



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109815536 B

(45) 授权公告日 2020. 10. 30

(21) 申请号 201811552039.9

G06Q 50/26 (2012.01)

(22) 申请日 2018.12.19

G06F 111/06 (2020.01)

G06F 111/04 (2020.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109815536 A

审查员 王宇莉

(43) 申请公布日 2019.05.28

(73) 专利权人 西南交通大学

地址 610031 四川省成都市高新区西部园  
区西南交通大学

(72) 发明人 孙鹏飞 金波 王青元 陈默

王晓文 郭金松

(74) 专利代理机构 成都方圆聿联专利代理事务

所(普通合伙) 51241

代理人 李鹏

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

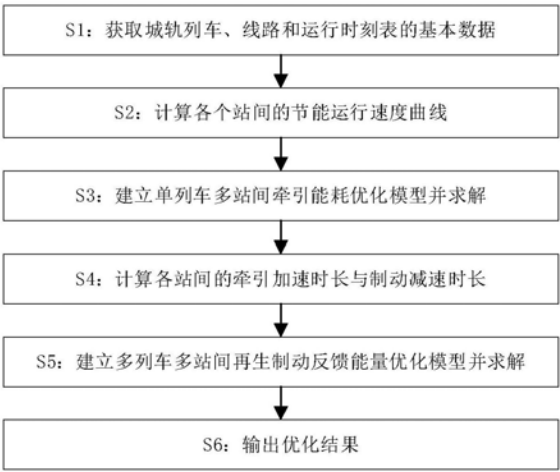
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

城市轨道交通节能时刻表和运行曲线优化  
方法

(57) 摘要

本发明的领域涉及城市交通优化技术领域，更具体地，涉及城市轨道交通节能时刻表和运行曲线优化方法，S1：获取城轨列车、城轨线路、城轨运营时刻表的基本数据；S2：针对单列车在单个站间的运行过程，得到每个站间不同运行时间下的节能运行速度曲线；S3：针对单列车在多个站间的运行过程，获取节能区间运行时间分配方案以及对应的速度曲线；S4：计算S3中得到的每个站间速度曲线的牵引加速时长与制动减速时长；S5：针对多列车在多个站间的运行过程，获取节能的发车间隔与停站时间；S6：输出优化结果。本发明节能运行速度曲线计算时间短，误差小；降低多站间牵引能耗，提高再生制动反馈能量利用率。



1.城市轨道交通节能时刻表和运行曲线优化方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1:获取城轨列车的基本数据、城轨线路的基本数据、城轨运营时刻表的基本数据;

S2:针对单列车在单个站间的运行过程,以站间运行牵引能耗最小为目标,通过优化运行速度曲线,得到每个站间不同运行时间下的节能运行速度曲线;

S3:针对单列车在多个站间的运行过程,以多站间总运行牵引能耗最小为目标,依据S2的结果,通过优化站间运行时间,获取节能区间运行时间分配方案以及对应的速度曲线;

S4:计算S3中得到的每个站间速度曲线的牵引加速时长与制动减速时长;

S5:针对多列车在多个站间的运行过程,以提高再生制动反馈能量利用为目标,通过优化发车间隔与停站时间,获取节能的发车间隔与停站时间;

具体包括以下子步骤:

S5.1:建立以提高再生制动反馈能量利用率为目标,发车间隔与停站时间为决策变量的多列车多站间再生制动反馈能量优化模型;

S5.2:将S5.1中的多列车多站间再生制动反馈能量优化模型转化为混合整数线性规划模型;

S5.3:利用混合整数规划求解器进行求解;

多列车多站间再生制动反馈能量优化模型:

$$\max T_{ov} = \sum t_{ov}$$

$$s.t. D_{1,min} \leq D_1 \leq D_{1,max}$$

$$T_{d,min}^i \leq D_i - A_i \leq T_{d,max}^i$$

$$A_i - D_{i-1} = T_{r,j}, i = 2, \dots, K+1$$

$$A_{K+1,min} \leq A_{K+1} \leq A_{K+1,max}$$

$$D_i - D'_i \geq T_{safe}$$

$$A_i - A'_i \geq T_{safe}$$

其中, $T_{ov}$ 表示总牵引加速与制动减速重叠时长; $t_{ov}$ 表示两车之间的牵引加速与制动加速重叠时长; $D_{1,min}$ 和 $D_{1,max}$ 分别表示第一趟车在第一站的最小发车时刻和最大发车时刻; $D_1$ 表示第一趟车在第一站的车站发车时刻; $T_{d,min}^i$ 和 $T_{d,max}^i$ 分别表示列车在车站i的最小停车时间和最大停车时间; $D_i$ 表示列车在车站i的车站发车时刻; $A_i$ 表示列车在车站i的到站时刻; $T_{r,i}$ 表示列车在第i个站间的运行时间; $A_{K+1,min}$ 和 $A_{K+1,max}$ 分别表示列车在车站K+1的最小到站时刻和最大到站时刻; $A_{K+1}$ 表示列车在车站K+1的到站时刻; $D'_i$ 表示后车在车站i的车站发车时刻; $A'_i$ 表示后车在车站i的到站时刻; $T_{safe}$ 表示安全运行间隔时长;

