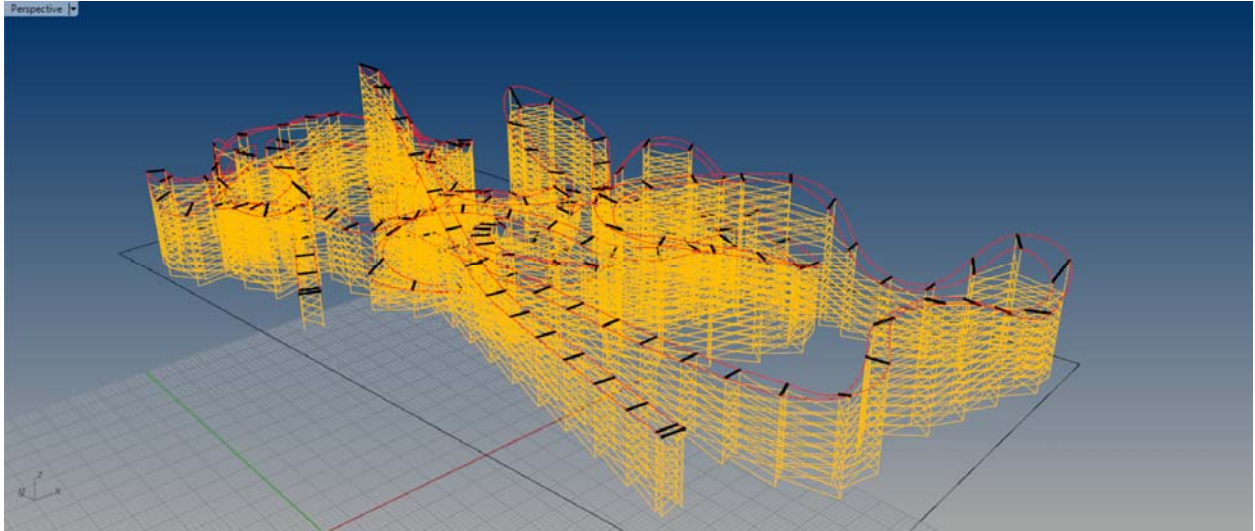


# Music on Rails

一种“旋律指导线型组合”的过山车轨道线路设计方法

谭振业 1453446



效果图

## 概述

本文提出了“旋律指导线型组合”的过山车轨道线路设计方法。通过平纵横线型的组合，使得游客在乘坐过山车时的升降、过弯等体验与背景音乐的音调、乐器等要素相契合，让整个过山车的游玩历程更加丰满与精彩。基于此思路，本文提出了音乐过山车线路的一般设计流程，编写了相关程序进行对物理模型与乘坐体验进行模拟，并通过实际设计一条线路对此方法进行了验证。

## 一般过山车的刺激分析

过山车作为大型机动游乐设施，往往是一个游乐园中最吸引人的项目。一般的过山车通过链式提升器提升到一定高度，然后依靠重力和惯性在轨道滑行。轨道平纵横线型的变化，使得过山车在滑行过程中各个方向的速度与加速度也不断改变，乘客由此获得了惊险刺激的乘坐体验。因此过山车也被称为“操控重力的艺术”[1]

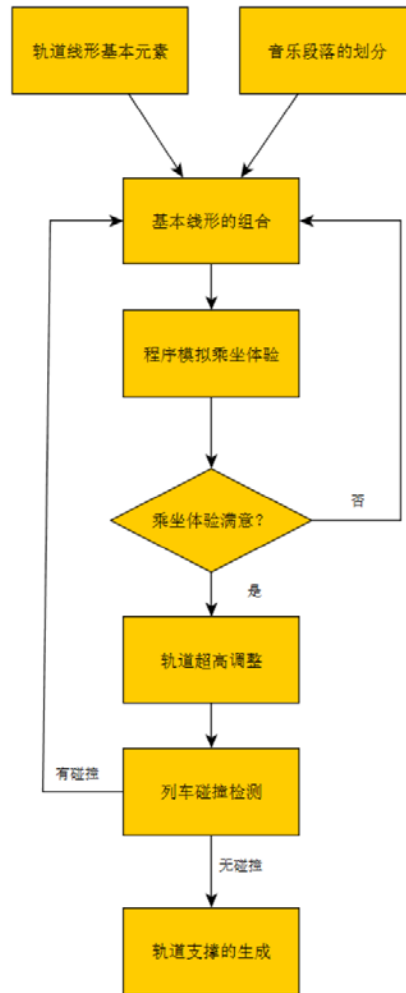
通过网络上观看过山车的相关视频[2][3]和模拟游戏[4]，我们总结出过山车的刺激要点来自以下几个方面：

