

Raychem RPG 公司, 印度

铁路运输架空设备性能的仿真优化

作为振兴国家铁路系统计划的一部分, 印度 Raychem RPG 公司的研究人员使用结构力学模拟和优化设计了一种用于接触网和线的自动张力装置和模块化悬臂梁。

作者 ADITI KARANDIKAR

铁路网是印度交通运输的主干系统, 将遍布印度全国的偏远乡村和城镇与交通发达的大城市相连接。在过去几年里, 印度铁路系统发生了许多变化, 印度政府近期正在着手计划于 2030 年以前对整个铁路网进行改造和现代化建设。从技术角度预测, 印度铁路将发生两个显著变化: 引进电力和太阳能火车; 火车的运行速度将从 100 km/h 增至 160 ~ 220 km/h。为了支持这些计划, 印度铁路系统必须对现有的基础结构和组件进行适当的升级, 例如轨道上的架空设备, 包括接触网和线以及受电弓装配。

Raychem RPG 公司是为不同领域提供创新能源解决方案的行业领先者, 致力于为不断发展的铁路网开发所需要的产品。由 Ishant Jain 领导的研究团队通过多物理场仿真技术优化了铁路运输架空设备中的两个关键组件——自动张力装置和模块化悬臂梁。

» 保护架空线路: 自动张力装置和模块化悬臂梁

在电动轨道系统中, 电力由沿着铁路轨道全长延伸的架空线

“使用 COMSOL® 软件对模块化悬臂总成进行结构优化得到的不同设计, 为 Raychem 公司获得了 4 项专利。”

—— ISHANT JAIN, RAYCHEM RPG 公司

路供给, 并通过安装在机车顶部的受电弓(集电器) 传输到列车。自动张力装置(图 1, 左) 具有自动校验机制, 是接触线的终止点。安装架空线路的导线时需要特殊的张力, 其大小随时间变化, 并且与环境温度紧密相关。不合适的张力会使架空线下垂或拉紧, 导致受电弓缠结或架空设备线折断。

类似地, 架空模块化悬臂梁用于支撑架空输电线, 其中包含接触网导线、接触件和吊索, 并通过绝缘子将总弯曲、横向和纵向的载荷施加到桅杆上(图 1, 右)。一款好的悬臂梁设计需要轻巧且坚固, 能够支持速度为 250 km/h 的列车运行时的载流组件。除了满足这些功能性要求之外, 在设计悬臂梁时还需要考虑其易于维护、运输、操作以及美观等需求。

» 面临挑战: 轨道组件设计

为了确保高速铁路旅客的安全, 自动张力装置的设计要求非常严格。为了通过实验确定自动张力装置设计的正确性和效率, 通常需要进行拉力测试, 而这往往需要设置大量难以实现的实验。Raychem PRG 创新中心接到的任务是设计一种质量轻且对温度波动高度敏感的自动张力装置, 同时还要求便于组装和维护。

由于从欧美市场进口的模块化悬臂梁体积庞大, 并且包含许多辅助组件, 因而作为印度政府“印度制造”计划的一部分, Raychem 团队的目标是提出一种新的设计, 用于去除辅助组件并

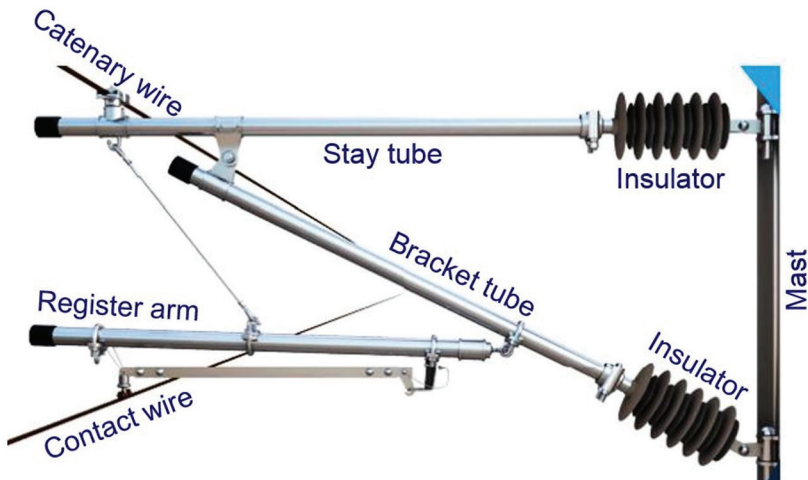


图1 自动张力装置（左）和模块化悬臂梁总成（右）。

图注：Catenary wire – 接触网导线；Stay tube – 支撑管；Insulator – 绝缘子；Bracket tube – 支架管；Register arm – 定位臂；Contact wire – 接触线；Mast – 桅杆。

