文章编号: 1000−8152(2012)01−0027−07

电梯群的可调整鲁棒优化调度

王 芳, 宗 群, 张景龙, 李俊芳

(天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 为解决电梯群控调度(GES)中乘客交通流不确定问题, 提出基于可调整鲁棒优化的电梯群控调度方法. 基于对电梯交通流的不确定特性分析, 建立了电梯群控调度的不确定优化模型. 利用可调整鲁棒优化方法将电梯群控调度的不确定模型转化为其可调整鲁棒对等式. 在此基础上, 证明了在不确定集为椭球集直积时, 电梯群控调度模型的可调整鲁棒对等式(ARC)是可计算的. 仿真验证表明, 与其他的调度方法相比, 该方法具有较好的调度性能, 提高了调度对不同乘客交通流模式的适应性.

关键词: 电梯群控调度; 不确定; 乘客交通流; 可调整鲁棒对等式

中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Adjustable robust optimization scheduling for group elevator system

WANG Fang, ZONG Qun, ZHANG Jing-long, LI Jun-fang

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A scheduling method based on adjustable robust optimization is proposed for the group elevator scheduling (GES) with uncertainty in passenger traffic-flow. An uncertain optimal model of the elevator group is developed based on the uncertain characteristics of passenger traffic-flow. The uncertain model is transformed into its adjustable robust counterpart by using the adjustable robust optimization approach. This adjustable robust counterpart (ARC) is proved to be computable when the uncertain set is the direct product of ellipsoidal sets. The simulation experiments show that the proposed method surpasses other methods in scheduling performance and in adapting different passenger traffic-flow patterns.

Key words: group elevator scheduling; uncertainty; passenger traffic-flow; adjustable robust counterpart

1 引言(Introduction)

电梯群控调度(GES)问题是一个具有不确定性、目标多样化等特点的优化问题. 对乘客交通流的预测研究是研究群控调度方法的基础, 而乘客交通流的不确定对电梯群控调度起到关键性的影响, 所以对乘客交通流的特性进行分析对解决群控调度问题是非常必要的. 针对乘客交通流不确定问题, 目的楼层调度[1−2]在一定程度上解决了其不确定, Cameras技术[3]也减小了乘客交通流不确定性的影响. 但他们没有考虑未来乘客交通流(以下简称“客流”)状况, 会导致当前时刻调度性能好, 但下一时刻调度性能可能较差的情形. 本文考虑当前时刻和下一时刻客流状况, 先对客流的特性进行分析, 然后采用Poisson分布对未来客流进行预测.

针对客流不确定的电梯群控调度问题, 文献[4−5]将鲁棒优化理论应用到电梯群控调度中, 和以前的最小等待时间算法、 静态分区算法[6]相比, 具有较好的调度效果.

在带有不确定参数的决策问题中, 如果所有决策变量在不确定参数确定前已经确定, 则采用鲁棒优化方法解决这类问题是非常有效的. 但是在一些问题中尤其是实际问题中, 并不是所有的决策变量在不确定参数确定前就已确定. 那么采用可调整鲁棒优化方法则更为合理. 可调整鲁棒优化方法的思想是把决策变量分为可调整变量和不可调整变量进行分阶段决策. 它是Ben-Tal等在2004年提出的[7], 此后有很多学者对其进行研究, 它被应用于地铁线设计[8]、救济物资分发[9]、产品储存与管理[10]、多阶段投资[11]、通讯网络的设计[12]等领域. 可调整鲁棒优化方法与鲁棒优化方法的都是通过将不确定优化问题转化为相应的鲁棒对等式, 使原问题的可行解具有良好的鲁棒性. 对于电梯群控系统, 在调度过程中电梯的调度策略(决策变量)随着乘客交通流(不确定参数)的变化进行调整, 采用可调整鲁棒优化方法比鲁棒优化方法的电梯群控调度更加合理.

本文首先从理论上证明电梯群控调度的可调整鲁棒优化方法满足:

1) 采用椭球集直积作为不确定集时, 电梯群控

收稿日期: 2010−11−16; 收修改稿日期: 2011−04−06.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60874073, 91016018).

调度的可调整鲁棒对等式是可计算的;

2) 采用可调整鲁棒优化方法得到的目标函数(服务成本)的最优值小于采用鲁棒优化方法时的最优值, 进一步在理论分析论证的基础上, 通过仿真验证本文提出的方法的有效性.

2 电梯群控调度模型(GES model)

首先给出如下定义.

定义 1 A, B为任意两个实数集合, 则它们的直积为$A\times B=\{(x,y)\,|x\in A, y\in B\}$, 即$A\times B$中任意元素是$A$中某一元素与$B$中某一元素的组合.

2.1 不确定乘客交通流预测(Predication of the uncertain passenger traffic-flow)

电梯乘客交通流是电梯群控调度的关键因素, 是指由电梯系统服务的乘客数、乘客到达时间及乘客分布情况. 在对客流的特性分析中, 综合当前客流和未来客流的情况, 将客流中各楼层外呼乘客数作为不确定参数, 文献[4−5]将第i层楼预测的外呼乘客数的误差作为不确定参数. 本文在对客流的分析中, 综合考虑当前客流状况和未来客流状况, 将不确定参数进行细化, 把各楼层外呼上行和外呼下行乘客数作为不确定参数.

事实上, 客流是一个随机量, 对大楼的客流进行观察统计, 其统计规律与某公共汽车在单位时间内来站乘车的乘客数、一个售货员接待的顾客数、以及某飞机场降落的飞机数的规律类似, 都可以用Poisson分布进行预测.

