



Shift2Rail 创新制动系统调研

1.Shift2Rail 总体目标

“Shift2Rail 计划”是欧盟于 2014 年启动的史上第一个大型铁路科研创新项目，目标是通过加速先进技术的集成及创新先进的铁路产品开发，寻求研究和创新（R&I）以及市场驱动的全新铁路解决方案。

Shift2Rail（以下简称 S2R）是在欧盟“Horizon 2020”计划之下的研究和创新活动，将为达成“同一欧洲铁路区”（Single European Railway Area, SERA）的目标进行必要的技术储备。其鼓励向市场引入更安静、更舒适和更可靠的列车，鼓励创新的铁路运营网络，在提升运载能力的同时，降低它们的生命周期成本。欧洲的公司通过参加这项计划，可以提升它们在国际市场上的竞争力。

项目预计到 2030 年达成如下关键性目标：

- 将铁路服务的可靠性和准时性提升 50%；
- 将铁路运输系统的运力提升 100%；
- 将铁路运输全生命周期成本 LCC（基建和车辆的开发、建造、维护、运行、翻新和报废成本等）降低 50%。

Shift2Rail 将提升欧洲铁路工业的竞争力，并满足日益变化的欧盟运输需要。

2.Shift2Rail 研究内容

S2R 的研发重点包括五个创新项目(Innovation Program, IP)，具体五个创新项目如下。其中涉及到列车车辆的研究内容包含在 IP1 中。

- IP1: 客运列车——高效可靠的大容量列车技术：开发更轻、更节能的新一代列车，减小旅行时间，追踪对环境的影响和破坏因素，降低 LCC。
- IP2: 先进交通管理和控制系统：以目前的欧洲铁路运营管理系统（ERTMS）为基础，继续开发新一代的信号和控制系统，实现列车具备自主行驶功能的智能交通管理系统开发，并对其容量、可靠性、LCC 进行优化。
- IP3: 高质量、低投入的基础设施和智能维护系统：实现一整套全新的铁路基础设施系统（包括铁路和供电系统），新系统能大大增加容量和性能，并降低成本。
- IP4: 优秀便捷、互联互通的铁路信息系统：实现以下关键目标——“到 2020 年，建立泛欧多模式联运信息系统、管理系统、支付系统的框架。”创新的方案和服务将推动旅客减少私家车出行，



优先选择公共交通。

- IP5: 节能便利的泛欧铁路货运技术: 实现以下关键目标——“2030 年前, 将 30%的道路交通分流到铁路运输和内陆水运, 2050 年前这一目标将提升到 50%。”

2.1 IP1-客运列车技术

机车车辆的设计对铁路运输的吸引力起着关键作用, 因此需要设计未来新一代更轻、更节能、更具成本效益的客运列车, 同时为所有乘客提供舒适、安全、实惠的旅行体验。



图 1 客运列车示意图

IP1 将围绕 7 个技术示范目标 (Technology Demonstrators-TDs) 组织工作, 涵盖 S2R 轨道总体规划中指出的所有研发领域, 包括高功率低能耗牵引系统、无线列车控制和监控系统 (TCMS)、轻量化车体、新型转向架、创新制动系统、车门和智能进入系统以及列车内装模块化设计和空调技术。IP1 中所包含的列车各个子系统的内容如表 1 所示。

图 2 显示了各 TDs 之间存在的功能交互的更全面关系, 它不仅突出了 TDs、IP 和同等级活动之间的技术依赖关系, 而且还突出了它们之间的功能依赖关系。

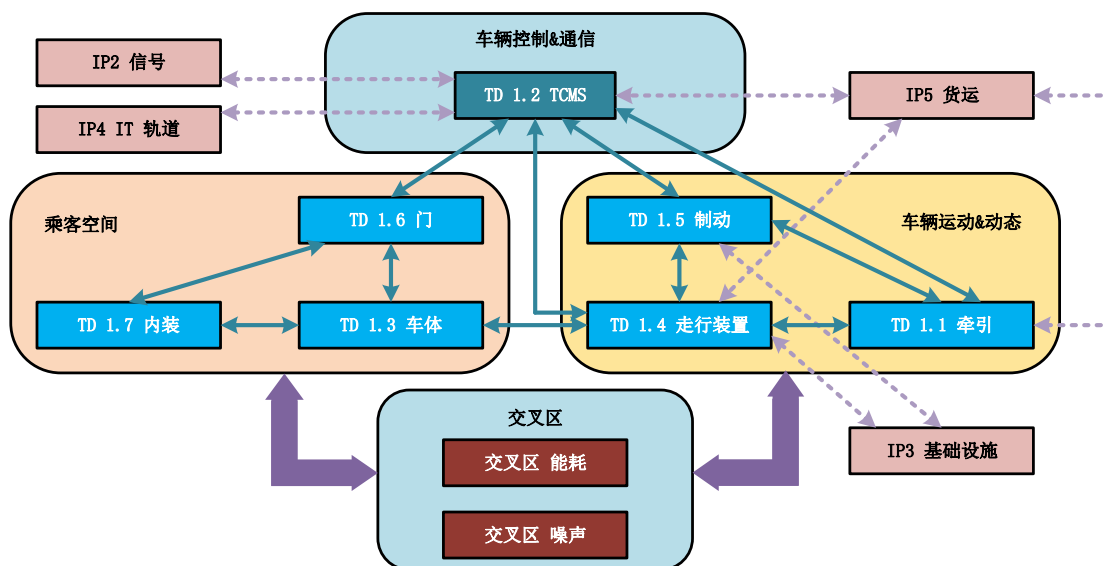


图 2 IP1 各子系统相互关系及和其它 IP 关系



表 1 IP1 各子系统总体目标

系统名称	总体概述
TD1.1 牵引系统	采用碳化硅（SiC）技术开发新的牵引部件和子系统
TD1.2（TCMS）	新一代 TCMS 的开发将使无线列车耦合得到广泛应用
TD1.3 采用复合材料或其他轻质材料的新一代车体架构	通过应用新材料减轻车体重量，承载更多乘客，能耗更低，对铁路基础设施的影响更小
TD1.4 新型转向架	通过新材料、新结构的应用，实现新功能，并显著提高性能水平
TD1.5 创新制动系统	将和新的转向架设计与牵引创新相结合，使下一代客运机车车辆具有更高制动率和更低噪声排放的制动特性
TD1.6 新型门系统	新的轻质复合结构可以在现有的安全性和可靠性水平上实现快速反应，减少站台停留时间和增加总的线路运输能力
TD1.7 列车内装模块化	将为列车内部开发新的模块化概念，允许运营商根据实际使用条件调整车辆内部布局，并改善客流，从而优化车辆容量和停站时间。

2.2 创新制动系统技术

上述 IP1 中包含的 TD1.5—创新制动系统，将具有更高的制动率和更低的噪声，它的成功应用将使得转向架在重量和体积方面获益颇丰，且研究的制动系统仅限制于高速列车和动车组。

新制动系统和牵引系统的联合创新设计，将使得下一代客运车辆在加速度、减速度方面获得提升，实现列车更大的运力。而制动系统的技术示范涉及 6 个 S2R 研究项目，具体如表 2 所示：

表 2 和制动相关 S2R 研究项目

项目简称	项目名称	项目周期
PINTA	牵引和制动第一阶段	2016 年 9 月 1 日~2018 年 12 月 31 日
CONNECTA	S2R 下一代大容量高安全的 TCMS 和制动	2016 年 9 月 1 日 ~2018 年 9 月 30 日
SAFE4RAIL	轨道车辆分布式应用集成安全架构	2016 年 10 月 1 日~2018 年 12 月 31 日
PIVOT	轨道车辆性能提升	2017 年 10 月 1 日~2019 年 12 月 31 日
PINTA2	牵引和制动第二阶段	2018 年 9 月 1 日~2020 年 11 月 30 日
RUN2RAIL	为新的可靠、可持续、智能和舒适性轨道车辆提供创新转向架方案	2018 年 9 月 1 日~2019 年 9 月 30 日
PIVOT2	轨道车辆性能提升第二阶段	2019 年 10 月 1 日~2022 年 12 月 31 日

6 个研究项目中涵盖的创新制动系统具体技术包括：



- 1) 高 SIL 等级电控单元;
- 2) 线控制动;
- 3) 黏着模型及低黏着管理方案;
- 4) 创新摩擦副解决方案;
- 5) 对制动系统进行虚拟验证和认证;

S2R 通过对上述技术的分析和开发并进行一定技术等级的验证,对创新制动系统进行系统方案设计、系统配置落实及系统功能测试,落实创新制动系统的研发成果并进行技术推广。

3.创新制动系统

3.1 高 SIL 等级电控单元

用于制动控制的高安全等级电子解决方案,其目标是开发一个电子装置的软件-硬件架构,它将根据适当的 SIL 等级来管理所有制动功能(常用、保持、紧急、安全制动、车轮防滑)。

通过对传统制动系统制动功能的分解和细化,将部分功能进行整合,传统制动系统架构如图 3、制动功能分解如图 4 所示,即将紧急制动控制单元和常用制动控制单元进行整合,开发一个集成式的高 SIL 等级电控制单元——电子分配阀(简称 EDV),此外还将防滑功能也包含在 EDV 中,形成更高水平的集成。EDV 子功能和实物示意图如图 5 所示,EDV 制动系统架构如图 6 所示。

