



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113743828 A

(43) 申请公布日 2021.12.03

(21) 申请号 202111114886.9

(22) 申请日 2021.09.23

(71) 申请人 西南交通大学

地址 610031 四川省成都市二环路北一段

(72) 发明人 孙鹏飞 张传鑫 王青元 陈小龙  
金波 冯晓云

(74) 专利代理机构 北京正华智诚专利代理事务  
所(普通合伙) 11870

代理人 何凡

(51) Int. Cl.

G06Q 10/06 (2012.01)

G06Q 50/30 (2012.01)

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 119/02 (2020.01)

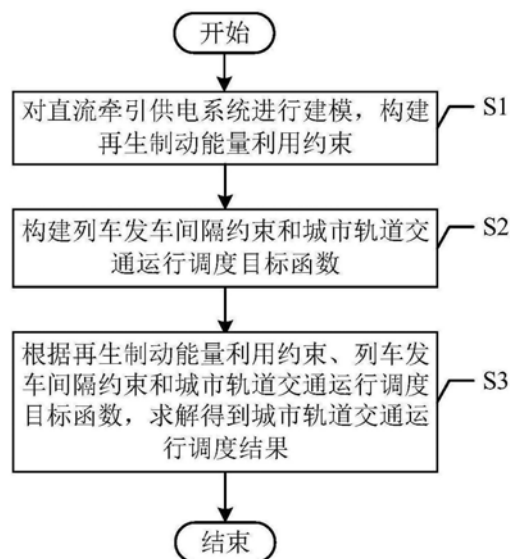
权利要求书3页 说明书7页 附图2页

### (54) 发明名称

一种城市轨道交通运行调度方法及系统

### (57) 摘要

本发明公开了一种城市轨道交通运行调度方法及系统,包括:对直流牵引供电系统进行建模,构建再生制动能量利用约束;构建列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数;根据再生制动能量利用约束、列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数,求解得到城市轨道交通运行调度结果。本发明对直流牵引供电系统进行了分析与建模,并将模型整理成城市轨道交通运行调度的约束,再结合列车发车间隔约束,最终求解出城市轨道交通运行调度结果,实现了城市轨道交通的高效节能调度。



1. 一种城市轨道交通运行调度方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、对直流牵引供电系统进行建模,构建再生制动能量利用约束;

S2、构建列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数;

S3、根据再生制动能量利用约束、列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数,求解得到城市轨道交通运行调度结果。

2. 根据权利要求1所述的城市轨道交通运行调度方法,其特征在于,所述步骤S1包括以下分步骤:

S11、对直流牵引供电系统进行建模,表征直流牵引供电系统的变电站电流特性:

$$I_i(n, t) = \lambda_i(n, t) \cdot \frac{U_s - \sqrt{U_s^2 - 4 \cdot P_i(t) \cdot R(x(i, t))}}{2 \cdot R(x(i, t))}$$

其中,  $i$  为加速列车的索引号;  $n$  为直流牵引供电系统的变电站的索引号;  $t$  为时刻;  $I_i(n, t)$  为加速列车  $i$  的电流被用作独立电流源时,在直流牵引供电系统的变电站  $n$  于  $t$  时刻产生的电流;  $\lambda_i(n, t)$  为加速列车  $i$  的电流被用作独立电流源时,在直流牵引供电系统的变电站  $n$  于  $t$  时刻产生电流的叠加系数;  $U_s$  为直流牵引供电系统的变电站等效电压;  $P_i(t)$  为加速列车  $i$  在  $t$  时刻的功率;  $R(x(i, t))$  为加速列车  $i$  在  $t$  时刻于  $x(i, t)$  位置处的等效电阻;

S12、根据直流牵引供电系统的变电站电流特性,构建再生制动能量利用函数:

$$E_{i,j,i',j'} = \sum_{t=1}^{t_{ov}} \sum_{n=1}^N [U_s \cdot \min\{I_i(n, t) - I_{i'}(n, t)\} - \min\{I_i(n, t) - I_{i'}(n, t)\}^2 \cdot R_s] \cdot \Delta t$$

其中,  $i'$  为制动列车的索引号,  $j$  为加速列车所在车站的索引号,  $j'$  为制动列车所在车站的索引号,  $E_{i,j,i',j'}$  为再生制动能量利用量;  $\Delta t$  为单位离散时间;  $t_{ov}$  为重叠时间;  $N$  为直流牵引供电系统的变电站总数;  $I_{i'}(n, t)$  为制动列车  $i'$  的电流被用作独立电流源时,在直流牵引供电系统的变电站  $n$  于  $t$  时刻产生的电流;  $\min\{\cdot\}$  为求取最小值的函数;  $R_s$  为直流牵引供电系统的变电站等效电阻;

