



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113886962 A

(43) 申请公布日 2022. 01. 04

(21) 申请号 202111159441.2

(22) 申请日 2021.09.30

(71) 申请人 同济大学

地址 200092 上海市杨浦区四平路1239号

(72) 发明人 曾小清 应沛然 沈拓 罗智航
冯嘉龙 刘熙 徐钟珂 益西志玛
袁腾飞 岳晓园 刘源 王奕曾

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

代理人 叶敏华

(51) Int. Cl.

G06F 30/15 (2020.01)

G06F 17/12 (2006.01)

G06F 119/14 (2020.01)

权利要求书8页 说明书16页 附图4页

(54) 发明名称

一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法

(57) 摘要

本发明涉及一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法：S1、根据时刻表估算最优牵引巡航速度；S2、利用最优巡航最小时间算法生成能耗近似最优解；S3、步骤S2结果对应列车运行时间是否满足时刻表，若满足，则执行S5，否则执行S4；S4、根据S3中列车运行时间和时刻表的误差，对最优牵引巡航速度进行迭代更新，之后执行S2；S5、利用搜索替换算法对能耗近似最优解进行优化；S6、步骤S5结果对应列车运行时间是否满足时刻表，若满足，则结束计算，否则重新估算最优牵引巡航速度，再返回执行S2和S5；S7、控制列车按照列车运行轨迹行驶。与现有技术相比，本发明针对高速列车，考虑陡坡线路和路段限速约束，能够在伴随变量间断情况下进行列车运行轨迹的规划控制。



1. 一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、根据预设的时刻表估算最优牵引巡航速度;

S2、利用最优巡航最小时间算法生成能耗近似最优解,该能耗近似最优解对应有近似最优运行轨迹点;

S3、判断步骤S2计算结果对应的列车运行时间是否满足时刻表,若满足,则执行S5,否则执行S4;

S4、根据S3中列车运行时间和时刻表的时间误差,对最优牵引巡航速度进行迭代更新,之后返回执行S2;

S5、利用搜索替换算法对能耗近似最优解进行进一步优化;

S6、判断步骤S5计算结果对应的列车运行时间是否满足时刻表,若满足,则结束计算,以当前能耗近似最优解对应的近似最优运行轨迹点作为最优运行轨迹点,否则根据S5计算结果对应的列车运行时间与时刻表的时间误差,重新估算最优牵引巡航速度,再返回依次执行S2和S5;

S7、将计算得到的所有最优运行轨迹点连线生成列车运行轨迹,控制列车按照该列车运行轨迹行驶。

2. 根据权利要求1所述的一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法,其特征在于,所述步骤S1中最优牵引巡航速度具体为:

$$v_{bq} = \frac{x_f - x_0}{t(x_f) - t(x_0)}$$

式中, x_f 为线路终点所在的位置, x_0 为线路起点所在的位置, $t(x_0)$ 和 $t(x_f)$ 分别为时刻表所要求的出发时间和到达时间。

3. 根据权利要求2所述的一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法,其特征在于,所述步骤S2具体包括以下步骤:

S21、假设能量回收率 ρ 等于1,则此时最优驾驶工况集合包含全力牵引工况、牵引巡航工况、制动巡航工况和全力制动工况,同时,最优牵引巡航速度 v_{bq} 和最优制动巡航速度 v_{bz} 相等;

S22、目标巡航速度为牵引巡航速度和限速的较小值:

$$v_{target}(x) = \min\{v_{bq}, \bar{V}(x)\}$$

将相同的目标巡航速度划分为同一分段,分段目标速度用 $v_{target,i}$ 进行标记,依据分段目标速度,将线路划分为大上坡、大下坡和缓坡,其中大上坡的定义为:使用全力牵引工况,列车的速度仍然下降的坡段,该部分的坡段可以用以下式子进行定义:

$$\bar{U}(v) - w_0(v) - w_r(x) - g(x) < 0$$

大下坡的定义为:使用惰行工况,列车速度仍然上升的坡段,该部分的坡段可以用以下式子进行定义:

$$-w_0(v) - w_r(x) - g(x) > 0$$

其中, $\bar{U}(v)$ 为全力牵引最大输出, $w_0(v)$ 为基本阻力, $w_r(x)$ 为弯道阻力, $g(x)$ 为坡道阻

力,除大上坡和大下坡以外的其余部分均为缓坡;

S23、在能量回收效率为1的假设前提下,采用简化的节能驾驶策略,以获得能耗近似最优解。

4. 根据权利要求3所述的一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法,其特征在于,所述步骤S23具体包括以下步骤:

S231、按照行驶顺序,依次进行速度轨迹计算,根据步骤S22的划分结果,若当前分段为大下坡,则执行步骤S232,若当前分段为缓坡,则执行步骤S233,若当前分段为大上坡,则执行步骤S234;

S232、在大下坡分段内使用全力牵引工况,得到预计算速度轨迹 v_{prec} ,如果存在子区段预计算速度轨迹 v_{prec} 大于i分段的目标速度: $v_{prec} > v_{target_i}$,则对超过的子区段采用制动巡航工况驾驶,否则的话,预计算速度轨迹就是预计算的结果,之后执行步骤S235;

S233、在缓坡分段内使用全力牵引工况,得到预计算速度轨迹 v_{prec} ,如果存在子区段预计算速度轨迹 v_{prec} 大于i分段的目标速度: $v_{prec} > v_{target_i}$,则对超过的子区段采用牵引巡航工况驾驶,否则的话,预计算速度轨迹就是预计算的结果,之后执行步骤S235;

S234、在大上坡分段内使用全力牵引工况,得到预计算速度轨迹 v_{prec} ,即为预计算的结果,之后执行步骤S235;

S235、将预计算结果和本段之前所有的i-1段进行合并,得到速度过渡轨迹 v_{temp} ;

S236、如果速度过渡轨迹 v_{temp} 在本段结束点的速度 $v_{temp_{end}}$ 大于i+1分段的分段目标速度 $v_{target_{i+1}}$,则从本段的结束点开始,以全力制动工况,反向计算速度轨迹 v_{back} ,寻找反向计算速度轨迹和预计算得到的速度轨迹 v_{prec} 的首个交点,保留交点左侧预计算得到的速度轨迹和交点右侧反向计算得到的速度轨迹,由此,得到前i个分段的解;

如果速度过渡轨迹 v_{temp} 在本段结束点的速度 $v_{temp_{end}}$ 小于i+1分段的分段目标速度 $v_{target_{i+1}}$,则预计算的结果就是前i个分段的解;

S237、计算结束后生成相应的切入协态变量,其中,应用全力制动部分所对应的切入协态变量定义为0,其余部分对应的切入协态变量均定义为1。

5. 根据权利要求2所述的一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法,其特征在于,所述步骤S4中对最优牵引巡航速度进行迭代更新的计算公式为:

$$v_{bq_{k+1}} = \left[1 + \gamma + \xi \cdot \frac{t_{r_k} - (t(x_f) - t(x_0))}{t(x_f) - t(x_0)} \right] \cdot v_{bq_k}$$

其中, γ 为偏移因子, ξ 为缩放因子, t_{r_k} 为第k次迭代的列车运行计算时间, v_{bq_k} 为第k次迭代的列车牵引巡航速度。

6. 根据权利要求4所述的一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法,其特征在于,所述步骤S5具体包括以下步骤:

基于替换逻辑调用搜索算法,其中,搜索算法具体为基于一维搜索的斐波那契算法、二分法或枚举法;

采用调用的搜索算法,寻找得到对应的替换插入段;

结合坡段类型、限速以及最优巡航速度之间的关系,完成替换过程。

7. 根据权利要求6所述的一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法,其特征在于,所述替换插入段的计算公式为:

$$\begin{cases} \frac{d\omega(x)}{dx} = \frac{-\varphi(v_{bq}) + \omega(x) \cdot \varphi(v)}{v^3(x)} \\ \frac{dv}{dx} = \frac{u(x) - w_0(v) - g(x) - w_r(x)}{v} \end{cases}$$

$$\varphi(v) = v^2 \cdot \frac{dw_0(v)}{dv}$$

该函数的初始值是能耗近似最优解插入区间起点处的值,其中, $\omega(x)$ 为辅助协态变量, $\varphi(v)$ 为速度的函数;

对于某一特定的插入段,评价函数分两种情况进行计算:

如果插入段用于保持列车持续运行,则评价函数的一般形式如下所示:

$$E_1(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}, d_{\text{key1}}, \omega_{\text{goal}}) = \begin{cases} N + |v(d_{\text{key}}) - v_{\text{goal}}|, & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) \text{ 不满足相关要求} \\ |\omega(\arg_{d_{\text{key1}} < x} v = v_{\text{goal}}) - \omega_{\text{goal}}|, & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) \text{ 满足相关要求} \\ M + v_{\text{goal}} + d_{\text{key}} - d_{\text{end}}, & \text{if } d_{\text{end}} < d_{\text{key}} \end{cases}$$

如果插入段用于列车减速运行,则评价函数的一般形式如下所示:

$$E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = \begin{cases} v(d_{\text{key}}), & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) > v_{\text{goal}} \\ v_{\text{goal}} - v(d_{\text{key}}), & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) \leq v_{\text{goal}} \\ M + d_{\text{key}} - d_{\text{end}}, & \text{if } d_{\text{end}} < d_{\text{key}} \end{cases}$$

其中,评价函数的自变量 x 是插入段的起点,即为状态转换点, N 和 M 分别是两个常数, $0 << N << M$;

d_{key1} 为关键点的位置,在评价函数 $E_1(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}, d_{\text{key1}}, \omega_{\text{goal}})$ 中,具体为陡坡段的结束点,在评价函数 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}})$ 中,则具体为全力制动工况的终点;

d_{end} 为插入段的终点, v_{goal} 和 ω_{goal} 在评价函数 $E_1(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}, d_{\text{key1}}, \omega_{\text{goal}})$ 中具体为插入段终点处的目标速度和目标辅助协态变量,在评价函数 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}})$ 中, v_{goal} 则具体为近似最优解 d_{key} 位置的目标减速速度;

$v(d_{\text{key}})$ 在大下坡路段条件下需满足 $v(d_{\text{key}}) > v_{\text{goal}}$,在大上坡路段条件下需满足 $v(d_{\text{key}}) < v_{\text{goal}}$;

$w(\arg_{d_{\text{key1}} < x} v = v_{\text{goal}})$ 为在 d_{key1} 点之后辅助伴随变量在插入段速度等于 v_{goal} 的位置的值。

8. 根据权利要求7所述的一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法,其特征在于,所述替换过程具体包括以下步骤:

S51、如果坡段类型为大上坡,则执行步骤S52;

如果坡段类型为大下坡,且 $\bar{V} \leq v_{bq} < v_{bz}$,则执行步骤S53;

如果坡段类型为大下坡,且 $v_{bq} \leq \bar{V} < v_{bz}$,则执行步骤S54;

如果坡段类型为大下坡,且 $v_{bq} < v_{bz} \leq \bar{V}$,则执行步骤S55;

如果坡段类型为缓坡,则执行步骤S56;

S52、当前坡段为大上坡,如果 $v_{bq} < \bar{V}$,则执行步骤S521,否则执行步骤S524;

S521、如果该分段仅包含全力牵引工况,则执行步骤S522,如果该分段仅包含全力牵引工况和全力制动工况,则执行步骤S523;

