4162时，连接至SMU的电池组电压必须低于SMU最大电压的2倍，这样SMU的正负极范围才能覆盖电池组电压。当电芯数量等于SMU上的通道数时，SMU的配置如图8D所示，共享的电流返回路径位于电池组的中心，以更大限度地扩展SMU的电压范围。如果SMU的正电压范围可以覆盖电池组电压，则共享低电流返回路径可放置在仿真电池组中的任意位置。此外，如果电池组中的电芯数量少于SMU上可用的通道数，则可断开共享低电流路径，将其作为净电流为零的节点。

范围	分辨率 (噪声受限)	噪声(0.1 Hz至10 Hz, 峰间), 典型值	精度($23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) ±(电压百分比 + 偏移)		温度系数±(电压百分比 + 偏移) / $^{\circ}\text{C}$ 至 55°C
			$T_{\text{CAL}} \pm 5^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{CAL}} \pm 1^{\circ}\text{C}$	
600 mV	100 nV	2 μV	0.02% + 50 μV	0.016% + 30 μV	0.0005% + 1 μV
6 V	1 μV	6 μV	0.02% + 300 μV	0.016% + 90 μV	
60 V	10 μV	60 μV	0.02% + 3 mV	0.016% + 900 μV	

图07

PXIe-4139电压精度 (四象限电源)

虽然使用TestStand等测试序列生成器可以轻松实现具有基本平衡和维护算法的简单BMS自动化，但更高级的算法可能需要在VeriStand等工具中运行模型的HIL系统进行测试。参数测试可确保BMS测量的精度，尤其是在集成电池系统后，对单个电芯和电流路径的直接测量变得十分困难的情况下。在集成的后期阶段，通常直接从BMS查询测量结果，而不是依赖标准测试设备。BMS测量校准至关重要，虽然可以使用DAQ等低成本设备进行高级行为和功能测试，但BMS测量校准应使用SMU等高准确度/高精度的仪器进行。

