



铁路牵引中的车轮磨损分析

# 跟踪分析

了解机车车轮的磨损情况是准确预测退化和维护需求的关键因素。瑞士联邦铁路（SBB）和 ABB 联合启动了一个数据收集与分析活动，旨在更好地了解 Re 460 型机车的车轮的磨损和轮对的退化情况。

—  
**Andrea Cortinovis,**  
**Lucas Schmid,**  
**Christian Huber**  
ABB 牵引事业部  
瑞士图尔吉

andrea.cortinovis@  
ch.abb.com  
lucas.schmid@  
ch.abb.com  
christian.huber@  
ch.abb.com

**Robert Birke**  
ABB 集团研究中心  
瑞士巴登

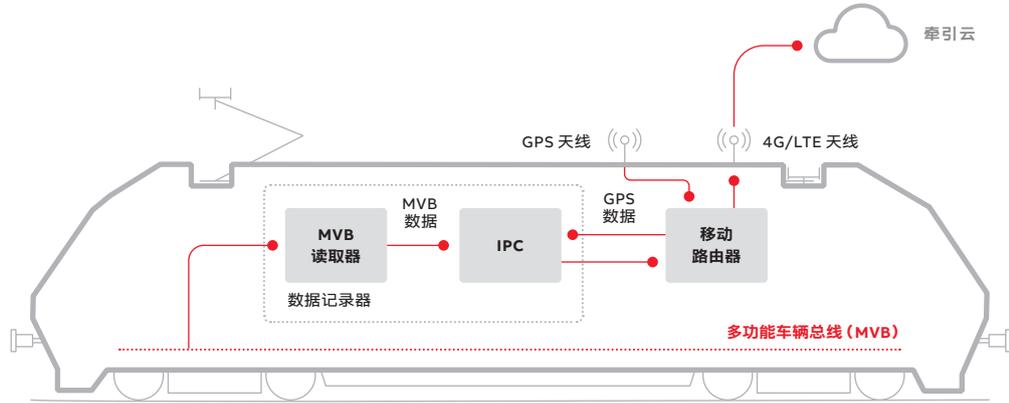
robert.birke@  
ch.abb.com

输送乘客和货物，机车必须施加牵引力。只有当车轮“抓紧”轨道时，才能有效施加这种力。换言之，驱动列车加速的牵引力必须与轮轨间的粘着力相匹配。如果在正常情况下施加的牵引力超过粘着极限，这种粘着就会消失，车轮就会在没有“抓紧”轨道的情况下旋转，从而使列车无法加速。这种现象被称为车轮滑转。粘着极限车轮滑转由多种因素决定，包括压在轮轨界面上的重量，轮轨的坡度，机车司机的行为以及会限制可用牵引力的环境条件（如湿度，天气情况以及轨面污染）。

车轮滑转不仅是一种麻烦，也是导致轮轨磨损和退化的原因。磨损和退化还受到列

—  
该项目寻求传动系和粘着力控制优化。

车与轨道相互作用的其他方面的影响，包括振动、加速和制动力。



01

— 01 Re460 型机车数据收集。

— 02 从原始数据到客户利益的数据流。

### 轮轨相互作用

铁路运输的性能、安全、运营成本以及可靠性均取决于轮轨相互作用处所发生的机械互动。如参考文献[1]所述。参考文献 [2] 提供了故障预测与健康管理的详细概述。

作用非常复杂，并且受到多种可变粘着条件的显著影响，这会引入与动力传动系统尤其是从动轴的相互作用。需要更深入地了解这些影响，如此才能优化传动系和粘着力控制，并实现系统的整体改善。

