

多模型电梯群控的自寻优策略

李晓理[†], 王志磊, 刘德馨, 王尚君

(北京科技大学 自动化学院; 北京科技大学 钢铁流程先进控制教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 本文对大量电梯实际运行数据进行分析, 将电梯的运行模式分为上行高峰模式、层间交换模式、下行高峰模式和空闲模式等4种情况. 根据多模型控制的思想, 对不同的交通模式, 设计不同权值的评价指标函数, 构成多模型自寻优控制器. 在多个控制策略的基础上, 采用神经网络构成切换机制, 给出电梯群控多模型控制器. 我们在电梯群控仿真平台上进行了验证, 结果显示了本文提出算法的有效性.

关键词: 电梯群控系统; 自寻优; 多模型

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Self-optimal strategy for elevator group control based on multiple models

LI Xiao-li[†], WANG Zhi-lei, LIU De-xin, WANG Shang-jun

(School of Automation and Electrical Engineering; Key Laboratory of Advanced Control of Iron and Steel Process (Ministry of Education), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the running data of a large number of elevators, the running modes of elevators can be classified into four classes: up-running summit mode, level exchanging mode, down-running summit mode and leisure time mode. According to the idea of multiple-model control, different weights of evaluation index function are designed based on different running modes and multiple self-optimal controllers are developed based on multiple control strategies, and the neural network is employed as the switching mechanism for selecting the appropriate controller for individual elevator. The proposed method is proposed method.

Key words: elevator group control system; self-optimal; multiple model

1 引言(Introduction)

随着城市现代化进程的加快, 特别是高楼大厦智能化水平的不断提高, 多部电梯构成的电梯群已成为高层建筑垂直交通运输的主要手段. 合理而有效的电梯群控方法, 对增加乘客的候梯、乘梯舒适度以及降低能耗具有重要意义.

目前, 应用智能控制方法进行群控系统研究的途径有很多, 最主要的思路是依据客流分布将电梯群分成若干运行模型. 在派梯阶段, 结合不同运行模型的特点, 使用相关优化算法来获得满意的派梯方案. 近些年来, 已有大量文献从不同角度对电梯群控系统进行了相关研究, 并取得了丰硕的成果. Hirasawa K等^[1]用遗传网络的方法, 建立了一个双层电梯控制系统. Jamaludin J等^[2]提出了一种带有自适应机制的模糊逻辑群电梯群控调度算法, 降低了乘客等待和乘梯的时间. 对多轿厢电梯群控系统, Valdivielso A等^[3]

根据不同交通流状况识别出不同的客流模型, 得到最佳的电梯调度和抗干扰方案. Zhang J I等^[4]针对不同的电梯运行模式, 在降低电梯运行能耗方面做了重点研究. 大连理工大学的杨祯山^[5]对电梯群控系统最新发展概况做了综述, 并详细分析了电梯群控系统研究中的控制算法等相关问题, 指出多种新型智能控制手段的融合使用是今后电梯群控研究的重要方向之一. 不过, 已有的文献研究中难免也存在一些不足, 如电梯运行模型划分不精确、评价群控算法性能的电梯动态指标不易计算, 以及电梯运行模型与相应控制策略的切换机制不完善等等.

本文在参考了现有研究成果的基础上, 从全新的视角提出了电梯群控系统的多模型自寻优控制解决方案. 多模型自适应控制是近些年来智能控制的一种热点研究方法, 它依据被控对象在不同运行状态的动态特性, 建立多个模型, 并在此基础上求出多模型控

收稿日期: 2013-07-05; 录用日期: 2013-12-02.

[†]通信作者. E-mail: lixiaoli@hotmail.com.

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-11-0578); 国家自然科学基金资助项目(61074055); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-12-005B); 高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)(20130006110008).

制器,对复杂的控制问题“分而治之”,因此,多模型控制方法成为工程界一种易于实现的控制策略^[6-7].根据不同时段客流特点,建立了不同的电梯运行模型,并将这些模型构成模型库;同时针对电梯群的每种运行模型,采用自寻优策略,得到用于优化派梯的多控制器集合.在群控系统运行过程中,利用神经网络识别电梯群当前运行模型,形成切换机制.最后,通过半实物仿真系统验证了多模型电梯群控方法的实用性.

2 电梯群控系统的多模型自寻优控制(Multiple models self-optimal control of elevator group control system)

2.1 电梯群控系统组成及原理分析(Composition and principle analysis of elevator group control system)

通常,电梯群控系统^[8]是指对由3部或3部以上电梯组成的电梯群进行派梯控制.由于调度的动态性、随机性和非线性的存在,给轿厢的调度和电梯间的协作带来很大的难度.合理的派梯方案,对降低乘客候梯焦躁度、提高乘客乘梯舒适度以及节约电梯运行能耗具有重要的意义.

从系统架构的角度来说,电梯群控系统一般由呼梯登记模块、优化调度模块及运行管理模块3大部分构成,当任意模块运行出现异常时,都将触发电梯连锁自保装置,从而达到保护乘梯人员安全的目的.电梯群控系统基本运行原理框架如图1所示.

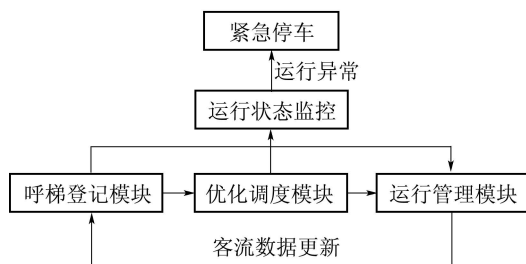


图1 电梯群控系统框架图

Fig. 1 Architecture of elevator group control system

从系统真实硬件组成角度来说,电梯系统由机房、井道底坑、层站及轿厢4部分组成.为了提高电梯群控系统研究的实用性,本文所做的电梯群控系统研究都是在图2所示平台上进行的.该平台是真实电梯的微缩模型,使用了可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)、传感器、变频调速器、交直流电机控制等技术,具有轿厢升降、自动平层、自动开关门、顺向响应轿厢内外呼梯信号、直驶、安全运行保护等功能.同时也可与上位机通信实现组态控制.

2.2 电梯群控系统多模型分析(Multiple models analysis of elevator group control)

许多文献都提出了各自的交通模型划分方法,目

前尚未有统一的交通模型划分规则和划分种类^[9-12],但各种方法所定义的模型都大同小异.因此,在大量客流数据统计的基础上,本文将交通运行模型划分为4类,并建立了每种运行模型的数学描述.



