

王 之 HIL

适用于露天矿山的电气化
自卸卡车的硬件在环测试



中国三一集团的 SET230 自卸卡车最多可承载 230 吨的有效负荷。其柴油机电力传动和 dSPACE HIL 仿真器可提供最大效率 – 前者用于重型运输，后者用于开发和验证复杂传动控制。



您

是否曾见过多层公寓建筑物实现 20% 坡度的爬坡？如果没有，您肯定应该去看下大型露天矿山。在如今的矿山中，自卸卡车通常达到小型住宅大厦的尺寸，而且可轻松负载数百吨的总重量。尽管质量巨大，这些巨人在粗糙而陡峭的地形始终安全移动，而且相比过去非常高效。其中一个贡献因素是柴油机电力混合传动，它已成为此量级的自卸卡车的市场标准柴油机电力混合传动使用带电子逆变器的发电机，生成推进功率，用于驱动后轴的两个三相电机。此设计从柴油电机到传动轴没有耐用的传动轴，使得完全可在没有手动变速器、机械耦合、差速器和传动轴的情况下工作，而这可大幅降低车辆的重量和维护成本。但是，为了在矿山重型使用期间保证高效率和安全，此传动概念需要电气组件高度复杂的控制策略。

基于模型到新尺寸

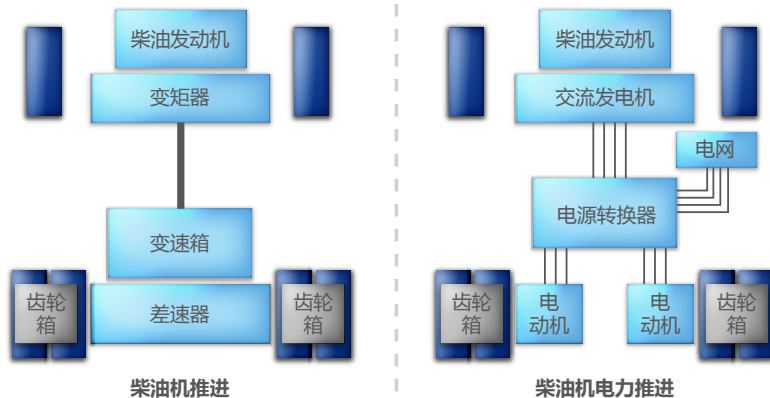
中国三一集团的工程师们在有所突破的情况下也必须面临此挑战，同时开发 SET230 自卸卡车（技术数据见下表），从而一次面对两个问题。一方面，卡车 230 吨的巨大有效载荷意味着公司需要瞄准全新尺寸。另一方面，工程师们仅具有柴油机电力传动技术的基本经验。正因为如此，三一将目标定为使用仿真来测试和验证大部分控制开发。