轮轨间的相互作用受到多种可变粘着条件的显著影响。

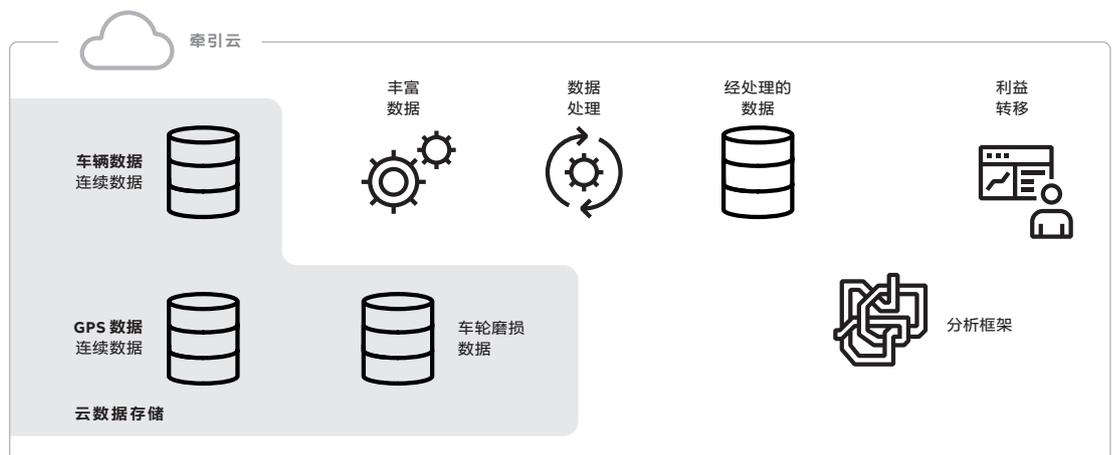
### 合作伙伴关系

瑞士联邦铁路 (SBB) 和 ABB 建立合作关系，共同利用数字化技术来获得对 Re 460 型机车车队车轮磨损状况更深入且数字驱动的意见 [3]。

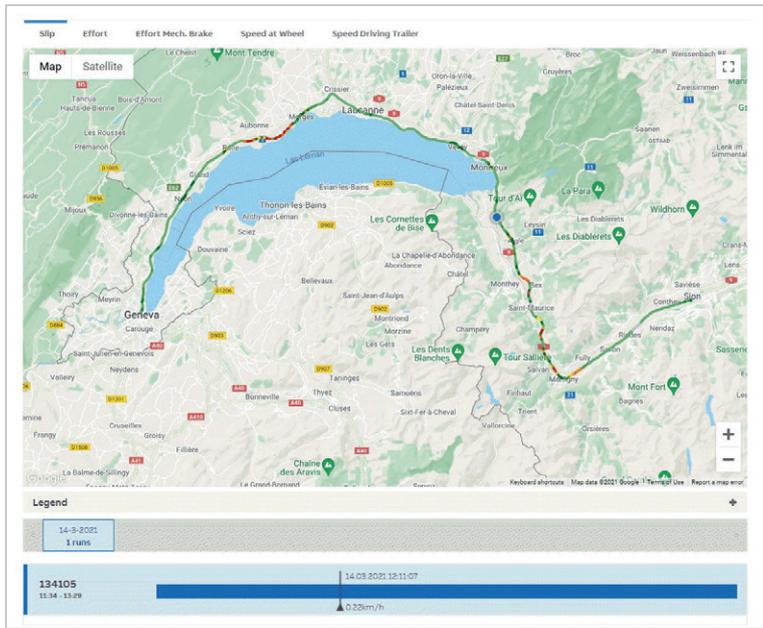
在过去数十年中，众多研究项目的开展增加了人们对轮轨力学性能、轮轨型材维护、转向架力学性能（刚度等）和轨垫阻尼性能的了解。

119 台 Re 460 型机车最初于 20 世纪 90 年代建造，配备由 ABB 提供的电气设备[4]。车队最近接受了一项由 SBB 和 ABB 联合实施的重大改装计划，包括安装最先进的新型转换器 [5]。