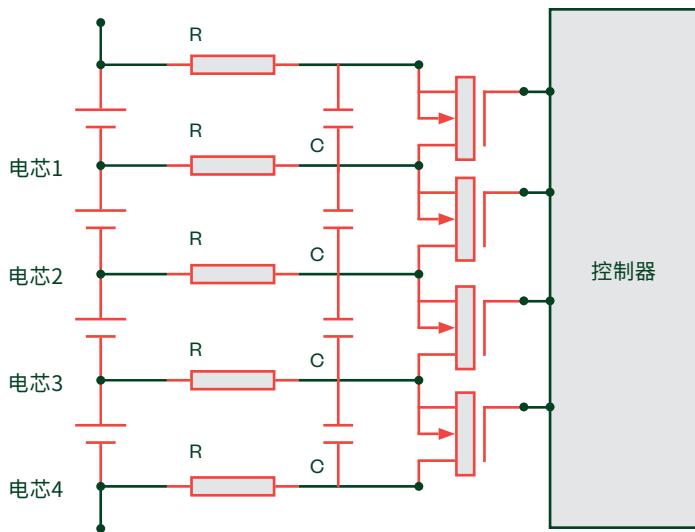


图8A

典型的被动式平衡BMS电路。

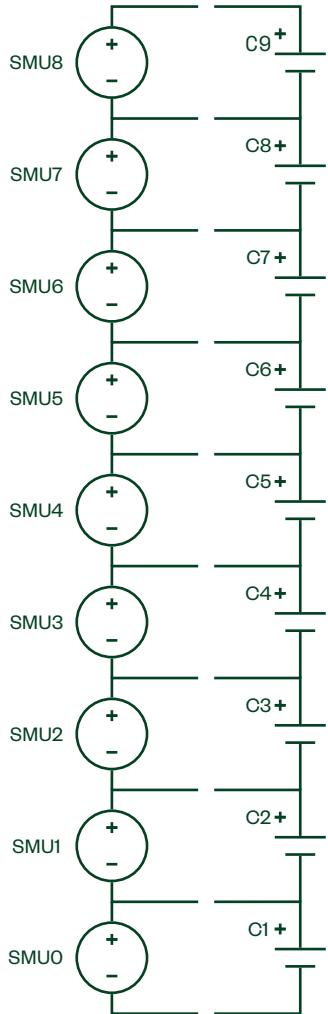


图8B

使用隔离(浮动)电源实现主动式和被动式平衡BMS的理想电芯仿真

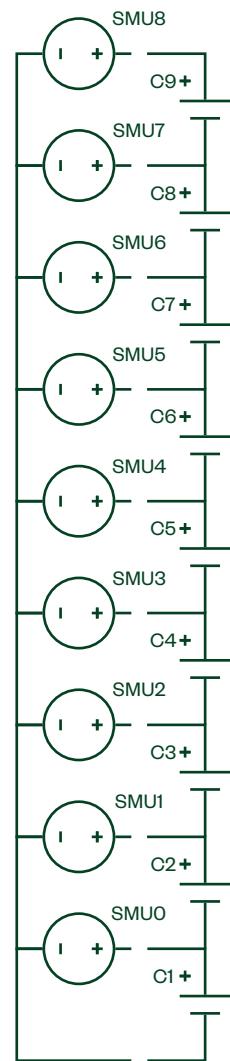


图8C

非理想配置；有将电源推到象限1外的风险

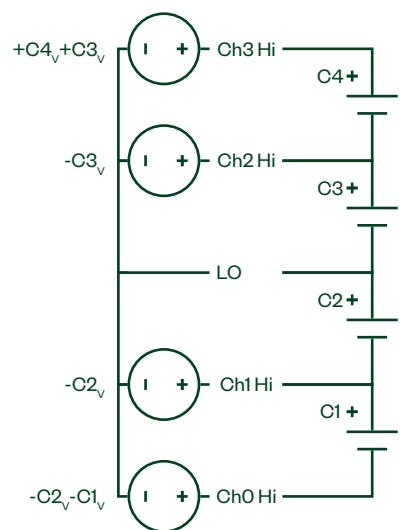


图8D

配置和连接多通道SMU，用作电芯仿真器

NI电池测试方法

NI卫星电池测试方法旨在通过使用集成的软硬件工具和测试自动化来优化组织效率，提高卫星的质量和可靠性，使工程师能够将数据作为测试策略的关键部分。使用该方法时，必须在整个产品生命周期中使用数据采集、信号调理、控制系统和自动化测试软件。目标是帮助工程师实现电池组件测试的自动化，加快组装、集成和测试(AIT)，并将测试活动提前到开发过程中。通过将数据管理和分析纳入卫星组件和子系统的测试，更轻松地在开发周期的早期阶段发现和解决问题，同时提高成本效益。NI提供了一个全面的解决方案，可简化测试流程、保证质量和可靠性，并最终帮助卫星制造商节省时间和成本。