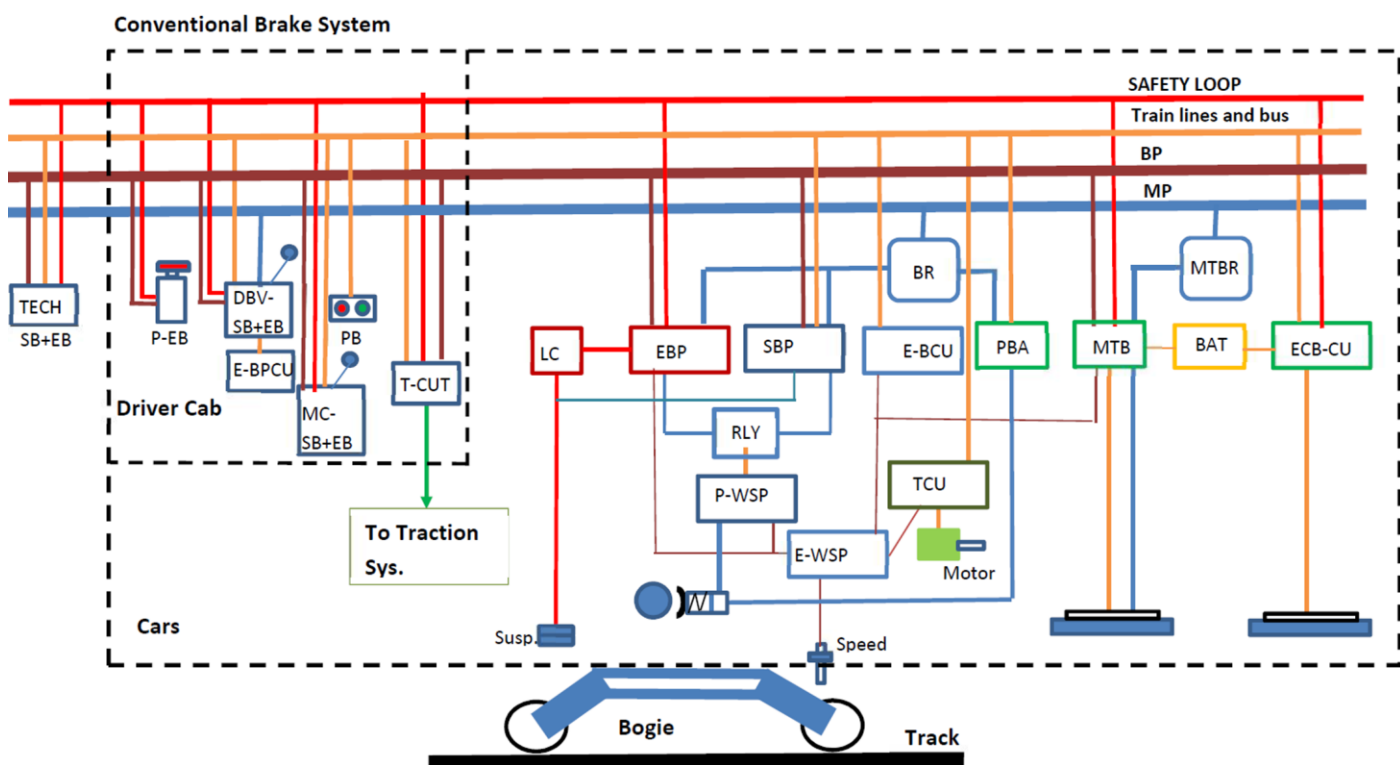


图 3 传统制动系统架构

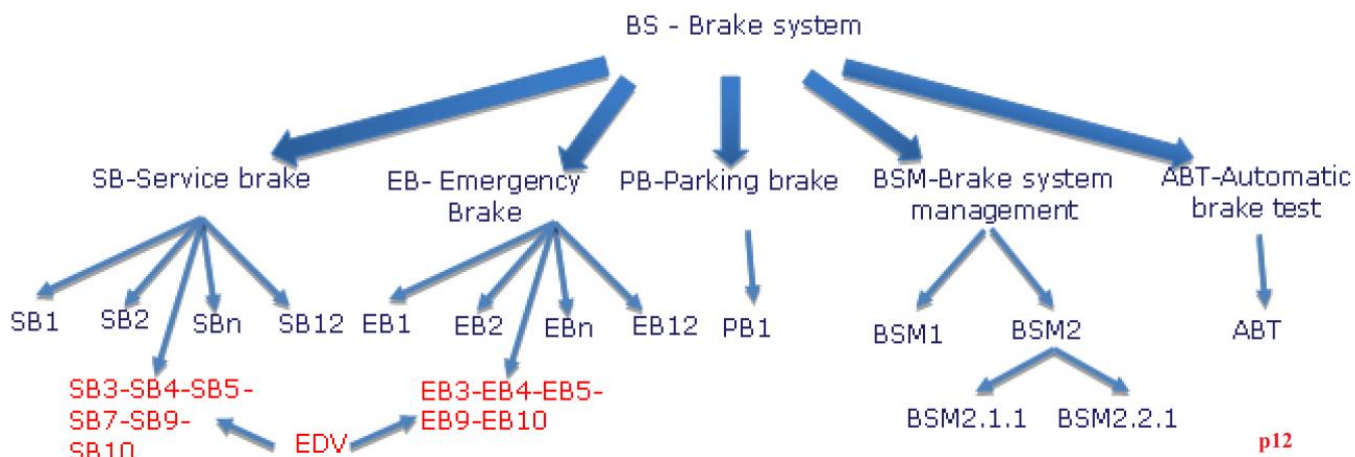


图 4 制动功能分解细化示意图

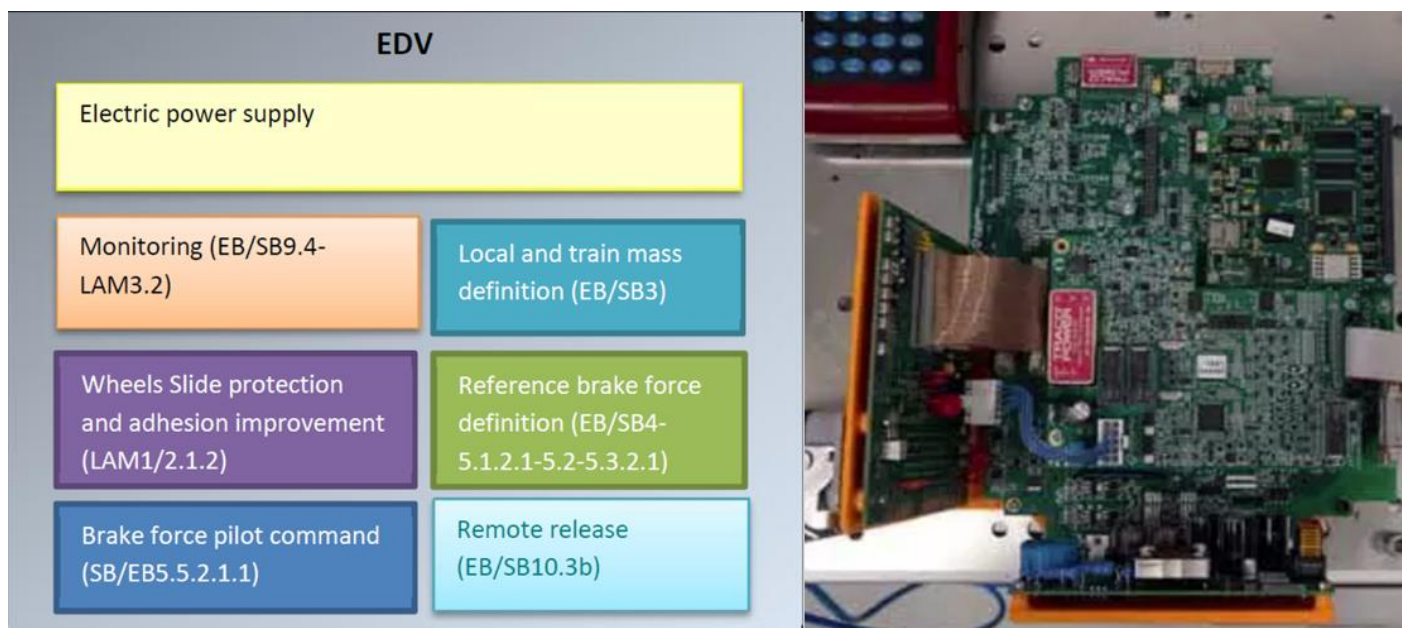


图 5 EDV 子功能和实物示意

通过 EDV 概念的推出，可以对传统制动系统进行重新架构，主要技术收益如下：

- 实现无制动管路的安全总线/紧急制动指令的安全环路，如图 6 所示；
- 用少而简单的电控气动设备代替现有的气动部件（如：分配阀、气制动模块、选择阀、中继阀等）执行常用制动和紧急制动；
- 安全的黏着摩擦制动力的电子控制连续调整；
- 在监测和黏着制动力的安全力载荷上实现安全电控；
- 提高制动缸压力精度，可以补偿温度和部件故障的影响等；



High Safety Electronic Cylinder Pressure Generation and Electric Brake in Emergency