S522、按照全力牵引工况,求解方程 $\min E_1(x, v_{bq}, d_{ESUS}, d_{ESUS}, 1) = 0$,得到解 v_1 ;如果 $v_1 \leq \bar{V}$,则 v_1 就是所要寻找的插入段,结束计算;否则的话,从大上坡结束点,以速度 \bar{V} ,分别连接左侧和右侧的近似最优解速度轨迹,得到解 v_2 ,结束计算;

S523、按照全力牵引工况—惰行工况—全力制动工况的工序,求解方程 $E_2(x, v_{goal}, d_{key}) = 0$,得到解 v_3 ,结束计算;

S524、如果该分段仅包含全力牵引工况,则近似最优解即为最优解,结束计算;如果该分段仅包含全力牵引工况和全力制动工况,按照惰行工况—全力制动工况的工序,求解方程 $E_2(x, v_{goal}, d_{key}) = 0$,得到解 v_4 ,结束计算;

S53、坡段类型为大下坡,如果该分段仅包含制动巡航工况,或仅包含全力牵引工况和制动巡航工况,则执行步骤S531;

如果该分段仅包含全力牵引工况,近似最优解在该分段的部分就是最优解;

如果该分段仅包含制动巡航工况和全力制动工况,或包含全力牵引工况、制动巡航工况和全力制动工况,则执行步骤S532;

S531、使用惰行工况,求解方程 $\min E_1(x, \bar{V}, d_{ESDS}, d_{SSDS}, \rho)$,得到解 v_1 ;如果 $\omega_{v_1}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$,那么 v_1 就是所寻找的插入段,结束计算;否则在惰行工况结束后,应用制动巡航工况,以获得 v_2 ,此时 v_1 和 v_2 均为插入段,结束计算;

S532、使用惰行工况,求解方程 $\min E_1(x, \bar{V}, d_{ESDS}, d_{SSDS}, \rho)$,得到解 v_3 ;如果 $\omega_{v_3}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$,则进一步以惰行工况—全力制动工况的工序寻找方程 $E_2(x, v_{goal}, d_{key}) = 0$ 的解,记作 v_4 ,结束计算;否则在惰行工况结束后,使用制动巡航工况,得到 v_5 ,按照惰行工况—全力制动工况的工序,寻找方程 $E_2(x, v_{goal}, d_{key}) = 0$ 的解,记为 v_6 ,结束计算;

S54、坡段类型为大下坡,如果该分段仅包含制动巡航工况,或全力牵引工况和制动巡航工况,则执行步骤S541;

如果该分段仅包含全力牵引工况,近似最优解在该分段的部分就是最优解;

如果该分段仅包含制动巡航工况、制动巡航工况和全力制动工况,则执行步骤S542;

S541、使用惰行工况,求解方程 $\min E_1(x, v_{bq}, d_{ESDS}, d_{ESDS}, 1) = 0$,得到解 v_1 ,如果存在

$v_1 > \bar{V}$, 同时应用惰行工况求解方程 $\min E_1(x, \bar{V}, d_{ESDS}, d_{SSDS}, \rho)$ 得到解 v_2 , 所对应的伴随变量如果有 $\omega_{v_2}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$, 那么使用惰行工况, 从大下坡结束点开始, 以速度 \bar{V} , 分别连接左侧和右侧的速度轨迹, 得到解 v_3 , 否则在前期使用惰性工况的基础上, 使用部分制动工况, 得到解 v_4 , 而后使用惰行工况, 从大下坡结束点, 以速度 \bar{V} , 分别连接左侧和右侧的速度轨迹, 从而得到最终的替换轨迹; 如果 $v_1 \leq \bar{V}$, 近似最优解在该分段的部分就是最优解;

S542、使用惰行工况, 求解方程 $\min E_1(x, v_{bq}, d_{ESDS}, d_{ESDS}, 1) = 0$, 得到解 v_1 , 如果所对应的伴随变量 $\omega_{v_1}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$, 那么按照惰行工况—全力制动的工序求解方程 $E_2(x, v_{goal}, d_{key}) = 0$, 得到解 v_7 ; 否则使用制动巡航工况得到解 v_8 , 按照惰行工况—全力制动的工序求解方程 $E_2(x, v_{goal}, d_{key}) = 0$, 得到解 v_9 ;

S55、坡段类型为大下坡, 如果该分段仅包含制动巡航工况, 或仅包含全力牵引工况和制动巡航工况, 则执行步骤S551;

如果该分段仅包含全力牵引工况, 近似最优解在该分段的部分就是最优解;

如果该分段仅包含制动巡航工况和全力制动工况, 或包含全力牵引工况、制动巡航工况和全力制动工况, 则执行步骤S552;

S551、使用惰行工况, 求解方程 $\min E_1(x, v_{bq}, d_{ESDS}, d_{ESDS}, 1) = 0$, 得到解 v_1 ; 若 $v_1 \leq v_{bz}$, v_1 即为所寻找的插入段, 否则求解方程 $\min E_1(x, v_{bz}, d_{ESDS}, d_{SSDS}, \rho)$, 得到解 v_2 , 所对应的协态变量如果满足 $\omega_{v_2}(\arg_x v = v_{bq}) > \rho$, 那么 v_1 就是插入段, 否则使用制动巡航工况得到 v_3 , 并应用惰行工况, 同时求解方程 $\min E_1(x, v_{bq}, d_{ESDS}, d_{ESDS}, 1)$ 得到解 v_4 , 如果 $v_4 > \bar{V}$, 那么使用惰性工况, 从大下坡结束点, 以速度 \bar{V} , 连接左侧的速度轨迹和右侧的速度轨迹, 从而得到插入段的轨迹, 否则将 v_2 、 v_3 和 v_4 合并就是插入段的轨迹;

S552、使用惰行工况, 如果方程 $\min E_1(x, v_{bz}, d_{ESDS}, d_{SSDS}, \rho)$ 的最小值为0, 得到解 v_6 , 那么接下来将使用部分制动工况, 从而得到轨迹 v_7 , 按照惰行工况—全力制动工况的工序, 寻找方程 $E_2(x, v_{goal}, d_{key}) = 0$ 的解 v_8 , 轨迹 v_6 、 v_7 和 v_8 构成了插入段; 如果方程 $\min E_1(x, v_{bz}, d_{ESDS}, d_{SSDS}, \rho)$ 的最小值不为0, 那么按照惰行工况—全力制动工况的工序, 寻找方程 $E_2(x, v_{goal}, d_{key}) = 0$ 的解 v_9 , 则 v_9 构成了插入段。

9. 根据权利要求8所述的一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法, 其特征在于, 所述步骤S2中最优驾驶工况集合以及步骤S5中搜索替换算法均是基于带有状态变量约束的极大值原理进行的, 具体过程为:

构建列车动力学模型如下所示:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v}$$

$$\frac{dv}{dx} = \frac{u(x) - w_0(v) - g(x) - w_r(x)}{v}$$

列车目标方程如下所示：

$$\min J(u) = \int_{x_0}^{x_f} \left(\frac{|u| + u}{2} + \rho \cdot \frac{u - |u|}{2} \right) dx$$

根据带有状态变量约束的极大值原理,哈密顿函数如下所示：

$$\begin{aligned} \mathcal{H} = & - \left(\frac{|u| + u}{2} + \rho \cdot \frac{u - |u|}{2} \right) + \frac{\lambda_1(x)}{v} \\ & + \lambda_2(x) \cdot \frac{u(x) - w_0(v) - g(x) - w_r(x)}{v} \end{aligned}$$

其中, λ_1 和 λ_2 为协态变量；

拉格朗日方程如下所示：

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \mathcal{H} + \mu_1(x) \cdot [u - \underline{U}(v)] + \mu_2(x) \cdot [-u + \bar{U}(v)] \\ & + \sigma(x) \cdot [-v + \bar{V}(x)] \end{aligned}$$

$$\mu_1(x) \geq 0, \mu_1(x) \cdot [u^*(x) - \bar{U}(v^*)] = 0$$

$$\mu_2(x) \geq 0, \mu_2(x) \cdot [-u^*(x) + \underline{U}(v^*)] = 0$$

$$\sigma(x) \geq 0, \sigma(x) \cdot [-v^*(x) + \bar{V}(x)] = 0$$

其中, μ_1 、 μ_2 和 σ 分别为乘子；

为了使哈密顿函数最大化,拉格朗日方程对控制的偏导数等于0,即：

$$\begin{aligned} L_u^*(x) = & - \left(\frac{\text{sgn}(u^*) + 1}{2} + \rho \cdot \frac{1 - \text{sgn}(u^*)}{2} \right) \\ & + \lambda_2(x) \cdot \frac{1}{v^*} + \mu_1(x) - \mu_2(x) = 0 \end{aligned}$$

拉格朗日方程的正则方程如下所示：

$$\frac{d\lambda_1(x)}{dx} = -L_t^*(x) \longrightarrow \frac{d\lambda_1(x)}{dx} = 0$$

$$\frac{d\lambda_2(x)}{dx} = -L_v^*(x) \longrightarrow \frac{d\lambda_2(x)}{dx} = -\frac{\partial \mathcal{H}^*}{\partial v} + \sigma(x)$$

牵引巡航速度由最优牵引巡航速度 v_{bq} 和限速 \bar{V} 的较小值决定,制动巡航速度为最优制动巡航速度 v_{bz} 和限速 \bar{V} 的较小值决定,最优牵引巡航速度 v_{bq} 和最优制动巡航速度 v_{bz} 的关系为：

$$\rho = \frac{\varphi(v_{bq})}{\varphi(v_{bz})}$$

得到五种最优控制工况,最优驾驶工况的切换规则由辅助协态变量 ω 决定：

$$\omega(x) = \frac{\lambda_2(x)}{v(x)}$$

当牵引巡航使用的时候, $\omega(x) = 1$, 同时 $d\omega(x)/dx = 0$ 成立, 通过求解微分方程组, 得到:

$$0 = \lambda_1 + \varphi(v) + v^2(x) \cdot \sigma(x)$$

当 $v(x) < \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) = 0$ 恒成立, 因此 $\varphi(v) = -\lambda_1$ 有唯一解 v_{bq} , 该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(v_{bq}) + g(x) + w_r(x)$;

当 $v(x) = \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) \geq 0$ 恒成立, 因此 $\varphi(v) = -\lambda_1 - v^2(x) \cdot \sigma(x)$ 有唯一解 $\bar{V}(x)$, 该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(v_{bq}) + g(x) + w_r(x)$;

当使用制动巡航时, $\omega(x) = \rho$, 同时 $d\omega(x)/dx = 0$ 成立, 通过求解微分方程组, 得到:

$$0 = \lambda_1 + \rho \cdot \varphi(v) + v^2(x) \cdot \sigma(x)$$

当 $v(x) < \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) = 0$ 恒成立, 因此 $\varphi(v) = -\lambda_1/\rho$ 有唯一解 v_{bz} , 该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(v_{bz}) + g(x) + w_r(x)$;

当 $v(x) = \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) \geq 0$ 恒成立, 则 $\varphi(v) = -\lambda_1/\rho - v^2(x) \cdot \sigma(x)/\rho$ 有唯一解 $\bar{V}(x)$, 该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(\bar{V}) + g(x) + w_r(x)$;