S13、对再生制动能量利用函数进行线性化分段处理:

$$E_{i,j,i',j'} = \begin{cases} 0 & t_{i,j,i',j'} < 0 \\ \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max}} t_{i,j,i',j'} & 0 \leq t_{i,j,i',j'} < t_{i,j,i',j'}^{\max} \\ \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max} - t_{a,j} - t_{b,j'}} t_{i,j,i',j'} t_{i,j,i',j'}^{\max} & t_{i,j,i',j'}^{\max} \leq t_{i,j,i',j'} < t_{a,j} + t_{b,j'} \\ 0 & t_{a,j} + t_{b,j'} \leq t_{i,j,i',j'} \end{cases}$$

其中,  $t_{i,j,i',j'}$  为车站  $j$  处加速列车  $i$  的最大加速部分结束时间点与车站  $j'$  处制动列车  $i'$  的最大制动部分开始时间点之间的时间间隙;  $E_{i,j,i',j'}^{\max}$  为再生制动能量利用量  $E_{i,j,i',j'}$  的最大值;  $t_{i,j,i',j'}^{\max}$  为再生制动能量利用量  $E_{i,j,i',j'}$  的最大值对应的时间;  $t_{a,j}$  为车站  $j$  列车加速时间;  $t_{b,j'}$  为车站  $j'$  列车制动时间;

S14、根据线性化分段处理后的再生制动能量利用函数,构建再生制动能量利用约束;

所述再生制动能量利用约束包括以下各式：

$$E_{i,j,i',j'} \leq \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max}} t_{i,j,i',j'} + \max \{1 - \alpha_{i,j,i',j'}\}$$

$$E_{i,j,i',j'} \leq \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max} - t_{a,j} - t_{b,j'}} (t_{i,j,i',j'} - t_{a,j} - t_{b,j'}) + \max \{1 - \alpha_{i,j,i',j'}\}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} \alpha_{i,j,i',j'} \leq 1$$

$$E_{i,j,i',j'}^{\max} = \sum_{t=1}^{t_{ov}} \sum_{n=1}^N [U_s \cdot \min\{I_i(n,t) - I_{i'}(n,t)\} - \min\{I_i(n,t) - I_{i'}(n,t)\}^2 \cdot R_s] \cdot \Delta t$$

其中， $\alpha_{i,j,i',j'}$ 为约束因子； $\max\{\cdot\}$ 为求取最大值的函数； $I$ 为列车总数； $J$ 为车站总数。

3. 根据权利要求2所述的城市轨道交通运行调度方法，其特征在于，所述列车发车间隔约束包括以下各式：

$$t_{i,i+1}^{\min} \leq d_{i+1,j} - d_{i,j} \leq t_{i,i+1}^{\max}$$

$$d_{j,\min} \leq a_{i,j} - d_{i,j} \leq d_{j,\max}$$

$$t_{\text{safe}} \leq a_{i+1,j} - a_{i,j}$$

$$t_{\text{safe}} \leq d_{i+1,j} - d_{i,j}$$

$$d_{i,j+1} - a_{i,j} = t_{j,j+1}$$

$$t_{i,j,i',j'} = a_{i,j} + t_{a,j} - d_{i',j'} + t_{b,j'}$$

其中， $d_{i,j}$ 为车站 $j$ 处加速列车 $i$ 的发车时间， $d_{i',j'}$ 为车站 $j'$ 处制动列车 $i'$ 的发车时间； $d_{i+1,j}$ 为车站 $j$ 处加速列车 $i+1$ 的发车时间； $t_{i,i+1}^{\min}$ 为相邻列车最小发车间隔时间； $t_{i,i+1}^{\max}$ 为相邻列车最大发车间隔时间； $a_{i,j}$ 为车站 $j$ 处加速列车 $i$ 的到站时间； $a_{i+1,j}$ 为车站 $j$ 处加速列车 $i+1$ 的到站时间； $t_{\text{safe}}$ 为列车之间安全间隔时间； $d_{j,\min}$ 为车站 $j$ 发车与到站最小时间间隙； $d_{j,\max}$ 为车站 $j$ 发车与到站最大时间间隙； $d_{i,j+1}$ 为车站 $j+1$ 处加速列车 $i$ 的发车时间； $t_{j,j+1}$ 为相邻车站的列车发车到站时间间隙。

4. 根据权利要求3所述的城市轨道交通运行调度方法，其特征在于，所述城市轨道交通运行调度目标函数为：

$$\text{Max } E = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J-1} E_{i,j,i',j'}$$

其中， $\text{Max}E$ 为城市轨道交通运行调度目标函数。

5. 一种城市轨道交通运行调度系统，其特征在于，包括：

再生制动能量利用分析运算子系统，用于分析直流牵引供电系统，对直流牵引供电系统进行建模，构建再生制动能量利用约束；

城市轨道交通运行调度规划求解子系统，用于构建列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数，并根据再生制动能量利用约束、列车发车间隔约束和城市轨道交通运

