

面向节能的单/多列车优化控制研究

BY 艾鑫

三峡大学 理学院, 湖北 宜昌 443002

摘要

本文主要研究了以节能为目标的单/多列车优化控制问题. 对于单列车, 首先将问题进行分解, 将行驶区间按照速度限制划分为子区间. 然后构造一个能量较小的初始解, 逐步往能量利用效率最大的子区间添加能量对解进行修正, 直到行驶时间满足要求. 其中每一个子区间都按照最大牵引、巡航、惰行、最大制动的方案行驶. 对于多列车问题, 主要考虑再生能量的利用, 即通过对发车间隔的优化最大化再生能量的利用. 通过遗传算法进行求解后发现在理想情况下能够节省 ??% 的能量. 随后对实际运行中可能出现的延误, 给出相应的调整策略, 并对其进行了蒙特卡罗模拟.

关键词: 优化控制; 再生能量; 遗传算法; 蒙特卡罗模拟

1 引言

轨道交通系统在城市交通中占有重要的地位, 其运行规模也越来越大. 整个轨道交通系统的能耗包括列车牵引、空调、照明等多方面产生的能耗, 其中列车牵引能耗是其中的主要能耗. 在能源问题日益凸显的今天, 通过对列车运行进行优化控制以减少牵引能耗具有重要意义. 本文研究了单/多列车的优化控制问题, 并对列车延误的情况给出了相应的调整方案.

对于单列车的优化控制问题, 已经有许多人进行了研究. 某某某在恒定速度限制以及恒定阻力的情况下对此问题进行了研究, 他们通过最大值原理得出最优行驶方案应该由最大牵引、巡航、惰行、最大制动组成[?]. 但是在实际情况下, 不同地段的速度限制往往并不一样, 而且实际运行阻力一般与地形和行驶速度有关.

2 列车的受力分析

为方便后面的分析与计算, 我们首先要对列车进行受力分析. 一辆列车在运行的过程中受到的力有这些: 重力 G , 轨道托力, 列车牵引力 F , 列车制动力 B , 和列车总运行阻力 W . 其中, 重力 G 在垂直轨道方向的分力与轨道托力抵消, 而平行与轨道方向的分力可以纳入到列车总运行阻力 W 中. 这些力中, 我们能够控制的有列车牵引力 F 和列车制动力 B , 而列车运行阻力 W 则无法直接控制, 它一般跟列车运行速度和路线情况等很多因素有关. 下面我们逐一对这些力进行分析.

列车牵引力 F 是由动力传动装置产生的, 与列车运行方向相同, 驱动列车并可根据需要进行调节的外力. 根据文献[?], 牵引力 F 在不同的速度下存在不同的最大值 F_{\max} , 具体公式如下

$$F_{\max} = \begin{cases} 203 & 0 \leq v \leq 51.5 \text{ km/h} \\ -0.002032v^3 + 0.4928v^2 - 42.13v + 1343 & 51.5 < v \leq 80 \text{ km/h} \end{cases} \quad (1)$$

其中最大牵引力的单位是 kN.

列车制动力 B 是由制动装置引起的, 与列车的运行方向相反的, 可根据需要控制其大小的外力. 根据文献[?], 制动力的在不同的列车速度下也存在不同的最大值 B_{\max} , 具体公式如下

$$B_{\max} = \begin{cases} 166 & 0 \leq v \leq 77 \text{ km/h} \\ 0.1343v^2 - 25.07v + 1300 & 77 < v \leq 80 \text{ km/h} \end{cases} \quad (2)$$

其单位也为 kN.

列车的总阻力 W 是指列车与外界相互作用引起的与列车运行方向相反, 一般是阻碍列车运行的, 不能被控制的外力. 按照其形成原因可分为基本阻力和附加阻力. 其中, 基本阻力是指列车在空旷地段沿平直轨道运行时受到的阻力. 这个阻力主要是由机械摩擦和空气摩擦等因素而产生的固有阻力. 基本阻力理论计算十分复杂, 一般采用下面的经验公式进行计算[?]:

$$w_0 = A + Bv + Cv^2 \quad (3)$$

其中 w_0 为单位基本阻力(N/kN), A, B, C 为阻力多项式系数, 通常取经验值: $A = 2.031, B = 0.0622, C = 0.001807, v$ 为列车速度(km/h).

列车在附加条件下(通过坡道、曲线、隧道)运行所增加的阻力叫做附加阻力. 附加阻力主要考虑坡道附加阻力和曲线附加阻力. 列车的坡道附加阻力是列车上下坡时重力在列车方向上的一个分力. 通常用如下公式计算[?]

$$w_i = i \quad (4)$$

其中 w_i 为单位坡道阻力系数(N/kN), i 为路线坡度(%). i 为正表示上坡, i 为负表示下坡. 列车的曲线阻力主要取决于轨道路线的曲率半径, 列车在曲线上运行时, 轮轨间纵向和横向的滑动摩擦力增加, 转向架等各部分摩擦力也有所增加. 通常采用如下的公式计算[?]:

$$w_c = c / R \quad (5)$$

其中 w_c 为单位曲线阻力系数(N/kN), R 为曲率半径(m); c 为综合反映影响曲线阻力许多因素的经验常数, 我国轨道交通一般取 600.

综上, 列车运行总阻力可按照如下公式计算:

$$W = (w_0 + w_i + w_c) \times g \times M / 1000 \quad (6)$$

其中, W 为列车运行总阻力(N), w_0 为单位基本阻力(N/kN), w_i 为单位坡道阻力, w_c 为单位曲线阻力, M 为列车质量(kg), g 为重力加速度常数.