图2 电梯群控系统仿真平台

Fig. 2 Simulation platform of elevator group control system

限于动态电梯候梯实例极强的随机性,本文基于静态实例,分析并建立了电梯运行模型.所谓静态实例,是指在电梯开始运行前,候梯客流分布已经确定,同时在响应完已有呼梯信号前电梯群内将无其他最新呼梯登记信号.由于在特定的电梯群控系统中,大楼人员的作息时间、对电梯的使用习惯等都具有一定的规律性,因此这种简化是合理的.

为了便于统计客流数据,可以对大楼楼层进行分区.设电梯可运行的楼层总数为 $N(N \geq 1)$,则划分基站(1层)及其上1-2层为基层区域;顶层及其下1-2层为顶层区域;对于基层、顶层之间的楼层,可依从下到上的方向,逐次划分为层间区域 $i(i \geq 1)$,每个层间区域包含2-3层.显然,具体楼层区域的划分与 N 密切相关.

定义描述其相关客流特征的变量如下: $x_{i,u}^{in}$ 表示楼层区域 $i(i \in \{D, T, 1, 2, 3 \dots\})$ 内意图进入轿厢并通过轿厢上行到达目的层的总人数; $x_{i,d}^{in}$ 表示区域 i 内意图进入轿厢并通过轿厢下行到达目的层的总人数; x_i^{out} 表示在区域 i 离开轿厢的总人数,这里: D 表示基层区域, T 表示顶层区域.

1) 上行高峰模式.

在这种运行模式下,绝大部分乘客都是从基层区域进入轿厢,并在顶层及顶层附近区域离开电梯;而在顶层附近,基本没有下行客流呼叫.这种运行模型多发生在写字楼的上班早高峰时期.由于这一阶段电梯超负荷运行,靠近基站的层间区域乘客多选择步行楼梯,故此类区域的客流数据量较小.设上行意图呼梯客流总量为 P_u ,下行意图呼梯客流总量为 P_d ,总的候梯客流量为 V ,电梯轿厢额定载客人数为 E ,则上行高峰模型数学描述如式(1):

$$\begin{cases} P_u \geq 85\%V, \\ 80\%P_u \leq x_{D,u}^{in} \leq P_u, \\ 55\%x_{D,u}^{in} \leq x_T^{out} \leq P_u, \\ 0 \leq P_d \leq 15\%V, \\ V \geq nE, \end{cases} \quad (1)$$

这里 n 表示电梯群的电梯台数。

上行高峰运行模型是客流最繁重的运行模型。如果群控算法能够较好的解决上行客流模型, 则也能较好的处理其他运行模型。

2) 层间交换模式。

这种模式下, 电梯的作用主要是用来完成层间区域间人员的流通交换, 且客流量相对较少。此模式为电梯带负荷运行中较为简单的情形, 且层间交换模式多适用于上、下午时段。

设层间楼层数为 M , 参照式(1), 层间交换模式时的客流数据描述满足下式:

$$\begin{cases} 0 \leq P_u \leq V, \\ 0 \leq P_d \leq V, \\ \sum_{i=1}^M x_{i,u}^{in} \geq 85\%P_u, \\ \sum_{i=1}^M x_{i,d}^{out} \geq 85\%P_d, \\ V \geq 15\%nE. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)最后一个约束条件, 限定了层间交换模型客流量, 以示与空闲模式的区别。

3) 下行高峰模式。

这种模式下, 绝大部分候梯乘客都是要下行到达目的层站, 即多数是从顶层区域进入轿厢, 并在基层区域及其附近区域离开电梯轿厢。相对而言, 上行呼梯乘客客流极少。这种运行模式多发生在写字楼下班高峰时期, 由于这一阶段电梯超负荷运行, 靠近基层的层间区域乘客多选择步行楼梯, 故此类区域的客流数据量较小。显然, 下行高峰乘客流特点与上行高峰模型极其相似, 只是客流流向相反, 故下行高峰模式客流数据满足式(3):

$$\begin{cases} P_d \geq 85\%V, \\ 80\%P_d \leq x_{T,d}^{in} \leq P_d, \\ 55\%x_{T,d}^{in} \leq x_D^{out} \leq P_d, \\ 0 \leq P_u \leq 15\%V, \\ V \geq nE. \end{cases} \quad (3)$$

4) 空闲模式。

空闲模型多发生在夜间等人员流动稀少的时间段内, 故电梯基本处于休眠状态, 偶尔有少量人员唤醒电梯的情况下, 客流量也不足单部电梯轿厢额定容量的15%。

这样, 空闲模型的客流数据特征可简单的表达为

$$P_u + P_d \leq 15\%E. \quad (4)$$

对于极少数不符合上述任何运行模型的客流分布实例, 可根据具体情况进行一定的近似处理, 从而使其符合某一模型。4类电梯运行模式模型的建立, 为针对特定模型下群控派梯算法的研究提供了标准, 也为辨识交通模型的人工神经网络奠定了基础。

2.3 基于神经网络的运行模式识别(Running mode identification based on artificial networks)

电梯运行模式的判别, 实质是对客流数据进行分类。一般, 选择BP网络用于解决数据分类问题。

电梯楼层总数如上节所述, 在进行垂直交通客流数据采集时, 一般将整个楼层分为若干区域并分别统计。因此, 用于训练识别神经网络的样本数据可用如下列向量表示:

$$p_i = (n_D^{in}, n_D^{out}, n_1^{in}, n_1^{out}, \dots, n_i^{in}, n_i^{out}, n_T^{in}, n_T^{out})^T, \quad (5)$$

其中元素 n_i^{in}, n_i^{out} 分别代表在静态候梯实例中区域 i 进入、离开轿厢的合计客流量。显然, 对于区域 $i \in \{D, T, 1, 2, 3, \dots\}$, 训练样本元素与客流统计特性数据之间符合下述关系式(6):

$$\begin{cases} n_i^{in} = x_{i,u}^{in} + x_{i,d}^{in}, \\ n_i^{out} = x_i^{out}. \end{cases} \quad (6)$$

这样, 依据上节建立的4类电梯运行模型, 得到神经网络输出向量与运行模型关系如表1所示。

表1 运行模型编码
Table 1 Codes of run mode

模型编号	模型名称	输出向量
1	上行高峰模型	[1 0 0 0]
2	层间交换模型	[0 1 0 0]
3	下行高峰模型	[0 0 1 0]
4	上空闲模型	[0 0 0 1]

