

学校代码: 10289

分类号: TP391

密 级: 公 开

学 号: 159030047



江苏科技大学 硕士学位论文

电梯智能群控调度算法研究

研究生姓名 李 晨 导师姓名 姜 文 刚

申请学位类别 工程硕士 学位授予单位 江 苏 科 技 大 学

专 业 领 域 控制工程 论文提交日期 2018 年 4 月 26 日

研 究 方 向 智能电气与系统 论文答辩日期 2018 年 6 月 7 日

答辩委员会主席 王 直 评 阅 人 盲 审

盲 审

2018 年 6 月 6 日

论文题目 电梯智能群控调度算法研究

姓 名 李晨

江苏科技大学

分类号: TP391

密 级: 公开

学 号: 159030047

专业硕士学位论文

电梯智能群控调度算法研究

学生姓名 李晨

指导教师 姜文刚教授

江苏科技大学
二零一八年六月

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering

Research on Elevator Intelligent Group Control Scheduling
Algorithm

Submitted by

Li Chen

Supervised by

Professor Jiang Wengang

Jiangsu University of Science and Technology

June , 2018

江苏科技大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

江苏科技大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权江苏科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于：

- (1) 保密 ☐，在____年解密后适用本授权书。
- (2) 不保密 ☐。

学位论文作者签名：

指导教师签名：

年 月 日

年 月 日

摘要

随着城市高层建筑的日益发展，大楼内单梯运行已无法满足乘客的输送需求，而多台电梯智能群控调度技术能够根据不同的交通模式及乘客的需求做出灵活的派梯策略，可以很好地适应各类大楼的乘客用梯需求，因此用于控制多台电梯的电梯智能群控技术的应用日益普遍。电梯智能群控调度系统主要分为电梯乘客交通流预测、交通模式识别、群控算法调度三个方面。其中，电梯乘客交通流预测是实现电梯智能群控系统的前提，交通模式识别是实现电梯智能群控系统的基础，群控调度算法是实现电梯智能群控系统合理派梯的核心。本文以缩小乘候梯的时间，减少电梯不必要的停靠，节约电梯运行的能耗为目标，以充分发挥现代智能控制理论的优越性为手段，对电梯智能群控系统的交通流预测、交通模式识别、电梯智能群控算法的三个方面进行分析。同时，针对现阶段电梯临界满载情况的运行提出了一种临界满载判别方法。

电梯乘客交通流预测是实现电梯智能群控调度的前提，针对电梯乘客交通流的时间序列小样本特征，根据等维新息原则，提出一种改进的灰色GM(1,1)模型对电梯交通流分别进行周期特性及发展变化趋势预测。综合考虑电梯交通流的周期特性及发展变化趋势，将两组预测数据进行自适应加权组合预测。将交通流数据自适应加权组合预测与小波神经网络预测模型相比较表明，在实际获取的乘客交通流数据量较少的情况下，电梯交通流组合预测的误差更小。

电梯交通模式识别是实现电梯智能群控调度的基础，针对影响交通模式识别因素较多且复杂多变的问题，根据粗糙集理论知识，提出了一种基于属性约简的电梯交通模式模糊识别方法。对影响电梯交通模式识别的属性及模糊推理规则的两个方面进行属性约简，增强了模型识别电梯交通模式时的容错性，减少了模糊推理规则数目。仿真结果可以表明，基于属性约简的电梯交通模式模糊识别方法的识别结果准确率高于应用最小二乘支持向量机(LSSVM)多值分类识别的准确率。

电梯群控调度算法是实现电梯智能群控系统合理派梯的核心，它能够根据乘客实际乘梯需求得出最优派梯方案。本文以乘客乘候梯时间和电梯能耗为优化目标，建立电梯智能群控多目标优化模型，并通过改进遗传算法对派梯方案进行优化，最后借助电梯智能群控调度系统仿真平台对本设计方案进行仿真测试，实验结果表明通过改进的遗传算法不但减少了乘客乘候梯时间，而且降低了电梯电能消耗。