在l次伯努利实验中, 定义事件A为"要乘电梯的人数$\zeta=k$", 事件$\bar{A}$为A的对立事件. k是不断变化的, 事件A发生的概率为

$$\mathrm{P}(\zeta=k)=\begin{pmatrix} l\\ k\end{pmatrix}p^k q^{l-k}, \tag{1}$$

这里p和q分别为事件A和$\bar{A}$发生的概率. 以下介绍Poisson定理[13].

定理 1 在l次伯努利实验中, 事件A在每次伯努利事件中发生的概率是p_l(与实验次数l有关). 当$l\to\infty, lp_l\to\lambda(\lambda>0)$, 有

$$\lim_{l\to\infty} b(k;l,p_l)=\frac{\lambda^k}{k!}\mathrm{e}^{-\lambda},\ k=0,1,2,\cdots, \tag{2}$$

这里Poisson分布$\mathrm{P}(\zeta=k)=\dfrac{\lambda^k}{k!}\mathrm{e}^{-\lambda}$.

由Poisson定理知, 在某时间段内, 出现x个乘客的概率为

$$\mathrm{P}(\zeta=x)=\frac{\lambda^x}{x!}\mathrm{e}^{-\lambda}, \tag{3}$$

其中: λ为时间段内平均乘客人数, x为该时间段内乘客人数.

在电梯群控调度中, 用Poisson分布对乘客交通流进行预测时, 在真实值和预测值之间存在一定的误差, 误差关系如下:

$$P_{\mathrm{u}i}=\bar{P}_{\mathrm{u}i}+\Delta\bar{P}_{\mathrm{u}i}, \tag{4}$$

$$P_{\mathrm{d}i}=\bar{P}_{\mathrm{d}i}+\Delta\bar{P}_{\mathrm{d}i}, \tag{5}$$

这里: $\Delta\bar{P}_{\mathrm{u}i}\in[-\tau_{\mathrm{u}i},\tau_{\mathrm{u}i}]$, $\Delta P_{\mathrm{d}i}\in[-\tau_{\mathrm{d}i},\tau_{\mathrm{d}i}]$, 其中: $P_{\mathrm{u}i}, P_{\mathrm{d}i}, \bar{P}_{\mathrm{u}i}, \bar{P}_{\mathrm{d}i}, \Delta\bar{P}_{\mathrm{u}i}, \Delta\bar{P}_{\mathrm{d}i}, \tau_{\mathrm{u}i}, \tau_{\mathrm{d}i}$分别表示第$i$层楼当前实际的外呼上(下)行人数与下一时刻实际的外呼上(下)行的乘客数之和, 第i层楼当前的实际外呼上(下)行乘客数与下一时刻预测的外呼上(下)行的乘客数之和, 外呼上(下)行的乘客数预测误差, 外呼上(下)行乘客数的预测误差上界. 采用Poisson分布进行预测, 可以解决未来乘客交通流不确定性对电梯群控调度的影响.

对乘客交通流进行分析后, 以下建立电梯群控调度模型.

2.2 电梯群控调度不确定优化模型(Uncertain optimization model of GES)

采用按层派梯的思想, 以m层大楼配置n部电梯为例, 上、下行的外呼请求数各为$m-1$, 对于各层要求上、下行的外呼请求, 只有一部电梯去响应.

在建立模型之前, 定义如下符号:

$r_{\mathrm{u}i}(r_{\mathrm{d}i})$表示第$i$层楼上(下)行外呼服务成本矩阵:

$$r^{\mathrm{T}}_{\mathrm{u}i}=(r_{\mathrm{u}i1}, r_{\mathrm{u}i2},\cdots,r_{\mathrm{u}in}),$$
$$r^{\mathrm{T}}_{\mathrm{d}i}=(r_{\mathrm{d}i1}, r_{\mathrm{d}i2},\cdots,r_{\mathrm{d}in}).$$

$x_{\mathrm{u}i}(x_{\mathrm{d}i})$表示第$i$层楼调度策略(决策变量),

$$x^{\mathrm{T}}_{\mathrm{u}i}=(x_{\mathrm{u}i1}, x_{\mathrm{u}i2},\cdots,x_{\mathrm{u}in}),$$
$$x^{\mathrm{T}}_{\mathrm{d}i}=(x_{\mathrm{d}i1}, x_{\mathrm{d}i2},\cdots,x_{\mathrm{d}in}).$$

$x_{\mathrm{u}ij}(x_{\mathrm{d}ij})=0$或1, 表示第$i$层楼第$j$部电梯是否响应外呼上行(下行); $x_{\mathrm{u}ij}(x_{\mathrm{d}ij})=1$, 表示第$i$层楼第$j$部电梯响应外呼上行(下行), 否则

$$x_{\mathrm{u}ij}(x_{\mathrm{d}ij})=0,\ i=1,\cdots,m,\ j=1,\cdots,n.$$

建立电梯群控调度不确定优化模型为

$$\min_{x_{\mathrm{u}i},x_{\mathrm{d}i}}\sum_{i=1}^{m-1}P_{\mathrm{u}i}r^{\mathrm{T}}_{\mathrm{u}i}x_{\mathrm{u}i}+\sum_{i=2}^{m}P_{\mathrm{d}i}r^{\mathrm{T}}_{\mathrm{d}i}x_{\mathrm{d}i},$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U=U_1\times U_2\\ U_1=\{P_{\mathrm{u}i}|\sum\limits_{i=1}^{m-1}\dfrac{(P_{\mathrm{u}i}-\bar{P}_{\mathrm{u}i})^2}{\tau^2_{\mathrm{u}i}}\leqslant\eta^2_1\},\\ U_2=\{P_{\mathrm{d}i}|\sum\limits_{i=2}^{m}\dfrac{(P_{\mathrm{d}i}-\bar{P}_{\mathrm{d}i})^2}{\tau^2_{\mathrm{d}i}}\leqslant\eta^2_2\},\\ x_{\mathrm{u}i}=(x_{\mathrm{u}i1},x_{\mathrm{u}i2},\cdots,x_{\mathrm{u}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{d}i}=(x_{\mathrm{d}i1},x_{\mathrm{d}i2},\cdots,x_{\mathrm{d}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{u}ij},x_{\mathrm{d}ij}\in\{0,1\}.\end{cases} \tag{6}$$