用于模型识别的网络结构如图3所示。

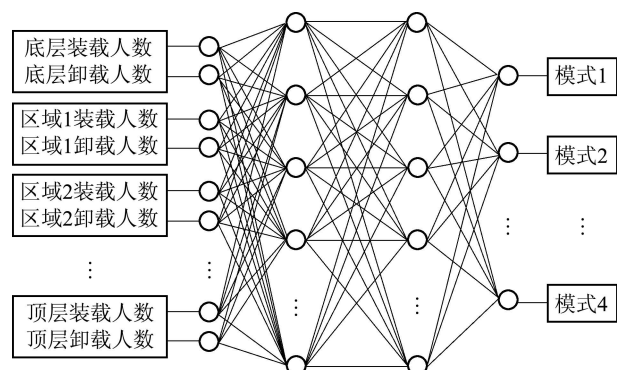


图3 运行模式识别网络结构

Fig. 3 Architecture of run models identification network

采用具有2层隐含层的BP神经网络,并统一应用S型激活函数,输出层采用线性激活函数.隐含层神经元的数目,通常大于输出层神经元数1到2个.本文建立了4类运行模型,故每个隐含层神经元个数定为6.

应用神经网络进行当前运行模型识别,是基于其良好的自学习特性及高效的数据分类能力,从而避免了繁杂的计算过程,提高了群控系统的实时特性.

2.4 自寻优派梯策略及电梯群多模型控制(Self-optimal elevator dispatch strategy and elevator group multi-model control)

2.4.1 自寻优控制及优化派梯策略分析(Analysis of self-optimal control and optimal elevator dispatch strategy)

自寻优控制^[13]是在某环境条件的约束或限制下,自行寻求最优的或满意的工作状态和运行方式,达到实现预期的最优或满意控制目标的目的.自寻优控制系统运行过程中能不断搜寻被控对象的最优运行状态,并自行控制对象趋向最优运行状态.当环境和对象特性发生变化,最优点漂移时,自寻优控制系统能不断搜寻最优点并制定最优控制决策,及时调控系统状态趋向于新的最优点附近.

电梯群的运行过程,由于内、外呼梯数据、轿厢位置等的不断变化,具有其极强的时变、非线性特性,故对其难以建立精确的数学模型,同时,这也造成了动态计算电梯运行评价指标的困难性.现有派梯策略由于疏于对候梯客流数据的动态统计,常常不能实现高效率的派梯.结合自寻优控制的优点,把自寻优控制策略应用于电梯群控系统,将提供一个有效的派梯方案.

为了能够准确获取客流信息,需构造合理的评价指标.本文中,重点考虑由如下动态指标构成的评价函数.

1) 平均候梯时间(average waiting time, AWT).

AWT为候梯乘客从按下厅外呼梯按钮到某部轿厢停车响应该呼梯信号所经历的平均时间,是衡量群控算法优劣的重要指标.尤其对于上、下行高峰模式,这时候候梯人数非常多,要优先响应这些楼层的外呼信号,以达到降低平均候梯时间的目的.

2) 平均乘梯时间(average riding time, ART).

ART是指从乘客进入轿厢时起到乘客到达目的层并离开轿厢时止所经历的时间平均值.长时间处在封闭的轿厢内极易引起乘客的不适感,因此,在确保运行安全的前提下,减少ART是群控调度算法的重要目标之一.

3) 系统能耗(run count, RC).

电梯的能耗主要由以下几部分产生:控制显示系统,轿厢内照明通风系统,驱动系统,曳引系统和门机

系统.在电梯使用过程中,各个部分的能耗存在一定规律.控制和照明通风系统等设备能耗变化比较小;驱动系统的能耗相对比较稳定;曳引系统的能耗主要由电梯的行程决定;电梯门机系统的能耗主要与开关门的时间和次数有关.因此,对于特定电梯,降低系统能耗的主要手段可从优化电梯行程和减少开关门次数两方面考虑.对电梯群控系统而言,本文主要考虑减少电梯的起停次数的方法,这样,不仅节约了能源,同时也延长了电梯群的使用寿命.

由此,可以构建派梯过程中的评价函数为

$$S = f(\text{AWT}, \text{ART}, \text{RC}). \quad (7)$$

式(7)表明,总的评价函数由AWT, ART及RC共同决定.事实上,基于电梯群控系统的多目标性以及各个电梯运行模式的不同侧重点,评价函数的构建可根据具体情况而添加或删减定义域变量种类.

根据上述评价函数,派梯策略的自寻优优化是指首先针对每个区域,都指定一个假定候梯乘客或离梯乘客人数最多的楼层,此时一部或多部电梯会优先响应该层呼梯信号;然后每隔一定周期,统计这一时段的电梯群动态性能指标,并形成指标函数以作为对这段时间派梯效果的衡量;最终,根据指标函数的变化情况调整优先响应层.一般,对于某种特定运行模式,经过若干次调整后,可得到此种模式下电梯群运行的最佳响应方式,并作为类似模式下电梯响应方式的基础.在电梯实际运行过程中,针对类似的客流信息情况,在此响应方式的基础上进一步优化,动态自寻优得到此时的最佳响应策略.

具体自寻优优化调整过程如下:

由每隔一段时间进行一次计算的 S 构成评价指标时间序列.为了衡量 S 的变化,定义时间序列 n :

$$E_n = S_n - S_{n-1}, \quad (8)$$

显然, E_n 表示评价指标的当前变化.

设电梯群有 m 部电梯,则每部电梯在每个区域都有一个优先响应层,定义优先响应矩阵为 H ,则 $H = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ \cdots \ h_m]$,其中,向量元素 h_i 为一个列向量,列向量的每个元素表示该部电梯在楼层各个区域的优先响应层.显然,向量各个元素的取值范围与大楼楼层数目有关.根据 E_n 和已有优先响应楼层序列 $\{H_1, H_2, \cdots, H_n\}$ 就可以预测 $n+1$ 时段优先响应楼层 H_{n+1} ,具体的预测步骤如下:

指定一个楼层变化步长增量 ΔH :

$$\Delta H = [\Delta h_1 \ \Delta h_2 \ \Delta h_3 \ \cdots \ \Delta h_m], \quad (9)$$

其中 ΔH 的大小可根据实际大楼楼层数而定,并且在自寻优派梯过程中,该向量各元素值是可以动态调整的.