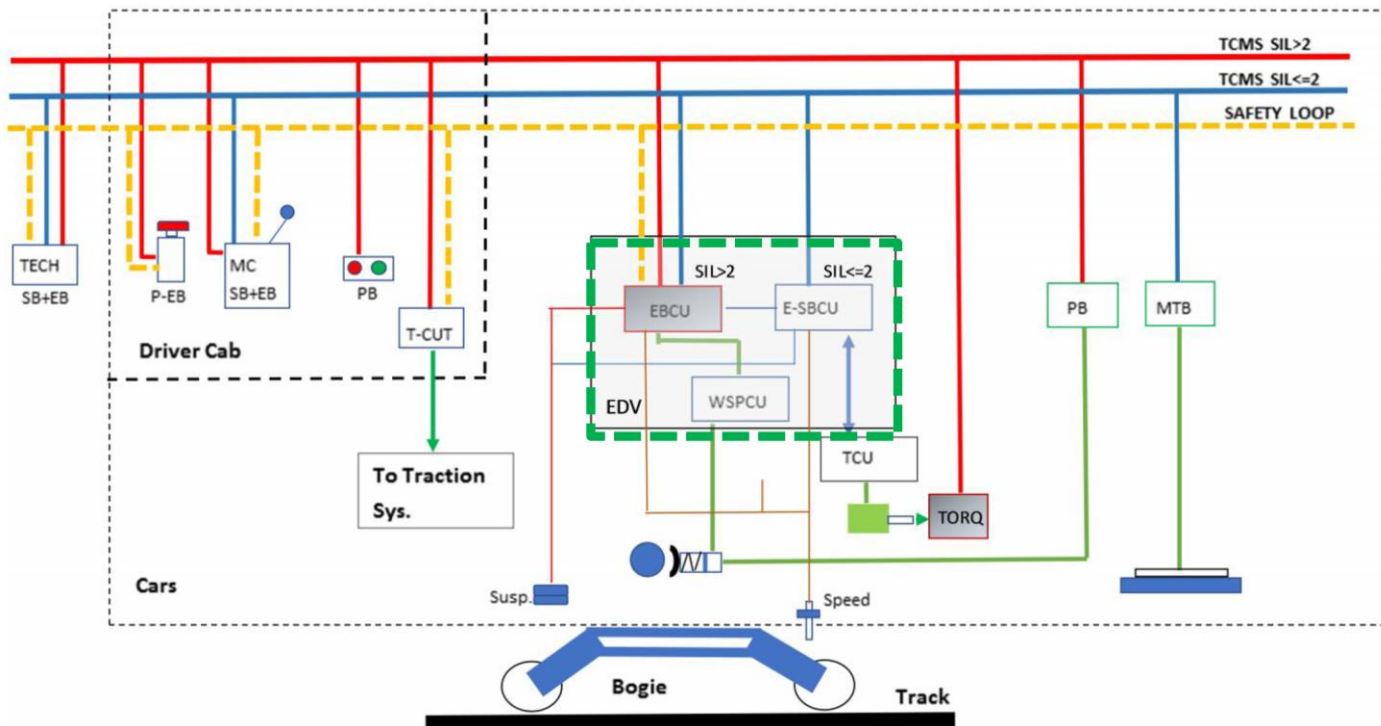


图 6 创新制动系统架构

3.2 线控制动

线控制动（Brake by Wire），它将在现有线控驱动技术的基础上，开发一个先进的完全电子化的架构理念。即将基础制动执行器从传统的气动控制变为线缆控制，通过相关控制线对执行电机进行制动控制，具体两者对比示意图如图 7 所示：

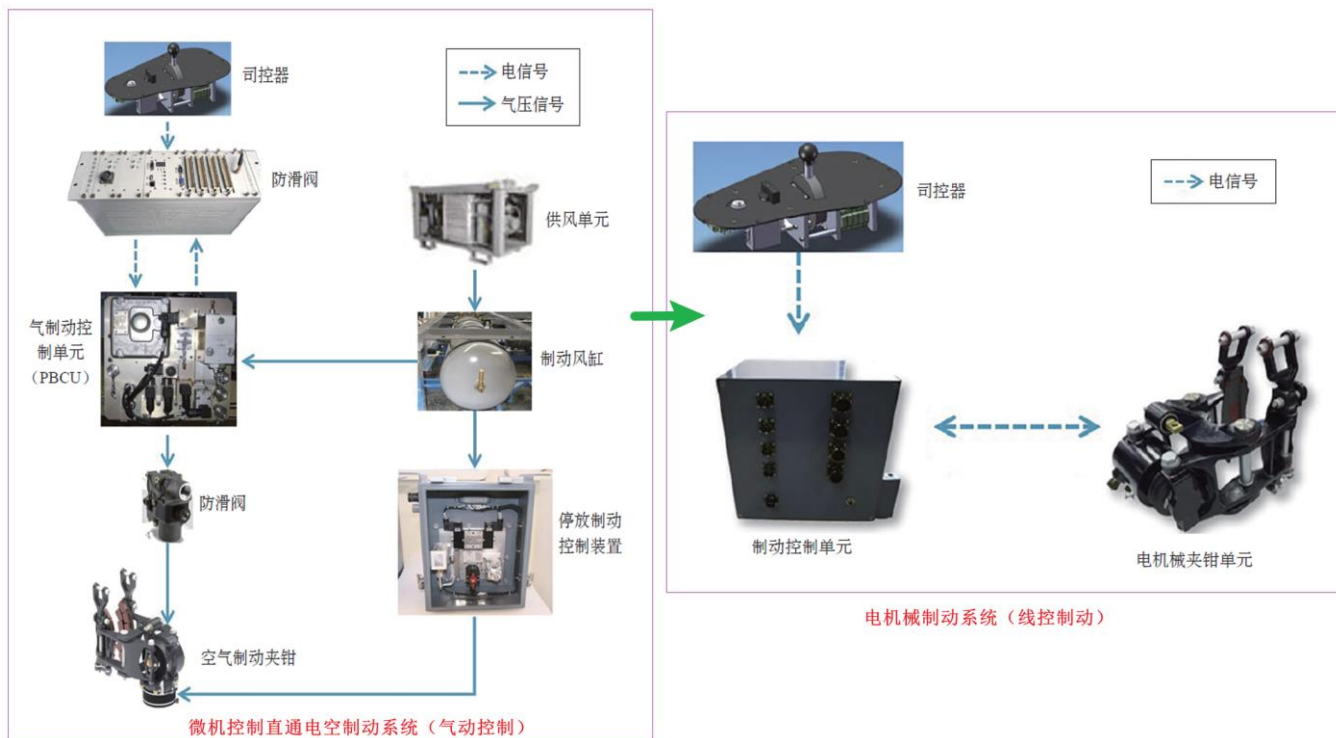


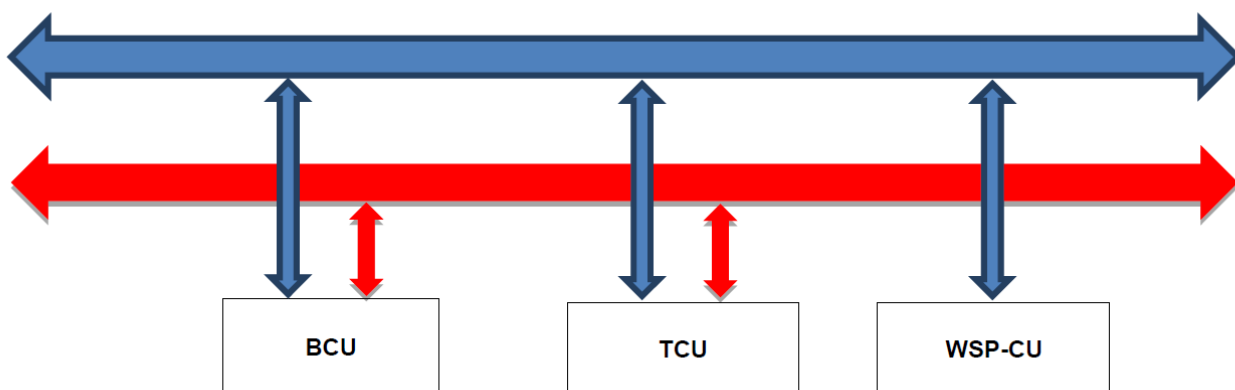
图 7 气动控制和线控制制动对比



线控制动中就指令传输控制架构和子系统控制的单元的区别而言就有 6 种方案，具体如下：

- 方案 1.1 和 1.2 接近现有技术方案，存在几个控制单元和不同的控制策略，但是简化了指令管理和中继阀并删除了气动部件如安全阀，具体如图 8 所示。
 - ◆ 方案 1.1 中实现了 TCU（牵引控制单元）和 BCU（制动控制单元）的高安全等级，但是 WSP-CU（防滑控制单元）是独立的；
 - ◆ 方案 1.2 中 TCU 和 BCU 有两个层级控制，一个是安全相关功能，另一个是非安全相关功能，WSP-CU 同样是独立的。

1.1) High safety level BCU and TCU. Independent WSP system



1.2) BCU and TCU with two control “layers”, one for safety related function and the other one for not safety related functions. Independent WSP system.

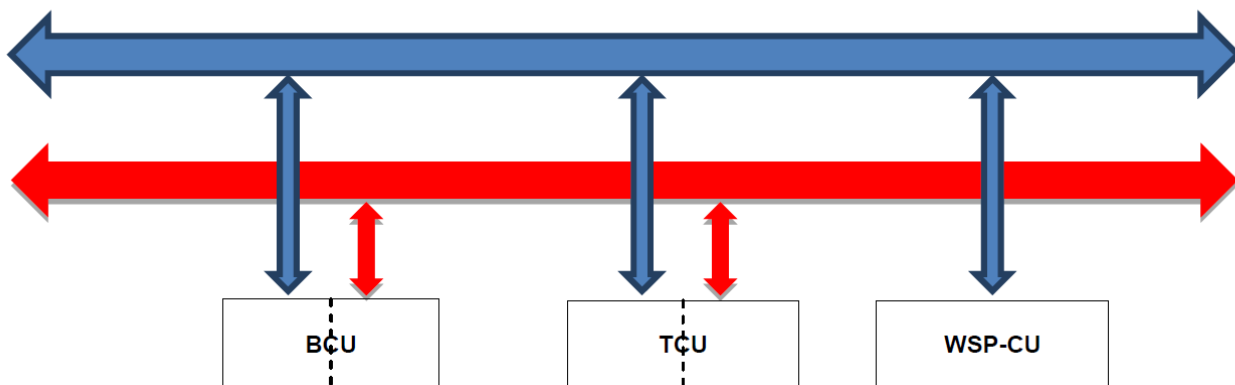
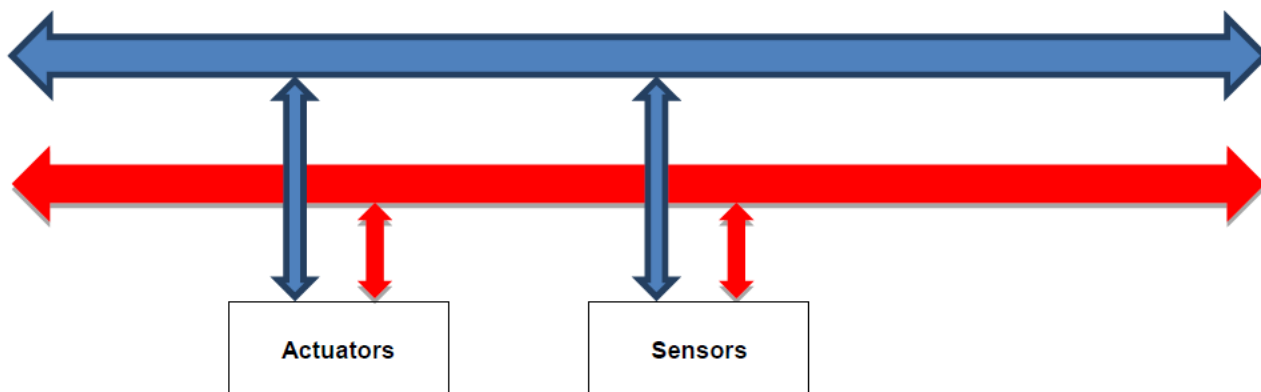


图 8 线控制动方案 1.1 和方案 1.2 示意图

- 方案 1.3 和方案 1.4 是最具有创新的方案，每一个执行部件需要电控设备，通过通信基础设施管理实现控制，极大减少本地控制单元，优化列车级控制（混合制动，防滑），实现集中控制，具体示意图如 9 所示。
 - ◆ 方案 1.3 中 TCU、BCU、WSP-CU 都被去除，所有子系统通过 TCMS 进行控制，并通过相关传感器经列车总线将信号反馈给 TCMS；
 - ◆ 方案 1.4 在方案 1.3 基础上，将 WSP-CU 单独保留进行独立的防滑控制。



1.3) BCU, TCU and WSP-CU removed, everything controlled by TCMS



1.4) BCU and TCU removed. Local WSP-CU, but with reference speed by the bus.

