

2023 第八届“数维杯”大学生数学建模竞赛论文

题 目 节能列车运行控制优化策略

摘 要

随着科技经济的发展，城轨交通的能耗为其可持续发展的进程带来了巨大压力，尤其是城市，对电能的需求量极高。为使其能耗成本降低，需要对列车的运行的策略进行优化。本文便是为解决当前城市列车能耗问题制定相应的优化方案。

针对问题一，需要我们得到速度-距离关系式、时间-距离关系式、牵引力-距离关系式、以及能量消耗-距离关系式四种情况的曲线，首先分析列车可能的运行状态，最终确定列车行驶时只存在牵引、巡航以及制动三种情况；然后根据牛顿第二定律，得到相应的常微分方程，对于该方程，我们采用龙格-库塔法对其进行求解，最终得到 A 站台到 B 站台所需时间为 198.9712 秒。

针对问题二，由于由于不同路段的限速不同，且存在坡度的情况，建立列车行驶时长最小为目标的单目标化模型。要使列车消耗能量尽可能小，我们需考虑四个阶段。然后对列车的每个状态得到相应的微分方程。对于其求解，我们采用遗传算法，得到全局最优解，最终得到列车的行驶时间为 227.61s。“牵动-巡航-惰行-制动”

针对问题三，由于该问题在 2000m 处设置障碍，列车必须等待 60s，所以我们在问题二的基础上，增加 ARX 预测模型，同时，我们分析得到列车需要经历两次“牵动-巡航-惰行-制动”阶段，再结合遗传算法，最终我们得到列车从 A 站到 B 站需要的时间为 383.45s。

关键词：常微分方程 龙格-库塔法 遗传算法 ARX 预测模型

目 录

一、问题重述	1
1.1 引言	1
1.2 要解决的具体问题	1
二、问题分析	2
2.1 问题一的分析	2
2.2 问题二的分析	2
2.3 问题三的分析	2
三、模型假设	3
3.1 主要符号与说明	3
四、模型的建立与求解	3
4.0.1 问题一模型的建立	4
4.0.2 问题一模型的求解	7
4.0.3 问题一的结果	9
4.1 问题二模型的建立与求解	11
4.1.1 问题二模型的建立	11
4.1.2 问题二模型的求解	15
4.1.3 问题二的结果	17
4.2 问题三模型的建立与求解	17

4.3	问题三模型的建立	17
4.3.1	模型的求解与结果	19
五、模型的评价与推广模型的评价与推广		20
5.1	模型的评价	20
参考文献		21

一、 问题重述

1.1 引言

随着科技与经济的发展，正被迅速推进的城市交通电气化进程，城轨交通的能耗与负荷随之增长，给其可持续发展带来了压力。“双碳”政策实施，为建立安全、高效、环保、可持续的能源利用模式，城轨系统以使用ATO 驾驶模式、光伏+地铁等等的方法，在减碳与节能方面达到了满意的效果。为使得在降低能耗的成本的同时，仍保持乘客享受列车的舒适度，需进一步对城轨系统的发掘。



1.2 要解决的具体问题

对节能列车运行控制优化策略的探究，我们现在需要建立数学模型解决以下几个问题：

1. 对于问题一需要考虑列车从站台 A 到站台 B 的运行途中，各类因素对列车的牵引能耗带来的影响，绘制速度-距离曲线、牵引制动力-距离曲线、时间-距离曲线与能量消耗-距离曲线，得到列车到达站台 B 的最短时间，并求得在最短运行时间上增加 10s、20s、50s、150s、300s 到达站台 B 的六组曲线。

2. : 问题二需要考虑附件中所提供的各项数据, 为了让运行过程的能耗降低, 优化的目标是得到有效的速度轨迹, 得到列车到达站台 B 的最短时间, 并求得在最短运行时间上增加 10s、20s、50s、150s、300s 到达站台 B 的六组曲线;
3. 问题三需要考虑列车在运行途中可能会发生各种意外, 其运行的速度轨迹会发生相应的变化。目标是在列车仍节能的情况下, 设计优化当列车延迟 60s 抵达终点的速度轨迹。

二、 问题分析

2.1 问题一的分析

对于问题 1, 我们首先列出速度-距离关系式、时间-距离关系式、牵引力-距离关系式、以及能量消耗-距离关系式, 分别对牵引阶段、巡航阶段、制动阶段进行讨论。利用龙格-库塔法, 借助 Matlab 软件得出以最短的时间。

2.2 问题二的分析

针对问题 2, 由于不同路段的限速不同, 且存在坡度的情况, 建立列车行驶时长最小为目标的单目标化模型。首先建立模型, 共分为“牵动-巡航-惰行-制动”四个阶段, 借助受力分析图, 建立微分方程, 借助遗传算法和 Matlab 软件中的 cftool 函数拟合工具, 创建初始种群, 对种群中的每个个体进行循环运算, 最终得出可行的速度轨迹。

2.3 问题三的分析

针对问题 3, 对于列车可能会遇到突发情况的事件下, 基于问题 2, 我们利用遗传算法, 对列车行驶进行预测。

三、 模型假设

1. 列车在进行加速时，加速度大小在极短时间内不会发生较大变化；
2. 题目所给的数据能够真实的反应列车行驶的路面状况；
3. 假设列车在行驶过程中发动机不会出现故障以及其他的小概率事件。

3.1 主要符号与说明

序号	符号	符号说明
1	v	行车速度 (km/h)
2	m	列车的重量 (t)
3	v_{max}	列车运行速度上限 (km/h)
4	F_q	列车发动机的牵引力 (N)
5	F_z	列车的制动力
6	s	列车的行驶距离
7	ρ	旋转质量因数
8	f	列车受到的阻力
9	θ	列车在行驶时的路面坡度

四、 模型的建立与求解

在列车运行的过程中，一般会与外界产生各种各样的摩擦，从而消耗列车牵引力的能量。一般来说，列车全过程不是匀速行驶，而是分为四个阶段：牵引阶段、巡航阶段、惰行阶段以及制动阶段。

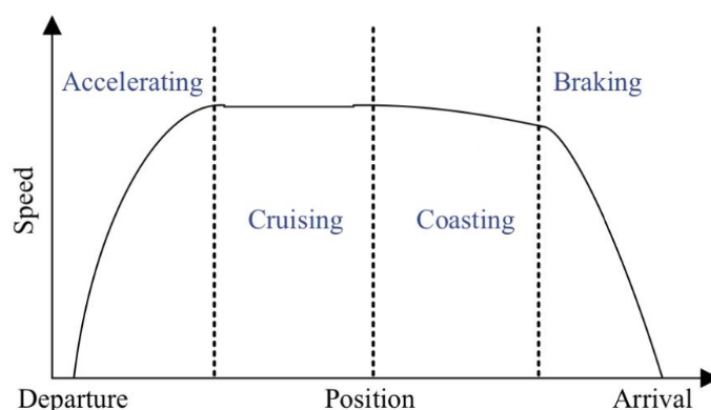


图 4-1: 列车运行阶段示意图

4.0.1 问题一模型的建立

已知该列车在水平轨道上运行，且其 A 与 B 站台之间的距离为 l ，运行速度的上限为 v_{max} ，质量为 m ，旋转质量因数 ρ ，列车最大牵引力为 F_{qmax} ，最大制动力为 F_{zmax} 。

在水平轨道上，列车满足：

$$F_q - F_z - f = m \frac{dv(s)}{ds} \quad (1)$$

其受力分析图如下：

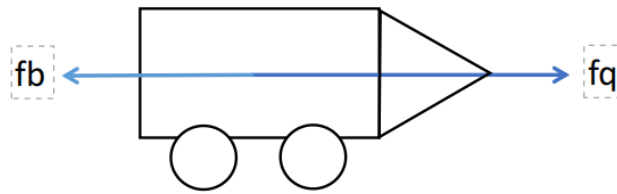


图 4-2: 列车受力分析图

由于问题一中，需要获取列车到站台 B 的最短时间，则列车运行的四个阶段中，我们不考虑其惰行阶段，只需要分析牵引、巡航以及制动情况，由此建立以行驶时间最小的单目标模型。

• (约束条件) 牵引阶段

为使列车能够在最短的时间内从 A 站到达 B 站，则，在牵引阶段，我们需要保证：

$$F_q = F_{qmax} \quad (2)$$

列车受到的阻力满足 Davis 阻力方程，该方程与列车的运行速度相关：

$$f = 2.0859 + 0.0098v + 0.006v^2 \quad (3)$$

为满足列车在牵引阶段能够正常进行加速，需要：

$$F_q \geq F_f \quad (4)$$

该阶段列车的加速度为：

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_q - f}{m} = a_1 \quad (5)$$

加速阶段列车的运行距离 s_1 为：

$$s_1 = \int_0^{t_1} \frac{1}{2} a_1 t^2 dt \quad (6)$$

加速阶段列车牵引力的能量消耗：

$$W_1 = \int_0^{t_1} F_q \times V_t \times t dt \quad (7)$$

• (约束条件) 巡航阶段

当列车达到最大速度之后，开始进入巡航阶段，即列车将开始以最大速度进行匀速行驶，此时：

列车的牵引力：

$$F_q = 2.0859 + 0.0098v_{max} + 0.006v_{max}^2 \quad (8)$$

列车行驶的距离 S_2 为：

$$s_2 = (t_2 - t_1) \times v_{max} \quad (9)$$

列车牵引力做功：

$$W_2 = \int_{t_1}^{t_2} F_q \times v_{max} \times (t_2 - t_1) \quad (10)$$

- (约束条件) **制动阶段**在制动情况时，由于惯性会产生惯性力：

$$F_g = \rho \times m \quad (11)$$

当列车行驶即将进入站台时，需要通过制动力进行减速，则：

列车制动时的加速度大小为：

$$a_3 = \frac{F_{zmax} + f - F_g}{m} = \frac{ds}{dt} \quad (12)$$

列车减速时受到的阻力满足 Davis 阻力方程，该方程与列车的运行速度相关：

$$f = 2.0859 + 0.0098v_t + 0.006v_t^2 \quad (13)$$

列车减速行驶的距离为：

$$s_3 = \int_{t_2}^{t_3} (v_2 t - \frac{1}{2} a_3 t^2) dt \quad (14)$$

制动减速阶段制动力的能量消耗：

$$W_3 = \int_{t_2}^{t_3} F_{zmax} \times s_3 \quad (15)$$

• 目标函数

为使列车行驶总时间最小，则需要满足：

$$\min \sum t_i \quad (16)$$

综上，则列车关于**速度-距离**的关系式为：

$$\begin{cases} v \frac{dv}{ds} = \frac{F_q - (2.0859 + 0.0098v + 0.006v^2)}{m}, \text{加速阶段} \\ s = v_{max} \Delta t, \text{巡航阶段} \\ v \frac{dv}{ds} = \frac{F_z + (2.0859 + 0.0098v + 0.006v^2) - F_g}{m}, \text{制动阶段} \end{cases} \quad (17)$$