于是,在确定候梯实例的情况下,优化优先响应楼

层的预测方式如下:

1) 当 $n = 0$ 时:

根据顺向截车传统派梯方案, 给定初始优先响应矩阵 H_0 , 计算 S_0 , 令 $H_1 = H_0 + \Delta H$;

2) 当 $n = 1$ 时:

计算 S_1 , 利用公式(8)求得 E_1 . 然后, 预测推理的伪代码如下:

If $E_1 > 0$, Then $H_2 = H_1 + \Delta H$;

If $E_1 \leq 0$, Then $\Delta H = -\Delta H$, 令 $S_1 = S_0$, $H_2 = H_0 + \Delta H$;

3) 当 $n = 2$ 时:

计算 S_2 , 利用式(8)求得 E_2 . 然后, 预测推理的伪代码如下:

If $E_2 > 0$, Then $H_3 = H_2 + \Delta H$;

If $E_2 = 0$, Then $H_3 = H_2$, 预测停止, 同时认为 H_3 为最优;

If $E_2 < 0$, Then $H_3 = H_1 (E_1 > 0)$ or $H_3 = H_0 (E_1 \leq 0)$, 同时, 预测停止, 并认为 H_3 为当前优先响应楼层;

4) 当 $n \geq 3$ 时:

计算 S_n , 利用式(8)求得 E_n .

If $E_n > 0$, Then $H_{n+1} = H_n + \Delta H$;

If $E_n = 0$, Then $H_{n+1} = H_n$, 预测停止, 并认为 H_{n+1} 为当前优先响应楼层;

If $E_n < 0$, Then $H_{n+1} = H_{n-1}$, 预测停止, 并认为 H_{n+1} 为当前优先响应楼层.

注意, 步骤2)的目的是为了确定一个能使 S_n 增长的 ΔH , 这样优先响应楼层层号的变化是沿着指标函数增长方向进行的.

与现有其他方法相比, 自寻优优化过程参考的主要信息是一段时间内的动态指标, 根据各个指标的定义, 该过程能够精确的得到相关指标的表达式. 显示出自寻优优化过程较强的优势.

2.4.2 电梯群控系统的多模型控制器 (Multiple models controller of elevator group control system)

电梯群在不同的运行模型下, 对派梯调度算法的性能要求不同. 例如, 在上、下行高峰模型下, 降低平均候梯时间是最主要的要求; 而在空闲模型等情形下, 降低能耗则是衡量调度算法的最主要指标. 因此, 针对不同模型指定不同的派梯策略, 即应用多模型^[14-15]的方法在不同的运行模型下切换到与之对应的优化方法, 对提高电梯群运行性能具有重要作用.

在多模型的电梯群控自寻优控制系统框架如图4所示.

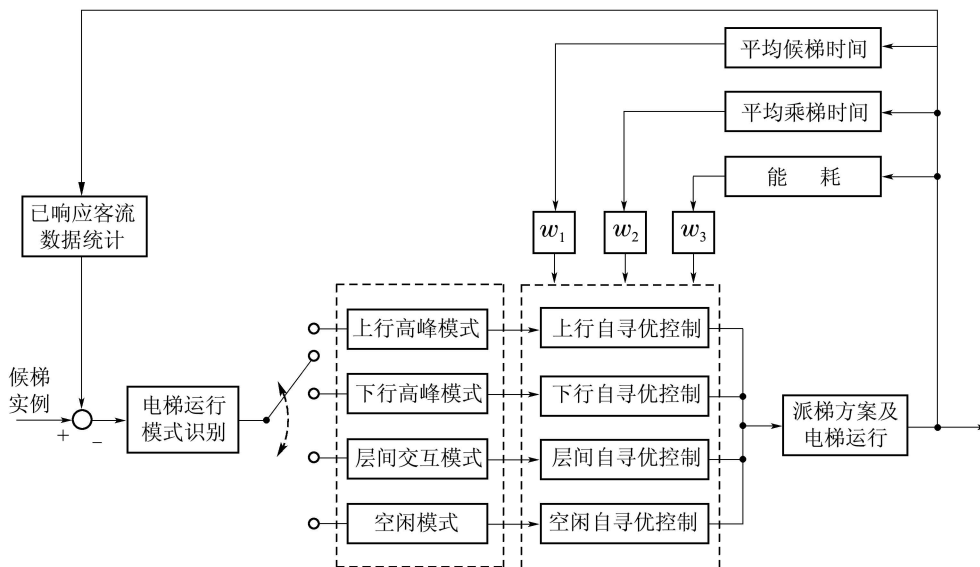


图4 多模型电梯群自寻优控制系统框架

Fig. 4 Architecture of elevator group self-optimal multi-models control system

基于自寻优方法的电梯群控多模型控制中, 不同模型下相应优先响应层确定策略的差异主要体现在第2.4.1节中所述的评价函数.

参考式(7), 构造评价指标函数如下:

$$S = -(\omega_1 AWT + \omega_2 ART + \omega_3 RC), \quad (10)$$

其中 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$. 在不同的运行模型下, 根据需要为不同指标指定相应的权值. 例如, 在上行高峰运行模型下, 由于大量候梯乘客的存在, 此时重点考虑平均候梯时间指标, 则可分配权重 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别对应为 0.8, 0.1 及 0.1. 下行高峰模型与此类似,

而层间交互模型以降低平均乘梯时间为主,空闲模型以降低能耗指标为主,其具体权值分配可依使用情况而定.此时的各个性能指标是指在当前优先响应层的情形下所获得的.

1) 针对4种电梯运行模型给出指标函数中各权值的分布,如表2所示.

表2 权值分布
Table 2 Distribution of weights

运行模型	ω_1	ω_2	ω_3
上行高峰	0.8	0.1	0.1
下行高峰	0.8	0.1	0.1
层间交换	0.4	0.5	0.1
空闲模型	0.1	0.1	0.8

2) 在 t 时刻,针对具体起始楼层、目的楼层、人数等呼梯数据,应用图3所示神经网络识别出所属电梯运行模型.

3) 针对识别出的运行模型,参考表2,确定 ω_1 , ω_2 及 ω_3 的权值分布,并选择对应模型下的自寻优派梯策略进行相应的派梯操作.

每种电梯运行模型下,根据电梯部数的不同,会分配大部分的电梯先去处理优先响应层的呼叫请求.这一优先处理规则,可根据实际情况进一步拓展.

3 实例分析(Example analysis)

为了验证基于自寻优的电梯群控多模型控制方法的有效性,本文依托图2和图5所示电梯群控仿真平台,进行了由3部8层电梯组成的群控系统实例仿真,并对各种常见派梯方案进行分析.

