

基于虚拟现实的高铁在坡道地段的运动仿真^①



高锐, 罗训

(天津理工大学 计算机科学与工程学院, 天津 300384)

通讯作者: 高锐, E-mail: 1528922622@qq.com

摘要: 在坡道地段的运动仿真是高铁在整个运动仿真中的重要部分. 为了研究高铁在坡道地段的运动仿真, 本文提出了基于虚拟现实的高铁运动仿真模型. 首先构建高铁模型和地形; 然后将高铁抽象成绳体模型, 从动力学角度分析高铁在坡道地段上的受力情况和运动状态; 最后在虚拟现实引擎 Unreal Engine 中进行相关蓝图节点的连接, 利用其提供的完整套件、实时高逼真的渲染效果, 将其应用在高铁的仿真中. 对研究高铁线路选取设计、模拟运行以及列车速度等参数和地形的适应关系等提供了很好的手段和方法, 使模拟效果与列车实际运行状态最大程度匹配, 同时也给相关的其他研究提供了参考.

关键词: 高铁; 三维建模; 虚拟现实; 运动仿真; 虚幻引擎

引用格式: 高锐, 罗训. 基于虚拟现实的高铁在坡道地段的运动仿真. 计算机系统应用, 2020, 29(5): 264-269. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7412.html>

Motion Simulation of High-Speed Railway on Ramp Based on Virtual Reality

GAO Rui, LUO Xun

(School of Computer Science and Technology, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Motion simulation on ramp is an important part of the whole motion simulation of high-speed railway. In order to study the motion simulation of high-speed railway on ramp, this study puts forward a simulation method based on virtual reality. First, the high-speed railway model and terrain are constructed. Then, high-speed railway is abstracted into rope model, and the force and motion state of high-speed railway on ramp are analyzed from a dynamic point of view. Finally, related blueprint nodes are connected in virtual reality engine Unreal Engine, and it is applied to the high-speed railway simulation using the complete suite and real-time high-fidelity rendering effects provided by it. It provides a satisfied means and method for studying the design of high-speed railway line selection, simulated operation, and the adaptability of parameters such as train speed and terrain, so that the simulation effect can be matched with the actual operation status of the train to the maximum extent, and also to provide reference for other related studies.

Key words: high speed railway; 3D modeling; virtual reality; motion simulation; Unreal Engine

随着我国经济、科技等各方面的迅猛崛起, 近年来高铁已经成为我国的一张靓丽名片. 2018 年底, 我国高铁运营里程已经超过 2.9 万公里, 占全球高铁运营里程总和的三分之二以上, 位居世界第一. 2019 年, 计划确保投产高铁新线 3200 公里^[1].

近年来, 我国高铁网的覆盖面逐步扩大, 向西部地

区延伸, 那么高铁建设面临的自然环境更加复杂, 长大坡道地段比较多, 比如在建的格库、大西、西成等都存在这样的问题^[2]. 当列车在上下坡时, 如果因为坡度过大或者坡长太长而导致列车速度的变化过于剧烈, 不仅会影响行车速度、行车安全、舒适度, 还会因为频繁的加减速导致运行费用的增加^[3]. 因此, 地理环境对

① 收稿时间: 2019-10-17; 修改时间: 2019-11-15; 采用时间: 2019-11-22; csa 在线出版时间: 2020-05-07

高铁的影响也是不容忽视的. 另外, 面对复杂的地理环境和不良的气候条件, 给高铁的建设增加了难度, 不仅需要耗费大量的人力、物力去实地勘察, 而且还会增加时间周期, 从而带来更大的代价.

在文献[4]中, 唐金开发了基于 Web 单列高速列车运行仿真系统, 并没有进行三维仿真. 文献[5]中, 基于 OSG 研究了道路三维场景组织与管理、道路建模等, 一方面渲染效果不佳, 另一方面没有现成的三维地理信息, 开发难度大. 另外, 一些研究者理论计算分析了列车在长大坡道上运行时坡度、列车运行速度、监控制动距离等的关系^[2]. 还有一些仅仅给出了场景建模方法^[6,7]. 那么, 虚幻引擎 Unreal Engine 拥有强大的功能、高质量逼真的渲染效果, 以极高的帧数渲染复杂场景, 对高铁模拟来说是一个非常好的工具.