列车关于**时间-距离**的关系式为：

$$\begin{cases} \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{F_q - 2.0859 - 0.0098 \frac{ds}{dt} - 0.006 \frac{d^2s}{dt^2}}{m}, \text{加速阶段} \\ s = v_{max} \Delta t, \text{巡航阶段} \\ \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{F_z + 2.0859 + 0.0098 \frac{ds}{dt} + 0.006 \frac{d^2s}{dt^2} - F_g}{m}, \text{制动阶段} \end{cases} \quad (18)$$

则高速列车关于**牵引力-距离**的关系式为：

$$\begin{cases} v \frac{dv}{ds} = \frac{F_q - f}{m}, \text{加速阶段} \\ F_q = f, \text{巡航阶段} \\ v \frac{dv}{ds} = \frac{F_z + f - F_g}{m}, \text{制动阶段} \end{cases} \quad (19)$$

列车关于**能量消耗-距离**的关系式为 (由于制动时，不消耗能量，故制动阶段消耗能量为

：

$$\begin{cases} \int_{x_0}^{x_1} F dx \text{加速阶段} \\ \int_{x_1}^{x_2} F dx, \text{巡航阶段} \\ 0, \text{制动阶段} \end{cases} \quad (20)$$

4.0.2 问题一模型的求解

为求解其微分方程，我们将采用龙格库塔法对其进行求解，按照微分中值定理则有：

$$\frac{y(x_{n+1}) - y(x_n)}{h} = y'(x_n + \theta h), 0 < \theta < 1 \quad (21)$$

且通过方程 $y' = f(x, y)$ 可得：

$$y(x_{n+1}) = y(x_n) + hf(x_n + \theta h, y(x_n + \theta h)) \quad (22)$$

首先在 $[x_n, x_{n+1}]$ 内取两个点, 则得到:

$$\begin{cases} y_{n+1} = y_n + h(\lambda_1 k_1 + \lambda_2 k_2) \\ k_1 = f(x_n, y_n) \\ k_2 = f(x_n + \alpha h, y_n + \beta h k_1), 0 < \alpha, \beta < 1 \end{cases} \quad (23)$$

为使精度提高, 我们分析局部截断误差 $y(x_{n+1}) - y_{n+1}$, 因为 $y_n = y(x_n)$, 所以可得:

$$\begin{cases} y_{n+1} = y(x_n) + h(\lambda_1 k_1 + \lambda_2 k_2) \\ k_1 = f(x_n, y(x_n)) = y'(x_n) \\ k_2 = f(x_n + \alpha h, y(x_n) + \beta h k_1) \\ \quad = f(x_n, y(x_n)) + \alpha h f_x(x_n, y(x_n)) \\ \quad \quad + \beta h k_1 f_y(x_n, y(x_n)) + O(h^2) \end{cases} \quad (24)$$

具体求解如下流程图所示:

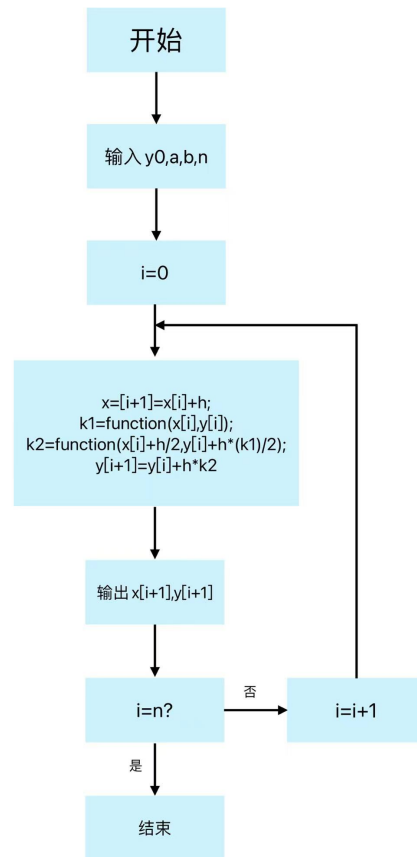


图 4-3: 龙格-库塔流程图

4.0.3 问题一的结果

对上述模型进行求解，我们得到列车最短运行时间为 198.9712s，通过对列车的速度-距离、牵引制动力-距离、时间-距离与能量消耗-距离曲线的模型求解，得到如下曲线图像：

