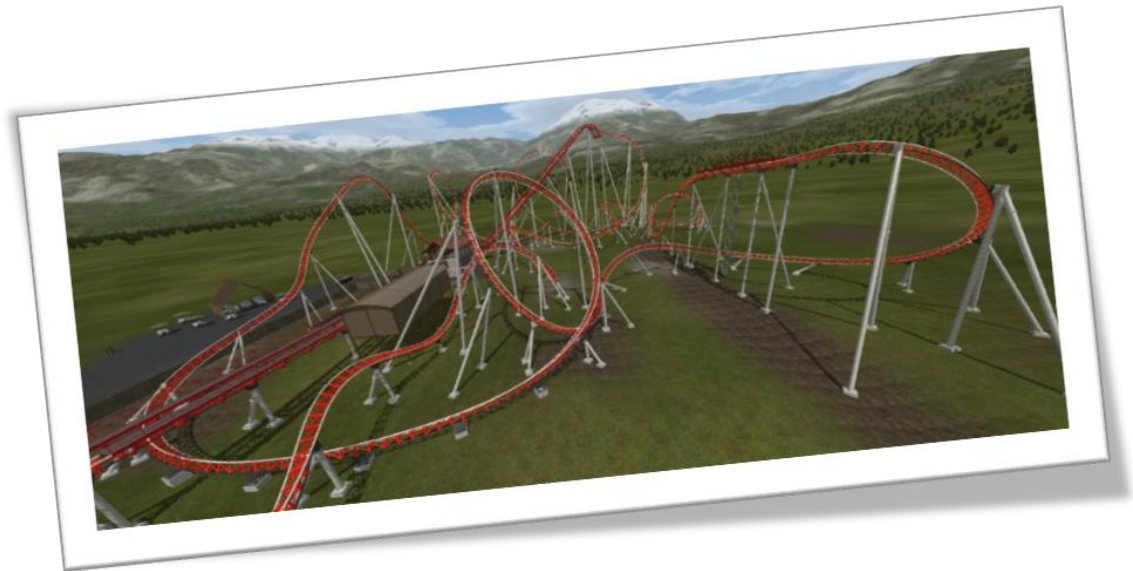


Roller Coaster of Death

过山车轨道路线设计书



王贤林 1451063

陈德宝 1450726

2017年6月5日

目录

1 引言	1
2 设计需求分析	1
1.1 总需求	1
1.2 基本条件	1
1.3 设计原则	1
3 刺激指标设定	1
4 系统构成、技术标准设定	2
4.1 系统主要构成	2
4.2 作品基本信息	3
4.3 尺寸参数	3
4.4 动力参数	3
4.5 载运参数	4
4.6 设计元素	4
5 线形设计	4
5.1 轨道线形设计思路	4
5.2 平面线形	6
5.3 纵断面线形	7
5.4 横断面设计与横倾角计算	8
5.5 合成空间曲线、调整与拟合	9
6 模型设计	10
7 运行状态分析与设计需求验证	12
8 安全性分析	17
8.1 垂直通过安全性	17
8.2 三维加速度与加速度组合	18
8.3 接钩安全性	18
8.4 碰撞安全性	18
8.5 瞬时加速度安全性	18
9 车辆通过性分析	19
10 任务分工	20
11 设计感悟	20
12 参考文献	21
附录一	22
附录二	25
附录三	26
附录四	29

1 引言

如今的人们处于一个日新月异的时代，物质生活多元化，精神生活也多元化。人们在享受丰富的物质生活的同时，也在寻求精神生活的娱乐和刺激。这其中，游乐园老少皆宜，因而丰富多样的游乐设施受到各个年龄段人群的欢迎。过山车是现时代青壮年成人追求刺激的流行方式之一。正因为过山车越来越受到人们的喜爱，如何在提高它的刺激性的同时，又保证它的安全性，是对于过山车设计者的一个巨大挑战。

过山车的设计大致可以分为两大部分，一是轨道线路和车辆设备的设计，二是轨道梁和支撑等钢构件和结构的设计，前者主要为了满足刺激性需求，而后者则是游乐设施安全性的有力保障。显然，设计一款让受众者拥有妙不可言的极致体验的过山车需要各个专业相关技术人员的通力合作。作为《道路与铁道工程》这门课的期末大作业，以下的设计内容将主要体现第一部分的设计过程。我们将在应用这门课所学知识的基础上，通过发挥想象力和创造力，由设计需求出发，给出过山车的轨道线路成果和有关的设计验算。

2 设计需求分析

2.1 总需求

面向青壮年成人的世界上最刺激的过山车轨道线路！

2.2 基本条件

1. 场地限制：长 200m，宽 100m，高 50m
2. 时间限制：运行时间 5 分钟以内
3. 动力类型：采用链式提升器将过山车提升到一定高度，然后依靠重力和惯性运行，允许施加制动控制停车。
4. 走行轮轨距及游间：轨距 1.0m，容许游间（横向偏移 10mm）
5. 轨道容许侧倾（超高坡度）角度：45 度
6. 一节车厢的轴距、车厢长度及车钩容许错位：分别为 3.0m、4.0m 和 20mm
7. 一节车厢的空载质量：1.0 吨
8. 一节车厢的载客人数：成人 3 个
9. 列车编组：1 节车辆
10. 整个列车单位重量基本阻力为：

$$\omega = 2 + 0.03V + 0.0005V^2 \quad (\text{N/kN})$$

式中：V 为车速（km/h）

2.3 设计原则

保证运行安全性与稳定性，合理规划线路，充分利用空间，满足设计需求。

3 刺激指标设定

为设计面向青壮年成人的世界上最刺激的过山车，在行进过程中，让游客感受如喷射飞机启动般的加速度推背感、风驰电掣的速度激情；满目眩晕、视觉错乱、肠胃翻江倒海的经历；肾上腺素急剧上升、心跳加快、体温降低以致短暂丧失意识甚至濒临死亡的极致体验，本过山车设置了速度、时间、加速度、空间变换、生理反应等多维刺激指标，通过空中螺旋

翻滚、垂直翻滚、倒转翻腾，在列车中体验四度空间的变换，在起伏中历经超重的压迫与失重的惊奇，再到负重力下的心悬一线，在极为短暂的时间里，拥有重力场多次变换。乘客将因此获得一系列从欢快到惊恐，从大脑缺氧至颅压骤升，从管状视野到丧失意识的独特之旅。

表 3-1 刺激指标

刺激指标	
速度	最大速度
	平均速度
	爬升率
时间	下落-100km 加速时间
	持续高速运行时间 ($\geq 80\text{km}$)
	加速度持续时间 (死亡 0.5s)
	垂直下落、抛物线上升的失重时间 (air time)
加速度	最大负重力
	最大绝对加速度 (冲击加速度)
	稳态加速度 (平均加速度)
空间变换	螺旋翻滚、垂直翻滚、水平回转、倒转翻腾的次数、角度、高差与曲率
生理反应	心率、体温、身体朝向、重力和肌肉张力变化

4 系统构成、技术标准设定

4.1 系统主要构成

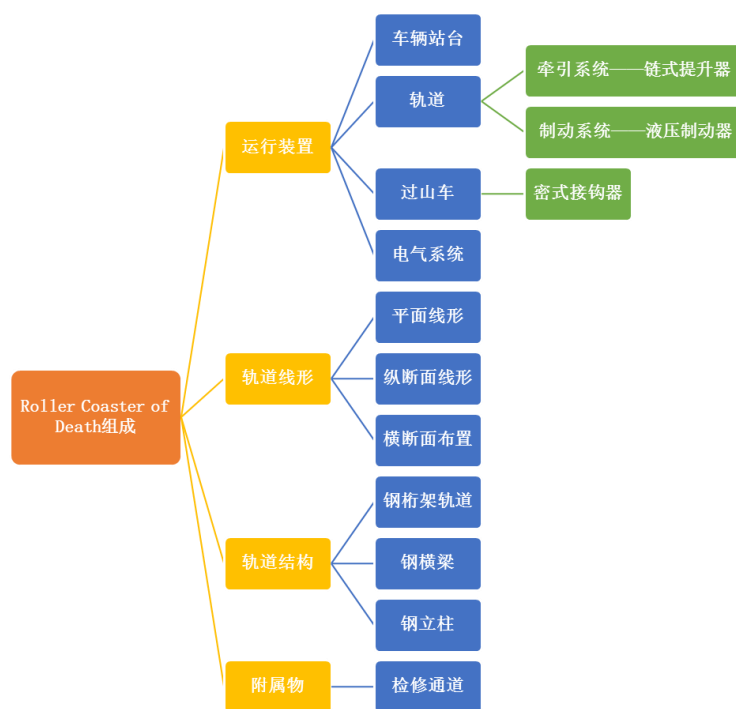


图 4-1 过山车系统设计层次图

4.2 作品基本信息

表 4-1 作品信息表

作品信息	
作品名称	Roller Coaster of Death
分类	链式过山车
种类	钢制 - 反转式
建模软件	AutoCAD、NoLimits
设计运量	72 人/每小时
设计元素	眼镜蛇回环、中心线翻滚、凌云倒挂、小型伊麦曼回环、驼峰上升

4.3 尺寸参数

表 4-2 基本参数表

基本参数	
轨道长度	1358.5 m
最大高度	49.8183 m
最小高度	5.47221m
最大落差	44.34609 m
轨距	1.0m
轨道游间	横向偏移 10mm
建筑面积投影尺寸	197.2365m×98.7623m

4.4 动力参数

表 4-3 动力参数表

动力参数	
动力类型	链式提升器提升，依靠重力和惯性运行
停车形式	制动控制
平均速度	74.1km/h（剔除提升时间）
最大运行速度	103.0km/h
运行总时间	1min26s
最大竖直下落角度	90°
最大重力加速度	5.0G (G 为重力加速度)
最大水平加速度	5.4G (G 为重力加速度)

4.5 载运参数

表 4-4 载运参数表

载运参数	
一节车厢的空载质量	1.0t
一节车厢的载客人数	成人 3 个
安全平均体重指数 (BMI)	22.5
安全身高	≥1.5m
一节车箱的轴距	3.0m
车厢长度	4.0m
车钩类型	密接式车钩 (容许错位 20mm)

