



[软件]

实现磁悬浮列车仿真



随着原油价格不断飙升，环境污染问题日益严重，政府和运输部门急需寻找一种方法来应对这些问题。磁悬浮技术就是一个很好的解决方法。

磁悬浮列车依靠电力运行，承载乘客和货物，与卡车和飞机相比，更经济、快捷、安静和环保。磁悬浮系统采用特定轨道，不会占用太多空间，而且车身和轨道的使用寿命至少是 50 年以上，与卡车和飞机相比，它的使用寿命更长，并且维护成本更低。

严格的从成本结构来看，磁悬浮技术能保证能源利用的有效性和持久性，大大减少能源的使用。与欧洲高速火车相比，典型的磁悬浮列车所需要的能源仅不到高速火车的 30%，而与传统运输工具相比其优势更加明显：汽车的能源消耗量是磁悬浮的 3 倍多，飞机更是高达 5 倍。此外，磁悬浮列车还是一种非常安静的交通运输工具，在行使速度达 240km/h 时，仅产生 69 dB 的噪声，这样的声量级在城市中完全可以忽略不计。

“现在很多亚洲国家正在计划开展新的铁路服务，他们认为采用磁悬浮列车是将来交通运输的发展方向。这与欧洲大部分国家不同，因为欧洲大部分国家的城市已经有了发达的市郊和市内的传统列车线路。”韩国机械和材料研究院（KIMM）高级研究员 Hyungsuk Han 博士说。KIMM 是由韩国政府出资建立的科学技术研究机构。

亚洲磁悬浮技术的应用

亚洲首列磁悬浮列车是中国上海的高速磁悬浮列车，乘客能够在短短的 8min 内从市内的商业区到达浦东国际机场。采用德国技术，耗资 8.2 亿的上海城际磁悬浮列车仅花费两年时间建成，并于 2004 年投入使用。著名的日本 Shinkansen 高速列车也采用了磁悬浮线路，在 Yamanashi，测试列车速度的最高纪

录达 581km/h，这比法国的 TGV 还要快 6km，TGV 是世界上首列商用城际磁悬浮列车，是为 2005 年的 Nagoya 世界博览会而修建的。

创建未来主流运输系统

韩国也是开展磁悬浮列车项目的国家之一，于 2006 年投资 2.85 亿开展城市磁悬浮列车项目。与中国和日本的高速列车不同，由韩国政府出资的磁悬浮列车项目重点开发 100 km/h 的中低速列车，其实用性类似于城铁。韩国政府科学技术研究机构——韩国机械和材料研究院 KIMM 参与了这个项目，主要负责磁悬浮列车的开发和系统集成。Hyundai-Rotem 负责构建磁悬浮列车，韩国铁路网部门则负责修建轨道。

整个开发项目进展迅速，这得益于来自 26 个企业、院校和研究机构的 300 多名研究人员和工程师的团队合作，目前列车已经进入市场投放阶段。中期计划包括 2011 年在 Incheon 国际机场开放 6.1km 的城市磁悬浮线路。如果能够按照预订计划实施，韩国磁悬浮列车将于 2013 年正式投入市场使用。

首列磁悬浮列车的仿真

在该项目的早期阶段，KIMM 的 Han 博士和他的开发团队进行了大量重要的研究工作，来评估和改善现有磁悬浮列车的性能。为了更好的完成这项任务，Han 博士和他的团队选择 LMS Virtual.Lab 来帮助开发虚拟的磁悬浮列车模型，这是世界首列磁悬浮列车仿真模型。

“磁悬浮列车仿真需要计算出列车和柔性轨道之间非接触式的相互作用，这是一项极具挑战性的工作。我们也考虑过其他解决方案，但最后认为只有 LMS

Virtual.Lab Motion 多体动力学仿真软件能够帮助我们成功模拟出关键的列车电磁铁和轨道之间的相互作用，这是一个非常复杂的过程。” Han 博士说。

集成的悬浮算法

与汽车或者飞机的仿真不同，磁悬浮列车开发团队首先需要根据相对位置和速度计算出电磁力，然后，这些计算出的力再施加于模型中的磁悬浮列车车身和轨道上。为了有效完成这项工作，开发团队创建自己用户自定义子程序，包括柔性接触和常微分方程 (ODE)。磁悬浮列车模型的成功创建还有赖于计算的准确性，以及能够在 LMS Virtual.Lab Motion 多体动力学求解器内集成柔性接触子程序。