对协态变量非连续性条件进行分析, 跳跃条件如下所示:

$$\lambda_1(\tau^-) = \lambda_1(\tau^+) + \eta(\tau) \cdot h_i^*(\tau) \rightarrow \lambda_1(\tau^-) = \lambda_1(\tau^+)$$

$$\lambda_2(\tau^-) = \lambda_2(\tau^+) + \eta(\tau) \cdot h_v^*(\tau) \rightarrow \lambda_2(\tau^-) = \lambda_2(\tau^+) - \eta(\tau)$$

$$\mathcal{H}^*(\tau^-) = \mathcal{H}^*(\tau^+) - \eta(\tau) \cdot \left(-\frac{dv^*}{dx} + \frac{d\bar{V}}{dx} \right) \Big|_{x=\tau}$$

$$\eta(\tau) \geq 0, \quad \eta(\tau) \cdot [-v^*(\tau) + \bar{V}(\tau)] = 0$$

通过分析可知协调变量 λ_2 和辅助协态变量 ω 只能在到达限速或离开限速的位置向上跳跃, 即: $\lambda_2(\tau^-) \leq \lambda_2(\tau^+)$;

在到达限速位置 τ 左右两侧都使用惰行工况的前提下, 如果协态变量发生跳变 $\lambda_2(\tau^-) < \lambda_2(\tau^+)$, 这也意味着 $\omega(\tau^-) < \omega(\tau^+)$, 那么该位置一定位于大下坡结束点;

在到达限速位置 τ 左右两侧都使用全力牵引工况的前提下, 如果协态变量发生跳变 $\lambda_2(\tau^-) < \lambda_2(\tau^+)$, 这也意味着 $\omega(\tau^-) < \omega(\tau^+)$, 那么该位置一定位于大上坡开始点;

此外, 在到达限速位置 τ 左右两侧控制工况输出极限相等的前提下, 如果协态变量发生跳变 $\lambda_2(\tau^-) < \lambda_2(\tau^+)$, 这也意味着 $\omega(\tau^-) < \omega(\tau^+)$, 那么该位置两侧控制输出的极限一定为 0, 且该点一定位于大下坡结束点或者该位置两侧控制输出的极限一定为 \bar{U} , 且该点一定为大上坡开始点。

10. 根据权利要求 9 所述的一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法, 其特征在于, 所

述五种最优控制工况具体为：

全力牵引工况，其控制输出为 $u(x) = \bar{U}$ ，其辅助协态变量为 $\omega(x) > 1$ ；

牵引巡航工况，其控制输出为 $u(x) \in [0, \bar{U}]$ ，其辅助协态变量为 $\omega(x) = 1$ ；

惰行工况，其控制输出为 $u(x) = 0$ ，其辅助协态变量为 $\rho < \omega(x) < 1$ ；

制动巡航工况，其控制输出为 $u(x) \in [\underline{U}, 0]$ ，其辅助协态变量为 $\rho = \omega(x)$ ；

全力制动工况，其控制输出为 $u(x) = \underline{U}$ ，其辅助协态变量为 $\omega(x) < \rho$ 。

一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及交通安全控制技术领域,尤其是涉及一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法。

背景技术

[0002] 根据中国铁路总公司2019年发布的统计公报,我国高铁运营总长度已增至3.5万公里,占全球高铁的75%。高铁的行程超过22.9亿次,需要巨大的能耗以满足运输需求。从环境保护和可持续发展的角度来看,在满足交通运输要求的同时降低高铁系统的能耗,已经成为高铁行业面临的挑战。考虑到实施成本和效果,最近的一项研究表明,安装具有节能驾驶策略(EEDS)的自动列车运行系统(ATO)和部署能量回收装置是最有应用前景的两项节能措施。其中,EEDS涉及计算最佳速度曲线及其相应控制模式的顺序,从而最大限度地降低能耗;能量回收理论则涉及回收制动过程中动能转化的电能,以实现节能目标。然而,与普通列车相比,在起伏地形上配备自动驾驶和能量回收装置的高速列车的EEDS将更加复杂,由于必须处理现实世界中经常出现的坡度陡峭的轨道、并防止列车超速行驶,在具有陡峭坡度和限速的轨道上行驶的高速列车,特别是在已经达到限速的情况下,会导致伴随变量在计算过程中不连续,一方面将增加整体计算时间,另一方面也难以保证列车在陡峭坡道上限速行驶时的能耗最小。

发明内容

[0003] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法,基于极大值原理生成列车轨迹,并控制列车按照生成的轨迹行驶,以规避超速风险,同时保证整体能耗最小。

[0004] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法,包括以下步骤:

[0005] S1、根据预设的时刻表估算最优牵引巡航速度;

[0006] S2、利用最优巡航最小时间算法生成能耗近似最优解,该能耗近似最优解对应近似最优运行轨迹点;

[0007] S3、判断步骤S2计算结果对应的列车运行时间是否满足时刻表,若满足,则执行S5,否则执行S4;

[0008] S4、根据S3中列车运行时间和时刻表的时间误差,对最优牵引巡航速度进行迭代更新,之后返回执行S2;

[0009] S5、利用搜索替换算法对能耗近似最优解进行进一步优化;

[0010] S6、判断步骤S5计算结果对应的列车运行时间是否满足时刻表,若满足,则结束计算,以当前能耗近似最优解对应的近似最优运行轨迹点作为最优运行轨迹点,否则根据S5计算结果对应的列车运行时间与时刻表的时间误差,重新估算最优牵引巡航速度,再返回依次执行S2和S5;

[0011] S7、将计算得到的所有最优运行轨迹点连线生成列车运行轨迹,控制列车按照该列车运行轨迹行驶。

[0012] 进一步地,所述步骤S1中最优牵引巡航速度具体为:

$$[0013] \quad v_{bq} = \frac{x_f - x_0}{t(x_f) - t(x_0)}$$

[0014] 式中, x_f 为线路终点所在的位置, x_0 为线路起点所在的位置, $t(x_0)$ 和 $t(x_f)$ 分别为时刻表所要求的出发时间和到达时间。

[0015] 进一步地,所述步骤S2具体包括以下步骤:

[0016] S21、假设能量回收率 ρ 等于1,则此时最优驾驶工况集合包含全力牵引工况、牵引巡航工况、制动巡航工况和全力制动工况,同时,最优牵引巡航速度 v_{bq} 和最优制动巡航速度 v_{bz} 相等;

[0017] S22、目标巡航速度为牵引巡航速度和限速的较小值:

$$[0018] \quad v_{target}(x) = \min \{ v_{bq}, \bar{V}(x) \}$$

[0019] 将相同的目标巡航速度划分为同一分段,分段目标速度用 v_{target} 进行标记,依据分段目标速度,将线路划分为大上坡、大下坡和缓坡,其中大上坡的定义为:使用全力牵引工况,列车的速度仍然下降的坡段,该部分的坡段可以用以下式子进行定义:

$$[0020] \quad \bar{U}(v) - w_0(v) - w_r(x) - g(x) < 0$$

[0021] 大下坡的定义为:使用惰行工况,列车速度仍然上升的坡段,该部分的坡段可以用以下式子进行定义:

$$[0022] \quad -w_0(v) - w_r(x) - g(x) > 0$$

[0023] 其中, $\bar{U}(v)$ 为全力牵引最大输出, $w_0(v)$ 为基本阻力, $w_r(x)$ 为弯道阻力, $g(x)$ 为坡道阻力,除大上坡和大下坡以外的其余部分均为缓坡;

[0024] S23、在能量回收效率为1的假设前提下,采用简化的节能驾驶策略,以获得能耗近似最优解。

[0025] 进一步地,所述步骤S23具体包括以下步骤:

[0026] S231、按照行驶顺序,依次进行速度轨迹计算,根据步骤S22的划分结果,若当前分段为大下坡,则执行步骤S232,若当前分段为缓坡,则执行步骤S233,若当前分段为大上坡,则执行步骤S234;

[0027] S232、在大下坡分段内使用全力牵引工况,得到预计算速度轨迹 v_{prec} ,如果存在子区段预计算速度轨迹 v_{prec} 大于i分段的目标速度: $v_{prec} > v_{target,i}$,则对超过的子区段采用制动巡航工况驾驶,否则的话,预计算速度轨迹就是预计算的结果,之后执行步骤S235;

[0028] S233、在缓坡分段内使用全力牵引工况,得到预计算速度轨迹 v_{prec} ,如果存在子区段预计算速度轨迹 v_{prec} 大于i分段的目标速度: $v_{prec} > v_{target,i}$,则对超过的子区段采用牵引巡航工况驾驶,否则的话,预计算速度轨迹就是预计算的结果,之后执行步骤S235;

[0029] S234、在大上坡分段内使用全力牵引工况,得到预计算速度轨迹 v_{prec} ,即为预计算的结果,之后执行步骤S235;

[0030] S235、将预计算结果和本段之前所有的*i*-1段进行合并,得到速度过渡轨迹 v_{temp} ;

[0031] S236、如果速度过渡轨迹 v_{temp} 在本段结束点的速度 $v_{temp_{end}}$ 大于*i*+1分段的分段目标速度 $v_{target_{i+1}}$,则从本段的结束点开始,以全力制动工况,反向计算速度轨迹 v_{back} ,寻找反向计算速度轨迹和预计算得到的速度轨迹 v_{prec} 的首个交点,保留交点左侧预计算得到的速度轨迹和交点右侧反向计算得到的速度轨迹,由此,得到前*i*个分段的解;

[0032] 如果速度过渡轨迹 v_{temp} 在本段结束点的速度 $v_{temp_{end}}$ 小于*i*+1分段的分段目标速度 $v_{target_{i+1}}$,则预计算的结果就是前*i*个分段的解;

[0033] S237、计算结束后生成相应的切入协态变量,其中,应用全力制动部分所对应的切入协态变量定义为0,其余部分对应的切入协态变量均定义为1。

[0034] 进一步地,所述步骤S4中对最优牵引巡航速度进行迭代更新的计算公式为:

$$[0035] \quad v_{bq_{k+1}} = \left[1 + \gamma + \xi \cdot \frac{t_{r_k} - (t(x_f) - t(x_0))}{t(x_f) - t(x_0)} \right] \cdot v_{bq_k}$$

[0036] 其中, γ 为偏移因子, ξ 为缩放因子, t_{r_k} 为第*k*次迭代的列车运行计算时间, v_{bq_k} 为第*k*次迭代的列车牵引巡航速度。

[0037] 进一步地,所述步骤S5具体包括以下步骤:

[0038] 基于替换逻辑调用搜索算法,其中,搜索算法具体为基于一维搜索的斐波那契算法、二分法或枚举法;

[0039] 采用调用的搜索算法,寻找得到对应的替换插入段;

[0040] 结合坡段类型、限速以及最优巡航速度之间的关系,完成替换过程。

[0041] 进一步地,所述替换插入段的计算公式为:

$$[0042] \quad \begin{cases} \frac{dw(x)}{dx} = \frac{-\varphi(v_{bq}) + \omega(x) \cdot \varphi(v)}{v^3(x)} \\ \frac{dv}{dx} = \frac{u(x) - w_0(v) - g(x) - w_r(x)}{v} \end{cases}$$

$$[0043] \quad \varphi(v) = v^2 \cdot \frac{dw_0(v)}{dv}$$

[0044] 该函数的初始值是能耗近似最优解插入区间起点处的值,其中, $\omega(x)$ 为辅助协态变量, $\varphi(v)$ 为速度的函数;