4.6 设计元素

为满足设计需求,达到设计预想的刺激指标,本过山车以充分利用空间为导向,以瞬时变换空间、改变运行状态为手段,以极致速度与加速度为追求,以只可意会而妙不可言的刺激体验为目标,设置了垂直回环、水平回环、螺旋回环的多元组合,获得别具一格而充满乐趣的设计元素,在乘车过程中体验到包括眼镜蛇回环、中心线翻滚、凌云倒挂、小型伊麦曼回环、驼峰上升在内的特技动作。

(一) 垂直回环

垂直回环					
序号	1	2	3	4	5
高差(m)	45.08	25.83	20.9	19.7	11.37

(二) 水平回环

水平回环			
序号	1	2	3
曲率半径(m)	16.91892	13.60147	9.699098

(三) 螺旋回环

螺旋回环		
序号	1	2
旋转角度	360°	360°

5 线形设计

5.1 轨道线形设计思路

依据道路设计学习成果与设计经验,以需求为导向,选定设计元素。结合空间线形的特点,与道路设计原理相近,将三维线形设计分成平面线形、纵断面、横断面设计三块部分,在平面内进行设计参数选用。平面线形根据过山车运动的力学原理和过山车安全、顺畅通过的要求进行设计;结合设计元素组合,势能、动能转化,满足刺激指标的要求,进行纵断面设计;横断面布置以及横倾角计算满足轨道距离要求、结构受力以及设计元素间的连续衔接。

而后，总结平纵横设计结果，在软件中进行立体线形分析，以求平纵线形的协调；为保证过山车运行的连续性、刺激性与安全性，对线条进行适度调整。最终，进行轨道线形的质量评定，通过样条拟合与仿真迭代，生成线形的空间坐标，对方案的进行最终确定。

为了便于后文对应查看，现将最终确定的平面线形进行控制点编号，如图 5-2 所示。以使平面线形设计计算的叙述过程更加明晰易懂。



图 5-1 轨道线形设计流程图



图 5-2 平面线形控制点编号

5.2 平面线形

道路线形设计中圆曲线半径的确定是依汽车行驶横向稳定性即抗滑移和抗倾覆稳定性而定，由于过山车是通过轨道来运行，并有足够的机械措施防止车体的滑移和稳定，因此，在过山车平面线形设计中，圆曲线半径主要根据离心加速度设计的需求（体现过山车的刺激性）来确定，如下式所示，

$$a = \frac{v^2}{R}$$

式中， v ——过山车设计速度（m/s）

在道路平面线形设计中，为使曲率逐渐变化，适应汽车转向操作的行驶轨迹及路线的顺畅；缓和超高，减小行车震荡，使离心加速度逐渐变化，不致产生侧向冲击，需要在平曲线中加入缓和曲线。在道路设计中要求缓和曲线须大于一定长度以满足上述需求。而在过山车轨道设计中，为充分体现刺激性，则可以减小缓和曲线长度。

缓和曲线长度计算主要依离心加速度变化率确定，离心加速度变化率即离心加速度从直线上的零增加到进入圆曲线时的最大值。离心加速度变化率为

$$p = \frac{v^3}{LR} = \frac{\left(\frac{V}{3.6}\right)^3}{LR} = \frac{V^3}{47LR}$$

式中， V ——过山车设计速度（km/h）

下面以过山车轨道控制点号 47~49 为例进行平面线形设计。

设计车速 80km/h，偏角左偏 $58^\circ 00' 1.1''$ ，离心加速度 a 大于 $4g$ ，加速度变化率为 $p=3g/s$ ，计算此平曲线的要素及相对桩号。

圆曲线半径

$$R = \frac{V^2}{3.6^2 a} = \frac{80^2}{3.6^2 \times 4 \times 9.8} = 12.6(m)$$

离心加速度大于 $4g$ ，取 $R=12m$ 。

依离心加速度变化率，缓和曲线长度

$$L_s \leq \frac{V^3}{47Rp} = \frac{80^3}{47 \times 12 \times 3 \times 9.8} = 30.88(m)$$

取缓和曲线长度 $L_s=30m$ 。

圆曲线的内移值 ΔR

$$\Delta R = \frac{L_s^2}{24R} - \frac{L_s^4}{2384R^3} = \frac{30^2}{24 \times 12} - \frac{30^4}{2384 \times 12^3} = 2.928(m)$$

切线增长值 q

$$q = \frac{L_s}{2} - \frac{L_s^3}{240R^2} = \frac{30}{2} - \frac{30^3}{240 \times 12^2} = 14.219(m)$$

切线长 T

$$T = (R + \Delta R) \tan \frac{\alpha}{2} + q = (12 + 2.928) \times \tan \frac{58^\circ 00' 1.1''}{2} + 14.219 = 22.543 \text{ (m)}$$

缓和曲线角 β_0

$$\beta_0 = 28.6479 \frac{L_s}{R} = 28.6479 \times \frac{30}{12} = 71^\circ 37' 11.1''$$

曲线总长度 L_h

$$L_h = (\alpha - 2\beta_0) \frac{\pi}{180} R + 2L_s = (58^\circ 00' 1.1'' - 2 \times 71^\circ 37' 11.1'') \times \frac{\pi}{180} \times 12 + 2 \times 30 = 42.148 \text{ (m)}$$

外距 E

$$E = (R + \Delta R) \sec \frac{\alpha}{2} - R = (12 + 2.928) \times \sec \frac{58^\circ 00' 1.1''}{2} - 12 = 5.100 \text{ (m)}$$

控制点号 47~49、49~51 设计参数取值、计算过程表格、逐桩坐标如附录一所示。

5.3 纵断面线形

在传统的过山车中，过山车从下面进入循环；Roller Coaster of Death 经过设计，在提升至最高处后，即从最高处进入旋转回环，而通过将回环平面间分开更大的距离，即可形成螺旋回环。在空间线形中，由于赛道会曲折，过山车的中心线会沿着圆柱形的形状移动， L 表示沿圆柱轴线的回环的距离。

在运动过程中，圆筒轴的速度分量不变的。轨迹的角度由下式决定：

$$\tan \alpha = \frac{2\pi R}{L}$$

一列以高速 v 沿着螺旋回环的过山车，其向心加速度的大小为：

$$a_c = \frac{(v \sin \alpha)^2}{R} = \frac{v^2}{R} \left(\frac{1}{1 + L^2 / 4\pi^2 R^2} \right)$$

因而在设计中，通过高和低点之间曲率半径变化，可使得向心加速度增大。更具体地，有研究表明，在牛顿方程的背景下，当一个物体沿着一条导轨滑动时，它的运动受到限制，为了使物体遵循弯曲的轨迹，力必须在轨道和身体之间起作用，这个力叫做约束力。在仅受重力的条件下，描述物体被迫沿着特定的轨迹运动的约束运动的方程，即是螺旋线方程，如图 5-3 所示。

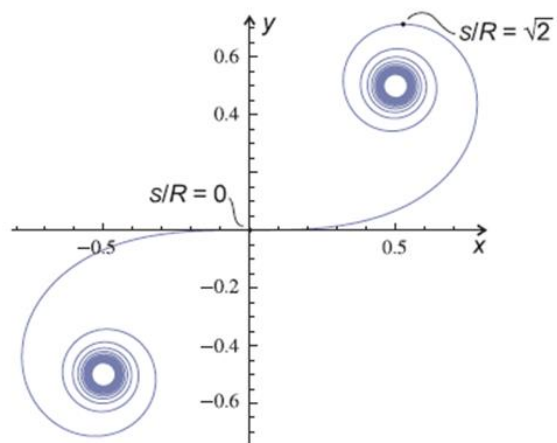


图 5-3 螺旋曲线

在具体设计中，我们通过螺旋线方程约束纵断面线形，调整至接近水滴形，如图 5-4 螺旋回环线形所示。水滴形设计使加速度变化平稳（设计验证详见第 7 节），并且使得回环顶部的弯道角度比回环侧面更急促，可以保证过山车以足够快的速度穿过回环，使之在回环顶部拥有充足的加速力，而且水滴形设计会在侧面产生较小的竖直加速度，提供了维持过山车顺畅运行所需的力，而不致将过大的离心力施加在可能有危险的部位。

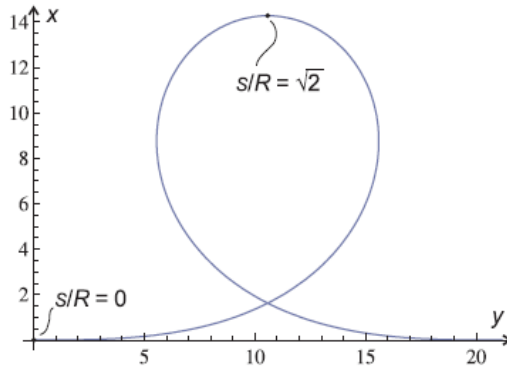


图 5-4 螺旋回环线形

过山车作为一款游乐项目，为了满足刺激性要求，可放宽道路纵断面设计中关于坡长坡度的限制（但平曲线半径和竖曲线半径仍需满足车辆通过性要求），直接通过竖曲线计算要素设计纵断面。

下面以过山车轨道控制点 48-53 号为例进行纵断面线形设计，为节省篇幅，纵断面计算结果列表如附录二附表 2-1 所示。

将线形设计的控制点号三维坐标导入 AutoCAD 中，通过反复调整试线来确定初步线形，为实体建模做准备，下图 5-5 为平面线形和纵断面初步线形。

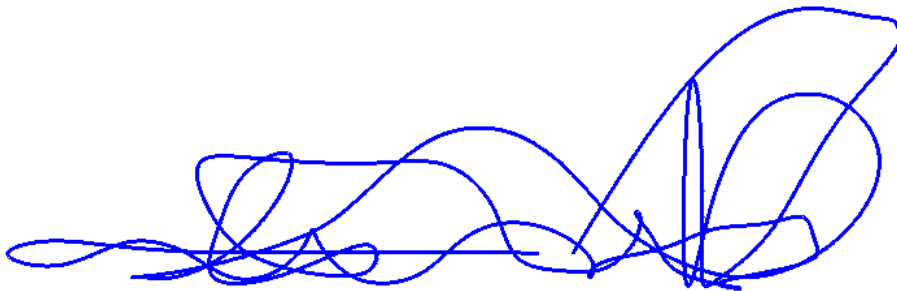


图 5-5 初步线形设计图

5.4 横断面设计与横倾角计算

1. 横断面布置

设计中，横断面布置主要满足轨道距离要求、结构受力以及设计元素间的连续衔接。与道路设计不同，过山车横断面无路基与路面，其以轨道结构、轨距尺寸为主进行设计。设计中选用了无缝钢管为其轨道，下辅以三角桁架保证轨道刚度与强度，无缝钢管设计距离为 1m。