混合整数规划线性模型,指要求部分决策变量的取值为整数的线性规划模型;

将 $t_{ov}$ 用逻辑变量 $\delta, \eta$ 与辅助变量 $\alpha, \beta$ 进行表示为:

$$t_{ov} = t_{b,i-1} \delta_5 + (A_{m,i} - t_{b,i-1}) \delta_6 + (T_{h,j} - A_{m,i}) \delta_7 - \alpha_1 + \alpha_2$$

$$t_{ov} = t_{a,i} \eta_5 + (D_{m,i} + t_{b,j-1}) \eta_6 + (-D_{m,i} - t_{a,i}) \eta_7 - \beta_1 + \beta_2$$

优化变量定义为:

$$X = [D^T \ A^T \ \delta_1^T \ \dots \ \delta_7^T \ \alpha_1^T \ \alpha_2^T \ \eta_1^T \ \dots \ \eta_7^T \ \beta_1^T \ \beta_2^T]^T$$

混合整数规划模型表示为:

$$\min \text{Opt} = CX$$

$$\text{s.t. } M_1 X \leq m_1$$

$$M_2 X = m_2$$

其中,C根据 $t_{ov}$ 的表达式和X变量的定义来构造, $M_1, m_1, M_2, m_2$ 根据多列车多站间再生制动反馈能量优化模型中的约束条件进行构造;

S6:输出优化结果,包括城轨节能运营时刻表以及相应节能运行速度曲线。

2.根据权利要求1所述的城市轨道交通节能时刻表和运行曲线优化方法,其特征在于,步骤S1所述的城轨列车的基本数据包括车重、牵引制动特性;所述的城轨线路的基本数据包括车站公里标、限速、坡度、曲线;所述的城轨运营时刻表的基本数据包括站间运行时间、发车间隔、停站时间。

3.根据权利要求1所述的城市轨道交通节能时刻表和运行曲线优化方法,其特征在于,所述步骤S2,具体包括以下子步骤:

S2.1:计算站间的最大运行能力速度曲线,得到最小运行时间;

S2.2:将运行速度曲线以牵引工况为起始,制动工况为结束,划分为多个子区间;

S2.3:在各个子区间添加惰行工况,记录运行时间变化与运行能耗变化;

S2.4:比较各个子区间的能耗时间比值,选取比值最大的子区间,在该子区间添加惰行工况;

S2.5:重新计算站间运行时间;

S2.6:判断站间运行时间是否等于设定的站间运行时间,若是,则结束运算;否则,返回步骤S2.2。

4.根据权利要求1所述的城市轨道交通节能时刻表和运行曲线优化方法,其特征在于,所述步骤S3,具体包括以下子步骤:

S3.1:生成各个站间离散化的区间运行时间和区间运行牵引能耗对照表;

S3.2:建立以多站间总运行牵引能耗最小为目标,区间运行时间为决策变量的单列车多站间牵引能耗优化模型;

S3.3:建立启发式算法,对单列车多站间牵引能耗优化模型进行求解。

5.根据权利要求4所述的城市轨道交通节能时刻表和运行曲线优化方法,其特征在于,所述的单列车多站间牵引能耗优化模型:

$$\min J = \sum_{i=1}^N J_{t,i}$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^N t_i = T_t$$

$$t_i \geq t_{i,\min}$$

$$J_{t,i} \leq J_{t,i,\max}$$

其中,J表示多个站间的总牵引能耗; $J_{t,i}$ 表示第i个站间的牵引能耗; $J_{t,i,\max}$ 表示第i个站间的最大牵引能耗; $t_i$ 表示第i个站间的运行时间; $t_{i,\min}$ 表示第i个站间的最小运行时间; $T_t$ 表示多站站间的总运行时间。

## 城市轨道交通节能时刻表和运行曲线优化方法

### 技术领域

[0001] 本发明的领域涉及城市交通优化技术领域,更具体地,涉及城市轨道交通节能时刻表和运行曲线优化方法。

### 背景技术

[0002] 随着我国城市规模不断扩大,城市人口迅速增加,居民的出行需求持续增长。城市轨道交通因其快捷、准点、安全、高效等优点,成为了居民出行的首要选择。大中型城市对轨道交通的需求也愈发强烈,因此,城市轨道交通近年发展迅猛。但随着城轨运营规模的不断扩大,日益增长的运营成本给运营单位造成了一定的经济压力。其中,城轨系统耗电支出约占运营成本的40%,且城轨列车运行所需电能占总消耗电能的比重较大。因此,降低城轨列车运行能耗对降低运营成本具有显著效果。列车运行能耗主要分为两个方面:牵引能耗与再生制动反馈能量。