1 虚拟高铁仿真模型

在高铁的仿真系统设计过程中, 仿真模型的建立是一项重要的工作, 建立的高铁仿真模型如图 1 所示.

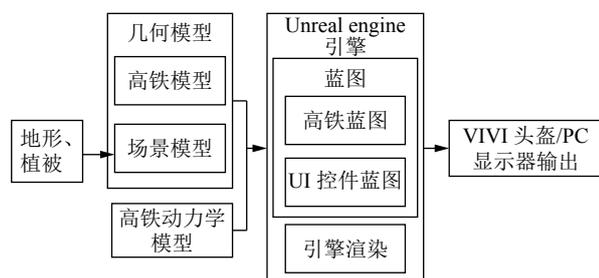


图 1 高铁仿真模型

高铁仿真模型主要包括几何模型、高铁动力学模型、Unreal Engine 引擎和显示输出 4 部分. 几何模型包括高铁模型和场景模型, 其中场景模型包括列车行驶的场景、地形、植被等; 高铁动力学模型首先将高铁列车抽象为绳体模型, 再通过动力学分析来计算高铁速度与坡度和坡长的关系以及列车在变坡点的受力情况; 在 Unreal Engine 引擎中, 通过对高铁蓝图、UI 控件蓝图的相关节点进行连接, 实现高铁的运行、相关参数显示、视角切换、小地图等, 再经过引擎渲染部署到 VIVE 沉浸式头盔中.

1.1 高铁模型构建

高铁模型的构建包括高铁列车外壳模型、车内座椅以及操作台和高铁轨道建模. 另外, 对于车体、轨道等不同的材质, 还需要用不同的材质贴图来进行修饰.

对于建模工具, 采用 Maya 进行建模, 相比其他建模软件而言, 它的可移植性强、可拓展性强, 并且由于它在角色建模方面比较领先, 所以它的曲面建模会更好, 更适合高铁多曲面的特性. 图 2、图 3 展示了高铁厢体模型和整列车体模型.



图 2 高铁厢体模型



图 3 高铁整体模型

1.2 高铁动力学建模

鉴于高铁的质量分布比较均匀、动力分散较为均衡, 为了尽可能的保留高铁列车的基本属性以保证列车运行仿真计算的精度, 那么采用一种绳体模型^[4]. 该模型将高铁看作质量均匀、长为 L 且具有动力的绳体. 其中 L 为列车长度. 本文以凸坡为例进行分析.

1.2.1 非变坡点受力分析

1) 列车上坡

当列车上坡时, 受到列车牵引力 F 、运行阻力 f 和列车自身重力沿运行反方向的分力 G_x 的作用, 因此所受合力为:

$$R = F - f - G_x \quad (1)$$

其中列车运行阻力仅考虑基本阻力, 不考虑空气阻力等.

2) 列车下坡

当列车下坡时, 受到列车制动力 F' 、运行阻力 f 和列车自身重力沿运行方向的分力 G'_x 的作用, 合力为:

$$R' = G'_x - F' - f \quad (2)$$

以 CHR3 动车组为例, 对 CRH3 动车组进行惰性阻力试验, 得出列车惰性单位阻力^[8]为:

$$f = 0.42 + 0.0016v + 0.0001302v^2 \quad (3)$$

其中, 速度 v 的单位为 km/h, f 的单位为 KN.