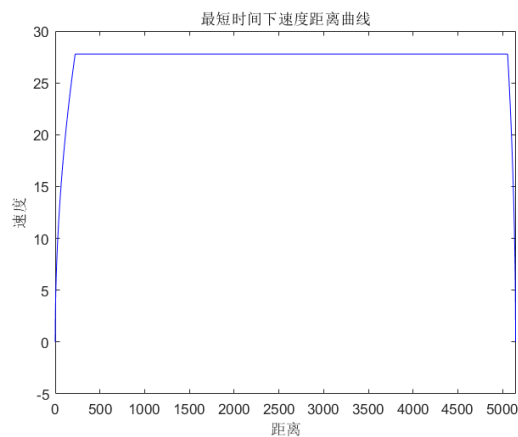


图 4-4: 速度-距离曲线

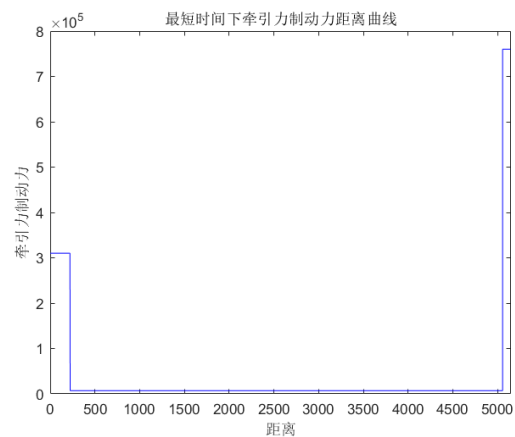


图 4-5: 牵引力制动力-距离曲线

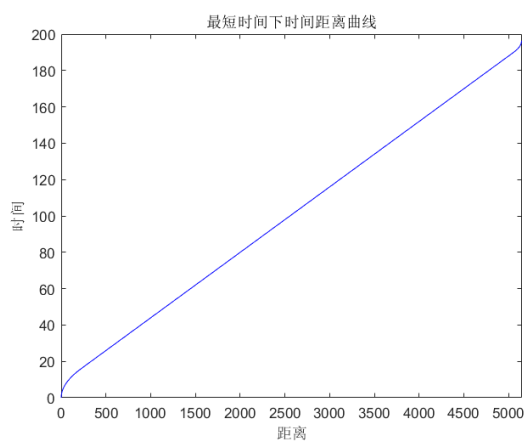


图 4-6: 时间-距离曲线

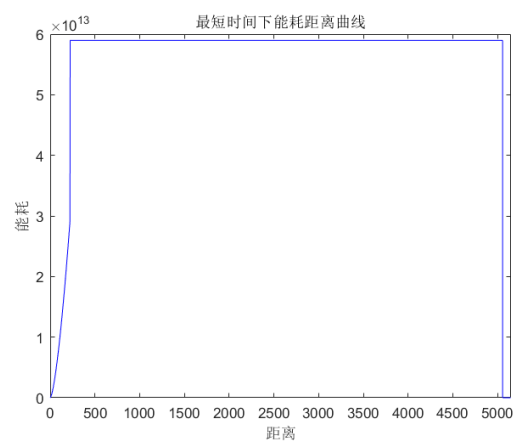


图 4-7: 能耗-距离曲线

通过对参数进行变化，我们得到 10s、20s、50s、150s、300s 以及最短时间的曲线：在这里我们展示增加 10s 的曲线，其余情况详见附录中：

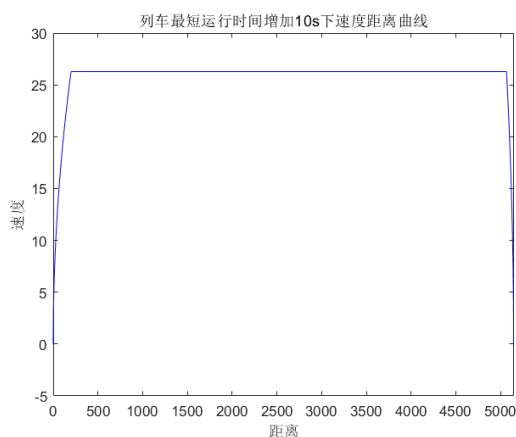


图 4-8: 速度-距离曲线

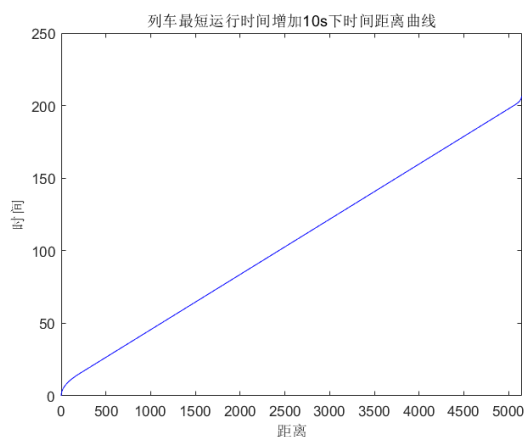


图 4-9: 时间-距离曲线

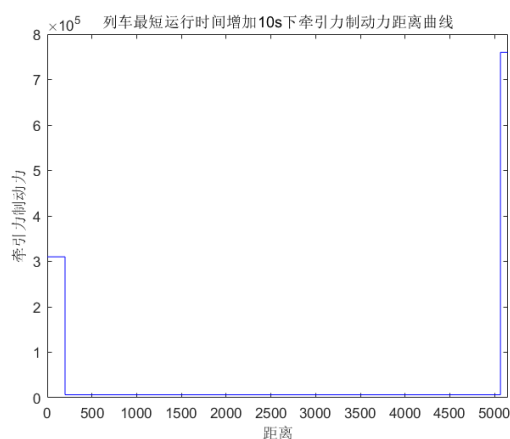


图 4-10: 牵引力制动力-距离曲线

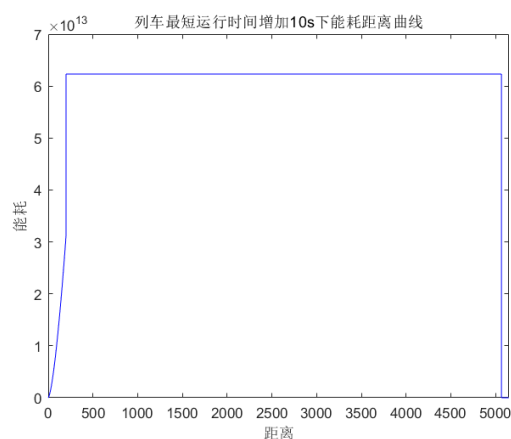


图 4-11: 能耗-距离曲线

4.1 问题二模型的建立与求解

在列车的实际情况中，在不同路段的限速是不同的，同时有些路段中可能还会存在坡度情况。除此之外在实际情况中我们还需要考虑列车的节能情况，以保证列车能够耗能最小，现在需要我们根据问题一，建立相应模型，以应对实际的路段情况。

4.1.1 问题二模型的建立

为使列车消耗能量尽可能的小，行驶时长尽可能短，所以我们建立以消耗能量最小为目标，列车行驶时长最小为目标的多目标优化模型。

坡道附加阻力分析

首先，我们对列车在坡道上的情况进行分析，列车在坡道上运行时，受到重力而使列车存在沿轨道方向的分立的影响，通常将这个分立称为坡道附加阻力，阻力的产生如下图所示：

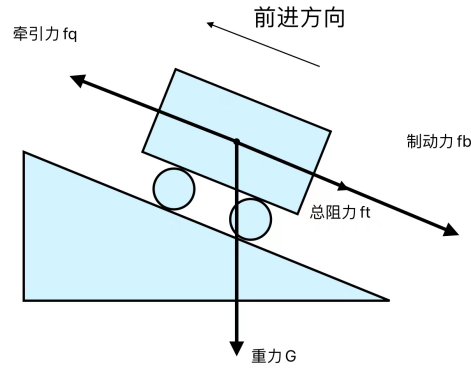


图 4-12: 列车受力分析图

坡度的计算公式如下：

$$\sin \theta = \frac{BC}{AB} = \frac{i}{1000} \quad (25)$$

$$w_i = 1000 \sin \theta = i \quad (26)$$

其中，BC 为标高差，AB 为坡道长度， w_i 为坡道阻力。

根据牛顿第二定律，可得到：

$$F_q - G \sin \theta - W - F_z = ma \quad (27)$$

基于问题一，并根据实际相应情况，为使能量消耗最小，需要增加列车的情行阶段，我们对问题二建立以下模型：

• (约束条件) 牵引阶段

牵引力的大小会与列车的最大速度相关，当列车速度小于最大限制速度时，满足 F_q 大小恒定，已知列车的发动机功率恒定，且 F_q 恒定时，列车速度不断增加，当满足 $F_q v_0 = P$ 时，且 $v_0 < v_{limit}$ 时， F_q 将会发生变化。

$$F_q = \begin{cases} F_{q1} & \# 0 \leq v \leq v_{limit} \\ F_{q1} \cdot \frac{v_{limit}}{v} & \# v_{limit} \leq v \end{cases} \quad (28)$$

列车受到的阻力满足 Davis 阻力方程：

$$f = 2.0859 + 0.0098v + 0.006v^2 \quad (29)$$

由于列车在行驶过程不同位置有不同的坡度，我们将路段分为若干个小段，每个小段内的限速和坡度视为常数，并在每个小段上面建立微分方程，则我们得到：

$$\frac{dv}{dt} = F_q - G \sin \theta_i - f = a_i \quad (30)$$

则该阶段行驶的路程为：

$$S_1 = \sum_i \int_{t_j}^{t_{j+1}} \frac{1}{2} a_i t^2 dt \quad (31)$$

• (约束条件) 巡航阶段

在该阶段，列车将保持速度恒定继续行驶，且在此阶段的速度需满足：

$$v \leq v_{limit_i} \quad (32)$$

其中 v_{limit_i} 表示第 i 个坡段的最大限速。

同时，当列车受力平衡时，才能够匀速行驶，故需满足：

$$F_q - G \sin \theta_i - f = 0 \quad (33)$$

在该阶段，列车行驶的路程为：

$$S_2 = \int_j^{j+1} v \times t dt \quad (34)$$

• (约束条件) **惰行阶段**

考虑到实际情况，列车会在匀速行驶一段距离后，开始进行惰行行驶，即没有牵引力，也没有制动力作用，同时在此阶段也没有牵引力能量的损耗，则，此时列车受力分析为：

$$\frac{dv}{dt} = -G \sin \theta_i - f + F_g \quad (35)$$

列车的行驶路程为：

$$S_3 = \sum_i \int_j^{j+1} vt - \frac{1}{2} a_i t^2 dt \quad (36)$$

• (约束条件) **制动阶段**

惰行行驶一段距离后，列车将通过制动力使列车强制减速，该情况能量的消耗量为 0，此时列车的受力分析为：

$$\frac{dv}{dt} = -G \sin \theta_i - f - F_z + F_g \quad (37)$$

列车的行驶距离为：

$$S_4 = \sum_i \int_j^{j+1} vt - \frac{1}{2} a_i t^2 dt \quad (38)$$

• **目标函数**

为使列车的总时间尽可能小，同时牵引力的能量消耗尽可能少，则我们得到：

$$\min \sum_i t_i \quad (39)$$

$$\min \int_{x_0}^{x_1} F_q dx + \int_{x_1}^{x_2} F_q dx \quad (40)$$

4.1.2 问题二模型的求解

为使列车的耗能尽可能小，同时使行驶时间尽可能小，我们采用遗传算法，从而得到全局最优解。

- 创建初始种群

随机选择一组有效个体，由于遗传算法使用染色体代表每个个体，因此初始种群实际上是一组染色体。

- 计算适应度

适应度函数的值是针对每个个体计算的。对于初始种群，此操作将执行一次，然后在应用选择、交叉和突变的遗传算子后，再对每个新一代进行。由于每个个体的适应度独立于其他个体，因此可以并行计算。

- 选择、交叉和变异

将选择，交叉和突变的遗传算子应用到种群中，就产生了新一代，该新一代基于当前代中较好的个体。选择（selection）操作负责当前种群中选择有优势的个体。交叉（crossover，或重组，recombination）操作从选定的个体创建后代。这通常是通过两个被选定的个体互换他们染色体的一部分以创建代表后代的两个新染色体来完成的。变异（mutation）操作可以将每个新创建个体的一个或多个染色体值（基因）随机进行变化。突变通常以非常低的概率发生。

- 算法终止条件

在确定算法是否可以停止时，可能有多种条件可以用于检查。两种最常用的停止条件是：

1、已达到最大世代数。这也用于限制算法消耗的运行时间和计算资源。

2、在过去的几代中，个体没有明显的改进。这可以通过存储每一代获得的最佳适应度值，然后将当前的最佳值与预定的几代之前获得的最佳值进行比较来实现。如果差异小于某个阈值，则算法可以停止。