针对电梯群控派梯过程中出现的重复派梯行为和因电梯信息不完备产生的无效停车情况，尤其是电梯交通流处于下行高峰交通模式时，因电梯拥挤程度饱和而轿厢负载未饱和出现的错误停站情况，提出了一种电梯满载状态识别方法来减少轿厢不必要的停站，有效减少了乘客乘候梯时间，降低了电梯系统能源的消耗。

关键词：交通流预测；交通模式识别；电梯群控；遗传算法；临界满载

Abstract

With the development of urban high-rise buildings, the single-lift operation in the building has been unable to meet the transportation needs of passengers. The multi-elevator intelligent group control scheduling technology can be well adapted to the needs of a variety of passenger elevators, and based on different traffic modes and passengers' needs to make a flexible dispatching strategy. Therefore, the application of smart group control technology for controlling elevators has become increasingly common. The elevator intelligent group control dispatch system is mainly divided into three aspects: elevator passenger traffic flow prediction, traffic pattern recognition, and group control algorithm scheduling. Among them, elevator passenger traffic flow forecasting is the premise of realizing the elevator intelligent group control system. Traffic pattern recognition is the basis of realizing the elevator intelligent group control system. The group control scheduling algorithm is the core of implementing the elevator intelligent group control system. This article aims to reduce passengers waiting time, reduce unnecessary stop of elevators, save the energy consumption of elevator operation, and give full play to the superiority of modern intelligent control theory as a means to predict traffic flow of elevator intelligent group control system. Three aspects of traffic pattern recognition and elevator intelligent group control algorithm are studied and analyzed. At the same time, a critical full load discrimination method is proposed for the operation of the critical full load condition of the elevator at this stage.

The prediction of elevator passenger traffic flow is the premise to achieve intelligent group control scheduling of elevators. According to the small-sample characteristics of elevator passenger traffic flow, according to the principle of equal dimension and innovation, an improved gray GM(1,1) model is proposed to analyze the periodicity and development trend of elevator traffic flow respectively prediction. Considering the cyclical characteristics of elevator traffic flow and its development trend, the two sets of forecasting data are adaptively weighted combined forecasting. Comparing the traffic flow data combination prediction with the wavelet neural network prediction model shows that the elevator traffic flow combined prediction error is smaller when the actual traffic data of the passenger traffic flow is less.

Elevator traffic pattern recognition is the key to group control optimization. Aiming at the problems of influencing the traffic pattern recognition with many and complex factors, according to the knowledge of rough set theory, an elevator traffic mode fuzzy identification

method based on attribute reduction is proposed. . The attribute reduction and the fuzzy inference rules affecting elevator traffic pattern recognition are attributed to reduce the fault-tolerance when the model recognizes the elevator traffic mode and reduces the number of fuzzy inference rules. The simulation results show that the recognition accuracy of elevator traffic pattern based on attribute reduction method is higher than the accuracy rate of multi-value classification recognition using least squares support vector machine (LSSVM).

The elevator group control scheduling algorithm is the core of implementing the elevator intelligent group control system to send the ladder properly. It can obtain the optimal dispatching ladder scheme according to the passengers' actual riding demand. This paper takes the passenger waiting time and the elevator energy consumption as the optimization goal, establishes an intelligent multi-objective optimization model of elevator group control, optimizes the dispatching plan by means of an improved genetic algorithm, and finally uses the elevator intelligent group control dispatching system simulation platform to compare this design proposal. The simulation test is conducted. The experimental results show that the improved genetic algorithm not only reduces the waiting time of passengers, but also reduces the elevator power consumption.

Aiming at the problem of repeated dispatching in elevator group control and invalid parking due to incomplete elevator information, especially when the elevator traffic flow is in the downward peak traffic mode, the car load is not saturated due to the degree of congestion of the elevator. The paper proposes an elevator full load status identification method to reduce the unnecessary stopping of the car, effectively reducing the passenger waiting time and reducing the energy consumption of the elevator system.