引入松弛变量C, 式(6)可以写为

$$\min_{x_{\mathrm{u}i},x_{\mathrm{d}i},c} C,$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum\limits_{i=1}^{m-1}P_{\mathrm{u}i}r_{\mathrm{u}i}^{\mathrm{T}}x_{\mathrm{u}i}+\sum\limits_{j=2}^{m}P_{\mathrm{d}i}r_{\mathrm{d}i}^{\mathrm{T}}x_{\mathrm{d}i}\leqslant C,\\ (P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U=U_1\times U_2,\\ U_1=\{P_{\mathrm{u}i}|\sum\limits_{i=1}^{m-1}\dfrac{(P_{\mathrm{u}i}-\bar{P}_{\mathrm{u}i})^2}{\tau_{\mathrm{u}i}^2}\leqslant\eta_1^2\},\\ U_2=\{P_{\mathrm{d}i}|\sum\limits_{i=2}^{m}\dfrac{(P_{\mathrm{d}i}-\bar{P}_{\mathrm{d}i})^2}{\tau_{\mathrm{d}i}^2}\leqslant\eta_2^2\},\\ x_{\mathrm{u}i}=(x_{\mathrm{u}i1},x_{\mathrm{u}i2},\cdots,x_{\mathrm{u}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{d}i}=(x_{\mathrm{d}i1},x_{\mathrm{d}i2},\cdots,x_{\mathrm{d}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{u}ij},x_{\mathrm{d}ij}\in\{0,1\}.\end{cases}\tag{7}$$

式(6)转化为仅约束里含有不确定参数的优化模型(7), 下面研究式(7)的可调整鲁棒对等式.

3 电梯群控调度模型的可调整鲁棒对等式 (ARC of GES model)

在电梯群控调度中, 调度方案随着外呼乘客数的变化而进行调整, 即$x_{\mathrm{u}i}$, $x_{\mathrm{d}i}$与$P_{\mathrm{u}i}$, $P_{\mathrm{d}i}$有如下关系:

$$x_{\mathrm{u}i}=x_{\mathrm{u}i}^0+\sum_{k=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{u}i}}{T}\rfloor}x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)},\tag{8a}$$

$$x_{\mathrm{d}i}=x_{\mathrm{d}i}^0+\sum_{k=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{d}i}}{T}\rfloor}x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)},\tag{8b}$$

$\lfloor s\rfloor$为小于等于s的最大整数, T表示轿厢额定容量.

由文献[11], 依赖于不确定集并随着不确定参数变化调整其值的变量称为可调整变量; 在不确定参数实现前就已确定的变量称为不可调整变量. 由此可知, $x_{\mathrm{u}i}$, $x_{\mathrm{d}i}$为可调整变量. 由式(8)可得, $x_{\mathrm{u}i}^0$, $x_{\mathrm{d}i}^0$为不可调整变量, $x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)}$, $x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)}$为新的可调整变量.

式(8)代入式(7)得

$$\min_{x_{\mathrm{u}i}^0,x_{\mathrm{d}i}^0,c} C,$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum\limits_{i=1}^{m-1}P_{\mathrm{u}i}r_{\mathrm{u}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{u}i}^0+\sum\limits_{k_i=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{u}i}}{T}\rfloor}x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)})+\\ \sum\limits_{i=2}^{m}P_{\mathrm{d}i}r_{\mathrm{d}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{d}i}^0+\sum\limits_{k_i=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{d}i}}{T}\rfloor}x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)})-C\leqslant 0,\\ \forall(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U=U_1\times U_2,\\ U_1=\{P_{\mathrm{u}i}|\sum\limits_{i=1}^{m-1}\dfrac{(P_{\mathrm{u}i}-\bar{P}_{\mathrm{u}i})^2}{\tau_{\mathrm{u}i}^2}\leqslant\eta_1^2\},\\ U_2=\{P_{\mathrm{d}i}|\sum\limits_{i=2}^{m}\dfrac{(P_{\mathrm{d}i}-\bar{P}_{\mathrm{d}i})^2}{\tau_{\mathrm{d}i}^2}\leqslant\eta_2^2\},\\ x_{\mathrm{u}i}=(x_{\mathrm{u}i1},x_{\mathrm{u}i2},\cdots,x_{\mathrm{u}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{d}i}=(x_{\mathrm{d}i1},x_{\mathrm{d}i2},\cdots,x_{\mathrm{d}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{u}ij},x_{\mathrm{d}ij}\in\{0,1\}.\end{cases}\tag{9}$$

由于采用按层派梯思想, 对于各层上、下行的外呼请求, 只有一部电梯去响应. 所以

$$(1,\cdots,1)x_{\mathrm{u}i}^0=1,\ (1,\cdots,1)x_{\mathrm{d}i}^0=1,$$
$$(1,\cdots,1)x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)}=1,\ (1,\cdots,1)x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)}=1.$$

观察电梯群控调度的不确定模型式(9)可知, 式(9)为一个不确定优化问题, 为了将其转化为可调整鲁棒对等式, 首先介绍一般不确定优化问题的可调整鲁棒对等式.

考虑不确定优化问题:

$$\mathrm{P}\{\min_x\{c^{\mathrm{T}}x\colon Ax\leqslant b\}\colon[A,b]\in U\},\tag{10}$$

这里U为不确定参数集.