[0003] 牵引能耗是指列车在运行过程中牵引加速所消耗的能量,主要由列车运行速度曲线决定。目前国内城轨列车所采用的运行速度曲线主要考虑安全与准点两个因素,忽略了通过优化速度曲线来降低牵引能耗的可能,所以现有的运行速度曲线尚存在较大的节能空间。已有的研究与工程实验表明通过优化城轨列车运行速度曲线可有效降低约10%的牵引能耗。同时,站间运行时间对列车运行速度曲线优化有着直接影响。但是,现有的研究大多以单列车在单个站间的运行为研究对象,并没有考虑站间运行时间调整对列车运行速度曲线以及牵引能耗的影响。因此,通过合理地调整列车站间运行时间,可进一步降低列车在多个站间的总运行能耗。

[0004] 再生制动反馈能量是列车在电制动的过程中产生的能量,通过供电网传输可供其他列车的牵引消耗。如果产生的再生制动反馈能耗不能被其他列车利用,由于能量无法储存,将会被制动电阻消耗,造成能量浪费。城轨列车运行过程中,由于站间距离较短,列车启动制动频繁,且列车的牵引和制动加速度较大,再生制动反馈能量的再利用空间十分巨大。数据表明,北京城轨运营线路中可以被利用的再生制动反馈能量占牵引能耗的30%以上,但是实际运营过程中利用率并不高,大量再生制动反馈能量被浪费。通过增加不同城轨列车牵引与制动过程的重叠时间,将会有效提高再生制动反馈能量的利用率。这一点可以通过调整城轨列车出站时间与到站时间,对城轨列车运行过程按照时间轴进行平移来实现。

[0005] 从上述分析不难看出,牵引能耗和再生制动反馈能量作为城轨系统列车运行能耗的主要影响因素,可以通过速度曲线、区间运行时间、出站时间和到站时间进行优化,后三个因素由运行时刻表决定。由于需要综合考虑速度曲线与时刻表相关因素,问题较为复杂,目前并没有十分完善的解决方案。

[0006] 在纪云霞,基于改进遗传算法的列车速度曲线优化[J].计算机与现代化,2018(8):1-7.论文提出一种改进型遗传算法,对列车节能运行速度曲线进行计算。该论文提出的节能运行速度曲线计算方法,模型复杂,计算时间长,且仅考虑单列车在单个站间的运行过程,并没有对单列车在多个站间的运行过程进行研究。

[0007] 还有比如,B.Jin,Train Timetable and Trajectory Optimization Using Improved[C].2018 37<sup>th</sup> Chinese Control Conf,2018:7748-7753.该论文提出列车多站间的速度曲线优化计算方法。该论文提出的列车多站间节能运行速度曲线优化计算方法计算误差较大,且没有对再生制动反馈能量利用率的提升进行研究。

## 发明内容

[0008] 提供一种城市轨道交通节能时刻表和运行曲线优化方法,在安全、准点的基础/约束上,实现城轨列车多区间节能运行和提高再生制动反馈能耗利用率。

[0009] 本发明提供的完整技术方案为:

[0010] 城市轨道交通节能时刻表和运行曲线优化方法,包括步骤:

[0011] S1:获取城轨列车的基本数据(车重、牵引制动特性),城轨线路的基本数据(车站公里标、限速、坡度、曲线),城轨运营时刻表的基本数据(站间运行时间、发车间隔、停站时间);

[0012] S2:针对单列车在单个站间的运行过程,以站间运行牵引能耗最小为目标,通过优化运行速度曲线,得到每个站间不同运行时间下的节能运行速度曲线;

[0013] S3:针对单列车在多个站间的运行过程,以多站间总运行牵引能耗最小为目标,依据S2的结果,通过优化站间运行时间,获取节能区间运行时间分配方案以及对应的速度曲线;

[0014] S4:计算S3中得到的每个站间速度曲线的牵引加速时长与制动减速时长;

[0015] S5:针对多列车在多个站间的运行过程,以提高再生制动反馈能量利用为目标,通过优化发车间隔与停站时间,获取节能的发车间隔与停站时间;

[0016] S6:输出优化结果,包括城轨节能运营时刻表以及相应节能运行速度曲线。

[0017] 其中:

[0018] 站间运行时间:列车从一个车站出发,到达下一个车站所需要的运行时间。

[0019] 牵引加速时长:列车从车站起车开始,保持牵引力大于零状态的时间长度。

[0020] 制动减速时长:列车保持制动力大于零状态,直至到达车站的时间长度。

[0021] 运营时刻表:主要包含列车站间运行时间、发车间隔、停站时间。

[0022] 所述步骤S2进一步包括如下子步骤:

[0023] S2.1:计算站间的最大运行能力速度曲线,得到最小运行时间;

[0024] S2.2:将运行速度曲线以牵引工况为起始,制动工况为结束,划分为多个子区间;

[0025] S2.3:在各个子区间添加惰行工况,记录运行时间变化与运行能耗变化;

[0026] S2.4:比较各个子区间的能耗时间比值,选取比值最大的子区间,在该子区间添加惰行工况;

[0027] S2.5:重新计算站间运行时间;

