

基于离散化的高速列车自动运行控制算法设计

白雪松 杨中平

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要: 本文基于高速列车的牵引、制动特性,提出了一种基于离散状态的高速列车自动运行控制模型,并在深入分析模型的基础上,提出了求解该模型的高效近似算法、列车自动运行中的滑动窗体概念和较为科学的仿真流程。基于 Matlab 的仿真结果表明,该算法很好的逼近列车运行目标曲线,且在定点停车等具体应用中特性良好。

关键词: 高速列车 自动运行 算法 仿真

1 引言

高速铁路自动化作为迎接“高速、高密度”铁路要求所遵循的发展方向,是一项非常先进的技术,必将在未来大放异彩。在列车自动运行控制(ATO: Automatic Train Operation)领域,传统的模拟式控制难以考虑诸如线路条件等复杂多变的情况,且输出结果较难利用;在数字式控制方面,现有的控制算法在处理全局与局部上均存在一定不足。本文基于城市轨道交通自动运行控制方法,通过对高速列车目标运行曲线的离散化处理,设计高速列车自动运行控制算法。提出采用滑动窗体能够很好的结合传统方法的优点,克服传统方法的缺点,可以满足算法优化需求,为高速列车自动运行研究提供有力的支持。

2 高速列车牵引计算模型

当列车在某一区段运行时,列车中的各个车辆处于不同的线路状态和受力状态。牵引计算只分析列车纵向运动。因此仅讨论列车沿轨道前进方向所受的各种作用力。对于整列车,其受力情况为: $C = F - W - B$,式中 C 是总合力(N), F 为牵引力(N), W 为运行阻力(N), B 为制动力(N)。

在已知速度的情况下,可以利用线性插值法或曲线拟合法从牵引特性曲线上求出某点的牵引力。电制动力的计算与牵引力的计算类似,也是基于制动特性曲线,求出某点的制动力。在常用制动时,由于纯电制动技术能够克服电空切换所带来的不足,克服冲击,连续调节,更能发挥ATO的技术优势,所以在此我们只考虑纯电制动的情形。图1和图2给出了我国CRH3型动车组的牵引和制动特性曲线。

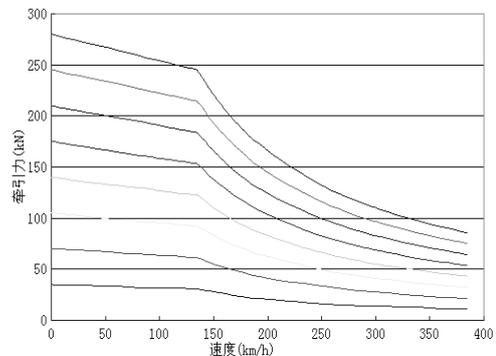


图1 京沪高速列车CRH3牵引特性曲线

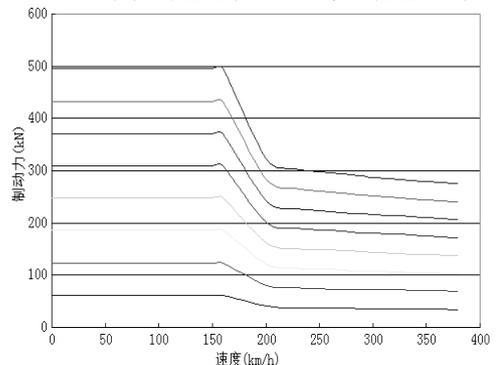


图2 京沪高速列车CRH3制动特性曲线

列车运行阻力包括基本阻力和附加阻力。CRH₃型动车组基本阻力公式:

$$W_0 = 0.79 + 0.0064v + 0.000115v^2 \quad (1)$$

附加阻力受车型的影响较小,主要取决于线路条件。

a 坡道附加阻力(N):

$$W_i = M \cdot g \cdot \sin\theta \approx M \cdot g \cdot \tan\theta \quad (2)$$