行调度目标函数,求解得到城市轨道交通运行调度结果。

6.一种城市轨道交通运行调度设备,其特征在于,包括:

存储器,用于存储计算机程序;

处理器,用于执行所述计算机程序时实现如权利要求1至4任一项所述的城市轨道交通运行调度方法的步骤。

7.一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至4任一项所述的城市轨道交通运行调度方法的步骤。

## 一种城市轨道交通运行调度方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及城市轨道交通技术领域,具体涉及一种城市轨道交通运行调度方法及系统。

### 背景技术

[0002] 城市轨道交通的大规模发展造成了巨大的能源消耗。气候变化引发的风险持续上升,提倡绿色环保的交通方式,实施节能技术变得尤为重要。提高列车再生制动能量利用是降低列车能耗的有效方法。

[0003] 城市轨道交通运营能耗主要由列车牵引能耗、环控能耗和其他能耗组成,其中牵引能耗超过总能耗的50%。现有的列车节能运行控制方法主要包括速度曲线优化和城市轨道交通运行调度的优化。城市轨道交通具有发车间隔短、运量大、牵引制动频繁的特点,会产生大量的再生制动能量。制动列车产生的再生制动能量大部分可以反馈到电网。再生制动是一种能量回收机制,已在世界各地的轨道交通系统中广泛使用。

[0004] 城市轨道交通系统使用的是安全、可靠的直流供电系统,该系统是一种高度非线性的模型。而目前现有城市轨道交通运行调度方法未引入牵引供电系统的模型进行设计,这常常使得优化效果大大降低。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术中的上述不足,本发明提供一种城市轨道交通运行调度方法及系统解决了现有城市轨道交通运行调度方法未考虑直流牵引供电系统,而使得能耗优化效果不佳的问题。

[0006] 为了达到上述发明目的,本发明采用的技术方案为:

[0007] 第一方面,一种城市轨道交通运行调度方法,包括以下步骤:

[0008] S1、对直流牵引供电系统进行建模,构建再生制动能量利用约束;

[0009] S2、构建列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数;

[0010] S3、根据再生制动能量利用约束、列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数,求解得到城市轨道交通运行调度结果。

[0011] 本发明的有益效果为:对直流牵引供电系统进行了分析与建模,并将模型整理成城市轨道交通运行调度的约束,再结合列车发车间隔约束,最终求解出城市轨道交通运行调度结果,进而实现城市轨道交通的高效节能调度。

[0012] 进一步地,所述步骤S1包括以下分步骤:

[0013] S11、对直流牵引供电系统进行建模,表征直流牵引供电系统的变电站电流特性:

$$[0014] \quad I_i(n, t) = \lambda_i(n, t) \cdot \frac{U_s - \sqrt{U_s^2 - 4 \cdot P_i(t) \cdot R(x(i, t))}}{2 \cdot R(x(i, t))}$$

[0015] 其中,i为加速列车的索引号;n为直流牵引供电系统的变电站的索引号;t为时刻;

$I_i(n, t)$  为加速列车  $i$  的电流被用作独立电流源时, 在直流牵引供电系统的变电站  $n$  于  $t$  时刻产生的电流;  $\lambda_i(n, t)$  为加速列车  $i$  的电流被用作独立电流源时, 在直流牵引供电系统的变电站  $n$  于  $t$  时刻产生电流的叠加系数;  $U_s$  为直流牵引供电系统的变电站等效电压;  $P_i(t)$  为加速列车  $i$  在  $t$  时刻的功率;  $R(x(i, t))$  为加速列车  $i$  在  $t$  时刻于  $x(i, t)$  位置处的等效电阻;

[0016] S12、根据直流牵引供电系统的变电站电流特性, 构建再生制动能量利用函数:

$$[0017] \quad E_{i,j,i',j'} = \sum_{t=1}^{t_{ov}} \sum_{n=1}^N [U_s \cdot \min\{I_i(n, t) - I_{i'}(n, t)\} - \min\{I_i(n, t) - I_{i'}(n, t)\}^2 \cdot R_s] \cdot \Delta t$$

[0018] 其中,  $i'$  为制动列车的索引号,  $j$  为加速列车所在车站的索引号,  $j'$  为制动列车所在车站的索引号,  $E_{i,j,i',j'}$  为再生制动能量利用量;  $\Delta t$  为单位离散时间;  $t_{ov}$  为重叠时间;  $N$  为直流牵引供电系统的变电站总数;  $I_{i'}(n, t)$  为制动列车  $i'$  的电流被用作独立电流源时, 在直流牵引供电系统的变电站  $n$  于  $t$  时刻产生的电流;  $\min\{\cdot\}$  为求取最小值的函数;  $R_s$  为直流牵引供电系统的变电站等效电阻;

