



转向系统的

# 性能测试

使用机械电子 HIL 测试开发和优化电动转向系统



是否可在实验条件下测试车辆的实际转向行为？是。借助适合的机械电子测试台架。这实际上是 Ing. h.c. F. Porsche AG 博士从事的工作，可高效优化已处于早期开发阶段的新转向系统的行为。

如今车辆的转向系统不仅仅是用于换向的简单组件。由于受伺服电机和大量辅助系统的支持，它们已成为安全系统的有机部分，并且将缓解驾驶员的道路交通压力。在赛道上，它们通常甚至决定输赢。这是 Porsche 等跑车制造商特别关注转向系统开发的原因。它们不仅研究转向移动到车轮的精确快速传输。它还关于行驶状态的直接反馈 – 在相反方向传输。这两个因素相结合可造就直观而安全的行驶。由于驾驶员直接体验转向系统，此组件还是让公司在竞争中脱颖而出的理想选择。因此，实现以敏捷而直接转向行为为特征的 Porsche 典型转向感觉是开发人员规格的首要任务。当然，赛车运行对转向扭矩和转向特性的专业需求要比日常行驶的配置高出很多，远超街道合法车辆的车辆动力学限制。

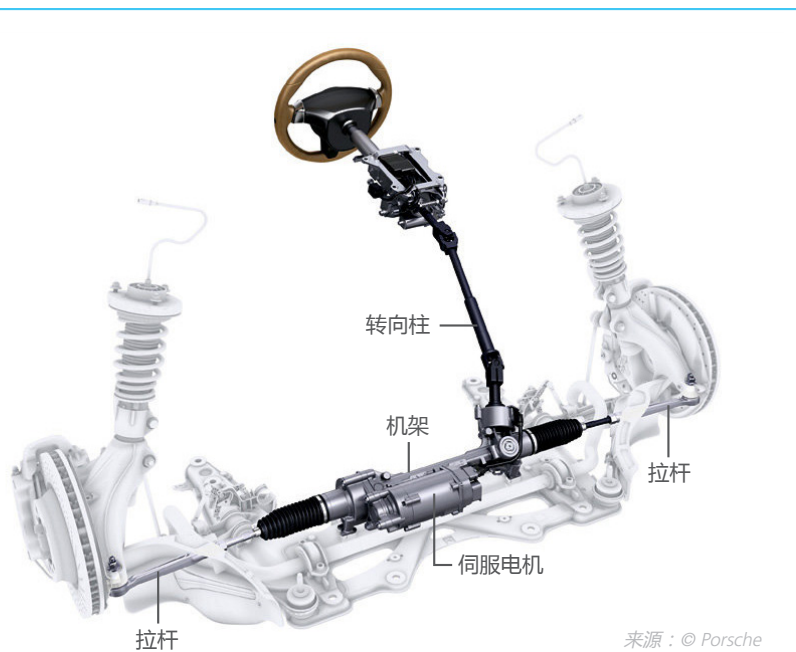
### 机电转向

最新转向系统采用机电形式，通常称为电动助力转向 (EPS) 系统 (图 1)。在此类系统中，伺服电机向拉杆提供附加电力，因此可主动支持驾驶员需要的转向角度。相比前几代产品，如液压转向系统，EPS 系统消耗的能源低很多，而且控制更加轻松。例如，开发人员可以在 EPS 系统中集成的电子控制单元 (ECU) 上实施转向、便利和辅助功能。这包括速度相关转向支持、主动转向回正性、车道保持辅助等。但是，EPS 系统的一个缺陷是驾驶员不会收到有关行驶状态的足够反馈，因为辅助单元存在重量惯性和传输到机架。这将给设计重要的反馈行为并因此保持特有的 Porsche 感觉带来特殊挑战。

