

高速列车受电弓测试台架的高度动态性控制

在 300 km/h 的时速下

# 保持 供电

电力轨道车辆即使是在最高速度下也决不允许失去供电，但是轨道车与架空接触网之间的复杂作用对受电弓的标定产生了巨大挑战。因此，维也纳技术大学 (TU Wien) 和西门子 (Siemens) 正在开发一种新的测试台架，以便将部分常用测试转移到实验室中进行。而他们使用的就是来自 dSPACE 的工具。



**现** 在的轨道交通速度正在不断加快。例如，现代车组的车速达到 300 km/h 已不再困难，但对于供电，挑战仍然存在。受电弓与架空线路之间的动态作用尤其重要。这种弹性连接系统容易产生振动，特

别是在高速情况下。如果接触力过小，受电弓将与线路分离而产生电弧，对碳滑板造成电气磨损。如果接触力过大，会增加机械磨损，并导致架空线路和碳滑板承受很高的动态负载。不同的轨道电力系统、架空线路设备和国家/地区规范会带

来其他挑战，特别是在国际轨道交通当中。因此有越来越多的现代高性能受电弓可以被控制用来主动优化接触力，即使是在高速的情况下。迄今为止，复杂的动态仿真虽然可以支持这些开发和机电设计，但是无法替代成本高昂的测试过程。因此，受电弓制造商西门子在开发合适的控制器时，尽早使用了真实受电弓的动态硬件在环测试。在这些测试当中，真实的受电弓作为被测单元，与虚拟架空线路相连。这样，西门子就能将真实测试结果与实验室开发的优势（例如可再现性）相结合。由于架空线路的动态性，很难准确描述其动作并与被测单元之间建立正确的连接。但是，如果能够对这些任务进行高质量的掌控，则此类测试台架就能以虚拟测试的形式执行快速且详尽的测试，并帮助开发人员更好地了解轨道上受电弓与架空线路的动态互动。进而使测试台架有助于在新开发车辆的测试和评估阶段中减少耗时耗力且昂贵的现场测试次数。

### 测试台架上的高度动态性

通过与西门子合作，维也纳技术大学 (TU Wien) 机械与机电研究院对现有高动态受电弓测试台架进行了增强，使其现在能够实时仿真受电弓与虚拟架空接触网的复杂互动。这意味着可以在虚拟测试中对实际受电弓进行真实、可再现的测试。工业机器人与直线电机相结合，担当了架空线路的角色。相应的控制器使这两个执行机构可以准确仿真架空线路在受电弓当前接触点的行为，同时测量所产生的接触力（图 1）。被测单元（即受电弓）受到的力与动态接触到真实架空线路期间产生的力相同。