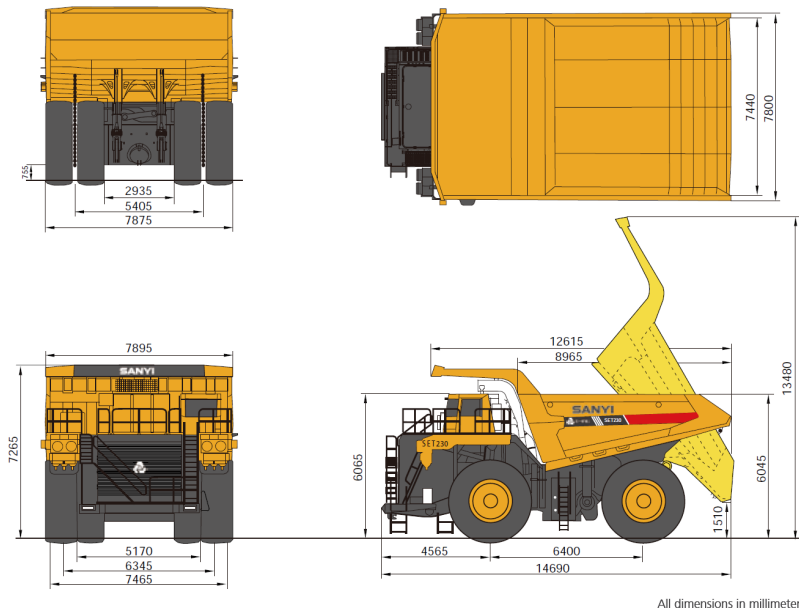
虚拟车辆仿真的交钥匙系统

三一并不是在大型实验室中测试实际电气组件，而是决定借助交钥匙 dSPACE Simulator Full-Size 仿真 SET230 整个传动系统。这允许在实施电子控制单元 (ECU) 后，立即随整个“虚拟”车辆一起测试和验证新开发的控制。因此，工程师能够优化测试台架上已有的控制策略。这就完全不会危及安全，从而可减少使用实际卡车原型执行昂贵跟踪测试的需求。

>>

相比传统柴油机供电矿用卡车（左图），SET230 等柴油机电力车辆从柴油发动机到传动轴无需耐用的传动轴（右图）。因此，车辆重量和维护工作均大幅减少。





最大爬坡能力	24%
连续爬坡能力	12.5%
最大下坡能力	-14%
连续下坡能力	-13%
最大车速	64 km/h
电力驱动系统的重量	45 t
最大有效负荷	230 t
允许的最大总重量	400 t

三一 SET230 的技术数据：对于重量高达 400 t 的车辆，柴油机混动自卸卡车可提供令人印象深刻的传动性能，甚至在粗糙地形也是如此。

强大而灵活的仿真器

三一的 HIL 仿真器使用 DS1006 处理器板，而这正是由于其四核处理器的高性能，此板甚至可实时计算最复杂的仿真模型。此处理器还提供在各种功能测试中将其不同的计算任务分配

给各个核心的能力。对于信号级别的信号处理和基于处理器的电动机仿真，三一依靠 dSPACE 电动机 HIL (EMH) 解决方案（基于两个 DS5202 FPGA 基板）。另一方面，此解决方案测量 ECU 高速的电动机特定信

号，如电力电子的脉宽调制控制信号。另一方面，它将生成用于控制电动机的旋转编码器信号。dSPACE 准确根据三一具体要求对信号进行调理，因此使用高达 ± 600 mA 的反馈信号仿真该传感器的输出。为了测试与其他车辆系统的 CAN 总线通信，三一使用两个 DS2202 HIL I/O 板，从而允许其工程师方便地使用 RTI CAN MultiMessage Blockset 执行 restbus 仿真。

建模到最后细节

除了用于仿真的强大而灵活的硬件，三一还致力于创建其自卸卡车的最精确模型，以及尽可能复制其异常苛刻的工作环境。由于使用 MATLAB®/ Simulink® 的离线仿真需要负责这两个方面，三一还决定实施范围广泛的 dSPACE Automotive Simulation Models (ASM)。这些模型已无缝覆盖倾斜卡车的所有技术领域，或者可以调整来满足它们，而且无需大量时间和工作。为了仿真柴油机电力系统，使用的一个组件是 ASM Engine Basic 模型，此模型已可复制柴油发动机的所有必要参数。对于传动的各种电气组件，除了几种自定义模型，三一主要依靠 ASM Electric Components (ASM EC) Library，并且单独调整其中一些组件来满足特殊应用要求。其中，这些组件包括发电机单独激励的同步电机（修改后的 ASM EC）、逆变器 (ASM EC)、整流器、中间电路 (ASM EC)、制动电阻器和两个异步鼠笼式牵引电机 (ASM EC)。这些仿真模型几乎完全使用 ASM Vehicle Dynamics Library 参数化，它包含了所有纵向和横向动态影响因素，覆盖了从减速齿轮到轮胎、转向系统、

“由于我们在 HIL 仿真器和 ASM 工具套件方面具有丰富经验，因此我们会将更多 dSPACE 工具集成到我们的工具链中。”