[0045] 对于某一特定的插入段,评价函数分两种情况进行计算:

[0046] 如果插入段用于保持列车持续运行,则评价函数的一般形式如下所示:

$$E_1(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}, d_{\text{key1}}, \omega_{\text{goal}}) = \begin{cases} N + |v(d_{\text{key}}) - v_{\text{goal}}|, & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) \text{ 不满足相关要求} \\ |\omega(\arg_{d_{\text{key1}} < x} v = v_{\text{goal}}) - \omega_{\text{goal}}|, & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) \text{ 满足相关要求} \\ M + v_{\text{goal}} + d_{\text{key}} - d_{\text{end}}, & \text{if } d_{\text{end}} < d_{\text{key}} \end{cases}$$

[0048] 如果插入段用于列车减速运行,则评价函数的一般形式如下所示:

$$E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = \begin{cases} v(d_{\text{key}}), & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) > v_{\text{goal}} \\ v_{\text{goal}} - v(d_{\text{key}}), & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) \leq v_{\text{goal}} \\ M + d_{\text{key}} - d_{\text{end}}, & \text{if } d_{\text{end}} < d_{\text{key}} \end{cases}$$

[0050] 其中,评价函数的自变量x是插入段的起点,即为状态转换点,N和M分别是两个常数, $0 < N < M$;

[0051] d_{key1} 为关键点的位置,在评价函数 $E_1(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}, d_{\text{key1}}, \omega_{\text{goal}})$ 中,具体为陡坡段的结束点,在评价函数 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}})$ 中,则具体为全力制动工况的终点;

[0052] d_{end} 为插入段的终点, v_{goal} 和 ω_{goal} 在评价函数 $E_1(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}, d_{\text{key1}}, \omega_{\text{goal}})$ 中具体为插入段终点处的目标速度和目标辅助协态变量,在评价函数 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}})$ 中, v_{goal} 则具体为近似最优解 d_{key} 位置的目标减速速度;

[0053] $v(d_{\text{key}})$ 在大下坡路段条件下需满足 $v(d_{\text{key}}) > v_{\text{goal}}$ 、在大上坡路段条件下需满足 $v(d_{\text{key}}) < v_{\text{goal}}$;

[0054] $w(\arg_{d_{\text{key1}} < x} v = v_{\text{goal}})$ 为在 d_{key1} 点之后辅助伴随变量在插入段速度等于 v_{goal} 的位置的值。

[0055] 进一步地,所述替换过程具体包括以下步骤:

[0056] S51、如果坡段类型为大上坡,则执行步骤S52;

[0057] 如果坡段类型为大下坡,且 $\bar{V} \leq v_{bq} < v_{bz}$,则执行步骤S53;

[0058] 如果坡段类型为大下坡,且 $v_{bq} \leq \bar{V} < v_{bz}$,则执行步骤S54;

[0059] 如果坡段类型为大下坡,且 $v_{bq} < v_{bz} \leq \bar{V}$,则执行步骤S55;

[0060] 如果坡段类型为缓坡,则执行步骤S56;

[0061] S52、当前坡段为大上坡,如果 $v_{bq} < \bar{V}$,则执行步骤S521,否则执行步骤S524;

[0062] S521、如果该分段仅包含全力牵引工况,则执行步骤S522,如果该分段仅包含全力牵引工况和全力制动工况,则执行步骤S523;

[0063] S522、按照全力牵引工况,求解方程 $\min E_1(x, v_{bq}, d_{\text{ESUS}}, d_{\text{ESUS}}, 1) = 0$,得到解 v_1 ;如果 $v_1 \leq \bar{V}$,则 v_1 就是所要寻找的插入段,结束计算;否则的话,从大上坡结束点,以速度 \bar{V} ,分别连接左侧和右侧的近似最优解速度轨迹,得到解 v_2 ,结束计算;

[0064] S523、按照全力牵引工况-惰行工况-全力制动工况的工序,求解方程 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$,得到解 v_3 ,结束计算;

[0065] S524、如果该分段仅包含全力牵引工况,则近似最优解即为最优解,结束计算;如果该分段仅包含全力牵引工况和全力制动工况,按照惰行工况-全力制动工况的工序,求解方程 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$,得到解 v_4 ,结束计算;

[0066] S53、坡段类型为大下坡,如果该分段仅包含制动巡航工况,或仅包含全力牵引工况和制动巡航工况,则执行步骤S531;

[0067] 如果该分段仅包含全力牵引工况,近似最优解在该分段的部分就是最优解;

[0068] 如果该分段仅包含制动巡航工况和全力制动工况,或包含全力牵引工况、制动巡航工况和全力制动工况,则执行步骤S532;

[0069] S531、使用惰行工况,求解方程 $\min E_1(x, \bar{V}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{SSDS}}, \rho)$,得到解 v_1 ;如果 $\omega_{v_1}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$,那么 v_1 就是所寻找的插入段,结束计算;否则在惰行工况结束后,应用制动巡航工况,以获得 v_2 ,此时 v_1 和 v_2 均为插入段,结束计算;

[0070] S532、使用惰行工况,求解方程 $\min E_1(x, \bar{V}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{SSDS}}, \rho)$,得到解 v_3 ;如果

$\omega_{v_3}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$,则进一步以惰行工况-全力制动工况的工序寻找方程 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$ 的解,记作 v_4 ,结束计算;否则在惰行工况结束后,使用制动巡航工况,得到 v_5 ,按照惰行工况-全力制动工况的工序,寻找方程 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$ 的解,记为 v_6 ,结束计算;

[0071] S54、坡段类型为大下坡,如果该分段仅包含制动巡航工况,或全力牵引工况和制动巡航工况,则执行步骤S541;

[0072] 如果该分段仅包含全力牵引工况,近似最优解在该分段的部分就是最优解;

[0073] 如果该分段仅包含制动巡航工况、制动巡航工况和全力制动工况,则执行步骤S542;

[0074] S541、使用惰行工况,求解方程 $\min E_1(x, v_{\text{bq}}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{ESDS}}, 1) = 0$,得到解 v_1 ,如果存在

$v_1 > \bar{V}$,同时应用惰行工况求解方程 $\min E_1(x, \bar{V}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{SSDS}}, \rho)$ 得到解 v_2 ,所对应的

伴随变量如果有 $\omega_{v_2}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$,那么使用惰行工况,从大下坡结束点开始,以速度

\bar{V} ,分别连接左侧和右侧的速度轨迹,得到解 v_3 ,否则在前期使用惰性工况的基础上,使用部分制动工况,得到解 v_4 ,而后使用惰行工况,从大下坡结束点,以速度

\bar{V} ,分别连接左侧

和右侧的速度轨迹,从而得到最终的替换轨迹;如果 $v_1 \leq \bar{V}$,近似最优解在该分段的部分

就是最优解;

[0075] S542、使用惰行工况,求解方程 $\min E_1(x, v_{\text{bq}}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{ESDS}}, 1) = 0$,得到解 v_1 ,如果所对

应的伴随变量 $\omega_{v_1}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$,那么按照惰行工况-全力制动的工序求解方程 E_2

$(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$, 得到解 v_7 ; 否则使用制动巡航工况得到解 v_8 , 按照惰行工况-全力制动的工序求解方程 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$, 得到解 v_9 ;

[0076] S55、坡段类型为大下坡, 如果该分段仅包含制动巡航工况, 或仅包含全力牵引工况和制动巡航工况, 则执行步骤S551;

[0077] 如果该分段仅包含全力牵引工况, 近似最优解在该分段的部分就是最优解;

[0078] 如果该分段仅包含制动巡航工况和全力制动工况, 或包含全力牵引工况、制动巡航工况和全力制动工况, 则执行步骤S552;

[0079] S551、使用惰行工况, 求解方程 $\min E_1(x, v_{\text{bq}}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{ESDS}}, 1) = 0$, 得到解 v_1 ; 若 $v_1 \leq v_{\text{bz}}$, v_1 即为所寻找的插入段, 否则求解方程 $\min E_1(x, v_{\text{bz}}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{SSDS}}, \rho)$, 得到解 v_2 , 所对应的协态变量如果满足 $\omega_{v_2}(\arg_x v = v_{\text{bq}}) > \rho$, 那么 v_1 就是插入段, 否则使用制动巡航工况得到 v_3 , 并应用惰行工况, 同时求解方程 $\min E_1(x, v_{\text{bq}}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{ESDS}}, 1)$ 得到解 v_4 , 如果 $v_4 > \bar{V}$, 那么使用惰行工况, 从大下坡结束点, 以速度 \bar{V} , 连接左侧的速度轨迹和右侧的速度轨迹, 从而得到插入段的轨迹, 否则将 v_2 、 v_3 和 v_4 合并就是插入段的轨迹;

[0080] S552、使用惰行工况, 如果方程 $\min E_1(x, v_{\text{bz}}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{SSDS}}, \rho)$ 的最小值为0, 得到解 v_6 , 那么接下来将使用部分制动工况, 从而得到轨迹 v_7 , 按照惰行工况-全力制动工况的工序, 寻找方程 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$ 的解 v_8 , 轨迹 v_6 、 v_7 和 v_8 构成了插入段; 如果方程 $\min E_1(x, v_{\text{bz}}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{SSDS}}, \rho)$ 的最小值不为0, 那么按照惰行工况-全力制动工况的工序, 寻找方程 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$ 的解 v_9 , 则 v_9 构成了插入段。

[0081] 进一步地, 所述步骤S2中最优驾驶工况集合以及步骤S5中搜索替换算法均是基于带有状态变量约束的极大值原理进行的, 具体过程为:

[0082] 构建列车动力学模型如下所示:

$$[0083] \quad \frac{dt}{dx} = \frac{1}{v}$$

$$[0084] \quad \frac{dv}{dx} = \frac{u(x) - w_0(v) - g(x) - w_r(x)}{v}$$

[0085] 列车目标方程如下所示:

$$[0086] \quad \min J(u) = \int_{x_0}^{x_f} \left(\frac{|u| + u}{2} + \rho \cdot \frac{u - |u|}{2} \right) dx$$

[0087] 根据带有状态变量约束的极大值原理, 哈密顿函数如下所示:

$$[0088] \quad \mathcal{H} = - \left(\frac{|u| + u}{2} + \rho \cdot \frac{u - |u|}{2} \right) + \frac{\lambda_1(x)}{v} + \lambda_2(x) \cdot \frac{u(x) - w_0(v) - g(x) - w_r(x)}{v}$$

[0089] 其中, λ_1 和 λ_2 为协态变量;

[0090] 拉格朗日方程如下所示:

$$[0091] \quad \mathcal{L} = \mathcal{H} + \mu_1(x) \cdot [u - \underline{U}(v)] + \mu_2(x) \cdot [-u + \bar{U}(v)] \\ + \sigma(x) \cdot [-v + \bar{V}(x)]$$

$$[0092] \quad \mu_1(x) \geq 0, \quad \mu_1(x) \cdot [u^*(x) - \bar{U}(v^*)] = 0$$

$$[0093] \quad \mu_2(x) \geq 0, \mu_2(x) \cdot [-u^*(x) + \underline{U}(v^*)] = 0$$

$$[0094] \quad \sigma(x) \geq 0, \quad \sigma(x) \cdot [-v^*(x) + \bar{V}(x)] = 0$$