>>

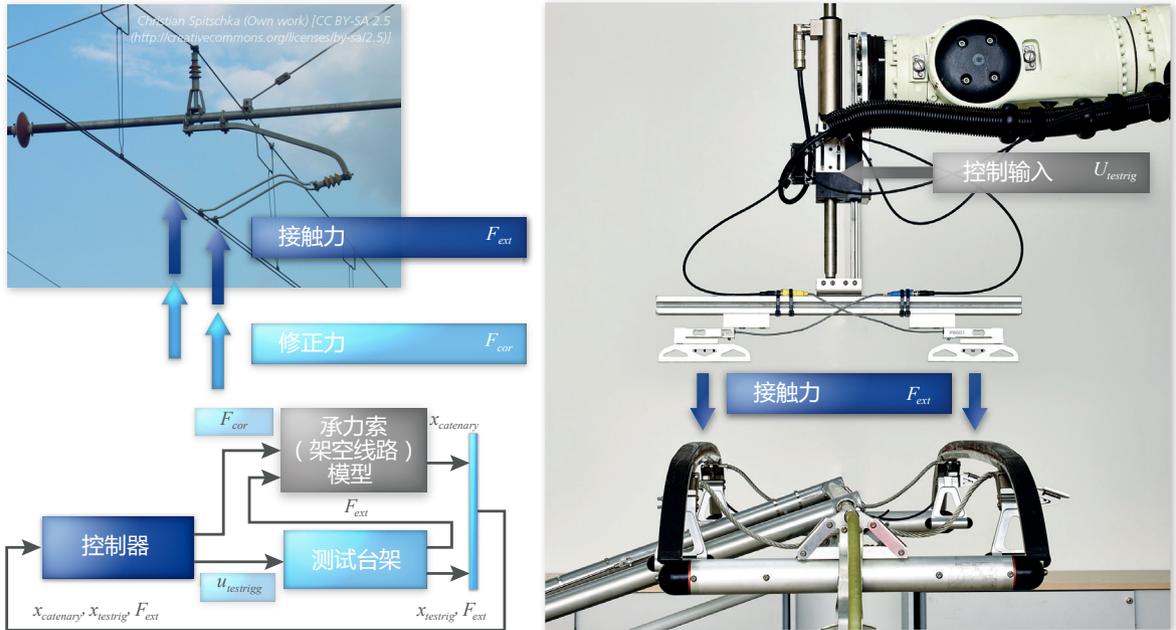


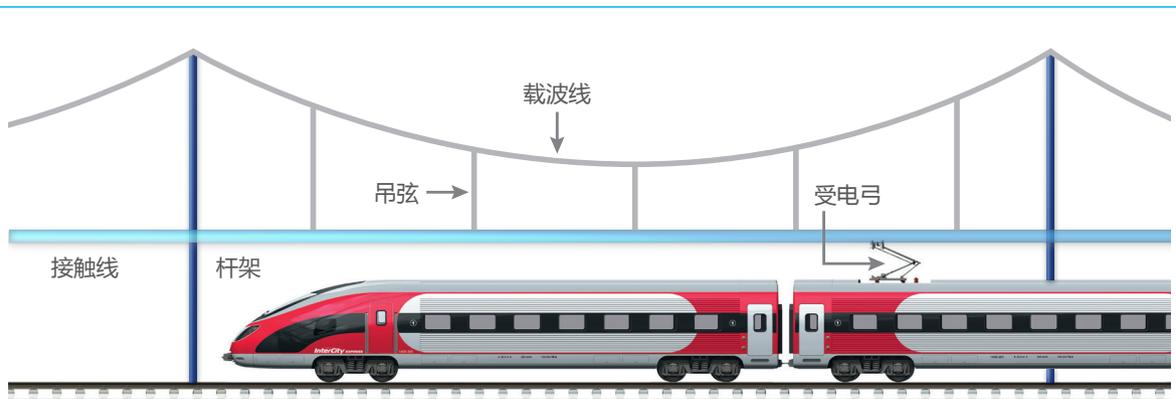
图 1：凭借 TU Wien 开发的方法，可以在西门子的受电弓测试台架上仿真真实的高速列车驱动。

为使仿真尽可能真实，必须先开发出一种极其高效的架空线路动力学数学模型。此模型不仅需要考虑到正确的机械导纳，还包括波传播现象。此外，还必须具有实时能力。真实架空线路的主要组件是接触线和载波线，两者通过吊弦实现互连（图 2）。为了创建线缆动态行为

的数学模型，开发人员首先建立运动方程式（此情况下是偏微分方程）。由于方程是基于拖带坐标系表示，只需要考虑接近受电弓接触点的架空线路的移动。随后，可以采用适当的近似方法（有限差分、有限元）对这些方程求解。特殊的优化吸收边界条件允许受激波超出

计算范围。这样，开发人员就可以仅仅考虑一小段架空线路，同时仍然能够真实仿真更大部分的复杂架空线路的动态特征。正确的吊弦相对位置自然也需要考虑在内。这样可带来时变系统结构，需要对模型数据进行全面的自动化预处理。

图 2：此图简化了真实架空线路的所有组件，在对虚拟架空线路进行建模时必须包含在内。





来源：© 维也纳技术大学

图 3：西门子的测试台架系统允许执行受电弓测试，TU Wien 在其上使用了一块带有大量 I/O 扩展的 DS1006 处理器板。

### 虚拟与真实环境相结合

测试台架控制系统现在必须在虚拟动力线与正在接受测试的真实装置之间建立正确的物理连接。为实现此目标，开发人员使用了一个预测控制器。该控制器与架空线路和测试台架执行机构的精确模型相配合，可预测相应行为，并提前作出正确的控制决定。这样就能在测试台架上尽可能真实地仿真架空线路。此控制系统还可以确保控制器始终遵从物理限制，例如允许的电

机最大电流和位置限制。为实现这一行为，每个采样周期都解决了复杂的数学优化问题。为了在很困难的高动态测试案例中得到准确的物理结果（即使测试台架并未快到足以跟上虚拟架空线路），研究团队对传统硬件在环控制概念进行了开发并实施了独特的新扩展。控制器中直接通过一个单独公式来计算脉冲和能量这两个守恒量。这样可以确保虚拟架空线路和真实受电弓始终交换这些守恒量，使测试结果更

加真实。对虚拟架空线路与真实受电弓之间的复杂交互进行仿真需要极高的模型精确性，同时还必须将模型复杂性降至最低，以便仍然能够对其进行实时计算。实时系统还必须准备好从状态观测器接收的测量数据，并预估摩擦力等干扰因素。为了实时完成所有这些任务，TU Wien 需要的不仅仅是新的数值方法，还包括功能极其强大的实时平台。 >>