[0019] S13、对再生制动能量利用函数进行线性化分段处理:

$$[0020] \quad E_{i,j,i',j'} = \begin{cases} 0 & t_{i,j,i',j'} < 0 \\ \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max}} t_{i,j,i',j'} & 0 \leq t_{i,j,i',j'} < t_{i,j,i',j'}^{\max} \\ \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max} - t_{a,j} - t_{b,j'}} t_{i,j,i',j'} t_{i,j,i',j'}^{\max} \leq t_{i,j,i',j'} < t_{a,j} + t_{b,j'} \\ 0 & t_{a,j} + t_{b,j'} \leq t_{i,j,i',j'} \end{cases}$$

[0021] 其中,  $t_{i,j,i',j'}$  为车站  $j$  处加速列车  $i$  的最大加速部分结束时间点与车站  $j'$  处制动列车  $i'$  的最大制动部分开始时间点之间的时间间隙;  $E_{i,j,i',j'}^{\max}$  为再生制动能量利用量  $E_{i,j,i',j'}$  的最大值;  $t_{i,j,i',j'}^{\max}$  为再生制动能量利用量  $E_{i,j,i',j'}$  的最大值对应的时间;  $t_{a,j}$  为车站  $j$  列车加速时间;  $t_{b,j'}$  为车站  $j'$  列车制动时间;

[0022] S14、根据线性化分段处理后的再生制动能量利用函数, 构建再生制动能量利用约束; 所述再生制动能量利用约束包括以下各式:

$$[0023] \quad E_{i,j,i',j'} \leq \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max}} t_{i,j,i',j'} + \max\{1 - \alpha_{i,j,i',j'}\}$$

$$[0024] \quad E_{i,j,i',j'} \leq \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max} - t_{a,j} - t_{b,j'}} (t_{i,j,i',j'} - t_{a,j} - t_{b,j'}) + \max\{1 - \alpha_{i,j,i',j'}\}$$

$$[0025] \quad \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} \alpha_{i,j,i',j'} \leq 1$$

$$[0026] \quad E_{i,j,i',j'}^{\max} = \sum_{t=1}^{t_{ov}} \sum_{n=1}^N [U_s \cdot \min\{I_i(n, t) - I_{i'}(n, t)\} - \min\{I_i(n, t) - I_{i'}(n, t)\}^2 \cdot R_s] \cdot \Delta t$$

[0027] 其中,  $\alpha_{i,j,i',j'}$  为约束因子;  $\max\{\cdot\}$  为求取最大值的函数;  $I$  为列车总数;  $J$  为车站总数。

[0028] 上述进一步方案的有益效果为: 对列车运行的电流情况进行了建模, 从变电站的角度出发, 有效表征了直流牵引供电系统的变电站电流特性; 列车制动状态时, 其动能可被转换为电能, 反馈回供电系统中再利用, 而再生制动能量利用函数量化了列车制动的能量, 为城市轨道交通运行调度奠定了基础; 由于再生制动能量利用函数为非线性函数, 通过线性化分段处理, 再构建再生制动能量利用约束, 以混合整数规划模型重构的方式有效提高了求解效率。

[0029] 进一步地, 所述列车发车间隔约束包括以下各式:

$$[0030] \quad t_{i,i+1}^{\min} \leq d_{i+1,j} - d_{i,j} \leq t_{i,i+1}^{\max}$$

$$[0031] \quad d_{j,\min} \leq a_{i,j} - d_{i,j} \leq d_{j,\max}$$

$$[0032] \quad t_{\text{safe}} \leq a_{i+1,j} - a_{i,j}$$

$$[0033] \quad t_{\text{safe}} \leq d_{i+1,j} - d_{i,j}$$

$$[0034] \quad d_{i,j+1} - a_{i,j} = t_{j,j+1}$$

$$[0035] \quad t_{i,j,i',j'} = a_{i,j} + t_{a,j} - d_{i',j'} + t_{b,j'}$$

[0036] 其中,  $d_{i,j}$  为车站  $j$  处加速列车  $i$  的发车时间,  $d_{j',j'}$  为车站  $j'$  处制动列车  $i'$  的发车时间;  $d_{i+1,j}$  为车站  $j$  处加速列车  $i+1$  的发车时间;  $t_{i,i+1}^{\min}$  为相邻列车最小发车间隔时间;  $t_{i,i+1}^{\max}$  为相邻列车最大发车间隔时间;  $a_{i,j}$  为车站  $j$  处加速列车  $i$  的到站时间;  $a_{i+1,j}$  为车站  $j$  处加速列车  $i+1$  的到站时间;  $t_{\text{safe}}$  为列车之间安全间隔时间;  $d_{j,\min}$  为车站  $j$  发车与到站最小时间间隔;  $d_{j,\max}$  为车站  $j$  发车与到站最大时间间隔;  $d_{i,j+1}$  为车站  $j+1$  处加速列车  $i$  的发车时间;  $t_{j,j+1}$  为相邻车站的列车发车到站时间间隔。