其遗传算法流程图如下图所示：

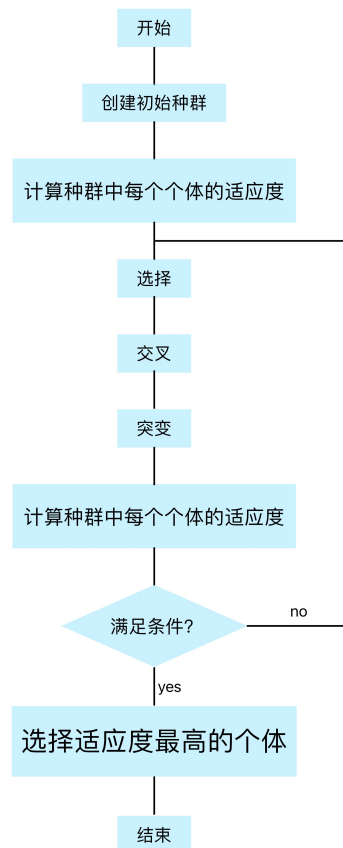


图 4-13: 遗传算法流程图

4.1.3 问题二的结果

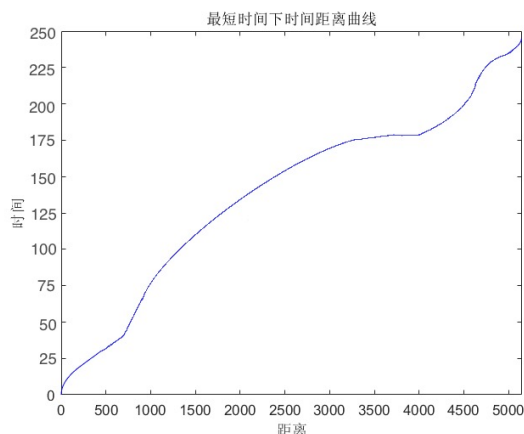


图 4-14: 时间-距离曲线

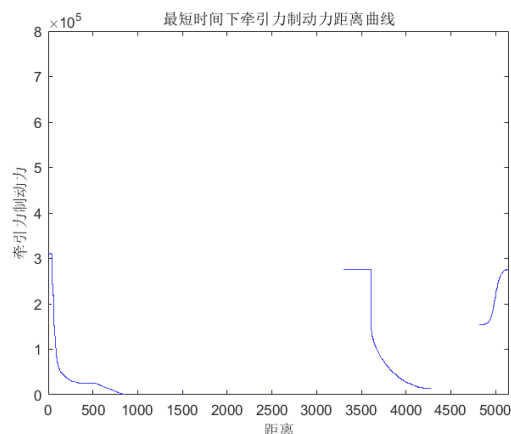


图 4-15: 牵引力制动力-距离曲线

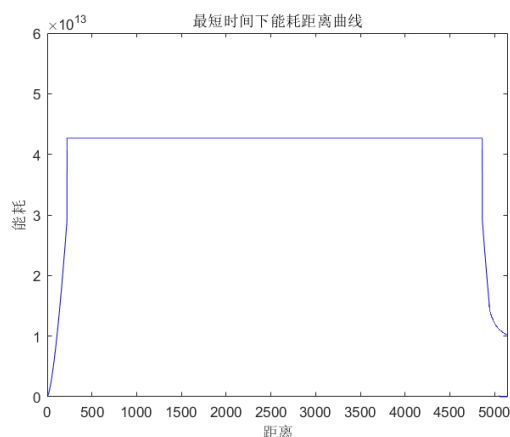


图 4-16: 能耗-距离曲线

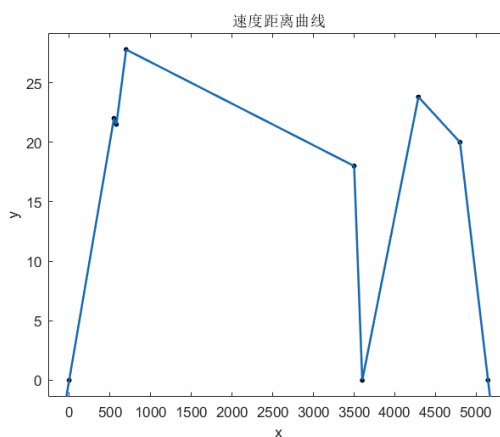


图 4-17: 速度-距离曲线

增加 10s、20s、50s、150s、300s 详见附录。

4.2 问题三模型的建立与求解

在问题三中，列车原计划于 320s 后到达终点，列车运行至 2000m 位置时，由于前方突发事故，需要延迟 60s 到达终点。所以列车在即将到达 2000m 时要进行减速。整个列车行驶阶段则可以看成两个加速减速阶段。

4.3 问题三模型的建立

模型以高速列车运行中总的牵引能耗最小为优化目标，牵引能耗通过牵引力做功得到，由于列车运行过程中，只有列车采用牵引工况加速或者

部分牵引力维持巡航时，才会有牵引力，故

- 目标函数

$$E_{total} = \min(\int_0^S \max(\eta F_z(v), 0), ds) \quad (41)$$

- 约束条件

在不同位置的限速不同，则：

$$0 \leq v(s) \leq v_{limit_i} \quad (42)$$

在不同情况下的加速度不同：

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = F_q - G \sin \theta_i - f, \text{牵引阶段} \\ F_q - G \sin \theta_i - f = 0, \text{巡航阶段} \\ \frac{dv}{dt} = -G \sin \theta_i - f, \text{惰行阶段} \\ \frac{dv}{dt} = -G \sin \theta_i - f - F_z, \text{制动阶段} \end{cases} \quad (43)$$

为了对之后列车的行驶做出调整，我们引入 ARX 模型，该模型能准确反映列车的输入特性，有结构清晰、全局描述的特点，如下：

$$\eta y(t) = \mu_0 + \sum_{i=1}^p \varphi_i y(t-i) + \sum_{j=1}^q Q_j u(t-d-j) + \xi(t) \quad (44)$$

式中: $y(t)$ 表示列车控制器的输出量; $u(t)$ 表示控制器的输入量; p 、 d 、 q 为模型的阶次; $\xi(t)$ 表示列车控制器的干扰噪声，为了精确测量，通常选择高斯白噪声作为列车控制器的干扰源; d 是系统时延; μ_0 表示列车控制器输出量的期望值; 而 φ_i 和 Q_j 为模型参数，以上参数是由列车运行数据辨识得到.

$$\begin{aligned} y(t) &= \varphi_0[\tilde{\omega}(t-1)] + \sum_{i=1}^p \varphi_{y,i}[\tilde{\omega}(t-1)] \\ y(t-1) &+ \sum_{j=1}^q \varphi_{u,j}[\tilde{\omega}(t-1)]u(t-1) + \xi(t) \end{aligned} \quad (45)$$

其中相关参数如下:

$$\begin{aligned}
 \varphi_0[\tilde{\omega}(t-1)] &= c_0^0 + \sum_{k=1}^m c_k^0 \exp \left[-\lambda_k^y \|\tilde{\omega}(t-1) - z_k^y\|^2 \right] \\
 \varphi_{y,i}[\tilde{\omega}(t-1)] &= c_{i,0}^y + \sum_{k=1}^m c_{i,k}^y \exp \left[-\lambda_k^y \|\tilde{\omega}(t-1) - z_k^y\|^2 \right] \\
 \varphi_{u,i}[\tilde{\omega}(t-1)] &= c_{i,0}^u + \sum_{k=1}^m c_{i,k}^u \exp \left[-\lambda_k^u \|\tilde{\omega}(t-1) - z_k^u\|^2 \right] \\
 \tilde{\omega}(t-1) &= [\tilde{\omega}(t-1), \tilde{\omega}(t-2), \dots, \tilde{\omega}(t-d)]^T \\
 z_k^h &= (z_{k,1}^h, z_{k,2}^h, \dots, z_{k,d}^h)^T; h = y, u
 \end{aligned} \tag{46}$$

4.3.1 模型的求解与结果

基于问题二，我们利用遗传算法，同时对列车行驶进行预测，最终得到的几组图像如下图所示：

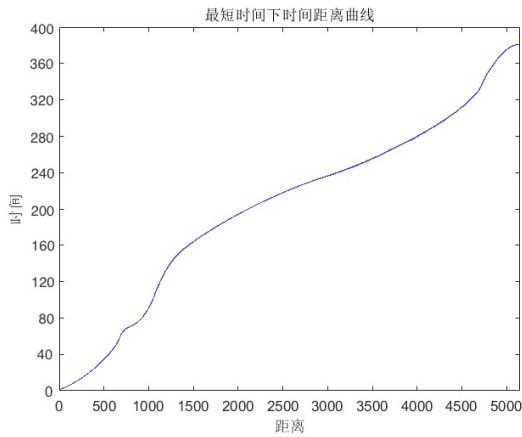


图 4-18: 时间-距离曲线

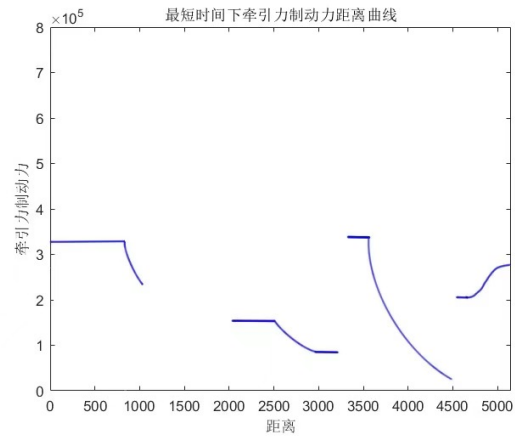


图 4-19: 牵引力制动力-距离曲线

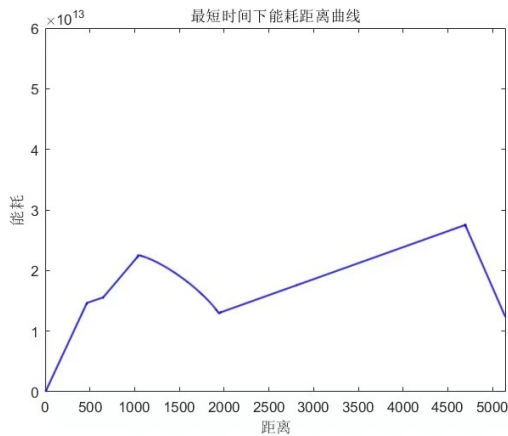


图 4-20: 能耗-距离曲线

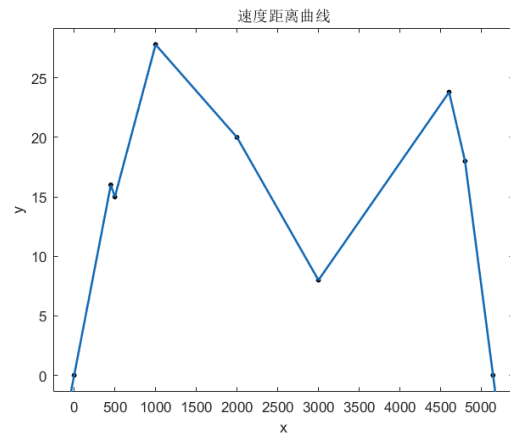


图 4-21: 速度-距离曲线

五、 模型的评价与推广模型的评价与推广

5.1 模型的评价

1、模型的优点

(1) 在考虑问题一时，列车的运行过程被分为“牵动-巡航-制动”三个阶段，分别合理运用龙格库拉法，求解模型，将二阶微分方程化为一阶微分方程，降低方程阶数，使模型得到简化；

(2) 在问题求解的过程中，以流程图、受力分析图辅助，将建模逻辑与思路更清晰的展现；

(3) 运用 MATLAB 等数学软件，将结果清晰明了的展现出来

2、模型的缺点

(1) 求解问题一的龙格库塔法，其精度低，引起误差；

(2) 在解决问题二时，数据样本较多，花费时间较长。

参考文献

- [1] 刘伯鸿, 连文博, 李婉婉. 基于 RBF-ARX 模型的高速列车预测控制器设计 [J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(5): 73-79. 2014.4.
- [2] 麻存瑞. 高速列车节能运行操纵策略优化方法研究 [D]. 北京交通大学, 2019.
- [3] 李旭阳. 面向节能的高速列车运行分析与优化研究 [D]. 兰州交通大学, 2020. DOI:10.27205/d.cnki.glttc.2020.001037.