### 验证转向系统

除了主观舒适和响应行为，转向系统还必须满足非常严格的要求。毕竟，它们是安全关键型车辆组件，因为它们出现故障会导致危险的行驶情况。因此，机械和电子验证遵守最严格的安全标准。数量日益增加的软件、新驾驶员辅助系统和后轴转向的可选功能将大幅增加转向系统开发中的测试需求。因此，虽然复杂性很高，但需要合适的方法来高效提供所需质量。使用 ECU 经过行业证明的硬件在环 (HIL) 方法，可重现测试、可轻松扩展的测试范围以及可根据每个情况调整的测试深度均可实现。通过在整个开发过程中测试整个系统和使用测试尽早支持控制器设计，甚至将进一步提高效率。这是 Porsche 在自己的实验室中使用机械电子测试台架来测试转向系统的原因，包括 ECU。合适的执行机构将以机械方式仿真转

图 1：机电转向系统的设置。用于转向支持的电动机与机架并行安装并在拉杆上施加转换力量。



来源：© Porsche

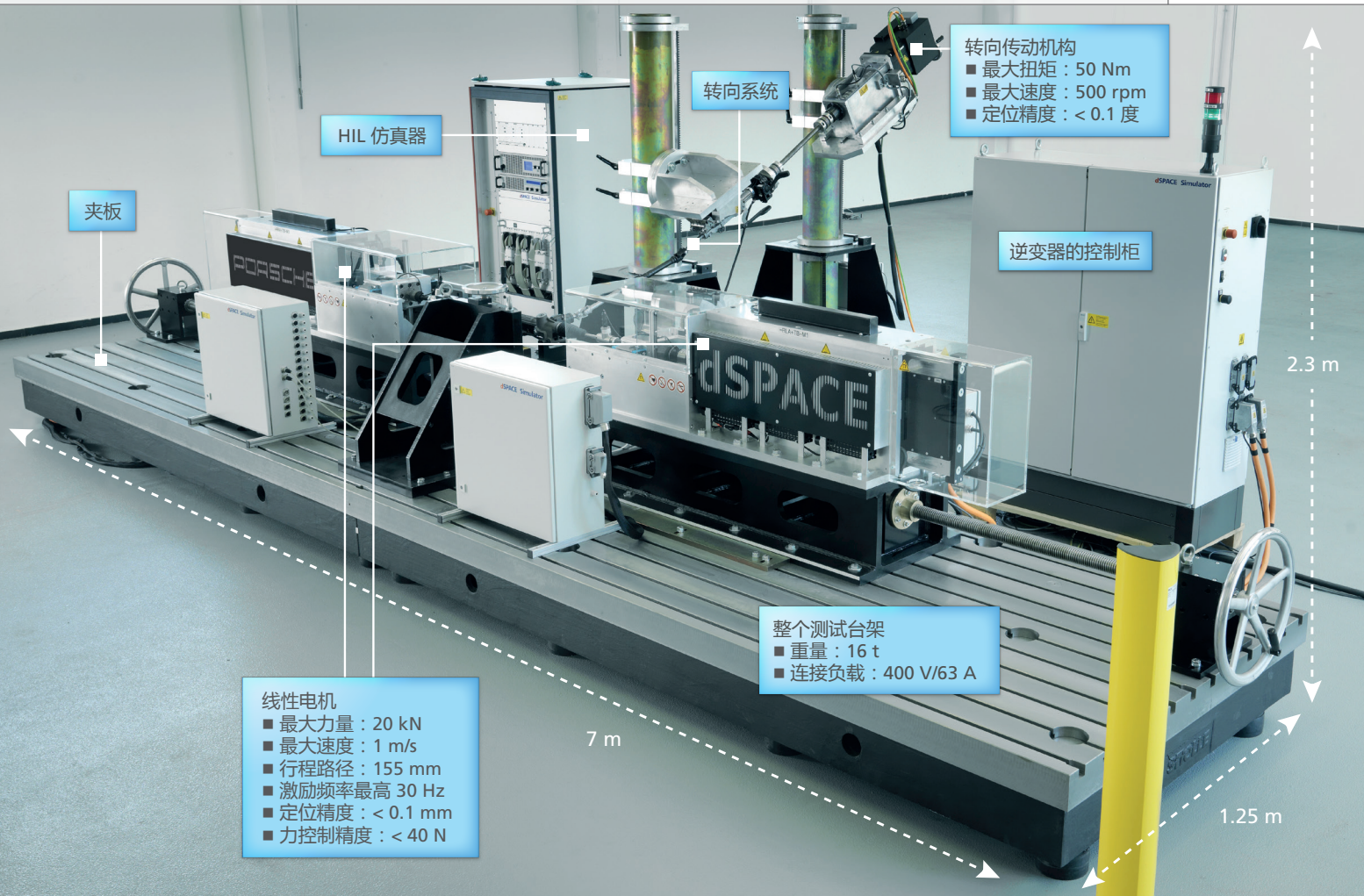


图 2：转向系统测试台架的设置和技术数据。

向系统，使得可在车辆原型中测试与实际试驾期间行为非常相似的系统行为。但是，也可以在转向系统的所有机械接口中插入合成刺激。这意味着还可在测试台架上执行全面测试。例如，开发人员可尽早测试新功能、标识重要参数，以及评估车辆动力学的限制，而不会面临任何风险。这还将在公司中累积重要的专业知识。

### 灵活的测试台架设置

dSPACE 和 Porsche 开发的转向测试台架的设置可容纳整个转向系统，包括转向柱、伺服电机、机架和拉杆（图 2）。它凭可变夹板以及用于定位各个组件的各种尺寸脱颖而出。此外，在转向系统和测试台架之间存在

能量和信号传输接口。所有这些都使得测试台架非常灵活，让用户可针对不同转向系统进行完美调整，同时确保非常短的设置时间，从而实现高效操作。