[0037] 上述进一步方案的有益效果为: 列车发车间隔约束保障了车头时距、停车时间、相邻列车发车和到站的安全时间间隔以及车站的运行效率, 为城市轨道交通的运行调度奠定了可靠保障。

[0038] 进一步地, 所述城市轨道交通运行调度目标函数为:

$$[0039] \quad \text{Max } E = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J-1} E_{i,j,i',j'}$$

[0040] 其中,  $\text{Max } E$  为城市轨道交通运行调度目标函数。

[0041] 上述进一步方案的有益效果为: 以制动能量回收最大作为调度目标, 使城市轨道交通的运行高效节能。

[0042] 第二方面, 一种城市轨道交通运行调度系统, 包括:

[0043] 再生制动能量利用分析运算子系统, 用于分析直流牵引供电系统, 对直流牵引供电系统进行建模, 构建再生制动能量利用约束;

[0044] 城市轨道交通运行调度规划求解子系统, 用于构建列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数, 并根据再生制动能量利用约束、列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数, 求解得到城市轨道交通运行调度结果。

[0045] 第三方面, 一种城市轨道交通运行调度设备, 包括:

[0046] 存储器,用于存储计算机程序;

[0047] 处理器,用于执行所述计算机程序时实现上述的城市轨道交通运行调度方法的步骤。

[0048] 第四方面,一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现上述的城市轨道交通运行调度方法的步骤。

## 附图说明

[0049] 图1为本发明实施例提供的一种城市轨道交通运行调度方法流程示意图;

[0050] 图2为本发明实施例的直流牵引供电系统示意图;

[0051] 图3为本发明实施例提供的一种城市轨道交通运行调度系统结构图;

[0052] 图4为本发明实施例提供的一种城市轨道交通运行调度设备结构图;

[0053] 图5为本发明实施例的城市轨道交通运行调度结果示意图。

## 具体实施方式

[0054] 下面对本发明的具体实施方式进行描述,以便于本技术领域的技术人员理解本发明,但应该清楚,本发明不限于具体实施方式的范围,对本技术领域的普通技术人员来讲,只要各种变化在所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内,这些变化是显而易见的,一切利用本发明构思的发明创造均在保护之列。

[0055] 如图1所示,在本发明的一个实施例中,一种城市轨道交通运行调度方法,包括以下步骤:

[0056] S1、对直流牵引供电系统进行建模,构建再生制动能量利用约束。

[0057] 如图2所示,直流牵引供电系统中列车制动状态时,其动能可被转换为电能,反馈回供电系统中再利用,因此对直流牵引供电系统进行建模是城市轨道交通运行调度的基础。

[0058] 步骤S1包括以下分步骤:

[0059] S11、对直流牵引供电系统进行建模,表征直流牵引供电系统的变电站电流特性:

$$[0060] \quad I_i(n, t) = \lambda_i(n, t) \cdot \frac{U_s - \sqrt{U_s^2 - 4 \cdot P_i(t) \cdot R(x(i, t))}}{2 \cdot R(x(i, t))}$$

[0061] 其中,i为加速列车的索引号;n为直流牵引供电系统的变电站的索引号;t为时刻; $I_i(n, t)$ 为加速列车i的电流被用作独立电流源时,在直流牵引供电系统的变电站n于t时刻产生的电流; $\lambda_i(n, t)$ 为加速列车i的电流被用作独立电流源时,在直流牵引供电系统的变电站n于t时刻产生电流的叠加系数; $U_s$ 为直流牵引供电系统的变电站等效电压; $P_i(t)$ 为加速列车i在t时刻的功率; $R(x(i, t))$ 为加速列车i在t时刻于x(i, t)位置处的等效电阻;

[0062] S12、根据直流牵引供电系统的变电站电流特性,构建再生制动能量利用函数:

$$[0063] \quad E_{i,j,i',j'} = \sum_{t=1}^{t_{ov}} \sum_{n=1}^N [U_s \cdot \min\{I_i(n, t) - I_{i'}(n, t)\} - \min\{I_i(n, t) - I_{i'}(n, t)\}^2 \cdot R_s] \cdot \Delta t$$