1.2.2 变坡点受力分析

列车在变坡点的受力分析如图4. 假设 F 为列车总牵引力(不考虑曲线牵引力), O 点为凸坡变坡点, α 、 β 分别为下坡、上坡的坡度角, L_1 、 L_2 分别为列车在 α 坡段和 β 坡段部分的长度, F_1 、 F_2 分别为 F 分散在 α 坡段和 β 坡段的牵引力, 列车在 α 坡段和 β 坡段的重力分别为 G_1 、 G_2 , F'_1 、 F'_2 分别为 α 坡段和 β 坡段由重力引起的坡道附加阻力, F_0 是 L_1 、 L_2 两部分列车间的作用力. 那么可得:

$$F = F_1 + F_2 \tag{4}$$

$$F'_1 = G_1 \sin \alpha = \frac{L_1}{L} mg \sin \alpha \tag{5}$$

$$F'_2 = G_2 \sin \beta = \frac{L_2}{L} mg \sin \beta \tag{6}$$

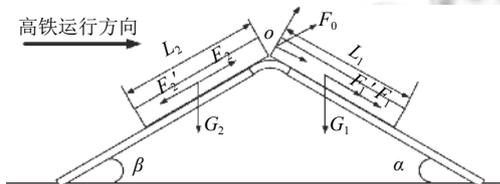


图4 变坡点受力分析

根据绳体模型的特点, 列车在 α 坡段和 β 坡段的加速度大小相等, 假设列车加速度为 a , 那么可得:

$$\frac{F_2 - F'_2 + F_0}{m_2} = \frac{F_1 + F'_1 - F_0 \sin \alpha}{m_1} \tag{7}$$

$$\frac{F_2 - F'_2 + F_0}{L_2} = \frac{F_1 + F'_1 - F_0 \sin \alpha}{L_1} \tag{8}$$

$$F_0 = \frac{L_2(F_1 + F'_1) - L_1(F_2 - F'_2)}{L_1 - L_2 \sin \alpha} \tag{9}$$

由于将列车看作动力分布均匀的绳体模型, 那么就可以将列车长度和列车动力分布视为成正比例关系, 可得:

$$F_1 = \frac{L_1}{L} F \tag{10}$$

$$F_2 = \frac{L_2}{L} F \tag{11}$$

将式(5)、式(6)、式(10)、式(11)代入式(9)中, 可得:

$$\begin{aligned} F_0 &= \frac{L_2(\frac{L_1}{L} F + \frac{L_1}{L} mg \sin \alpha)}{L_1 - L_2 \sin \alpha} - \frac{L_1(\frac{L_2}{L} F + \frac{L_2}{L} mg \sin \beta)}{L_1 - L_2 \sin \alpha} \\ &= \frac{L_1 L_2 (\sin \alpha + \sin \beta) mg}{L(L_1 - L_2 \sin \alpha)} \end{aligned} \tag{12}$$

由于 F'_1 、 F'_2 已知, 那么就可以计算出列车在变坡点的加速度(不考虑曲线阻力带来的加速度):

$$a = \frac{(F_0 - F'_2)L}{mL_2} \tag{13}$$

1.3 Unreal Engine 引擎

1.3.1 场景模型构建

场景是高铁模型的载体. 为了便于测试, 在构建场景时, 先创建一组上、下斜坡以便测试, 再创建一些山地和植被. Unreal Engine 引擎自带的 Landscape 系统可以创建山脉、起伏或倾斜的地面等大型开放的世界环境, 并且可以修改其形状和外观. 具体操作步骤为: ① 在引擎的模式面板中选择 Landscape; ② 选择管理-选择-新建地貌, 创建基本地貌, 调整位置、分辨率等参数; ③ 选择雕刻-斜坡, 创建一个上下坡; ④ 选择雕刻-雕刻, 设置画刷等参数; ⑤ 使用画刷在创建的地貌上刷山地等其他地形; ⑥ 利用腐蚀等工具对创建的地形进行微调; ⑦ 创建地形材质, 在材质编辑器中添加纹理并连接相关节点, 然后将材质赋予地形. 图5为地形场景.



图5 地形场景

1.3.2 蓝图可视化脚本构建

Unreal Engine 引擎中的蓝图可视化脚本系统是一套完整的游戏性脚本程序系统, 它使用基于蓝图节点, 包括实例、函数、变量、宏等, 来创建庞杂的游戏性元素去完成对对象的驱动. 蓝图包括关卡蓝图和蓝图类两大类. 其中, 每个关卡拥有一个关卡蓝图, 可以在关卡中引用并操作 Actor、对关卡流送、检查点等相关事务进行管理, 还可与关卡中拖放的蓝图类进行交互, 从而触发相应的事件等; 蓝图类包含很多子类, 可以创建 Actor 类、Character 类、Player Controller 玩家控制器类、Game Mode 游戏模式类以及用于 UI 显示的控件蓝图类等等.