附 录

```

clear all
clc
close all

% 牵引阶段
deltaT=0.00001;
Fq(1)=310000;
i=1;
v(1)=0;
s(1)=0;
Wq(1)=0;
tim(i)=0;
for t=0:deltaT:18
a(i)=(310000-2089.5-9.8*v(i)-6*v(i)*v(i))/176300;
v(i+1)=v(i)+a(i)*deltaT;
s(i+1)=s(i)+(v(i)+v(i+1))*deltaT/2;
Wq(i+1)=Wq(i)+Fq(i)*s(i);
Fq(i+1)=310000;
tim(i+1)=tim(i)+deltaT;
if v(i)>27.78
break
end
i=i+1;
end

% 巡航阶段
i=1;
vv(1)=27.78;
ss(1)=0;
WWq(1)=0;
Zq(1)=760000;
Eq1(1)=0;
for t1=0:deltaT:10
aa(i)=(760000+2089.5+9.8*vv(i)+6*vv(i)*vv(i))/176300;
vv(i+1)=vv(i)-aa(i)*deltaT;
ss(i+1)=ss(i)+(vv(i)+vv(i+1))*deltaT/2;
WWq(i+1)=WWq(i)+760000*abs((ss(i+1)-ss(i)));
Wq1(i+1)=0;
Zq(i+1)=760000;
if vv(i)<0
break

```

```

end
i=i+1;
End
i=1;
szong=5144.7;
ss0=szong-s(end)-ss(end);
v0(1)=27.78;
tt0=ss0/27.78;
s0(1)=s(end);
Wq0(1)=Wq(end);
deltaTT=0.1;
tim0(1)=tim(end);
Fq0(1)=2089.5+9.8*27.78+6*27.78*27.78;
for t0=0:deltaTT:tt0;
v0(i+1)=27.78;
a0(i+1)=0;
s0(i+1)=s0(i)+v0(i)*deltaTT;
Fq0(i+1)=2089.5+9.8*v0(i)+6*v0(i)*v0(i);
Wq0(i+1)=Wq0(i)+Fq0(i)*v0(i)*deltaTT;
tim0(i+1)=tim0(i)+deltaTT;
i=i+1;
end

%制动阶段
i=1;
vvv(1)=27.78;
tim1(1)=tim0(end);
for t1=0:deltaT:10
aaa(i)=(760000+2089.5+9.8*vvv(i)+6*vvv(i)*vvv(i))/176300;
vvv(i+1)=vvv(i)-aaa(i)*deltaT;
tim1(i+1)=tim1(i)+deltaT;
if vvv(i)<0
break
end
i=i+1;
end
% tim=0:deltaT:t+deltaT;
% tim0=t+deltaT:deltaTT:t+t0+2*deltaTT;
% tim1=t+t0+2*deltaTT:deltaT:t+t0+t1+20*deltaT;
timz=[tim,tim0,tim1];
ss=ss+s0(end);
vz=[v,v0,vv];
Wq0=Wq0+Eq(end);
szz=[s,s0,ss];
WWq(1)=Wq0(end);

```

```

Wqz=[Wq,Wq0,Wq1];
Fqz=[Fq,Fq0,Zq];
figure
plot(szz',vz,'b-')
xlim([0,5150]);
xlabel('距离')
ylabel('速度')
title('最短时间下速度距离曲线')
figure
plot(szz',Wqz,'b-')
xlim([0,5150]);
xlabel('距离')
ylabel('能耗')
title('最短时间下能耗距离曲线')
figure
plot(s0',Wq0,'b-')
figure
plot(szz',Fqz,'b-')
xlim([0,5150]);
xlabel('距离')
ylabel('牵引力制动力')
title('最短时间下牵引力制动力距离曲线')
figure
plot(szz',timz,'b-')
xlim([0,5150]);
xlabel('距离')
ylabel('时间')
title('最短时间下时间距离曲线')
Tmin=t+t0+t1;
disp('列车最短运行时间下的牵引时间为：')
t
disp('列车最短运行时间下的巡航时间为：')
t0
disp('列车最短运行时间下的制动时间为：')
t1
disp('列车最短运行时间为：')
Tmin

disp('制动阶段能耗：')
Eq1(end-1)

disp('巡航阶段能耗：')

```

```
Eq0(end-1)
```

```
disp('牵引阶段能耗：')
```

```
Eq(end-1)
```

```
disp('制动阶段能耗：')
```

```
ss(end)
```

```
disp('巡航阶段能耗：')
```

```
s0(end)
```

```
disp('牵引阶段能耗：')
```

```
s(end)
```

```
toc
```

第二问

```
clear all
```

```
clc
```

```
close all
```

```
A=xlsread('数维杯\附件一.xls')
```

```
podu=A(:,3);
```

```
juli=A(:,1);
```

```
vlimit0=A(:,4);
```

```
vlimit=27.78;
```

```
[m,n]=size(juli);
```

```
for i=1:1:m-1;
```

```
xj1(i)=juli(i+1)-juli(i);
```

```
end
```

```
%牵引阶段
```

```
deltaT=1;
```

```
Fq(1)=310000;
```

```
fqeff=0.9;
```

```
i=1;
```

```
v(1)=0;
```

```
s(1)=0;
```

```
Wq(1)=0;
```

```
tim(i)=0;
```

```
miu=0.9;
```

```
for t=0:deltaT:18
```

```
a(i)=(310000-2089.5-9.8*v(i)-6*v(i)*v(i)-176300*9.8*sin(podu(i)))/176300;
```

```
v(i+1)=v(i)+a(i)*deltaT;
```

```
s(i+1)=s(i)+(v(i)+v(i+1))*deltaT/2;
```

```
Wq(i+1)=Wq(i)+Wq(i)*s(i)*miu;
```

```

Fq(i+1)=310000;
tim(i+1)=tim(i)+deltaT;
if v(i)>vlimit0(i)
break
end
i=i+1;
end
v0=0;
s0=0;
a0=0;
miu=0.9;
deltaT=0.01;
podu1=A(3,2);
ss=A(3,1);
[Wq,Fq,v,a,s,Tmin1,tim] = qianyin1(v0,a0,s0,miu,deltaT,podu1,vlimit,ss);
Tmin1
v(end)
a(end)
s(end)
Wq(end)

% 巡航阶段
i=1;
vv(1)=27.78;
ss(1)=0;
WWq(1)=0;
Zq(1)=760000;
Eq1(1)=0;
for t1=0:deltaT:10
aa(i)=(760000+2089.5+9.8*vv(i)+6*vv(i)*vv(i))/176300;
vv(i+1)=vv(i)-aa(i)*deltaT;
ss(i+1)=ss(i)+(vv(i)+vv(i+1))*deltaT/2;
WWq(i+1)=WWq(i)+760000*abs((ss(i+1)-ss(i)));
Wq1(i+1)=0;
Zq(i+1)=760000;
if vv(i)<0
break
end
i=i+1;
End
i=1;
szong=5144.7;
ss0=szong-s(end)-ss(end);
v0(1)=27.78;
tt0=ss0/27.78;

```

```

s0(1)=s(end);
Wq0(1)=Wq(end);
deltaTT=0.1;
tim0(1)=tim(end);
Fq0(1)=2089.5+9.8*27.78+6*27.78*27.78;
for t0=0:deltaTT:tt0;
v0(i+1)=27.78;
a0(i+1)=0;
s0(i+1)=s0(i)+v0(i)*deltaTT;
Fq0(i+1)=2089.5+9.8*v0(i)+6*v0(i)*v0(i);
Wq0(i+1)=Wq0(i)+Fq0(i)*v0(i)*deltaTT;
tim0(i+1)=tim0(i)+deltaTT;
i=i+1;
end

```

```

figure
plot(s,Eq,'b-')
title('能量距离曲线')
plot(s,v,'b-')
title('速度距离曲线')
plot(s,Fq,'b-')
title('牵引力制动力距离曲线')
plot(s,tim,'b-')
title('时间距离曲线')
plot(tim,v)
title('速度轨迹图')

```

```

clear all
clc
close all
A=xlsread('数维杯\附件一.xls')
podu=A(:,3);
juli=A(:,1);
vlimit0=A(:,4);
vlimit=27.78;
[m,n]=size(juli);
for i=1:1:m-1;
xj1(i)=juli(i+1)-juli(i);
end

```

```

%制动阶段
deltaT=1;
Fq(1)=260000;
fqeff=0.6;
i=1;

```

```

v(1)=27.78;
s(1)=199;
Eq(1)=4.2978e+09;
tim(i)=8,18;
miu=0.6
for t=0:deltaT:18
a(i)=(-Fq(i)-2089.5-9.8*v(i)-6*v(i)*v(i)-176300*9.8*sin(podu(i)))/176300;
v(i+1)=v(i)+a(i)*deltaT;
s(i+1)=s(i)+(v(i)+v(i+1))*deltaT/2;
Eq(i+1)=Eq(i)+Fq(i)*s(i)*miu;
Fq(i+1)=260000;
tim(i+1)=tim(i)+deltaT;
if v(i)<0
break
end
i=i+1;
end
v0=27.78;
s0=199;
a0=0;
miu=0.6;
deltaT=0.01;
podu1=A(3,2);
ss=541;
[Eq,Fq,v,a,s,Tmin1,tim] = zhidong1(v0,a0,s0,miu,deltaT,podu1,vlimit,ss);
Tmin1
v(end)
a(end)
s(end)
figure
plot(s,Eq,'b-')
title('能量距离曲线')
plot(s,v,'b-')
title('速度距离曲线')
plot(s,Fq,'b-')
title('牵引力制动力距离曲线')
plot(s,tim,'b-')
title('时间距离曲线')
plot(tim,v)
title('速度轨迹图')