[0064] 其中,i'为制动列车的索引号,j为加速列车所在车站的索引号,j'为制动列车所



在车站的索引号,  $E_{i,j,i',j'}$  为再生制动能量利用量;  $\Delta t$  为单位离散时间;  $t_{ov}$  为重叠时间;  $N$  为直流牵引供电系统的变电站总数;  $I_{i'}(n, t)$  为制动列车  $i'$  的电流被用作独立电流源时, 在直流牵引供电系统的变电站  $n$  于  $t$  时刻产生的电流;  $\min\{\cdot\}$  为求取最小值的函数;  $R_s$  为直流牵引供电系统的变电站等效电阻;

[0065] S13、对再生制动能量利用函数进行线性化分段处理:

$$[0066] \quad E_{i,j,i',j'} = \begin{cases} 0 & t_{i,j,i',j'} < 0 \\ \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max}} t_{i,j,i',j'} & 0 \leq t_{i,j,i',j'} < t_{i,j,i',j'}^{\max} \\ \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max} - t_{a,j} - t_{b,j'}} t_{i,j,i',j'} t_{i,j,i',j'}^{\max} \leq t_{i,j,i',j'} < t_{a,j} + t_{b,j'} \\ 0 & t_{a,j} + t_{b,j'} \leq t_{i,j,i',j'} \end{cases}$$

[0067] 其中,  $t_{i,j,i',j'}$  为车站  $j$  处加速列车  $i$  的最大加速部分结束时间点与车站  $j'$  处制动列车  $i'$  的最大制动部分开始时间点之间的时间间隙;  $E_{i,j,i',j'}^{\max}$  为再生制动能量利用量  $E_{i,j,i',j'}$  的最大值;  $t_{i,j,i',j'}^{\max}$  为再生制动能量利用量  $E_{i,j,i',j'}$  的最大值对应的时间;  $t_{a,j}$  为车站  $j$  列车加速时间;  $t_{b,j'}$  为车站  $j'$  列车制动时间;

[0068] S14、根据线性化分段处理后的再生制动能量利用函数, 构建再生制动能量利用约束; 所述再生制动能量利用约束包括以下各式:

$$[0069] \quad E_{i,j,i',j'} \leq \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max}} t_{i,j,i',j'} + \max\{1 - \alpha_{i,j,i',j'}\}$$

$$[0070] \quad E_{i,j,i',j'} \leq \frac{E_{i,j,i',j'}^{\max}}{t_{i,j,i',j'}^{\max} - t_{a,j} - t_{b,j'}} (t_{i,j,i',j'} - t_{a,j} - t_{b,j'}) + \max\{1 - \alpha_{i,j,i',j'}\}$$

$$[0071] \quad \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} \alpha_{i,j,i',j'} \leq 1$$

$$[0072] \quad E_{i,j,i',j'}^{\max} = \sum_{t=1}^{t_{ov}} \sum_{n=1}^N [U_s \cdot \min\{I_i(n, t) - I_{i'}(n, t)\} - \min\{I_i(n, t) - I_{i'}(n, t)\}^2 \cdot R_s] \cdot \Delta t$$

[0073] 其中,  $\alpha_{i,j,i',j'}$  为约束因子;  $\max\{\cdot\}$  为求取最大值的函数;  $I$  为列车总数;  $J$  为车站总数。

[0074] 以上过程对列车运行的电流情况进行了建模, 从变电站的角度出发, 有效表征了直流牵引供电系统的变电站电流特性; 列车制动状态时, 其动能可被转换为电能, 反馈回供电系统中再利用, 而再生制动能量利用函数量化了列车制动的能量, 为城市轨道交通运行调度奠定了基础; 由于再生制动能量利用函数为非线性函数, 通过线性化分段处理, 再构建再生制动能量利用约束, 以混合整数规划模型重构的方式有效提高了求解效率。