根据牵规,习惯使用单位重量的列车受力作为计算的依据,动车组的单位坡道阻力(N/t):

$$w_i = \frac{M \cdot g \cdot \tan\theta}{M \cdot g} \times 1000 = 1000 \cdot \tan\theta \quad (3)$$

铁路上将坡道终点对起点高度差与坡道水平长度的比值定义为坡道的坡度 i ，以千分数‰表示即 $i = 1000 \cdot \tan\theta$ 。

b 曲线附加单位阻力的计算公式为：

$$w_r = 600/R = 10.5\alpha/L_r \quad (4)$$

L_r —曲线长度； α —曲线中心角

c 隧道附加单位阻力公式：

$$w_s = 0.00013 \cdot L_s \quad L_s \text{—隧道长度, } m$$

为了方便起见，在此我们给出需要的加速度、速度、位移等运动学基本计算公式。计算时，以速度为步长。

$$a_i = \frac{F_i - W_i / 1000}{(1 + \gamma) \cdot M} \quad (m/s^2) \quad (5)$$

$$t_i = \frac{\Delta v}{3.6 \cdot a_i} \quad (s) \quad (6)$$

$$v_{i+1} = v_i + \Delta v \quad (km/h) \quad (7)$$

$$S_i = \frac{v_i}{3.6} \cdot t_i + \frac{1}{2} \cdot a_i \cdot t_i^2 \quad (m) \quad (8)$$

3 算法模型与优化

列车运行的基本性能指标是安全、准时、舒适、合理、节能，因此，应针对于满足这些性能要求，提出相应的控制方法。记列车的运行区间为 S ，根据离散化原则分为 $S_1 \sim S_n$ 共 n 段，依次记 S_1 与 S_2 、 S_2 与 S_3 …… S_n 的分界点为状态 P_1 、 P_2 …… P_n ，补充起始状态 P_0 。状态 P_j 为二维向量 $[v_j, t_j]$ ，在 S_i 区间内的控制档位为 K_i 。因此，问题转化为：已知目标运行曲线 $S-v$ 图，求解档位分布 K_i 。算法在形式上可以看作是一颗决策树，如图 3 所示。

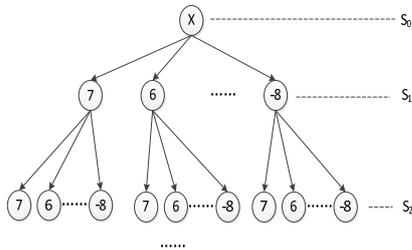


图 3 算法决策树

即从起始点 S_0 开始，依次历遍各个档位，计算每条路径的档位分布，继而计算每条路径的状态点 P_j' ，求得目标函数 $\sum (P_j - P_j')^2$ 。选择目标函数 $\min \sum (P_j - P_j')^2$ 最小的作为最终控制方式，即算法的优化目标。目前求解列车控制的算法存在两种传统倾向：一是仅预测考虑下一小段的列车控制。这种情况下，列车仅针对下一段的 v 、 S 、 t 来选择档位，方法

简单，但具有天生的盲目性，预测性不足。例如，从 S_7 来看， S_8 需要加速，而 S_9 又需要惰行。那么，这种控制方式波动和震荡均非常大，显然不是我们希望的选择。二是力图考虑全局的列车控制。这种考虑方式受传统的自动控制理论影响较深，多为模拟控制，最终结果可以草拟成多个数学函数。显然，这种方式局限性很大。例如线路状况、临时限速、紧急信号等难以纳入控制参数。这种方式的结果也不符合现代列车数字化自动驾驶系统的使用。因此，结合以上两种方式，我们提出了基于滑动窗口控制的思路。

