第 23 卷 第 5 期 控 制 与 决 策 2008 年 5 月
Vol. 23 No. 5 Control and Decision May 2008

文章编号: 1001-0920(2008)05-0520-05

电梯群控系统的一种鲁棒离散优化调度策略

宗 群, 窦立谦, 王维佳
(天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘 要: 针对电梯群控调度过程中交通不确定的问题,提出一种电梯群控调度的鲁棒离散优化方法. 将交通流作为不确定参数,考虑当前时刻和下一时刻交通流状况,将下一时刻交通流预测的不准确性作为不确定因素,建立电梯群控调度的鲁棒离散优化模型. 针对该模型的特点,进一步提出了解决方法. 仿真结果表明,该方法在电梯群控调度性能和交通模式的适应性方面得到较大改善.

关键词: 电梯群控; 鲁棒离散优化; 鲁棒优化; 调度策略
中图分类号: TP27 **文献标识码**: A

Robust discrete optimization scheduling strategy for elevator group control system

ZONG Qun, DOU Li-qian, WANG Wei-jia
(College of Electric and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China. Correspondent: DOU Li-qian, E-mail: Liqian_dou@163.com)

Abstract: A robust discrete optimization scheduling strategy for elevator group control system is presented to deal with the uncertainty in elevator traffic flow. The elevator traffic flow is regarded as uncertain parameters, and current traffic conditions and the next are taken into account, so the predictive errors of traffic flow are seen as the uncertainties. Then the decision model for elevator group control is constructed. Solving method is proposed for the characteristics of the model. Simulation result shows that the method proposed can improve effectively the performance and adaptability of elevator group control system.

Key words: Elevator group control; Robust discrete optimization; Robust optimization; Scheduling strategy

1 引 言

电梯调度是研究如何将大楼中的乘客快速、高效地运送到目的楼层的过程,同时又要兼顾乘客生理和心理的要求. 对于配置多部电梯的大楼,一般采用群控调度方法,其核心是群控算法[1]. 目前,以群控方式调度电梯已非常普遍,也发展出许多调度算法,如分区算法、启发搜索式算法、强化学习算法以及各种智能算法[2,3]. 这些先进的调度算法在很大程度上提高了电梯调度的效率,更加适合人们的需求. 在实际中,乘客交通流总是不确定和随机的,而目前的调度方法基本上是基于当前交通流状况的,并未对未来乘客的影响加以分析,这就造成即使此时刻调度性能较好,但下一时刻调度性能也可能较差的情况. 因此,研究解决交通流的不确定性,充分考虑未来交通流状况,从而改善调度性能是电梯群控调度的关键问题. 对此,三菱公司的 Nikovski[4] 采用基于马尔可夫理论的电梯群控调度方法,建立了一个概率模型,考虑了在电梯上高峰模式下未来乘客的到达对轿厢行为的影响. 该方法能减少乘客的平均等待时间,但对交通流模式依赖较大. 而一些较新的技术(如 Cameras[5] 和目的楼层登记[6,7])在一定程度上减小了当前时刻交通流不确定性的影响. 但基于这些技术的调度方法没能有效考虑未来交通流的状况,而且,目前绝大多数的电梯系统也不具备这样的功能.

本文提出一种电梯群控调度的鲁棒离散优化策略,把交通流作为不确定参数,考虑了当前时刻和下一时刻交通流状况,将下一时刻交通流预测的不准

收稿日期: 2007-01-09; **修回日期**: 2007-06-12.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60574055); 高校博士学科点专项科研基金项目(20050056037); 天津市重点攻关项目(06YFGZGX01700).
作者简介: 宗群(1961—), 男, 天津人, 教授, 博士生导师, 从事电梯群控系统、计算机控制的研究; 窦立谦(1976—), 男, 天津人, 博士生, 从事电梯系统调度、系统优化理论的研究.

确性作为不确定因素,建立电梯群控调度的鲁棒离散优化模型,并进行有效求解.具体调度实例验证了本调度方法的有效性.