- 1) 轨道高度带来的“恐高”体验
- 2) 过山车俯冲、过弯、爬坡时带来的加速度变化
- 3) 轨道震动与风

本文并未试图量化各个体验的刺激程度。过山车速度或加速度单纯的达到某个很大的值并不能保证过山车的优秀体验。过山车的体验首先应该是顺滑的，其次良好的线型变化组合使得乘客体验有张有弛。而这也正是本文提出“旋律指导线型组合”的目标所在。考虑到现阶段我们只能对过山车体验进行模拟，本文采用线型组合所带来的运动变化作为过山车的主要设计内容。

## 音乐过山车的设计流程

本文将轨道线型分为若干种基本元素，每种基本元素有着各自的速度、加速变化曲线，并能由特定参数控制。将这些线型基本元素根据流行音乐的段落进行匹配组合，并根据段落的长度对基本元素进行调整，由此得到了初步的轨道线路。通过程序模拟乘坐体验，此时可以对上一步某一音乐段落所指定的基本元素进行替换等修改。之后对线路进行超高调整。并对列车运行时所需的空空间进行碰撞检测，若运行空间相互碰撞，则重新调整线形。最后生成轨道的支撑物。整个设计流程可以归纳如下图：



音乐过山车设计流程图

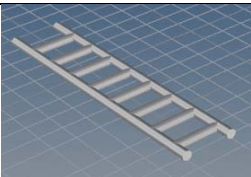

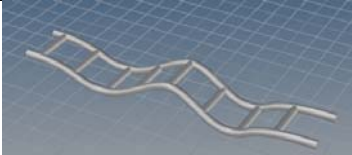

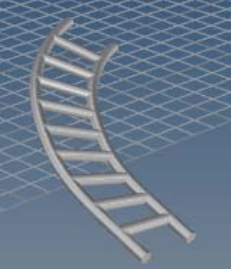
设计过程中使用的软件工具链：

轨道线形基本元素的设计	Rhino
音乐段落的划分	Audacity
乘坐体验的模拟	Javascript
轨道超高调整	Rhino + Grasshopper
列车碰撞检测	Rhino
轨道支撑的自动生成	Rhino + Python

### 轨道线型的基本元素

本文粗略的将线型元素做如下划分：直线，过弯曲线，以及它们与高程变化的组合。在已知过山车驶入某段线型元素的初速度之后，便可以算的在这段线型速度变化、加速度变化以及驶离时间。

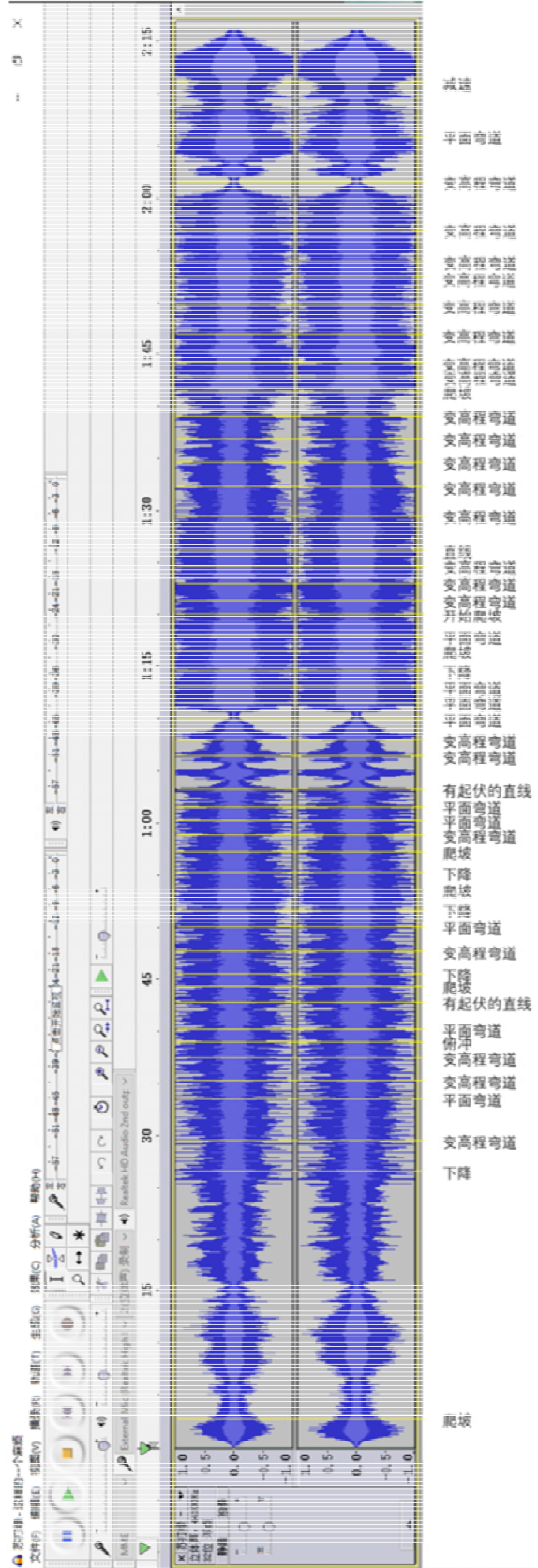
考虑到一个线型元素会与一段旋律匹配（见下一节），列车的驶离时间可以通过调整线型元素的长度、高程变化、转弯半径进行控制。