根据电梯控制系统的特点,主流的电梯控制技术有以下几种派梯规则:顺向截梯,反向截梯,分区控制,搜索式控制,启发式控制等^[16].这些算法从不同角度考虑,优化电梯运行的过程.顺向截梯是,轿厢在某一方向运行过程中,在未到达目的楼层的前方出现与电梯运行方向相一致的顺方向厅外召唤信号时,轿厢可以应答停车,而把某层厅外乘客捎走.反向截梯与顺向截梯相反,当轿厢在去往目的楼层的前方出现与电梯运行方向相反的逆向厅外召唤信号时,电梯也可以应答停车,将乘客运送到反方向某一层站,显然这种派梯不符合常理,适用于特殊情况(如某些紧急情况的发生),当然它的等待时间或能耗相对来说会较长(大).分区控制,搜索式控制,启发式控制应属于智能派梯控制算法.分区控制可以分为固定分区调配和动态分区调配;搜索式控制是在可能的派梯空间内寻找某台单梯,使其能

够优化某个系统性能;启发式控制常常依据最长队列优先原则,最高呼梯层优先原则进行派梯.但这几种种派梯算法与具体环境关系十分密切,很多指标函数的选择需要人为设定,方法并不具有普适性.

目前,应用最广泛的派梯方法是最小等待时间调度方法,即电梯群控控制器在进行群控派梯选择时,通过预测计算各电梯的响应时间,选择响应最快的电梯去响应召唤,使所有候梯乘客等待时间最小.在实际运行当中,最小等待时间方法常常通过顺向截梯的派梯规则来实现,某些特殊情况也可以通过反向截梯实现.本实例中将依据大量的计算数据对最小等待时间调度方法和自寻优优化派梯方法进行对比.

结合第2.2节中上行高峰数学模式,选定一组候梯客流数据如表3所示.

表3 候梯乘客分布
Table 3 Distribution of passenger

起始层号	目的层号	人数
2	3	3
3	1	1
3	8	60

假定用于试验的电梯系统硬件配置情况如下:建筑物层数为8层,楼层高度为3.5 m,电梯数为3台,每部电梯轿厢初始位置均为基站1层,电梯额定载客量为20.额定速度为2 m/s,加速度为1 m/s².开门时间为2 s,关门时间为3.3 s.

由上述配置情况可知,电梯的起停、运行过程可以看成是静止、匀加速直线运动及匀速运动的交替过程.根据物理学相关公式

$$\begin{cases} v_t = v_0 + at, \\ s_y = v_t t, \\ s_j = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \end{cases} \quad (11)$$

可以计算派梯消耗时间,从而计算相关指标.其中: v_t 表示电梯的匀速速率; s_y 用来表示匀速运动运行的距离; s_j 表示匀加速运动运行的距离; a 表示加速度.

对上面给定的实例,分别按最小等待时间调度和自寻优优化算法进行派梯,并分析AWT,ART及RC指标,从而证明经自寻优控制方法优化后的顺向截梯算法调度性能的提升.

1) 最小等待时间调度方法.

由于初始状态3部轿厢都位于第1楼层,默认1#电梯为主梯,即其拥有外部呼梯信号的优先响应权.

对与上面的实例,可认为初始的3个呼梯信号几乎是同时产生的,而且3部电梯虽然之间会相互协调,但在运行上是并行独立的.

如果按照顺向截梯的规则,具体的派梯方案如下:

$$\begin{cases} 1\#, 1\text{层} \xrightarrow{\text{空载}} 2\text{层} \xrightarrow{3\text{人}} 3\text{层} \xrightarrow{20\text{人}} 8\text{层}, \\ 2\#, 1\text{层} \xrightarrow{\text{空载}} 3\text{层} \xrightarrow{1\text{人}} 1\text{层} \xrightarrow{\text{空载}} 3\text{层} \xrightarrow{20\text{人}} 8\text{层}, \\ 3\#, 1\text{层} \xrightarrow{\text{空载}} 3\text{层} \xrightarrow{20\text{人}} 8\text{层}. \end{cases}$$

综上,所有呼梯信号都已响应完毕,该派梯方案的各项指标值如下:累计候梯时间为1439.95 s,累计乘梯时间为597.75 s,累计起停次数为9.详细的计算过程可参考附录1.

如果按照反向截梯的规则,派梯方案为

$$\begin{cases} 1\#, 1\text{层} \xrightarrow{\text{空载}} 2\text{层} \xrightarrow{3\text{人}} 3\text{层} \xrightarrow{1\text{人}} 1\text{层} \xrightarrow{\text{空载}} 3\text{层} \xrightarrow{20\text{人}} 8\text{层}, \\ 2\#, 1\text{层} \xrightarrow{\text{空载}} 3\text{层} \xrightarrow{20\text{人}} 8\text{层}, \\ 3\#, 1\text{层} \xrightarrow{\text{空载}} 3\text{层} \xrightarrow{20\text{人}} 8\text{层}. \end{cases}$$

很明显,1#电梯增加的负载正好是2#电梯减少的负载,因此整体指标值不变,一般情况下,反向截梯适用于特殊或紧急情况,因此整体指标将增加.

2) 自寻优控制派梯方法.

实际应用中,自寻优优化是在顺向派梯的基础上,针对每种电梯运行模型的特点,首先初始化每个楼层区域的优先响应层,经过一定周期后,计算此段周期内的派梯指标,通过比较目标函数的优劣性,断定下一周期各楼层区域的优先响应层,如此反复迭代寻优.针对特定电梯群使用环境、特定电梯运行模式,各个楼层区域的优先响应层最终会稳定在某一层,而优先响应该层,会大大提升电梯的服务质量.

针对上述上行高峰运行模型静态候梯实例,设基层区域初始化优先响应层为1层,经计算,此时对应的指标函数 $S = -19.834$,此时依据自寻优学习过程,楼层步长变化增量 $\Delta h = 2$,优先响应层将自动寻优而设定为3层,针对候梯实例,可计算得到此时的指标函数 $S = -13.866$,如此依据3.3.1算法,经过一段时期的自寻优优化过程,针对符合实例中客流分布特性的上行高峰运行模型的基层优先响应层将稳定于3层,此时3层将为所有电梯的停靠基站.具体派梯方案如下:

$$\begin{cases} 1\#, 1\text{层} \xrightarrow{20\text{人}} 8\text{层} \xrightarrow{\text{空载}} 3\text{层} \xrightarrow{20\text{人}} 8\text{层}, \\ 2\#, 3\text{层} \xrightarrow{1\text{人}} 1\text{层} \xrightarrow{\text{空载}} 2\text{层} \xrightarrow{3\text{人}} 3\text{层}, \\ 3\#, 3\text{层} \xrightarrow{20\text{人}} 8\text{层}. \end{cases}$$

综上,所有呼梯信号都已响应完毕,该派梯方案

的各项指标值如下:累计候梯时间为978.85 s,累计乘梯时间为597.75 s,累计起停次数为7.详细的计算过程可参考附录2.