若$x^{\mathrm{T}}=(x_1^{\mathrm{T}},x_2^{\mathrm{T}})$, x_1, x_2分别为不可调整变量和可调整变量, $A=(A_1,A_2)$, 式(10)可写成如下形式:

$$\min_{x_1,x_2}\{c_1^{\mathrm{T}}x_1\colon A_1x_1+A_2x_2\leqslant b\}_{\xi=(A_1,A_2,b)\in U}.\tag{11}$$

式(11)的ARC和RC分别为

$$\min_{x_1}\begin{cases}c_1^{\mathrm{T}}x_1\colon\forall\zeta=(A_1,A_2,b)\in U,\\ \exists x_2\colon A_1x_1+A_2x_2\leqslant b,\end{cases}\tag{12}$$

$$\min_{x_1}\begin{cases}c_1^{\mathrm{T}}x_1\colon\exists x_2,\ \forall\zeta=(A_1,A_2,b)\in U,\\ A_1x_1+A_2x_2\leqslant b.\end{cases}\tag{13}$$

对于可调整鲁棒对等式与鲁棒对等式的可行集, 有如下定义[14].

定义 2 对任意的不确定参数, 满足可调整鲁棒对等式(12)和鲁棒对等式(13)的可行解的集合分别为式(12)和式(13)的可行集, 且都称为式(11)的鲁棒可行集.

在一般不确定优化问题的可调整鲁棒对等式的理论基础上, 研究电梯群控调度的不确定模型的可调整对等式. 由一般不确定优化问题的可调整鲁棒对等式可得, 电梯群控调度不确定模型式(9)的可调整鲁棒对等式为

$$\min_{x_{\mathrm{u}i}^0,x_{\mathrm{d}i}^0,c} C,$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\forall(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U=U_1\times U_2,\ \exists x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)},\ x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)},\\ \sum\limits_{i=1}^{m-1}P_{\mathrm{u}i}r_{\mathrm{u}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{u}i}^0+\sum\limits_{k_i=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{u}i}}{T}\rfloor}x_{\mathrm{u}i}{}^{(k_i)})+\\ \sum\limits_{i=2}^{m}P_{\mathrm{d}i}r_{\mathrm{d}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{d}i}^0+\sum\limits_{k_i=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{d}i}}{T}\rfloor}x_{\mathrm{d}i}{}^{(k_i)})-C\leqslant 0,\\ U_1=\{P_{\mathrm{u}i}|\sum\limits_{i=1}^{m-1}\dfrac{(P_{\mathrm{u}i}-\bar{P}_{\mathrm{u}i})^2}{\sigma_{\mathrm{u}i}^2}\leqslant\eta_1^2\},\\ U_2=\{P_{\mathrm{d}i}|\sum\limits_{i=2}^{m}\dfrac{(P_{\mathrm{d}i}-\bar{P}_{\mathrm{d}i})^2}{\sigma_{\mathrm{d}i}^2}\leqslant\eta_2^2\},\\ x_{\mathrm{u}i}=(x_{\mathrm{u}i1},x_{\mathrm{u}i2},\cdots,x_{\mathrm{u}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{d}i}=(x_{\mathrm{d}i1},x_{\mathrm{d}i2},\cdots,x_{\mathrm{d}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{u}ij},x_{\mathrm{d}ij}\in\{0,1\}.\end{cases}\tag{14}$$

为比较可调整鲁棒对等式与鲁棒对等式之间的区别, 式(9)的鲁棒对等式为

$$\min_{x^0_{\mathrm{u}i},x^0_{\mathrm{d}i},c} C,$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}\exists x^{(k_i)}_{\mathrm{u}i}, x^{(k_i)}_{\mathrm{d}i},\ \forall(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U=U_1\times U_2,\\ \sum\limits_{i=1}^{m-1}P_{\mathrm{u}i}r^{\mathrm{T}}_{\mathrm{u}i}(x^0_{\mathrm{u}i})+\sum\limits_{k_i=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{u}i}}{T}\rfloor}x^{(k_i)}_{\mathrm{u}i}+\\ \sum\limits_{i=2}^{m}P_{\mathrm{d}i}r^{\mathrm{T}}_{\mathrm{d}i}(x^0_{\mathrm{d}i})+\sum\limits_{k_i=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{d}i}}{T}\rfloor}x^{(k_i)}_{\mathrm{d}i}-C\leqslant 0,\\ U_1=\{P_{\mathrm{u}i}|\sum\limits_{i=1}^{m-1}\dfrac{(P_{\mathrm{u}i}-\bar P_{\mathrm{u}i})^2}{\sigma^2_{\mathrm{u}i}}\leqslant\eta^2_1\},\\ U_2=\{P_{\mathrm{d}i}|\sum\limits_{i=2}^{m}\dfrac{(P_{\mathrm{d}i}-\bar P_{\mathrm{d}i})^2}{\sigma^2_{\mathrm{d}i}}\leqslant\eta^2_2\},\\ x_{\mathrm{u}i}=(x_{\mathrm{u}i1},x_{\mathrm{u}i2},\cdots,x_{\mathrm{u}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{d}i}=(x_{\mathrm{d}i1},x_{\mathrm{d}i2},\cdots,x_{\mathrm{d}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{u}ij},x_{\mathrm{d}ij}\in\{0,1\}.\end{cases}\tag{15}$$

3.1 电梯群控调度模型的可调整鲁棒对等式的可计算性(Computational ability of ARC of GES)

在实际应用中, 大多数可调整鲁棒对等式不是可计算处理的, 只能通过求解它的近似问题, 但是如果选择合适的不确定集, 可调整鲁棒对等式是可计算的. 本文采用椭球集的直积作为不确定集, 以下证明当电梯群控调度模型采用椭球集的直积为不确定集时, 其可调整鲁棒对等式是可计算的.