[0095] 其中, μ_1 、 μ_2 和 σ 分别为乘子;

[0096] 为了使哈密顿函数最大化, 拉格朗日方程对控制的偏导数等于 0, 即:

$$[0097] \quad L_u^*(x) = - \left(\frac{\text{sgn}(u^*) + 1}{2} + \rho \cdot \frac{1 - \text{sgn}(u^*)}{2} \right) \\ + \lambda_2(x) \cdot \frac{1}{v^*} + \mu_1(x) - \mu_2(x) = 0$$

[0098] 拉格朗日方程的正则方程如下所示:

$$[0099] \quad \frac{d\lambda_1(x)}{dx} = -L_t^*(x) \longrightarrow \frac{d\lambda_1(x)}{dx} = 0$$

$$[0100] \quad \frac{d\lambda_2(x)}{dx} = -L_v^*(x) \longrightarrow \frac{d\lambda_2(x)}{dx} = -\frac{\partial \mathcal{H}^*}{\partial v} + \sigma(x)$$

[0101] 牵引巡航速度由最优牵引巡航速度 v_{bq} 和限速 \bar{V} 的较小值决定, 制动巡航速度为最优制动巡航速度 v_{bz} 和限速 \bar{V} 的较小值决定, 最优牵引巡航速度 v_{bq} 和最优制动巡航速度 v_{bz} 的关系为:

$$[0102] \quad \rho = \frac{\varphi(v_{bq})}{\varphi(v_{bz})}$$

[0103] 得到五种最优控制工况, 最优驾驶工况的切换规则由辅助协态变量 ω 决定:

$$[0104] \quad \omega(x) = \frac{\lambda_2(x)}{v(x)}$$

[0105] 当牵引巡航使用的时候, $\omega(x) = 1$, 同时 $d\omega(x)/dx = 0$ 成立, 通过求解微分方程组, 得到:

$$[0106] \quad 0 = \lambda_1 + \varphi(v) + v^2(x) \cdot \sigma(x)$$

[0107] 当 $v(x) < \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) = 0$ 恒成立, 因此 $\varphi(v) = -\lambda_1$ 有唯一解 v_{bq} , 该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(v_{bq}) + g(x) + w_r(x)$;

[0108] 当 $v(x) = \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) \geq 0$ 恒成立, 因此 $\varphi(v) = -\lambda_1 - v^2(x) \cdot \sigma(x)$ 有唯

一解 $\bar{V}(x)$, 该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(v_{bq}) + g(x) + w_r(x)$;

[0109] 当使用制动巡航时, $\omega(x) = \rho$, 同时 $d\omega(x)/dx = 0$ 成立, 通过求解微分方程组, 得到:

$$[0110] \quad 0 = \lambda_1 + \rho \cdot \varphi(v) + v^2(x) \cdot \sigma(x)$$

[0111] 当 $v(x) < \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) = 0$ 恒成立, 因此 $\varphi(v) = -\lambda_1/\rho$ 有唯一解 v_{bz} , 该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(v_{bz}) + g(x) + w_r(x)$;

[0112] 当 $v(x) = \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) \geq 0$ 恒成立, 则 $\varphi(v) = -\lambda_1/\rho - v^2(x) \cdot \sigma(x)/\rho$ 有唯一解 $\bar{V}(x)$, 该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(\bar{V}) + g(x) + w_r(x)$;

[0113] 对协态变量非连续性条件进行分析, 跳跃条件如下所示:

$$[0114] \quad \lambda_1(\tau^-) = \lambda_1(\tau^+) + \eta(\tau) \cdot h_t^*(\tau) \rightarrow \lambda_1(\tau^-) = \lambda_1(\tau^+)$$

$$[0115] \quad \lambda_2(\tau^-) = \lambda_2(\tau^+) + \eta(\tau) \cdot h_v^*(\tau) \rightarrow \lambda_2(\tau^-) = \lambda_2(\tau^+) - \eta(\tau)$$

$$[0116] \quad \mathcal{H}^*(\tau^-) = \mathcal{H}^*(\tau^+) - \eta(\tau) \cdot \left(-\frac{dv^*}{dx} + \frac{d\bar{V}}{dx} \right) \Big|_{x=\tau}$$

$$[0117] \quad \eta(\tau) \geq 0, \quad \eta(\tau) \cdot [-v^*(\tau) + \bar{V}(\tau)] = 0$$

[0118] 通过分析可知协调变量 λ_2 和辅助协态变量 ω 只能在到达限速或离开限速的位置向上跳跃, 即: $\lambda_2(\tau^-) \leq \lambda_2(\tau^+)$;

[0119] 在到达限速位置 τ 左右两侧都使用惰行工况的前提下, 如果协态变量发生跳变 $\lambda_2(\tau^-) < \lambda_2(\tau^+)$, 这也意味着 $\omega(\tau^-) < \omega(\tau^+)$, 那么该位置一定位于大下坡结束点;

[0120] 在到达限速位置 τ 左右两侧都使用全力牵引工况的前提下, 如果协态变量发生跳变 $\lambda_2(\tau^-) < \lambda_2(\tau^+)$, 这也意味着 $\omega(\tau^-) < \omega(\tau^+)$, 那么该位置一定位于大上坡开始点;

[0121] 此外, 在到达限速位置 τ 左右两侧控制工况输出极限相等的前提下, 如果协态变量发生跳变 $\lambda_2(\tau^-) < \lambda_2(\tau^+)$, 这也意味着 $\omega(\tau^-) < \omega_2(\tau^+)$, 那么该位置两侧控制输出的极限一定为0, 且该点一定位于大下坡结束点或者该位置两侧控制输出的极限一定为 \bar{U} , 且该点一定为大上坡开始点。

[0122] 进一步地, 所述五种最优控制工况具体为:

[0123] 全力牵引工况, 其控制输出为 $u(x) = \bar{U}$, 其辅助协态变量为 $\omega(x) > 1$;

[0124] 牵引巡航工况, 其控制输出为 $u(x) \in [0, \bar{U}]$, 其辅助协态变量为 $\omega(x) = 1$;

[0125] 惰行工况, 其控制输出为 $u(x) = 0$, 其辅助协态变量为 $\rho < \omega(x) < 1$;

[0126] 制动巡航工况, 其控制输出为 $u(x) \in [U, 0]$, 其辅助协态变量为 $\rho = \omega(x)$;

[0127] 全力制动工况, 其控制输出为 $u(x) = \underline{U}$, 其辅助协态变量为 $\omega(x) < \rho$ 。

[0128] 与现有技术相比, 本发明针对在具有陡峭坡度和限速的轨道上行驶的高速列车,

特别是在已经达到限速的情况下,提出一种行驶速度轨迹控制方法,以实现预先对速度轨迹进行规划生成,通过分析受状态约束的极大值原理的跳跃条件,导出了陡峭轨道上达到限速点处新的最优切换规则,由此设计了一种高速列车两步算法,包括最优巡航最小时间算法和搜索替换算法,分别求解考虑时间-能量和空间-能量转换的动力学模型,能够在伴随变量间断情况下快速有效地对列车速度轨迹进行最优控制,不再受到协态变量必须连续的限制,既规避了超速风险,同时保证了整体能耗最小。

附图说明

- [0129] 图1为本发明的方法流程示意图;
 [0130] 图2为本发明中行驶速度轨迹的计算生成过程示意图;
 [0131] 图3为实施例中局部应用本发明方法后的效果示意图;
 [0132] 图4为实施例中在完整线路上应用本发明方法后的效果示意图。

具体实施方式

- [0133] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。
 [0134] 实施例
 [0135] 如图1所示,一种交通节能安全运行轨迹规划控制方法,包括以下步骤:
 [0136] S1、根据预设的时刻表估算最优牵引巡航速度;
 [0137] S2、利用最优巡航最小时间算法生成能耗近似最优解,该能耗近似最优解对应应有近似最优运行轨迹点;
 [0138] S3、判断步骤S2计算结果对应的列车运行时间是否满足时刻表,若满足,则执行S5,否则执行S4;
 [0139] S4、根据S3中列车运行时间和时刻表的时间误差,对最优牵引巡航速度进行迭代更新,之后返回执行S2;
 [0140] S5、利用搜索替换算法对能耗近似最优解进行进一步优化;
 [0141] S6、判断步骤S5计算结果对应的列车运行时间是否满足时刻表,若满足,则结束计算,以当前能耗近似最优解对应的近似最优运行轨迹点作为最优运行轨迹点,否则根据S5计算结果对应的列车运行时间与时刻表的时间误差,重新估算最优牵引巡航速度,再返回依次执行S2和S5;
 [0142] S7、将计算得到的所有最优运行轨迹点连线生成列车运行轨迹,控制列车按照该列车运行轨迹行驶。
 [0143] 其中,步骤S1~S6具体生成速度轨迹的过程如图2所示,步骤S1中根据时刻表估算 v_{bq} 的具体计算公式为:

$$[0144] \quad v_{bq_1} = \frac{x_f - x_0}{t(x_f) - t(x_0)}$$

[0145] 式中, x_f 为线路终点所在的位置, x_0 为线路起点所在的位置, $t(x_0)$ 和 $t(x_f)$ 分别为时刻表所要求的出发时间和到达时间。

[0146] 步骤S2中利用最优巡航最小时间算法生成最优速度轨迹对应能耗近似最优解的具体计算过程为:

[0147] S21、假设能量回收率 ρ 等于1,则此时最优驾驶工况集合仅包含全力牵引工况、牵引巡航工况、制动巡航工况和全力制动工况,同时,最优牵引巡航速度 v_{bq} 和最优制动巡航速度 v_{bz} 相等;

[0148] S22、目标巡航速度具体为牵引巡航速度和限速的较小值:

$$[0149] \quad v_{target}(x) = \min \{ v_{bq}, \bar{V}(x) \}$$

[0150] 相同的目标巡航速度被划分为同一分段,分段目标速度用 v_{target_i} 进行标记,依据分段目标速度,将线路划分为大上坡、大下坡和缓坡,其中大上坡的定义为:使用全力牵引工况,列车的速度仍然下降的坡段,该部分的坡段可以用以下式子进行定义:

$$[0151] \quad \bar{U}(v) - w_0(v) - w_r(x) - g(x) < 0$$

[0152] 大下坡的定义为:使用惰行工况,列车速度仍然上升的坡段,该部分的坡段可以用以下式子进行定义:

$$[0153] \quad -w_0(v) - w_r(x) - g(x) > 0$$

[0154] 除大上坡和大下坡以外的其余部分均为缓坡。上式中, $\bar{U}(v)$ 为全力牵引最大输出, $w_0(v)$ 为基本阻力, $w_r(x)$ 为弯道阻力, $g(x)$ 为坡道阻力。

[0155] S23、在能量回收效率为1的假设前提下,应用化简的节能驾驶策略,快速获得近似最优解,具体流程如下:

[0156] S231、按照行驶顺序,依次进行速度轨迹计算,根据步骤S22的划分结果,如果当前分段为大下坡,则执行步骤S232,如果是缓坡,则执行步骤S233,如果是大上坡,则执行步骤S234;

