

# CSiBridge 中的移动荷载分析

筑信达 吕良

桥梁设计的作用一般包括永久作用、可变作用、偶然作用和地震作用等，对于普通桥梁的设计偶然作用和地震作用一般考虑较少，而永久作用的计算也较为简单。可变作用由于其作用力大小、作用位置、分布形式等因素的不确定，对整个桥梁结构的受力影响较大，往往是工程师考虑更多的内容之一。

车辆荷载是可变作用中重要的一部分，也是工程师关注最多的内容之一。车辆荷载由许多参数决定，其中包括车重、轴载、轴距、桥跨、车辆在桥上的位置及车辆数目、上部结构的刚度等。由于各种荷载及荷载组合均带有随机性，在分析中存在一些难以确定的因素，加之现有资料的局限性和倾向性，从而导致建模分析的复杂性。

针对移动荷载分析的复杂性，CSiBridge 程序提供了强大灵活的分析功能。软件采用参数化的建模方式，不仅能快速建立复杂结构的分析模型，并且软件将车道信息与结构信息分开存储，使车道无需依附于结构形式来布置。用户无需考虑车道荷载的传递方式，仅需按照需求布置车道形式即可，极大简化了工程师的建模工作。

做移动荷载分析时，对于一些复杂结构仅采用框架单元来模拟上部结构往往会丢失很多细节信息，在 CSiBridge 中也可采用壳单元或实体单元来模拟上部结构。结合灵活的车道布置方式，在分析类似匝道桥或多车道变化的桥梁时，可直接显示结构局部位置由车辆荷载产生的最大/最小位移、内力以及应力等。

## 1 丰富的车辆荷载类型

CSiBridge 中车辆荷载的定义方式有两种：一种是导入基于标准规范而编制的标准车辆，软件内置的荷载规范包括中国公路荷载规范 (JTG-2015)、中国铁路荷载规范 (TB10002.1) 和高铁荷载 (ZK)，英国的 HA (代表英国正常公路交通、用公式表达的活荷载) 与 HB 荷载 (特种车辆荷载)，美国的 H (M) 和 HS (MS) 荷载，以及一些其他国家的规范荷载；第二种是工程师自定义的车辆荷载。自定义时一般是将标准荷载转换为一般车辆数据，然后再进行修改编辑。

另外在定义车辆荷载时，软件不仅仅可以考虑由车辆产生竖向力，同时也可定义其产生的水平作用，如制动与加速力、离心力等效应，也可以定义由超高和离心力引起的倾覆力矩，如下图所示。