基本元素		控制要素
平直线		长度
斜直线		长度，倾角
有起伏的直线		长度，起伏的高程变化
平面弯道		弯曲半径（超高计算见后）
变高程弯道		弯曲半径（超高计算见后），高程倾斜角

## 音乐的段落划分

本文选取了台湾流行乐队苏打绿的歌曲《这样的一个麻烦》作为背景音乐。选取的理由在于这首歌旋律欢快，歌手演唱时字词的拉长与转音特别适合过山车的俯冲、过弯等体验。

歌曲全长 2 分 16 秒。根据旋律及歌词，将歌曲分段并附上期望的线型，结果如下图。

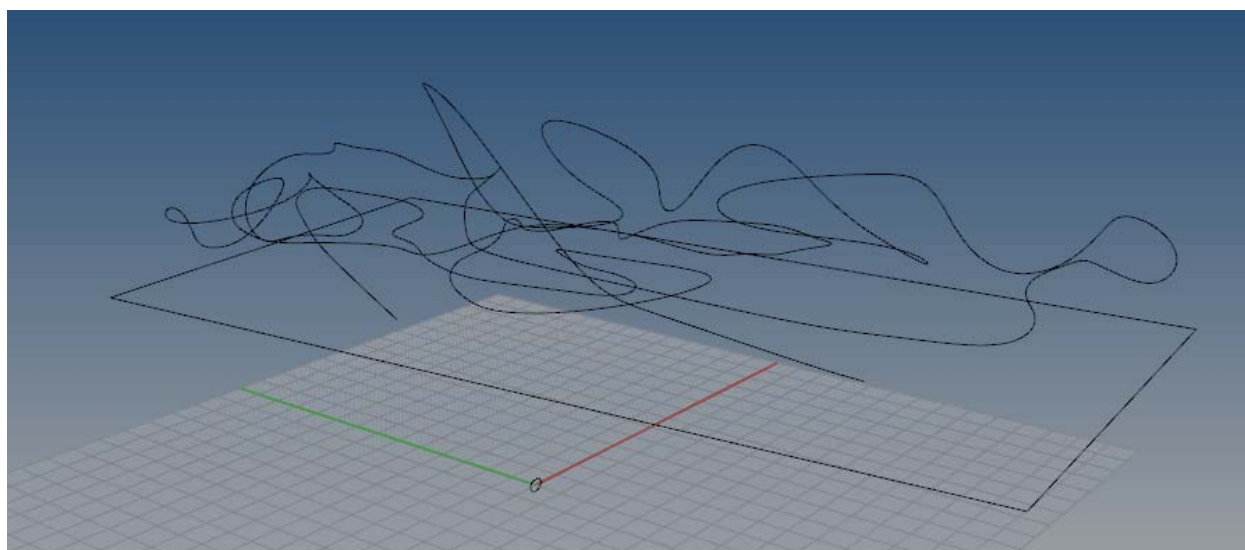


需要指出，以上线型的指定并非唯一。线路生成后可以根据模拟主观地调整线型组合。

## 线路的生成

由于轨道长度与音乐段落的时常限制，我们并没有使用过渡曲线来衔接不同的组合。而是提取了线型元素的控制点，重新使用样条函数对整条线路进行拟合来生成曲线。显然这会使得行驶时间与之前计算结果不相符，这可以通过微调控制点来调整。需要指出，由于过山车经历的运动变化本来就是渐变的过程，对线路基本元素驶入和驶出时间计算得十分精确没有太大意义。因此只需让时间误差不累计便可保证线形元素与音乐段落的匹配。