(1) 高铁蓝图

高铁是研究的主体, 在引擎中是主要的对象, 所以需要高铁进行驱动来实现模拟仿真. 具体步骤如下:

① 创建一个 Third Person 的蓝图模板; ② 创建一个 Character 蓝图类; ③ 导入 Maya 构建的高铁模型并添加到 Character 蓝图类中作为被驱动对象; ④ 连接相关

节点完成对象移动、鼠标等输入响应事件; ⑤ 创建速度、时间、距离变量, 连接变量及相关节点完成高铁驱动蓝图部分. 主要的蓝图程序如图 6 所示.

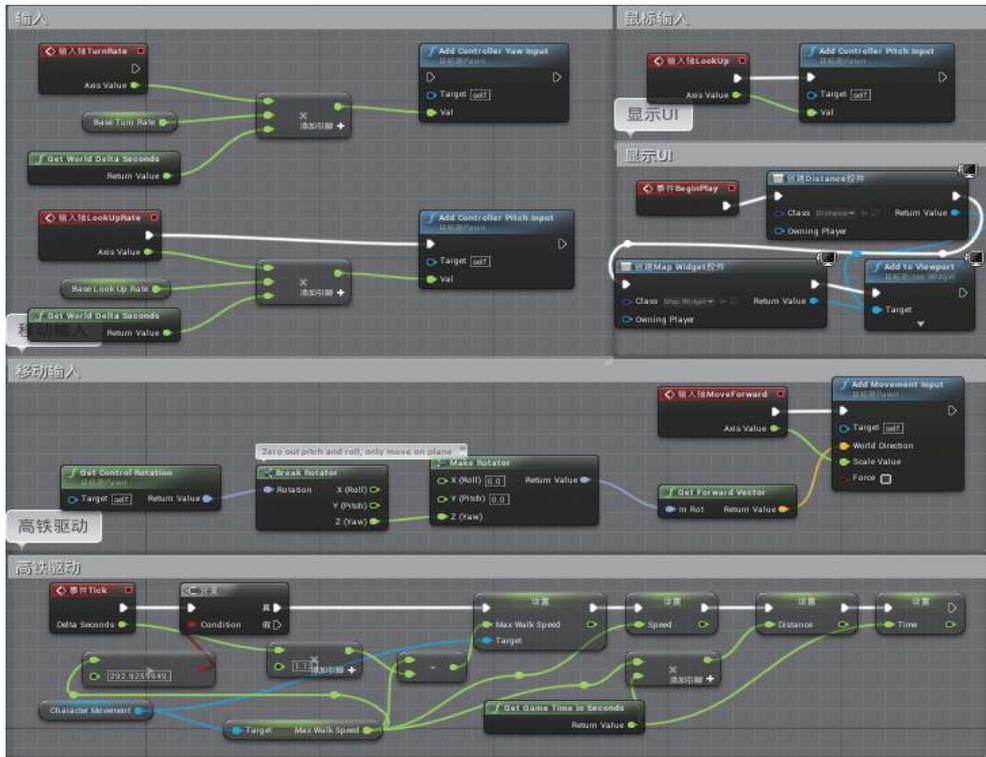


图 6 高铁驱动蓝图

(2) UI 控件蓝图

为了在头盔和显示器中显示高铁的实时数据和实现切换视角功能, 需要创建控件蓝图. 首先创建控件蓝图, 在控件蓝图中布局文本控件、按钮控件, 并将它们与相应的蓝图进行绑定, 图 7 所示是速度文本蓝图. 切换视角和退出蓝图如图 8 所示.



图 7 速度文本蓝图

实现切换视角功能需要在高铁蓝图中添加不同视角的相机, 并且构建不同视角的蓝图脚本以便于在控件蓝图中调用. 侧面视角的蓝图脚本如图 9 所示.