滑动窗口是指，列车档位的计算仅在窗口的范围内进行。例如，假定窗口大小为 10，当列车处于 S_{40} 的位置，仅根据 $S_{40} \sim S_{50}$ 范围内的线路信息和目标曲线计算控制档位。随着列车的不断前行，窗口也不断滑动。滑动窗口很巧妙地结合了上述情形一：实时性好，动态计算的优点和情形二：全局性好的优点，提供了高效的列车控制方法。并且，滑动窗口也是降低算法复杂度的要求。窗口的概念起源于近现代滤波器，并且，根据我们的理解，ATO 中关于全局和局部的权衡，与滤波器设计中全局和局部的权衡非常类似。我们相信滑动窗口的控制方法能够给 ATO 系统控制方法的研究带来新的思路。

3.1 复杂度分析

即便采用滑动窗口的方法，上述是一颗未经优化的决策树，分支数目非常大。例如，当窗口长度为 10 即决策树的深度为 10 时，子路径数目达到 $16^{10} \approx 10^{12}$ 。对于一个实时性系统来讲，计算量过于庞大。

3.2 可优化性分析

我们分析了数种情形，将可优化性大致分类如下：

(1) 列车的目标曲线不是随机的

这意味着，假设列车在 S_i 要求速度 v_i ，那么在 S_{i+1} ， v_{i+1} 必然跟 v_i 具有很大的相关性，即概率 $P(k_{i+1} = k)$ 是不均等的。这意味着，决策树必然存在很大的剪枝可能。例如，在 S_{100} 要求速度 180 km/h ，在 S_{101} 对速度的要求很可能在 180 km/h 附近。

(2) 列车自身控制方面的约束

假设列车在 S_i 采用档位 K_i ，由于列车档位变换不能过于频繁，那么很可能在 S_{i+1} 也采用档位 K_i 。这意味着决策树可以进一步剪枝。

(3) 列车控制函数具有某些规律性特征。

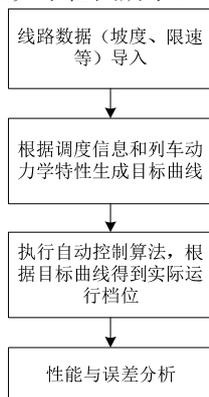
例如，由于列车的动力学特性，我们发现列车的 $v-s$ 曲线大部分情况均为凸函数。这意味着连接开始

与末端，那么中间的 $v-s$ 均在直线之上。这也是很好的可优化信息。

综上，由于概率 $P(k_i = k)$ 不是均匀分布，即信息量存在极大的冗余，而根据算法的理论，存在信息量极大的冗余算法则必然存在极大的优化。

4 算法的仿真与结果分析

算法的方针流程如下框图所示。



上述自动控制算法可以实时地适应于任意的调度控制，我们选取了两个典型的应用场景进行仿真测试：“京沪高速铁路德州——徐州段”和“独立定点停车”。

4.1 京沪高速铁路德州——徐州段仿真

根据京沪高铁线路数据、车辆牵引制动档位特性，制定全线的目标曲线（ $S-v$ 曲线），目标曲线采用快速启动和制动的方式，在全线路中共有 3 个加速点和 3 个减速点。

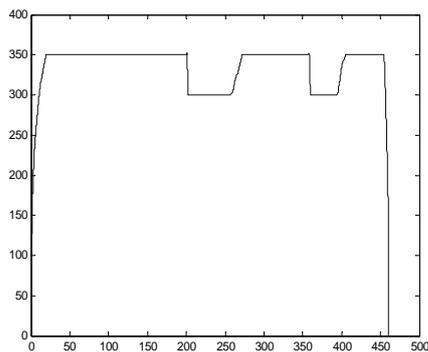


图 4 京沪高铁德州——徐州段目标运行曲线
(纵轴：速度 单位： km/h 横轴：距离 单位： km)

目标曲线如图 4 所示，算法执行后得到了图 5 所示实际运行曲线和档位分布信息。仿真结果显示，通过跟踪目标曲线，列车的实际运行曲线与目标曲线高度一致。列车档位主要分布在+3（加速）—+7（加速）之间，列车在平稳运行时，间歇性加速与惰行，因此呈现多档位相互切换。仿真结果较为符合理论分析，