经过微调，与曲目相适应的曲线如图所示，Rhino 文件见附件。



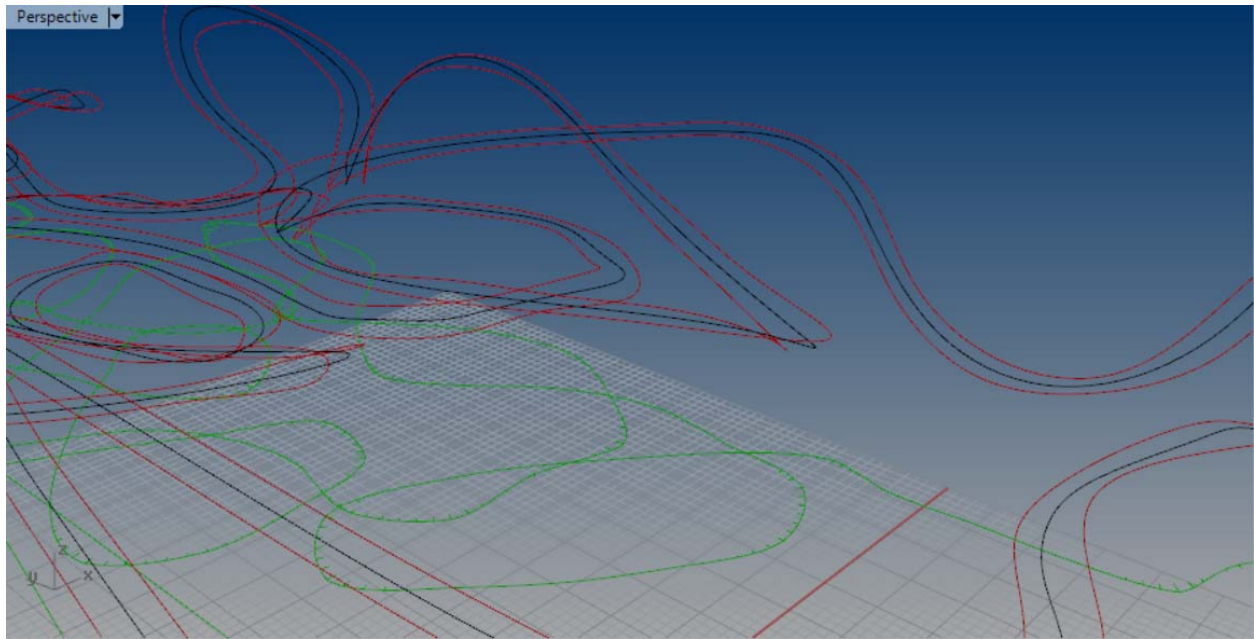
轨道的线型图

## 超高的调整

超高的调整是为了优化列车过弯时轨道的受力。通过旋转轨道的横截面，使得在理想状态下列车过弯时轨道仅提供垂直于轨道平面的力。

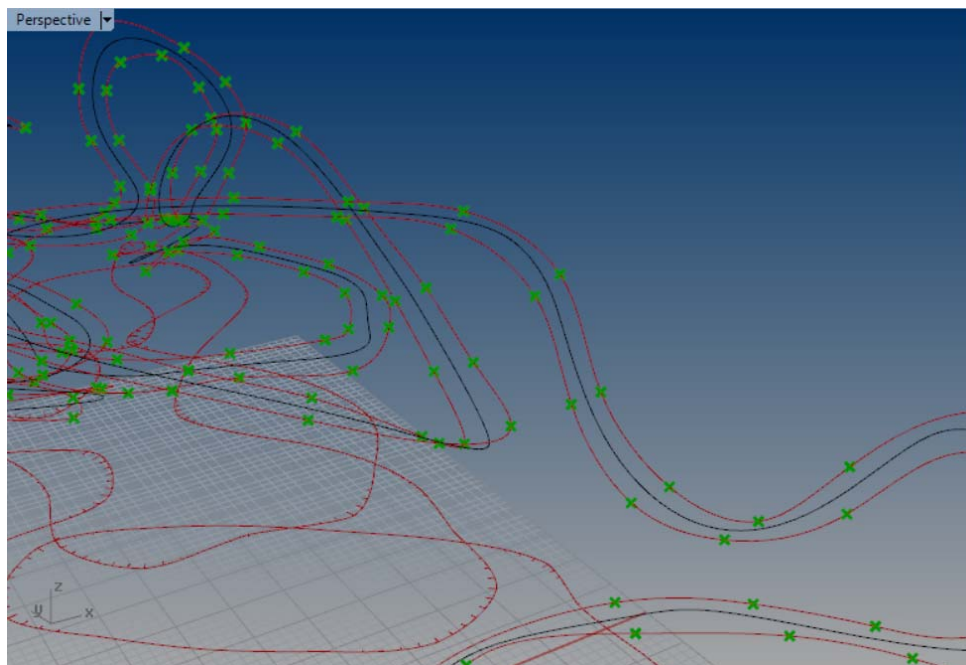
但由于列车运行时候轨道摩擦、风荷载等随机因素较多，列车速度难以在每一个点精确计算，并且有处于保证乘客体验的最大倾斜角，理想的横断面超高往往难以达到。但由于过山车的支撑结构往往设计得冗余度较高，轨道一般还是安全的。

