

面向节能的单/多列车优化决策问题

艾鑫¹ 杨志巧² 李金武³

¹ 三峡大学 理学院

² 武汉大学 数学与统计学院

³ 湖南大学 机械与运载工程学院

2015 年 12 月 5 日

问题回顾

第一问、单列车节能运行优化控制问题

问题回顾

问题一、单列车节能运行优化控制问题

第一小问 请建立计算速度距离曲线的数学模型，计算寻找一条列车从 A_6 站出发到达 A_7 站的最节能运行的速度距离曲线，其中两车站间的运行时间为 110 秒

第二小问 请建立新的计算速度距离曲线的数学模型，计算寻找一条列车从 A_6 站出发到达 A_8 站的最节能运行的速度距离曲线，其中要求列车在 A_7 车站停站 45 秒， A_6 站和 A_8 站间总运行时间规定为 220 秒（不包括停站时间）

第二问、多列车节能运行优化控制问题

问题回顾

第二问、多列车节能运行优化控制问题

第一小问 当 100 列列车以间隔 $H = h_1, \dots, h_{99}$ 从 A_1 站出发, 追踪运行, 依次经过 A_2, A_3, \dots 到达 A_{14} 站, 中间在各个车站停战最少 D_{\min} 秒, 最多 D_{\max} 秒。间隔 H 各分量的变化范围是 H_{\min} 秒至 H_{\max} 秒。请建立优化模型并寻找使所有列车运行总能耗最低的间隔 H 。要求第一列列车发车时间和最后一列列车的发车时间之间间隔为 $T_0 = 63900$ 秒, 且从 A_1 站到 A_{14} 站的总运行时间不变, 均为 2086 秒 (包括停站时间)。假设所有列车处于同一供电区段。

问题回顾

第二问、多列车节能运行优化控制问题

第二小问 接上问，如果高峰时间（早高峰 7200 秒至 12600 秒，晚高峰 43200 至 50400 秒）发车间隔不大于 2.5 分钟且不小于 2 分钟，其余时间发车间隔不小于 5 分钟，每天 240 列。请重新为它们制定运行图和相应的速度距离曲线。

第三问、列车延误后运行优化控制问题

问题回顾

第三问、列车延误后运行优化控制问题

第一小问 接上问，若列车 i 在车站 A_j 延误 DT_j^i (10 秒) 发车，请建立控制模型，找出在确保安全的前提下，首先使所有后续列车尽快恢复正点运行，其次恢复期间耗能最少的列车运行曲线

第二小问 假设 DT_j^i 为随机变量，普通延误 ($0 < DT_j^i < 10\text{s}$) 概率为 20%，严重延误 ($DT_j^i > 10\text{s}$) 概率为 10% (超过 120 秒，接近下一班，不考虑调整)，无延误 ($DT_j^i = 0$) 概率为 70%。若允许列车在各站到、发时间与原时间相比提前不超过 10 秒，根据上述统计数据，如何对第二问的控制方案进行调整？

问题求解

第一问、单列车节能运行优化控制问题

模型建立

目标函数的确定

题设给出的目标是使得耗能最少，根据题设可知耗能主要是由于列车行驶需要牵引力，导致发电机就处于耗能状态。查阅相关参考文献 [2] 可知在整个运行过程中所消耗的能量由牵引力来决定，如下所示：

$$E = \int_0^{t_{\max}} F(t) v_t dt$$

注： $t_{\max} = 110$ ， 因为总的运行时间为 110 秒。

约束条件的确定

约束条件一：由题目所给的数据中可以知道从 A_6 站到 A_7 站的总路程为 1354m，因此整个过程中行走的总路程 $L_{\max} = 1354 \text{ m}$ ，即：

$$\int_0^{t_{\max}} v_t dt = L_{\max}$$

约束条件二：列车起始时刻和到达 A_7 站时刻的速度均为 0 且在运行的任何时刻速度都不能大于该时刻所处路段的最大速度 \bar{v}_t ，即：

$$\begin{cases} v_0 = v_{t_{\max}} = 0 \\ v_t \leq \bar{v}_t \end{cases}$$

约束条件三：由牛顿学第二定律可知，实际输出的牵引加速度乘以质量等于合外力，即：

$$ma_t = m \frac{dv_t}{dt} = F(t) - B(t) - W(t)$$

第一问模型

综上所述，建立的单列车两个站点之间的最优化模型为：

$$\begin{aligned} \min \quad & E = \int_0^{t_{\max}} F(t) v_t dt \\ s.t. \quad & \left\{ \begin{array}{l} \int_0^{t_{\max}} v_t dt = L_{\max} \\ \begin{cases} v_0 = v_{t_{\max}} = 0 \\ v_t \leq \bar{v}_t \end{cases} \\ ma_t = m \frac{dv_t}{dt} = F(t) - B(t) - W(t) \\ F(t) = k_t F_{\max}(t) \\ B(t) = k_b B_{\max}(t) \\ W(t) = [w_0(t) + w_1(t)] \times g \times m / 1000 \end{array} \right. \end{aligned}$$