[0075] 上述约束还避免了再生制动能量被过度利用。

[0076] S2、构建列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数。

[0077] 列车发车间隔约束包括以下各式：

$$[0078] \quad t_{i,i+1}^{\min} \leq d_{i+1,j} - d_{i,j} \leq t_{i,i+1}^{\max}$$

$$[0079] \quad d_{j,\min} \leq a_{i,j} - d_{i,j} \leq d_{j,\max}$$

$$[0080] \quad t_{\text{safe}} \leq a_{i+1,j} - a_{i,j}$$

$$[0081] \quad t_{\text{safe}} \leq d_{i+1,j} - d_{i,j}$$

$$[0082] \quad d_{i,j+1} - a_{i,j} = t_{j,j+1}$$

$$[0083] \quad t_{i,j,i',j'} = a_{i,j} + t_{a,j} - d_{i',j'} + t_{b,j'}$$

[0084] 其中,  $d_{i,j}$  为车站  $j$  处加速列车  $i$  的发车时间,  $d_{i',j'}$  为车站  $j'$  处制动列车  $i'$  的发车时间;  $d_{i+1,j}$  为车站  $j$  处加速列车  $i+1$  的发车时间;  $t_{i,i+1}^{\min}$  为相邻列车最小发车间隔时间;  $t_{i,i+1}^{\max}$  为相邻列车最大发车间隔时间;  $a_{i,j}$  为车站  $j$  处加速列车  $i$  的到站时间;  $a_{i+1,j}$  为车站  $j$  处加速列车  $i+1$  的到站时间;  $t_{\text{safe}}$  为列车之间安全间隔时间;  $d_{j,\min}$  为车站  $j$  发车与到站最小时间间隔;  $d_{j,\max}$  为车站  $j$  发车与到站最大时间间隔;  $d_{i,j+1}$  为车站  $j+1$  处加速列车  $i$  的发车时间;  $t_{j,j+1}$  为相邻车站的列车发车到站时间间隔。

[0085] 列车发车间隔约束保障了车头时距、停车时间、相邻列车发车和到站的安全时间间隔以及车站的运行效率,为城市轨道交通的运行调度奠定了可靠保障。

[0086] 城市轨道交通运行调度目标函数为：

$$[0087] \quad \text{Max } E = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J-1} \sum_{i'=1}^I \sum_{j'=1}^{J-1} E_{i,j,i',j'}$$

[0088] 其中,  $\text{Max } E$  为城市轨道交通运行调度目标函数。

[0089] 上述进一步方案的有益效果为：以制动能量回收最大作为调度目标,使城市轨道交通的运行高效节能。

[0090] S3、根据再生制动能量利用约束、列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数,求解得到城市轨道交通运行调度结果。

[0091] 本发明实施例通过CPLEX软件进行上述求解过程,得到了城市轨道交通运行调度结果。

[0092] 上文对于本发明实施例提供的一种城市轨道交通运行调度方法进行了详细的描述,本发明还提供了一种与该方法对应的城市轨道交通运行调度系统、设备及计算机可读存储介质。

[0093] 如图3所示,本发明实施例提供的一种城市轨道交通运行调度系统,包括：

[0094] 再生制动能量利用分析运算子系统,用于分析直流牵引供电系统,对直流牵引供电系统进行建模,构建再生制动能量利用约束；

[0095] 城市轨道交通运行调度规划求解子系统,用于构建列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数,并根据再生制动能量利用约束、列车发车间隔约束和城市轨道交通运行调度目标函数,求解得到城市轨道交通运行调度结果。

[0096] 如图4所示,本发明实施例提供的一种城市轨道交通运行调度设备,包括：

[0097] 存储器,用于存储计算机程序；

[0098] 处理器,用于执行所述计算机程序时实现上述的城市轨道交通运行调度方法的步

骤。

[0099] 本发明实施例还提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现上述的城市轨道交通运行调度方法的步骤。

[0100] 本发明实施例的城市轨道交通运行调度结果如图5所示。

[0101] 综上,本发明对直流牵引供电系统进行了分析与建模,并将模型整理成城市轨道交通运行调度的约束,再结合列车发车间隔约束,最终求解出城市轨道交通运行调度结果,进而实现城市轨道交通的高效节能调度。

[0102] 本发明是参照根据本发明实施例的方法、设备(系统)和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0103] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0104] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0105] 本发明中应用了具体实施例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处,综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

[0106] 本领域的普通技术人员将会意识到,这里所述的实施例是为了帮助读者理解本发明的原理,应被理解为本发明的保护范围并不局限于这样的特别陈述和实施例。本领域的普通技术人员可以根据本发明公开的这些技术启示做出各种不脱离本发明实质的其它各种具体变形和组合,这些变形和组合仍然在本发明的保护范围内。