Keywords: traffic flow prediction; traffic pattern recognition; elevator group control; genetic algorithm; critical full load

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
Contents.....	VII
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题背景及研究的目的和意义.....	1
1.2 电梯交通流的研究现状及分析.....	1
1.3 电梯群控技术研究现状分析及发展趋势.....	3
1.4 本文主要研究内容.....	4
第 2 章 电梯群控系统的结构特征分析.....	7
2.1 电梯群控系统介绍.....	7
2.2 电梯群控系统的基本特征.....	8
2.2.1 电梯群控系统的模糊性.....	8
2.2.2 电梯群控系统的扰动性.....	8
2.2.3 电梯群控系统的非线性.....	9
2.2.4 电梯智能群控调度系统的多目标性.....	9
2.3 电梯群控系统仿真模型.....	9
第 3 章 电梯交通流预测.....	17
3.1 引言.....	17
3.2 电梯交通流预测问题分析.....	17
3.3 电梯交通流预测模型.....	18
3.3.1 灰色 GM(1,1)预测模型.....	18
3.3.2 灰色 GM(1,1)模型的优化改进.....	19
3.3.3 原始灰色振荡序列的变换.....	19
3.3.4 GM(1,1)模型的背景值改进.....	20
3.4 基于等维新息原则优化 GM(1,1)模型.....	21
3.5 电梯交通流预测.....	22
3.5.1 基于电梯交通流周期特性灰色 GM(1,1)预测.....	22
3.5.2 基于电梯交通流发展趋势的滚动 GM(1,1)预测.....	23
3.5.3 组合预测.....	25
3.6 本章小结.....	27
第 4 章 电梯交通模式的识别.....	29
4.1 引言.....	29
4.2 电梯交通模式识别方法.....	29
4.2.1 电梯客流预测修正.....	29
4.2.2 电梯交通模式分析.....	33
4.2.3 粗糙集理论.....	33
4.2.4 实际交通模式分析.....	34
4.2.5 电梯载客率 X_{\max} 的确定.....	35
4.2.6 电梯交通模式属性约简.....	36
4.2.7 电梯输入量模糊化.....	36

4.2.8 电梯交通模式模糊推理.....	37
4.3 仿真结果.....	39
4.4 本章小结.....	42
第 5 章 基于改进遗传算法的电梯智能群控调度系统研究.....	43
5.1 引言.....	43
5.2 电梯智能群控调度系统的多目标优化问题模型.....	43
5.2.1 多目标优化概述.....	43
5.2.2 多目标优化函数选取.....	44
5.2.3 多目标评价函数.....	46
5.2.4 电梯智能群控多目标函数调度算法设计.....	48
5.3 基于改进遗传算法的电梯智能群控调度算法.....	48
5.3.1 遗传算法概述.....	48
5.3.2 改进遗传算法设计.....	49
5.4 电梯群控系统仿真平台.....	57
5.4.1 电梯群控系统测试平台.....	57
5.4.2 仿真结果分析.....	62
5.5 电梯临界满载运行状态识别.....	62
5.5.1 电梯临界满载识别.....	63
5.6 本章小结.....	67
总结与展望.....	69
参考文献.....	71
攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	75
致 谢.....	77

Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	III
Contents in Chinese	V
Contents in English	VII
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research background and significance.....	1
1.2 Research status and analysis of elevator traffic flow.....	1
1.3 Research status and development trend of elevator group control technology.....	3
1.4 The main research content of this article.....	4
Chapter 2 Structural features analysis of elevator group control system	7
2.1 Elevator group control system introduction.....	7
2.2 Basic features of elevator group control system.....	8
2.2.1 Fuzzy group control system.....	8
2.2.2 The disturbance of elevator group control system.....	8
2.2.3 Nonlinearity of elevator group control system.....	9
2.2.4 Multi-objective of elevator intelligent group control dispatching system.....	9
2.3 Elevator group control system simulation model.....	9
Chapter 3 Elevator traffic flow prediction	17
3.1 Introduction.....	17
3.2 Analysis of elevator traffic flow forecast problem.....	17
3.3 Elevator traffic flow prediction model.....	18
3.3.1 Grey GM(1,1) prediction model.....	18
3.3.2 Optimization and improvement of grey GM(1,1) model.....	19
3.3.3 The transformation of the original gray oscillation sequence.....	19
3.3.4 Improved background value of grey GM(1,1) model.....	20
3.4 Optimization of GM(1,1) model based on equal dimension innovation principle.....	21
3.5 Elevator traffic flow forecast.....	22
3.5.1 Grey GM(1,1) prediction based on periodical characteristics of elevator traffic.....	22
3.5.2 Rolling GM (1,1) prediction based on development trend of elevator traffic	23
3.5.3 Combination forecast.....	25
3.6 Chapter summary.....	27
Chapter 4 Recognition of elevator traffic patterns	29
4.1 Introduction.....	29
4.2 Elevator traffic pattern recognition method.....	29
4.2.1 Elevator passenger flow forecast correction.....	29
4.2.2 Elevator traffic pattern analysis.....	33
4.2.3 Rough set theory.....	33
4.2.4 Actual traffic pattern analysis.....	34
4.2.5 Determination of passenger loading rate X_{\max}	35
4.2.6 Lift traffic mode attribute reduction.....	36
4.2.7 Elevator input fuzzification.....	36

4.2.8 Elevator traffic mode fuzzy reasoning.....	37
4.3 Simulation results.....	39
4.4 chapter summary.....	42
Chapter 5 Elevator group control dispatching system based on improved genetic algorithm....	43
5.1 Introduction.....	43
5.2 Multi-objective optimization model of elevator group control scheduling system.....	43
5.2.1 Multi-objective optimization overview.....	43
5.2.2 Multi-objective optimization function selection.....	44
5.2.3 Multi-objective evaluation function.....	46
5.2.4 Elevator group control multi-objective function scheduling algorithm design.....	48
5.3 Elevator group control scheduling algorithm based on improved genetic algorithm.....	48
5.3.1 Genetic algorithm overview.....	48
5.3.2 Improved genetic algorithm design.....	49
5.4 Elevator group control system simulation platform.....	57
5.4.1 Elevator group control system test platform.....	57
5.4.2 Analysis of simulation results.....	62
5.5 Elevator full-load operation status recognition.....	62
5.5.1 Elevator full load identification.....	63
5.6 Chapter summary.....	67
Conclusions and prospects.....	69
References.....	71
Theses published and patents during the period of studying for master degree.....	75
Acknowledgement.....	77

第1章 绪论

1.1 课题背景及研究的目的和意义

自美国电梯公司奥的斯研发出第一台电梯以来，电梯逐渐变成人们在大楼内的主要代步工具。随着城市建设的日益发展以及计算机通信技术水平的提升，城市里的智能高层建筑大楼得到飞速发展。由于大楼内人口数量的不断增长，大楼内单梯运行已无法满足乘客的输送需求，而多台电梯智能群控调度技术可以很好地适应多种乘客用梯需求，根据不同的交通模式及乘客的需求做出灵活的派梯策略，因此应用于控制多台电梯的电梯智能群控技术的应用日益普遍^[1-2]。

对于当今现代化电梯智能群控系统来说，电梯智能群控调度系统主要由电梯交通流预测、交通模式识别、电梯智能群控算法调度三个方面组成。大楼内乘客的起始目的楼层构成了电梯交通流，电梯智能群控调度系统的目的是为了能够更好的疏导客流，因此需要对大楼内的电梯交通流特性进行深入分析研究^[3]，找出大楼内乘客乘梯的潜在乘梯规律，使得电梯智能群控系统能够随着大楼内乘客客流的变化灵活的调整派梯策略。因此，电梯交通流的精确预测是实现优化电梯智能群控调度系统的前提。对于一个办公大楼来说，一天内的不同时刻电梯客流情况是不同的，具有多样性，而一种群控策略显然是无法满足多样的客流需求。因此，需要对大楼内的乘客交通流进行识别分类，针对不同的交通模式去灵活调整派梯策略是实现优化电梯智能群控调度系统的基础^[4]。电梯智能群控调度算法是根据大楼内实际的乘客交通流情况及楼内此刻交通流所处的电梯交通模式，综合大楼内各个楼层的外呼信号、各台电梯的位置、各台电梯的运行方向及状态、各台电梯内的乘客人数、各台电梯内呼信号等，以某个或着某些调度指标为最优化原则，针对不同的乘客需求灵活的调整派梯策略，智能群控调度算法是电梯智能群控系统的核心组成部分。