两种派梯方案评价函数的各项动态指标如表4所示.

表4 两种派梯方案指标对比
Table 4 The index comparison of two elevator control strategies

派梯方案	AWT/s	ART/s	RC/次
最小等待时间	22.5	9.34	9
自寻优	15.29	9.34	7
优化程度	降低32.04%	0	降低22.22%

通过与最小等待时间算法比较,在平均乘梯时间ART相同的情况下,平均候梯AWT降低了32.04%,累计启停次数RC降低了22.22%,可见,基于自寻优优化策略的电梯调度方法取得了良好效果.

应用电梯群控组态系统,选定候梯客流数据,可以进行派梯算法效果的相关评价验证.首先,在图5区域1处选定电梯运行模型,如上行高峰运行模型,然后在区域2处选定各类优化派梯算法,并单击区域3处的启动仿真.这时,如图2所示实物仿真平台会进行相关派梯操作,电梯群控系统运行状态会在图5的区域4、区域5处实时显示.实验中,选定同一个候梯客流数据,通过应用不同派梯方法,证明了基于多模型的电梯群控自寻优派梯综合效果要优于其他方法,而且正如上面实例分析数据显示,多模型自寻优派梯算法尤其对缩短平均候梯时间具有显著作用.

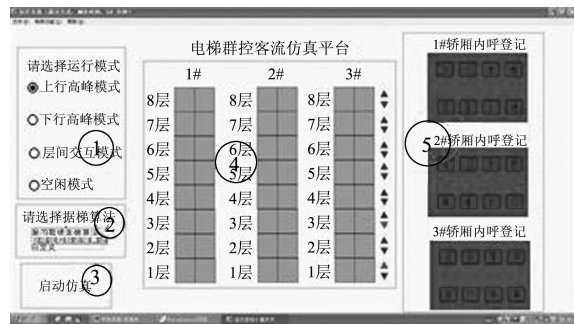


图5 客流仿真组态界面

Fig. 5 Simulation of passenger flow SCADA interface

4 结论(Conclusion)

本文在分析了电梯群控系统原理的基础上,参考传统方法的优缺点,提出了基于多模型的电梯群控方法,并加入了自寻优策略以此来获得各个区域

的优先响应层, 这样就把更多的实时客流数据信息加入了派梯调度过程. 最后, 用实例的形式验证了方法的有效性和实用性.

该方法的成功应用, 亦从侧面反应出将先进的客流检测设施配置到现有电梯群控系统中, 可以促进更多智能控制方法在该领域的应用.

参考文献(References):

- [1] HIRASAWA K, EGUCHI T, ZHOU J, et al. A double-deck elevator group supervisory control system using genetic network programming [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, 2008, 38(4): 535 - 550.
- [2] JAMALUDIN J, RAHIM N A, HEW W P. An elevator group control system with a self-tuning fuzzy logic group controller [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(12): 4188 - 4198.
- [3] VALDIVIELSO A, MIYAMOTOAND T. Multicar-elevator group control algorithm for interference prevention and optimal call allocation [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 2011, 41(2): 311 - 322.
- [4] ZHANG J L, ZONG Q. Energy-saving scheduling optimization under up-peak traffic for group elevator system in building [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 66: 495 - 504.
- [5] 杨祯山, 邵诚. 电梯群控技术的现状与发展方向 [J]. *控制与决策*, 2005, 20(12): 1321 - 1331.
(YANG Zhenshan, SHAO Cheng. On the present situation and developing trends of elevator group supervisory control technologies [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(12): 1321 - 1331.)
- [6] LANDAU I D, CONSTANTINESCU A, ALMA M. Adaptive regulation-rejection of unknown multiple narrow band disturbances [C] // *The 17th Mediterranean Conference on Control & Automation*. Makedonia Palace: IEEE, 2009: 1056 - 1065.
- [7] MIRZAEI A, SALAHSHOOR K. Fault diagnosis and accommodation of nonlinear systems based on multiple-model adaptive unscented Kalman filter and switched MPC and H-infinity loop-shaping controller [J]. *Journal of Process Control*, 2012, 22(3): 626 - 634.
- [8] 李东, 王伟, 邵诚. 电梯群控智能系统与智能控制技术 [J]. *控制与决策*, 2001, 16(5): 513 - 517.
(LI Dong, WANG Wei, SHAO Cheng. Elevator group supervisory control systems and intelligent control techniques [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5): 513 - 517.)
- [9] 朱德文, 付国江. 电梯群控技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
(ZHU Dewen, FU Guojiang. *Elevator Group Control Technology* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.)
- [10] YASUHIRO O, HARUHIKO K, SADAKI H, et al. Elevator group control system using multiagent system [J]. *Systems and Computers in Japan*, 2003, 34(1): 45 - 58.
- [11] FARAG W, QUINTANA V H, LAMBERT-TORRES G. A genetic based neuro-fuzzy approach for modeling and control of dynamical systems [J] // *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1998, 9(5): 756 - 767.
- [12] TANG H Y, DING B, QI W G. Research on traffic mode of elevator applied fuzzy C-mean clustering algorithm based on PSO [C] // *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Harbin: IEEE, 2009: 582 - 585.
- [13] 涂序彦, 王枫, 刘建毅. 智能控制论 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
(TU Xuyan, WANG Cong, LIU Jianyi. *Intelligent Cybernetics* [M]. Beijing: Science Press, 2010.)
- [14] 刘德馨, 李晓理, 丁大伟, 等. 基于雷达观测数据的高炉料面多模型控制 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(10): 1277 - 1283.
(LIU Dexin, LI Xiaoli, DING Dawei, et al. Multi-model control of blast furnace burden surface based on observed data of radars [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(10): 1277 - 1283.)
- [15] 李晓理, 石龙辉, 丁大伟. 水箱液位系统多模型控制方法 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(3): 370 - 374.
(LI Xiaoli, SHI Longhui, DING Dawei. Multi-model control for water level system [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 370 - 374.)
- [16] 林琳. 群控电梯多目标智能最优调度算法的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
(LIN Lin. Research on multi-target intelligent optimal dispatching algorithm in elevator group control system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.)