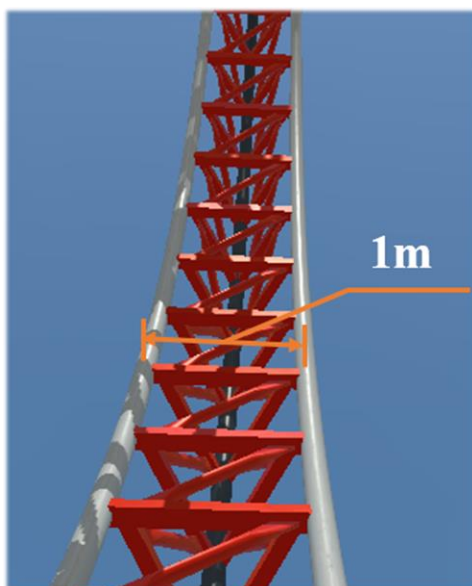


图 5-6 轨道横断面图

2. 横倾角计算

过山车在弯道运行的时候，应使整个车体的侧翻趋势尽可能小，这就必然要使轨道有一定的横倾角 α ，当这个横向倾角是一个合适的值时，将使整个车体系统不受到轨道给它的侧向力。

1) 沿轨道有纵向倾角时

$$\tan \alpha = \frac{v^2 \cos^2 \gamma}{R_h \left(g \cos \gamma + \frac{v^2}{R_v} \right)}$$

由此可得出轨道横向倾角，式中： v ——装置滑行速度（m/s）

γ ——沿轨道纵向倾角

R_h ——轨道水平半径

R_v ——轨道垂直半（+凹，-凸）

2) 沿轨道无纵向倾角时

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{R_h g} \quad (\text{由此可得出轨道横向倾角})$$

通过计算获得过山车行驶经过每个位置时所需的理论横倾角，但此横倾角曲线是离散的不光滑的曲线，需要通过样条拟合和仿真迭代获得最优实际的横倾角，实际横倾角详见第 6 节模型设计。

5.5 合成空间曲线、调整与拟合

根据上述平纵横设计计算结果，整合空间三维坐标，获得轨道轴线各点空间坐标，导入 NoLimits 2（过山车建模专业软件）中。

通过 NoLimits 2 设计软件中的三维建模展示，对线形进行调整；通过轨道实体模型的建立，对横倾角进行样条拟合，最终空间线形坐标详见附录三-空间线形控制点坐标表。

6 模型设计

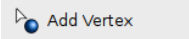
NoLimits 2 Roller Coaster Simulation 是一款功能齐全的过山车编辑器，具有 CAD 风格的线框显示、逼真的过山车仿真效果和集成的环境编辑器，能够自定义地设计拖放式轨道、支撑结构和其他对象，其强有力的样条编辑工具便于设计者创造平滑而真实的轨道线形。

在上述平纵横计算结果的基础上，在 NoLimits 2 中建模的过程实际是“点-线-面-体-渲染-导出”的一整个过程。NoLimits 2 软件的菜单栏和工具条如下图 6-1，各个工具条分别提供了轨道编辑、支撑设置、地形布置、风景渲染等功能。



图 6-1 菜单栏和工具条

有关建模步骤和阶段性成果分述如下。

- 1) 打开 Track 面板，输入控制点坐标，使用命令  添加一系列的顶点（图中蓝色圆点），构成控制路径；

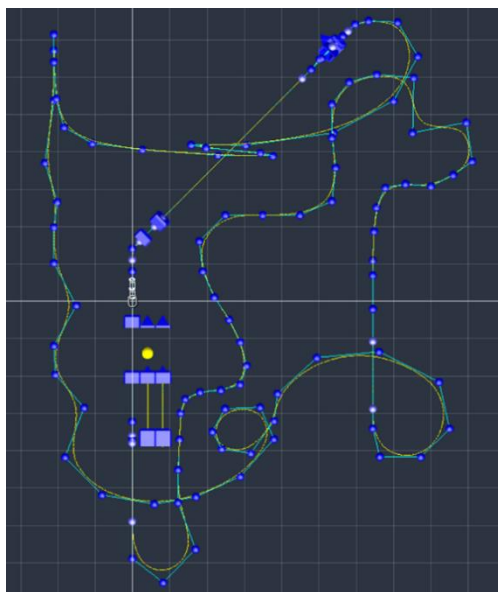


图 6-2 平面线形控制路径

- 2) 通过 Bezier 曲线调整轨道线形成为一条光滑平顺的曲线；

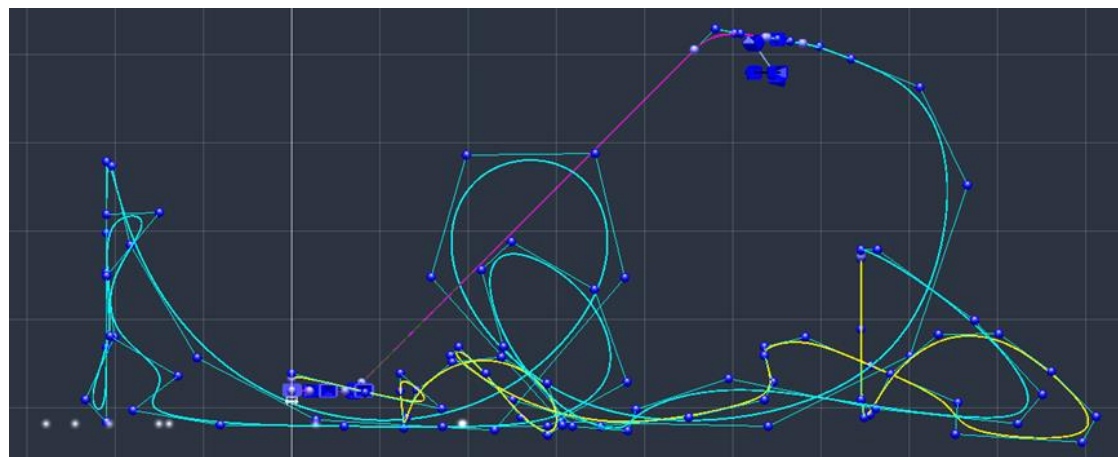


图 6-3 调整纵断面线形

3) 将轨道线形划分区段（软件中称作 Block & Separator），分别用于接下来的车站、链式提升器工作区间、刹车段的建模，如下图的绿色小圆块；

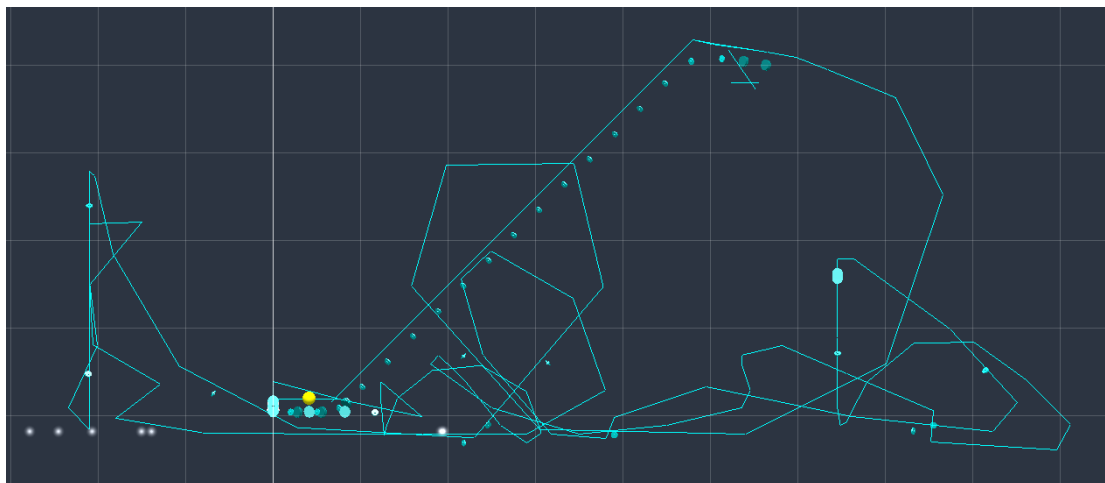



图 6-4 划分轨道区间

4) 确定最终线形后，使用命令  Add Fork Switch 添加过山车轨道，调整轨道的横倾角，如下图 6-5 所示；

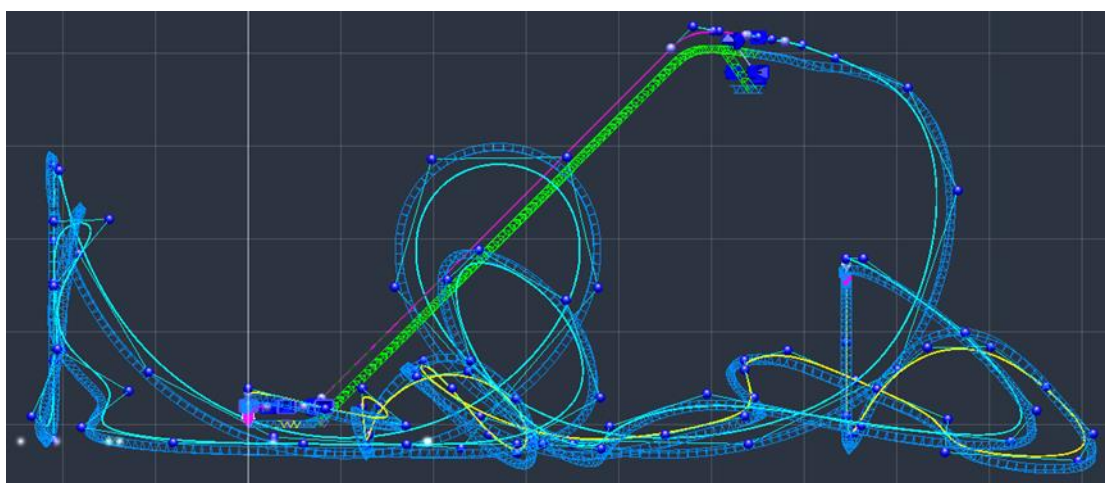




图 6-5 轨道横倾角调整

5) 打开 Supports 面板，使用  Add Footer 命令和  Add Beam 命令可以分别设置支撑、轨道横梁等结构构件的参数，建出构件的三维实体；