[0028] S2.6:判断站间运行时间是否等于设定的站间运行时间,若是,则结束运算;否则,返回步骤S2.2。

[0029] 最大运行能力速度曲线:以最大加速度进行牵引,以最大减速度进行制动,贴近限速。

[0030] 最小运行时间:最大运行能力速度曲线对应的运行时间

[0031] 能耗时间比值:运行能耗变化值与运行时间变化值的比值。

[0032] 其中:

[0033] 牵引工况:列车牵引力大于零的运行状态;

[0034] 制动工况:列车制动力大于零的运行状态;

[0035] 惰行工况:列车牵引力与制动力均等于零的运行状态;

[0036] 所述步骤S3进一步包括如下子步骤:

[0037] S3.1:生成各个站间离散化的区间运行时间和区间运行牵引能耗对照表;

[0038] S3.2:建立以多站间总运行牵引能耗最小为目标,区间运行时间为决策变量的单列车多站间牵引能耗优化模型;

[0039] S3.3:建立启发式算法,对模型进行求解。

[0040] 单列车多站间牵引能耗优化模型:

$$[0041] \quad \min J = \sum_{i=1}^N J_{t,i}$$

$$[0042] \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N t_i = T_t$$

$$[0043] \quad t_i \geq t_{i,\min}$$

$$[0044] \quad J_{t,i} \leq J_{t,i,\max}$$

[0045] 其中,J表示多个站间的总牵引能耗; $J_{t,i}$ 表示第i个站间的牵引能耗; $J_{t,i,\max}$ 表示第i个站间的最大牵引能耗; $t_i$ 表示第i个站间的运行时间; $t_{i,\min}$ 表示第i个站间的最小运行时间; $T_t$ 表示多站站间的总运行时间。

[0046] 其中,

[0047]  $\Delta t$ :表示每次分配的时间间隔。

[0048] 总富裕时间运行时间:设定的多站间总运行时间与现多站间总运行时间的差值。

[0049] 所述步骤S5进一步包括如下子步骤:

[0050] S5.1:建立以提高再生制动反馈能量利用率为目标,发车间隔与停站时间为决策变量的多列车多站间再生制动反馈能量优化模型;

[0051] S5.2:将S5.1中的节能优化模型转化为混合整数线性规划模型;

[0052] S5.3:利用混合整数规划求解器进行求解。

[0053] 混合整数线性规划模型:指要求部分决策变量的取值为整数的线性规划模型。

[0054] 多列车多站间再生制动反馈能量优化模型:

$$[0055] \quad \max T_{ov} = \sum t_{ov}$$

$$[0056] \quad \text{s.t.} \quad D_{1,\min} \leq D_1 \leq D_{1,\max}$$

$$[0057] \quad T_{d,\min}^i \leq D_i - A_i \leq T_{d,\max}^i$$

$$[0058] \quad A_i - D_{i-1} = T_{r,j}, i = 2, \dots, K+1$$

$$[0059] \quad A_{K+1,\min} \leq A_{K+1} \leq A_{K+1,\max}$$

$$[0060] \quad D_i - D_i' \geq T_{\text{safe}}$$

$$[0061] \quad A_i - A_i' \geq T_{\text{safe}}$$

[0062] 其中, $T_{ov}$ 表示总牵引加速与制动减速重叠时长; $t_{ov}$ 表示两车之间的牵引加速与制

动加速重叠时长; $D_{1,\min}$ 和 $D_{1,\max}$ 分别表示第一趟车在第一站的最小发车时刻和最大发车时刻; $D_1$ 表示第一趟车在第一站的发车时刻; $T_{d,\min}^i$ 和 $T_{d,\max}^i$ 分别表示列车在车站i的最小停车时间和最大停车时间; $D_i$ 表示列车在车站i的发车时刻; $A_i$ 表示列车在车站i的到站时刻; $T_{r,i}$ 表示列车在第i个站间的运行时间; $A_{K+1,\min}$ 和 $A_{K+1,\max}$ 分别表示列车在车站K+1的最小到站时刻和最大到站时刻; $A_{K+1}$ 表示列车在车站K+1的到站时刻; $D_i'$ 表示后车在车站i的发车时刻; $A_i'$ 表示后车在车站i的到站时刻; $T_{\text{safe}}$ 表示安全运行间隔时长。

[0063] 混合整数规划线性模型:

[0064] 将 $t_{ov}$ 用逻辑变量 $\delta, \eta$ 与辅助变量 $\alpha, \beta$ 进行表示为:

[0065]  $t_{ov} = t_{b,i-1}\delta_5 + (A_{m,i} - t_{b,i-1})\delta_6 + (T_{h,j} - A_{m,i})\delta_7 - \alpha_1 + \alpha_2$

[0066]  $t_{ov} = t_{a,i}\eta_5 + (D_{m,i} + t_{b,j-1})\eta_6 + (-D_{m,i} - t_{a,i})\eta_7 - \beta_1 + \beta_2$

[0067] 优化变量可以定义为:

[0068]  $X = [D^T \ A^T \ \delta_1^T \ \cdots \ \delta_7^T \ \alpha_1^T \ \alpha_2^T \ \eta_1^T \ \cdots \ \eta_7^T \ \beta_1^T \ \beta_2^T]^T$

[0069] 混合整数规划模型可以表示为:

[0070]  $\min \text{Opt} = CX$

[0071]  $s.t. M_1X \leq m_1$

[0072]  $M_2X = m_2$

[0073] 其中,C可以根据 $t_{ov}$ 的表达式和X变量的定义来构造, $M_1, m_1, M_2, m_2$ 可以根据多列车多站间再生制动反馈能量优化模型中的约束条件进行构造。

[0074] 本发明技术方案带来的有益效果

[0075] 1) 列车节能运行速度曲线计算时间短,误差小;

[0076] 2) 综合考虑运行速度曲线和站间运行时间优化,在不改变总运行时间的情况下,进一步降低多站间牵引能耗;

[0077] 3) 通过优化停站时间和发车间隔,提高再生制动反馈能量利用率;

[0078] 4) 通过降低牵引能耗,提高再生制动反馈能量利用率,降低城轨列车运行能耗,且改进方案对于运营者而言是零成本的。

[0079] 说明书附图

[0080] 图1为本发明方法的步骤流程图;

[0081] 图2为步骤S2节能速度曲线计算的步骤流程图;

[0082] 图3为步骤S3单列车多站间牵引能耗优化模型启发式算法的步骤流程图;

[0083] 图4为实施例的节能速度曲线;

[0084] 图5为实施例的节能运营时刻表。

## 具体实施方式

[0085] 结合附图说明本发明的具体技术方案。

[0086] 如图1所示,该优化方法包括步骤:

[0087] S1:获取城轨列车的基本数据(车重、牵引制动特性),城轨线路的基本数据(车站公里标、限速、坡度、曲线),城轨运营时刻表的基本数据(站间运行时间、发车间隔、停站时间);

[0088] S2:针对单列车在单个站间的运行过程,以站间运行牵引能耗最小为目标,通过优化运行速度曲线,得到每个站间不同运行时间下的节能运行速度曲线;

[0089] S3:针对单列车在多个站间的运行过程,以多站间总运行牵引能耗最小为目标,依据S2的结果,通过优化站间运行时间,获取节能区间运行时间分配方案以及对应的速度曲线;

[0090] S4:计算S3中得到的每个站间速度曲线的牵引加速时长与制动减速时长;

[0091] S5:针对多列车在多个站间的运行过程,以提高再生制动反馈能量利用为目标,通过优化发车间隔与停站时间,获取节能的发车间隔与停站时间;

[0092] S6:输出优化结果,包括城轨节能运营时刻表以及相应节能运行速度曲线。

[0093] 其中:

[0094] 站间运行时间:列车从一个车站出发,到达下一个车站所需要的运行时间。

[0095] 牵引加速时长:列车从车站起车开始,保持牵引力大于零状态的时间长度。

[0096] 制动减速时长:列车保持制动力大于零状态,直至到达车站的时间长度。

[0097] 运营时刻表:主要包含列车站间运行时间、发车间隔、停站时间。

[0098] 如图2所示,所述步骤S2进一步包括如下子步骤:

[0099] S2.1:计算站间的最大运行能力速度曲线,得到最小运行时间;

[0100] S2.2:将运行速度曲线以牵引工况为起始,制动工况为结束,划分为多个子区间;

[0101] S2.3:在各个子区间添加惰行工况,记录运行时间变化与运行能耗变化;

[0102] S2.4:比较各个子区间的能耗时间比值,选取比值最大的子区间,在该子区间添加惰行工况;

[0103] S2.5:重新计算站间运行时间;

[0104] S2.6:判断站间运行时间是否等于设定的站间运行时间,若是,则结束运算;否则,返回步骤S2.2。

[0105] 最大运行能力速度曲线:以最大加速度进行牵引,以最大减速度进行制动,贴近限速。

[0106] 最小运行时间:最大运行能力速度曲线对应的运行时间

[0107] 能耗时间比值:运行能耗变化值与运行时间变化值的比值。

[0108] 其中:

[0109] 牵引工况:列车牵引力大于零的运行状态;

[0110] 制动工况:列车制动力大于零的运行状态;

[0111] 惰行工况:列车牵引力与制动力均等于零的运行状态;

[0112] 如图3所示,所述步骤S3进一步包括如下子步骤:

[0113] S3.1:生成各个站间离散化的区间运行时间和区间运行牵引能耗对照表;

[0114] S3.2:建立以多站间总运行牵引能耗最小为目标,区间运行时间为决策变量的单列车多站间牵引能耗优化模型;

[0115] S3.3:建立启发式算法,对模型进行求解。

[0116] 单列车多站间牵引能耗优化模型:

[0117] 
$$\min J = \sum_{i=1}^N J_{t,i}$$



$$[0118] \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N t_i = T_t$$

$$[0119] \quad t_i \geq t_{i,\min}$$

$$[0120] \quad J_{t,i} \leq J_{t,i,\max}$$

[0121] 其中,  $J$ 表示多个站间的总牵引能耗;  $J_{t,i}$ 表示第 $i$ 个站间的牵引能耗;  $J_{t,i,\max}$ 表示第 $i$ 个站间的最大牵引能耗;  $t_i$ 表示第 $i$ 个站间的运行时间;  $t_{i,\min}$ 表示第 $i$ 个站间的最小运行时间;  $T_t$ 表示多站站间的总运行时间。

[0122] 其中,

[0123]  $\Delta t$ :表示每次分配的时间间隔。

[0124] 总富裕时间运行时间:设定的多站间总运行时间与现多站间总运行时间的差值。

[0125] 所述步骤S5进一步包括如下子步骤:

[0126] S5.1:建立以提高再生制动反馈能量利用率为目标,发车间隔与停站时间为决策变量的多列车多站间再生制动反馈能量优化模型;

[0127] S5.2:将S5.1中的节能优化模型转化为混合整数线性规划模型;

[0128] S5.3:利用混合整数规划求解器进行求解。

[0129] 混合整数线性规划模型:指要求部分决策变量的取值为整数的线性规划模型。

[0130] 多列车多站间再生制动反馈能量优化模型:

$$[0131] \quad \max T_{ov} = \sum t_{ov}$$

$$[0132] \quad \text{s.t.} \quad D_{1,\min} \leq D_1 \leq D_{1,\max}$$

$$[0133] \quad T_{d,\min}^i \leq D_i - A_i \leq T_{d,\max}^i$$

$$[0134] \quad A_i - D_{i-1} = T_{r,i}, i = 2, \dots, K+1$$

$$[0135] \quad A_{K+1,\min} \leq A_{K+1} \leq A_{K+1,\max}$$

$$[0136] \quad D_i - D_i' \geq T_{\text{safe}}$$

$$[0137] \quad A_i - A_i' \geq T_{\text{safe}}$$

[0138] 其中,  $T_{ov}$ 表示总牵引加速与制动减速重叠时长;  $t_{ov}$ 表示两车之间的牵引加速与制动加速重叠时长;  $D_{1,\min}$ 和 $D_{1,\max}$ 分别表示第一趟车在第一站的最小发车时刻和最大发车时刻;  $D_1$ 表示第一趟车在第一站的发车时刻;  $T_{d,\min}^i$ 和 $T_{d,\max}^i$ 分别表示列车在车站 $i$ 的最小停车时间和最大停车时间;  $D_i$ 表示列车在车站 $i$ 的发车时刻;  $A_i$ 表示列车在车站 $i$ 的到站时刻;  $T_{r,i}$ 表示列车在第 $i$ 个站间的运行时间;  $A_{K+1,\min}$ 和 $A_{K+1,\max}$ 分别表示列车在车站 $K+1$ 的最小到站时刻和最大到站时刻;  $A_{K+1}$ 表示列车在车站 $K+1$ 的到站时刻;  $D_i'$ 表示后车在车站 $i$ 的发车时刻;  $A_i'$ 表示后车在车站 $i$ 的到站时刻;  $T_{\text{safe}}$ 表示安全运行间隔时长。

[0139] 混合整数规划线性模型:

[0140] 将 $t_{ov}$ 用逻辑变量 $\delta, \eta$ 与辅助变量 $\alpha, \beta$ 进行表示为:

$$[0141] \quad t_{ov} = t_{b,i-1} \delta_5 + (A_{m,i} - t_{b,i-1}) \delta_6 + (T_{h,j} - A_{m,i}) \delta_7 - \alpha_1 + \alpha_2$$

$$[0142] \quad t_{ov} = t_{a,i} \eta_5 + (D_{m,i} + t_{b,j-1}) \eta_6 + (-D_{m,i} - t_{a,i}) \eta_7 - \beta_1 + \beta_2$$

[0143] 优化变量可以定义为:

$$[0144] \quad X = [D^T \ A^T \ \delta_1^T \ \dots \ \delta_7^T \ \alpha_1^T \ \alpha_2^T \ \eta_1^T \ \dots \ \eta_7^T \ \beta_1^T \ \beta_2^T]^T$$

[0145] 混合整数规划模型可以表示为:

[0146]  $\min \text{Opt} = CX$

[0147]  $\text{s.t. } M_1 X \leq m_1$

[0148]  $M_2 X = m_2$

[0149] 其中,  $C$  可以根据  $t_{ov}$  的表达式和  $X$  变量的定义来构造,  $M_1, m_1, M_2, m_2$  可以根据多列车多站间再生制动反馈能量优化模型中的约束条件进行构造。