2　鲁棒离散优化

定义 1　鲁棒离散优化的定义:一个包含不确定性的离散优化问题可描述如下[8]:

$$\begin{aligned}&\min_x c^{\mathrm{T}} x,\\ &\text{s.t. } Ax \le b,\ l \le x \le u,\\ &\qquad \forall x_i \in Z,\ i = 1,2,\cdots,k. \qquad (1)\end{aligned}$$

其中:$c \in R^n$ 为目标函数系数;$l \in R^n$, $u \in R^n$ 为决策变量 x 取值的上、下界;$A \in R^{m\times n}$, $b \in R^m$ 为约束函数的系数;$x \in R^n$ 为决策变量,决策变量的前 k 个值取整数.

对上述优化问题的不确定性有如下假设:

假设 1　A 是不确定参数.令 J_i 表示矩阵 A 的第 i 行元素中受不确定性影响的系数集(如:第 2 行中第 2 和第 5 列元素不确定,则 $J_2 = \{2,5\}$).令 $\tilde{a}_{ij}$ 表示矩阵 A 的第 i 行中不确定元素,$j \in J_i$,定义 $\tilde{a}_{ij}$ 为对称有界的随机变量,则 $\tilde{a}_{ij} \in [a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$.其中:$a_{ij}$ 为标称量,$\hat{a}_{ij}$ ($\hat{a}_{ij} > 0$) 为扰动量.

假设 2　c 为不确定参数.与假设 1 类似,也可给出 c 的取值区间为 $[c_j, c_j + d_j]$.其中:c_j 表示标称值,d_j 表示相对其标称值 c_j 的偏差.

该离散优化问题为含有不确定性的优化问题,称为鲁棒离散优化问题.鲁棒优化问题与其他不确定优化问题的一个明显区别在于其强调所谓硬约束的鲁棒性,即对于每种情况,最优解必须始终保持可行性,而其他不确定优化方法则不然.事实上,鲁棒优化是基于对最坏情况优化的考虑,即所求解在最坏情况下依然保持优化特性.通过将初始的不确定优化问题转化为利用对等的确定性优化问题(鲁棒对等式)进行逼近.同时该鲁棒对等式是计算易处理(多项式可解)的,而且可估计逼近问题和原始问题之间的最优解误差[9].

定理 1　考虑如下不确定线性离散优化问题:

$$\begin{aligned}\mathrm{P}:\ &\min_x c^{\mathrm{T}} x,\\ &\text{s.t. } Ax \le b,\ l \le x \le u,\\ &\qquad \forall x_i \in Z,\ i = 1,2,\cdots,k. \qquad (2)\end{aligned}$$

各变量的定义符合定义 1,假设 1 和假设 2.则该问题的鲁棒对等式可表示成如下的优化问题:

$$\begin{aligned}&\mathrm{P}^*:\\ &\min_x\Big\{c^{\mathrm{T}} x + \max_{\{S_0|S_0\subseteq J_0,|S_0|\le\Gamma_0\}}\Big\{\sum_{j\in S_0} d_j|x_j|\Big\}\Big\},\\ &\text{s.t. } \sum_j a_{ij}x_j + \max_{\substack{\{S_i\cup\{t_i\}|S_i\subseteq J_i,\\ |S_i|=\lfloor\Gamma_i\rfloor,t_i\in J_i\setminus S_i\}}}\Big\{\sum_{j\in S_i}\hat{a}_{ij}|x_j| +\\ &\qquad (\Gamma_i - \lfloor\Gamma_i\rfloor)\hat{a}_{it_i}|x_{t_i}|\Big\} \le b_i,\\ &\qquad l \le x \le u,\ x_i \in Z,\ \forall i = 1,2,\cdots,k. \qquad (3)\end{aligned}$$