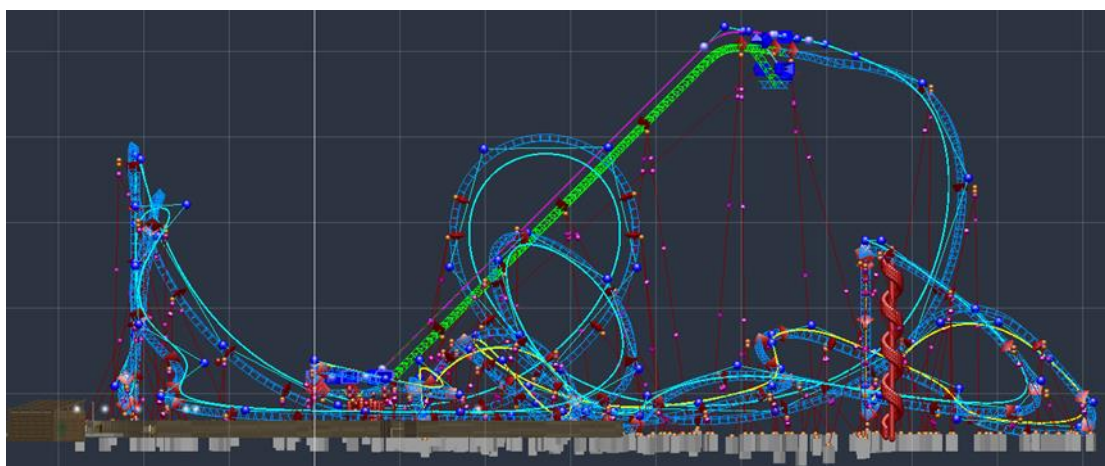


图 6-6 支撑布置，车辆形式选择

- 6) 在 Track 面板里选择合适的车辆形式，调整轴距、车厢长度及车钩容许错位等车辆参数。
- 7) 打开 Terrain 面板，使用沙盒工具可以生成地形和地物，如树木、草地等；
- 8) 打开 Scenery 面板，通过设置相关参数，可以模拟光线、云彩、温度、湿度等气候条件；



图 6-7 地形地物布置和气候效果模拟

- 9) 打开渲染编辑器，将建好的三维模型进行渲染得到效果图；



图 6-8 渲染效果图

- 10) 在 NoLimits 中进行过山车仿真模拟以检验轨道是否满足车辆通过性要求，并生成模拟过山车运行的场景；
- 11) 导出动画，在 Premiere 里剪辑和添加背景音乐，合成视频。

7 运行状态分析与设计需求验证

1. 前进速度计算与运行速度分析

将轨道分成很多个关键点，列车从任意一点 i 运行到点 $i+1$ 的速度计算，按照系统能量守恒定理。

- (1) i 计算点

$$\text{动能 } E_{id} = \frac{1}{2}mv_i^2$$

$$\text{势能 } E_{ip} = \sum_{j=1}^6 mgH_{ij}$$

式中:

m ——单车质量, 共 j 辆车 (取 6)

v_i —— i 计算点列车速度 (m/s)

g ——重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$

H_{ij} —— i 计算点, j 辆车高度 (m), $j=1\sim 6$

(2) $i+1$ 计算点

$$\text{动能 } E_{i+1,d} = \frac{1}{2} \times 6mv_{i+1}^2$$

$$\text{势能 } E_{i+1,p} = \sum_{j=1}^6 mgH_{i+1,j}$$

重力摩擦损失:

$$E_{i,i+1,g} = \frac{1}{2}mg \sum_{j=1}^6 (\cos \gamma_{ij} + \cos \gamma_{i+1,j}) fs_{i,i+1,j}$$

向心力摩擦损失:

$$E_{i,i+1,n} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^6 \left(\frac{v_i^2}{R_{ij}} + \frac{v_{i+1}^2}{R_{i+1,j}} \right) fs_{i,i+1,j}$$

式中:

v_{i+1} —— $i+1$ 计算点, 列车速度 (m/s), j 辆车相同

$H_{i+1,j}$ —— $i+1$ 计算点, j 辆车高度 (m), $j=1\sim 6$

$\cos \gamma_{ij}$ —— i 计算点, j 辆车法线 (垂直轨道) 方向余弦

$\cos \gamma_{i+1,j}$ —— $i+1$ 计算点, j 辆车法线 (垂直轨道) 方向余弦

$s_{i,i+1,j}$ —— j 辆车 i 和 $i+1$ 计算点, 重心轨迹线弧长 (m)

R_{ij} —— i 计算点, 重心轨迹线曲率半径 (m)

$R_{i+1,j}$ —— $i+1$ 计算点, 重心轨迹线曲率半径 (m)

根据能量平衡:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \times 6mv_i^2 + \sum_{j=1}^6 mgH_{ij} &= \frac{1}{2} \times 6mv_{i+1}^2 + \sum_{j=1}^6 mgH_{i+1,j} - \frac{1}{2}mg \sum_{j=1}^6 (\cos \gamma_{ij} + \cos \gamma_{i+1,j}) fs_{i,i+1,j} \\ &- \frac{1}{2}m \sum_{j=1}^6 \left(\frac{v_i^2}{R_{ij}} + \frac{v_{i+1}^2}{R_{i+1,j}} \right) fs_{i,i+1,j} \end{aligned}$$

$$v_{i+1}^2 = \frac{6v_i^2 + 2g \sum_{j=1}^6 (H_{ij} - H_{i+1,j}) - \sum_{j=1}^6 \left[g (\cos \gamma_{ij} + \cos \gamma_{i+1,j}) + \frac{v_i^2}{R_{ij}} \right] fs_{i,i+1,j}}{6 + \sum_{j=1}^6 \frac{fs_{i,i+1,j}}{R_{i+1,j}}}$$

同时，考虑整个列车单位重量受到基本阻力为：

$$\omega = 2 + 0.03V + 0.0005V^2 \quad (\text{N/kN})$$

式中：V为车速（km/h）

根据上述原理及公式，推算得运行全过程速度如附表 4-1 运行-速度表。结合附表 4-1 运行-速度表绘制得图 7-1 速度-时间曲线及各项速度类刺激指标如表 7-1 所示。

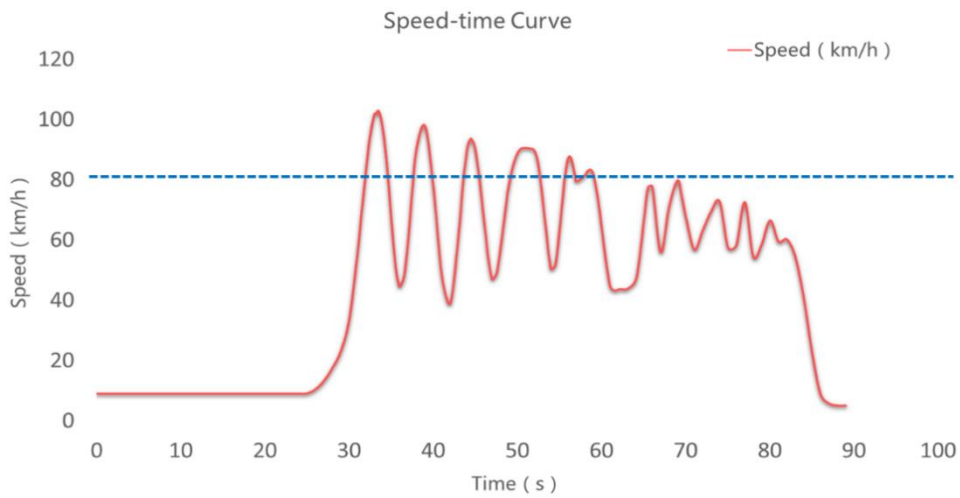


图 7-1 速度-时间曲线

表 7-1 速度类指标

最大速度 (km/h)	103
平均速度 (km/h)	74.1
下落-100km 加速时间 (s)	4
持续高速运行时间(≥80km) (s)	14

从对速度-时间的分析可知，过山车在提升至最高处以仅 90° 垂直下落俯冲，即达到最大速度 103km/h，用时仅 4s，百公里加速可媲美超级跑车奥迪 S8 4.0TFSI quattro (4.08s)，与相同高度下自由落体的最大速度相近 (107.4km/h)。在运行过程中，过山车历经 11 次加速与 12 次减速，在高空以每小时 74.1 公里的平均时速飞驰、爬升、俯衡、扭动，最大爬升率为 10.3m/s，与二战日本杀人魔“零式战机”不相上下 (11m/s)。不间断地为乘客带来近地飞行的惊喜体验；与此同时，高速运行时间均匀分散至整个“飞行”旅途中，如表 7-2 所示，过山车长时间迎风呼啸般地飞驰使乘客始终保持亢奋、紧张的状态。

因过山车仅受重力与惯性驱动，速度-时间曲线实际反映轨道的高程，即重力势能。不难发现，轨道线路设计良好地在限定高度内将高程逐级降低，即将重力势能逐级、平顺释放，最大程度上保证了运行时间内的刺激感，有效避免了运行中的空窗期。

表 7-2 高速运行持续时间表

高速运行持续时间					
持续时间(s)	2.6	2.5	2	3.5	3.4
合计(s)	14				

2. 加速度计算与分析

由物理学原理，曲线段合加速度计算式：

$$a_{i+1} = \frac{v_{i+1}^2}{R_{i+1}}$$

式中：

a_{i+1} —— $i+1$ 的加速度

v_{i+1} —— $i+1$ 的速度

R_{i+1} —— $i+1$ 的曲率半径

将其在空间三维平面投影，即得相应时刻的竖直加速度与水平加速度，在全线路计算得相应加速度值，详见附表 4-1 运行时刻-速度-加速度表。根据加速度表，绘制得图 7-2 垂直加速度-时间曲线、图 7-3 侧向加速度-时间曲线与图 7-4 三维加速度-时间对比曲线。