[0150] 优化的结果如图4和图5所示, 图4为实施例的节能速度曲线; 图5为实施例的节能运营时刻表。

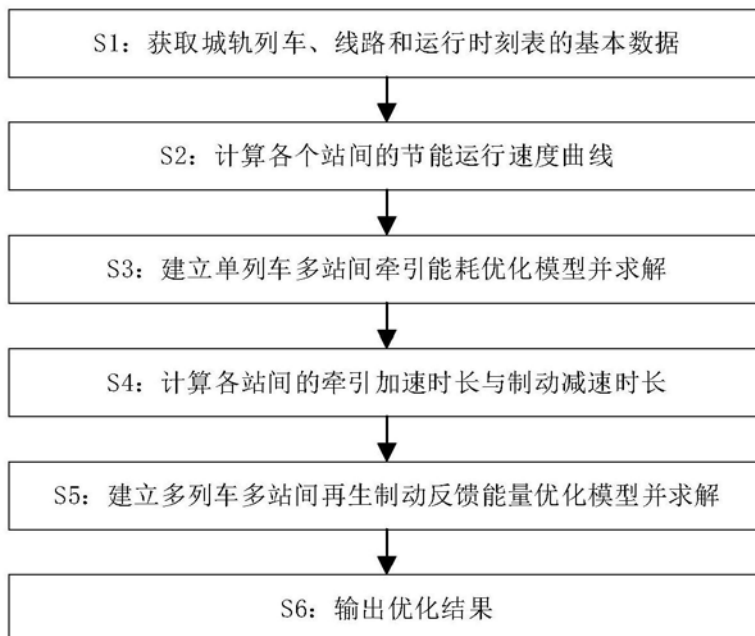


图1

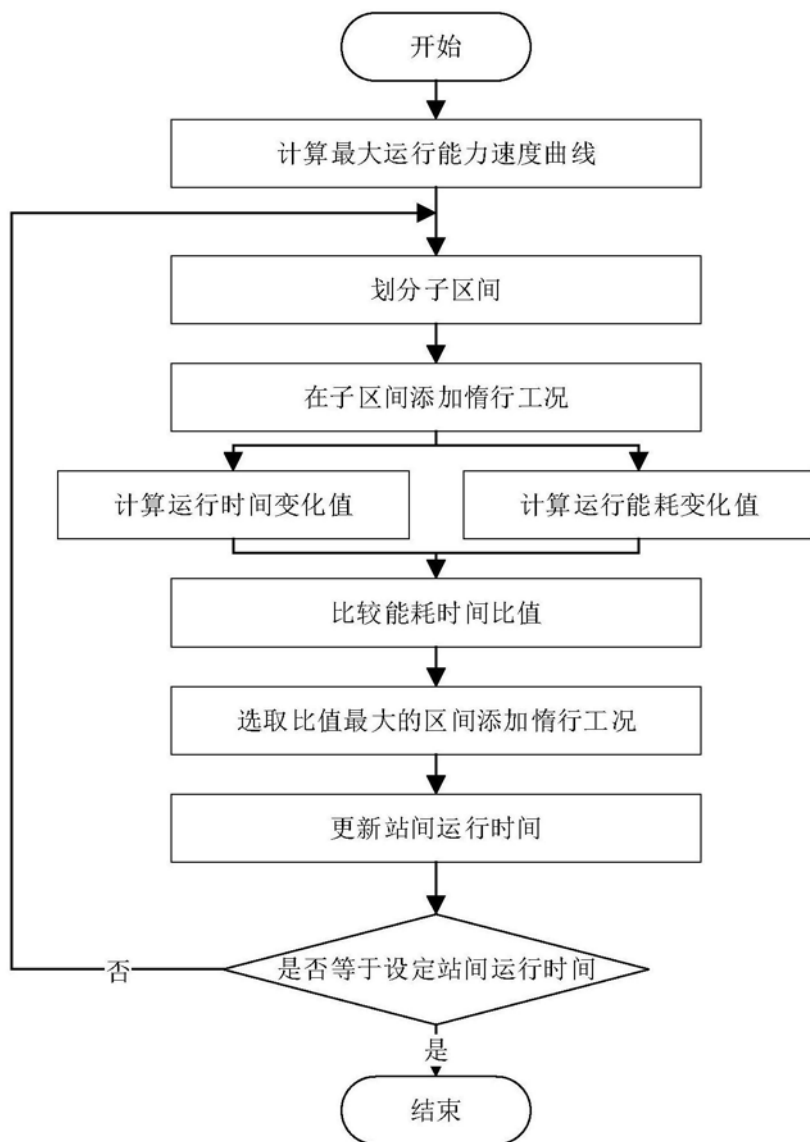