其中:目标函数中 $J_0 = \{j\,|\,d_j > 0\}$, $|J_0|$ 表示 c 内不确定元素的个数,$\Gamma_0 \in [0, |J_0|]$, S_0 为 J_0 的一个子集,且 $|S_0| \le \Gamma_0$.约束条件中,$J_i = \{j\,|\,\hat{a}_{ij} > 0\}$, $|J_i|$ 表示元素的个数;$\Gamma_i \in [0, |J_i|]$, $\lfloor\Gamma_i\rfloor$ 表示小于 Γ_i 的最大整数,$\lfloor\Gamma_i\rfloor \le \Gamma_i$;$S_i$ 为 J_i 的一个子集,即 $S_i \subseteq J_i$, $|S_i| = \lfloor\Gamma_i\rfloor$;$t_i \in J_i\setminus S_i$ 表示 $t_i \in J_i$ 但 $t_i \notin S_i$.

证明　对于约束函数 $Ax \le b$,提供一个参数 Γ_i, $\Gamma_i \in [0, |J_i|]$,引入参数 Γ_i 的目的是调整鲁棒离散优化方法的鲁棒性,控制优化解的保守程度.如果 Γ_i 不取整数,在矩阵 A 第 i 行的所有不确定元素 $\tilde{a}_{ij}$ 中,允许变化的不确定元素有 $\lfloor\Gamma_i\rfloor + 1$ 个,其中 $\lfloor\Gamma_i\rfloor$ 个元素取值为

$$\sum_{j\in S_i} a_{ij} + \max_{\{S_i\subseteq J_i,|S_i|=\lfloor\Gamma_i\rfloor\}}\sum_{j\in S_i}\hat{a}_{ij},$$

一个元素取值为

$$a_{it_i} + \max_{\{S_i\cup\{t_i\}|S_i\subseteq J_i,t_i\in J_i\setminus S_i\}}(\Gamma_i - \lfloor\Gamma_i\rfloor)\hat{a}_{it_i}.$$

不允许变化的不确定元素个数为 $|J_i| - \lfloor\Gamma_i\rfloor - 1$,这些元素取其标称值,这就符合了矩阵 A 的第 i 行中有不确定元素取其标称值的情况.对于矩阵 A 第 i 行的所有元素,除不确定元素 $\tilde{a}_{ij}$ 外,剩下的元素均为确定的,这些确定的元素也直接取其标称值.基于此,约束函数 $Ax \le b$ 便转化为如下形式:

$$\begin{aligned}&\sum_j a_{ij}x_j + \max_{\substack{\{S_i\cup\{t_i\}|S_i\subseteq J_i,\\ |S_i|=\lfloor\Gamma_i\rfloor,t_i\in J_i\setminus S_i\}}}\Big\{\sum_{j\in S_i}\hat{a}_{ij}|x_j| +\\ &(\Gamma_i - \lfloor\Gamma_i\rfloor)\hat{a}_{it_i}|x_{t_i}|\Big\} \le b_i. \qquad (4)\end{aligned}$$

同理,对于目标函数,不确定参数 c 中允许变化的不确定元素有 Γ_0 个,取值为

$$c^{\mathrm{T}}_{j\in S_0} + \max_{\{S_0|S_0\subseteq J_0,|S_0|\le\Gamma_0\}}\sum_{j\in S_0} d_j;$$

不允许变化的不确定元素有 $|J_0| - \Gamma_0$ 个,它的取值和参数 c 内确定的元素一样,均取其标称值.因此,目标函数 $c^{\mathrm{T}}x$ 便转化为如下形式:

$$c^{\mathrm{T}} x + \max_{\{S_0|S_0\subseteq J_0,|S_0|\le\Gamma_0\}}\Big\{\sum_{j\in S_0} d_j|x_j|\Big\}. \qquad (5)$$