对电梯智能群控调度系统的研究有着重要的实际意义：对电梯智能群控调度系统的深入研究有利于疏散建筑大楼内的乘客客流，减少乘客乘候梯时间，缓解因高峰交通模式导致的乘客拥堵的情况，充分提升大楼内电梯的运行效率，发挥出电梯在垂直建筑物中的输送乘客的能力；再者，电梯能耗在建筑物内总能耗中的所占比例巨大，对电梯智能群控算法的深入研究有利于减少电梯运行过程当中的不必要停靠，节约电梯运行能耗，有助于推进当代所提倡的智能楼宇、绿色建筑的建设。

1.2 电梯交通流的研究现状及分析

电梯乘客交通流预测是电梯智能群控调度的前提，是智能群控系统交通模式识别的基础，有效提高电梯交通流的预测精度能够使智能群控系统更加合理派梯，从而缩短乘客等待电梯时间，减少电梯不必要的停靠次数，节约大楼内电梯运行的能源消耗。目前，专家研究者们针对电梯交通问题的研究主要围绕着交通流的预测跟模式识别这两个方面进行展开。

电梯乘客交通流是由大楼内当前流动的乘客数、乘客的出现周期以及乘客在大楼内各层的分布情况构成的，它反映出了当前大楼内客流流动的情况^[5-6]。对于不同的大楼而言，电梯乘客交通流的情况及反映出的乘客客流特性也不相同，同一建筑物，在不同的时间段内所表现出的电梯交通流的情况及反映出的客流特性也不相同。前人通过对各类典型大楼的电梯交通流特性进行分析研究表明，电梯乘客交通流的特性具有周期性、随机性以及突发性三种特性，这些特性在任意一个大楼或者同一大楼内的不同时间段都有可能出现。故此，在描述电梯交通流问题时人们无法用一固定的函数来对交通流预测模型表达。

为了更加精准预测电梯交通流，国内外一些专家使用神经网络模型、自回归平均模型、支持向量机等等对电梯交通流进行预测。万健如^[7]等人提出了蚁群优化神经网络的电梯交通流预测方法，优化后预测效果要好于单一的神经网络。黄敏^[8]等人根据结构风险最小化原则提出了小波神经的预测方法，其预测效果要好于 BP 预测。宗群^[9]等人提出了双层模糊神经预测方法，简化了网络复杂度。宗群^[10]等人则根据异常数据检测修正的方式提出了一种季节自回归单整移动平均模型，成功地实现电梯乘客交通流的实时在线修正。胡志刚^[11]等人提出小波支持向量机的交通流预测模型，实际仿真表明其预测性能效果较好。唐海燕^[12]等人综合考虑周期特性及发展趋势提出了一种基于支持向量回归的预测方法，仿真结果表明其预测效果显著。丁宝^[13]等人提出了一种混合分析预测的方法来进行电梯交通流的预测，预测效果较单一预测模型效果更好。

交通模式的识别是电梯智能群控优化调度的关键，根据预测模型所得的下一时刻客流分布情况对交通模式进行准确识别，针对不同的交通模式选择适合当前模式的群控算法，能够使智能群控调度系统更加合理的灵活的进行派梯。为了更加准确无误的识别出电梯客流所属的交通模式，一些专家提出了很多有效的识别方法。文献[14-16]使用神经网络进行识别，取得了较好识别的结果，但是模型的抗干扰性不强，需要进行大量数据的学习。文献[17]将随机森林算法用于电梯交通模式识别中，提高了模型的分析速度，但需大量的数据来进行理论分析。文献[18-19]分别利用群体智能聚类和模糊核聚类算法对交通模式进行识别，实现了很好的分类效果，但模型缺乏容错性，存在对初始值敏感的问题。文献[20-22]采用 SVM 多值分类的交通模式识别方法，获得了较好的识别效果，但是无法避免一值多类情况的发生。文献[23-25]提出了采用模