求解算法

换一个角度看问题

- 题目要求在给定的时间内，使消耗的能量最小

换一个角度看问题

- 题目要求在给定的时间内，使消耗的能量最小
- 给定时间让能量最小 \implies 比较困难

换一个角度看问题

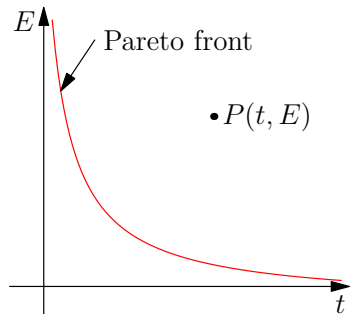
- 题目要求在给定的时间内，使消耗的能量最小
- 给定时间让能量最小 \implies 比较困难
- 给定能量让时间最小 \implies 容易求解

换一个角度看问题

- 题目要求在给定的时间内，使消耗的能量最小
- 给定时间让能量最小 \implies 比较困难
- 给定能量让时间最小 \implies 容易求解
- 可以将第一个问题转化为第二个问题，首先构造一个能量比较小的初始解，然后不断的增加能量，直到时间满足要求

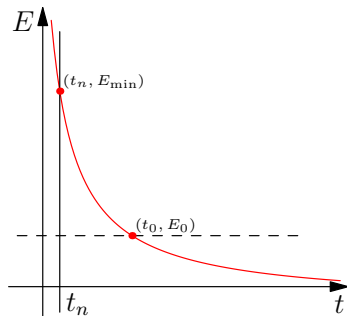
为什么能够这么做？

- 将此问题推广为一个多目标规划问题
 - 目标一： $\min t$
 - 目标二： $\min E$
- 运行方案 $(t, E) \implies P(t, E)$
- 多目标规划：Pareto front C （非劣解集）



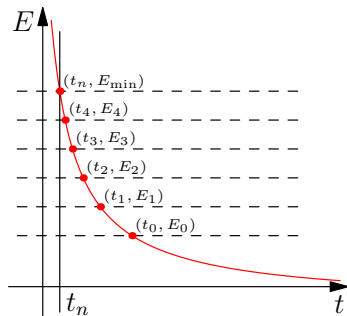
为什么能够这么做？

- 原问题：给定时间 t_n ，求 $E_{\min} \implies$ 求 $t = t_n$ 与 C 的交点对应的运行方案
- 如果我们能够给出能量较小的初始解 (t_1, E_1) ，然后逐步添加能量，直到 $t = t_n$ ，即求得原问题的运行方案



为什么能够这么做？

- 原问题：给定时间 t_n ，求 $E_{\min} \Rightarrow$ 求 $t = t_n$ 与 C 的交点
- 如果我们能够给出能量较小的初始解 (t_1, E_1) ，然后逐步添加能量，直到 $t = t_n$



考虑一个理想的情况

下面考虑一个理想的情况，即假设：

- 速度限制 v_{\max} 为常数
- 阻力 r 也为常数

优化模型

$$\begin{aligned} \min \quad & E = \int_0^{t_{\max}} k_t(t) v(t) F(t) dt \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} m \frac{dv(t)}{dt} = k_t F - k_b B - r \\ L = \int_0^{t_{\max}} v(t) dt \\ v(0) = v_0, \quad v(t_{\max}) = v_T \\ k_t \in [0, 1], k_b \in [0, 1], v \leq v_{\max} \end{cases} \end{aligned}$$

Pontryagin 最大值原理

根据 Pontryagin 最大值原理, 前述优化模型可以转化为最大化下面的哈密顿函数:

$$H = \frac{p_1}{v} \times (k_t F - k_b B - r) + p_2 v - k_t v F$$

其中 p_1 应该满足下面的微分方程:

$$\frac{dp_1}{ds} = -\frac{\partial H}{\partial v}$$

求解结果

$$\begin{cases} k_t = 1, k_b = 0, (p_1 > v^2) \\ k_t \in [0, 1], k_b = 0, (p_1 = v^2) \\ k_t = 0, k_b \in [0, 1], (p_1 = 0) \\ k_t = 0, k_b = 0, (0 < p_1 < v^2) \\ k_t = 0, k_b = 1, (p_1 < 0). \end{cases}$$