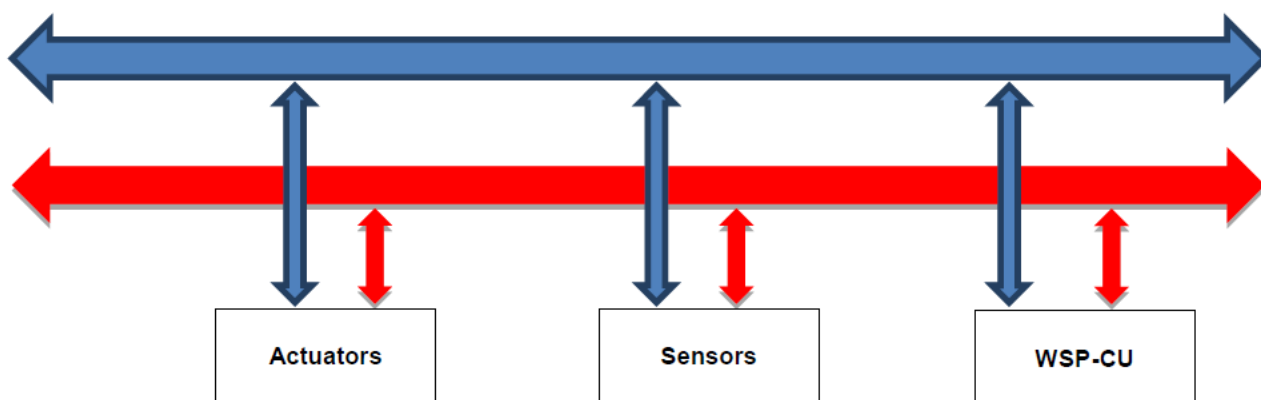


图9 线控制动方案 1.3 和方案 1.4 示意图

- 方案 1.5 和方案 1.6 介于上述方案之间，有这些方案的部分优势但是也有缺点，如一旦集成单元故障（包括制动系统和防滑单元丢失）将对危害性分析有巨大影响，如果增加冗余单元，则必须重新评估成本影响，具体示意图如 10 所示。
 - ◆ 方案 1.5 中存在一个管理列车级所有安全相关功能（牵引和制动）的控制单元，其绕过了紧急制动中的本地 TCU 和 BCU，WSP-CU 是独立的；
 - ◆ 方案 1.6 中在列车级控制牵引、制动和防滑的一个单独的集成单元中有两个控制层级，一个层级是安全相关的功能，另一个是非安全相关功能。



1.5) One unit at vehicle level managing all the safety related functions (traction and brake), bypassing the local BCU and TCU in emergency. Independent WSP.

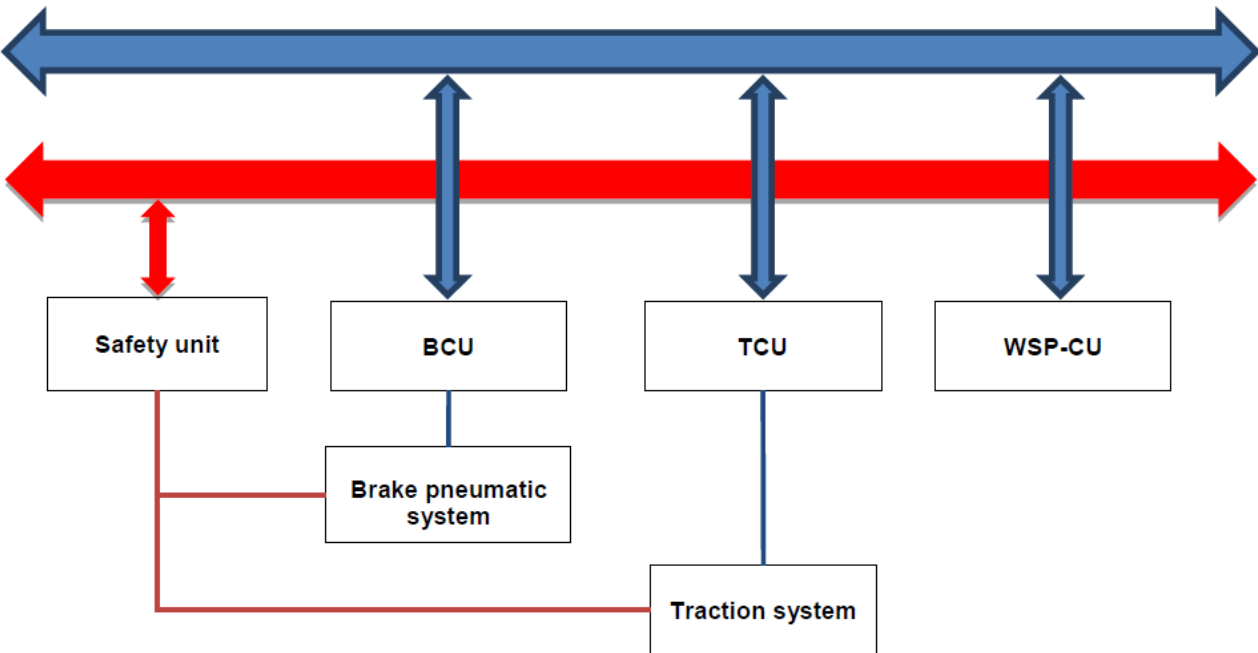


图 10.1 线控制动方案 1.5 示意图

1.6) One single unit at vehicle level controlling traction, brake and WSP with two control “layers”, one for safety related function and the other one for not safety related functions.

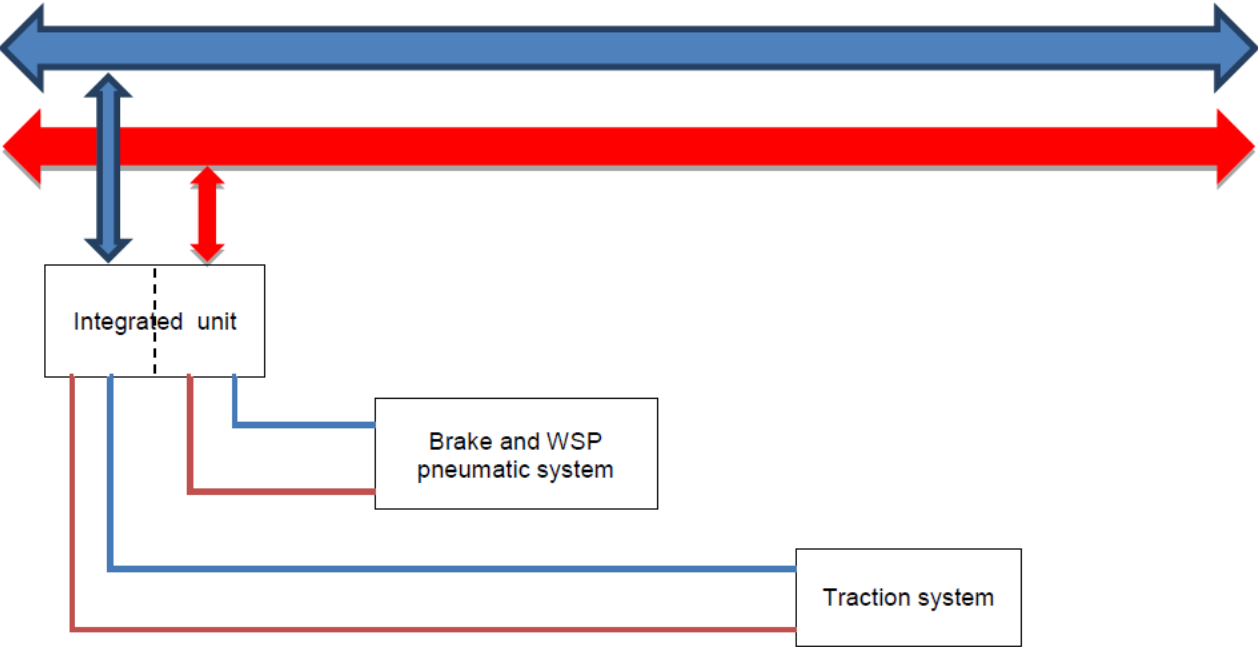


图 10.2 线控制动方案 1.6 示意图



3.3 低黏着管理；

低黏着管理涉及到两个方面，首先是黏着曲线的获得，其次基于不同黏着曲线的分析对实际黏着情况下的车辆运行状况进行处置，包括防滑控制、撒砂等。

3.3.1 黏着测试和建模

这部分主要工作集中在黏着检测和低黏着管理。其目标是绘制出铁路交通中出现的不同黏着工况；根据识别出的黏着类别，可以对不同季节影响和不同位置的黏着工况做出预测。这方面数据的收集是标准化黏着监测的基础。基于黏着检测数据和黏着建模以及实验室仿真的轨道再现系统，在相关需求定义的基础上制作一个防滑测试台，进行相关防滑硬件在环仿真研究。仿真的初步模型如图 11 所示：