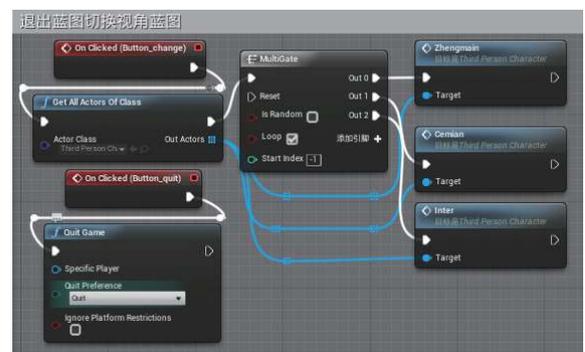


图 8 切换视角主要蓝图

1.3.3 引擎渲染

Unreal Engine 引擎具有实时逼真渲染的特点. 一方面由于具有基于物理的渲染技术、高级动态阴影选项、光线追踪功能、屏幕空间反射以及光照通道等; 另一方面, 引擎带有自动 LOD 生成系统, 可以自动决定物体渲染的资源分配, 减少不重要物体的面数和细节度, 从而提高渲染效率.

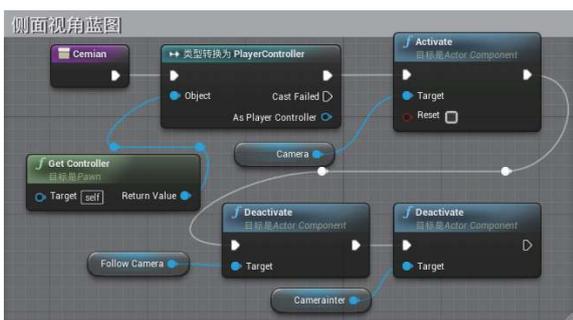


图9 侧面视角蓝图脚本

2 结果分析

本文采用 CRH3 列车组的相关参数进行测试, 其中 CRH3 动车组为 4 拖 4 共 8 节编组, 车长 200 m, 满载总质量为 530 t, 牵引总功率为 8800 kW, 再生制动功率为 8250 kW, 最高运营速度 350 km/h 测试坡度为 15°、20°。

1) 根据前文分析得到的公式对坡道上速度随坡长和坡度的关系进行模拟测试。

本文采用以下算法规则: 假设列车运行单位长度的加速度不变, 把 t_0 时刻的速度 v_0 作为变坡点的初始速度分析列车的受力情况, 利用式 (1) 或式 (2) 结合式 (3) 及相关动力学方程式计算速度 v_1 , 由于牵引力和阻力都与速度有关, 所以将 v_1 作为下一单位长度的初始速度, 重复上述步骤, 以此类推。

列车上坡时, 处于牵引力运行状态, 将引擎中文本控件中的模拟值输出为数据表格绘制图表。

图 10 展示了在上坡度为 15°、20°时列车速度随坡度、坡长的变化关系。由图可以看出, 随着坡长的增大, 列车速度逐渐变小; 随着坡度的变大, 列车速度随着坡长的增大减小的越来越快。

列车下坡时, 处于制动力运行状态, 将引擎中文本控件中的模拟值输出为数据表格绘制图表。

图 11 展示了在下坡度为 15°、20°时列车速度随坡度、坡长的变化关系。由图可以看出, 随着坡长的增大, 列车速度逐渐变小; 随着坡度的增大, 列车速度随着坡长的增大减小的越来越慢。