“dSPACE 工具不仅能够可靠地满足我们严苛的计算能力要求，还能提供最出色的灵活性，而且可以处理各种任务。”

Stefan Jakubek 教授，维也纳技术大学

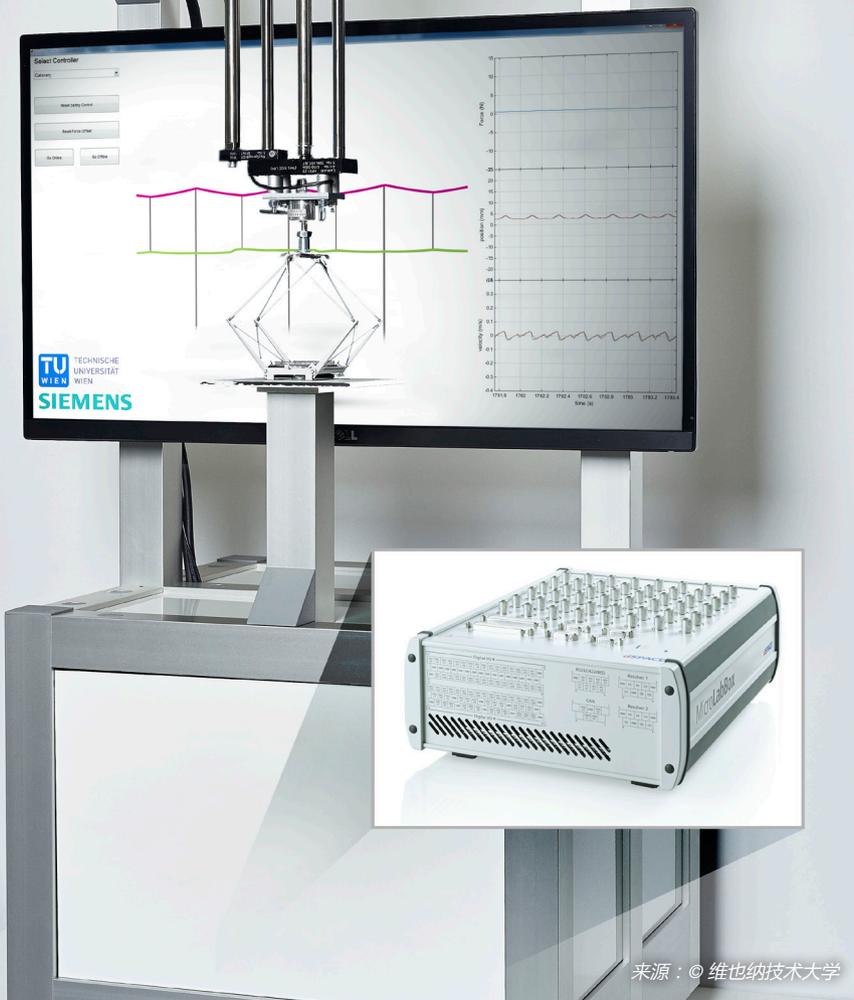
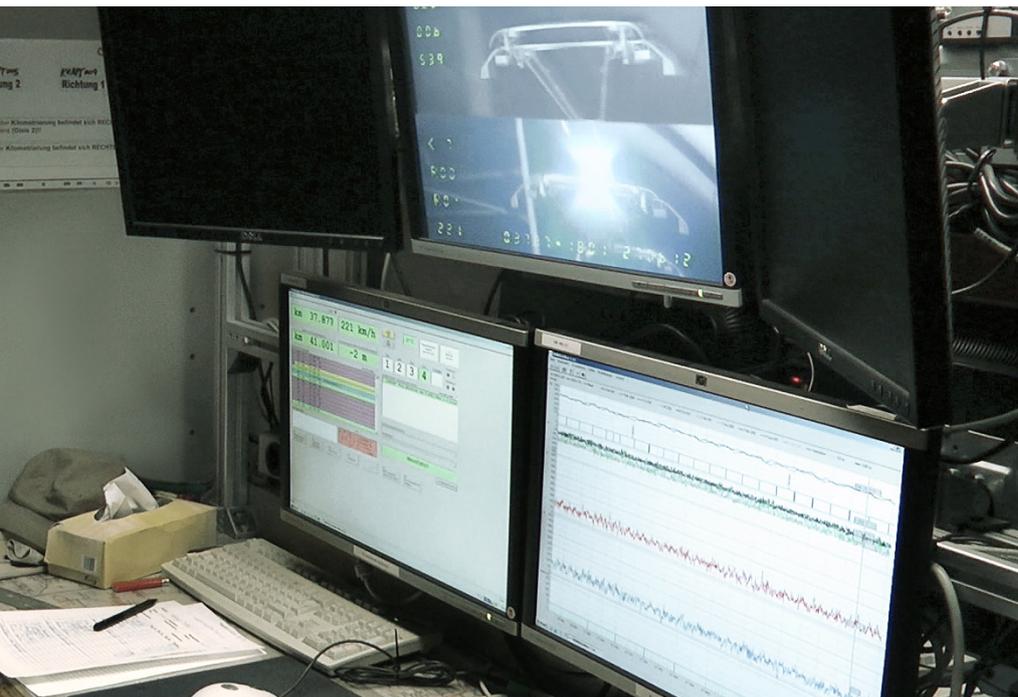