Pontryagin 最大值原理

求解结果与四个阶段相对应：

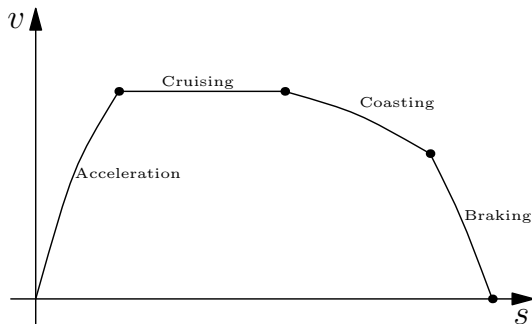
最大加速 $k_t = 1, k_b = 0$

巡航 $k_t \in [0, 1], k_b = 0$

巡航 $k_t = 0, k_b \in [0, 1]$

惰行 $k_t = 0, k_b = 0$

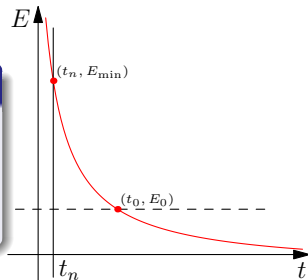
最大制动 $k_t = 0, k_b = 1$



Pontryagin 最大值原理

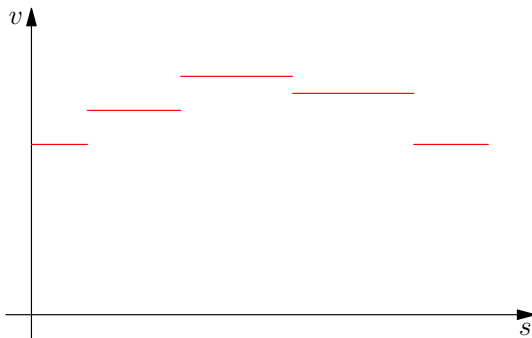
最大值原理结论

对于理想情况，所有“能量最小”和“时间最短”问题的最优解都是由：最大牵引、巡航、惰行和最大制动组成。



回到实际情况

- 实际情况下，不同路段的速度限制是不一样的
- 实际路况（坡度、曲率）是随着路段变化的
- 基本阻力与速度相关



求解初始解

初始解求法

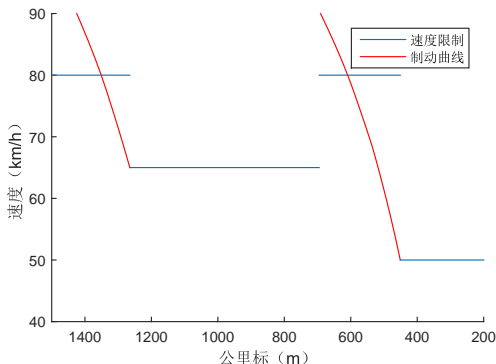
首先将列车最大加速到速度为 50km/h ，然后使列车惰行，在要到达终点时按最大制动进行制动。

- 加速到 50km/h 是因为一般速度限制都大于等于 50km/h
- 实际过程中发现，部分路段阻力过大，因此在惰行的时候要设置一个加速度下限
- 具体的制动点是通过检测是否遇到制动曲线来确定的