糊聚类的方法对交通模式进行多聚类中心分析，使交通模式识别不再依赖复杂的专家经验，但是模型对初值敏感，参数的确定方式大多根据试凑法获得。文献[26]使用贝叶斯决策理论对其交通模式进行识别，提高了系统各项评价指标，但模型优化训练需要大量数据为基础，模型一旦确定可移植性较差。

1.3 电梯群控技术研究现状分析及发展趋势

国内对电梯群控这一领域的研究分析起步相对较晚些，从八十年代开始引进国外先进的电梯技术经验，开始逐步对电梯系统特性分析研究，从而推动了国内电梯行业技术的不断进步。经过专家学者及各大电梯公司多年的不断努力，目前我国电梯行业的技术水平在世界电梯产业内也已占据了一席之地。

在国外，电梯智能群控调度算法的研究分析起步较为早一些，相对国内来讲群控技术更加成熟完善。国外研究人员研究方向主要集中在利用专家经验、模糊推理、遗传算法、神经网络等智能算法进行电梯智能群控算法的研究^[27-28]。如 Daniel 等人提出了一种改进的模糊群控算法^[29]；Pablo 等人提出了一种使用病毒算法进行电梯智能群控算法的优化^[30]；Berna 和 Emre Oner Tartan 等提出了使用遗传算法进行电梯群控调度^[31-33]，同时，Berna Bolat 针对遗传算法在电梯智能群控调度算法的局限性提出了使用粒子群算法进行电梯群控调度算法的优化^[34]。近年来，随着绿色建筑的提倡，电梯能耗问题逐渐被人们意识到，在保证原有电梯舒适度的基础上，学者们进一步研究如何降低电梯能耗问题^[35-37]。日本的 Nagatani 对电梯高峰期的客流情况进行了研究分析，推导出了在不同客流强度下乘客候梯时间指标跟其余指标间的相互耦合关系，为电梯智能群控调度的多目标优化提供了很好的参考依据^[38-40]。

在国内，为了打破国外在电梯群控技术方面垄断的局面，高校的专家学者和电梯技术企业响应国家号召对电梯智能群控调度算法进行不断研究分析，已取得了不错的成绩。如宗群等利用 Monte Carlo 方法建立交通流概率仿真模型，并提出了智能多模式电梯群控系统^[41]；李中华等针对电梯群控高峰模式提出了两种动态分区调度方法，同时采用聚类方法处理交通流数据^[42]；唐海燕等提出电梯乘客交通流具有混沌特性，并将相空间延迟坐标重构理论引入到电梯乘客交通流预测当中^[43]；张景龙等以电梯能耗为出发点，提出了一种基于回馈型电梯智能群控调度系统的能耗计算方法^[44]。刘剑和刘清等针对不同的交通模式以多目标优化为原则进行群控调度^[45-47]。

目前，国内外相关领域专家的研究方向主要集中在利用专家经验、模糊推理、遗传算法、神经网络等智能算法进行电梯智能群控算法的研究，而每种智能算法都有其适用的场合范围和各自的优缺点。比如，专家系统可根据专家经验知识解决无法完全依赖数学计算的电梯问题，但适用于一些大楼层数较少，电梯数量不多的场合；遗传

算法虽然可得到电梯智能群控调度的最优解,但因电梯智能群控调度系统具有实时性,往往不能在特定的时间段内找到最优解;模糊控制虽然能够处理电梯智能群控系统的不确定模糊信号,但是它缺乏自我学习能力,无法应对较为复杂的电梯交通模式变化;人工神经网络虽然具有较强的容错性,能够进行自我组织学习,但其自我训练调整需要耗费大量的时间,也容易陷入局部极值导致误差较大。因此针对电梯智能群控调度算法研究需要扬长避短,尽可能的发挥出每一个智能算法的优点,最大限度的确保电梯智能群控系统能够根据不同的交通模式灵活合理的调整派梯策略。