但在实际运行中，轮轨在接触面上的相互



02

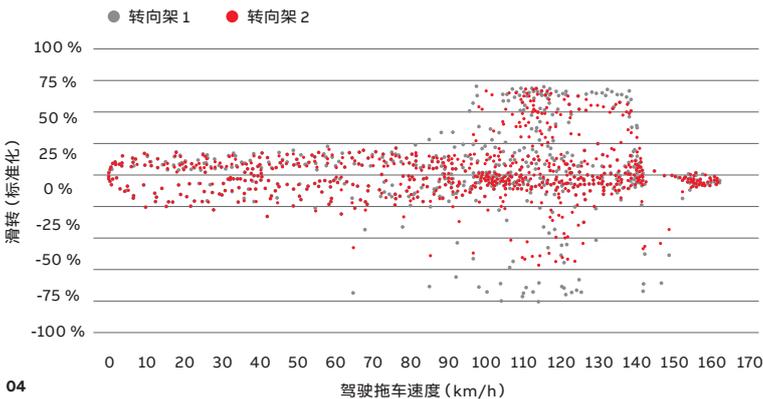


中的空气压力、轴的扭震强度、四根从动轴的转度以及车辆速度。

第二数据通道可捕获机车每秒的地理位置。这些数据由一台移动路由器提供，移动路由器作为标配件安装在每台 Re 460 型机车

Web 门户允许识别异常或特殊事件/情况。

03



中。此外，该路由器可通过移动网络在 IPC 和牵引云之间提供安全的数据传输通道。此连接用于传输收集到的数据 → 02。

**从数据到知识**

完成数据摄取后，牵引云便可利用数据管路对数据进行处理和存储。一些典型的数据管路任务有数据源的融合（例如离线车轮磨损数据）、数据的聚合、对不同统计数据的计算、数据分析等。最终通过可视化、生成报告、数据界面等方式实现客户利益转移，作为合作之中建立分析工坊的基础。

研究中包括的调查领域有：在具挑战性的粘着条件下，牵引力控制的行为；以及使用吊索制动、紧急制动或撒砂器的频率和条件。在 Re 460 型机车改造中，特别注意了解轮对的滚动行为[6]。

**收集数据**

本项研究中使用的五台 Re 460 型机车配备一台可与铁路兼容的工业计算机（IPC），通过MVB 读取器从多功能车辆总线（MVB）读取数据 → 01。

MVB 读取器经过专门配置，能够以 20 Hz 的采样率读取与轮轨接触相关的所有信号，并将其传输至 IPC。例如，捕获到的信号包括：牵引动力、主制动管和制动气缸

作为一个利益转移的例子，为了实现记录数据的可视化，开发了一个定制 Web 门户。它可以提供机车的历史使用情况的快速概览。此外，还允许识别异常或特殊事件/情况，以便进行更详细的分析。

除了显示时域内的最重要信号外，Web 门户还可提供用于查看数据的各种视图。例如，可以将两个信号作为点云显示在一个散点图中，也可以作为频率分布显示在一个二维直方图中。该门户还可以在地理地图上叠加数据，以识别诸如车轮滑转发生率相对较多的位置 → 03。

Web 门户不提供不同的过滤器选项，可选择仅关注数据的一个子集。例如，可以选择显示一个或两个转向架的数据。此外，用户可以按列车配置过滤数据。例如，仅限机车推动而非在前面拉动特定转向架的行程。

04

- 03 以 GPS 定位显示的轮轨滑移情况。低滑移值以绿色显示，高滑移值以红色显示。
- 04 此散点图显示了在不利粘着条件下行驶时，车轮滑转与车速的关系。
- 05 显示了同一线路上两次行程的比较（左图：不利粘着条件；右图：有利干燥条件）。
- 06 该工具允许对作为数据收集对象的各台机车的运行情况进行统计比较。

### 案例研究：不利粘着条件

下面将举例说明如何通过 Web 门户更好地了解机车在给定条件下的行为。在 →03 中，以彩色在地图上显示了（瑞士）锡永和日内瓦之间路段上雨天的轮轨滑移情况。

数据显示，在较长路段上出现不利粘着条件（以红色、橙色和突出滑移条件增加的颜色显示）。用户可以选择任意信号组合，在一个散点图中查看相同的行程。例如，在 →04 中，显示了速度和车轮滑转的关系。从该示意图可以看到，在这段行程中，车轮滑转较多的情况主要发生在速度较高的时候。此外，数据显示，前转向架（即“转向架 1”）的车轮滑转率往往高于后转向架。在不利粘着条件下，经常可以观察到这样的影响：牵引力控制可优化机车的