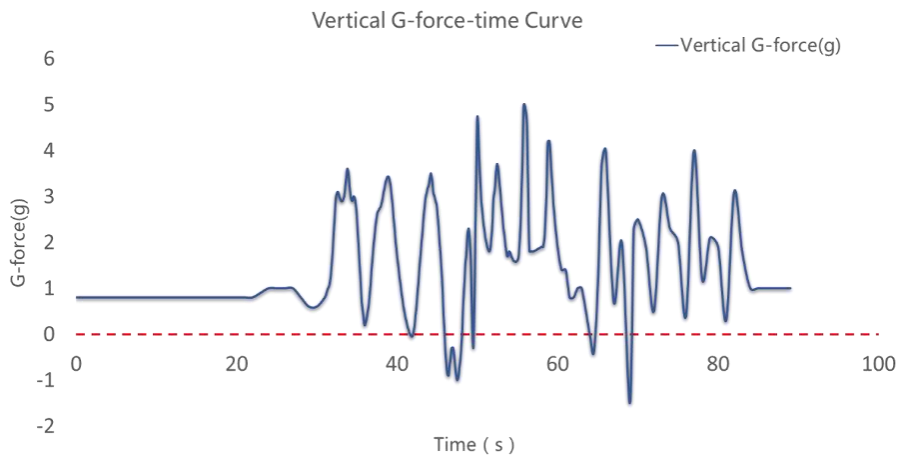


图 7-2 垂直加速度-时间曲线

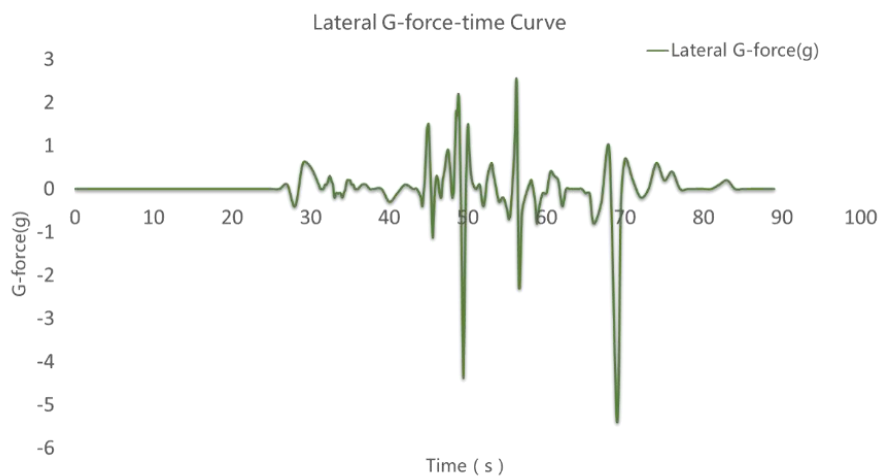


图 7-3 侧向加速度-时间曲线

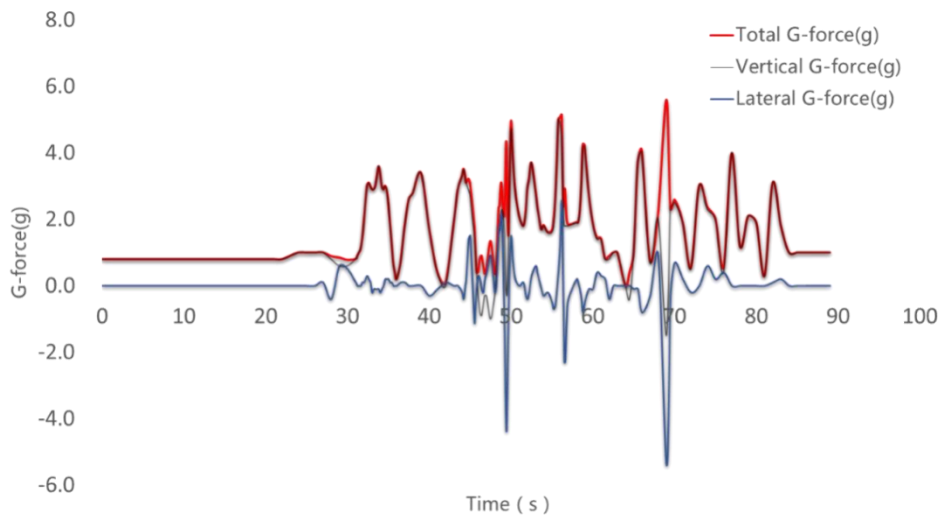


图 7-4 三维加速度-时间对比曲线

从计算结果结合图表可知，在过山车行进的过程中，身体会经历三个维度的加速，各方向的加速度峰值均保持在了较高的水平。如竖直加速度峰值达到 5g；水平加速度峰值在小型伊麦曼回环处达到瞬时 5.4g；最大负重力达 1.5g，接近普通民航客机的操作限值；合加速更是直逼普通成人的承受极限（6g）。同时，也可发现竖直加速度的变化与轨道高程及竖曲线曲率变化相吻合，水平加速度的变化与平面线形的变化相匹配。

表 7-3 速度类指标

	竖直加速度 (g)	水平加速度 (g)	负重力 (g)	合加速度 (g)
最大值	5	2.5	-1.5	5.6
最小值	-1.5	-5.4	5	0

通过对加速度曲线更深入地分析发现，在该设计作品的运行过程中，出现了速度、加速度、合速度均达到高峰值的耦合时间点，我们称之为“死亡 0.5s”。在 55.7s-56.2s 运行时刻，竖直加速度始终保持在 4.5-5g 的范围内，持续 0.5s 的高峰加速度将导致人体瞬时大脑缺氧，出现瞬间意识模糊的感觉，瞳孔略微放大，在视野中出现管状画面，这也是我们将该作品称为“Roller Coaster of Death”的原因之一。

表 7-4 死亡 0.5s

死亡 0.5s			
时刻 (s)	速度 (km/h)	竖直加速度 (g)	合加速度 (g)
55.7	82.5	4.5	4.5
55.8	84.4	5	5.0
56	87.2	4.9	5.1
56.2	87.8	4.5	5.1

此外，同样以时间的维度看，过山车竖直加速度大于等于两倍重力加速度的时间累计长达 19.1 秒，换言之，在这段时间中，乘客将始终被紧紧压迫在座位中无法动弹，眼睁睁直面“死亡”。同时，在驼峰上升阶段将经历共计 3.2s 抛物线上升所致的失重时间(air time)，拥有凌空飞行的体验。

8 安全性分析

8.1 垂直通过安全性

根据能量守恒原理，如果不考虑空气的阻力和轨道的摩擦力，那么，运动中的过山车，无论处在何处，它具有的势能和动能之和，都应该等于它在第一个坡顶时的势能。考虑到过山车受到基本阻力，即：

$$\omega = 2 + 0.03V + 0.0005V^2$$

设计中通过在限高内提高链式提升器高度，使其积蓄的势能要比它在大回环最高处的势能大得多。因此，在势能—动能的转化中，会有足够的动能保证过山车以一定速度安全通过大回环的最高点，而不至于掉下来。

从物理学角度分析，大回环实际上为离心装置，在回环里，游客受到的合力不断变化：在回环的底部，离心力方向与重力一致，冲下回环时，游客会感到离心力将自己向座位方向挤压，此时游客感觉到身体受外力压迫，即处于超重状态。到了回环顶部，游客完全倒了过来，重力想把游客拽下去，但此时离心力比重力更大，且方向直指天空，把游客按在了座位上。此时可能会出现短暂的失重现象，根据物理学原理，轨道竖向无约束情况下保证安全通过回环顶部的最小速度为：

$$v = \sqrt{gR}$$

在本设计中，过山车通过链式提升器直接从第一个回环顶部落下，第二处回环高差最大，为 25.83m，其相应顶部半径为 12.5m，同时，其为各回环顶处最大半径，相应临界速度为 40.1km/h。与此同时，从图 8-1 速度时间曲线可知，提升释放后，回环运行过程中最小速度为 43km 且出现在第四回环处，因而保证了运行的通过性与安全性。此时，就算没有安全护具，游客也不会因失重掉下来；当然，出于安全考虑，在实际应用时，仍需要做好相应的安全防护措施。

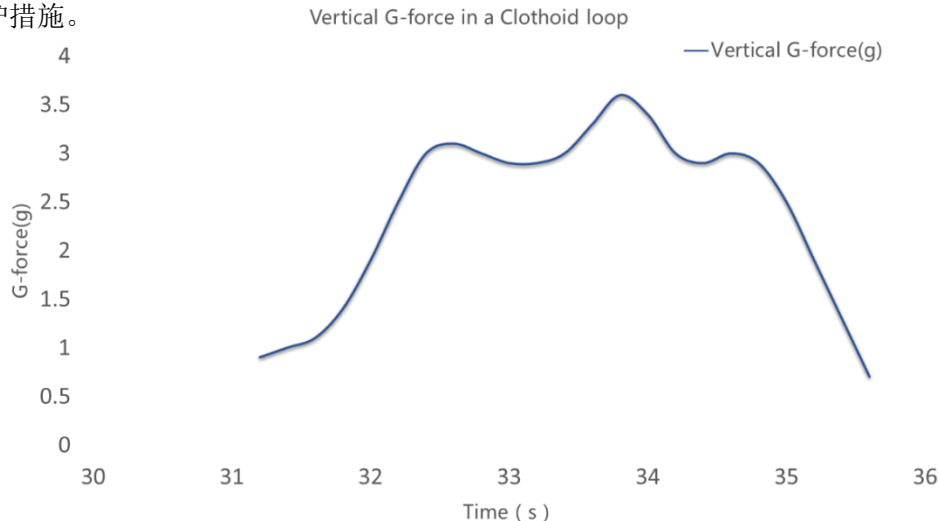


图 8-1 螺旋回环竖直加速度变化

安全性的内在来源在于在前文中已提及的螺旋线方程——本设计中通过螺旋线方程约束竖直回环线形，保证轨道曲率的均匀变化，在轨道倒置的回环顶部过山车仍能安全通过。从图中可知，竖直加速度逐渐从 1g 增加，接近底部达到最大值 3.6g，然后再降低，通过螺旋线方程约束线形，竖直加速度沿着轨道的曲率线性增加，既保证过山车的回环在运行中切实可行；同时对于健康的乘客来说，3~4g 的加速度峰值能够保证运行时的人身安全。