### 高效电力驱动

动态电力驱动是测试台架的核心，其中包含可采用机械方式仿真转向系统的两个线性电机。它们仿真在实际车辆中从车轮传输到两个拉杆的力量。转向柱另一端的转向执行机构（电动机）将动态设置转向机角度，从而仿效驾驶员。受控驱动逆变器向两个线性电机和转向执行机构供电。线性电机的控制设计为实现大输入力矩和精确分辨率所有电机的逆变器都

通过共享 DC 链路电压连接。DC 链路是通过主动馈入单元从电网馈入的能量。由于连接逆变器，仅必须覆盖测试台架的电流损耗。大多数能量在电路中流动。这使得测试台架的能效比 Porsche 以前使用的液压测试台架高。外部电源仅适用于标准三相插头（63 A）。不需要冷却剂和压缩空气等其他材料。

### 仿真器的设置和功能

电机控制、测试台架监控和测量数据捕获均由 dSPACE HIL 仿真器执行。仿真器包含实时处理器、所需 I/O 和相应的信号调节。驱动逆变器通过 LTi Motion TWINsync 协议控制，可确保以 125 μs 间隔将设定点传输到逆

>>



图 3 : 测试台架的组件、信号、执行机构和传感器。

变器。此控制概念甚至在高达 30 Hz 的高动态刺激中也可以提供高准确性，这与鹅卵石道路的快速行驶对应。HIL 系统还仿真 restbus，这可根据 CAN 或 FlexRay 使用，具体取决于转向类型。工具套件 dSPACE Automotive Simulation Models (ASM) 用于实时仿真车辆的车辆动力学。实际转向系统可以连接到 ASM Vehicle Dynamics Model 进行闭环操作 (图 3)。dSPACE ModelDesk 的图形用户界面用于参数化各种 Porsche 车辆型号。此软件还让开发人员可定义虚拟试驾的道路和机动。为了立即可视化车辆行为，使用了 3-D 动画软件 dSPACE MotionDesk (图 4)。实验和仪器软件 dSPACE ControlDesk 用于控制测试台架。使用自动化软件 dSPACE Automation-