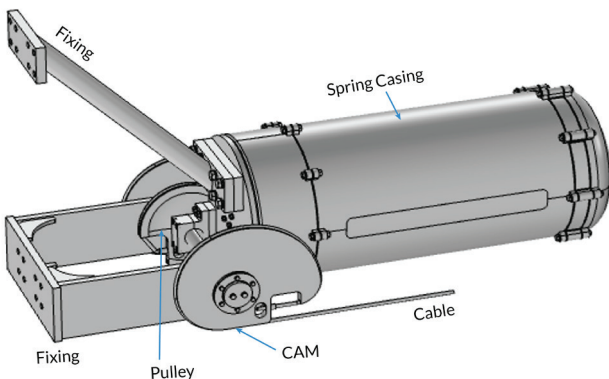


图2 自动张力装置的几何形状。

图注：Fixing – 固定；Spring Casing – 弹簧套管；Pulley – 滑轮；CAM – 凸轮；Cable – 电缆。

通过有效利用材料确保结构的完整性,从而最终节约成本并减轻设备质量。

为了实现这两个设计目标, Raychem 团队使用 TRIZ 理论(发明问题解决理论)来激发和构思各种创意,提出创新的解决方案。然后,他们使用 COMSOL Multiphysics® 软件按照铁路标准对不同方案进行了优化和设计验证。

» 步入正轨: 结构分析

Raychem 团队使用 COMSOL® 软件对自动张力装置中各个部件的结构进行了优化,并通过多体动力学分析从系统层面对组件的耦合运动进行研究。在建模过程中,团队首先导入一个典

型的装配体(图2),然后添加适当的边界条件考虑动态载荷的影响。借助模型,他们研究了外部电缆中的张力以及弹簧的弹力变化。

图3显示了施加载荷后电缆的位移和张力的仿真结果。可以清晰地看出,该装置能够保持电缆中的张力不变,满足其中一个项目设计要求。

模拟模块化悬臂梁时,他们将一个原始模型导入 COMSOL 多物理场仿真软件中。在分析过程中,研究团队很快发现现有的模块化悬臂梁设计非常笨重,而且内部的应力分布不均匀。因此,他们使用多变量优化方法对设计进行了结构优化,将总应变能与总质量标准的最小值同时设置为目标函数。

基于设计规范,团队使用拓扑优化将原始设计的系统质量减少了75%(图4,上)。此外,他们还使用优化研究创建了三维模型,并施加了静态和动态结构载荷(图4,下),模拟列车以250 km/h的速度行驶时产生的影响。

» 驶向前方: 优化设计

查看仿真分析结果可知,他们重新设计了整个自动张力装置组件,加入了一个比原组件尺寸缩减了50%的可折叠设计。此外,Jain 的团队还使用 COMSOL 软件及其附加的结构力学和非线性结构材料模块,将金属弹簧换成了聚合物弹簧。所有的设计更改优化让整个组件的质量减少了80%。Jain 表示:“通过在自动张力装置上进行结构和多体动力学分析,我们将组件的数量从早

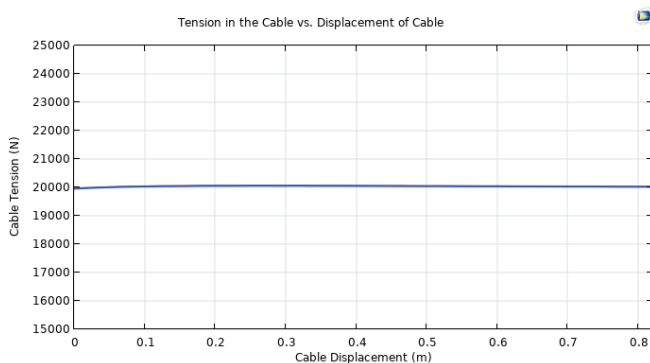
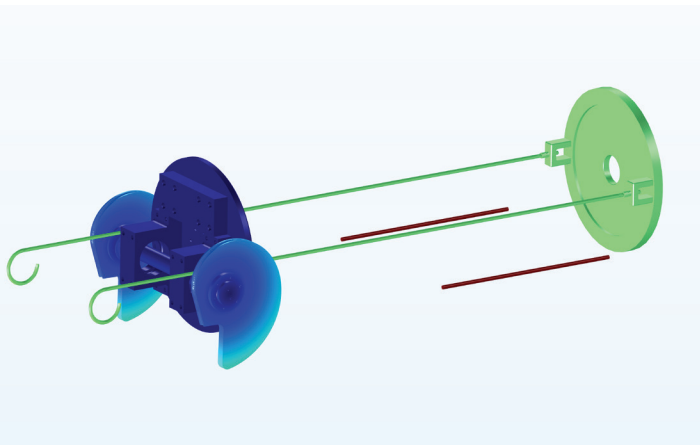