将式(4)和(5)代替式(2)中的相应项可得式(3). □

定理 2　考虑一个如式(3)所示的离散鲁棒优化问题,等价于如下混合整数优化问题:

$$\min_x c^{\mathrm{T}} x + z_0\Gamma_0 + \sum_{j\in J_0} p_{0j},$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_j a_{ij}x_j + z_i\Gamma_i + \sum_{j\in J_i} p_{ij} \le b_i,\ \forall i,$$
$$z_0 + p_{0j} \ge d_j y_j,\ \forall j \in J_0,$$
$$z_i + p_{ij} \ge \hat{a}_{ij} y_j,\ \forall i \ne 0,\ j \in J_i,$$
$$-y_j \le x_j \le y_j,\ l_j \le x_j \le u_j,\ \forall j,$$
$$p_{ij} \ge 0,\ \forall i, j \in J_i,$$
$$y_j \ge 0,\ z_i \ge 0,\ \forall i, \forall j,$$
$$x_i \in Z,\ i = 1,2,\cdots,k, \tag{6}$$

其中 y, z, p 为松弛变量.

证明　给定一个向量 x^*,令式(3) 中

$$\max_{\{S_i\cup\{t_i\}\mid S_i\subseteq J_i, |S_i| = \lfloor\Gamma_i\rfloor, t_i\in J_i\setminus S_i\}}\Big\{\sum_{j\in S_i}\hat{a}_{ij}\,|x_j^*| + (\Gamma_i - \lfloor\Gamma_i\rfloor)\hat{a}_{it_i}\,|x_j^*|\Big\} = \beta_i(x^*,\Gamma_i), \tag{7}$$

则求解 $\beta_i(x^*,\Gamma_i)$ 可等价于求如下优化问题:

$$\beta_i(x^*,\Gamma_i) = \max \sum_{j\in J_i}\hat{a}_{ij}\,|x_j^*|\,z_{ij},$$
$$\text{s.t.}\quad \sum_{j\in J_i} z_{ij} \le \Gamma_i,\ 0 \le z_{ij} \le 1,\ \forall j \le J_i. \tag{8}$$

式(8) 的最优值由 $\lfloor\Gamma_i\rfloor$ 个值为 1 的变量和一个值为 $\Gamma_i - \lfloor\Gamma_i\rfloor$ 的变量组成. 这就等价于选择集合

$\{S_i \cup \{t_i\} \mid S_i \subseteq J_i, |S_i| = \lfloor\Gamma_i\rfloor, t_i \in J_i\setminus S_i\}$,

使其对应的值函数为

$$\sum_{j\in S_i}\hat{a}_{ij}\,|x_j^*| + (\Gamma_i - \lfloor\Gamma_i\rfloor)\,a_{it_i}\,|x_j^*|.$$

式(8) 的对偶形式为

$$\min \sum_{j\in J_i} p_{ij} + \Gamma_i z_i,$$
$$\text{s.t.}\quad p_{ij} + z_i \ge \hat{a}_{ij}\,|x_j^*|,\ \forall i, j \in J_i,$$
$$p_{ij} \ge 0,\ z_i \ge 0,\ \forall i, j \in J_i. \tag{9}$$

根据强对偶理论,式(8) 对于所有的 $\Gamma_i \in [0, |J_i|]$,其解是可行且有界的,那么其对偶形式的解也是可行且有界的,且目标函数值相等. 这样,$\beta_i(x^*,\Gamma_i)$ 等于式(9) 的目标函数值.

类似地,也可令式(3) 中目标函数的 max 部分作如下转化:

$$\beta_0(x^*,\Gamma_0) =$$
$$\max\Big\{\sum_{j\in S_0} d_j\,|x_j^*| : |S_0| \le \Gamma_0,\ S_0 \subseteq J_0\Big\} =$$
$$\max\Big\{\sum_{j\in J_0} d_j\,|x_j^*|\,z_{0j} : \sum_{j\in J_0} z_{0j} \le \Gamma_0,$$
$$0 \le z_{0j} \le 1,\ \forall j \in J_0\Big\} =$$
$$\min\Big\{\sum_{j\in J_0} p_{0j} + \Gamma_0 z_0 : z_0 + p_{0j} \ge d_j\,|x_j^*|,$$
$$z_0 \ge 0,\ p_{0j} \ge 0,\ \forall j \in J_0\Big\}. \tag{10}$$

将式(9) 和(10) 代替式(3) 中相应项,即可得到式(6). □

在鲁棒对等式的等价式(6) 中引入了松弛变量 y, z, p,这些松弛变量的取值是连续的,因此,鲁棒离散优化鲁棒对等式的等价形式是一个混合整数规划,其求解的复杂度并没有提高.