的总体牵引，并导致主转向架上的车轮滑转率增加，从而调节第二转向架的轨面。

优化车轮磨损为节省成本提供了巨大的潜力。

另一个有趣的比较中（如 →05 所示）。在这里，工具显示了同一铁路线路上的两次行程。左边曲线是在不利粘着条件下的记录，右边曲线是在有利干燥条件下的记录。

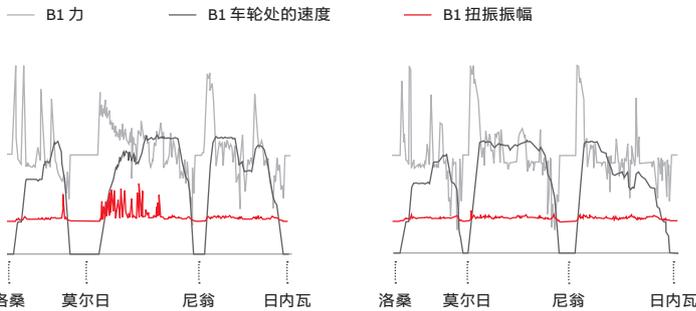
### 统计

除了详细洞察外，该工具还可用于生成快速概览。这是使用两类统计实现的：提供机车概览的一般统计；以及按 GPS 坐标汇总数据的地理统计。

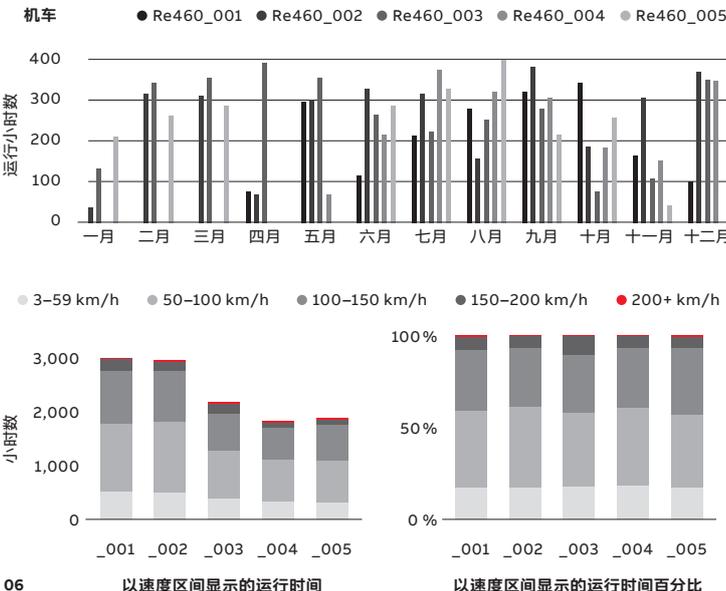
一般统计便于比较不同机车间的数据。它可以基于不同时段（例如每月和每年）提供展示数据和事件的可视化。例如，通过运行时数和运行公里数的条形图，揭示了不同机车部署的基本信息 →06。

它还可以整合这些数据，诸如查看不同的运行速度级别。

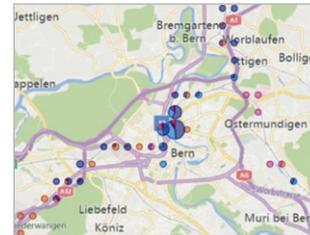
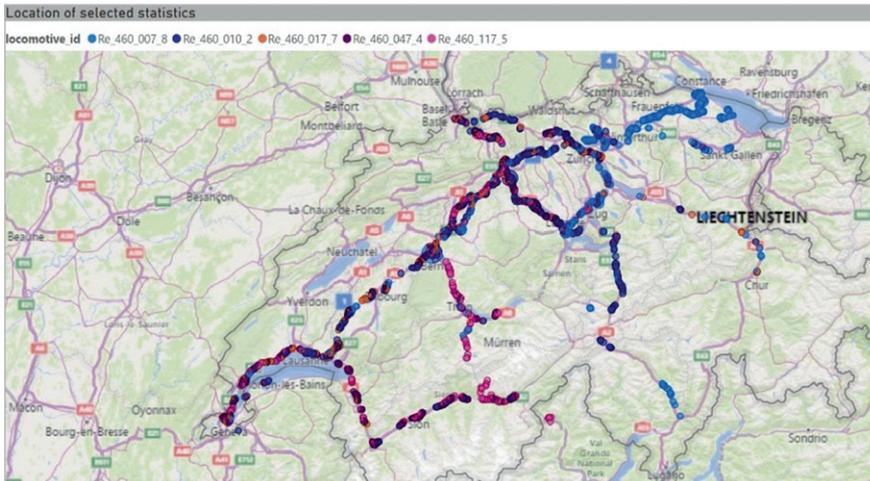
地理统计在地图上以饼图形式显示，饼图的大小表示给定参数的整个值，饼图扇区表示 GPS 坐标所对应的值。这可以解释与特定位置相关的机车数据。例如，它可以识别出存在大量撒砂 →07 或高扭振情况的区域。还可以捕获与天气数据的相关性，例如潮湿的轨道条件引起的滑移。