```

图像附录

图 5-22: 第一问增加 20s

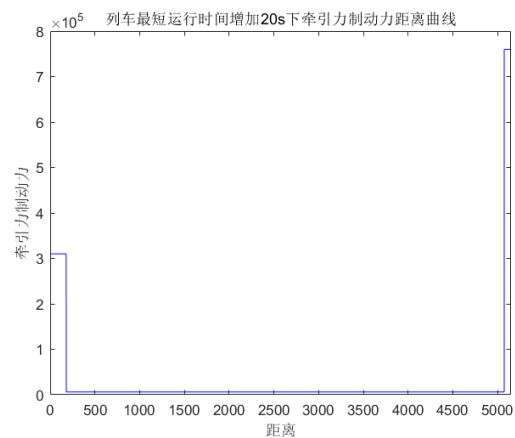
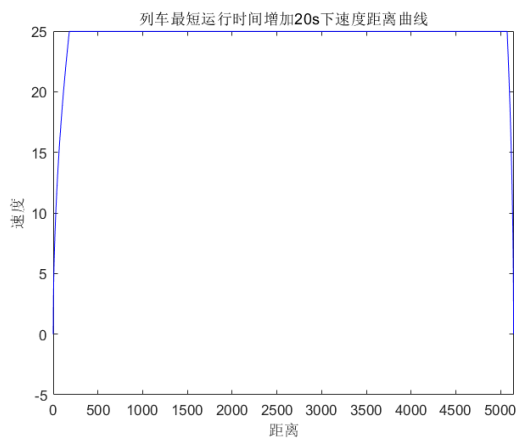