Desk, Porsche 还可以自动化测试序列，从而改进便利性。

#### EPS 测试部件

在 Porsche，转向测试台架用于标识机械转向参数，以及分析转向系统的传输行为。参数标识测试用于了解转向系统供应商如何实施机械要求。此外，相同部件的重复测量可提供此部件的磨损属性相关信息。测试期间将标识以下参数：

- 小齿轮角度和机架移动之间的传输行为
- 电机角度和机架移动之间的传输行为
- 转向杆（扭力杆和转向柱）的刚度
- 电机变速器（皮带传动和滚珠螺杆）的刚度

- 转向箱和转向柱的摩擦力
- 电机查找表（性能、能耗和效率）

通过使用 AutomationDesk, Porsche 可以方便地自动化测量序列。这的良好示例是标识转向箱和转向柱中的摩擦力，以及标识电机查找表，其中各自都需要不同的测量。例如，要确定转向杆的刚度，转向执行机构将使用自动化测试启动扭矩受控三角信号。此刚度可派生自测定变量“方向盘扭矩”  $M_L$  和“方向盘角度”  $\delta_L$  (图 5, (E))。电力助力转向系统的力矩传输行为分析使得可标识伺服电机的属性。它用于检查伺服电机满足不同刺激频率的辅助要求的程度。其中还可以分析转向系统的反馈行为。开发人员主要通过转向控制器软件来对其施加影响，并且将其设计为符合

Porsche 感觉。将针对各种频率分析机架力量到扭力杆扭矩的变速器行为。分析的传输行为标准有：

- 从电机扭矩到机架力量的传输行为
- 从电机扭矩到机架力量的传输行为

图 5 ( 4, 5 ) 显示了机架的刺激如何转换为扭力杆扭矩的反应。“被动”曲线介绍没有 EPS 辅助的转向系统的纯机械变速器行为。“主动”曲线介绍含激活支持的转向系统的行为。“主动”曲线的振幅比“被动”曲线低很多。这是转向系统的辅助功能导

致的，将降低驾驶员必须施加才能达到舒适水平的手动扭矩。曲线 #1 和 #2 的大量一致表示使用 dSPACE 转向测试台架的测量的高可重复性。

### 测试总体系统行为

测试台架提供两种分析总体系统行为的方法。首先，来自试驾测量等的预定义信号可传递到测试台架作为测试向量，然后启动。此方法的优势是测试向量只需记录一次，即可重复使用任意多次。因此，无需针对实际车辆再次执行行驶机动来分析不同的软件状态。其次，ASM Vehicle Dynamics