图2

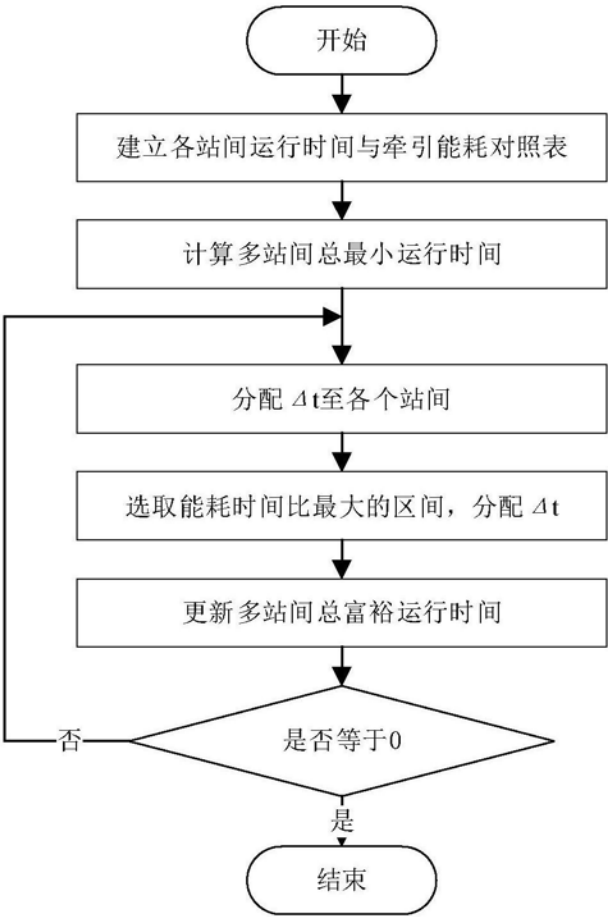


图3

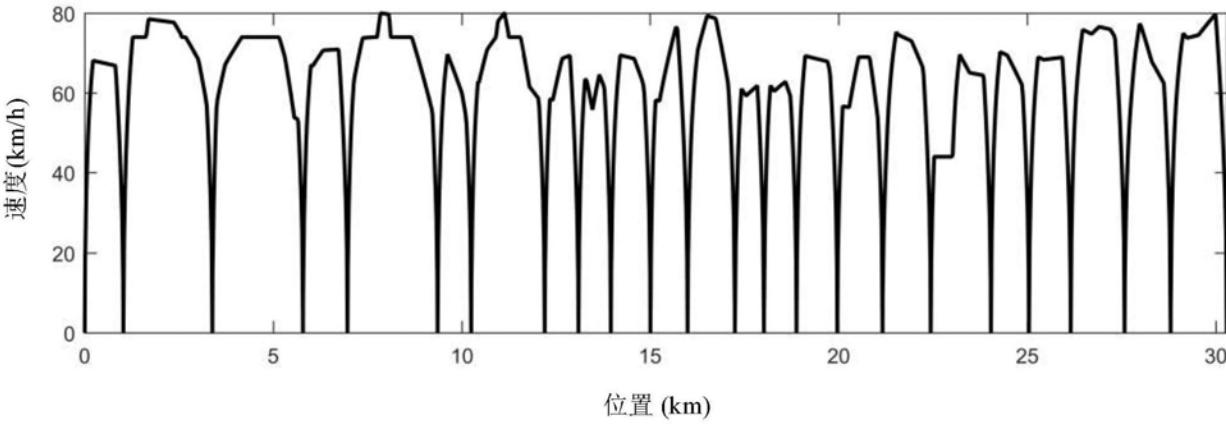


图4

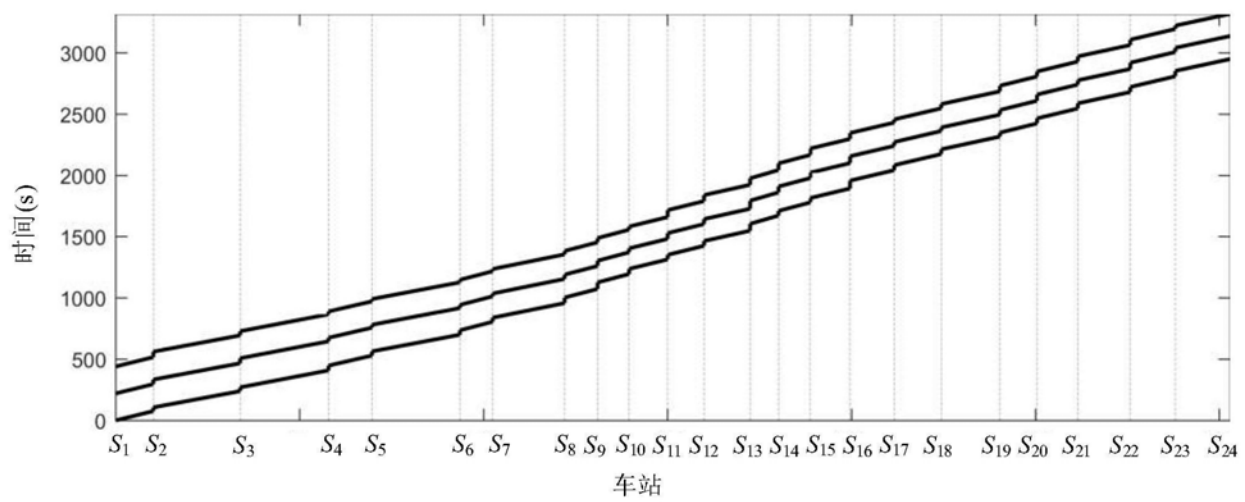


图5