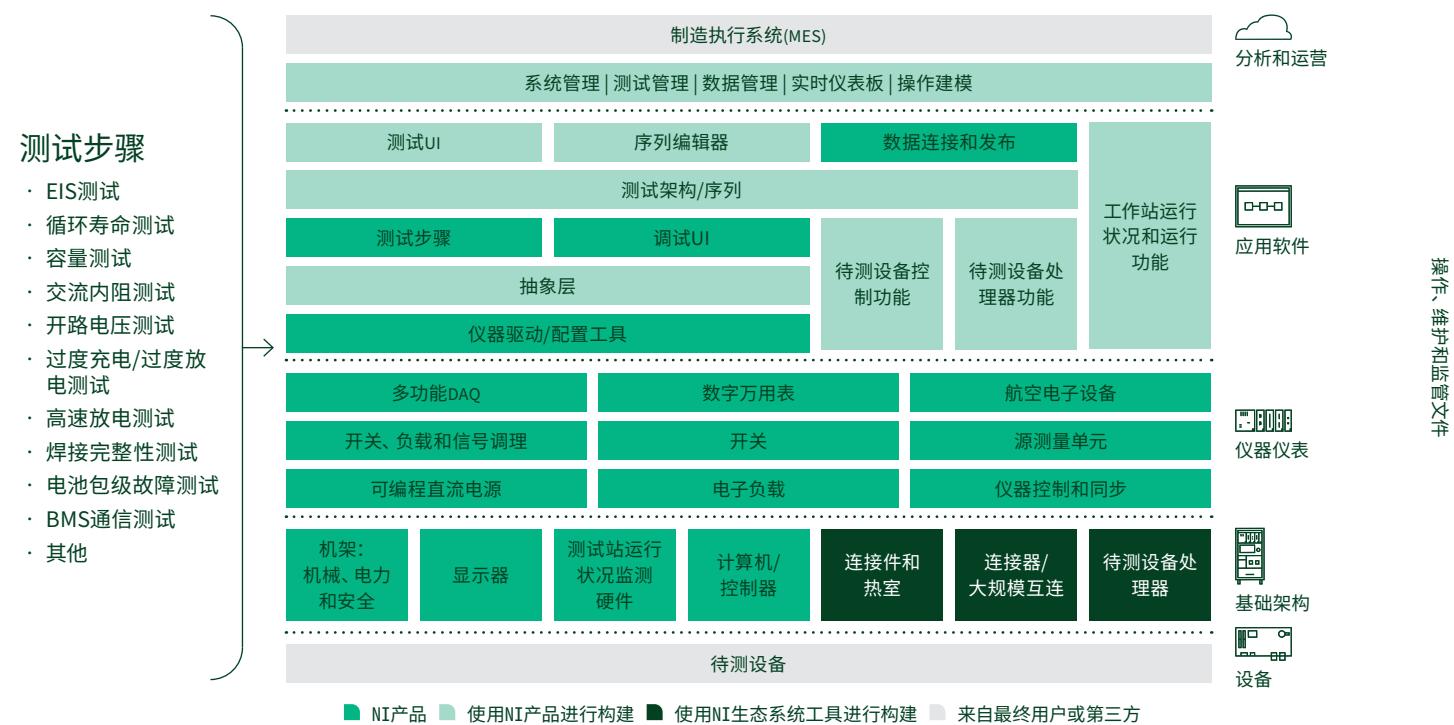


图09

NI卫星电池测试方法

NI提供一整套用于测试卫星电池的电池测试解决方案。凭借NI在数据采集、自动化和可视化方面的专业知识，可利用NI的解决方案在开发的各个阶段（从早期原型验证到最终鉴定）测试电池。

NI的电池和BMS测试解决方案包括：

- 模块化和可扩展I/O - 添加测量通道，以最小的每通道增量成本进行扩展，并快速添加混合测量。
- 可扩展的电源选项 - 在卫星总线电压范围内访问各种功率包络覆盖范围。
- 室内测量 - 使用坚固耐用、同步、IP防护等级的测量模块和热室控制执行温度和湿度测试，以及应变、电压、电流或振动等其他待测设备测量。
- 数字接口通信 - 集成数字待测设备控制通信标准和自定义协议，以满足特定应用的需求。
- 企业管理 - 创建定制的数据仪表板，为合适的人员提供合适的信息，以采取合适的措施，更大限度地提高利用率，延长正常运行时间，监控测试系统，并管理测试设施资产。
- 系统仿真 - 使软件开发与硬件可用性脱钩，在没有设备在场的情况下验证测试脚本，从而加快开发速度并降低系统部署风险。