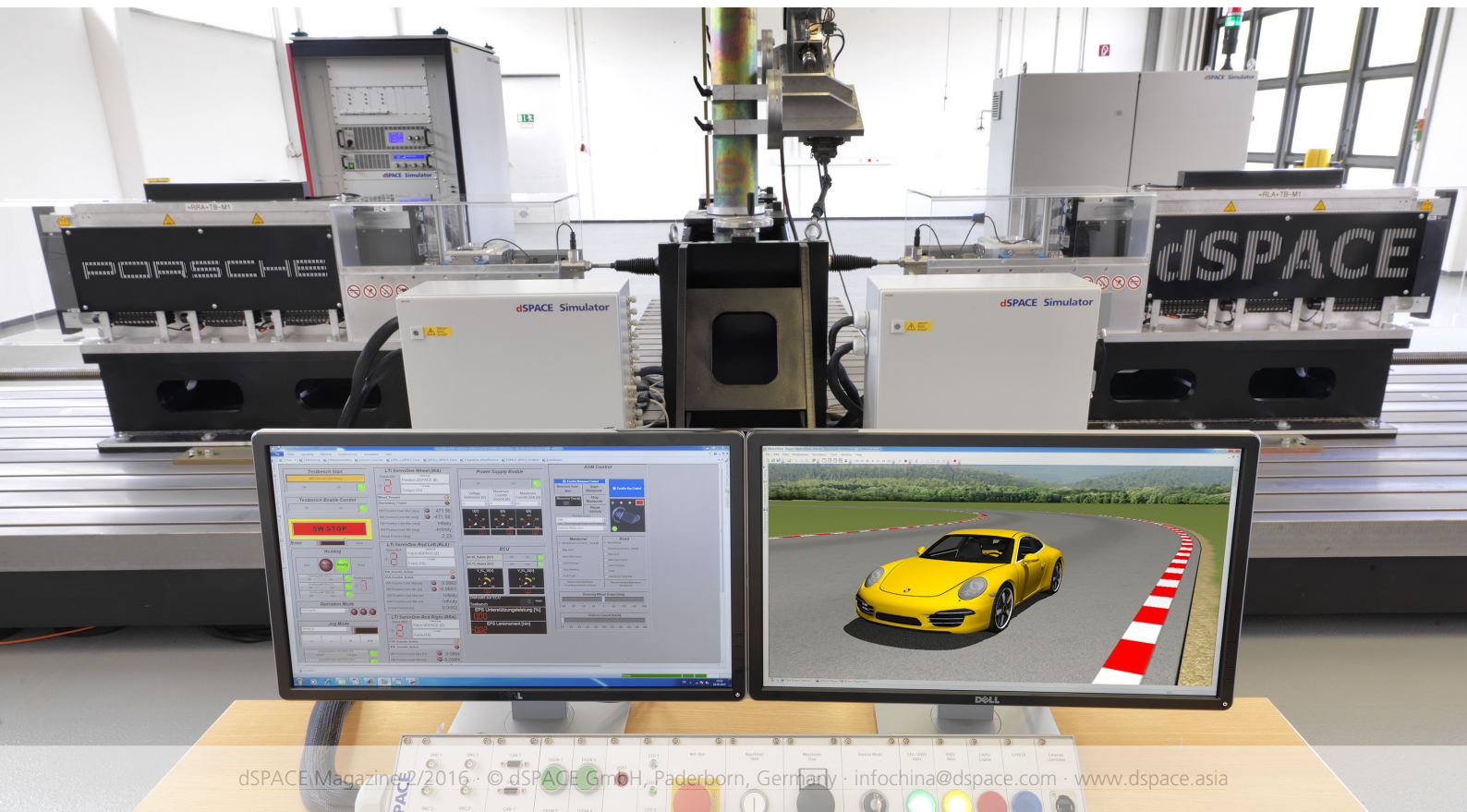
Model 可用于在车辆总体系统上下文中分析转向系统的行为。为此，必须使用要测试的 Porsche 车辆的数据参数化 ASM Vehicle Dynamics Model。此外，ModelDesk 可用于定义各种行驶情况。开发人员可以定义多个变量，如赛道拓扑和道路表面的摩擦力属性。使用测试向量和使用 ASM Vehicle Dynamics 仿真均可支持实际车辆中的试驾系统分析。测试如此可重现和精确的一个主要原因是它们独立于驾驶员和环境因素 ( 图 6 )。

>>

“由于其高度动态特性，来自 dSPACE 的机械电子测试台架对于我们而言是重要开发工具，可完美集成到高要求的 Porsche 转向系统开发。”