附录1 顺向截梯方案(Appendix 1 Heading off elevator in sequence scheduling schemes)

首先, 由1#电梯首先响应2层的上行到3楼的呼梯信号. 1#电梯将由1层运行到2层并停车, 其运动形式包括匀加速运动和匀速运动, 由于各类电梯系统停车前的减速运动没有统一要求, 故在本实例中忽略停车前的减速运动过程. 由式(11)知, 匀加速运动经历的时间是

$$t_{1j}^{1\#} = \frac{vt}{a} = 2 \text{ s}.$$

该过程运行的距离为

$$S_{1j}^{1\#} = \frac{1}{2} a (t_{1j}^{1\#})^2 = 2 \text{ m}.$$

考虑整个运行距离为, 则匀速运行的距离为

$$S_{1y}^{1\#} = 3.5 - S_{1j}^{1\#} = 1.5 \text{ m}.$$

因此, 匀速运动经历的时间为

$$t_{1y}^{1\#} = \frac{1.5}{2} = 0.75 \text{ s}.$$

考虑电梯在2层停留时的开关门时间为 $t_t = 5.3 \text{ s}$. 则这个阶段经历的时间

$$t_1^{1\#} = t_{1j}^{1\#} + t_{1y}^{1\#} + t_t = 8.05 \text{ s}.$$

此时可以计算2层3人的候梯时间为 $3 \times 8.05 = 24.15 \text{ s}$. 随即该轿厢将前往3层响应厢内呼梯信号. 由于该过程和轿厢由1层运行到2层的数据指标极其类似, 该阶段累计用时为 $t_2^{1\#} = 8.05 \text{ s}$, 具体过程不再赘述. 这里可以计算出该3人的乘梯时间为 $3 \times 2.75 = 8.25 \text{ s}$. 此时, 按照顺向截梯算法的基本原理, 3层60人上行呼梯信号的响应也由1#电梯完成, 即此刻在一定程度上该上行呼梯信号对2#, 3#电梯是屏蔽的. 因此, 此时会有20人登梯进入1#轿厢前往8层, 故此20人的候梯时间为 $20 \times (t_1^{1\#} + t_2^{1\#}) = 300 \text{ s}$.

此处需要注意的是, 由于该部电梯只能响应60人中的20人, 剩余的40人亦不在1#电梯的顺向运行范围内, 故该40人将刷新呼梯信号登记, 以便其余电梯响应. 注意, 此时1#电梯已运行 $t_1^{1\#} + t_2^{1\#} = 16.1 \text{ s}$.

接下来电梯将由3层运行到8层. 相关的运行数据如下:

$$t_{3j}^{1\#} = 2 \text{ s}, S_{3j}^{1\#} = 2 \text{ m}, t_{3y}^{1\#} = 7.75 \text{ s},$$

$$S_{3y}^{1\#} = 15.5 \text{ m}, t_3^{1\#} = t_{3j}^{1\#} + t_{3y}^{1\#} + t_t = 15.05 \text{ s}.$$

由上述数据可以得到其内20人的乘梯时间为 $20 \times (t_{3y}^{1\#} + t_3^{1\#}) = 195 \text{ s}$.

接下来考虑3层的下行至1层的呼梯信号, 该信号将由2#电梯响应.

首先, 2#电梯由1层运行到3层停车并装载1人. 2#电梯的运行是从0时开始的, 即和1#电梯同式开始响应呼梯信号. 整个过程的相关数据如下:

$$t_{1j}^{2\#} = 2\text{ s}, S_{1j}^{2\#} = 2\text{ m}, t_{1y}^{2\#} = 2.5\text{ s}, \\ S_{1y}^{2\#} = 5\text{ m}, t_1^{2\#} = t_{1j}^{2\#} + t_{1y}^{2\#} + t_t = 9.8\text{ s}.$$

此时, 可算得此1人的候梯时间为9.8 s. 然后, 该部电梯将响应轿厢内呼梯信号下行到1层. 该过程的各项运行数据如下:

$$t_{2j}^{2\#} = 2\text{ s}, S_{2j}^{2\#} = 2\text{ m}, t_{2y}^{2\#} = 2.5\text{ s}, \\ S_{2y}^{2\#} = 5\text{ m}, t_2^{2\#} = t_{2j}^{2\#} + t_{2y}^{2\#} + t_t = 9.8\text{ s}.$$

此时可计算得到该乘梯人的乘梯时间为 $1 \times (t_{2y}^{2\#} + t_{2j}^{2\#}) = 4.5\text{ s}$. 考虑2#电梯响应完当前任务的时间为

$$t_1^{2\#} + t_2^{2\#} = 9.8 + 9.8 = 19.6\text{ s}.$$

而如上所述, 1#电梯在运行16.1 s时由于不能完全响应60人呼梯信号, 而此时2#电梯仍有其他派梯任务, 故余留3层的40人将由3#电梯响应. 3#电梯由1层运行到3层, 期间的各项运行数据如下:

$$t_{1j}^{3\#} = 2\text{ s}, S_{1j}^{3\#} = 2\text{ m}, t_{1y}^{3\#} = 2.5\text{ s}, \\ S_{1y}^{3\#} = 5\text{ m}, t_1^{3\#} = t_{1j}^{3\#} + t_{1y}^{3\#} + t_t = 9.8\text{ s}.$$

由于轿厢额定容量, 3#电梯此行只能响应20人, 故此20人的候梯时间为 $20 \times (16.1 + 9.8) = 518\text{ s}$. 接着, 其由3层运行至8层, 相关运行数据如下:

$$t_{2j}^{3\#} = 2\text{ s}, S_{2j}^{3\#} = 2\text{ m}, t_{2y}^{3\#} = 7.75\text{ s}, \\ S_{2y}^{3\#} = 15.5\text{ m}, t_2^{3\#} = t_{2j}^{3\#} + t_{2y}^{3\#} + t_t = 15.05\text{ s}.$$

轿厢内20人的乘梯时间为 $20 \times (t_{2y}^{3\#} + t_{2j}^{3\#}) = 195\text{ s}$.