从定理 1 和定理 2 可以看出,一个不确定的鲁棒离散优化问题可成功地转化为一个确定的混合整数规划问题,而对于混合整数优化问题的求解已有很多成熟的方法.

3　电梯群控系统鲁棒离散优化调度策略

3.1　基于鲁棒离散优化方法的电梯决策模型

1) 交通流不确定性表示. 电梯交通流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. 在对交通流的分析中,综合考虑当前交通流状况和未来交通流状况,将各楼层乘客外呼作为不确定参数. 以当前时刻交通流表示标称量,并作为乘客外呼请求的下限;以未来交通流表示扰动量,而扰动量可通过交通流预测得到,这里假设该值是已知的. 最后,将标称量和扰动量之和作为乘客外呼请求的上限. 这样交通流不确定参数的表达形式如下:

$$P_{\text{Up}i} \in [p_{\text{Up}i}, p_{\text{Up}i} + \sigma_{\text{Up}i}],$$
$$P_{\text{Dn}j} \in [p_{\text{Dn}j}, p_{\text{Dn}j} + \sigma_{\text{Dn}j}], \tag{11}$$

其中: $i = 1,2,\cdots,m-1$, $j = 2,3,\cdots,m$; $P_{\text{Up}i}$ 表示第 i 层上外呼数,为不确定参数; $P_{\text{Dn}j}$ 表示第 j 层下外呼数,为不确定参数; $p_{\text{Up}i}$ 表示当前时刻第 i 层楼上外呼乘客数的标称量; $p_{\text{Dn}j}$ 表示当前时刻第 j 层楼下外呼乘客数的标称量; $\sigma_{\text{Up}i}$ ($\sigma_{\text{Up}i} > 0$) 表示当前时刻第 i 层楼上外呼乘客数的扰动量; $\sigma_{\text{Dn}j}$ ($\sigma_{\text{Dn}j} > 0$) 表示当前时刻第 j 层楼下外呼乘客数的扰动量.

2) 决策变量的确定. 本文采用按层派梯的思想,以 m 层大楼配置 n 部电梯为例. 上、下行的外呼请求各为 $m-1$ 个,这样决策变量即为各外呼请求的派梯号,即

$$x_{\text{Up}i\text{Elev}k} \in \{0,1\},\ x_{\text{Dn}j\text{Elev}k} \in \{0,1\}. \tag{12}$$

其中: $i = 1,2,\cdots,m-1$, $j = 2,3,\cdots,m$, $k = 1,2,\cdots,n$; $x_{\text{Up}i\text{Elev}k}$ 为 1 表示第 k 部电梯响应第 i 层上外呼,为 0 表示不响应; $x_{\text{Dn}j\text{Elev}k}$ 为 1 表示第 k 部电梯响应第 j 层下外呼,为 0 表示不响应.

3) 目标函数的确定. 最小化各层上、下行外呼的总成本,要求上行的外呼为 $1 \to m-1$ 层,要求下行的外呼为 $2 \to m$ 层. 以 1 层上行外呼为例,如果第 1 部电梯响应其外呼,其成本为第 1 部电梯的服务成本与该层外呼数的乘积. 并以乘客等待时间为服务成本,则目标函数如下:

$$\min_{X_{\mathrm{Up}i},X_{\mathrm{Dn}i}} \sum_{i=1}^{m-1} P_{\mathrm{Up}i}(T_{\mathrm{Up}i}X_{\mathrm{Up}i}) + \sum_{j=2}^{m} P_{\mathrm{Dn}j}(T_{\mathrm{Dn}j}X_{\mathrm{Dn}j}); \tag{13}$$