定义不可调整变量$x^0_{\mathrm{u}i}, x^0_{\mathrm{d}i}$的系数矩阵为$A_1$, $x^{\mathrm{T}}_1=((x^0_{\mathrm{u}i})^{\mathrm{T}},(x^0_{\mathrm{d}i})^{\mathrm{T}})$, 可调整变量$x^{(k_i)}_{\mathrm{u}i}, x^{(k_i)}_{\mathrm{d}i}$的系数矩阵为$A_2$, A_2是确定的, $x^{\mathrm{T}}_2=((x^{(k_i)}_{\mathrm{u}i})^{\mathrm{T}},(x^{(k_i)}_{\mathrm{d}i})^{\mathrm{T}})$, $P_{\mathrm{u}i}$, $P_{\mathrm{d}i}$为不确定参数, 不确定集为椭球集的直积. 电梯群控调度的不确定优化模型式(9)等价于

$$\min_{x_1,C} C,$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}A_1x_1+A_2x_2-C\leqslant 0,\\ \forall(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U=U_1\times U_2,\\ U_1=\{P_{\mathrm{u}i}|\sum\limits_{i=1}^{m-1}\dfrac{(P_{\mathrm{u}i}-\bar P_{\mathrm{u}i})^2}{\tau^2_{\mathrm{u}i}}\leqslant\eta^2_1\},\\ U_2=\{P_{\mathrm{d}i}|\sum\limits_{i=2}^{m}\dfrac{(P_{\mathrm{d}i}-\bar P_{\mathrm{d}i})^2}{\tau^2_{\mathrm{d}i}}\leqslant\eta^2_2\},\\ x_{\mathrm{u}i}=(x_{\mathrm{u}i1},x_{\mathrm{u}i2},\cdots,x_{\mathrm{u}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{d}i}=(x_{\mathrm{d}i1},x_{\mathrm{d}i2},\cdots,x_{\mathrm{d}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{u}ij},x_{\mathrm{d}ij}\in\{0,1\}.\end{cases}\tag{16}$$

对于式(9)的可调整鲁棒式(14)的可计算性, 有如下定理:

定理 2 如果电梯群控调度的不确定优化模型式(9)满足: 1) 可调整变量$x_2=A_3(\xi)$, 且x_2的系数矩阵A_2是确定的; 2) 不确定集合U是椭球集的直积, 即$U=U_1\times U_2$, $A_1\in U_1$, $A_2\in U_2$, U_1, U_2为椭球集. 那么ARC式(14)是可计算的.

证 因为不可调整变量$x^0_{\mathrm{u}i}, x^0_{\mathrm{d}i}$的系数矩阵为$A_1$, $x^{\mathrm{T}}_1=((x^0_{\mathrm{u}i})^{\mathrm{T}},(x^0_{\mathrm{d}i})^{\mathrm{T}})$, 可调整变量$x^{(k_i)}_{\mathrm{u}i}, x^{(k_i)}_{\mathrm{d}i}$的系数矩阵为$A_2$且是确定的, 又由

$$x^{\mathrm{T}}_2=((x^{(k_i)}_{\mathrm{u}i})^{\mathrm{T}},(x^{(k_i)}_{\mathrm{d}i})^{\mathrm{T}}),$$

所以, 式(14)可写为

$$\min_{x_1,C} C,$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}\forall(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U=U_1\times U_2,\\ \exists x_2, A_1x_1+A_2x_2-C\leqslant 0,\\ U_1=\{P_{\mathrm{u}i}|\sum\limits_{i=1}^{m-1}\dfrac{(P_{\mathrm{u}i}-\bar P_{\mathrm{u}i})^2}{\tau^2_{\mathrm{u}i}}\leqslant\eta^2_1\},\\ U_2=\{P_{\mathrm{d}i}|\sum\limits_{i=2}^{m}\dfrac{(P_{\mathrm{d}i}-\bar P_{\mathrm{d}i})^2}{\tau^2_{\mathrm{d}i}}\leqslant\eta^2_2\},\\ x_{\mathrm{u}i}=(x_{\mathrm{u}i1},x_{\mathrm{u}i2},\cdots,x_{\mathrm{u}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{d}i}=(x_{\mathrm{d}i1},x_{\mathrm{d}i2},\cdots,x_{\mathrm{d}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{u}ij},x_{\mathrm{d}ij}\in\{0,1\}.\end{cases}\tag{17}$$

因为$x_2=A_3(\xi)$, A_2是确定的. 令$x^{\mathrm{T}}_3=(x^{\mathrm{T}}_1,A^{\mathrm{T}}_3(\xi))$, $A^{\mathrm{T}}_4(\xi)=(A^{\mathrm{T}}_1(\xi),A^{\mathrm{T}}_2)$, 所以, 式(17)等价为

$$\min_{x_3} C,$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}\forall(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U=U_1\times U_2,\\ A_4(\xi)x_3-C\leqslant 0,\\ U_1=\{P_{\mathrm{u}i}|\sum\limits_{i=1}^{m-1}\dfrac{(P_{\mathrm{u}i}-\bar P_{\mathrm{u}i})^2}{\tau^2_{\mathrm{u}i}}\leqslant\eta^2_1\},\\ U_2=\{P_{\mathrm{d}i}|\sum\limits_{i=2}^{m}\dfrac{(P_{\mathrm{d}i}-\bar P_{\mathrm{d}i})^2}{\tau^2_{\mathrm{d}i}}\leqslant\eta^2_2\},\\ x_{\mathrm{u}i}=(x_{\mathrm{u}i1},x_{\mathrm{u}i2},\cdots,x_{\mathrm{u}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{d}i}=(x_{\mathrm{d}i1},x_{\mathrm{d}i2},\cdots,x_{\mathrm{d}in})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{u}ij},x_{\mathrm{d}ij}\in\{0,1\}.\end{cases}\tag{18}$$

式(18)的简化形式为

$$\min_{x_3} C,\quad \text{s.t.}\begin{cases}\forall(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U=U_1\times U_2,\\ A_4(\xi)x_3\leqslant C.\end{cases}\tag{19}$$

上式为不确定优化问题

$$\min_{x_3=(x_1,A_3)} C,\quad \text{s.t. } A_4x_3\leqslant C,\ A_4\in U$$

的鲁棒对等式, U是不确定椭球集$U_1\times U_2$的直积. 由文献[15]知, 式(19)是可计算的, 且可转化为二次规划问题. 而二次规划有很多方法可以计算. 所以, 可调整鲁棒对等式(14)是可计算的. 证毕.