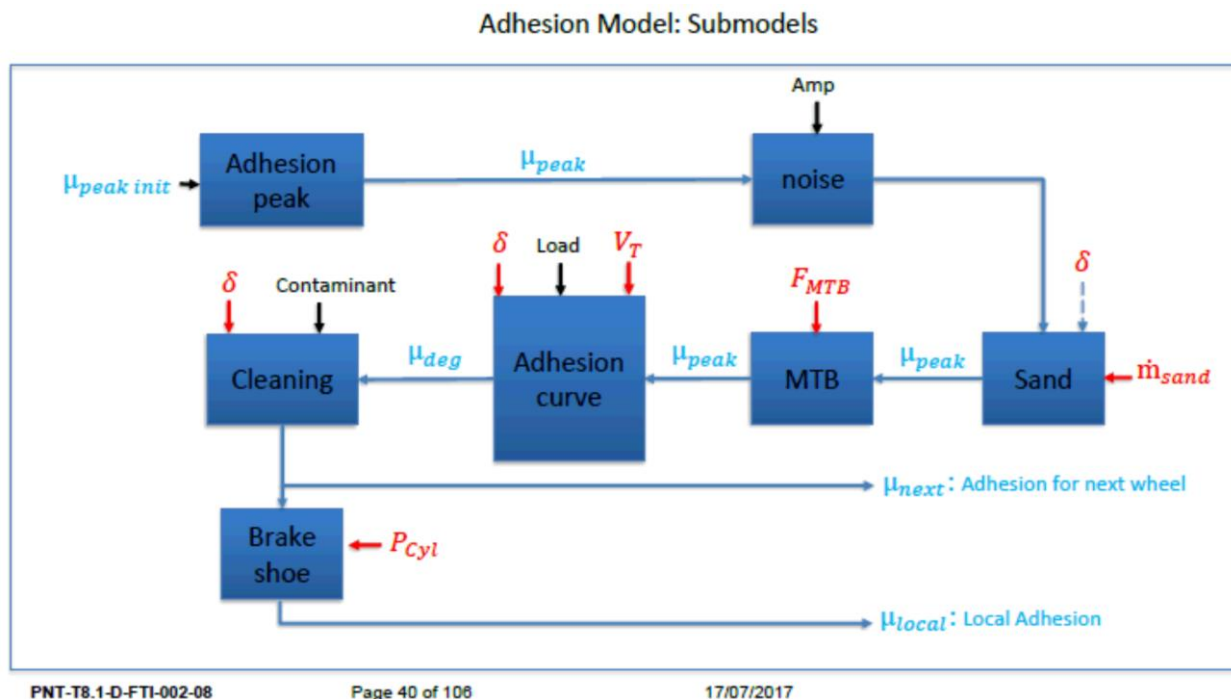


图 11.1 黏着模型框图

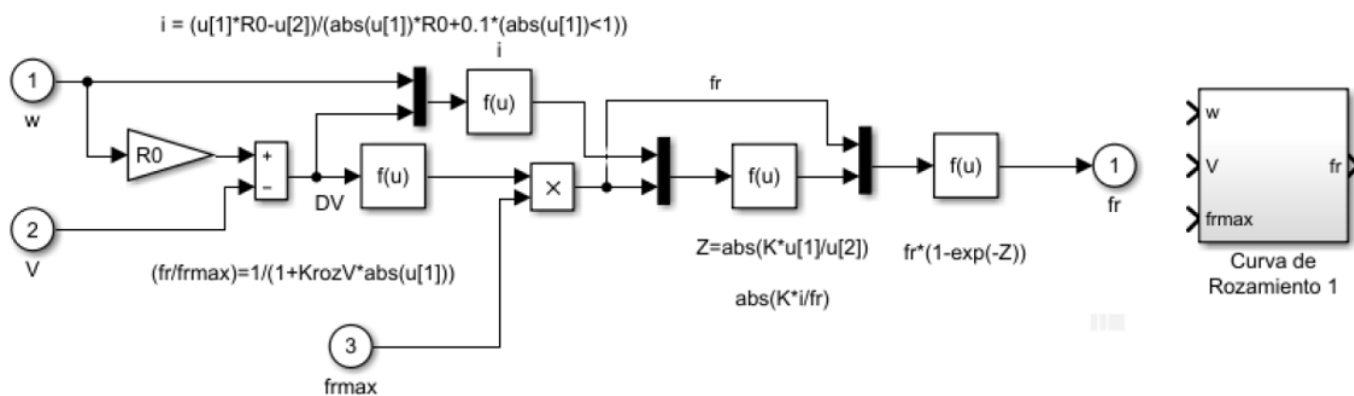


Figure : Adhesion curve model block in SIMULINK.

图 11.2 Simulink 中仿真的黏着模型



通过初步仿真模型、实测黏着数据、相关输入输出参数、黏着模型子模型、黏着曲线子模型对仿真模型进行多次循环迭代优化，使得最终的仿真模型可以和实测数据有较好的匹配性，达到仿真可以替代实测的程度。具体迭代后的仿真模型如图 12 所示：

General Adhesion Model: Submodels
(New cleaning model revised)

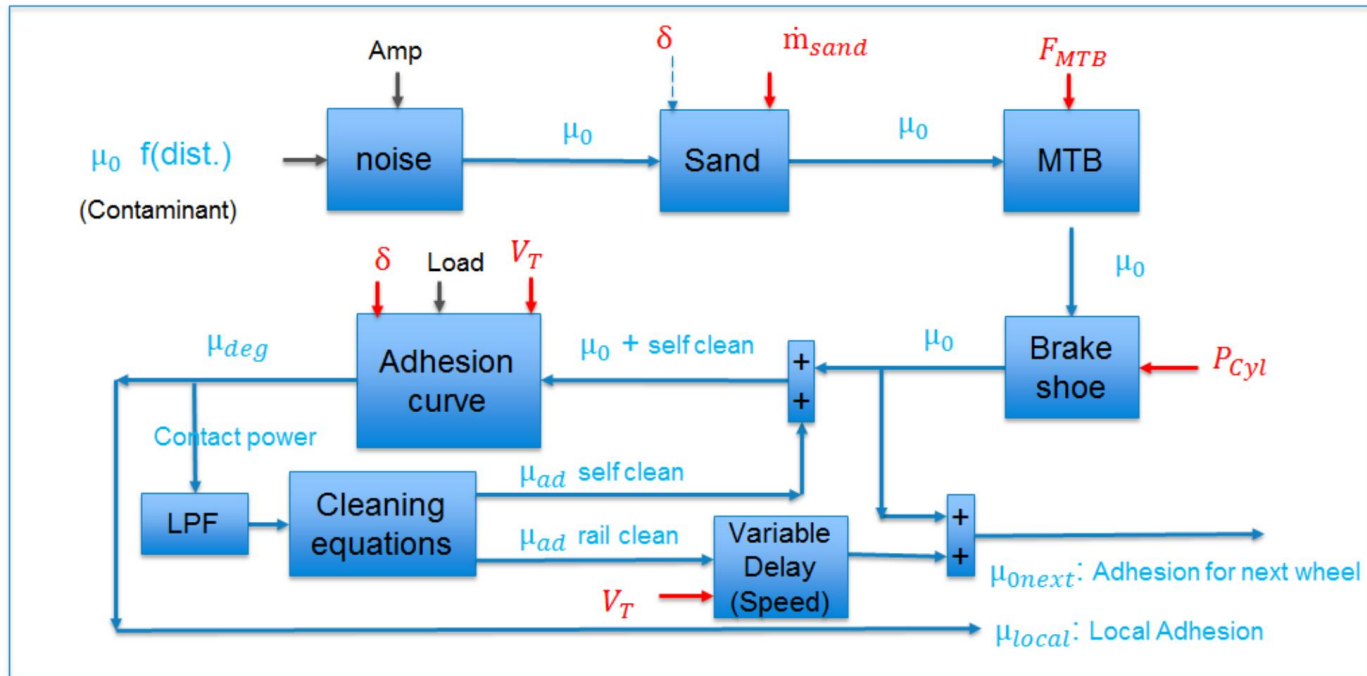


图 12.1 新黏着模型框图

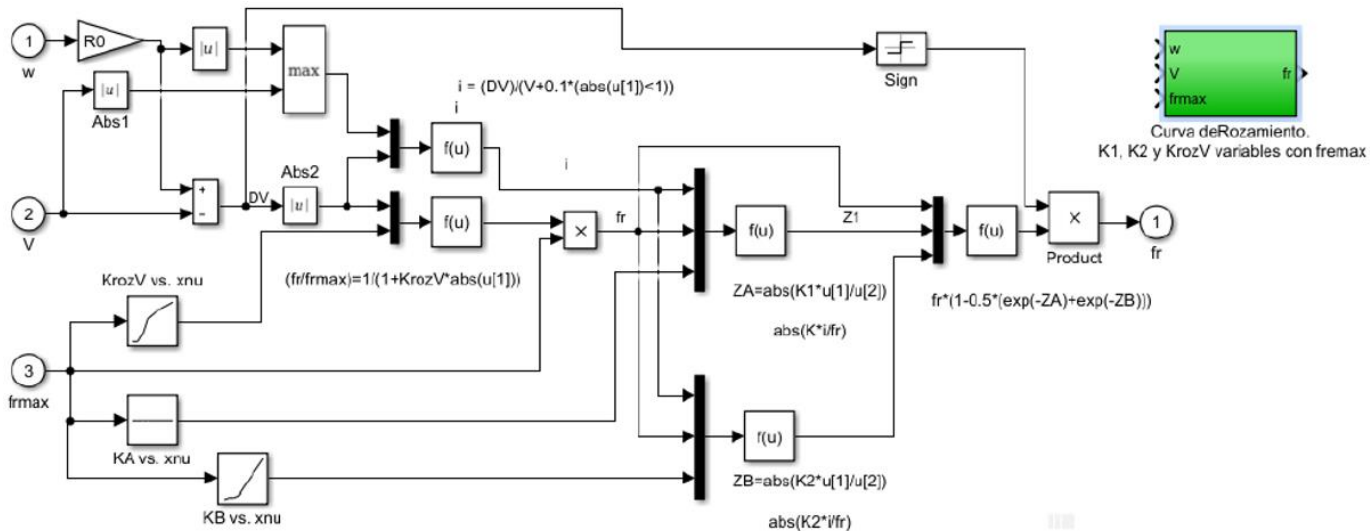


Figure : NEW Adhesion curve model block in SIMULINK.