$$T_{\mathrm{Up}i} = [T_{\mathrm{Up}i\mathrm{Elev}1} \quad T_{\mathrm{Up}i\mathrm{Elev}2} \quad \cdots \quad T_{\mathrm{Up}i\mathrm{Elev}k}],$$
$$T_{\mathrm{Dn}j} = [T_{\mathrm{Dn}j\mathrm{Elev}1} \quad T_{\mathrm{Dn}j\mathrm{Elev}2} \quad \cdots \quad T_{\mathrm{Dn}j\mathrm{Elev}k}]; \tag{14}$$

$$X_{\mathrm{Up}i} = [x_{\mathrm{Up}i\mathrm{Elev}1} \quad x_{\mathrm{Up}i\mathrm{Elev}2} \quad \cdots \quad x_{\mathrm{Up}i\mathrm{Elev}k}]^{\mathrm{T}},$$
$$X_{\mathrm{Dn}j} = [x_{\mathrm{Dn}j\mathrm{Elev}1} \quad x_{\mathrm{Dn}j\mathrm{Elev}2} \quad \cdots \quad x_{\mathrm{Dn}j\mathrm{Elev}k}]^{\mathrm{T}}. \tag{15}$$

其中: $T_{\mathrm{Up}i\mathrm{Elev}k}$ 为第 k 部梯相对于第 i 层楼上外呼的成本; $T_{\mathrm{Dn}j\mathrm{Elev}k}$ 为第 k 部梯相对于第 j 层楼下外呼的成本; $i = 1,2,\cdots,m-1$, $k = 1,2,\cdots,n$, $j = 2,3,\cdots,m$. 在实际中,成本一般表示为候梯时间、乘梯时间、能耗等,或是这些内容的加权平均多目标形式.

4) 约束函数的确定. 对于各层要求上、下行的外呼请求,假设只有 1 部电梯响应,电梯对该请求响应为 1,不响应为 0,因此,4 部梯对于该请求的响应之和为 1. 约束函数如下:

$$[1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1] X_{\mathrm{Up}i} = 1,\ i = 1,2,\cdots,m-1;$$
$$[1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1] X_{\mathrm{Dn}j} = 1,\ j = 2,3,\cdots,m. \tag{16}$$

因此,电梯群控调度鲁棒离散优化模型的表达式如下:

$$\min_{X_{\mathrm{Up}i},X_{\mathrm{Dn}j}} \sum_{i=1}^{m-1} P_{\mathrm{Up}i}(T_{\mathrm{Up}i}X_{\mathrm{Up}i}) + \sum_{j=2}^{m} P_{\mathrm{Dn}j}(T_{\mathrm{Dn}j}X_{\mathrm{Dn}j}),$$
$$\text{s.t. 式}(11),(12),(14) \sim (16). \tag{17}$$

显然,这是一个含有不确定参数的离散优化问题,即鲁棒离散优化问题.

3.2　模型求解

假设大楼为 16 层,配置 4 部电梯,即 $m = 16$, $n = 4$,以此配置进行模型求解.

1) 引入松弛变量 M,将式(17) 中的含有不确定参数的目标函数转化到约束函数中,即

$$\min M,$$
$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^{15} P_{\mathrm{Up}i}(T_{\mathrm{Up}i}X_{\mathrm{Up}i}) + \sum_{j=2}^{16} P_{\mathrm{Dn}j}(T_{\mathrm{Dn}j}X_{\mathrm{Dn}j}) \le M,$$
$$\text{式}(11),(12),(14) \sim (16). \tag{18}$$

2) 根据定理 1,引入鲁棒优化模型参数 Γ, $\Gamma \in [0,|J|]$, $|J|$ 为所有楼层(15 个上,15 个下) 中扰动量非零的个数. 则式(18) 变为

$$\min M,$$
$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^{15} P_{\mathrm{Up}i}(T_{\mathrm{Up}i}X_{\mathrm{Up}i}) + \sum_{j=2}^{16} p_{\mathrm{Dn}j}(T_{\mathrm{Dn}j}X_{\mathrm{Dn}j}) + \beta(X,\Gamma) \le M,$$
$$\text{式}(11),(12),(14) \sim (16). \tag{19}$$