图3 施加载荷后电缆的位移（左）和张力（右）仿真结果。图注：Cable Tension – 电缆张力；Cable Displacement – 电缆位移。

期设计的 20 个减少到了 8 个。”

此外，在 COMSOL Multiphysics® 软件的帮助下，团队还建立了一个仿真模型用于优化传统的架空模块化悬臂梁。他们基于模型创建了一个简化的概念设计，随后对强度和振动模式进行了细致的结构分析，以验证优化后的新设计。仿真起到了简化设计的作用，使组件数量从 12 个减少到 5 个，质量减少约 1/3。对于两种设计方案，印度铁路局已经接受了其中的一种设计，而另一种则处于批准阶段。“使用 COMSOL® 软件对模块化悬臂梁总成进行结构优化得到的不同设计，为 Raychem 公司获得了 4 项专利。” Jain 说道。

2020 年 6 月，Raychem 团队凭借该可折叠模块化悬臂梁系统设计获得了工程领域的金孔雀创新产品奖（Golden Peacock Innovative Product Award，GPIPSA）。

» 继续直驶：未来计划

预计在未来的十年里，印度铁路基础设施将会得到持续改进。Raychem 公司的研究团队将使用 COMSOL Multiphysics® 软件为印度铁路系统开发出更多新型架空设备产品。除了能源和石油天然气领域外，Raychem 公司还将继续使用强大的多物理场仿真技术为印度铁路开发系统提供创新性解决方案。

致谢

Ishant Jain 对以下为本文研究做出贡献的人员表示感谢：Ganesh Bhoje、Nitin Pandey、Raghav Upasani 和 Hamza Saiger。☺

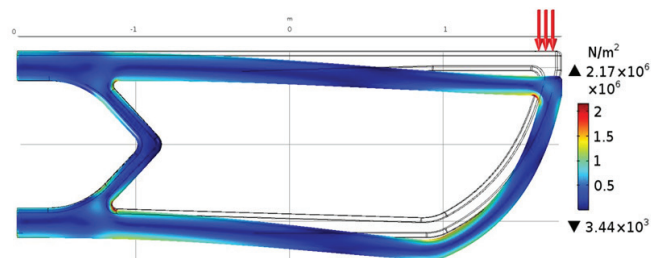
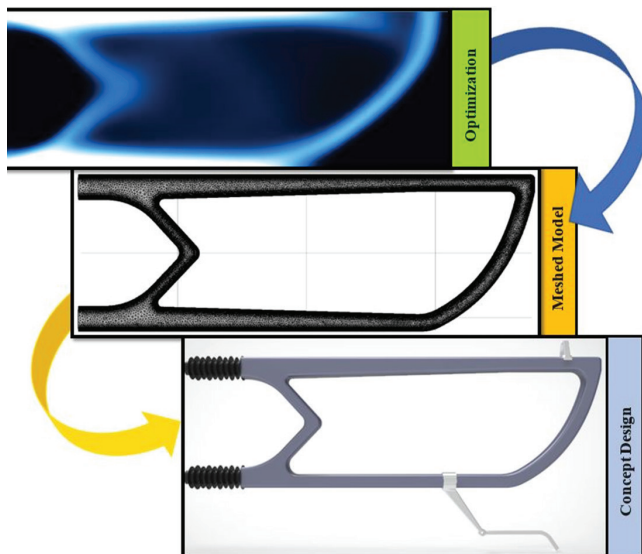


图4 悬臂梁设计优化（上）和优化模型的载荷测试（下）。

图注：Optimization – 优化；Meshed Model – 网格模型；Concept Design – 概念设计。