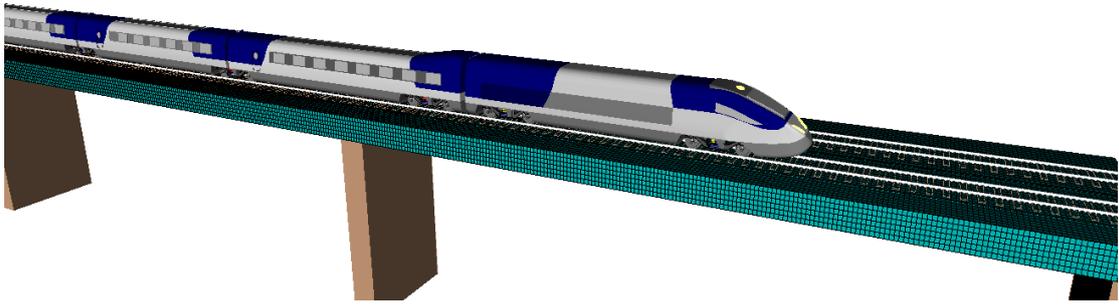


## UM VBI 铁路车桥相互作用计算方法



本文内容源自 UM 软件用户手册第 21 章，因译者学识和水平有限，难免有错误之处，恳请读者批评指正。

### 模块简介

**UM Vehicle-Bridge Interaction**（以下简称 **VBI**）模块用于建立铁路车辆或列车与柔性桥梁的动态相互作用模型（国内学者多采用术语“车桥耦合”，笔者认为“车桥相互作用”更为恰当），并完成动力学时域仿真计算及后处理工作。**UM VBI** 模块需要用到 **UM Loco**（建立铁路车辆或列车编组多体模型）和 **UM FEM**（导入外部柔性体和刚柔耦合计算）模块。

铁路车辆建模和仿真的基本方法在用户手册第 8 章有详细介绍。

**UM** 软件采用基于固定界面的 **Craig-Bampton** 模态综合法（注意：不是模态叠加法），将桥梁模型从有限元软件导入，一座完整的桥梁表现为多个柔性子系统的组装。目前，支持的有限元软件有 **ANSYS**、**ABAQUS**、**MSC NASTRAN** 和 **NX NASTRAN**，相应接口的详细介绍请见用户手册第 11 章。

这里我们着重介绍铁路车桥相互作用动力学仿真技术。**UM VBI** 研究的对象既可以是车辆，也可以是桥梁。对于桥梁来说，可以研究列车通过引起的桥梁共振问题，列车安全运营的速度和轴重限值，对比和优化桥梁设计方案等。特别是对于高速列车，共振问题尤其值得研究，桥面的剧烈振动容易导致轮轨分离和轨道结构的破坏，进而引发安全事故。通过车桥相互作用动力计算，可以直接获得桥梁各节点的动应力和动应变时程数据，根据这些数据可进一步进行桥梁疲劳耐久性分析（**UM Durability** 模块）。车速、轴重和轨道不平顺等因素决定了应力载荷水平，影响桥梁的疲劳寿命。对于车辆来说，考虑桥梁的柔性因素（垂向和横向），其安全性、平稳性和乘坐舒适性等指标都会有变化，且理论上更接近于实际的情况。

早期的铁路桥梁动力学分析一般基于简化的车桥作用模型。其中，比较常用的手段是在有限元软件中将运动的列车简化为一组移动荷载，施加于静置的桥梁。而且，这组移动荷载通常就是列车的静轮重，并未考虑车辆动力学的影响。因此，此类方法和模型并非真正意义上的车桥相互作用。