其中

$$\beta(X,\Gamma) = \max_{\{S\cup\{t\}|S\subseteq J,\ |S| = \lfloor\Gamma\rfloor,\ t\in J\backslash S\}} \left\{ \sum_{j\in S} o_j T X_j + T(\Gamma - \lfloor\Gamma\rfloor) o_t X_t \right\},$$

$$o_j = [o_{\mathrm{Up}j} \quad o_{\mathrm{Dn}j}],\quad T = \begin{bmatrix} T_{\mathrm{Up}j} & 0 \\ 0 & T_{\mathrm{Dn}j} \end{bmatrix},$$

$$X_j = \begin{bmatrix} T_{\mathrm{Up}j} \\ T_{\mathrm{Dn}j} \end{bmatrix},$$

这里 o_t, X_t 与 o_j, X_j 具有相同的形式.

3) 根据定理 2,结合电梯调度的实际情况,式(19) 可变换为如下的优化问题:

$$\min M,$$
$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^{15} P_{\mathrm{Up}i}(T_{\mathrm{Up}i}X_{\mathrm{Up}i}) + \sum_{j=2}^{16} P_{\mathrm{Dn}j}(T_{\mathrm{Dn}j}X_{\mathrm{Dn}j}) + \sum_{i=1}^{30} p_i + \Gamma z \le M,$$
$$p_i \ge 0,\ z \ge 0,$$
$$z + p_i \ge o_{\mathrm{Up}i}X_{\mathrm{Up}i},\ i = 1,2,\cdots,15,$$
$$z + p_{j+14} \ge o_{\mathrm{Dn}j}X_{\mathrm{Dn}j},\ j = 2,3,\cdots,16,$$
$$\text{式}(11),(12),(14) \sim (16). \tag{20}$$

其中: z, p_i 是 4 维列向量,为松弛变量,无实际意义,只是为了问题便于求解而引入的. 由此可以看出,式(20) 为确定的混合整数优化问题.

4　仿真实例

在实验室的电梯虚拟仿真平台下[10],按如下参数设计进行仿真比较:

1) 所选择的环境参数

大楼:共 16 层,门厅高 4 m,其余楼层高 3 m.

电梯:4 部电梯,每部电梯速度 1.5 m/s,加速度 1 m/s^2,加加速度 1.8 m/s^3,额定容量 12 人,开关门时间 1 s,单个乘客转移时间 1 s.

交通流:共选取 4 组,分别为:交通流 1: 上高峰 15 min 230 人,流入模式 86 %;交通流 2: 随机层间 15 min 110 人,层间模式 82 %;交通流 3:下高峰 15 min 240 人,流出模式 89 %;交通流 4: 综合交通流 60 min 540 人.

2) 所选择的几组电梯算法

算法 1: 基于最小等候时间的算法.

算法 2: 多智能体电梯群控调度算法.

算法 3: 鲁棒离散优化的电梯群控调度.

3) 比较内容

包括: 乘客平均等候时间,乘客平均乘梯时间,乘客长时间等候率,乘客平均拥挤度和各电梯启停车次数.

通过对 3 种算法的比较分析可知,算法 1 是传统方法,算法 2 是智能方法,算法 3 是本文提出的方

法. 仿真结果如表 1 所示.