[0157] S232、在本分段(大下坡)内使用全力牵引工况,得到预计算速度轨迹 v_{prec} ,如果存在部分子区段预计算速度轨迹 v_{prec} 大于i分段的目标速度 $v_{prec} > v_{target_i}$,则对超过的子区段采用制动巡航工况驾驶,否则的话,预计算速度轨迹就是预计算的结果,并执行步骤S235;

[0158] S233、在本分段(缓坡)内使用全力牵引工况,得到预计算速度轨迹 v_{prec} ,如果存在部分子区段预计算速度轨迹 v_{prec} 大于i分段的目标速度 $v_{prec} > v_{target_i}$,则对超过的子区段采用牵引巡航工况驾驶,否则的话,预计算速度轨迹就是预计算的结果,并执行步骤S235;

[0159] S234、在本分段(大上坡)内使用全力牵引工况,得到预计算速度轨迹 v_{prec} 就是预计算的结果,并执行步骤S235;

[0160] S235、将预计算结果和本段之前所有的i-1段进行合并,得到速度过渡轨迹 v_{temp} ;

[0161] S236、如果速度过渡轨迹 v_{temp} 在本段结束点的速度 $v_{temp_{end}}$ 大于i+1分段的分段目标速度 $v_{target_{i+1}}$,则从本段的结束点开始,以全力制动工况,反向计算速度轨迹 v_{back} ,寻找反向计算速度轨迹和预计算得到的速度轨迹 v_{prec} 的首个交点,保留交点左侧预计算得到的速度轨迹和交点右侧反向计算得到的速度轨迹,由此,得到前i个分段的解;如果速度过渡轨迹 v_{temp} 在本段结束点的速度 $v_{temp_{end}}$ 小于i+1分段的分段目标速度 $v_{target_{i+1}}$,则预计算的结果就是前i个分段的解。

[0162] S24、上述结果计算结束以后,生成相应的切入协态变量,应用全力制动部分所对应的切入协态变量定义为0,其余部分均定义为1。

[0163] 步骤S4具体是根据S3的计算结果与时刻表的误差,对最优牵引巡航速度 v_{bq} 进行迭代更新,具体计算过程为:

$$[0164] \quad v_{bq_{k+1}} = \left[1 + \gamma + \xi \cdot \frac{t_{r_k} - (t(x_f) - t(x_0))}{t(x_f) - t(x_0)} \right] \cdot v_{bq_k}$$

[0165] 式中, γ 为偏移因子, ξ 为缩放因子, t_{r_k} 为第k次迭代的列车运行计算时间, v_{bq_k} 为第k次迭代的列车牵引巡航速度。

[0166] 步骤S5则利用搜索替换算法对近似最优解进行进一步优化,该步骤包括基于替换逻辑调用搜索算法,具体过程为:

[0167] 搜索算法可以基于一维搜索中的任意一种算法,例如斐波那契算法、二分法和枚举法等,搜索算法的目的是寻找到对应的替换段,从而使得速度轨迹满足极大值原理最优结果的必要性推论,因此,所对应的插入段的计算方程为:

$$[0168] \quad \begin{cases} \frac{d\omega(x)}{dx} = \frac{-\varphi(v_{bq}) + \omega(x) \cdot \varphi(v)}{v^3(x)} \\ \frac{dv}{dx} = \frac{u(x) - w_0(v) - g(x) - w_r(x)}{v} \end{cases}$$

[0169] 该函数的初始值是近似最优解插入区间起点处的值,式中, $\omega(x)$ 为辅助协态变量, $\varphi(v)$ 为速度的函数,具体形式如下:

$$[0170] \quad \varphi(v) = v^2 \cdot \frac{dw_0(v)}{dv}$$

[0171] 对于某一特定的插入段,评价函数分两种情况进行计算。如果插入段用于保持列车持续运行,则评价函数的一般形式如下所示:

$$[0172] \quad E_1(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}, d_{\text{key1}}, \omega_{\text{goal}}) = \begin{cases} N + |v(d_{\text{key}}) - v_{\text{goal}}|, & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) \text{ 不满足相关要求} \\ |\omega(\arg_{d_{\text{key1}} < x} v = v_{\text{goal}}) - \omega_{\text{goal}}|, & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) \text{ 满足相关要求} \\ M + v_{\text{goal}} + d_{\text{key}} - d_{\text{end}}, & \text{if } d_{\text{end}} < d_{\text{key}} \end{cases}$$

[0173] 如果插入段用于列车减速运行,则评价函数的一般形式如下所示:

$$[0174] \quad E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = \begin{cases} v(d_{\text{key}}), & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) > v_{\text{goal}} \\ v_{\text{goal}} - v(d_{\text{key}}), & \text{if } d_{\text{end}} \geq d_{\text{key}}, v(d_{\text{key}}) \leq v_{\text{goal}} \\ M + d_{\text{key}} - d_{\text{end}}, & \text{if } d_{\text{end}} < d_{\text{key}} \end{cases}$$

[0175] 其中,评价函数的自变量x是插入段的起点,也是状态转换点;

[0176] N和M是两个常数, $0 < N \ll M$;

[0177] d_{key1} 是关键点的位置,在评价函数 $E_1(x, v_{goal}, d_{key}, d_{key1}, \omega_{goal})$ 中,通常是陡坡段的结束点,在评价函数 $E_2(x, v_{goal}, d_{key})$ 中,通常是全力制动工况的终点 (EFBM); d_{end} 是插入段的终点, v_{goal} 和 ω_{goal} 则在评价函数 $E_1(x, v_{goal}, d_{key}, d_{key1}, \omega_{goal})$ 中是插入段终点处的目标速度和目标辅助协态变量,而评价函数 $E_2(x, v_{goal}, d_{key})$ 中的 v_{goal} 是近似最优解 d_{key} 位置的目标减速速度; $v(d_{key})$ 的相关要求具体指在大下坡段需满足 $v(d_{key}) > v_{goal}$ 、在大上坡路段需满足 $v(d_{key}) < v_{goal}$; $w(\arg_{d_{key1} < x} v = v_{goal})$ 是在 d_{key1} 点之后辅助伴随变量在插入段速度等于 v_{goal} 的位置的值。

[0178] 替换过程的具体实施流程需要结合坡道类型以及限速和最优巡航速度间的关系,具体计算步骤如下:

[0179] S51、如果坡道类型为大上坡,则执行步骤S52;如果坡道类型为大下坡,且 $\bar{V} \leq v_{bq} < v_{bz}$, 则执行步骤S53;如果坡道类型为大下坡,且 $v_{bq} \leq \bar{V} < v_{bz}$, 则执行步骤S54;如果坡道类型为大下坡,且 $v_{bq} < v_{bz} \leq \bar{V}$, 则执行步骤S55;如果坡道类型为缓坡,则执行步骤S56;

[0180] S52、当前坡道为大上坡,如果 $v_{bq} < \bar{V}$, 则执行步骤S521, 否则执行步骤S524;

[0181] S521、如果该分段仅包含全力牵引工况则执行步骤S522, 如果该分段仅包含全力牵引工况和全力制动工况则执行步骤S523;

[0182] S522、按照全力牵引工况,求解方程 $\min E_1(x, v_{bq}, d_{ESUS}, d_{ESUS}, 1) = 0$, 解记作 v_1 ; 如果 $v_1 \leq \bar{V}$, 则 v_1 就是所要寻找的插入段, 结束计算; 否则的话, 从大上坡结束点 (ESUS), 以速度 \bar{V} , 分别连接左侧和右侧的近似最优解速度轨迹, 解记作 v_2 , 结束计算;

[0183] S523、按照全力牵引工况-惰行工况-全力制动工况的工序, 求解方程 $E_2(x, v_{goal}, d_{key}) = 0$, 解记作 v_3 , 结束计算;

[0184] S524、如果该分段仅包含全力牵引工况, 则近似最优解就是最优解, 结束计算; 如果该分段仅包含全力牵引工况和全力制动工况, 按照惰行工况-全力制动工况的工序, 求解方程 $E_2(x, v_{goal}, d_{key}) = 0$, 解记作 v_4 , 结束计算;

[0185] S53、坡道类型为大下坡, 如果该分段仅包含制动巡航工况, 或仅包含全力牵引工况和制动巡航工况, 则执行步骤S531; 如果该分段仅包含全力牵引工况, 近似最优解在该分段的部分就是最优解; 如果该分段仅包含制动巡航工况和全力制动工况, 或全力牵引工况、制动巡航工况和全力制动工况, 则执行步骤S532;

[0186] S531、使用惰行工况, 求解方程 $\min E_1(x, \bar{V}, d_{ESDS}, d_{SSDS}, \rho)$, 解记作 v_1 ; 如果 $\omega_{v_1}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$, 那么 v_1 就是所寻找的插入段, 结束计算; 否则的话, 应用在惰行工况结束后, 应用制动巡航工况, 以获得 v_2 , 此时 v_1 和 v_2 均为插入段, 结束计算;

[0187] S532、使用惰行工况, 求解方程 $\min E_1(x, \bar{V}, d_{ESDS}, d_{SSDS}, \rho)$, 解记作 v_3 ; 如果

$\omega_{v_3}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$, 则进一步以惰行工况-全力制动工况的工序寻找方程 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$ 的解, 记作 v_4 , 结束计算; 否则的话, 在惰行工况结束后, 使用制动巡航工况, 得到 v_5 ,

按照惰行工况-全力制动工况的工序, 寻找方程 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$ 的解, 记为 v_6 , 结束计算;

[0188] S54、坡道类型为大下坡, 如果该分段仅包含制动巡航工况, 或全力牵引工况和制动巡航工况, 则执行步骤S541; 如果该分段仅包含全力牵引工况, 近似最优解在该分段的部分就是最优解; 如果该分段仅包含制动巡航工况、制动巡航工况和全力制动工况, 则执行步骤S542;

[0189] S541、使用惰行工况, 求解方程 $\min E_1(x, v_{bq}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{ESDS}}, 1) = 0$, 解记作 v_1 , 如果

$v_1 > \bar{V}$, 同时应用惰行工况求解方程 $\min E_1(x, \bar{V}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{SSDS}}, \rho)$ 得到解 v_2 , 所对应的

伴随变量如果有 $\omega_{v_2}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$, 那么使用惰行工况, 从大下坡结束点开始, 以速度

\bar{V} , 分别连接左侧和右侧的速度轨迹, 得到解 v_3 , 否则的话, 在前期使用惰性工况的基础上,

使用部分制动工况, 得到解 v_4 , 而后使用惰行工况, 从大下坡结束点, 以速度 \bar{V} , 分别连

接左侧和右侧的速度轨迹, 从而得到最终的替换轨迹; 如果 $v_1 \leq \bar{V}$, 近似最优解在该分段

的部分就是最优解;

[0190] S542、使用惰行工况, 求解方程 $\min E_1(x, v_{bq}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{ESDS}}, 1) = 0$, 解记作 v_1 , 如果所对

应的伴随变量 $\omega_{v_1}(\arg_x v = \bar{V}) > \rho$, 那么按照惰行工况-全力制动的工序求解方程 E_2

$(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$, 得到解 v_7 ; 否则的话, 使用制动巡航工况得到解 v_8 , 按照惰行工况-全力制动的工序求解方程 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$, 得到解 v_9 ;