现在考虑每部电梯完成当前派梯任务的累计时间分别为

$$1\#: t_1^{1\#} + t_2^{1\#} + t_3^{1\#} = 8.05 + 8.05 + 15.05 = 31.15\text{ s}, \\ 2\#: t_1^{2\#} + t_2^{2\#} = 9.8 + 9.8 = 19.6\text{ s} \\ 3\#: t_1^{3\#} + t_2^{3\#} = 9.8 + 15.05 = 24.85\text{ s}.$$

显然, 2#电梯会率先闲置下来, 并停留在1层, 则2#电梯将响应3层余下20人的呼梯信号. 其将经历由1层运行至3层, 最后再到8层的过程, 两个阶段的各项数据分别如下:

$$t_{1j}^{2\#} = 2\text{ s}, S_{1j}^{2\#} = 2\text{ m}, t_{1y}^{2\#} = 2.5\text{ s}, \\ S_{1y}^{2\#} = 5\text{ m}, t_1^{2\#} = t_{1j}^{2\#} + t_{1y}^{2\#} + t_t = 9.8\text{ s}, \\ t_{2j}^{2\#} = 2\text{ s}, S_{2j}^{2\#} = 2\text{ m}, t_{2y}^{2\#} = 7.75\text{ s}, \\ S_{2y}^{2\#} = 15.5\text{ m}, t_2^{2\#} = t_{2j}^{2\#} + t_{2y}^{2\#} + t_t = 15.05\text{ s}.$$

此20人的候梯时间、乘梯时间分别为 $20 \times (19.6 + t_1^{2\#}) = 588\text{ s}$, $20 \times (t_{2y}^{2\#} + t_{2j}^{2\#}) = 195\text{ s}$.

综上, 所有呼梯信号都已响应完毕, 该派梯方案的各项指标值如下: 累计候梯时间为1439.95 s, 对应平均候梯时间为 $\text{AWT} = 22.50\text{ s}$; 累计乘梯时间为597.75 s, 对应平均乘梯时间为 $\text{ART} = 9.34\text{ s}$; 累计起停次数为9.

附录2 自寻优控制派梯方案(Appendix 1 Self-optimal control elevator scheduling schemes)

首先, 1#电梯响应60人呼梯信号, 并装载20人去往8层, 该过程的数据指标如下:

$$t_{1j}^{1\#} = 2\text{ s}, S_{1j}^{1\#} = 2\text{ m}, t_{1y}^{1\#} = 7.75\text{ s}, \\ S_{1y}^{1\#} = 15.5\text{ m}, t_1^{1\#} = t_{1j}^{1\#} + t_{1y}^{1\#} + t_t = 15.05\text{ s}.$$

依据上节计算习惯, 此时该20人的候梯时间为 $20 \times t_t = 106\text{ s}$; 同时, 对应的乘梯时间为 $20 \times (t_{1j}^{1\#} + t_{1y}^{1\#}) = 195\text{ s}$. 由于仍余40人, 其将在开关门耗时5.3 s之后及时更新客流登记情况.

与1#电梯同时开始响应呼梯信号的2#电梯将首先响应3层至1层的请求, 并将其直接送往1层. 整个过程的数据特征如下:

$$t_{1j}^{2\#} = 2\text{ s}, S_{1j}^{2\#} = 2\text{ m}, t_{1y}^{2\#} = 2.5\text{ s}, \\ S_{1y}^{2\#} = 5\text{ m}, t_1^{2\#} = t_{1j}^{2\#} + t_{1y}^{2\#} + t_t = 9.8\text{ s}.$$

此1人的候梯时间为5.3 s, 乘梯时间为4.5 s.

在开始派梯的5.3 s之后, 只有3#电梯闲置, 其将运输3层的20人至8层. 整个过程的数据指标如下:

$$t_{1j}^{3\#} = 2\text{ s}, S_{1j}^{3\#} = 2\text{ m}, t_{1y}^{3\#} = 7.75\text{ s}, \\ S_{1y}^{3\#} = 15.5\text{ m}, t_1^{3\#} = t_{1j}^{3\#} + t_{1y}^{3\#} + 2t_t = 20.35\text{ s}.$$

所以, 此20人的候梯时间为 $20 \times 2t_t = 212\text{ s}$, 乘梯时间为195 s. 考虑到在1#, 3#电梯执行派梯任务时, 2#电梯已经完成当前任务, 则2层上行呼梯信号由2#电梯响应, 该过程数据指标如下:

$$t_{2j}^{2\#} = 2\text{ s}, S_{2j}^{2\#} = 2\text{ m}, t_{2y}^{2\#} = 0.75\text{ s}, \\ S_{2y}^{2\#} = 1.5\text{ m}, t_2^{2\#} = t_{2j}^{2\#} + t_{2y}^{2\#} + t_t = 8.05\text{ s},$$

则此3人的候梯时间为 $20 \times (t_1^{2\#} + t_2^{2\#}) = 53.55\text{ s}$. 随后, 2#电梯运行至3层, 该过程数据指标为

$$t_{3j}^{2\#} = 2\text{ s}, S_{3j}^{2\#} = 2\text{ m}, t_{3y}^{2\#} = 0.75\text{ s}, \\ S_{3y}^{2\#} = 1.5\text{ m}, t_3^{2\#} = t_{3j}^{2\#} + t_{3y}^{2\#} + t_t = 8.05\text{ s},$$

于是, 此3人的乘梯时间为 $3 \times (t_{3y}^{2\#} + t_{3j}^{2\#}) = 8.25\text{ s}$. 对比3部电梯完成当前任务的时间:

$$1\#: t_1^{1\#} = 15.05\text{ s}, \\ 2\#: t_1^{2\#} + t_2^{2\#} + t_3^{2\#} = 9.8 + 8.05 + 8.05 = 25.9\text{ s}, \\ 3\#: t_1^{3\#} = 20.35\text{ s},$$

则将1#电梯返回3层接取最后的20人. 其返回过程的数据特征如下:

$$t_{2j}^{1\#} = 2\text{ s}, S_{2j}^{1\#} = 2\text{ m}, t_{2y}^{1\#} = 7.75\text{ s}, \\ S_{2y}^{1\#} = 15.5\text{ m}, t_2^{1\#} = t_{2j}^{1\#} + t_{2y}^{1\#} + t_t = 15.05\text{ s}.$$

此时, 20人的候梯时间为 $20 \times (t_1^{1\#} + t_2^{1\#}) = 602\text{ s}$, 随后其将运行至8层, 对应20人的乘梯时间为195 s.

综上, 所有呼梯信号都已响应完毕, 该派梯方案的各项指标值如下: 累计候梯时间为978.85 s, 对应平均候梯时间为 $\text{AWT} = 15.29\text{ s}$; 累计乘梯时间为597.75 s; 对应平均乘梯时间为 $\text{ART} = 9.34\text{ s}$; 累计起停次数为7.

作者简介:

李晓理 (1971-), 男, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制和智能控制等研究, E-mail: lixiaoli@hotmail.com;

王志磊 (1987-), 男, 硕士研究生, 从事优化调度等研究, E-mail: cjzz2005@yahoo.com.cn;

刘德馨 (1987-), 女, 博士研究生, 从事优化调度等研究, E-mail: bjldxin@126.com;

王尚君 (1958-), 男, 工程师, 从事智能控制及工业自动化研究, E-mail: zdhwjsj@sina.com.