3 单列车优化控制

接下来我们考虑单列车的优化控制问题, 首先建立相应的数学模型, 然后给出求解算法和求解结果.

3.1 模型建立

我们的目标是节能, 即使列车运行的能耗最少. 列车的能耗包括很多方面, 我们在这里仅考虑列车的牵引耗能, 它是列车耗能的主要部分. 列车的牵引耗能 E 即牵引力 F 所做功, 由下式给出

$$E = \int_0^{t_{\max}} F(t) v dt \quad (7)$$

其中 t_{\max} 为总行驶时间, v 为列车运行速度. 我们的目标就是使上式尽可能的小. 下面我们来考虑约束条件.

首先要考虑的是行驶路程的约束, 即在 $t = t_{\max}$ 时, 列车必须到达指定的目的地. 设起点与终点的路程为 L_{\max} . 行驶路程约束如下:

$$\int_0^{t_{\max}} v dt = L_{\max}. \quad (8)$$

另一个约束是, 初始和终了时的速度为零, 且行驶过程中要满足速度限制:

$$\begin{cases} v(0) = v(t_{\max}) = 0 \\ 0 \leq v \leq \bar{v} \end{cases} \quad (9)$$

其中 \bar{v} 表示列车所处位置处的速度上限. 最后还有一个物理上的一个约束条件, 即牛顿第二定律:

$$M \frac{dv}{dt} = F(t) - B(t) - W(t) \quad (10)$$

其中 M 为列车的质量, $F(t), B(t), W(t)$ 分别为牵引力, 制动力和总阻力.

综上所述, 单列车优化控制模型为:

$$\begin{aligned}
 \min E &= \int_0^{t_{\max}} F(t)v dt \\
 s.t. \quad & \int_0^{t_{\max}} v dt = L_{\max} \\
 & v(0) = v(t_{\max}) = 0 \\
 & 0 \leq v \leq \bar{v} \\
 & M \frac{dv}{dt} = F(t) - B(t) - W(t) \\
 & 0 \leq F \leq F_{\max} \\
 & 0 \leq B \leq B_{\max} \\
 & W = (w_0 + w_i + w_c) \times g \times M / 1000
 \end{aligned}$$

3.2 求解算法

上述模型是一个泛函极值问题, 直接求解十分困难. 故应该采取其它策略性的算法进行求解. 某某通过 Pontryagin 最大值原理分析得到, 对于恒定速度限制和恒定阻力的情况下最优解应该由: 最大牵引、巡航、惰行和最大制动组成. 其中最大牵引表示列车以最大牵引全力加速运行; 巡航表示列车匀速运行, 具体是需要牵引还是制动取决于列车当时受到的总阻力; 惰行表示列车既不牵引也不制动, 列车运行状态取决于列车总阻力; 最大制动表示列车按最大制动力进行制动, 制动阶段不耗能, 在下一节里面的多列车优化中还要考虑制动时产生的再生能量的利用, 在单列车优化控制问题中暂不考虑再生能量.

在实际情况中, 不同的路段一般有不同的速度限制, 而总阻力也根据式(6), 取决于当地地况和行驶速度. 因此, 我们可以将整个行驶区间按照速度限制划分成许多子区间, 在每个子区间中速度限制都是恒定的. 在每个子区间的中, 列车按照: 最大牵引、巡航、惰行和最大制动的方案行驶.

接下来的问题就是, 如何分配各子区间的能量使总能量最少. 一般来说, 能耗越大, 运行时间越短. 但是, 对于不同的子区间, 单位能耗所缩短的行驶时间并不相同. 我们采用了贪心算法来解决这个问题. 首先, 构造一个耗能较小的初始解, 然后不断地将一小份能量 ΔE 分配给能量利用效率最大的子区间, 直到达到指定的行驶时间为止. 具体算法如下:

1. 构造初始解: 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, 此即能量较小的初始解. 设初始解的行驶时间为 $t = t_0$, 目标行驶时间为 t_s .
2. 将整个行驶区间 S 按照速度限制划分为子区间 s_i , 在每个子区间内, 速度限制恒定.
3. 依次在每个子区间 s_i 起点处分配一小份能量 ΔE . 分配到能量的区间, 按照: 最大牵引、巡航、惰行和最大制动行驶. 设减少的行驶时间分别为 t_i .
4. 将能量 ΔE 分配到 t_i 最大的子区间起点, 更新行驶时间 $t = t - t_i$.
5. 若 $t > t_s$, 则回到步骤 3, 否则, 算法完毕.

3.3 求解结果

4 多列车优化控制

对于多列车的优化控制问题, 关键在于再生能量的利用. 再生能量是指: 在列车制动时, 将列车运行时的动能转换为电能, 并向接触网反馈的电能. 产生的再生能量可以用于本车的空调、照明等设备, 还可以用于其它列车的加速. 在这里, 我们只考虑再生能量用于其它列车加速这一情况. 根据文献[?], 产生的再生能量计算公式为:

$$E_{\text{reg}} = (E_{\text{mech}} - E_f) \cdot 95\% \quad (11)$$

其中 E_{mech} 是制动过程中列车机械能的变化量, E_f 是制动过程中为克服基本阻力和附加阻力所做的功. 被利用的再生能量计算公式如下:

$$E_{\text{used}} = E_{\text{reg}} \cdot t_{\text{overlap}} / t_{\text{brake}} \quad (12)$$

其中 t_{overlap} 是两辆列车制动阶段与加速阶段重叠的时间, t_{brake} 是其中一辆列车制动的的时间, 即假设利用的再生能量与重叠时间成正比.

5 延误调整模型

6 总结