图 12.2 Simulink 中仿真的新黏着模型

3.3.2 黏着管理

由于低的轮轨黏着带来了运行和安全性方面的问题（比如信号/站台的超负荷、SPAD 信号通过危



险等), 需要轮轨黏着方面的知识作为开发黏着管理方案的基础。

黏着管理取得的优势将包括: 优化的、可靠的或更短的制动距离; 更高的整体列车安全性; 提升线路运载能力 (间接效果); 降低维护费用。

黏着数据整理主要方法是通过定义测试场景、收集轮轨黏着实际数据, 并总结通用要求和相关标准, 提出解决方案的规范并进行开发。黏着数据收集整理的主要工作流程如图 13 所示, 部分实际工作如图 14 所示。

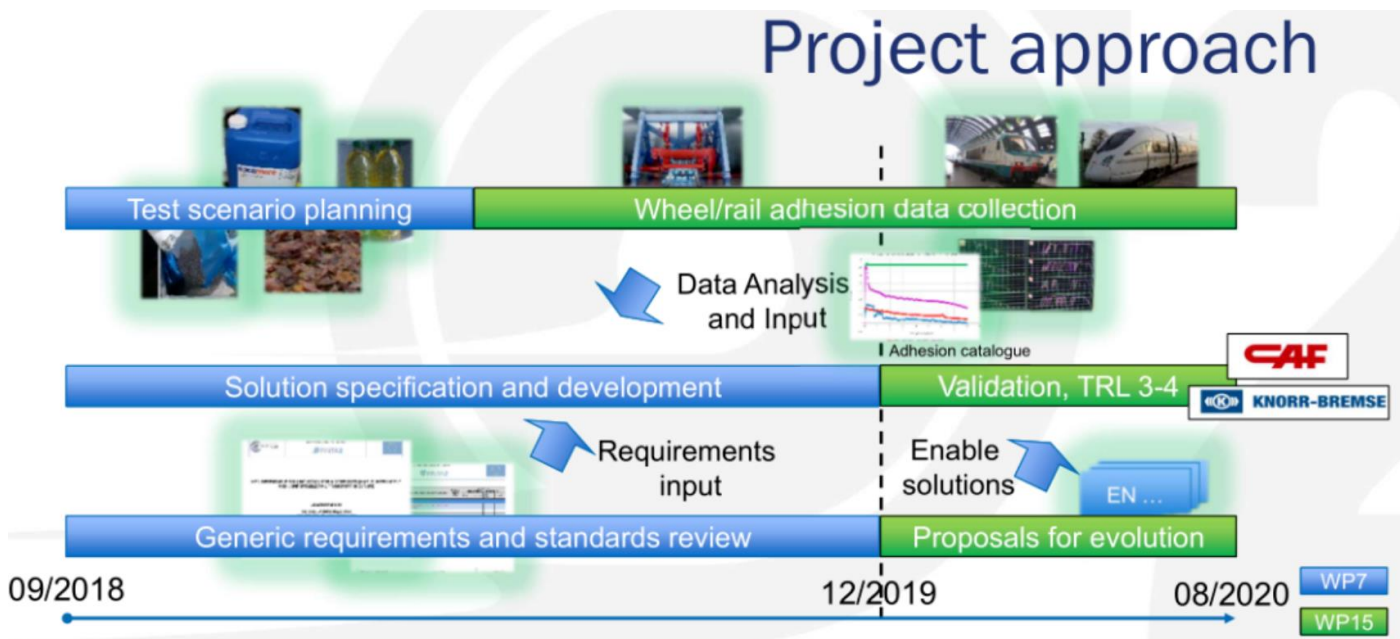


图 13 黏着数据收集研究实际工作流程

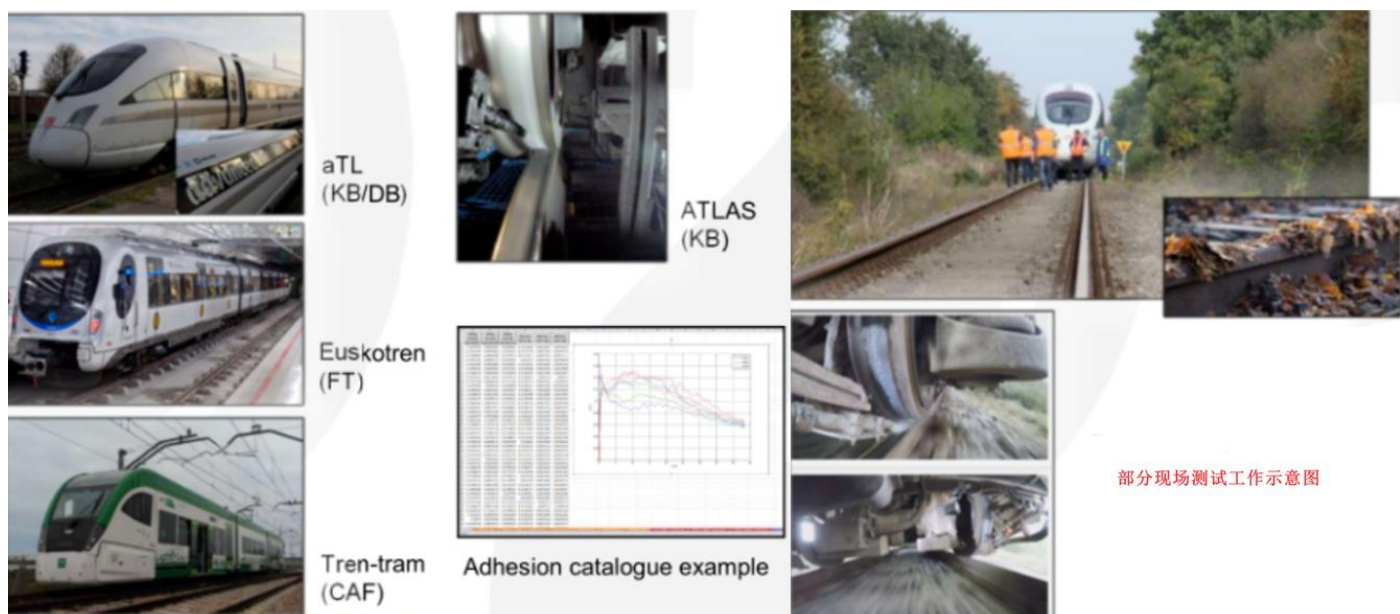


图 14 黏着管理部分实际工作

通过上述的研究工作主要获得如下成果: 法维莱的防滑自适应算法 (如图 15 所示)、黏着提升撒砂器 (如图 16 所示), CAF 的混合制动策略 (如图 17 所示), 克诺尔的制动力传输优化理念 (如图 18 所示)。并且评估更好的制动性能在未来铁路交通中的影响, 以及更新防滑测试台模型用于高效和