图 4：MicroLabBox 用于构建受电弓测试台架的小型演示器模型。由于开发的控制概念可以轻松地从测试台架移植到示教器，因此可在教室内将它们用作例证。

图 5：试车过程可用于演示新型受电弓如何高效地防止产生电弧。



### 灵活的 dSPACE 工具链

TU Wien 选择了来自 dSPACE 的实时工具。在研究项目期间，测试台架概念在两个不同的 dSPACE 平台上进行了开发。可用于测试真实大小受电弓的测试台架的核心是一块 DS1006 处理器板（图 3）。其 2.8 GHz 四核处理器可以高效地分配计算负载，从而允许开发人员执行复杂的系统仿真，并使用高采样率控制系统。例如，一个处理器内核负责测试台架的基本连接和控制（5 kHz 采样率），另一个内核则执行预测式阻抗控制（200 Hz）。第三个内核负责对架空线路的精确模型进行仿真（200 Hz）。在每个采样步长中，测试台架控制器都会根据模型状态进行初始化。针对与测试台架组件之间的定制通信，开发人员使用一块 DS4302 CAN 接口板（直线电机）、一块 DS3002 增量编码器接口板（位置传感器）、一块 DS2201 多路 I/O 板（控制变量）和一块 DS4121 ECU 接口板（工业机器人）。开发出的大多数算法都通过 MATLAB®/Simulink® 实现，并在其中直接编译。该团队还使用了易于集成的外部库，有效地解决复杂的数学问题。使用实验软件 dSPACE ControlDesk® 开发的用户界面让测试台架上的虚拟测试控制变得非常直观。除了真实大小的测试台架之外，开发人员还构建了按比例缩小的实验室测试台架，用于开发和教学用途（图 4）。实验室测试台架清晰展现了受电弓与架空线路之间的相互作用以及阻抗控制的基本情况，使其可以方便地理解。因此，TU Wien 首次采用了新的紧凑型 MicroLabBox。dSPACE 工具链的高度兼容性和无缝性使算法能够从测试台架轻松传输到更小型的实验室演示器上。

### 结果与展望

所述工具可用于构建高度动态、功能强大的受电弓测试台架。特别是凭借扩展的架空线路模型，可以分析多机牵引的影响，例如一台拥有大量同时升起的受电弓的列车已经在测试台架上实现。这样，就能在开发周期中尽早并且可靠地量化未来受电弓的性能。西门子与 TU Wien 进一步合作开发了受电弓测试台架，是全球第一款能够始终以守恒量来仿真偏微分方程系统动力学的硬件在环测试台架。真实的高度动态测试现在已成为可能，再加上其可再现性，可大大改善高性能受电弓，成为提高未来轨道交通效率的宝贵资产。由于测试过程可以轻松传输到更小型的演示器，使控制模型还能在教室内用于教学目的，以激发年轻一代工程师们对轨道技术的兴趣。因此，未来轨道交通极有可能在速度与效率方面创造新的记录。 ■

*Stefan Jakubek 教授, Alexander Schirrer 博士, Guilherme Aschauer 工程硕士, 维也纳技术大学 Christian Saliger 理科硕士, Siemens AG Austria*

本视频展示了与 TU Wien 合作开发的、正在工作当中的西门子受电弓测试平台，使您可以详细了解其新型高动态控制系统。

[www.dspace.com/go/dMag\\_20161\\_tuwien\\_e](http://www.dspace.com/go/dMag_20161_tuwien_e)  
(© Strukt GmbH)



**Stefan Jakubek 教授**

Stefan Jakubek 是维也纳技术大学控制和过程自动化教授。



**Alexander Schirrer 博士**

Alexander Schirrer 是维也纳技术大学控制和过程自动化博士后研究员。



**Guilherme Aschauer 工程硕士**

Guilherme Aschauer 是维也纳技术大学控制和过程自动化项目助理。



**Christian Saliger, 理科硕士**

Christian Saliger 是 Siemens AG Austria 的受电弓开发工程师。