在本文对超高的计算中，使用忽略运行摩擦等带来的能量损耗，使用能量守恒近似计算过弯时各点的速度，即速度的平方正比于与所在点的  $z$  坐标。并通过 Rhino 的 Grasshopper 插件分析计算曲线各个点的曲率半径。考虑最大倾斜角后便可算出轨道各点的超高。



绿色的阴影为曲线的曲率半径大小的投影示意图

再把按超高平移后的点重新拟合生成曲线，便得到超高修正后的轨道曲线。

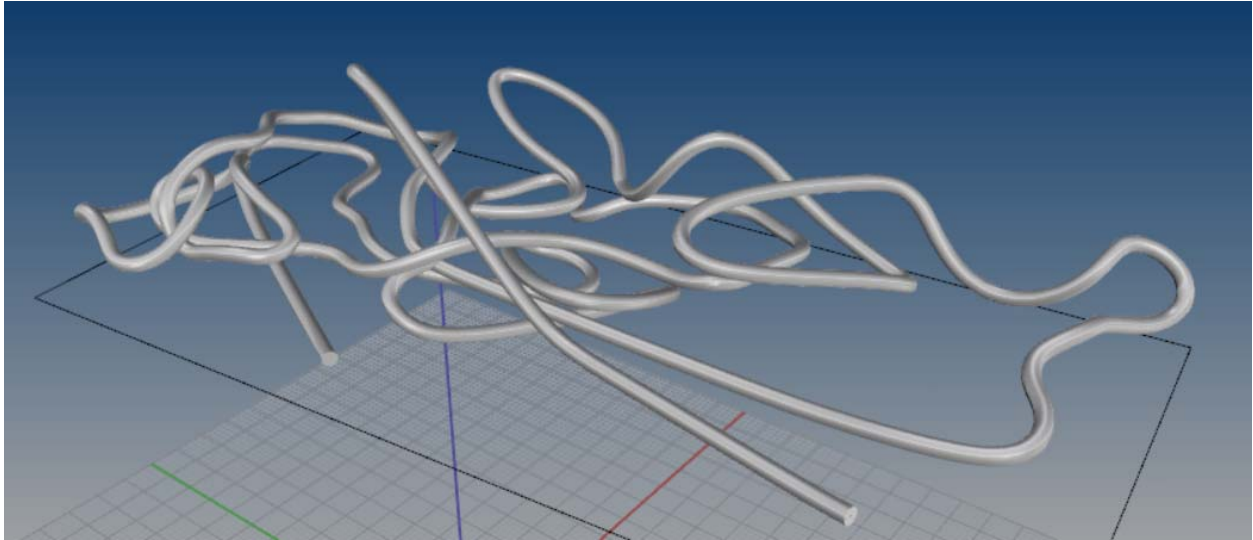


绿色的点为超高修正后的控制点

## 列车碰撞检测

列车的碰撞检测是指轨道的净空、净宽等尺寸能保证列车运行时不与轨道及同时在运行的其他列车发生碰撞。本文采用的检测方法是在 Rhino 文件中沿前面生成的轨道中线“挤出”半径为 1.5m 的

圆形管道，以此代表列车运行时所占用的空间。然后用 Rhino 内置的布尔运算检测圆形管道是否与自己相交。若无相交则表明列车运行空间安全。若相交则调整线形，并重新进行体验模拟、超高计算步骤。



列车运行空间示意图

### 支撑的自动生成

一般过山车的支撑物可以分为木结构支撑与钢结构支撑。木结构支撑通常通过短的木条铆接成桁架。为了结构的安全桁架的布置往往比较密集。由于木材的柔度大，过山车在运行时会有抖动，这也算木支撑过山车的一个特点。钢材由于强度大，只需要较少的支撑便能提供结构需要强度，并且过山车运行时会比较顺滑，从而能设计曲率半径更小的弯道[1].