并且在 Matlab 平台上算法运行时间约为 2 秒左右，复杂度和实时性都很好。

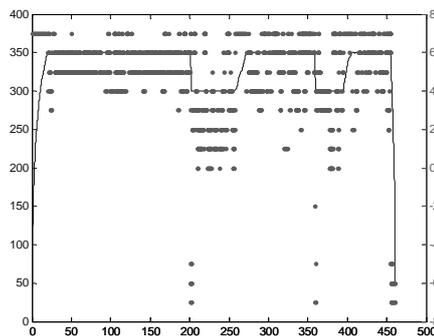


图 5 实际运行曲线与档位分布
(纵轴：速度 单位： km/h 横轴：距离 单位： km)

4.2 独立定点停车

为了进一步确认算法在定点停车上的精确性，我们引入了定点停车实验，验证停车误差。理论图示如图 6，通过反推法得到。

其中停车方式为最大减速度停车，停车位置为 460.87km。通过运行自动运行控制算法定点停车，得到的实际仿真结果如下图 7 所示。

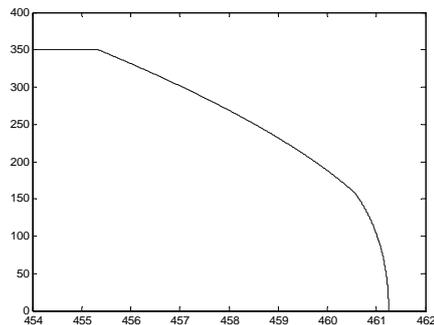


图 6 目标定点停车曲线
(纵轴：速度 单位： km/h 横轴：距离 单位： km)

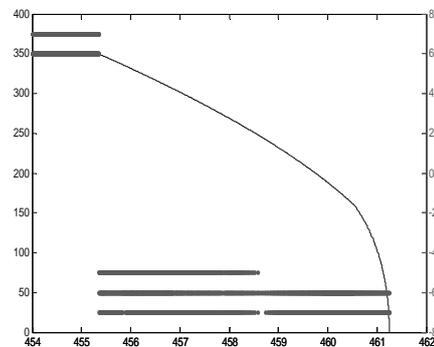


图 7 实际运行定点停车仿真结果
(纵轴：速度 单位： km/h 横轴：距离单位： km)

分析显示，在进入制动状态后，ATO 采用 -5, -6, -7 档位减速；当距离在 500m 左右时，算法通过实时估计停车点位置，调整档位级别，途中分别调整为 -6,

-7 档位来实现定点停车。Matlab 结果显示最终列车停止位置在 460.9968km，误差小于 0.01m。

两个仿真结果均显示，本文提出的算法高效的利用了列车的控制特征，并且可以根据列车状态（位置、速度、时间）实时调整档位信息，能够完成列车的控制。

5 结束语

本文基于城市轨道交通自动运行控制方法，针对传统自动驾驶算法的不足，进行了自动驾驶算法的优化设计，提出了基于滑动窗口的控制方法，并具体基于Matlab平台实现了该算法。两个仿真结果表明，本

文中提出的算法思路及具体实现能很好的吻合列车运行需求，具有很好的参考价值。

参考文献

- [1] 唐涛, 黄良骥.列车自动驾驶系统控制算法综述[J].铁道学报, 2003, 25(2): 98-102.
- [2] 黄志平, 康熊, 周忠良.列车自动驾驶的仿真实现[J].铁道机车车辆, 2001(6): 3-7.
- [3] 崔世文,冯晓云.列车优化操纵与自动驾驶模式的研究与仿真[J].铁道机车车辆, 2005, 25(5): 9-12.
- [4] 王月仙, 王成国等.高速动车组自动运行仿真研究[J].电力机车与城轨车辆, 2009,32(4):7-1