8.2 三维加速度与加速度组合

结合《中华人民共和国游乐设施安全规范（GB 8408-2008）》与加速度曲线可知，本设计过山车运行各向加速度峰值均不超过规范允许值且充分利用限值空间。竖直加速度大于等于 4g 时间累积为 1.1s，而峰值为 5g，在规范限值内；水平加速度峰值 5.4g 持续时间为 0.01s，恰在规范限值内；最大负重力达 1.5g，不超过规范允许值-2g，且根据规范，此时相应持续时间不受限制（规范图表只表述在 4s 内）。

表 8-1 竖直加速持续时间表

竖直加速度持续时间		
$\geq 2g$ (s)	$\geq 4g$ (s)	$\leq 0g$ (air time) (s)
19.1	1.1	3.2

根据图 7-6 加速度组合与规范限值对比图，显然从水平与竖直加速组合的角度分析，运行全过程中三维加速度均满足我国规范要求，验算得以通过，安全性得以保障。

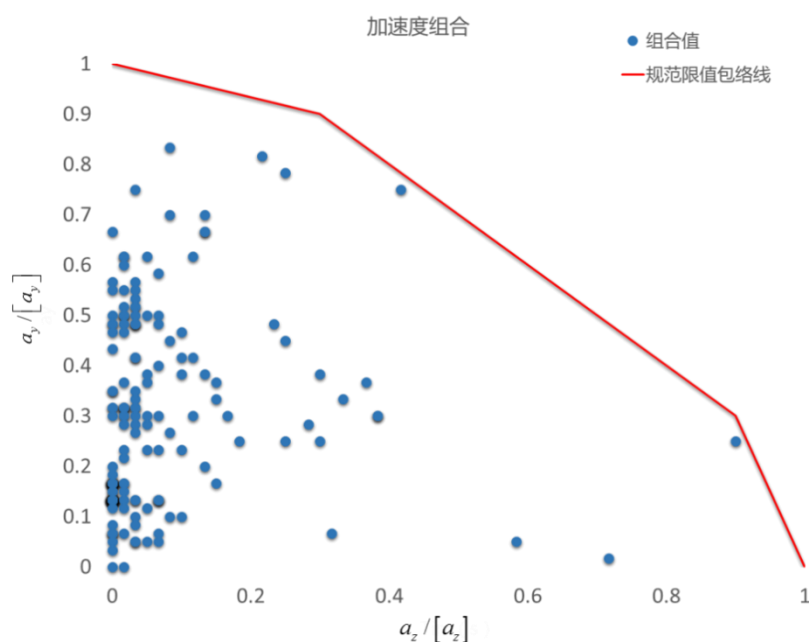


图 8-1 加速度组合与规范限值对比图

8.3 接钩安全性

因设计中，车辆间采用密接式车钩，坡段长度不受此条件限制，接钩安全性满足。

8.4 碰撞安全性

本设计中，过山车轨道通过布置“区段”系统，避免过山车相互碰撞。即是通过把轨道分为若干感应区段，感应器负责监测过山车的精确位置，每一时段在轨道中每个区段中均只允许一辆过山车通过，当异物碰触轨道，过山车立即制动停车，保证调度安全。

8.5 瞬时加速度安全性

本设计中，采用控制峰值加速度在 6g 以下与控制乘客的平均体重指数在 22.5 以下保证瞬时加速度下的人身安全，这与一研究成果有关。有一针对位于美国德克萨斯州圣安东尼奥响尾蛇过山车的研究表明，其一个特别的角落被发现产生了横向弯曲和轴向负载高达 6g 的加速度峰值，持续时间超过 100 毫秒，有学者发现其对于人体的冲击能量与 3~4 英里/小时

的汽车低速追尾碰撞产生的能量相当，并且产生了大量的伤害索赔。调查中，脖子、背、颈椎、皆为易受伤部位，其中背部最大能承受 3000N 冲击力。大多数冲击伤害发生在特定转折点，脊椎损伤比扭伤或拉伤更严重，同时女性的峰值加速度比男性高（因女性更大的头颈比率）。约 30 万名乘客中，共有 39 名受试者中有严重的脊椎损伤，受伤率为 13 / 100000。研究结论是，峰值加速度在 6g 以下、乘客平均体重指数(BMI) 男性在 23.1 以下与女性 22.6 以下，能够较大程度避免冲击加速度对人体的伤害。

9 车辆通过性分析

车辆通过性分析是在保证安全性的前提下，检查平曲线和竖曲线半径能否满足车辆“正常”通过。对于平曲线半径过小的情况，如果车身过长则转弯不能顺利通过；对于竖曲线半径，过山车依靠重力和惯性运行，根据物理定律，如果 $v < \sqrt{gR}$ ，则车辆不能通过坡顶，过山车连续行驶难以为继。在设计时，给出车辆的通过性分析是必要的，但是，手算的过程比较繁琐而重复。令人欣慰的是，NoLimits 是一款出色的仿真软件，能够真实地检验出过山车在满足物理规律的前提下能否顺利地通过轨道。下面通过给出速度和离心加速度沿轨道方向的变化分布（图中的绿色竖标代表速度大小，黄色竖标代表加速度大小）来简略说明仿真过程，在实践中，通过控制速度和离心加速度来调整轨道线形也是线形设计的一个方面，若水平轨道上车辆速度 $v \leq 0$ ，则平曲线不能正常通过；若离心加速度小于某一数值，则纵断面竖曲线不能正常通过。

由于 NoLimits 生成过山车运行状态的过程并不像 3dsMax 里是通过设置关键帧动画并调整照相机角度来模拟实现的，它可直接进通过 VR 虚拟现实仿真模拟。毋庸置疑，通过性分析结果中，视频具有最佳的说服力。最终车辆在轨道上的运行状态可观看渲染导出的视频。

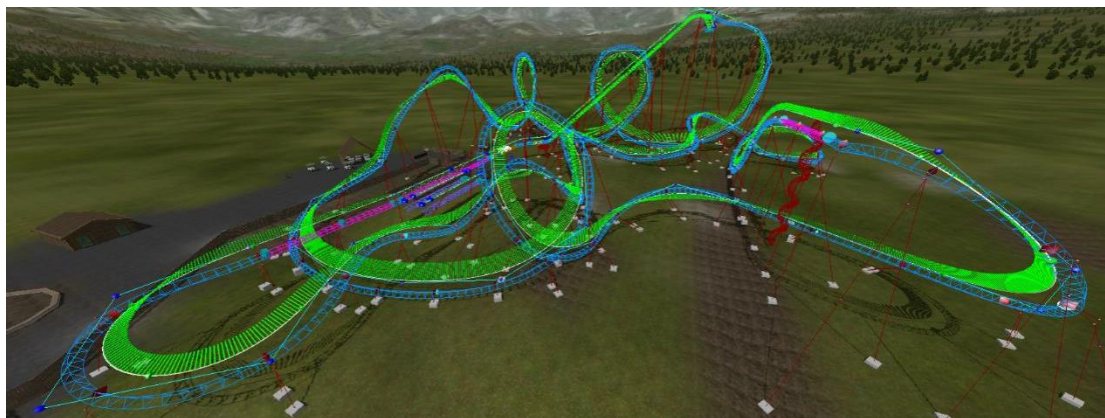


图 9-1 速度沿程变化图

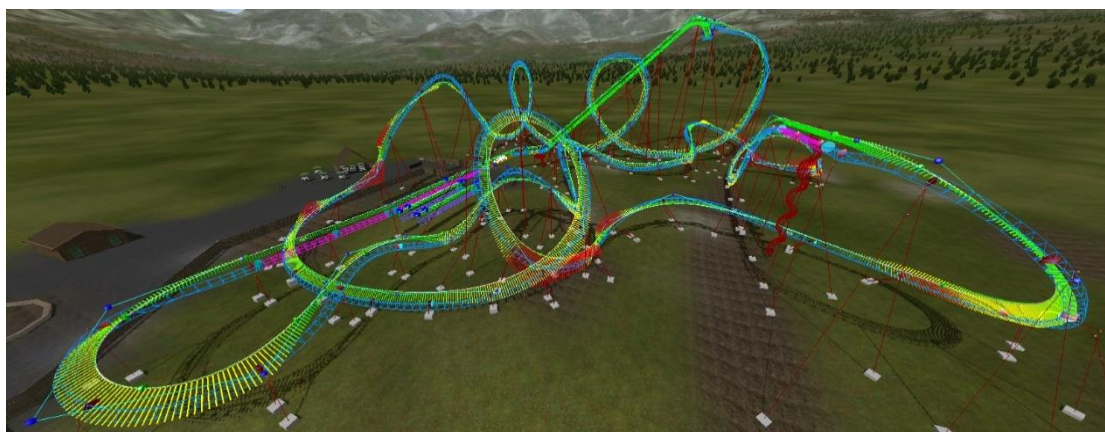


图 9-2 离心加速度沿程变化图

10 任务分工

任务分工表	
设计需求分析	陈德宝、王贤林
系统构成设计	王贤林
刺激指标设定	王贤林、陈德宝
平纵横计算	陈德宝
运行状态、安全性分析	王贤林
通过性分析	陈德宝
模型制作	王贤林、陈德宝
视频渲染	陈德宝

11 设计感悟

在学习了《道路与铁道工程》这门课后，于我而言，尝试去设计最刺激的过山车轨道线路仍然是乐趣与挑战并存的一项作业。初次接触这个题目时，我感觉无从下手，不知“刺激”这一需求如何付诸实践。慢慢地，从一点一点地设定刺激指标，确定过山车系统的构成，到运用所学道路平纵横方面的知识着手计算，过山车的设计方案在我的脑海里渐行明朗。在这一过程中，课堂上轨道工程方面内容的学习和之前编制的平面线形计算表格对于初步拟定设计线形起到了至关重要的作用。在初步计算之后，如何运用建模软件去形象化地展现过山车轨道线形仍然是非常棘手的问题，AutoCAD 不够直观，3dsMax 建模过于复杂。幸运的是，我们在网上了解到 NoLimits 是一款非常逼真而便捷的过山车专用编辑软件。于是，我们自学全英文教程，愚公移山般吃透各个编辑命令。自此，如沉迷游戏一般一发不可收拾，建模过程既艰辛又充满着乐趣，逼真的画面和效果吸引着我们的眼球。连续几个周末，从早上干到晚上，我们心目中最刺激的过山车终于应运而生。一切的付出和努力都是值得的，因为成果在一点一滴积累中逐渐形成和完善。