应对卫星电力系统的复杂测试挑战：储能

BMS测试配置示例包括电芯仿真和与待测BMS通信的数字接口。电芯仿真和数字接口仪器依赖于BMS。典型的BMS测试配置如图10所示。

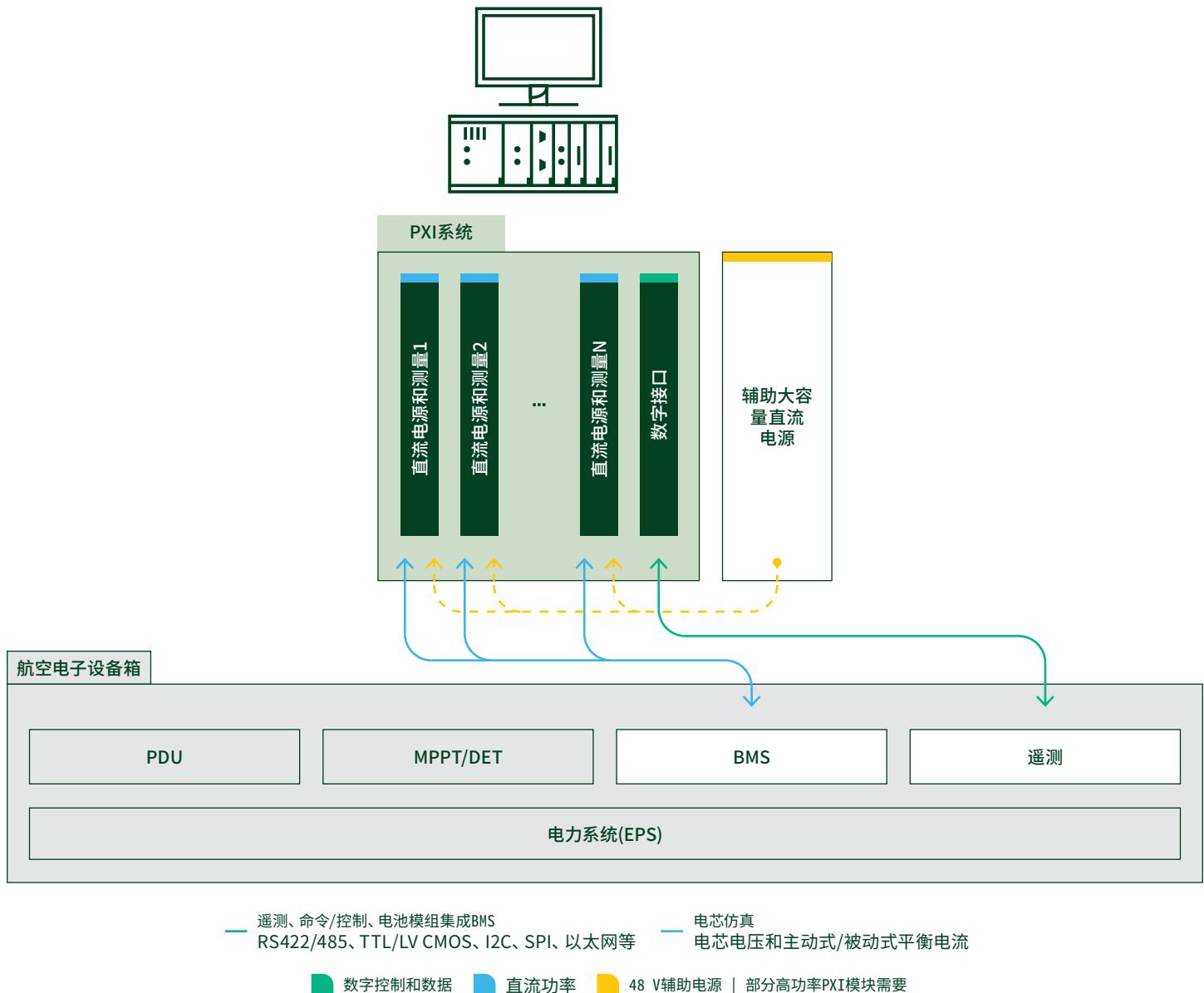


图10

这个基于PXI的BMS测试配置带有用于待测设备通信的数字接口，左侧组通过SMU提供四通道主动平衡，右侧组提供12通道被动平衡配置。

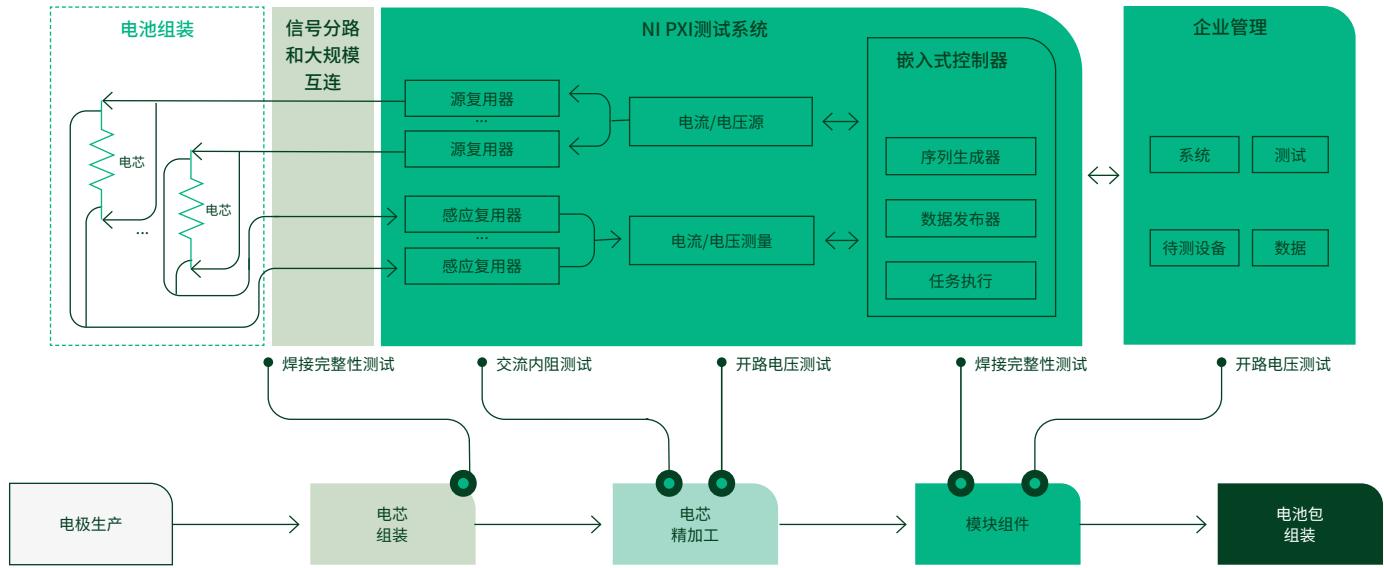


图11

电芯和模块解决方案

根据您的测试需求，从多种解决方案中进行选择：

- PXI 提供超紧凑的高性能组成结构，可容纳更多测试并扩大生产量。
- SMU 为 AC-IR 和焊接完整性测试提供可重复且精确的测量和电流源。
- 可编程电源和电子负载设备提供直流电源和电源接收功能，用于仿真和鉴定卫星总线。
- 数字万用表可为 OCV 和焊接完整性测试执行快速、精确的电压测量。
- NI 的多路复用器可根据测试类型有效地将系统扩展到 32 或 64 个通道，在较小的占用空间内尽可能实现更大范围的覆盖。
- SLSC 模块与 PXI 测试系统相结合，可仿真 BMS 的电芯电压，并提供各种传感器仿真选项。
- 数字航空航天接口支持通用和高速接口，以及卫星中常见的定制专用接口。
- CompactDAQ 硬件提供同步的混合传感器测量监控。
- 与 TestStand、Switch Executive 和 SystemLink™ 等测试软件直接集成，用于企业数据和系统管理。