3.2 可调整鲁棒对等式的求解(Computation of ARC)

本文通过求解电梯群控调度不确定模型的可调整鲁棒对等式以达到求解电梯群控调度不确定模型的目标.

假设大楼有16层, 配置4部电梯, 轿厢的容量为

14, 即$m=16$, $n=4$, $T=14$, 则需要求解的ARC为

$$\min_{x_{\mathrm{u}i}^0,x_{\mathrm{d}i}^0,c} C,$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}\forall(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U=U_1\times U_2,\\ \exists x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)},x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)},\\ \sum_{i=1}^{15}P_{\mathrm{u}i}r_{\mathrm{u}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{u}i}^0+\sum_{k_i=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{u}i}}{14}\rfloor}x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)})+\\ \sum_{i=2}^{16}P_{\mathrm{d}i}r_{\mathrm{d}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{d}i}^0+\sum_{k_i=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{d}i}}{14}\rfloor}x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)})-C\leqslant 0,\\ U_1=\{P_{\mathrm{u}i}|\sum_{i=1}^{15}\frac{(P_{\mathrm{u}i}-\bar{P}_{\mathrm{u}i})^2}{\tau_{\mathrm{u}i}^2}\leqslant\eta_1^2\},\\ U_2=\{P_{\mathrm{d}i}|\sum_{i=2}^{16}\frac{(P_{\mathrm{d}i}-\bar{P}_{\mathrm{d}i})^2}{\tau_{\mathrm{d}i}^2}\leqslant\eta_2^2\},\\ x_{\mathrm{u}i}=(x_{\mathrm{u}i1},x_{\mathrm{u}i2},x_{\mathrm{u}i3},x_{\mathrm{u}i4})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{d}i}=(x_{\mathrm{d}i1},x_{\mathrm{d}i2},x_{\mathrm{d}i3},x_{\mathrm{d}i4})^{\mathrm{T}},\\ x_{\mathrm{u}ij},x_{\mathrm{d}ij}\in\{0,1\}.\end{cases}$$

由式(4)−(5)得

$$\sum_{i=1}^{15}\frac{(P_{\mathrm{u}i}-\bar{P}_{\mathrm{u}i})^2}{\tau_{\mathrm{u}i}^2}\leqslant 15=(\sqrt{15})^2,$$

$$\sum_{i=2}^{16}\frac{(P_{\mathrm{d}i}-\bar{P}_{\mathrm{d}i})^2}{\tau_{\mathrm{d}i}^2}\leqslant 15=(\sqrt{15})^2.$$

取$\eta_1=\eta_2=4$, 上式可以转化为

$$\min_{x_{\mathrm{u}i}^0,x_{\mathrm{d}i}^0,x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)},x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)},c} C,$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum_{i=1}^{15}\bar{P}_{\mathrm{u}i}r_{\mathrm{u}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{u}i}^0+\sum_{k_i=1}^{\lfloor\frac{\bar{P}_{\mathrm{u}i}+\tau_{\mathrm{u}i}}{14}\rfloor}x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)})+\\ \sum_{i=2}^{16}\bar{P}_{\mathrm{d}i}r_{\mathrm{d}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{d}i}^0+\sum_{k_i=1}^{\lfloor\frac{\bar{P}_{\mathrm{u}i}+\tau_{\mathrm{d}i}}{14}\rfloor}x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)})-\\ 4\sqrt{\sum_{i=1}^{15}(\bar{P}_{\mathrm{u}i}r_{\mathrm{u}i}^{\mathrm{T}}\sum_{k_i=1}^{\lfloor\frac{\bar{P}_{\mathrm{u}i}+\tau_{\mathrm{u}i}}{14}\rfloor}x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)})^2\tau_{\mathrm{u}i}^2}-\\ 4\sqrt{\sum_{i=2}^{16}(\bar{P}_{\mathrm{d}i}r_{\mathrm{d}i}^{\mathrm{T}}\sum_{k_i=1}^{\lfloor\frac{\bar{P}_{\mathrm{d}i}+\tau_{\mathrm{d}i}}{14}\rfloor}x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)})^2\tau_{\mathrm{d}i}^2}\leqslant C,\\ x_{\mathrm{u}ij},x_{\mathrm{d}ij}\in\{0,1\}.\end{cases}$$

代入相关数据, 转化后的式子为确定的0−1规划问题. 0−1规划问题是特殊的整数规划问题, 对此类问题可通过分支定界法、Gomory割平面法进行求解.

3.3 电梯群控调度模型的可调整鲁棒对等式的最优值(Optimal value of ARC of GES model)

对于电梯群控调度的不确定优化问题, 采用可调整鲁棒优化方法有以下定理成立.

定理 3　在电梯群控调度系统中, 设其模型的可调整鲁棒对等式(14)和鲁棒对等式(15)的可行集分别为F_1, F_2, 那么有$F_2\subset F_1$. 且可调整鲁棒对等式(14)的最优值优于鲁棒对等式(15)的最优值.