在这个过程中，我体会最深的是如何根据需求去表达你的设计。这一点，学建筑的同学远比我们做得好。诚然，计算非常重要，它是确保安全性的前提，但是，人类的本能对繁杂的计算数据并不感兴趣，真正吸引公众眼球的是外观和画面的效果。因此，如何把你的设计形象化地展现出来尤为重要，在这一方面，建模软件的熟练掌握不可缺少。

这个学期，我与贤林同学长期合作，两门最重要的专业课大作业都是和他组队完成。我真心佩服他的魄力，也感谢他的支持和鼓励。于细节处，向他学习；于无声处，Roller Coaster of Death 终于横空出世。

——陈德宝

早有耳闻桥梁课群的课程设置繁重而困难，颇具挑战性，直到这学期真正体验了桥梁人的学习生活之后，才有了切身的感受。但是，所谓艰难困苦，玉汝于成，同济桥梁之所以闻名世界，与同济桥梁人在校所接受的大胆、前卫的教育必定是息息相关的，《道路与铁道工程》这门课正是其集中体现，而此次的设计课题，更是将其推向极致，使我们不得不重新组织、审视、运用自身多年来的知识积淀，将其灵活而富有创新地渗透到此次设计作业的每一个细节中。我想，这也是学习这门课程最大的意义。

此次的设计中，我们以需求为导向，时刻不忘在理论知识与实际需要中牵线搭桥，努力谋求需求与设计的最佳吻合与科学实现。首先我们认清了科学原理的真理性与适用性间的辩证关系。以过山车与普通道路线形设计为例，都在空间线形的范畴中，但是显然过山车轨道的空间性更强，其在某个平面往往存在投影重合，因而两者具有共通性却不能按部就班机械抄袭，需要回归最本质的原理选定相关的参数，结合物理、数学的相关知识设计符合我们设计目标的线路。同时，我们深刻体悟到团队协作的重要性，与德宝同学的合作愉快而高效，我们互相启发思路，互相讨论证伪，互补劣势，发挥优势，最终呈现出我们心中所系而切实可行的作品。

毫无疑问，阮欣老师的《道路与铁道工程》从以往传统地讲授、模仿例题、练习的固定套路中摆脱出来，颠覆了我们包括进入大学 15 年来学习生涯中建立的对于学习、思考的认识，老师以一种放手的姿态，让我们在自由的知识海洋中寻觅、搜索我们想要的结果。当然结果并不重要，可贵的是这样一种找寻过程中对于能力的提升与视野的拓展，使我们这学期的学习生活紧张、丰富而又充实。

感悟之余，唯有感谢！

——王贤林

12 参考文献

- [1]张金水.道路勘测与设计[M].3 版. 上海:同济大学出版社,2015.
- [2]游乐设施安全规范(GB 8408-2008)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [3] R. Müller, "Roller coasters without differential equations—a Newtonian approach to constrained motion," *European Journal of Physics*, vol. 31, (4), pp. 835-848, 2010.
- [4] C. Braccesi and F. Cianetti, "Development of a procedure for the structural design of roller coaster structures: The rails," *Engineering Structures*, vol. 93, pp. 13-26, 2015.
- [5] A. B. Nordmark et al, "The comfortable roller coaster—on the shape of tracks with a constant normal force," *European Journal of Physics*, vol. 31, (6), pp. 1307-1317, 2010.
- [6] A. Pendrill, "Acceleration in one, two, and three dimensions in launched roller coasters," *Physics Education*, vol. 43, (5), pp. 483-491, 2008.
- [7] A. Pendrill et al, "Student investigations of the forces in a roller coaster loop," *European Journal of Physics*, vol. 34, (6), pp. 1379, 2013.

附录一

平面线形计算表格

一、 47-49 号控制点计算过程

附表 1-1 47-49 号控制点设计参数表

序号	交点号	X (N) 坐标	Y (E) 坐标	半径	Ls1	Ls2
47	QD	21.700	82.3			
48	JD1	34.200	85.1	12	30.000	30.000
49	JD2	41.800	77.4			

附表 1-2 47-49 号控制点曲线要素表

交点号	交点坐标		交点桩号	偏角值		曲线要素值 (m)						
	N (X)	E (Y)		左偏	右偏	R	Ls1	Ls2	T1	T2	L	E
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
QD	21.700	82.300	K0+000.000									
JD1	34.200	85.100	K0+012.810	58°00'01.1"		12	30	30	22.543	22.543	42.148	5.100
JD2	41.800	77.400	K0+020.690									

附表 1-3 47-49 号控制点逐桩坐标表

桩号	中线坐标	切线方位角		
		N (X)	E (Y)	
ZH	-K0+009.733	12.202	80.172	12° 37' 33.0"
	-K0+008.	13.894	80.549	12° 23' 12.2"
	-K0+006.	15.850	80.965	11° 31' 00.0"
	-K0+004.	17.815	81.340	10° 00' 35.9"
	-K0+002.	19.790	81.653	7° 51' 59.9"
	K0+000.	21.777	81.880	5° 05' 12.2"
	K0+000.	21.777	81.880	5° 05' 12.2"
	K0+002.	23.773	82.000	1° 40' 12.6"
YH	K0+002.414	24.187	82.009	0° 52' 59.3"
	K0+004.	25.772	81.989	357° 37' 01.2"
	K0+006.	27.764	81.826	352° 55' 37.9"
	K0+008.	29.733	81.490	347° 36' 02.9"
	K0+010.	31.656	80.961	341° 38' 15.9"
QZ	K0+011.34	32.905	80.490	337° 17' 06.5"
	K0+012.	33.504	80.223	335° 02' 17.2"
	K0+014.	35.238	79.267	327° 48' 06.6"

	K0+016.	36.809	78.088	319° 55' 44.2"
	K0+018.	38.159	76.692	311° 25' 10.0"
	K0+020.	39.215	75.095	302° 16' 23.9"
HY	K0+020.267	40.950	77.084	326° 22' 05.6"
	K0+020.69	41.300	76.847	325° 33' 50.5"
	K0+022.	42.365	76.084	323° 15' 21.8"
	K0+024.	43.935	74.845	320° 15' 34.0"
	K0+026.	45.445	73.533	317° 53' 58.0"
	K0+028.	46.907	72.169	316° 10' 33.8"
	K0+030.	48.335	70.769	315° 05' 21.5"
	K0+032.	49.745	69.350	314° 38' 21.0"
HZ	K0+032.414	50.036	69.056	314° 37' 31.9"

二、 49-51 号控制点计算过程

附表 1-4 49-51 号控制点设计参数表

序号	交点号	X (N) 坐标	Y (E) 坐标	半径	Ls1	Ls2
49	QD	41.800	77.4			
50	JD1	41.700	66.4	14	35.000	35.000
51	JD2	34.127	64.528			

附表 1-5 49-51 号控制点曲线要素表

交点号	交点坐标		交点桩号	偏角值		曲线要素值 (m)						
	N (X)	E (Y)		左偏	右偏	R	Ls1	Ls2	T1	T2	L	E
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
QD	41.800	77.400	K0+000.000									
JD1	41.700	66.400	K0+011.000	75°35'39.5"		14	35	35	30.162	30.162	53.471	8.082
JD2	34.127	64.528	K0+011.949									

附表 1-6 49-51 号控制点逐桩坐标表

桩号	中线坐标		切线方位角
	N (X)	E (Y)	
ZH	-K0+019.161	41.974	269° 28' 44.9"
	-K0+018.	41.963	269° 24' 01.1"
	-K0+016.	41.935	268° 53' 41.6"
	-K0+014.	41.881	267° 55' 18.3"
	-K0+012.	41.784	266° 28' 51.2"
	-K0+010.	41.630	264° 34' 20.4"
	-K0+008.	41.401	262° 11' 45.7"
	-K0+006.	41.081	259° 21' 07.2"
	-K0+004.	40.656	256° 02' 24.9"

	-K0+002.	40.112	79.570	252° 15' 38.9"
YH	-K0+000.69	39.683	78.333	249° 31' 54.4"
	K0+000.	39.434	77.690	248° 00' 49.0"
	K0+000.	39.434	77.690	248° 00' 49.0"
	K0+002.	38.611	75.871	243° 17' 55.4"
	K0+004.	37.635	74.132	238° 06' 57.9"
	K0+006.	36.499	72.498	232° 27' 56.7"
QZ	K0+007.574	35.491	71.305	227° 41' 19.6"
	K0+008.	35.202	70.999	226° 20' 51.7"
	K0+010.	33.748	69.669	219° 45' 42.8"
	K0+011.949	32.191	68.572	212° 53' 34.9"
	K0+012.	32.149	68.547	212° 42' 30.2"
	K0+014.	30.423	67.678	205° 11' 13.8"
HY	K0+015.839	29.624	65.604	213° 49' 55.9"
	K0+016.	29.490	65.515	213° 29' 08.1"
	K0+018.	27.784	64.472	209° 26' 14.8"
	K0+020.	26.012	63.546	205° 51' 25.4"
	K0+022.	24.189	62.724	202° 44' 39.8"
	K0+024.	22.327	61.995	200° 05' 57.9"
	K0+026.	20.436	61.345	197° 55' 19.9"
	K0+028.	18.524	60.759	196° 12' 45.6"
	K0+030.	16.597	60.223	194° 58' 15.1"
	K0+032.	14.661	59.720	194° 11' 48.5"
	K0+034.	12.721	59.236	193° 53' 25.6"
HZ	K0+034.31	12.420	59.162	193° 53' 05.4"

附录二

附表 2-1 48-53 号控制点纵断面计算元素表

序号	变坡点桩号	变坡点高程	半径	坡长	i(%)	L(M)	T(M)	E(M)
48	K0+000.000	8.986						
49	K0+014.200	13.917	25	3.199545	143.422	10.893	5.447	-0.593
50	K0+018.700	18.410	18	4.499545	99.848	17.347	8.674	-2.090
51	K0+020.599	18.476	16	1.899545	3.475	31.658	15.829	-7.830
52	K0+022.799	14.200	24	2.199545	-194.390	17.508	8.754	1.596
53	K0+026.998	9.100		4.199545	-121.442			