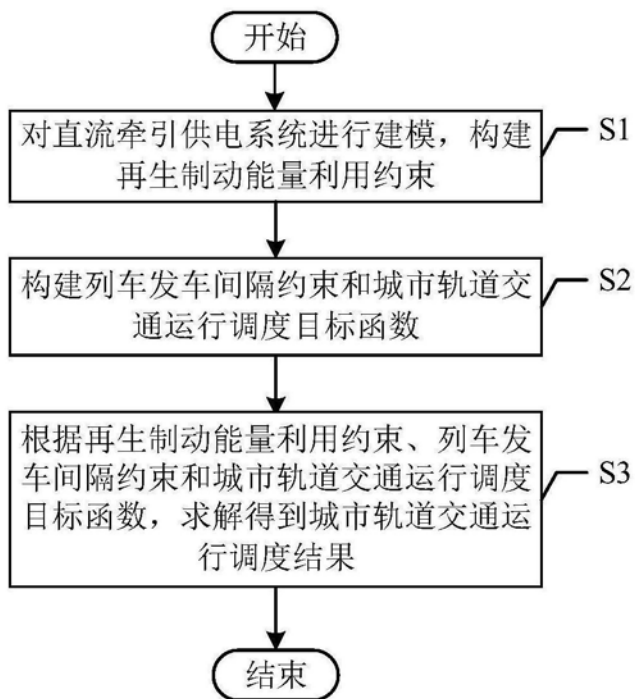


图1

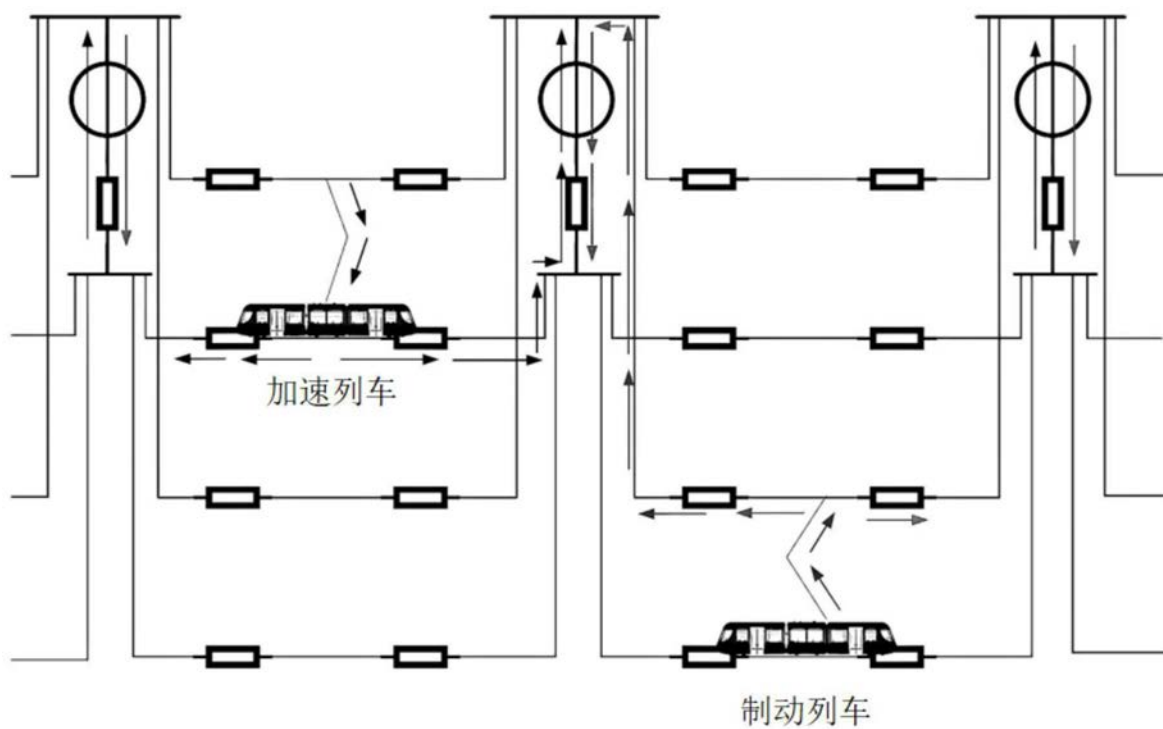


图2



图3

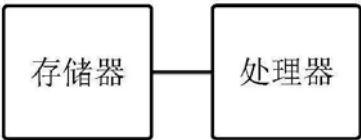


图4

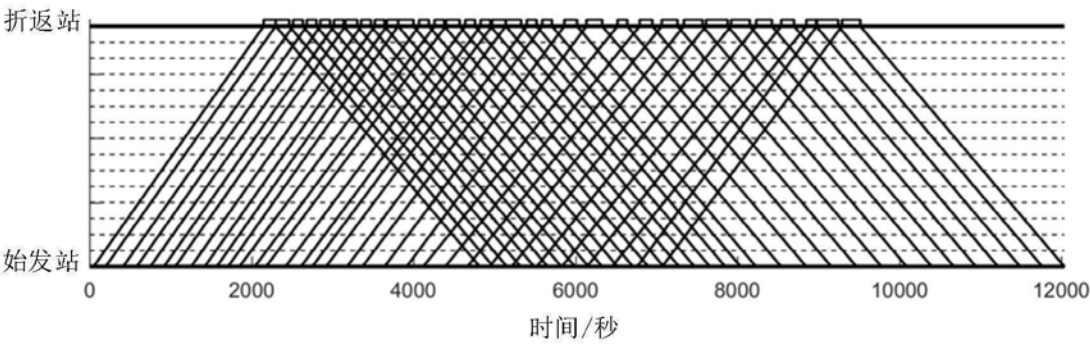


图5