“这些用户自定义子程序能够仿真轨道和 48 个电磁铁之间的相对位置和速度。每个电磁铁被分解成 20~30 个子部分，这样能够精确计算出垂直方向的力和侧向力。然后团队定义了 300 个与电磁力相关的常微分方程，来计算由电磁铁产生的升力和导向力。不规则的侧面和垂直外轮廓被定义为切线、过渡和圆形曲线部分。之后这些电磁力再施加给磁悬浮列车车身和轨道。” Han 博士解释说。

只用两周完成构建模型

KIMM 开发团队即便从 LMS 的合作伙伴 SVD 那里获得帮助，构建轨道模型，但在短短两周内创建如此复杂的虚拟模型，同时还要考虑集成新的悬浮效应算法，这本身就是充满挑战的任务。

“这是第一次构建包含电磁机构和柔体轨道之间相互作用力的整车多体动力学模型，并达到能够进行功能品质分析的水平。

这也是首次对磁悬浮列车进行整车仿真，包括磁悬浮列车转向架操控机械装置和转向架耐久性分析。” Han 博士补充说。

模型创建成功以后，开发团队按照模型的分析步骤运行模型来改善磁悬浮列车的整体性能。KIMM 还使用 LMS Virtual.Lab Motion 分析了其他关键属性，如平顺性、振动和耐久性。LMS Virtual.Lab Motion 涵盖了所有处理步骤以及所需技术，能够从头到尾进行完整的设计评估，这有助于研究人员检查一些细节，例如，悬浮稳定性和曲线通过能力——这是一个技巧性设计，因为转向架机械装置需要具有良好的转向能力来通过小半径弯道。开发团队还使用软件包优化设计，解决关键问题，如和轨道规范相关的成本问题以及悬浮控制。

“在设计稳定的经济型轨道与保证乘客的舒适性和平顺性两者之间寻求平衡非常重要，” Han 博士说。“我们自己编写了能够处理悬浮力算法的子程序，因为 LMS Virtual.Lab 不仅能够处理像磁悬浮列车这样复杂模型的仿真，还具有能让我们自己编写处理悬浮力算法子程序的功能。另外，LMS Virtual.Lab 能够大量节省 CPU 处理时间，这对于计算 48 个电磁铁，每个电磁铁根据 300 个方程分解成 20~30 个子部分来说非常重要。此外，流程化处理设置功能使得我们能够在两周时间内构建可运行的模型。”

LMS Test.Lab 验证模型

为了验证世界首辆磁悬浮列车仿真模型，KIMM 采用 LMS Test.Lab 试验系统测试真实的磁悬浮列车样车 UTM2，来验证计算结果的准确度。KIMM 工程师测量了真实的磁悬浮列车样机的动态

响应，如辅助悬架的频率响应函数 (FRF) 和电磁控制系统，利用这些信息来交叉对比仿真模型的准确性。例如，工程师比较列车和柔性轨道之间的共振，对轨道和转向架机械装置的振型进行采样分析。

LMS Test.Lab 还可以用于研究平顺性和操控性设计，包括影响平顺性的减振系数、气垫刚度对平顺性质量的影响以及转向架曲线特性的效果。

成功“悬浮”

由于成功采用了 LMS Virtual.Lab 仿真平台创建虚拟的磁悬浮列车模型，以及使用 LMS Test.Lab 试验系统验证仿真结果，KIMM 表示韩国首辆磁悬浮列车已在 2008 年 4 月推出。从韩国国家科技博物馆出发至博览会公园，大约 1000km 的路程。自 2005 年，韩国政府已经投资大约 640 万建设磁悬浮列车设施，包括轨道、桥梁和车站。“我非常激动能够看见首列磁悬浮列车试运行。” Kunkuk 大学校长 Oh Myung 先生说，他在教育部任副主席的时候已经开展这个项目。整个计划预计 2013 年完成，韩国是继中国和日本，第三个将磁悬浮列车用于公共交通服务的国家。整个城市磁悬浮列车路线分为 6 站，包括为 2014 年亚洲赛准备的水公园车站。“LMS Virtual.Lab 是唯一一个能够集成悬浮力算法的仿真解决方案，能通过创建电磁力的模型真实体现列车性能。这有助于我们得到最真实的仿真效果，” Han 博士总结道。“LMS Virtual.Lab 还能够解决其他任务的关键因素，如轨道特定成本以及悬浮控制系统。此外，LMS Test.Lab 验证流程也进一步保证了磁悬浮列车的成功推出。” KIMM