附录三

附表 3-1 空间线形控制点坐标表

序号	X	Y	Z	(X,Y,Z)
1	6.023	-20.023	12.000	6.02308,-20.0231,12
2	47.827	-61.827	53.083	47.8272,-61.8272,53.0833
3	56.500	-70.900	51.600	56.5,-70.9,51.6
4	59.800	-74.100	51.000	59.8,-74.1,51
5	63.400	-75.000	49.600	63.4,-75,49.6
6	71.200	-74.600	46.400	71.2,-74.6,46.4
7	76.600	-65.500	35.300	76.6,-65.5,35.3
8	70.100	-53.600	16.000	70.1,-53.6,16
9	54.000	-45.000	8.000	54,-45,8
10	30.496	-41.696	8.530	30.4964,-41.6959,8.52995
11	15.807	-41.793	24.894	15.8065,-41.7929,24.8944
12	19.800	-41.000	38.700	19.8,-41,38.7
13	34.400	-39.600	38.900	34.4,-39.6,38.9
14	37.755	-38.804	24.822	37.7553,-38.8041,24.8219
15	22.986	-39.000	7.567	22.9863,-39,7.567
16	2.736	-40.494	8.743	2.73639,-40.4942,8.74348
17	-10.731	-42.224	15.748	-10.7312,-42.2236,15.7476
18	-18.299	-46.544	28.521	-18.2985,-46.5442,28.5213
19	-20.394	-54.176	37.476	-20.3942,-54.1759,37.4756
20	-21.000	-64.042	37.969	-21,-64.0424,37.969
22	-21.000	-71.399	29.901	-21,-71.3986,29.9014
23	-21.000	-53.698	8.507	-21,-53.6978,8.50681
24	-23.400	-37.000	11.000	-23.4,-37,11
25	-20.100	-26.500	18.100	-20.1,-26.5,18.1
26	-21.000	-19.750	25.400	-21,-19.75,25.4
27	-21.000	-10.150	32.000	-21,-10.15,32
28	-15.000	1.200	32.200	-15,1.2,32.2
29	-21.000	12.000	25.000	-21,12,25
30	-20.600	19.700	18.200	-20.6,19.7,18.2
31	-12.900	28.600	13.700	-12.9,28.6,13.7

32	-18.000	41.850	9.800	-18,41.85,9.8
33	-8.100	51.950	8.150	-8.1,51.95,8.15
34	5.950	54.400	8.000	5.95,54.4,8
35	17.100	52.450	7.950	17.1,52.45,7.95
36	29.000	47.000	8.000	29,47,8
37	38.000	37.000	13.000	38,37,13
38	34.300	28.500	23.500	34.3,28.5,23.5
39	24.900	28.900	28.900	24.9,28.9,28.9
40	21.500	35.000	25.700	21.5,35,25.7
41	24.000	39.600	17.000	24,39.6,17
42	31.800	40.800	8.000	31.8,40.8,8
43	38.071	32.103	7.500	38.0705,32.1033,7.50016
44	39.011	24.821	9.895	39.0106,24.8214,9.8947
45	49.500	15.200	13.400	49.5,15.2,13.4
46	66.200	13.600	10.000	66.2,13.6,10
47	82.300	21.700	8.300	82.3,21.7,8.3
48	85.100	34.200	11.600	85.1,34.2,11.6
49	77.400	41.800	20.000	77.4,41.8,20
50	66.400	41.700	28.000	66.4,41.7,28
51	64.528	34.127	28.000	64.528,34.127,28
53	64.528	10.804	27.270	64.528,10.804,27.27
54	64.528	2.160	27.000	64.528,2.16,27
55	64.528	-6.873	19.000	64.528,-6.87349,19
56	64.528	-10.874	11.000	64.528,-10.8735,11
57	64.857	-18.628	8.986	64.8569,-18.6276,8.98603
58	65.528	-25.075	9.328	65.5284,-25.0753,9.32816
59	67.884	-30.328	13.917	67.8837,-30.3277,13.917
60	73.300	-31.329	18.410	73.3004,-31.329,18.4097
61	80.153	-30.707	18.476	80.1527,-30.7066,18.4757
62	86.100	-33.700	14.200	86.1,-33.7,14.2
63	91.200	-37.400	9.100	91.2,-37.4,9.1
64	89.600	-47.800	6.200	89.6,-47.8,6.2
65	75.200	-45.000	7.100	75.2,-45,7.1

66	75.505	-59.736	10.667	75.5053,-59.7362,10.6672
67	65.600	-60.600	14.900	65.6,-60.6,14.9
68	58.200	-58.600	18.100	58.2,-58.6,18.1
69	53.568	-52.704	17.000	53.568,-52.704,17
70	53.568	-43.704	16.000	53.568,-43.704,16
71	54.568	-35.704	13.000	54.568,-35.704,13
72	53.568	-26.704	11.000	53.568,-26.704,11
73	45.000	-23.000	9.000	45,-23,9
74	35.000	-23.000	8.000	35,-23,8
75	25.000	-23.000	11.000	25,-23,11
76	18.000	-16.000	16.000	18,-16,16
77	18.928	-7.933	17.000	18.9283,-7.93302,17
78	22.000	-1.000	14.000	22,-1,14
79	26.000	5.000	9.000	26,5,9
80	29.000	11.000	7.000	29,11,7
81	30.678	17.333	8.115	30.6783,17.333,8.11548
82	28.942	22.352	12.875	28.9423,22.3516,12.8747
83	23.765	23.894	15.832	23.765,23.8942,15.832
84	18.191	24.405	15.251	18.1905,24.4048,15.2508
85	14.107	26.268	12.096	14.1066,26.2677,12.096
86	13.000	30.000	9.000	13,30,9
87	12.700	37.100	7.800	12.7,37.1,7.8
88	12.300	45.200	12.000	12.3,45.2,12
89	12.300	54.000	14.000	12.3,54,14
90	17.000	66.500	10.000	17,66.5,10
91	8.316	75.401	11.807	8.31606,75.401,11.8074
92	0.000	68.880	14.000	0,68.88,14
93	0.000	58.999	13.380	0,58.999,13.3801
94	0.000	37.998	12.062	0,37.998,12.0624
95	0.010	32.264	12.100	0.0100001,32.2639,12.1
96	0.010	-8.000	12.100	0.0100001,-8,12.1
97	0.005	-11.080	12.049	0.00486615,-11.0803,12.0487
98	0.000	-14.000	12.000	0,-14,12

附录四

附表 4-1 运行时刻-速度-加速度表

运行时刻(s)	速度 (km/h)	竖直加速度(g)	竖直加速度(g)	合加速度(g)
0	9	0.8	0	0.8
1	9	0.8	0	0.8
2	9	0.8	0	0.8
3	9	0.8	0	0.8
4	9	0.8	0	0.8
5	9	0.8	0	0.8
6	9	0.8	0	0.8
7	9	0.8	0	0.8
8	9	0.8	0	0.8
9	9	0.8	0	0.8
10	9	0.8	0	0.8
11	9	0.8	0	0.8
12	9	0.8	0	0.8
13	9	0.8	0	0.8
14	9	0.8	0	0.8
15	9	0.8	0	0.8
16	9	0.8	0	0.8
17	9	0.8	0	0.8
18	9	0.8	0	0.8
19	9	0.8	0	0.8
20	9	0.8	0	0.8
21	9	0.8	0	0.8
22	9	0.8	0	0.8
23	9	0.9	0	0.9
24	9	1	0	1.0
25	9.1	1	0	1.0
26	10.5	1	0	1.0
27	13.3	1	0.1	1.0
28	17.6	0.8	-0.4	0.9
29	23.2	0.6	0.6	0.8
30	33.8	0.6	0.5	0.8
31.8	78.4	1.4	0.1	1.4
32.8	99.7	3	0.1	3.0
33.8	99.8	3.6	-0.1	3.6
34.8	73.6	2.9	0.2	2.9
35.8	46.1	0.4	0	0.4
36.5	47.9	0.7	0.1	0.7
37.5	77.4	2.6	0	2.6
38	90.7	2.8	0	2.8

39	97.8	3.4	0	3.4
40	77.1	1.7	-0.3	1.7
41	47.9	0.4	-0.1	0.4
42	39	0	0.1	0.1
43.5	78.8	2.9	0	2.9
44.8	91.9	2.9	1.4	3.2
45.8	71.7	0.4	0	0.4
46.8	48.9	-0.3	0.2	0.4
47.5	48.9	-1	0.9	1.3
48.9	77.1	2.3	1.8	2.9
49.8	87.6	2.7	0.5	2.7
50.5	90.5	2.9	0.2	2.9
51.8	90.2	2.2	-0.3	2.2
52.5	84.3	3.7	0.3	3.7
53.8	53.1	1.7	-0.2	1.7
54.5	51.9	1.6	-0.2	1.6
55.8	84.4	5	0.5	5.0
56.8	81.6	1.8	-1	2.1
57	79.5	1.8	-0.4	1.8
58.8	83	4.2	-0.8	4.3
59.5	74.4	2.8	-0.1	2.8
60.5	52.9	1.4	0.4	1.5
61.5	43.2	0.8	0.2	0.8
62.5	43.6	1	0	1.0
63	43.7	1	0	1.0
64.5	54.4	-0.4	0	0.4
65.5	77.5	3.7	-0.1	3.7
66	77.8	4	-0.8	4.1
67	56	0.7	-0.3	0.8
68	71	2	0.9	2.2
69.5	74.5	2.3	-0.3	2.3
70	67.5	2.5	0.7	2.6
71	56.8	1.9	0.2	1.9
72	63.2	0.5	-0.2	0.5
73	69.5	3	0	3.0
74	72.8	2.3	0.6	2.4
75	57.5	2	0.2	2.0
76	58.3	0.4	0.4	0.6
77	72.6	4	0	4.0
78	54.5	1.2	0	1.2
79	58.5	2.1	0	2.1
80	66.5	1.9	0	1.9
81	59.5	0.3	0	0.3

82	60.2	3.1	0.1	3.1
83	54.4	1.8	0.2	1.8
84	40.8	1	0	1.0
85	22.5	1	0	1.0
86	8.7	1	0	1.0
87	5.7	1	0	1.0
88	5	1	0	1.0
89	5	1	0	1.0