证　可调整鲁棒对等式(14)和鲁棒对等式(15)的可行集分别为

$$F_1=\{x_{\mathrm{u}i}^0,x_{\mathrm{d}i}^0|\forall\xi=(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U,\exists x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)},x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)},\\ \sum_{i=1}^{m-1}P_{\mathrm{u}i}r_{\mathrm{u}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{u}i}^0+\sum_{k_i=1}^{[\frac{P_{\mathrm{u}i}}{T}]}x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)})+\\ \sum_{i=2}^{m}P_{\mathrm{d}i}r_{\mathrm{d}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{d}i}^0+\sum_{k_i=1}^{[\frac{P_{\mathrm{d}i}}{T}]}x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)})-C\leqslant 0\},$$

$$F_2=\{x_{\mathrm{u}i}^0,x_{\mathrm{d}i}^0|\exists x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)},x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)},\forall\xi=(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U,\\ \sum_{i=1}^{m-1}P_{\mathrm{u}i}r_{\mathrm{u}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{u}i}^0+\sum_{k_i=1}^{[\frac{P_{\mathrm{u}i}}{T}]}x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)})+\\ \sum_{i=2}^{m}P_{\mathrm{d}i}r_{\mathrm{d}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{d}i}^0+\sum_{k_i=1}^{[\frac{P_{\mathrm{d}i}}{T}]}x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)})-C\leqslant 0\}.$$

要证$F_2\subset F_1$, 只需证明$\forall x_{\mathrm{u}i}^0,x_{\mathrm{d}i}^0\in F_2$都有$x_{\mathrm{u}i}^0$, $x_{\mathrm{d}i}^0\in F_1$, 对$\forall x_{\mathrm{u}i}^0,x_{\mathrm{d}i}^0\in F_2$, 存在$x_{\mathrm{u}i}^{(k)},x_{\mathrm{d}i}^{(k)}$(各自至少一个)使得, 对$\forall\xi=(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U_1\times U_2$有

$$\sum_{i=1}^{m-1}P_{\mathrm{u}i}r_{\mathrm{u}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{u}i}^0+\sum_{k_i=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{u}i}}{T}\rfloor}x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)})+\\ \sum_{i=2}^{m}P_{\mathrm{d}i}r_{\mathrm{d}i}^{\mathrm{T}}(x_{\mathrm{d}i}^0+\sum_{k_i=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{d}i}}{T}\rfloor}x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)})-C\leqslant 0.$$

另外, 对$\forall\xi=(P_{\mathrm{u}i},P_{\mathrm{d}i})\in U_1\times U_2$, 至少存在

$$\bar{x}_{\mathrm{u}i}^{(k)}=x_{\mathrm{u}i}^{(k)},\ \bar{x}_{\mathrm{d}i}^{(k)}=x_{\mathrm{d}i}^{(k)}$$

使得

$$\sum_{i=1}^{m-1}P_{\mathrm{u}i}r_{\mathrm{u}i}^{\mathrm{T}}(\bar{x}_{\mathrm{u}i}^0+\sum_{k_i=1}^{\lfloor\frac{P_{\mathrm{u}i}}{T}\rfloor}x_{\mathrm{u}i}^{(k_i)})+\\ \sum_{i=2}^{m}P_{\mathrm{d}i}r_{\mathrm{d}i}^{\mathrm{T}}(\bar{x}_{\mathrm{d}i}^0+\sum_{k_i=1}^{[\frac{P_{\mathrm{d}i}}{T}]}x_{\mathrm{d}i}^{(k_i)})-C\leqslant 0.$$

由此可得

$$\bar{x}_{\mathrm{u}i}^0=x_{\mathrm{u}i}^0,\ \bar{x}_{\mathrm{d}i}^0=x_{\mathrm{d}i}^0.$$

即$x_{\mathrm{u}i}^0$, $x_{\mathrm{d}i}^0\in F_1$, 所以, $F_2\subset F_1$. 由文献[11]可知, 同一不确定优化问题的可调整鲁棒优化方法比鲁棒优化方法的最优值更优. 所以, 可调整鲁棒对等式(14)优于鲁棒对等式(15)的最优值.　　证毕.

以上定理说明, 采用可调整鲁棒优化方法的电梯群控调度得到的服务成本小于采用鲁棒优化方法时的服务成本.

4 仿真验证(Simulation test)

在电梯群控调度仿真环境[16]下对本文提出的方法进行仿真验证并对仿真结果进行分析. 以某16层大楼配置4部电梯为例. 首先设定仿真环境的参数:

1) 大楼参数: 一楼门厅的高度为4 m; 其他楼层高度为3 m; 电梯参数: 4部电梯, 每部电梯速度为2.5 m/s, 加速度为1 m/s², 加加速度为1.8 m/s³, 额定容量12人, 开关门时间4 s, 单个乘客转移时间1 s.

2) 选择4种调度算法进行仿真: 基于静态分区算法(static zoning, SZ)、基于多智能体算法(multi-agent, MA)、基于鲁棒优化算法(RO)、基于可调整鲁棒优化算法(ARO). 比较内容: 乘客平均候梯时间(s)、乘客平均乘梯时间(s)、乘客平均拥挤度.

3) 选取3种客流进行仿真: 客流1: 上高峰, 15分钟300人; 客流2: 下高峰, 15分钟300人; 客流3: 随机层间, 15分钟100人. 仿真结果见表1−3.