图 5-23: 速度-距离曲线

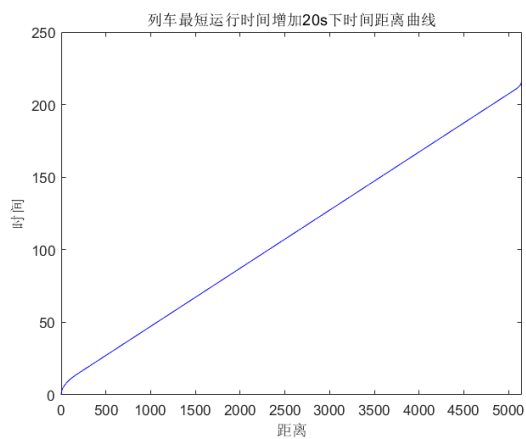


图 5-24: 牵引力制动力-距离曲线

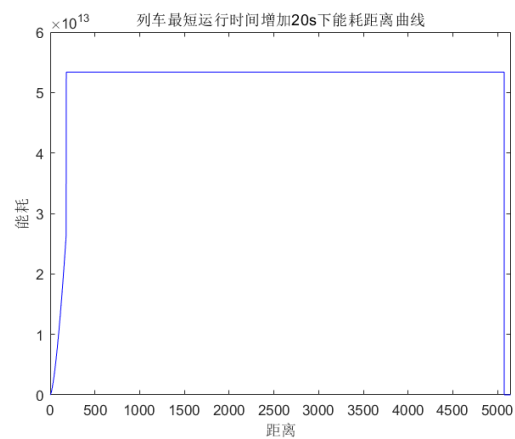


图 5-25: 时间-距离曲线

图 5-26: 能耗-距离曲线

图 5-27: 第一问增加 50s

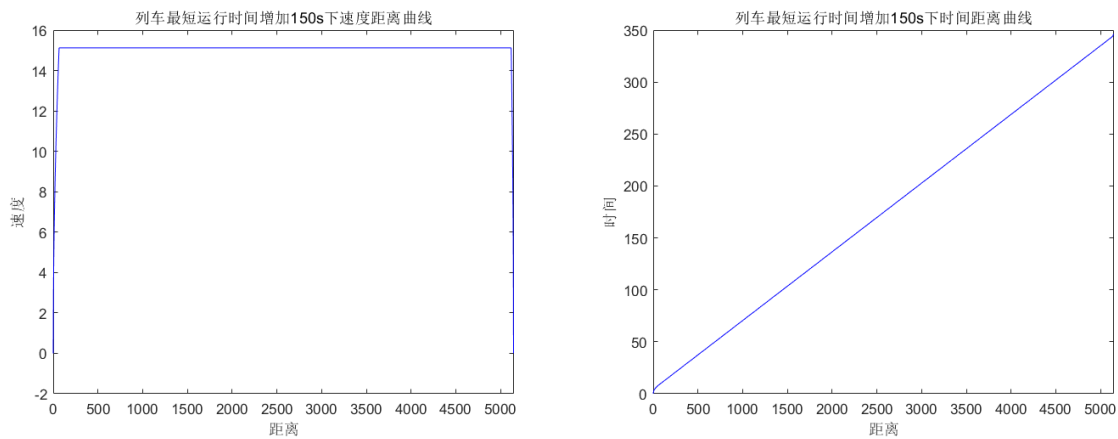


图 5-28: 时间-距离曲线

图 5-29: 速度-距离曲线

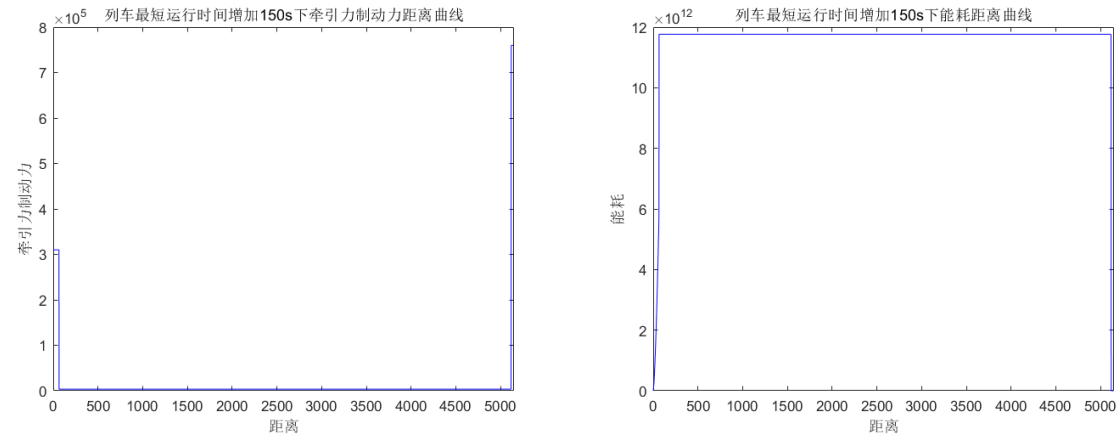


图 5-30: 牵引力制动力-距离曲线

图 5-31: 能耗-距离曲线

图 5-32: 第一问增加 150s

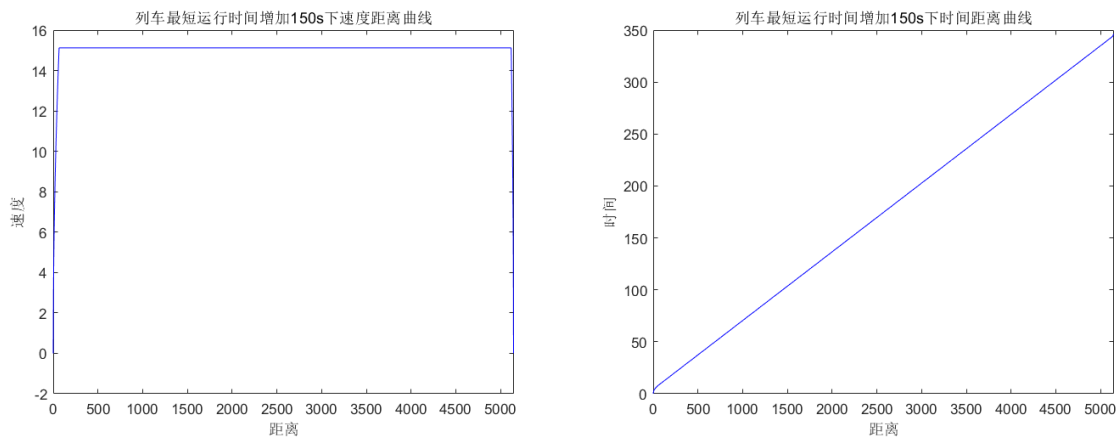


图 5-33: 速度-距离曲线

图 5-34: 时间-距离曲线

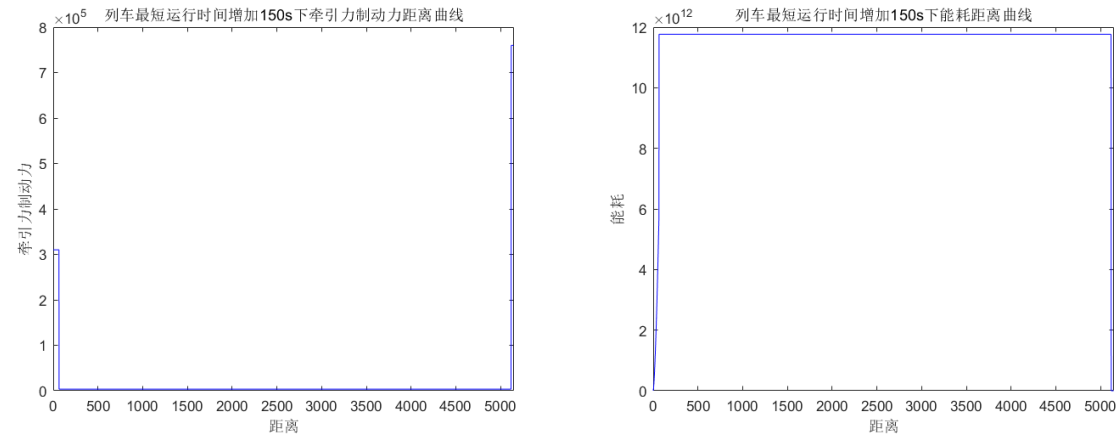


图 5-35: 牵引力制动力-距离曲线

图 5-36: 能耗-距离曲线

图 5-37: 第一问增加 300s

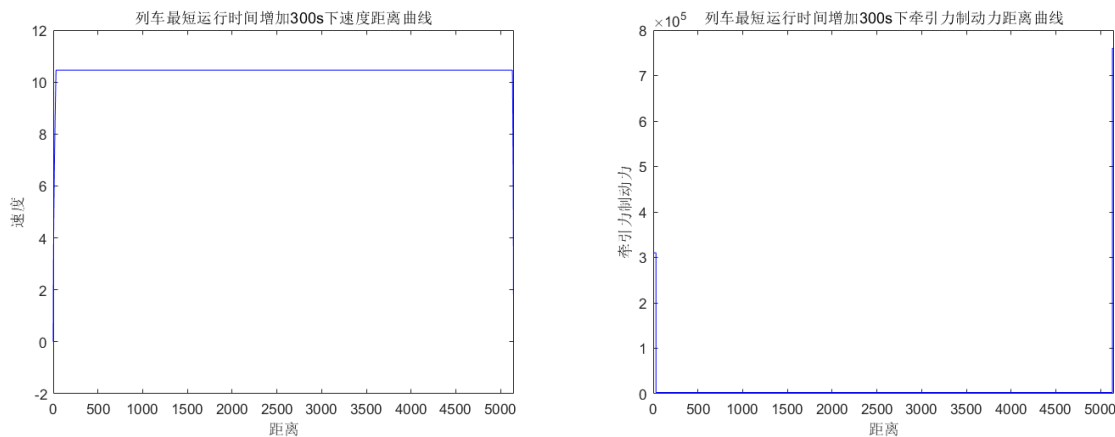


图 5-38: 速度-距离曲线

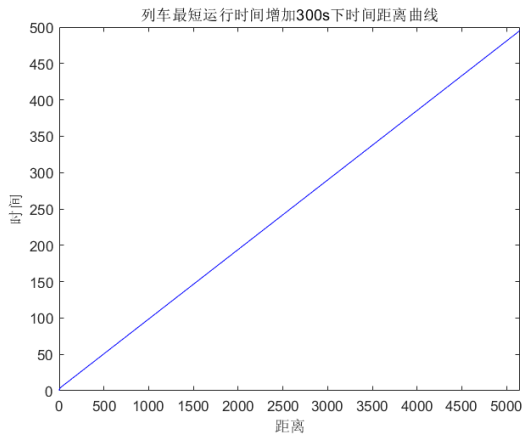


图 5-39: 牵引力制动力-距离曲线

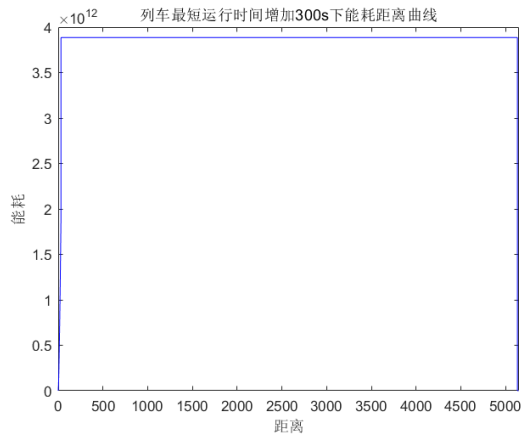


图 5-40: 时间-距离曲线

图 5-41: 能耗-距离曲线

图 5-42: 第二问增加 10s

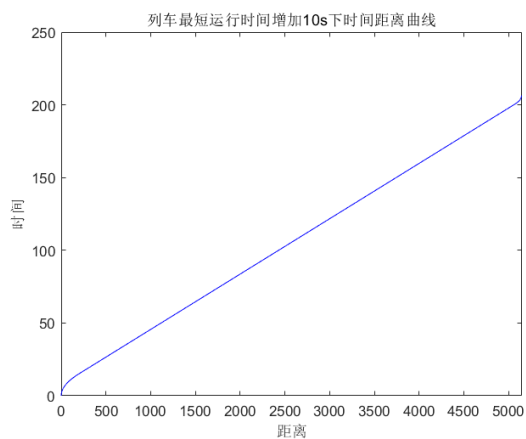


图 5-43: 时间-距离曲线

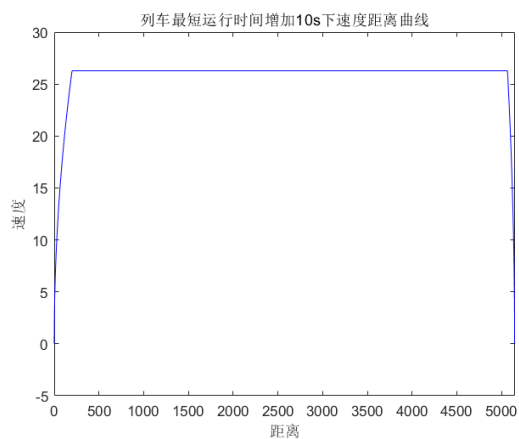


图 5-44: 速度-距离曲线