表1 仿真结果

交通流	算法	评价指标				
		平均候梯时间/s	平均乘梯时间/s	长时间候梯率/%	乘客拥挤度	电梯启停次数
1	1	29.17	49.28	15.4	8.97	190
	2	34.01	50.51	8	9.21	193
	3	**31.49**	**50.24**	**12**	**9.15**	**186**
2	1	24.45	27.31	21.3	3.71	91
	2	23.05	25.40	5	2.95	94
	3	**21.36**	**23.30**	**8**	**2.44**	**85**
3	1	27.65	27.38	12.5	5.62	188
	2	24.36	30.97	7.4	5.56	192
	3	**22.73**	**26.75**	**7.8**	**6.26**	**179**
4	1	26.61	35.42	16.3	5.87	431
	2	25.19	38.32	7.36	5.74	449
	3	**20.86**	**34.37**	**7.6**	**5.45**	**412**

1) 算法 3 和算法 1 的比较. 算法 3 加入了对交通不确定的预测,因此调度性能要优于一般的最小候梯时间算法. 特别在长时间候梯率和电梯启停次数上的性能均得到了改善. 长时间候梯主要是在乘客刚刚错过某部电梯时出现,算法 3 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,因此该指标改善显著. 除上高峰交通模式外,其他性能均有所提高.

2) 算法 3 和算法 2 的比较. 算法 2 能有效改善长时间侯梯主要是因为算法 2 考虑了重派梯的情况,每次均可派出较为有利的电梯,然而这也导致电梯可能运行于无用路线,因此启停次数增加,不利于节能. 算法 3 除长时间侯梯率外,其他性能均优于算法 2.

3) 3 种算法的综合比较. 本文算法具有较好的性能,对交通模式具有较强的适应能力.

5 结 论

电梯群控调度问题的难点在于如何处理调度中的交通信息不确定问题. 传统电梯群控调度方法难以处理该问题,而鲁棒离散优化能将不确定的优化问题转化为确定的混合整数优化问题,从而进行有效求解. 本文首先建立了电梯群控调度不确定优化模型;然后,根据模型特点,应用鲁棒离散优化理论进行求解;最后,在电梯虚拟仿真平台下进行了方法的验证. 结果表明,在电梯群控调度中加入对交通流不确定的考虑,能提高电梯调度的综合性能,而且也能进一步改善对交通模式的适应能力.

参考文献(References)

[1] 宗群, 童玲, 薛丽华. 电梯群控系统智能优化调度方法的研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(8): 939-942.
(Zong Qun, Tong Ling, Xue Li-hua. Research on intelligent optimal dispatching method in elevator group control systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(8): 939-942.)

[2] Crites R H, Barto A G. Elevator group control using multiple reinforcement learning agents[J]. Machine Learning, 1998, 33(2/3): 235-262.

[3] Yasuhiro O, Haruhiko K, Sadaki H. Elevator group control system using multiagent system[J]. Systems and Computers in Japan, 2003, 34(1): 45-58.

[4] Nikovski D, Brand M. Marginalizing out future passengers in group elevator control[C]. Conf on Uncertainty in Artificial Intelligence. Acapulco, 2003, 8: 443-450.

[5] Kim J H, Moon B R. Adaptive elevator group control with Cameras [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2001, 48(2): 377-382.

[6] 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]. IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. Hague, 2004, 7: 6274-6279.

[7] 罗飞, 许玉格, 曹建忠. 基于目的层预约的电梯群控系统建模与控制[J]. 控制与决策, 2006, 22(10): 1159-1162.
(Luo Fei, Xu Yu-ge, Cao Jiao-zhong. Modeling and control in elevator group control system with destination registration[J]. Control and Decision, 2006, 22(10): 1159-1162.)

[8] Bertsimas D, Sim M. Robust discrete optimization and network flows[J]. Mathematical Programming, 2003, 98(1-3): 49-71.

[9] Ben-Tal A, Nemirovski A. Robust optimization methodology and applications [J]. Mathematical Programming, 2002, 92(3): 453-480.

[10] 宗群, 何彦召, 魏利剑. 面向 Agent 的电梯群控仿真系统建模研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1391-1393.
(Zong Qun, He Yan-zhao, Wei Li-jian. Modeling and research for agent-oriented elevator group control simulation system[J]. J of System Simulation, 2006, 18(5): 1391-1393.)