Lu Liling, 三一集团项目工程师

制动器和悬架等。需要在建模和参数化中额外集成的唯一方面是自卸卡车各种有效载荷状态的影响，从空车直至完全 230 吨有效载荷的最大利用率。ASM Vehicle Dynamics 中已包括的环境模型也允许准确复制倾斜卡车经过的具有挑战性的地形轮廓。这涵盖 SET230 传动系统各种各样的需求，从短距离的向上推举到爬陡坡，再到长下坡的连续工作等。

直观的参数化，清晰的可视化

为了直观调整模型参数化和和管理其广泛的参数集，包括定制组件，三一依

靠 dSPACE ModelDesk 的图形用户界面。可视化软件 dSPACE MotionDesk 也有用处。MotionDesk 说明了使得参数更改效果实时可见的逼真 3-D 在线动画中的所有结果，包括仿真各种驾驶行为和情景。三一工程师在 dSPACE ControlDesk 中执行整个操作和记录测试数据。

快速为操作做好准备

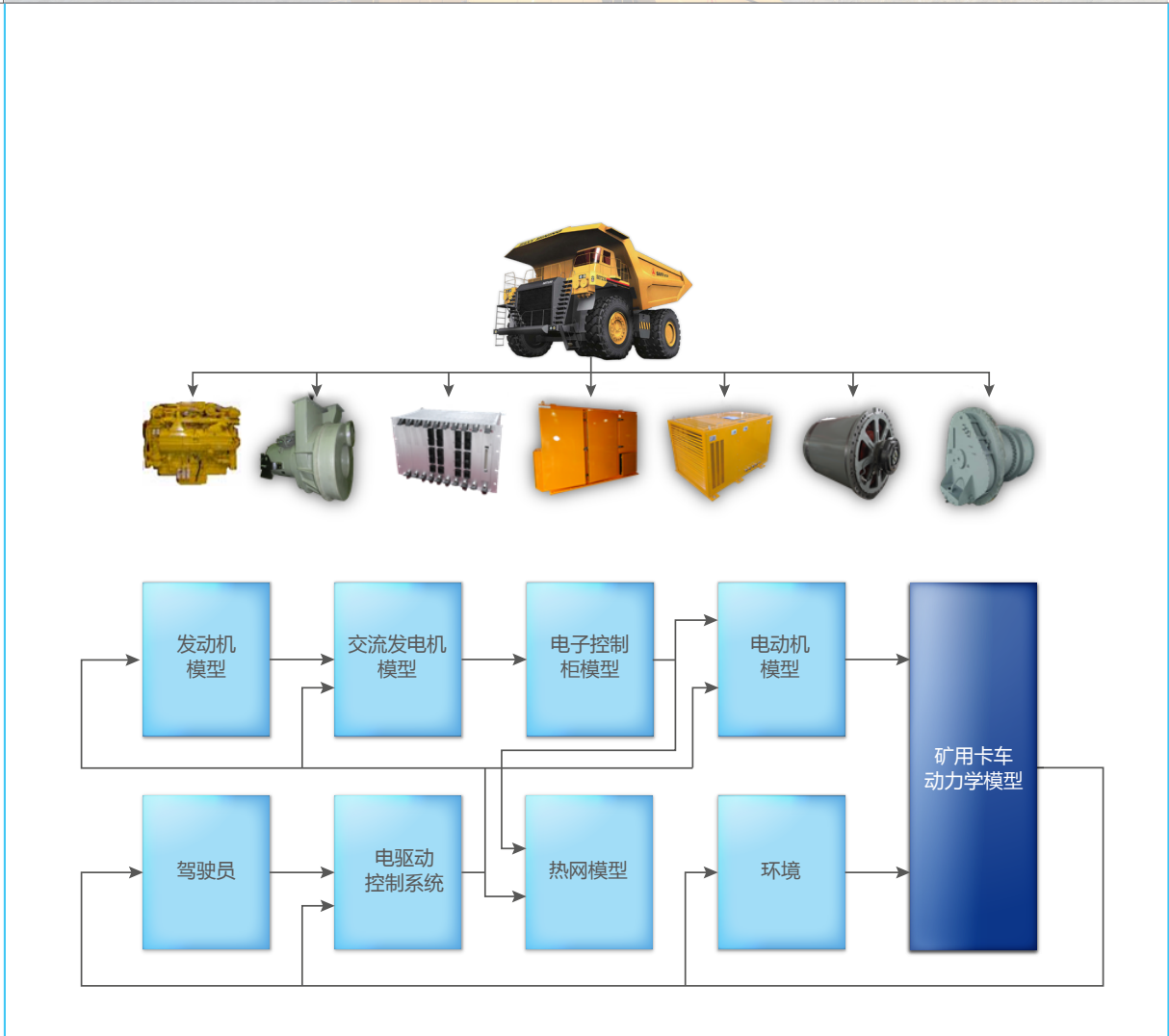
SET230 的 HIL 仿真器由 dSPACE 工程团队开发，以及所有其硬件和软件组件也是。他们与三一一起修改、实施、编程和测试仿真器，并以交钥