CAF: Blending Simulation

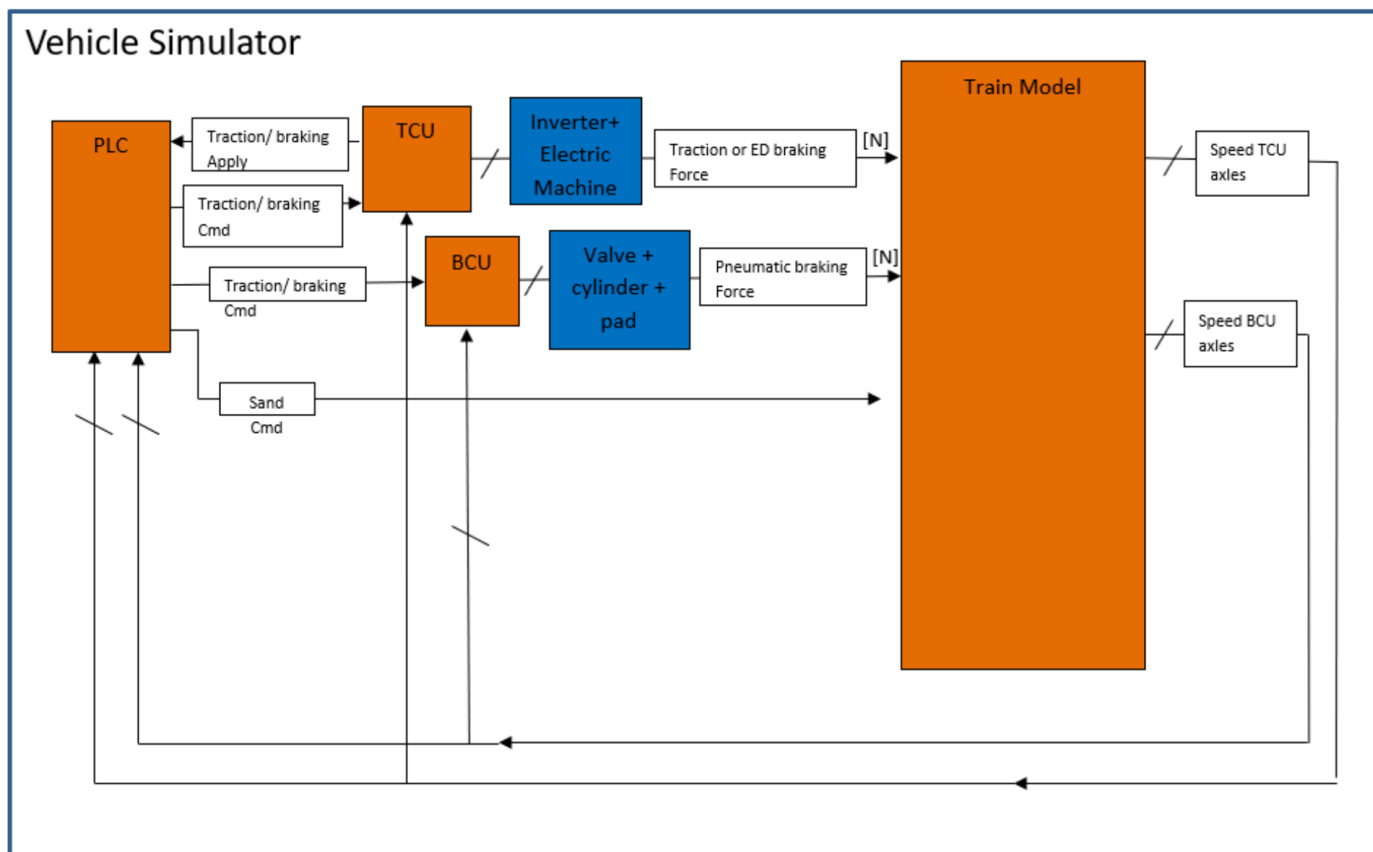


图 17 CAF 的混合制动策略



图 18 克诺尔的制动力传输优化理念

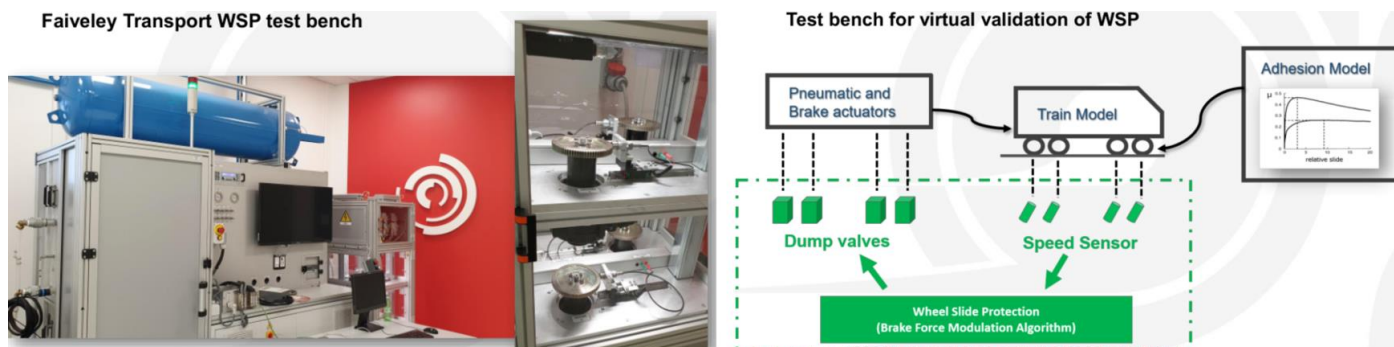


图 19 法维莱防滑测试台



表 3 黏着管理主要收益指标

PINTA2 KPI (global)	Brakes KPI (local)	KPI expectations (end of S2R)	Current status *
LCC reduction *	Commissioning costs	Reduction by 50%	Reduction by 50%
LCC reduction	Maintenance costs	Reduction by 15%	Reduction by 15%
Reliability	Reduction of braking distance extension	Reduction by 40% (from 25% to 15%)	Reduction by 40% (from 25% to 15%)

3.4 创新摩擦副；

在上述互补技术的基础上、并同时考虑黏着相关和非黏着相关的方法（比如创新的摩擦副方案、电子—机械解决方案和无摩擦低噪声解决方案），开发出未来制动系统的理念。无摩擦低噪声制动解决方案如使用涡流制动，示意图如图 20 所示。创新摩擦副，如使用碳陶瓷等新型摩擦材料进行摩擦副设计；电子—机械解决方案如图 7 右侧所示。

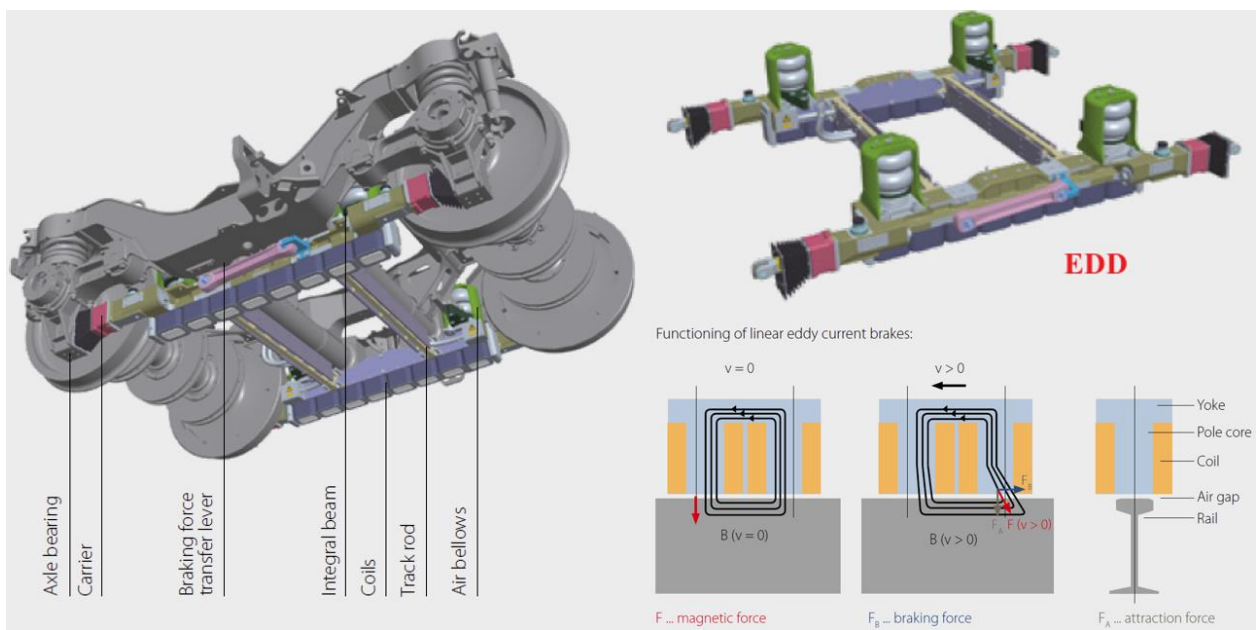
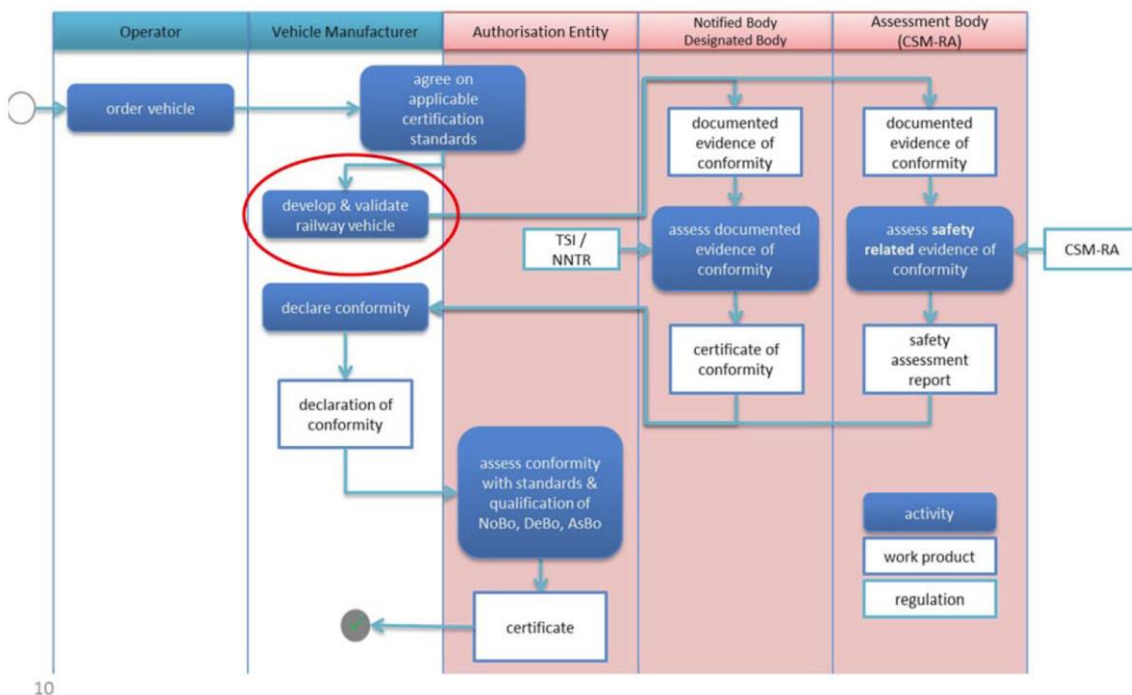


图 20 涡流制动示意图

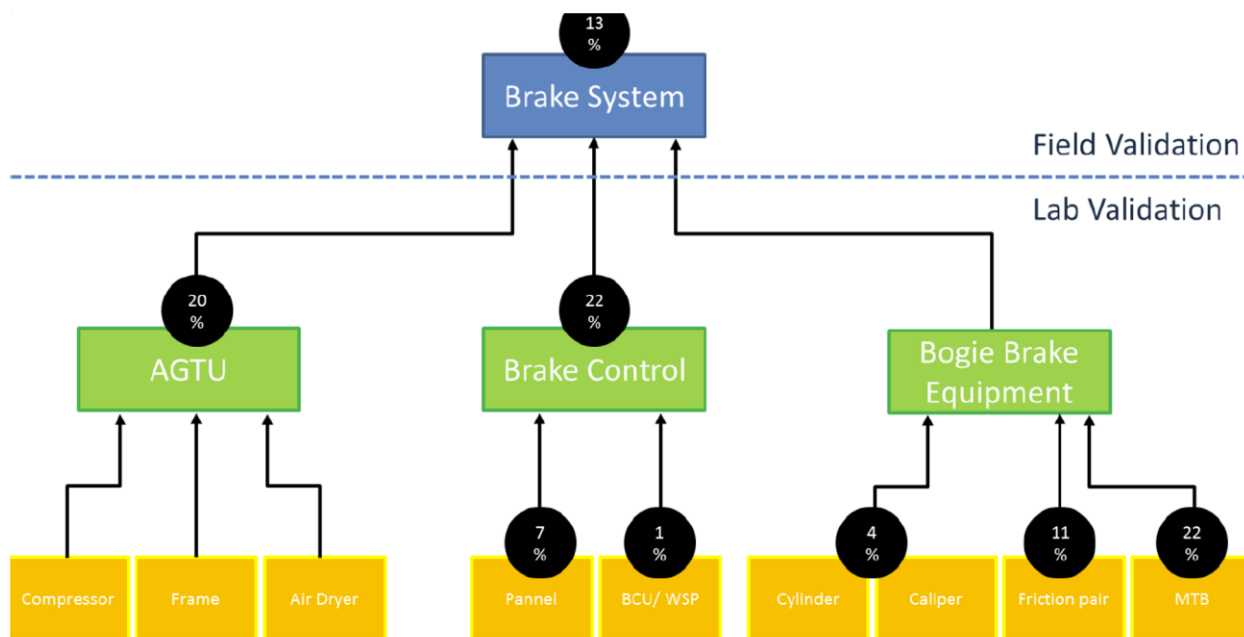
3.5 虚拟验证和认证

从虚拟验证和认证（VVC）概念发展进行介绍，介绍欧洲铁路行业验证和认证的现状（如图 21 所示）。通过具体分析，识别成本因素，希望通过模拟仿真降低潜在成本，典型的制动系统的验证成本如图 22 所示。并在认证的整体环境中识别利益相关者，列出相关法规和标准，描述认证过程和确定成本的动因，为虚拟验证和认证的有效概念提供一个坚实的基础。