05



06



07

### 车轮磨损

定期检查车轮磨损情况，以确定轮对是否需要更换或进行型面镟修。更换过程非常繁琐，但即使测量和重绘车轮型面也需要停机（包括将机车退出正常运行）。因此，优化维护和车轮磨损为节省成本提供了巨大的潜力。

分析车轮磨损数据一方面是为了预测车轮磨损以便进行车轮测量仅在必要时，另一方

可以增进对众多物理交互的了解。

面，是为了确定最重要的车轮磨损因素，从而引入可延长车轮寿命的优化措施。

在执行的分析中，根据记录的数据和先前知识，创建可能影响车轮磨损情况的列车信号列表。然后，将这些信号输入特征选择过程，以确定最佳的模型输入。首先，

去除恒定信号。然后，用剩余信号的递减子集训练模型。每次通过时，都会去掉重要性评分最低的信号。然后，使用其决定系数来评估简化后的模型 →08。决定系数表示按模型解释的数据中的不一致程度（越高越好，最大为 1.0）。基于决定系数，选择在模型性能方面代表最佳折中的最小信号组（图示案例中为 5 个）。这些信号用作数据驱动式模型所用的输入信号。

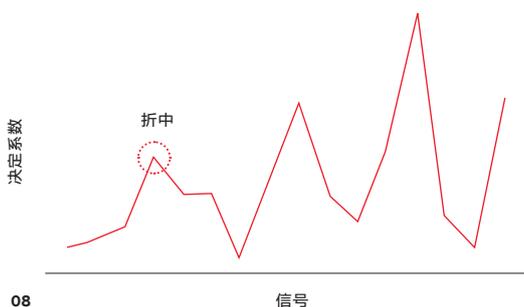
通常使用基于里程的简单线性回归模型来预测车轮磨损。通过使用更多数据和探索不同的机器学习算法，可以构建更精确的模型。为了说明模型的准确性，→09 显示了测量值（x 轴）和预测值（y 轴）的关系。理想情况下，所有点都应该位于对角线上，这意味着预测值等于给定值。

与简单线性回归模型（左）相比，随机森林模型（右）使用 →10 所示的 5 个信号将平均绝对误差减小了 22.8%。

### 可执行的结果

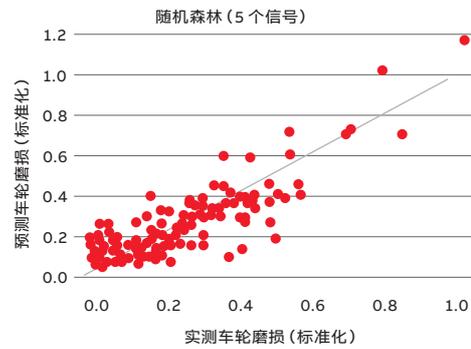
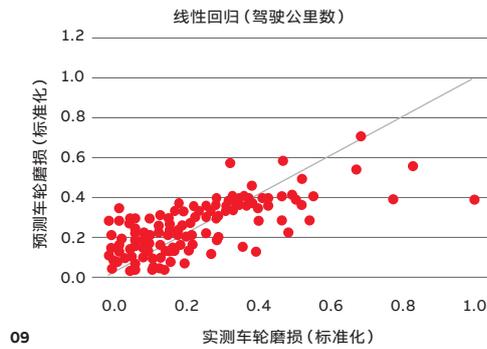
借助在该项目中收集和分析的数据，增加了对众多物理交互的了解，并提高传动系和车轮磨损机制的透明度。这允许在传动链区域进行软件调整，从而增加轮对的运行里程。