### 数学模型

**UM** 软件提供多种铁路轨道模型（注意：所有轨道及轮轨接触模型都是弹性的，无刚性轨道和刚性轮轨接触之说），其中一种是将轨道简化为连续支撑的无质量的粘弹性力元，如图 1 所示。

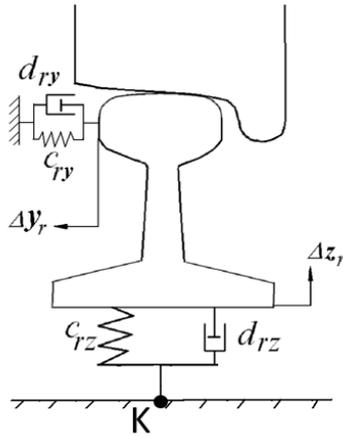


图 1 无质量轨道模型

横向轮轨力（合力）和垂向轮轨力分别取决于轮轨接触点在横向和垂向的位置与速度，计算公式如下：

$$R_y = -c_{ry}\Delta y_r - d_{ry}\Delta \dot{y}_r$$

$$R_z = -c_{rz}\Delta z_r - d_{rz}\Delta \dot{z}_r$$

其中， $R_y$  和  $R_z$  分别是横向和垂向轮轨力； $c_{ry}$  和  $c_{rz}$  分别是轨道横向和垂向刚度系数； $d_{ry}$  和  $d_{rz}$  分别是轨道横向和垂向阻尼系数， $\Delta y_r$  和  $\Delta z_r$  分别是轨道横向和垂向弹性变形。这里的刚度为轨道及下部结构的整体（等效）刚度，包括轨枕、扣件、道砟、轨道板、道床、桥梁以及各层橡胶元件。

显然，轮轨接触点处钢轨的变形和速度与图 1 中的  $K$  点位置和速度有关。当没有桥梁时， $K$  点固结于地面，其在横向和垂向的位移和速度均为 0。而有桥梁时，桥梁的弹性变形会影响  $K$  点位置，总位移为钢轨相对于桥梁的位移和桥梁的弹性变形之和，一般来说其速度也不为 0。

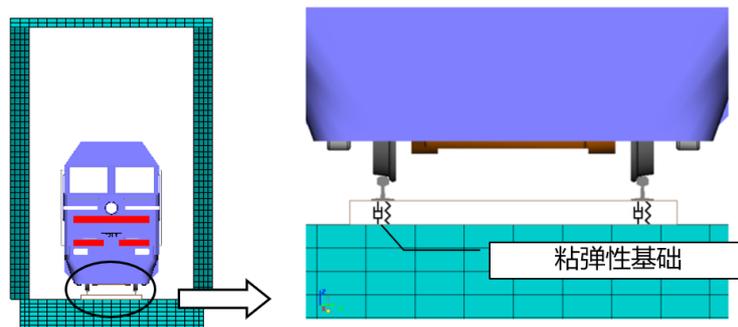


图 2 考虑桥梁柔性的粘弹性轨下基础

UM VBI 模块计算轮轨力时考虑到了桥梁在横向和垂向的柔性，可以进行真正意义上的车桥相互作用动力学分析。借助于高效而精确的 Park 求解算法，用户可以快速有效地完成仿真工作。

## 分离法与耦合法

这里我们来讨论对比两种典型的车桥相互作用分析方法：分离法（**Separate**）和耦合法（**Coupled**）。

在以往文献中，分离法应用较多，它将车辆系统和桥梁系统分割开来。首

先，进行车辆动力学计算，获得轮轨接触力的时程数据。然后，将动态的轮轨接触力施加到桥梁有限元模型，并匹配每一时刻的车轮和桥梁受力点位置，如图3所示。尽管分离法可以得到比较有用的桥梁动态响应，但由于车辆动力学计算时并未考虑到桥梁柔性的影响，因此车辆的安全性、平稳性和乘坐舒适性指标并不能反映实际情况。