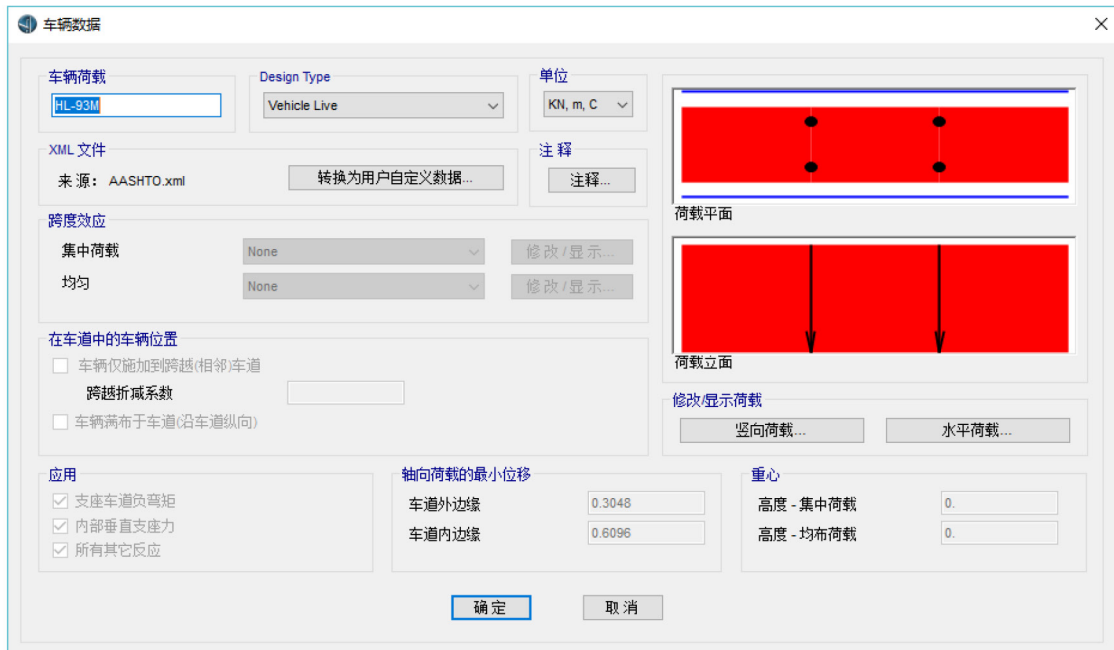


图 1 AASHTO HL-93M 车辆荷载



## 2 简单的加载方式

CSiBridge 采用参数化的建模方式，桥梁所有的信息均存储于“构件”当中。在软件中开始建立一个新的桥梁模型时，用户首先需要定义布局线，然后定义好各个“构件”的信息，如车道、桥墩、桥台、支座等，最后将这些“构件”组合成桥梁。当其中某一部分构件的信息发生更改时，仅需修改该构件的信息，更新模型，软件会自动调整其余部分构件与其匹配。

其中车道就属于一个独立的“构件”。不同于其他类型软件，工程师需通过主梁或指定一些横向联系梁来确定车道的位置，CSiBridge 中车道的布置形式仅与布局线有关，定义时用户可以选择依据结构布局线定义车道，或者重新定义一个布局线来定义车道。定义好车道之后用户只需指定荷载在车道上的分布形式，软件会自动计算并将相应的荷载传递给结构，不需要用户处理车道与结构之间的连接关系。

对于一些直线桥梁，无论是建模、分析、设计都是比较简单的，但是对于曲线梁桥，如果需要通过主梁或者横向联系梁来确定车道的分布还是比较麻烦的，如下图 2a 中的匝道桥。特别是采用壳单元或是实体单元来模拟时，常规的指定车道的方式已经不在适用。但是在 CSiBridge 中，用户只需将车道布置的参考线选为结构的布局线，无论上部结构离散为杆系单元、壳单元、或是实体单元，软件均能自动处理。



图 2a 匝道桥

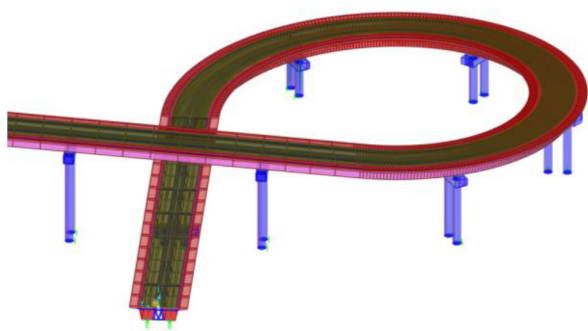


图 2b CSiBridge 分析模型

另外对于一些直线桥梁，有时候需要考虑车辆按特定的轨迹运动。比如某些时候路线的曲率半径很大，为简化设计，常常会将该曲线段的桥梁设计成直线桥梁。这就会导致车辆在该桥上运行时并不是沿桥梁中心线方向运动，而是沿一个特定的曲线运动，类似下图所示。此时结构的布局线于车道的布局线不在同一条直线上。在 CSiBridge 中仅需重新定义一条布局线即可完成该类型车道的定义。

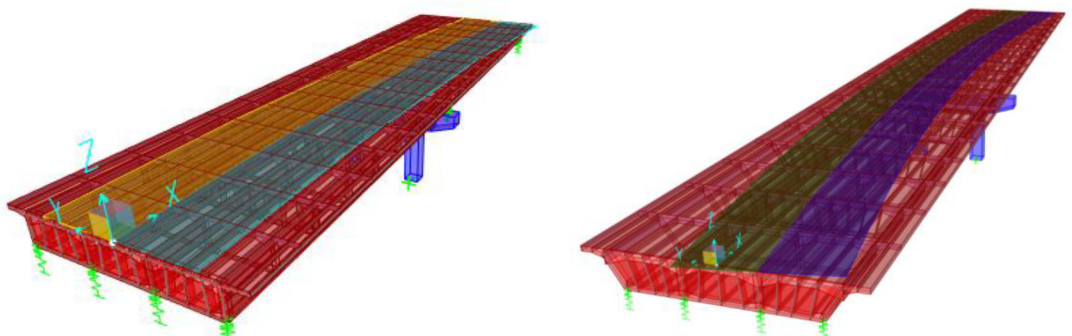


图 3 弯桥直做

## 3 浮动车道

一般来说，用户指定的车道位置是固定不变的，真实情况下车辆也有可能偏移车道移动，用户指定的车道位置有可能并没有包含最不利的位置。因此为了保守计算，可能需要设定多个车道分布形式，并设定多个工况来进行分析，最后将结果取包络值。整个过程繁琐，并且人为指定车道位置的方式也无法保证取到最不利值。针对上述问题，CSiBridge 中引入了浮动车道的概念。