匙方式交付用于上海现场操作。收到订单和调试系统之间仅有八个月，因此三一能够开始按计划开发 SRET230 的电动机控制。通过使用基于模型的方法和 dSPACE 高效而多功能的工具，工程师成功保证进度，同时实施所有开发步骤、测试基本控制策略以及在上海现场验证它们。流程结束时的成果是电动机控制具备最大可能的效率和可靠性。通过使用 dSPACE 工具，实验室的开发时间和车辆的校准时间都大幅缩短，从而也显著降低成本。此外，三一能够在很大程度上扩展自身在电气化动力系统

>>

虚拟车辆：交钥匙 dSPACE Simulator Full-Size 可复制整个传感器系统（右侧）和执行机构组件（左侧）。这让三一工程师可在早期阶段就测试基本控制策略以及其他车辆组件，而无需进行任何昂贵的实际自卸卡车试驾。





范围广泛的模型参数：从柴油电机到电力传动、操作员和环境组件，众多因素流入自卸卡车的车辆动力学模型。

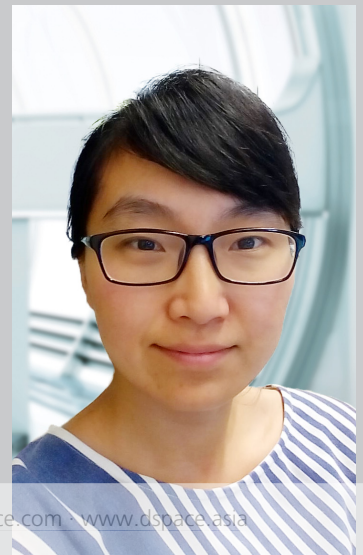
方面的经验范围。其新经验已用于建立积极性很高的全新开发人员团队。在使用 HIL 仿真器和 ASM 模型成功开始后，三一正计划在其工具链中集成更多 dSPACE 工具，包括测试自动化软件 AutomationDesk、生产代码生成器 TargetLink® 和数据管理工具 SYNECT® 等产品。现在三一的

SET230 在重型柴油机电力传动自卸卡车细分市场已取得突破，因此他们还计划将来凭借甚至更大的挺好扩展自己的地位。因此，“可移动公寓建筑物”很有可能很快会增加几层。■

Lu Liling, Qi Lie, 三一集团

Lu Liling

Lu Liling 是中国上海三一集团的 SET230 矿用卡车开发团队的一名工程师。





清晰可视元素：在 dSPACE MotionDesk 中，三一工程师可在清晰 3-D 在线动画中复制在 HIL 系统中仿真的行驶机动和情景。这让他们可实时可视化参数变更的效果。

Qi Lie

Qi Lie 是中国上海三一集团的 SET230 矿用卡车开发团队的一名工程师。



自豪的开发人员：直观的 dSPACE 工具不仅帮助三一大幅简化和加速自卸卡车的开发和测试。这些工具还帮助他们总体上更好地了解电气化动力系统后面的技术。其新经验将用于建立高素质的开发人员团队。