[0191] S55、坡道类型为大下坡, 如果该分段仅包含制动巡航工况, 或仅包含全力牵引工况和制动巡航工况, 则执行步骤S551; 如果该分段仅包含全力牵引工况, 近似最优解在该分段的部分就是最优解; 如果该分段仅包含制动巡航工况和全力制动工况, 或全力牵引工况、制动巡航工况和全力制动工况, 则执行步骤S552;

[0192] S551、使用惰行工况, 求解方程 $\min E_1(x, v_{bq}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{ESDS}}, 1) = 0$, 解记作 v_1 ; 如果 $v_1 \leq$

v_{bz} , v_1 就是所寻找的插入段, 否则的话, 求解方程 $\min E_1(x, v_{bz}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{SSDS}}, \rho)$, 得到解 v_2 , 所对

应的协态变量如果满足 $\omega_{v_2}(\arg_x v = v_{bq}) > \rho$, 那么 v_1 就是插入段, 否则的话, 使用制动

巡航工况得到 v_3 , 并应用惰行工况, 求解方程 $\min E_1(x, v_{bq}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{ESDS}}, 1)$ 得到解 v_4 , 如果

$v_4 > \bar{V}$, 那么使用惰性工况, 从大下坡结束点, 以速度 \bar{V} , 连接左侧的速度轨迹和右侧的

速度轨迹, 从而得到插入段的轨迹, 否则的话 v_2 、 v_3 和 v_4 的合并就是插入段的轨迹;

[0193] S552、使用惰行工况, 如果方程 $\min E_1(x, v_{bz}, d_{\text{ESDS}}, d_{\text{SSDS}}, \rho)$ 的最小值为 0, 解记作 v_6 ,

那么接下来将使用部分制动工况, 从而得到轨迹 v_7 , 按照惰行工况-全力制动工况的工序,

寻找方程 $E_2(x, v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$ 的解 v_8 , 轨迹 v_6 、 v_7 和 v_8 构成了插入段; 如果方程 $\min E_1(x, v_{bz},$

$d_{\text{ESDS}}, d_{\text{SSDS}}, \rho)$ 的最小值不为 0, 那么按照惰行工况-全力制动工况的工序, 寻找方程 $E_2(x,$

$v_{\text{goal}}, d_{\text{key}}) = 0$ 的解 v_9 , v_9 构成了插入段。

[0194] 在步骤S2和步骤S5中,最优驾驶工况集合的推导以及搜索替换算法的逻辑是基于带有状态变量约束的极大值原理进行的,具体的推导过程如下:

[0195] 列车的动力学模型如下所示:

$$[0196] \quad \frac{dt}{dx} = \frac{1}{v}$$

$$[0197] \quad \frac{dv}{dx} = \frac{u(x) - w_0(v) - g(x) - w_r(x)}{v}$$

[0198] 目标方程展示如下:

$$[0199] \quad \min J(u) = \int_{x_0}^{x_f} \left(\frac{|u| + u}{2} + \rho \cdot \frac{u - |u|}{2} \right) dx$$

[0200] 根据带有状态变量约束的极大值原理,哈密顿函数如下所示:

$$[0201] \quad \mathcal{H} = - \left(\frac{|u| + u}{2} + \rho \cdot \frac{u - |u|}{2} \right) + \frac{\lambda_1(x)}{v} \\ + \lambda_2(x) \cdot \frac{u(x) - w_0(v) - g(x) - w_r(x)}{v}$$

[0202] 其中, λ_1 和 λ_2 为协态变量。拉格朗日方程如下所示:

$$[0203] \quad \mathcal{L} = \mathcal{H} + \mu_1(x) \cdot [u - \underline{U}(v)] + \mu_2(x) \cdot [-u + \bar{U}(v)] \\ + \sigma(x) \cdot [-v + \bar{V}(x)]$$

$$[0204] \quad \mu_1(x) \geq 0, \quad \mu_1(x) \cdot [u^*(x) - \bar{U}(v^*)] = 0$$

$$[0205] \quad \mu_2(x) \geq 0, \quad \mu_2(x) \cdot [-u^*(x) + \underline{U}(v^*)] = 0$$

$$[0206] \quad \sigma(x) \geq 0, \quad \sigma(x) \cdot [-v^*(x) + \bar{V}(x)] = 0$$

[0207] 其中, μ_1 、 μ_2 和 σ 分别为乘子。

[0208] 为了使哈密顿函数最大化,拉格朗日方程对控制的偏导数等于0,即:

$$[0209] \quad L_u^*(x) = - \left(\frac{\text{sgn}(u^*) + 1}{2} + \rho \cdot \frac{1 - \text{sgn}(u^*)}{2} \right) \\ + \lambda_2(x) \cdot \frac{1}{v^*} + \mu_1(x) - \mu_2(x) = 0$$

[0210] 拉格朗日方程的正则方程如下所示:

$$[0211] \quad \frac{d\lambda_1(x)}{dx} = -L_t^*(x) \longrightarrow \frac{d\lambda_1(x)}{dx} = 0$$

$$[0212] \quad \frac{d\lambda_2(x)}{dx} = -L_v^*(x) \longrightarrow \frac{d\lambda_2(x)}{dx} = -\frac{\partial \mathcal{H}^*}{\partial v} + \sigma(x)$$

[0213] 牵引巡航速度为最优牵引巡航速度 v_{bq} 和限速 \bar{V} 的较小值决定,制动巡航速度为最优制动巡航速度 v_{bz} 和限速 \bar{V} 的较小值决定,最优牵引巡航速度 v_{bq} 和最优制动巡航速度 v_{bz} 的关系为:

$$[0214] \quad \rho = \frac{\varphi(v_{bq})}{\varphi(v_{bz})}$$

[0215] 因此,最优控制工况由五种工况构成,如表1所示。最优驾驶工况的切换规则由辅助协态变量 ω 决定:

$$[0216] \quad \omega(x) = \frac{\lambda_2(x)}{v(x)}$$

[0217] 表1

控制工况	控制输出	辅助协态变量
全力牵引工况	$u(x) = \bar{U}$	$\omega(x) > 1$
牵引巡航工况	$u(x) \in [0, \bar{U}]$	$\omega(x) = 1$
惰行工况	$u(x) = 0$	$\rho < \omega(x) < 1$
制动巡航工况	$u(x) \in [\underline{U}, 0]$	$\rho = \omega(x)$
全力制动工况	$u(x) = \underline{U}$	$\omega(x) < \rho$

[0218] 当牵引巡航使用的时候, $\omega(x) = 1$, 同时 $d\omega(x)/dx = 0$ 成立, 通过求解微分方程组, 得到:

$$[0220] \quad 0 = \lambda_1 + \varphi(v) + v^2(x) \cdot \sigma(x)$$

[0221] 当 $v(x) < \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) = 0$ 恒成立, 因此 $\varphi(v) = -\lambda_1$ 有唯一解 v_{bq} 。该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(v_{bq}) + g(x) + w_r(x)$ 。

[0222] 当 $v(x) = \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) \geq 0$ 恒成立, 因此 $\varphi(v) = -\lambda_1 - v^2(x) \cdot \sigma(x)$ 有唯一解 $\bar{V}(x)$ 。该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(v_{bq}) + g(x) + w_r(x)$ 。

[0223] 当使用制动巡航时, $\omega(x) = \rho$, 同时 $d\omega(x)/dx = 0$ 成立, 通过求解微分方程组, 得到:

$$[0224] \quad 0 = \lambda_1 + \rho \cdot \varphi(v) + v^2(x) \cdot \sigma(x)$$

[0225] 当 $v(x) < \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) = 0$ 恒成立, 因此 $\varphi(v) = -\lambda_1/\rho$ 有唯一解 v_{bz} 。该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(v_{bz}) + g(x) + w_r(x)$ 。

[0226] 当 $v(x) = \bar{V}(x)$ 时, $\sigma(x) \geq 0$ 恒成立, 则 $\varphi(v) = -\lambda_1/\rho - v^2(x) \cdot \sigma(x)/\rho$ 有

唯一解 $\bar{V}(x)$ 。该情况下控制输出为 $u(x) = w_0(\bar{V}) + g(x) + w_r(x)$ 。

[0227] 对协态变量非连续性条件进行分析,跳跃条件展示如下:

$$[0228] \quad \lambda_1(\tau^-) = \lambda_1(\tau^+) + \eta(\tau) \cdot h_t^*(\tau) \rightarrow \lambda_1(\tau^-) = \lambda_1(\tau^+)$$

$$[0229] \quad \lambda_2(\tau^-) = \lambda_2(\tau^+) + \eta(\tau) \cdot h_v^*(\tau) \rightarrow \lambda_2(\tau^-) = \lambda_2(\tau^+) - \eta(\tau)$$

$$[0230] \quad \mathcal{H}^*(\tau^-) = \mathcal{H}^*(\tau^+) - \eta(\tau) \cdot \left(-\frac{dv^*}{dx} + \frac{d\bar{V}}{dx} \right) \Big|_{x=\tau}$$

$$[0231] \quad \eta(\tau) \geq 0, \quad \eta(\tau) \cdot [-v^*(\tau) + \bar{V}(\tau)] = 0$$

[0232] 通过分析可知协调变量 λ_2 和辅助协态变量 ω 只能在到达限速或离开限速的位置向上跳跃,即: $\lambda_2(\tau^-) \leq \lambda_2(\tau^+)$ 。

[0233] 在到达限速位置 τ 左右两侧都使用惰行工况的前提下,如果协态变量发生跳变 $\lambda_2(\tau^-) < \lambda_2(\tau^+)$,这也意味着 $\omega(\tau^-) < \omega(\tau^+)$,那么该位置一定位于大下坡结束点(ESDS)。在到达限速位置 τ 左右两侧都使用全力牵引工况的前提下,如果协态变量发生跳变 $\lambda_2(\tau^-) < \lambda_2(\tau^+)$,这也意味着 $\omega(\tau^-) < \omega(\tau^+)$,那么该位置一定位于大上坡开始点(SSDS)。

[0234] 另有,在到达限速位置 τ 左右两侧控制工况输出极限相等的前提下,如果协态变量发生跳变 $\lambda_2(\tau^-) < \lambda_2(\tau^+)$,这也意味着 $\omega(\tau^-) < \omega_2(\tau^+)$,那么该位置两侧控制输出的极限一定为0,且该点一定位于大下坡结束点(ESDS)或者该位置两侧控制输出的极限一定为 \bar{U} ,且该点一定为大上坡开始点(SSDS)。

[0235] 本实施例将上述方法在局部区域进行应用,如图3所示(横坐标为位置,纵坐标由下往上依次为协态变量和速度),高速列车计划通过图中大下坡路段bc。在两步法的第一步中假设 $\rho=1$,得到最优巡航速度,如图3中连续实线表示。大下坡路段bc由当前的运行速度 v_{bq} 决定。在陡坡段,由于 $v_{bq} < \bar{V} < v_{bz}$,在步骤S51执行完毕后,执行步骤S54,最终的计算结果如图3中虚线段表示。

[0236] 本实施例进一步将上述方法应用于完整线路,如图4a~4c所示(横坐标均为位置,图4a中纵坐标为辅助协态变量,图4b中纵坐标为速度,图4c中纵坐标为轨道海拔高度),高速列车在通过陡坡路段,为了避免超速,需要严格地控制工况切换点,使得列车实现以较少的能耗完成规定的运输任务。