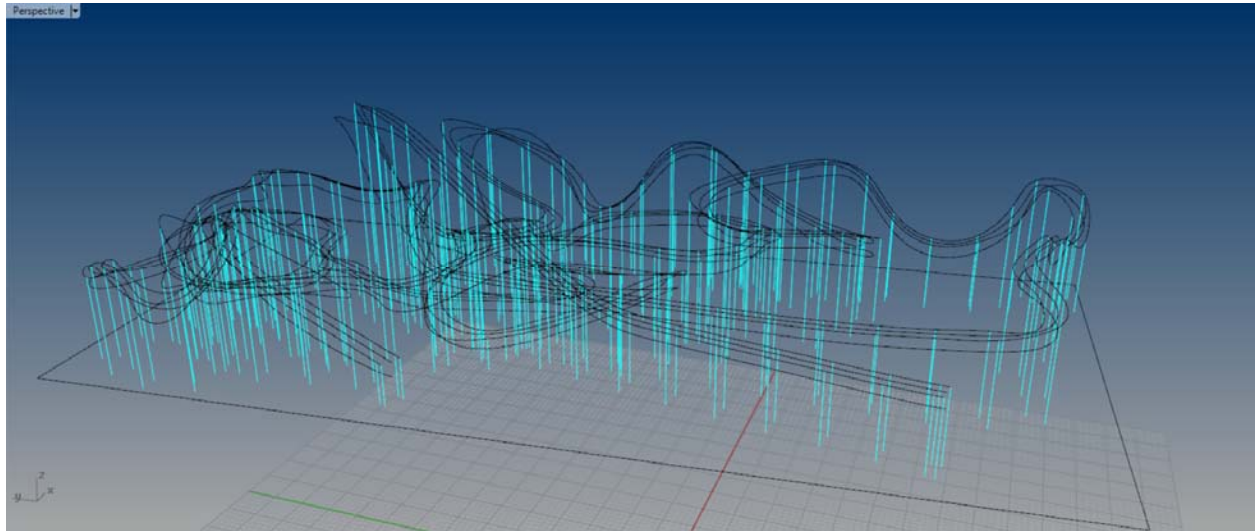
钢支撑轨道 (左)，木结构支撑 (右)



不管是木支撑或钢支撑，可以想象的为了提供足够的刚度和安全赘余，面对过山车的冲击荷载等复杂工况，支撑的设计绝非易事。本文针对木结构支撑的桁架结构，提出了结构自动生成算法，能根据轨道快速的生成无碰撞的桁架几何模型，并提供相关的程序接口，便于下一步通过力学软件根据各种动荷载和分项系数实现截面尺寸的调整、优化结构造型等功能。