除了最初在合作中定义的研究领域外，发现还可以将记录的数据用于其他感兴趣的领域。这方面的一些例子有对预防轴达到疲劳强度的支持等，例如在扭震方面，可在试运行之前发现传感器问题，了解受电弓与固定式架空线路间的反弹等，这些例子展示了如何通过使数据更具可处理性和

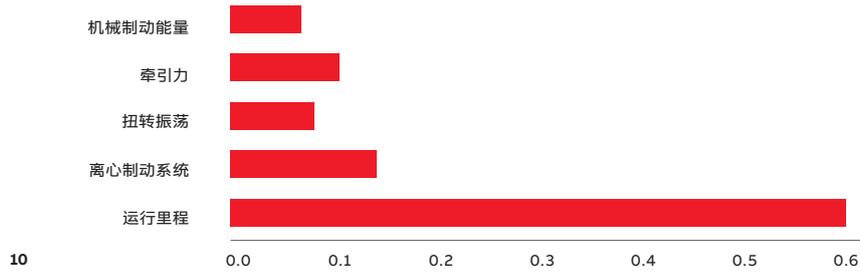


08

- 07 将饼图叠加在地图上，显示撒砂器的使用频率。
- 08 决定系数，用于减少信号数量。
- 09 与简单线性回归模型（左）相比，随机森林模型（右）将平均绝对误差减小了 22.8%。
- 10 来自选择过程的 5 个信号。



09



10

结构性的方式，以一种更通用的方式利用数据，以及如何发掘隐藏潜力。通过此项目掌握的技术知识也将用于未来的逆变器设计和转换器控制之中。

最后，任何重大项目运行都离不开一些“教训”。尤其是在项目的早期阶段，在能够可靠地记录数据并创建一个良好的数据库之前，需要做大量的工作。数据本身也带来了一些挑战：从整合超慢和超快时间序列到数据质量问题，更不用说要避免无处不在的相关性与因果关系混淆陷阱。

除了最初定义的研究领域外，还可以将记录的数据用于其他感兴趣的领域。

该项目也是共同创建方面的一次宝贵示范，在其中产品不只是一种可交付物品，而是 ABB 和客户共同设定目标、分享观察、从最开始到最后共同把控研发方向的一项合作。

参考文献

[1] R. Lewis, U. Olofsson, <i>Wheel-Rail Interface Handbook</i> , Woodhead Publishing, 2009.	Slovenia, 18–22 June 2017.	[4] J. Luetscher, J. Schlaepfer, The 'Locomotive 2000' – a new generation of high-speed, multipurpose locomotives – 99 main-line locomotives with AC propulsion for Swiss Federal Railways, <i>ABB Review</i> 10/1992, pp. 25–33.	[5] T. Hungerberger, IGBT converters extend life of Re460 locomotives, <i>ABB Review</i> 1/2017, pp. 65–69.	ABB Switzerland press release, July 14, 2020, <a href="https://new.abb.com/news/de/detail/65238/abb-increases-the-energy-efficiency-of-the-locomotive-2000-for-an-even-more-sustainable-operation-in-the-future">https://new.abb.com/news/de/detail/65238/abb-increases-the-energy-efficiency-of-the-locomotive-2000-for-an-even-more-sustainable-operation-in-the-future</a> [访问日期: 2022 年 4 月 11 日]。
[2] P. Dersin, A. Alessi, B. Lamoureux, M. Brahimi, O. Fink, "Prognostics and health management in railways", 27 <sup>th</sup> European Safety and Reliability Conference (ESREL 2017), Portoroz, Slovenia, 18–22 June 2017.	[3] A. Cortinovis, R. Birke, L. Schmid, T. Wymann, C. Fehrenbach (2022). Radverschleißuntersuchung im Co-Creation-Ansatz: Von Rohdaten zum besseren Verständnis der Radabnutzung ZEVrail, ZEVrail, 2022, issue 08 (待出版)		[6] "ABB increases the energy efficiency of the 'Lok 2000' for even more sustainable operation in the future",	