[0237] 综上所述,本发明针对高速列车在陡坡和限速轨道上运行,特别是在节能运行过程中达到限速的情况,提出了一种速度轨迹控制方法。与以往经典的极大值原理中伴随变量是连续的研究不同,本发明解决了陡坡段达到限速导致伴随变量不连续情况下的求解问题。通过对跳跃条件的分析,导出了陡坡路径中达到限速点的最优切换规则和切换位置。基于上述规则,提出了一种新的控制切换规则,由此能够综合利用动态限速、调度、陡坡和列车运行规则等信息,以设计一种新的两步算法:在第一步中,设计了最优巡航最小时间算法,从时间能量转换的角度获得近似最优解;第二步则应用搜索一替换算法从空间能量转换的角度调整近似最优解。

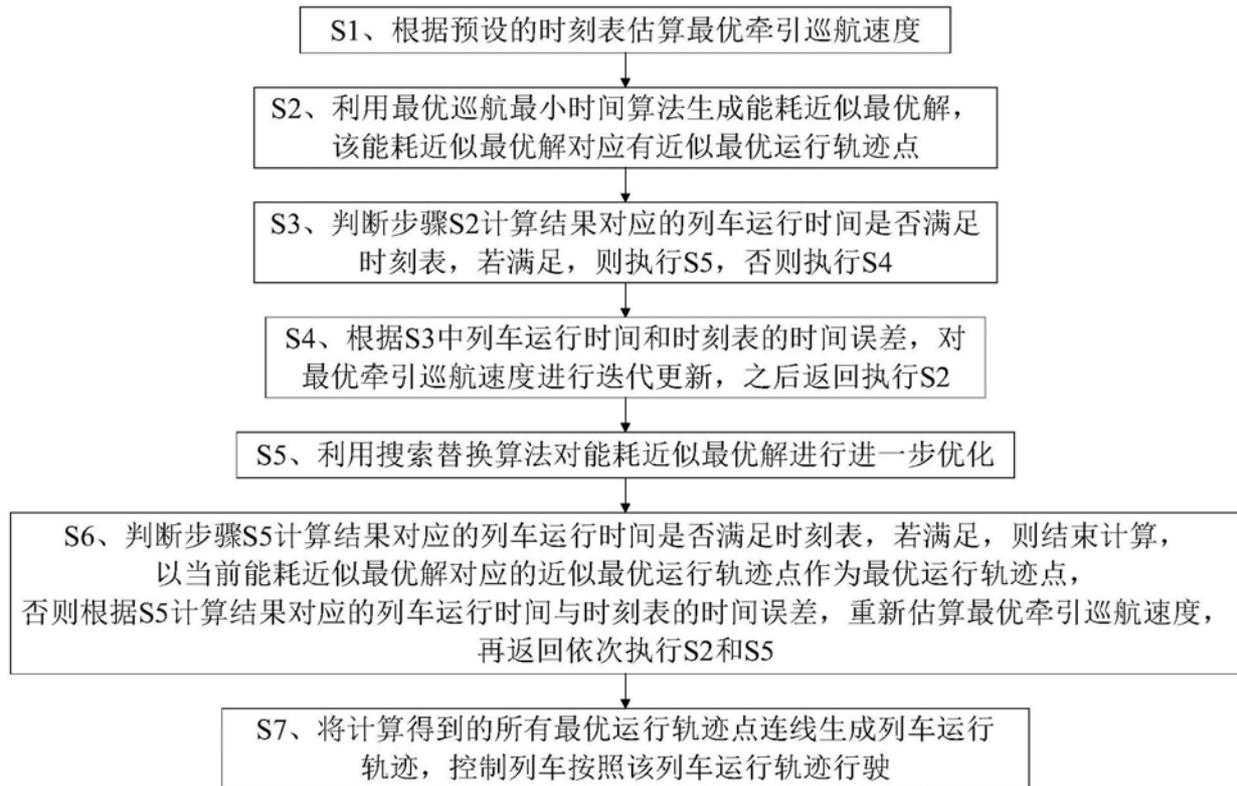


图1

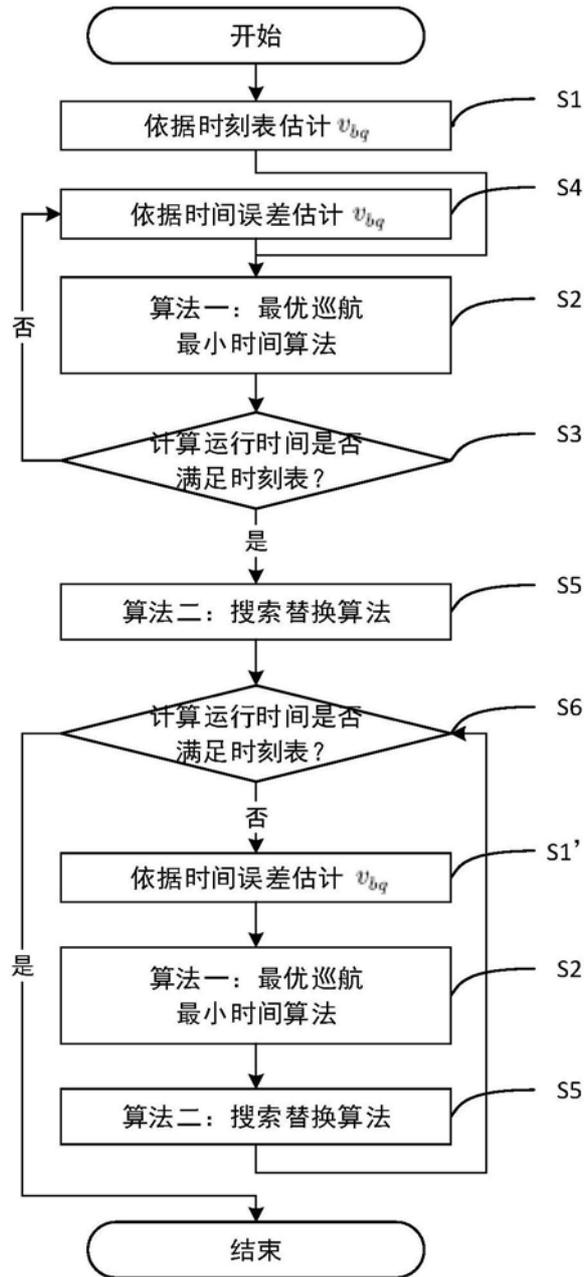


图2

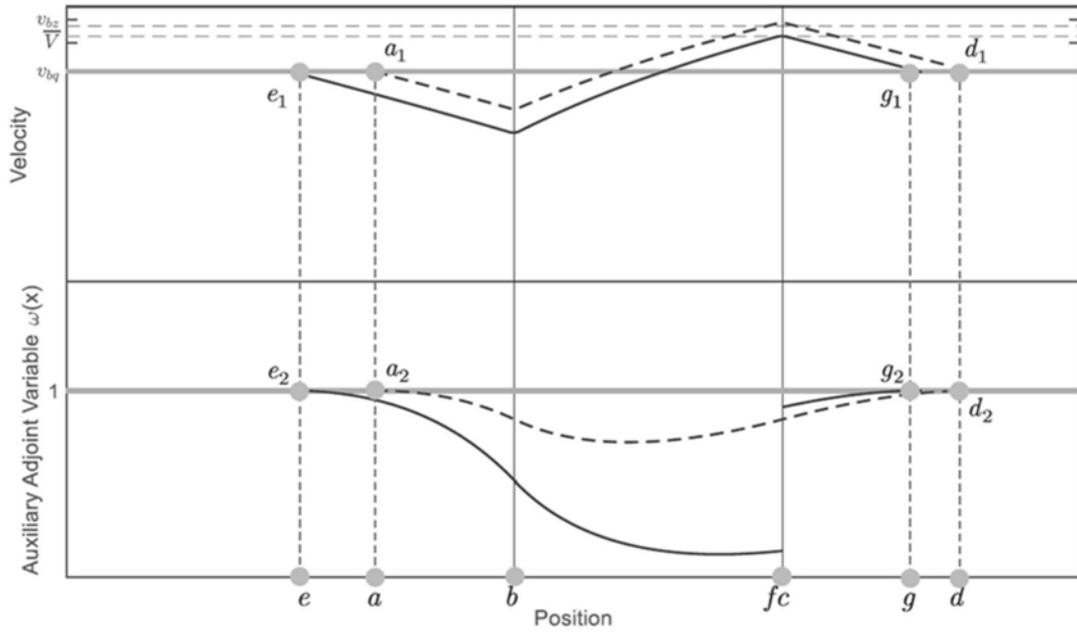


图3

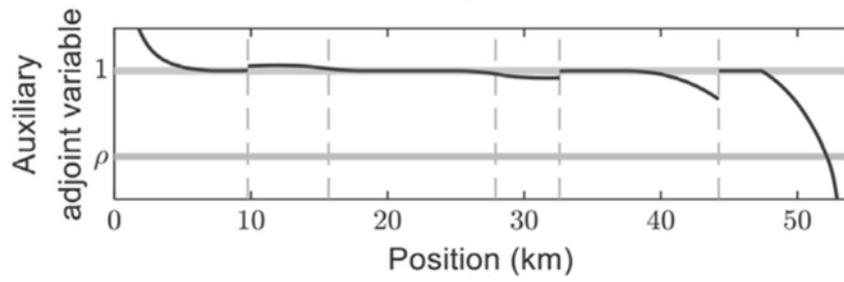


图4a

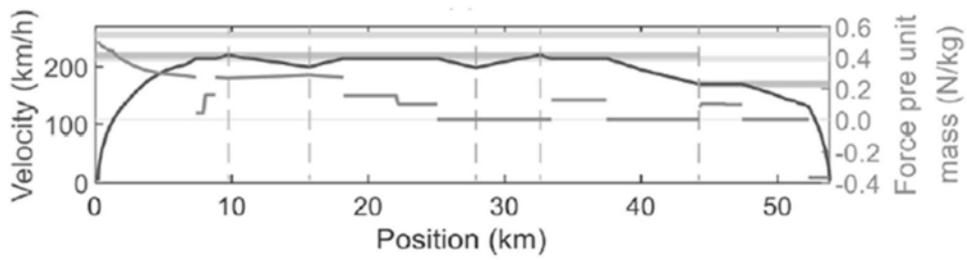


图4b

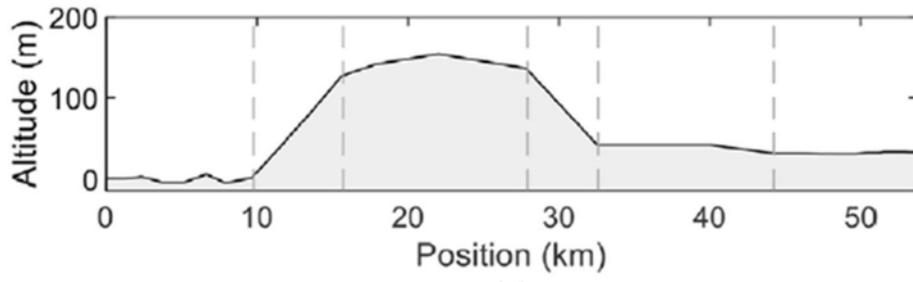


图4c