表 1 上高峰调度结果

Table 1 Scheduling results of up-peak

算法	平均候梯时间/s	平均乘梯时间/s	平均拥挤度
算法a	36.67	34.87	0.80
算法b	76.32	48.76	1.01
算法c	27.83	55.36	0.98
算法d	24.53	43.91	1.35

表 2 下高峰调度结果

Table 2 Scheduling results of down-peak

算法	平均候梯时间/s	平均乘梯时间/s	平均拥挤度
算法a	36.59	34.82	5.39
算法b	108.54	47.13	4.38
算法c	31.62	27.31	4.85
算法d	27.35	27.09	4.97

表 3 随机层间调度结果

Table 3 Scheduling results of random inter-floor

算法	平均候梯时间/s	平均乘梯时间/s	平均拥挤度
算法a	62.65	39.41	1.96
算法b	31.96	25.16	0.91
算法c	23.72	26.52	0.75
算法d	23.08	25.47	0.94

对仿真结果, 进行比较分析:

静态分区算法: 相对于多智能体算法, 通过分区将高到达率的人群分流, 在高峰期间表现出较好的调度效果.

多智能体算法: 在3种乘客交通流模式下, 其调度性能表现一般.

鲁棒优化算法: 与多智能体算法、静态分区算法相比, 显示出较好的调度性能. 它考虑了客流不确定性, 在前一时刻已预测到可能的乘客出现, 而采取了相应的措施.

可调整鲁棒优化算法: 通过分别对外呼上行和外呼下行的客流做出预测, 将客流进行细化, 在不同客流模式下具有较强的适应能力, 从而做出更合理的调度决策, 除平均拥挤度外, 在平均候梯时间和平均乘梯时间上, 调度性能改善显著.

由以上仿真结果分析可知, 基于可调整鲁棒优化的电梯群控调度方法能够很好地改善电梯群控调度性能.

5 结论(Conclusions)

本文针对客流不确定的电梯群控调度问题, 提出了基于可调整鲁棒优化的电梯群控调度方法. 利用Poisson分布预测乘客交通流; 结合可调整鲁棒优化方法, 改进原有文献建立的电梯群控调度不确定优化模型. 由调度方案与交通流之间的关系, 将GES不确定优化模型转化为可调整鲁棒对等式; 在选用不确定集为椭球集的直积时, 证明可调整鲁棒对等式是可计算的, 并提出了求解方法. 最后由仿真验证以及仿真结果的对比分析可知, 本文提出的方法有效的提高了调度性能.

参考文献(References):

[1] TANAKA S, INNAMI Y, ARAKI M. A study on objective functions for dynamic operation optimization of a single-car elevator system with destination hall call registration[C] //*Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. New York: IEEE, 2004: 6274 – 6279.

[2] 罗飞, 许玉格, 曹建忠. 基于目的楼层预约的电梯群控系统建模与控制[J]. 控制与决策, 2006, 21(10): 1159 – 1162.
(LUO Fei, XU Yuge, CAO Jianzhong. Modeling and control in elevator group control system with destination registration[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(10): 1159 – 1162.)

[3] KIM H, MOON B R. Adaptive elevator group control with cameras[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, 48(2): 377 – 382.

[4] 宗群, 王维佳, 何彦昭. 基于鲁棒优化理论的电梯群控调度策略[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 743 – 748.
(ZONG Qun, WANG Weijia, HE Yanzhao. Elevator group scheduling based on robust optimization[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(4): 743 – 748.)

[5] 宗群, 窦立谦, 王维佳. 电梯群控系统的一种鲁棒离散优化调度策略[J]. 控制与决策, 2008, 23(5): 520 – 524.
(ZONG Qun, DOU Liqian, WANG Weijia. Robust discrete optimization scheduling strategy for elevator group control system[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(5): 520 – 524.)

[6] 邢关生. 基于强化学习算法的电梯动态调度策略的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
(XING Guansheng. *The research of elevator dynamic scheduling policy based on reinforcement learning algorithm*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.)

[7] BEN-TAL A, GORYASHIKO A, GUSLITZER E, et al. Adjustable robust solutions of uncertain linear programs[J]. *Mathematical Programming*, 2004, 99(2): 351 – 376.

[8] ODELLIA B, BEN-TAL A. Adjustable robust counterpart of conic quadratic problems[J]. *Mathematical Methods of Operations Research*, 2008, 68(2): 211 – 233.

[9] TANG F, ZHANG L, HUANG J, et al. An affinely adjustable robust optimization approach to emergency logistics under uncertain demands[C] //*IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Unites States: IEEE Computer Society, 2009: 1738 – 1742.

[10] GUIGUES V. Robust production management[J]. *Optimization and Engineering*. 2009, 10(4): 505 – 532.

[11] BEN-TAL A, GOLANY B, SHTERN S. Robust multi-echelon multi-period inventory control[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 199(3): 922 – 935.

[12] LEMAECHALl C, OUOROU A, PETROU G. Robust network design in telecommunications under polytypic demand uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 206(3): 634 – 641.

[13] 魏宗舒. 概率论与数理统计教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983: 64 – 66.
(WEN Zongshu. *Probability and Statistics Tutorial*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1983: 64 – 66.)

[14] BEN-TAL A, NEMIROVKI A. Robust convex optimization[J]. *Mathematics of Operations Research*, 1998, 23(4): 769 – 805.

[15] BEN-TAL A, NEMIROVKI A. Robust solutions of uncertain linear programs[J]. *Operation Research Letters*, 1999, 25(1): 1 – 13.

[16] ZONG Q, XUE L H, WANG Z S. Virtual simulation environments of elevator group control systems[J]. *Elevator World*, 2001, (11): 90 – 93.

作者简介:

王　芳 (1984—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为可调整鲁棒优化、电梯群控调度, E-mail: fangwang@tju.edu.cn;

宗　群 (1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂系统建模与优化控制、电梯群控优化调度等, E-mail: zongqun@tju.edu.cn;

张景龙 (1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为节能电梯群控、可调整鲁棒优化, E-mail: jinglong.zhang@163.com;

李俊芳 (1974—), 女, 博士研究生, 研究方向为复杂系统建模与优化控制、电梯群控调度, E-mail: 460657277@qq.com.