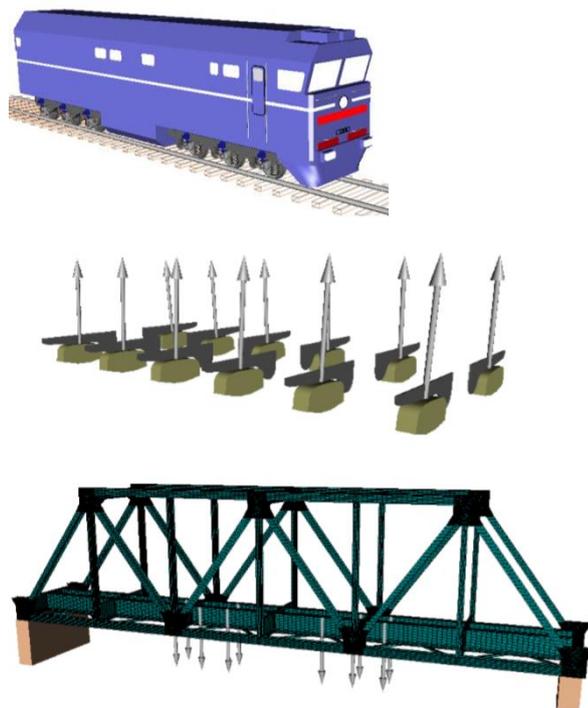


图3 分离法计算过程

而耦合法则考虑车辆系统和桥梁系统的交互作用（迭代）。当车辆运行到桥梁上时，车辆荷载会使车轮下方（轮轨接触点处）钢轨、轨枕、道床和桥梁等轨下结构发生弹性变形和刚性位移，形成总的钢轨位移，钢轨位移和速度的变化会改变作用在车轮上的接触力，该力又反作用于钢轨，传递到轨下结构，引起新的动态响应，此为车辆和桥梁的相互作用过程。



图4 耦合法计算过程

UM VBI 模块提供这两种方法可供用户对比分析，不管是分离法还是耦合法，都基于以下假设：

- 同时考虑横向和垂向轮轨力；

- 对每个车轮单独计算垂向轮轨力；
- 对每个轮对综合计算横向轮轨力（左右平均）。

## 移动荷载

当铁路车辆运行于桥梁之上,可视为一组动态的移动荷载作用(轮轨接触力)。在任意时刻,车桥交互作用点  $K$  点取决于轮轨接触状态(接触斑的位置)。

如果荷载(力)始终作用于柔性桥梁局部坐标系中的某个点,其大小仅取决于弹性变形,这种荷载成为定点荷载。像车辆系统里的弹簧和阻尼力元,其连接点始终是固定在两个物体的局部坐标系里。

然而,所有的轮轨接触力都不会一直作用于桥梁上某些固定的点,因此为移动荷载。理论上移动荷载可以作用于一个柔性体表面的任意点,而不是一个固定的节点,或若干个人为指定的间隔点。

下面介绍 UM VBI 车桥相互作用计算中用到的两个简化算法:

- 快速搜寻桥面作用点位置
- 将移动荷载等效于施加在节点上的外力

采用控制区域的思想可以快速搜寻桥面上对应于轮轨接触斑的作用点。如图 5 所示,所谓控制区域即为桥梁上表面一组单元,包括作用点所在单元(控制单元)以及周围的一些单元。当作用点离开当前控制单元,则在控制区域内沿运动方向与之相邻的单元成为新的控制单元,相应的控制区域也自动更新。这种方法用于车桥相互作用计算不仅效率非常高,而且具有足够的精度。