Railway Vehicle Certification Process

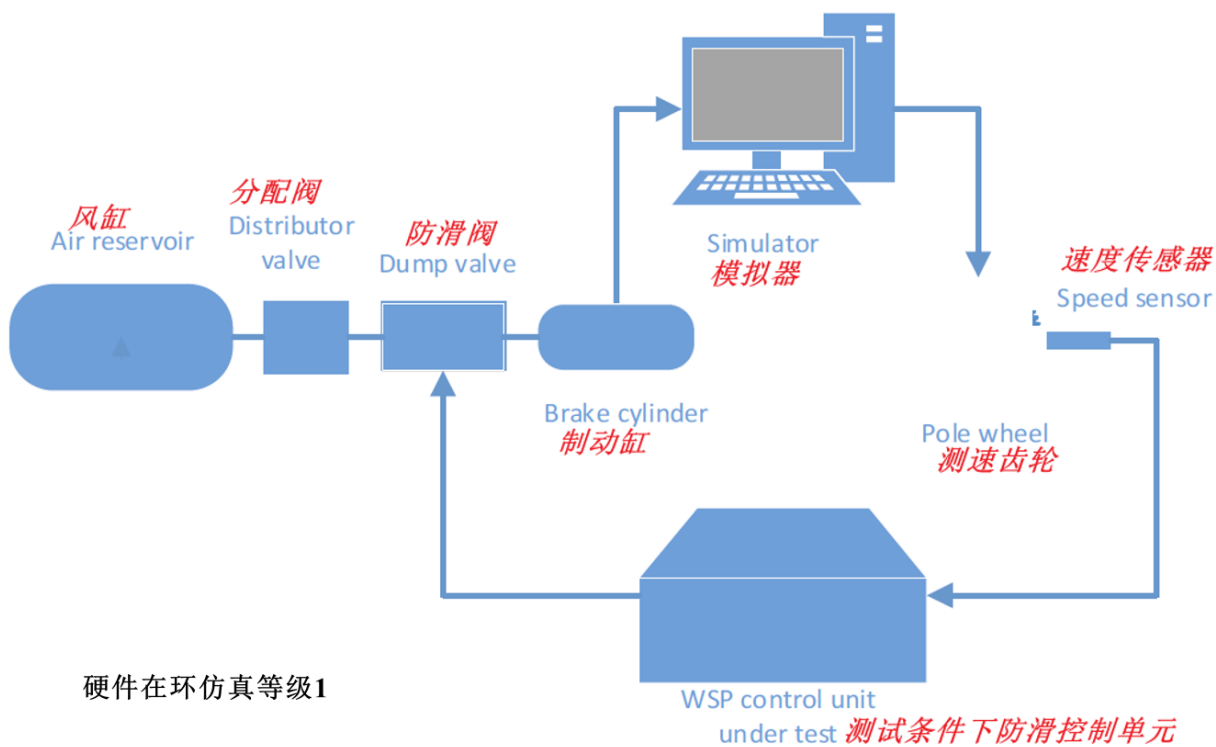
图 21 轨道车辆认证流程



Brake System Validation Cost Break-Down

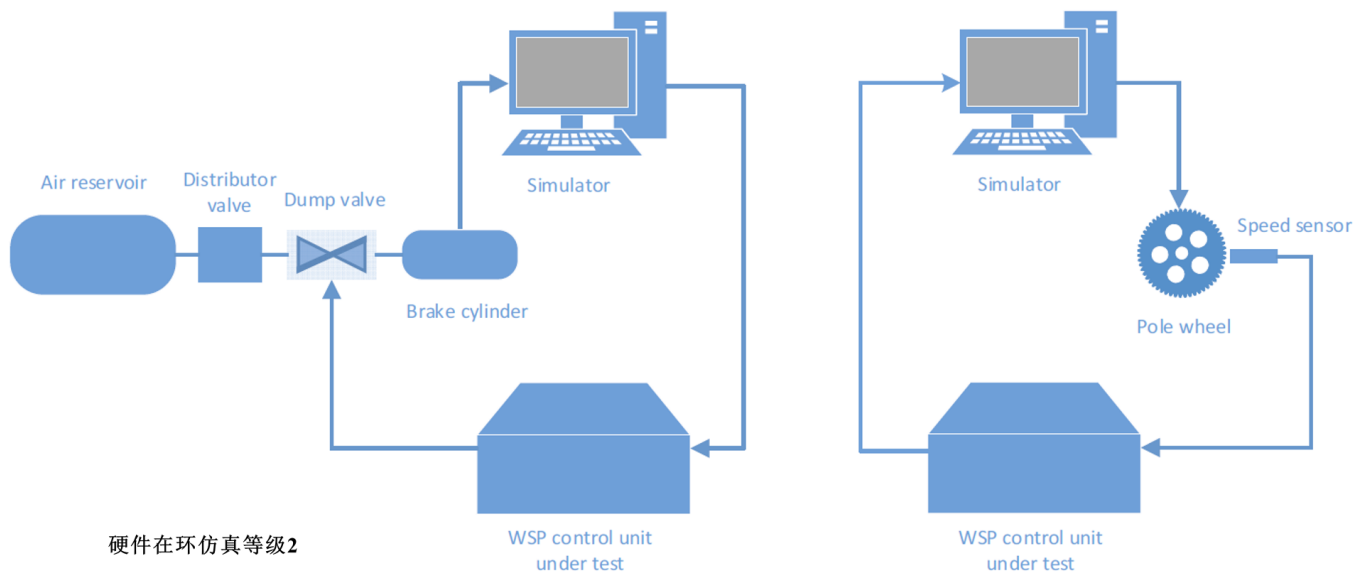
图 22 典型制动系统验证成本占比

通过分析得出结论，用虚拟工具替换车辆测试在技术上是可行的。计划中的仿真程序用于制动部件和子系统的虚拟验证和验证，将导致一种新的测试结果形式，以证明符合 TSI 要求。在这种情况下，已经建立的硬件在环模拟也将被依次取代（分为三个不同等级的硬件在环仿真模型，分别如图 23、24、25 所示），并尽可能由一个纯软件在环仿真进行模拟（如图 26 所示）。可被替换的现场测试的确切数量主要取决于虚拟工具的质量以及法律法规要求和欧洲标准中给出的可能性。



硬件在环仿真等级1

图 23 硬件在环仿真等级 1



硬件在环仿真等级2

图 24 硬件在环仿真等级 2

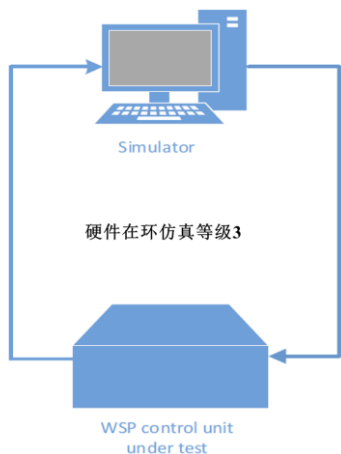


图 25 硬件在环仿真等级 3



图 26 软件在环仿真



考虑到质量问题，有必要对新近获得的测试结果建立必要的置信度。根据验证程序，对仿真结果的质量和完整性的要求至少和常规方法得到的结果一样高。因此，对 VVC 工具(包括相关流程)和 VVC 提供者的进行必要的认证，有利于提高对通过虚拟环境获得结果的信心。同时，调整了相关欧洲标准 EN ISO/IEC 17025 的要求，以适应虚拟环境的要求，该标准是目前测试实验室及其测试过程认证的基础。

为了使更多的虚拟测试切实可行，需要调整法律要求（例如 TSI）和欧洲标准。根据具体情况，或在铁路部门(包括授权机构)内达成普遍共识，根据制造商与公告机构之间的专业知识和协议，以达到用虚拟工具取代车辆现场验证测试的方式对车辆制动功能的验证是可行的。

4.结论

完整的 S2R 计划通过上述不同项目之间的互相验证和配合实现了未来制动系统的概念设计，并按照相关方案进行全系统方案设计、技术示范及测试。

总体上，为匹配高性能无线传输技术在轨道列车上使用，实现制动系统的虚拟验证和认证。对传统制动系统进行功能细化分解，定义适用于线控制动的设计需求并对部分功能进行整合和相关安全性分析，以此开发出一套高 SIL 等级的电子控制单元；同时基于对轮轨不同黏着实测数据的收集，对恢复黏着系统进行性能需求分析，介绍实验室黏着建模过程及仿真模型，开发一套防滑自适应算法并配合撒砂装置以满足低黏着条件下制动力有效施加；另外对新型摩擦副进行匹配研发，开发电机械制动设备和长寿命低磨耗的制动盘、制动闸片以及无摩擦低噪音的涡流制动系统。最后对制动系统的评估和验证流程进行分析，提出对其进行虚拟验证和认证的流程和方法。

鉴于上述完整的创新型制动系统的开发和验证，对于未来行业的发展将会起到巨大的推动作用，实现车辆从传统的气动控制执行制动到未来的线控制动及相关制动性能的虚拟验证和认证，大幅缩短车辆的验证周期并减少验证成本，同时为了适应环保要求，开始使用无制动磨耗粉末的新型摩擦材料甚至开始使用低噪声无磨耗的涡流制动方式参与紧急制动。

5.参考文献

<https://shift2rail.org/>