Anton Uselmann , Porsche AG

图 4：机械电子测试台架，包括含用于控制测试的 ControlDesk 的操作员工作站 ( 左 ) 和用于可视化行驶驱动 MotionDesk ( 右 )。



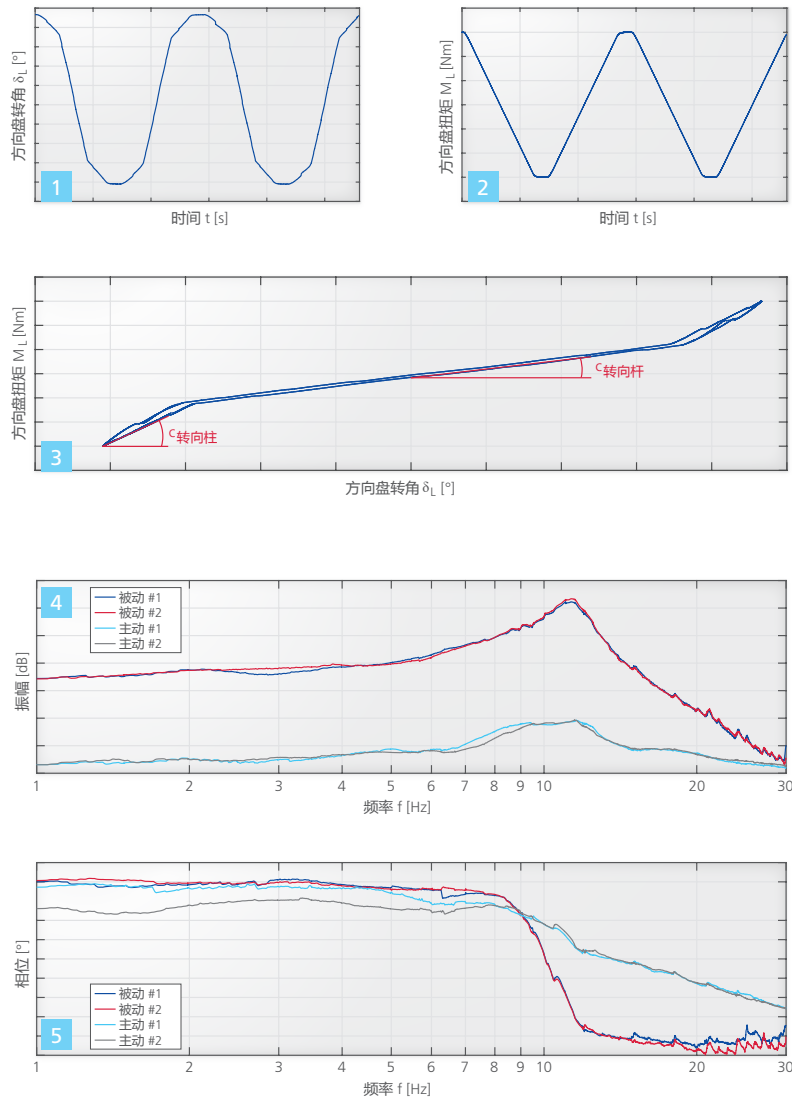


图 5：方向盘测试期间记录的各种测量值。

- 1, 2：含相对于时间  $t$  的方向盘角度  $\delta_L$  和方向盘扭矩  $M_L$  的转向杆的刺激
- 3：转向杆的刚度可派生自方向盘扭矩  $M_L$  相对于方向盘角度  $\delta_L$  的梯度。
- 4, 5：仅含机械变速器（被动）和激活辅助单元（被动）的转向系统的变速器行为。曲线 #1 和 #2 说明使用 dSPACE 测试台架的测量的高可重复性。

### 项目进度和协调

在整个项目期间，从报价阶段的首次交谈到调试和最终检查，参与项目的 Porsche 和 dSPACE 员工密切合作。第一个项目阶段是根据 Porsche 要求创建测试台架设置。它根据在多个步骤中修订的机械设置的 3-D 模型创建。例如，与构造相关的测量确保了测试台架的自然频率与所有计划内使用情景兼容，即它们不在激励的频率范围内。线性电机的转子也必须针对所需高动力优化。帕德伯恩 dSPACE 和魏斯萨赫 Porsche 开发中心的定期电话会议和现场会议是项目的有机部分，使得项目状态在任何时候都是透明的。测试台架按计划交付和调试。由于整个测试台架来自单个来源且按交钥匙方式交付，没有协调开销或与第三方的通信问题。

### 结论和展望

转向测试台架向 Porsche 提供了更大灵活性，让他们可以高精度重现测试，从而使得转向系统的开发和验证更加高效。甚至在项目完成后，两家公司仍保持密切联系。例如，dSPACE 当前正致力于进一步优化转向测试台架的控制算法。在下一个阶