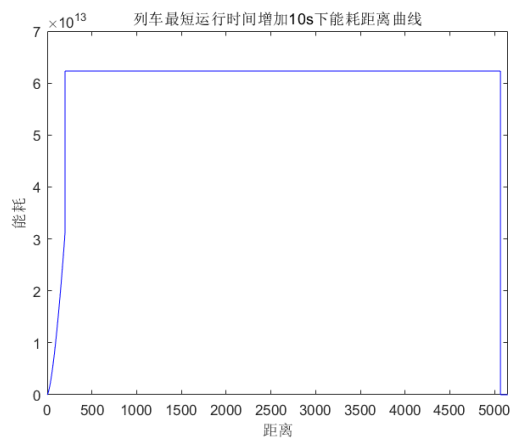


图 5-45: 能耗-距离曲线

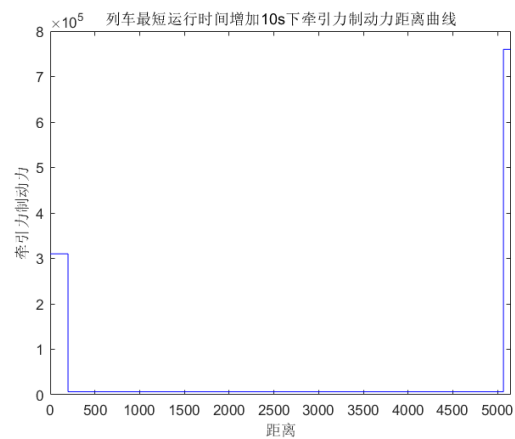


图 5-46: 牵引力制动力-距离曲线

图 5-47: 第二问增加 20s

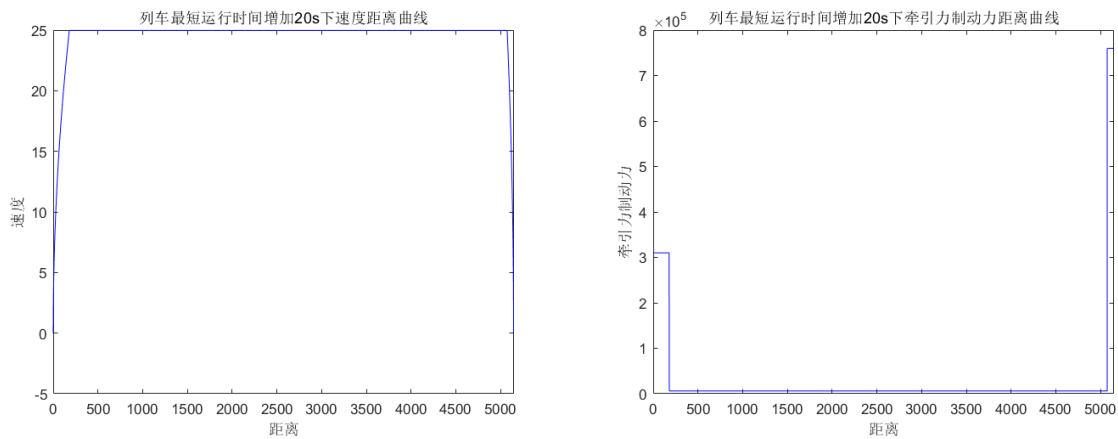


图 5-48: 速度-距离曲线

图 5-49: 牵引力制动力-距离曲线

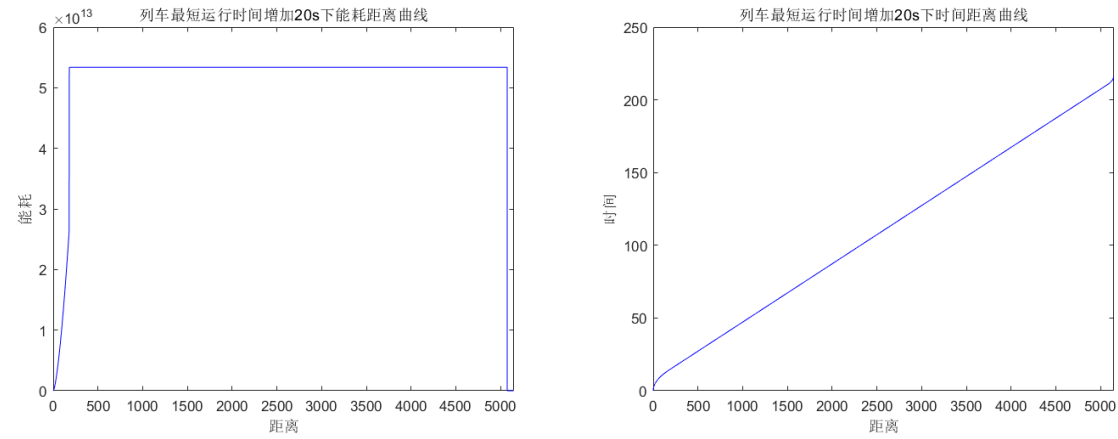


图 5-50: 能耗-距离曲线

图 5-51: 时间-距离曲线

图 5-52: 第二问增加 50s

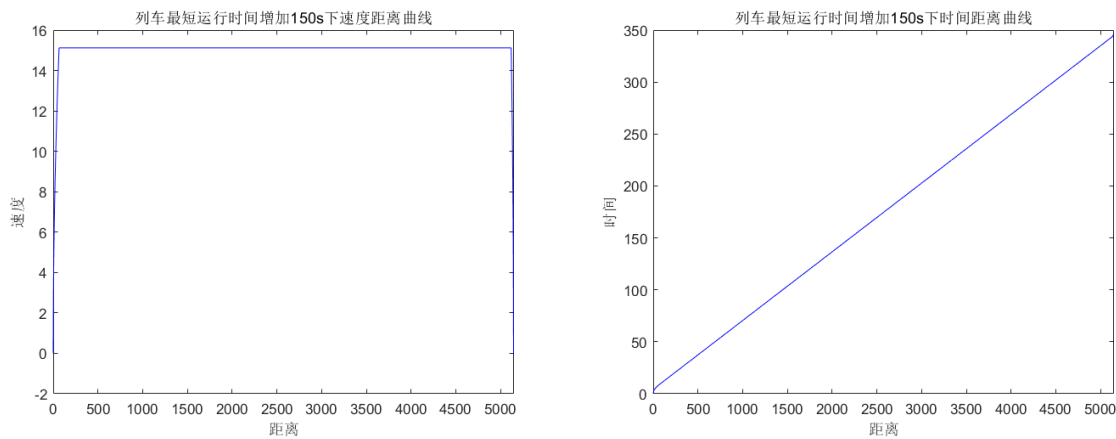


图 5-53: 时间-距离曲线

图 5-54: 速度-距离曲线

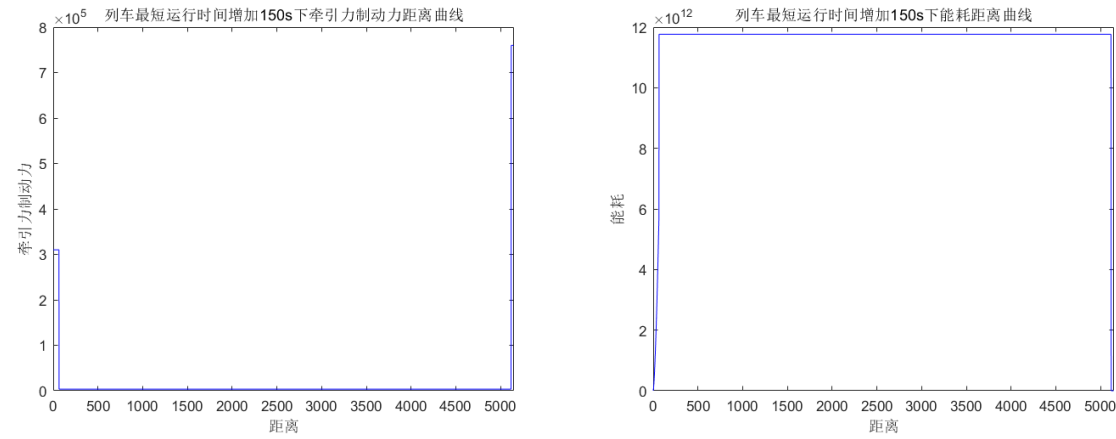


图 5-55: 牵引力制动力-距离曲线

图 5-56: 能耗-距离曲线

图 5-57: 第二问增加 150s

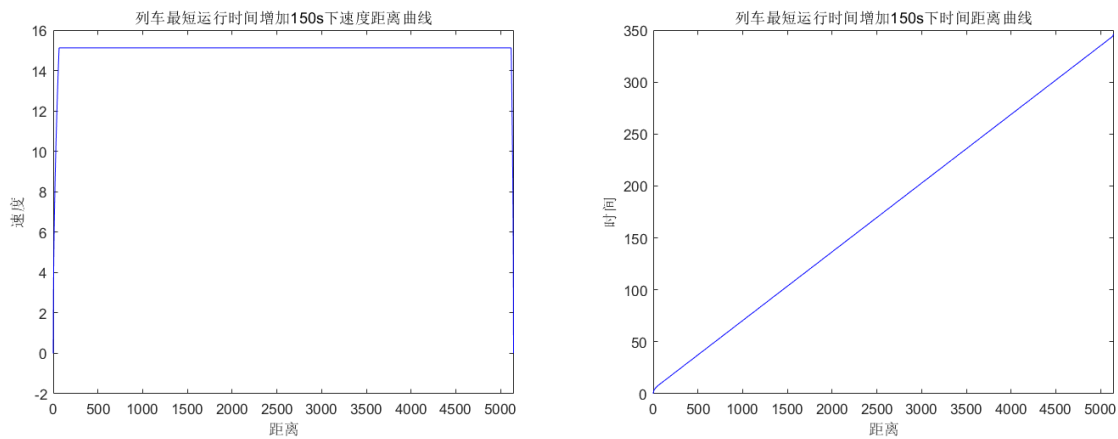


图 5-58: 速度-距离曲线

图 5-59: 时间-距离曲线

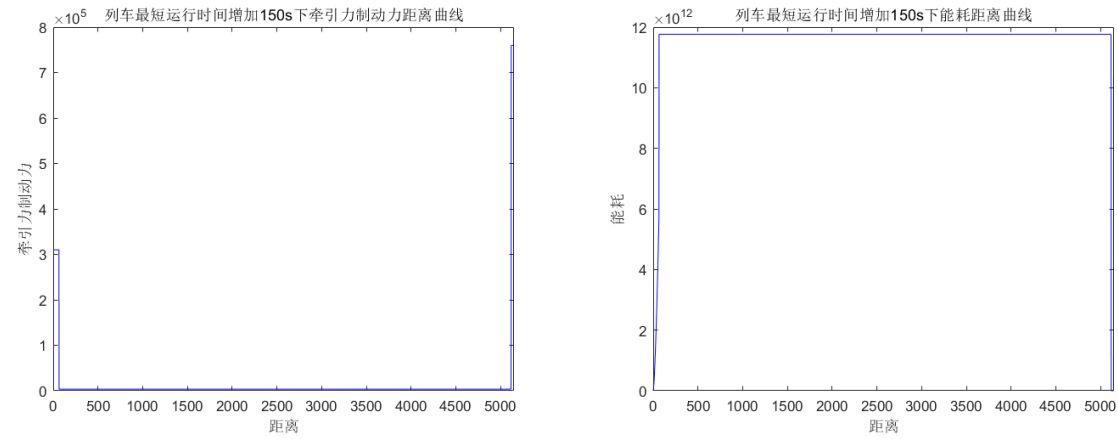


图 5-60: 牵引力制动力-距离曲线

图 5-61: 能耗-距离曲线

图 5-62: 第二问增加 300s

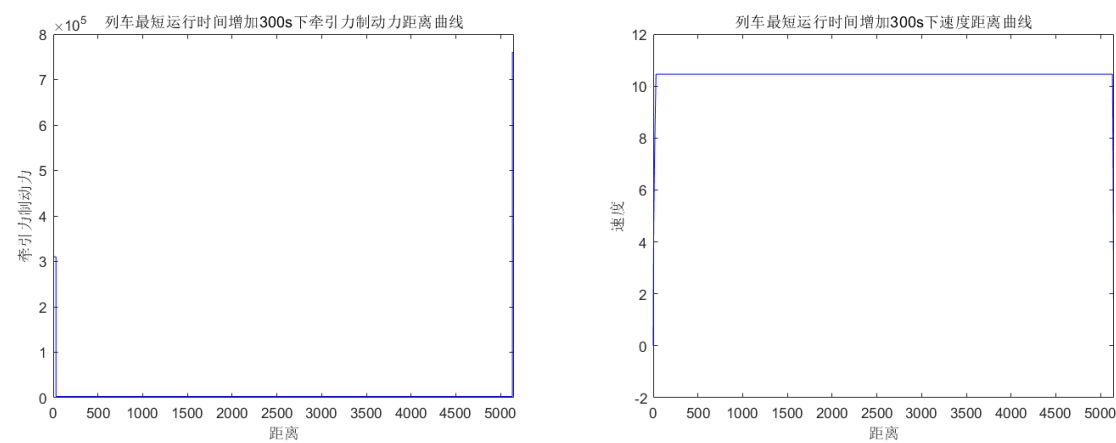


图 5-63: 牵引力制动力-距离曲线

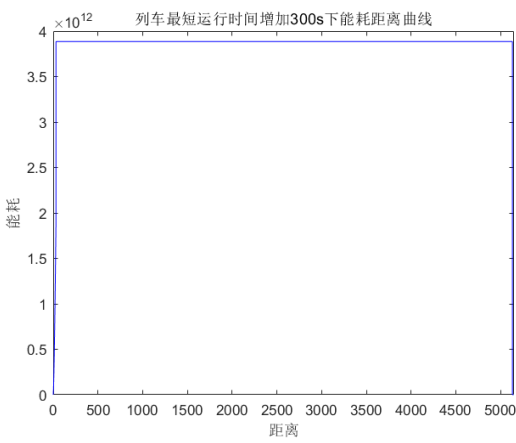


图 5-65: 能耗-距离曲线

图 5-64: 速度-距离曲线

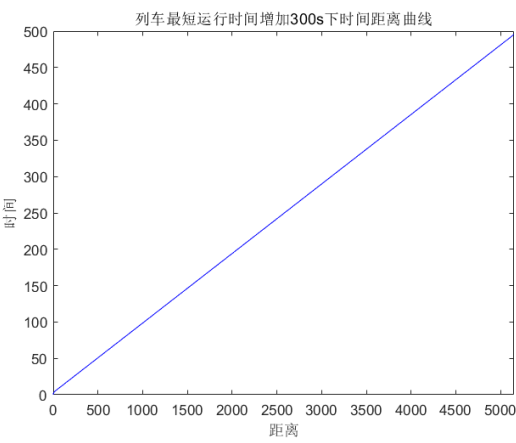


图 5-66: 时间-距离曲线