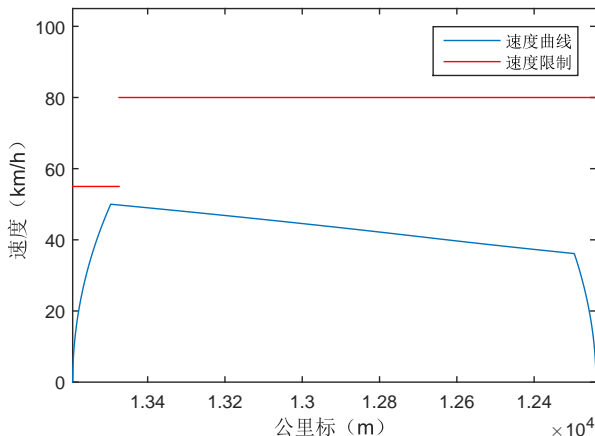
制动点的确定

什么是制动曲线？

制动曲线是在某一点，以该点的目标速度按照最大制动逆推出来的速度-路程曲线。在列车行驶过程中，一旦列车的速度-路程曲线遇到制动曲线就要立刻进行最大制动。

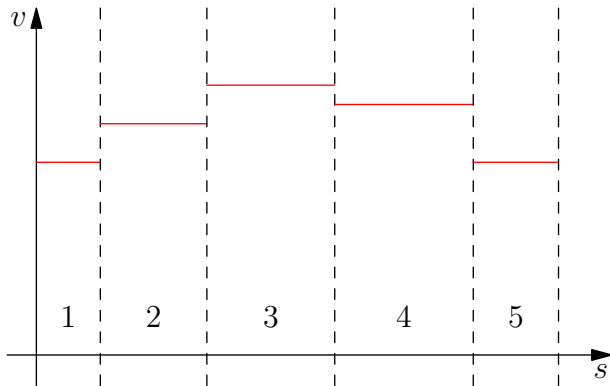


一个实际的初始解



初始解的逐步修正

得到初始解后，以速度限制对路程进行分区，使得在每个分区内的速度限制都是一样的。



初始解的逐步修正

一般得到的初始解的时间是大于所规定的运行时间，所以需要多分配一小份能量 ΔE ，对初始解进行逐步修正，直到达到目标运行时间为止。

能量分配准则

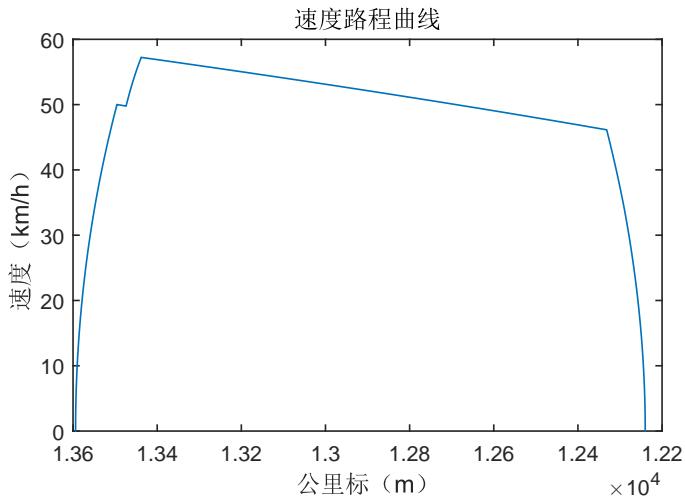
设总路程按照速度限制分成了 N 个子区间，逐次将分配的能量 ΔE 分配到各个子区间。对于分配能量的区间按照已分配到的总能量，按照：最大加速、巡航、惰行、最大制动的策略计算运行方案。因此可以得到每一个区间的节省时间 Δt_i ，将能量 ΔE 分配给节省时间最多的区间。

多站点情况

- 对于多站点情况，可以看做是两站点情况的一个特例
- 对于初始解，可以先生成相邻两个站点之间的初始解，拼接起来形成多站点情况的初始解
- 在相邻两个站点之间任然按照速度限制划分子区间，将所有子区间都当做多站点情况的子区间。逐步优化初始解过程与之前一样

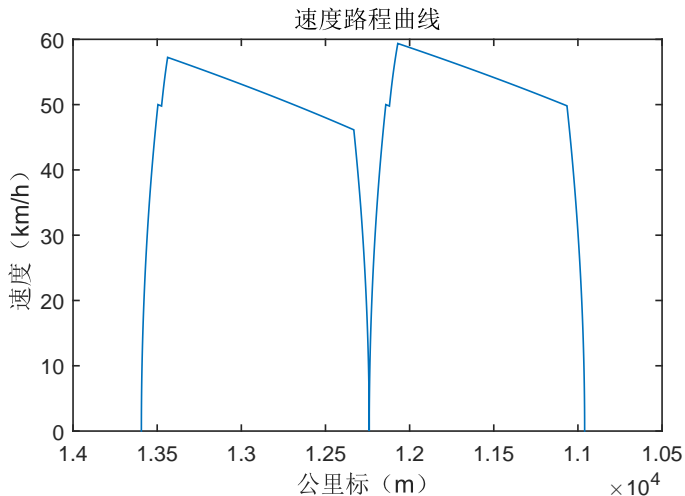
第一问速度路程曲线

第一小问



第一问速度路程曲线

第二小问



第二问、多列车节能运行优化控制问题

模型建立

算法求解

第三问、列车延误后运行优化控制问题

模型建立

算法求解

总结与展望