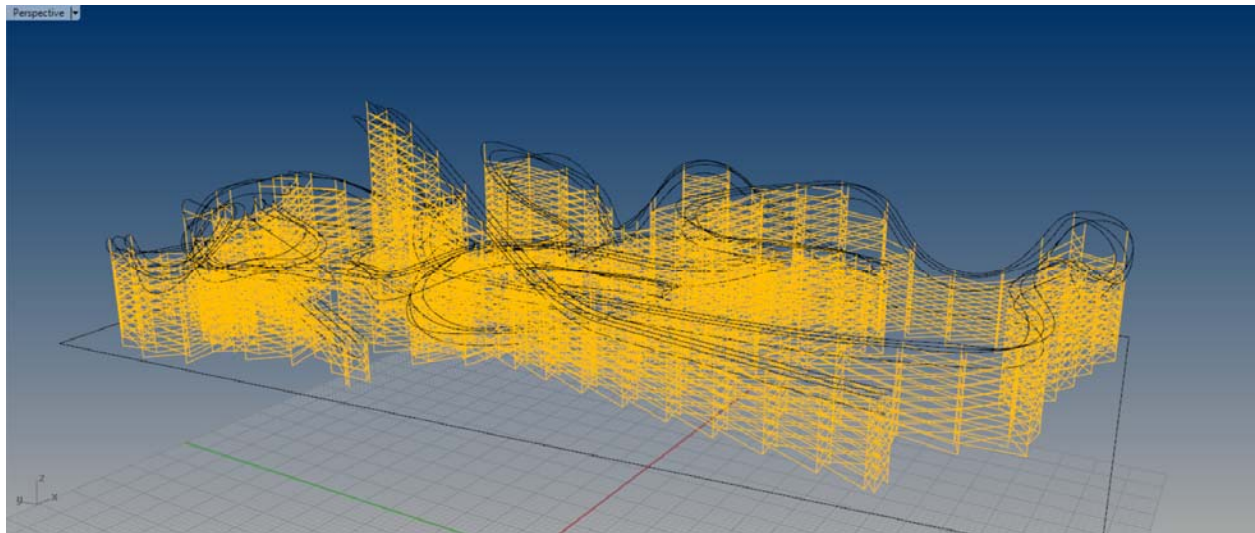
本文的桁架自动生成程序分为四步。

首先在前面生成的两根轨道曲线按固定的间距取出桁架与轨道的支撑点，把支撑点及其地面投影起来作为竖向支撑。



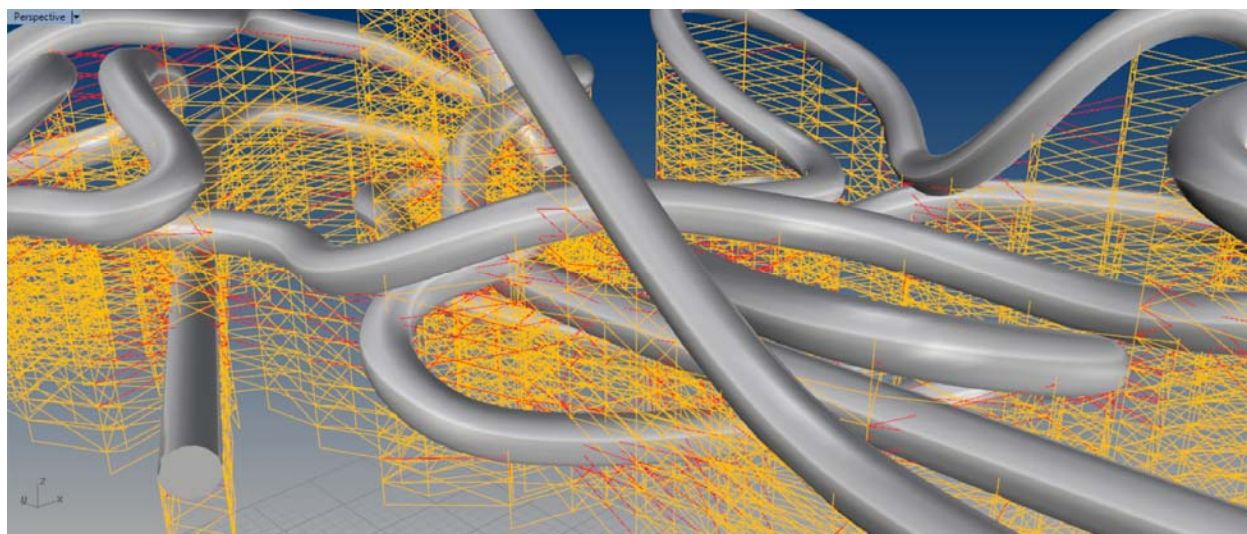
竖向支撑示意图

然后按顺序取并排的竖向支撑，按一定间距在竖向支撑取出桁架的支撑点，再按不同的桁架要求将支撑点相连，形成桁架结构的几何形状。



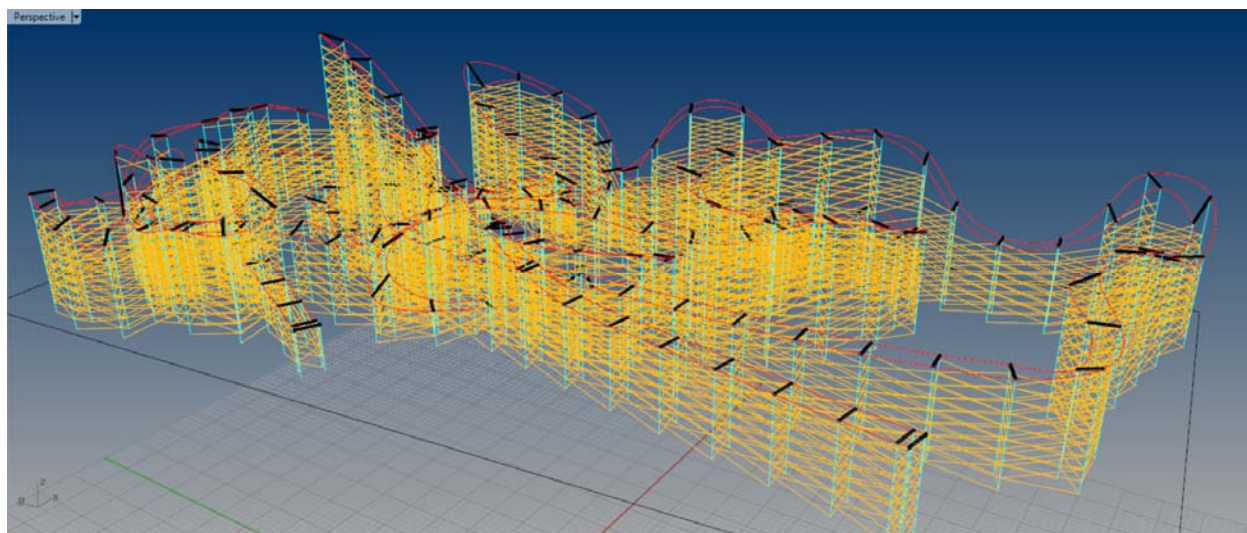
初步的桁架结构

为了保证支撑物不影响列车的运行空间，将生成的线段与之前拉伸出的运行空间进行碰撞检测。若支撑物与运行空间相碰撞，则删去该支撑物。



颜色为红色的桁架即为与运行空间相碰撞的桁架

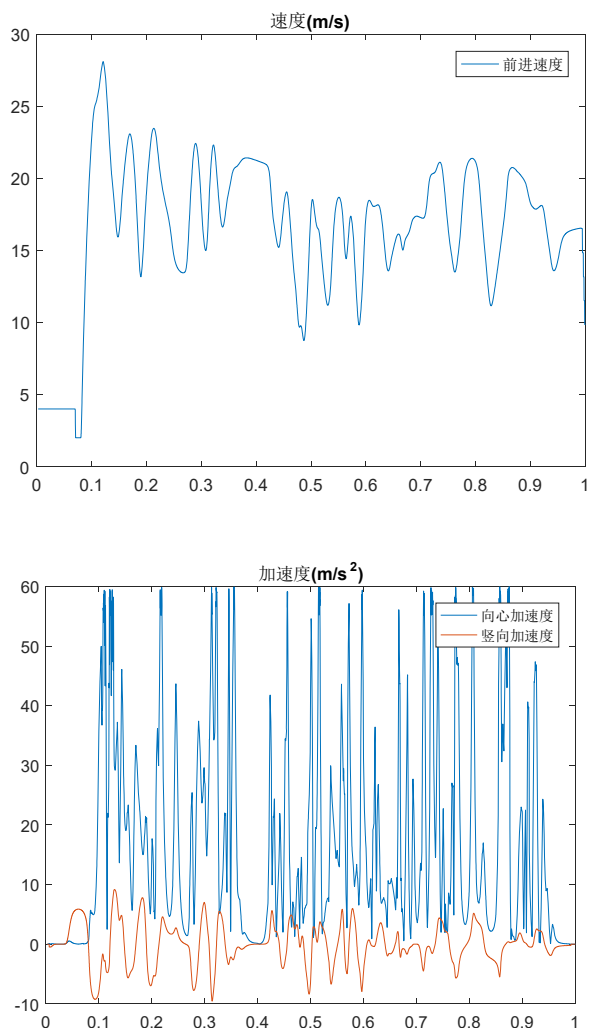
最后将桁架节点以及轨道曲线的控制点以 csv 格式导出，便于后期使用 sap2000 等力学软件进行有限元分析和结构优化。



桁架最终效果示意图

## 线路分析

## 速度、加速度分析



从以上速度、加速度分析图可以看出，速度与加速度“张弛有度”，结合背景音乐能使得游客得到较好的游玩体验。并且经过计算，加速度的各项指标满足《游乐设施安全规范》(GB8408-2008)的要求。过山车的网页模拟可访问 <http://45.32.61.1:5000/t2.html>。最终的体验效果与背景音乐基本合拍，实现了最初的设计目标。

## 结论

本文提出了一种“旋律指导线型组合”的过山车轨道线路设计思路。通过参数化设计基本的线型元素，使得过山车的运动体验与背景音乐的旋律相契合，带来更为丰满刺激的过山车体验。基于此思路，本文提出了音乐过山车的一般设计流程，并通过实际设计验证了该流程的可行性。

本文还通过与图形软件和自编脚本程序的结合，实现了轨道的快速调整、木支撑的自动生成，并在浏览器实现了过山车体验的模拟，大大加快了过山车的设计速度。

## 参考资料

[1] Coasters 101: An Engineer's Guide to Roller Coaster Design, Nick Weisenberger, 2012

[2] 5 Best Fastest Roller Coasters on Earth, 2016. April.30, from:  
<https://www.youtube.com/watch?v=luO6Yu0PUM0>

[3] 15 Most Terrifying Roller Coasters, 2016. April.2, from:  
<https://www.youtube.com/watch?v=6PVa1vphS7c>

[4] <http://www.nolimitscoaster.com/>