综合上述结果另可知, 列车下坡时速度的变化比上坡速度的变化更加大。由图 11 可以发现, 在列车下坡时, 当里程超过 4 km 时, 速度减小的越来越快, 并且

当达到一定坡长的时候, 列车速度会为 0, 理论上符合列车实际制动需要的情况。

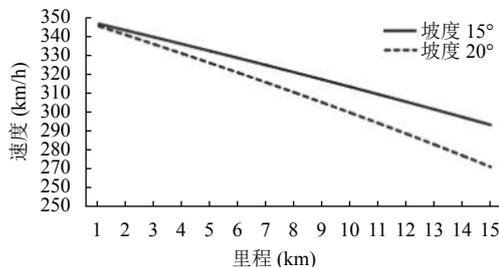


图 10 上坡时速度的变化情况

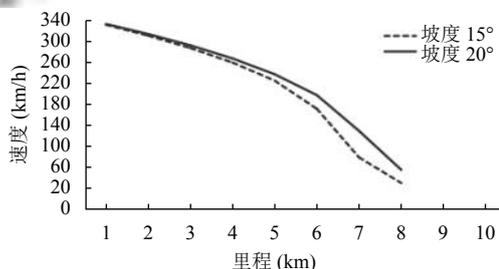


图 11 下坡时速度的变化情况

另外, 通过将模拟得到的数据与理论计算得到的数据进行对比, 结果基本吻合, 而且从直观上也符合实际情况, 进一步说明仿真模型的可行性。

2) 系统运行实时帧率

为了检测系统运行的流畅情况, 实时显示系统运行帧率, 在引擎中执行键盘~键, 打开引擎控制台, 输入 stat fps 和 stat unit 命令, 屏幕上显示帧率等参数, 如图 12。



图 12 系统运行帧率

根据实验显示, 帧率达到 119 fps, 系统运行非常流畅, 也和看到的实际运行效果一致, 也证明引擎选择的正确性。图 13 为切换视角上方的情况。

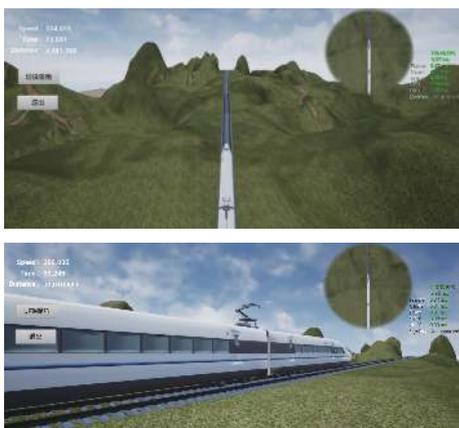


图 13 切换视角上方图

3 结论

本文提出了基于虚拟现实的高铁运动仿真模型,通过 Maya 和 Unreal Engine 建立高铁模型和仿真场景模型. 将高铁抽象成绳体模型对其进行不同运动状态下的受力分析,并在 Unreal Engine 中进行模拟,得到相关数据,与理论计算的数据进行对比,误差非常微小,其可行性得到验证,为高铁的选线、参数调整等提供了很好的可视化方案,具有一定的实用性和参考性. 为高铁研究和实际铺设提供可视化的方法,也可以缩短周期和相应成本,同时通过进一步开发也可以应用于

培训等教学工作当中. 本文后续可研究将坡道和曲线线路结合的更为复杂的高铁仿真模拟.

参考文献

- 1 今年高铁投产新线 3200 公里. 人民网. http://www.gov.cn/xinwen/2019-01/04/content_5354663.htm. [2019-01-04].
- 2 张守帅, 田长海. 高速铁路长大下坡地段列车运行速度相关问题研究. 中国铁道科学, 2017, 38(3): 124-129. [doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2017.03.18]
- 3 尹国栋, 魏庆朝, 招阳. 高速列车在不同运行工况下速度变化与坡度和坡长的关系研究. 铁道建筑, 2010, (10): 93-96. [doi: 10.3969/j.issn.1003-1995.2010.10.029]
- 4 唐金金. 基于运行图的高速列车群运行过程全息优化仿真方法与系统研究[博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- 5 张昊, 蒲浩, 胡光常, 等. 基于 OSG 的铁路三维实时交互式可视化技术研究. 铁道勘察, 2010, 36(1): 3-7. [doi: 10.3969/j.issn.1672-7479.2010.01.002]
- 6 徐阳. 列车视景仿真中三维建模技术的研究[硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2011.
- 7 宋晓伟. 地铁列车运行控制视景仿真系统中三维建模技术的研究与实现[硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- 8 张曙光. 高速列车设计方法研究. 北京: 中国铁道出版社, 2009.