NI电池测试解决方案的优势

- NI电池测试解决方案具有多种优势，包括：
- 测试速度可满足产量的要求，具有超高精确度和控制能力，适合长时间的测试运行
- 使用SMU、DMM和高速多路复用器，实现经济高效、精确且吞吐率高的PXI配置
- 每个系统可根据测试类型从32个通道扩展到64个通道，且占用空间小
- 测试执行和洞察力收集可延长正常运行时间、监控测试资产并执行抢先式测试站维护
- 服务计划可确保充分提高设备的可用性和延长正常运行时间

结论

卫星电力系统的复杂性不断增加，迫使工程团队在满足日益紧迫的进度预期的同时，提供更加复杂的测试系统。这种压力来自于制造业市场日渐加剧的竞争，各方均力求以更低廉的成本提高运营效率，因为只有这样，企业才能摆脱被动迎战的尴尬局面，从而独占市场鳌头。为了应对这些压力，优秀的工程团队纷纷使用可复用的COTS组件框架来实现测试方法标准化。这不仅有助于加快开发速度，还能确保在未来按需扩展。

NI一直以直接方式或与集成商合作伙伴合作的间接方式竭诚服务于各类制造商，稳立测试行业龙头地位长达40多年。NI电池测试解决方案为测试卫星电力系统测试提供了一种全面而灵活的方法。这些解决方案可确保正确测试卫星组件和系统，并确保结果可靠。NI的平台测试方法将高性能仪器仪表与测试开发、序列生成和管理软件工具相结合，可满足规格、产品上市时间和预算要求。让NI帮助您实现流程、系统、软件和数据基础架构的标准化，为分析等数字化技术奠定坚实的基础，从而充分利用数据来提高产品性能和运营表现。