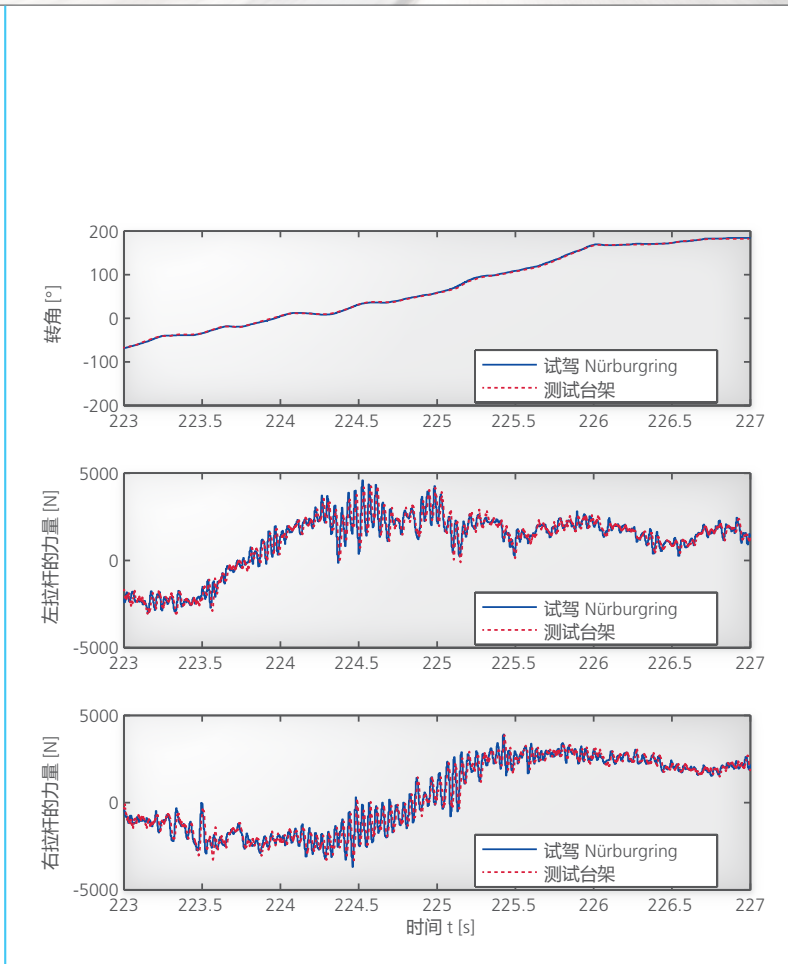


图 6 : Nürburgring 赛道实际试驾期间记录的如下测量数据：转向角度和对应拉杆力量（蓝色），以及在转向测试台架测量的值（红色）。

“我们在虚拟车辆中使用实时仿真模型 ASM Vehicle Dynamics 分析实际转向系统的行为。”

Benedikt Schrage, Porsche AG

段，两家公司将在测试台架中集成后轴转向系统。包括按电线转向架构可能是下一个项目。此外，Porsche 还计划集成在测单元的温度室。HIL 仿真器已包括必要接口。■

Anton Uselmann, Eric Preising, Benedikt Schrage, Dario Düsterloh, Porsche AG



观看视频，详细了解测试台架如何工作：  
[www.dspace.com/go/dMag\\_20162\\_mHIL\\_E](http://www.dspace.com/go/dMag_20162_mHIL_E)

Anton Uselmann

Anton Uselmann 负责德国魏斯萨赫 Porsche AG 转向系统的功能开发。



Eric Preising

Eric Preising 是德国魏斯萨赫 Porsche AG 测试车间的底盘测试台架专家。



Benedikt Schrage

Benedikt Schrage 是底盘测试台架测试工程师，负责德国魏斯萨赫 Porsche AG 转向测试台架。



Dario Düsterloh

Dario Düsterloh 是德国魏斯萨赫博士生，在转向系统开发流程中研究功能优化和复杂性管理。