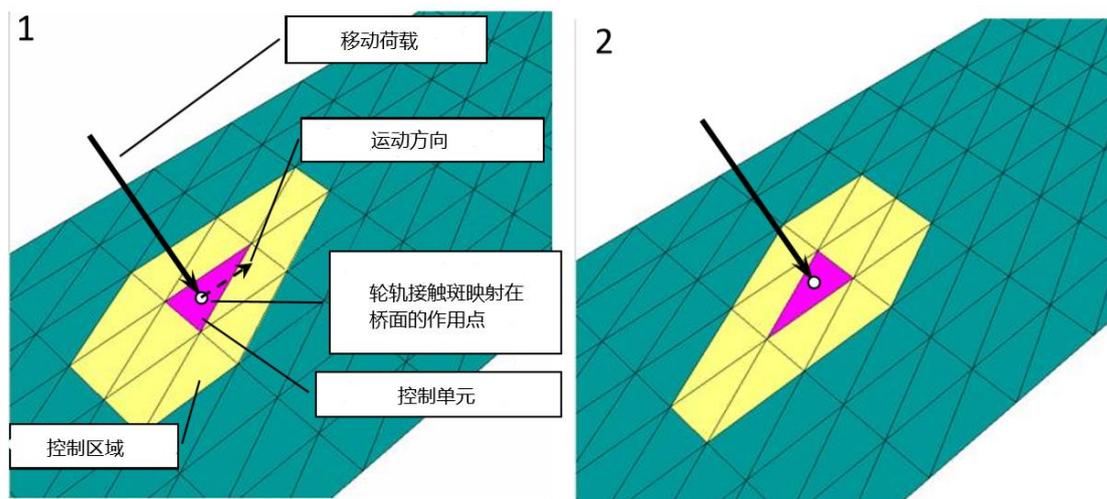


图 5 控制区域示意图

已知桥梁表面三个节点(与  $K$  点最近的三个节点)的速度,则通过线性插值可得到三角形区域内任意点  $K$  的速度  $v_K$ 。这里的  $v_1$ ,  $v_2$  和  $v_3$  都是在总体坐标系里测得的,而  $v_{3l}$ ,  $v_{2l}$  和  $v_{Kl}$  则分别为第三点、第二点和  $K$  点相对于第一点的速度。

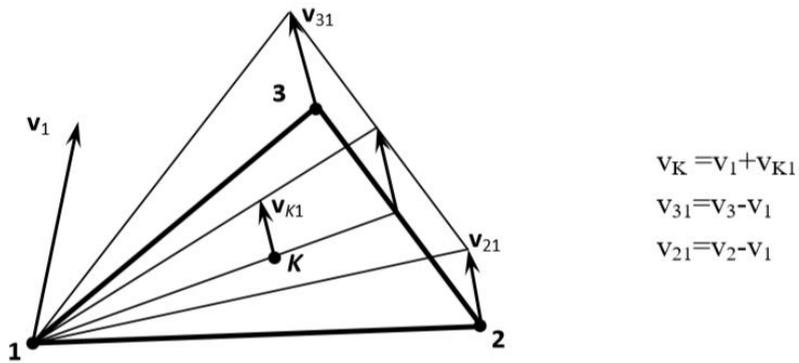


图 6 计算任意点的速度

采用图 7 的方法, 可以将控制单元内任意位置的移动荷载等效为作用在其节点上的外力。

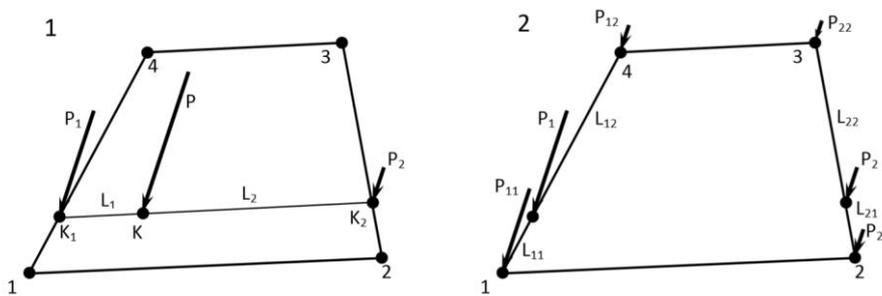


图 7 移动荷载与等效节点力

在仿真过程中, 用户可以在动画窗口实时观察控制区域、移动荷载及其等效到节点的分力。

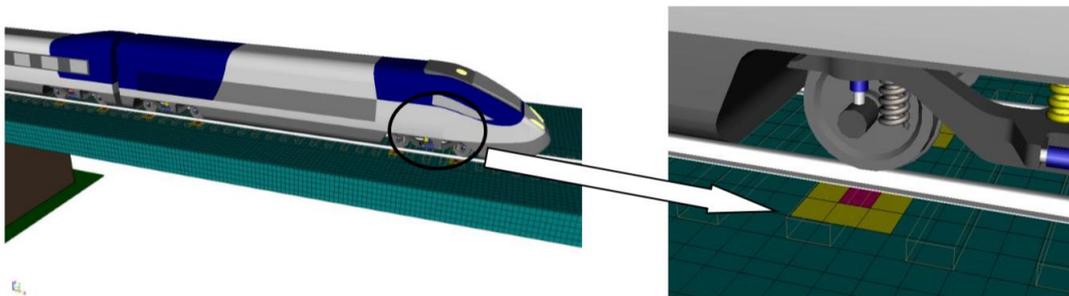


图 8 实时显示控制区域

## 参考文献

Mikheev, G., Krugovova, E., Kovalev, R., 2010. Railway vehicle and bridge interaction: some approaches and applications. // COMPRAIL 2010, 31 Aug - 2 Sept 2010, Beijing, China. P. 593-604. WIT Press