浮动车道是指在分析时车道的横向位置将自动变化以计算每个响应的最大影响值，但是车道的宽度不变。采用浮动车道时需要将多个浮动车道指定到一个车道集。车道集的宽度确定了能够布置的浮动车道数量，以及它们横向移动的空间，即“浮动”范围。车道集当中的浮动车道不能彼此交叉和重叠。分析时，如果有多个浮动车道，软件会自动将其分为组，以组为单位进行横向移动找到结构加载的最不利位置。如图 4 所示，该模型中设立了四个浮动车道，并将四个浮动车道指定到一个车道集中。分析时，软件会依据相邻的浮动车道进行分组，然后使不同的分组在车道集内横向移动，找到移动荷载作用的最不利位置，图-4 即为其中的一种分组方式。

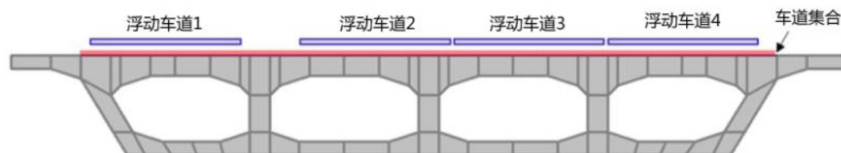


图 4 浮动车道分为两个连续组

## 4 两种活荷载分析类型

### 4.1 基于影响线的包络分析

进行桥梁分析设计时，一般采用基于影响线或影响面的包络分析来确定结构各个位置的最不利荷载。影响线是针对零宽度的车道进行计算的，而影响面是针对具有一定宽度的车道进行计算的。分析时，车辆将沿着桥梁的每个车道双向行驶，利用影响面，程序自动将车辆布置在最不利位置（同时考虑顺桥向和横桥向），使结构产生最大或最小响应。如果设置有浮动车道，程序首先会通过移动浮动车道的位置，来得到最大影响的横向布置。用户可限定车辆作用的车道数，或者指定车辆作用的几条车道，也可以直接由程序决定最不利的施加方式。通过上述过程，软件将计算出在移动荷载作用下结构的最大/最小响应值，并且在计算车辆荷载作用时，可考虑竖向和水平荷载。

### 4.2 逐步分析方法

对于一些特殊的研究或超常规的车辆，可通过逐步分析方法来研究其对桥梁结构的作用。采用逐步分析时，用户需要设置一个或多个车道，并在车道上指定对应的车辆荷载，同时还需要指定车辆的起始位置、开始时间、行驶方向和速度等参数，定义窗口如图 5 所示。定义完荷载模式之后，在分析工况中用户可以选择执行多步静力分析或时程分析。

如果选择多步静力分析，软件将从零时间开始按每个时间步单独进行线性静力求解。每次求解均是独立的，计算结果反映了车辆在当前位置时，桥梁结构的受力状态。用户可以绘制车辆沿结构行驶时结构所产生的位移或应力，也可输出包络结果。如果选择时程分析，程序将对车辆创建一个独立的时程函数。当荷载作用在相应的位置时，该时程函数将在一个时间步内由 0 增加到 1，然后在下一个时间步中从 1 减为 0。在一个时间步中任意时间所施加的荷载，为这一时间步开始时和结束时荷载的线性插值。通过这种方式来考虑结构的动态响应。

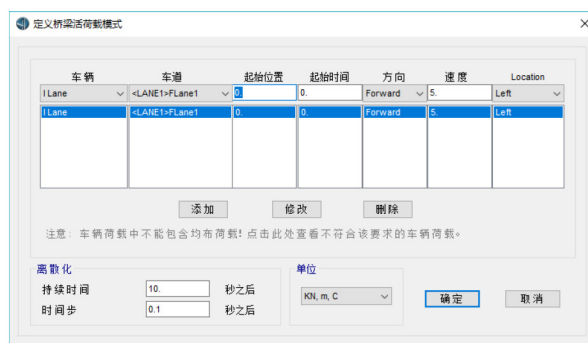


图 5 活载逐步分析参数定义

## 5 小结

随着工程设计的复杂程度不断提高，分析设计的要求必然也更加精细。对于一些宽桥、弯桥、斜桥，或者一些特殊的匝道桥，常规的杆系模型分析方法在处理这些工程问题时已捉襟见肘。如果再考虑复杂的车道形式，车道布置等问题，必然给工程师分析及设计造成极大的困扰。CSiBridge 以参数化建模方式，极大简化了结构建模与非规则车道布置的问题，适用于杆系模型、壳单元模型和实体模型，有效提高了分析精度。并引入浮动车道的概念，能更加准确地捕捉到结构的最不利加载形式。不仅能完成常规的基于影响线的包络分析，也可进行一些特殊车辆的逐步分析。在满足桥梁分析的功能性与实用性的基础上，CSiBridge 必能成为工程师强有力的分析设计工具。