1.4 本文主要研究内容

电梯智能群控调度系统主要分为电梯乘客交通流预测、交通模式识别、群控算法调度三个方面。其中,电梯乘客交通流预测是实现电梯智能群控系统的前提,交通模式识别是实现智能群控调度系统的基础,群控调度算法是实现智能群控系统合理派梯的核心。综合现阶段国内外专家学者对电梯交通流、电梯交通模式、电梯群控算法的研究,本文以缩小乘客乘候梯的时间,减少电梯不必要的停靠,节约电梯运行的能耗为目标,以充分发挥现代智能控制理论的优越性为手段,对电梯智能群控系统的交通流预测、交通模式识别、智能群控算法这三个方面进行研究分析。同时,针对现阶段电梯临界满载情况的运行提出了一种临界满载判别方法。

论文首先进行介绍了电梯智能群控调度研究目的及意义,其次分别对乘客交通流预测识别技术、电梯智能群控调度算法的研究现状进行了分析综述。本文对电梯智能群控调度系统所涉及的知识理论进行了分析总结,并对以下内容进行了深入研究分析。

(1) 基于灰色预测理论的电梯交通流组合预测

电梯乘客交通流预测是实现电梯智能群控调度的前提,有效提高电梯乘客交通流的预测精度能够使电梯智能群控系统更加合理派梯。针对电梯乘客交通流时间序列小样本特征,根据等维新息原则,提出一种改进的灰色 GM(1,1)模型对电梯交通流分别进行周期特性及发展变化趋势预测。综合考虑电梯交通流的周期特性及发展变化趋势,将两组预测数据进行自适应加权组合预测。将交通流数据组合预测与小波神经网络预测模型相比较表明,在实际获取的乘客交通流数据量较少的情况下,电梯交通流组合预测的误差更小。

(2) 基于模糊粗糙集理论的交通模式识别

电梯交通模式识别是实现电梯智能群控优化的基础,针对影响交通模式识别因素较多且复杂多变的问题,根据粗糙集理论知识,提出了一种基于属性约简的电梯交通模式模糊识别方法。对影响电梯交通模式识别的属性及模糊推理规则的两个方面进行属性约简,增强了模型识别电梯交通模式时的容错性,减少了模糊推理规则数目。从

仿真结果能够看出，基于属性约简的电梯交通模式模糊识别方法的识别结果准确率高，高于应用最小二乘支持向量机（LSSVM）多值分类识别的准确率。

（3）基于改进遗传算法的电梯智能群控调度

电梯智能群控调度算法是实现电梯智能群控系统合理派梯的核心，它能够根据乘客实际乘梯需求得出最优派梯方案。本文以乘客乘候梯时间和电梯能耗为优化目标，建立电梯智能群控多目标优化模型，并通过改进遗传算法对派梯方案进行优化，最后借助电梯智能群控调度系统仿真平台对本设计方案进行仿真测试，实验结果表明通过改进的遗传算法不但减少了乘客乘候梯时间，而且降低了电梯电能消耗。

（4）电梯临界满载运行情况的判别

针对电梯群控派梯过程中出现的重复派梯行为和因电梯信息不完备产生的错误停站情况，尤其是电梯交通流处于下行高峰期时，因电梯拥挤程度饱和而轿厢负载未饱和出现的错误停站情况，提出了一种电梯满载状态识别方法来减少轿厢不必要的停站，减少了乘客乘候梯时间，降低了电梯系统能源的消耗。

第 2 章 电梯群控系统的结构特征分析

2.1 电梯群控系统介绍

电梯智能群控技术是指对某大楼内的多台电梯进行协同统一派梯调度，当大楼内每一楼层产生呼梯信号时，电梯智能群控调度系统会收集大楼内各台电梯的运行信息，根据某一派梯规则充分权衡乘候梯时间、能耗、轿厢拥挤等各项派梯指标，做出最佳派梯方案，选择最合适的电梯去响应各楼层外呼信号。一个完整的电梯智能群控系统一般包括乘客交通流的预测、交通模式的识别、智能群控调度算法的选择三大模块。下图 2.1 为电梯智能群控调度系统组成结构图。

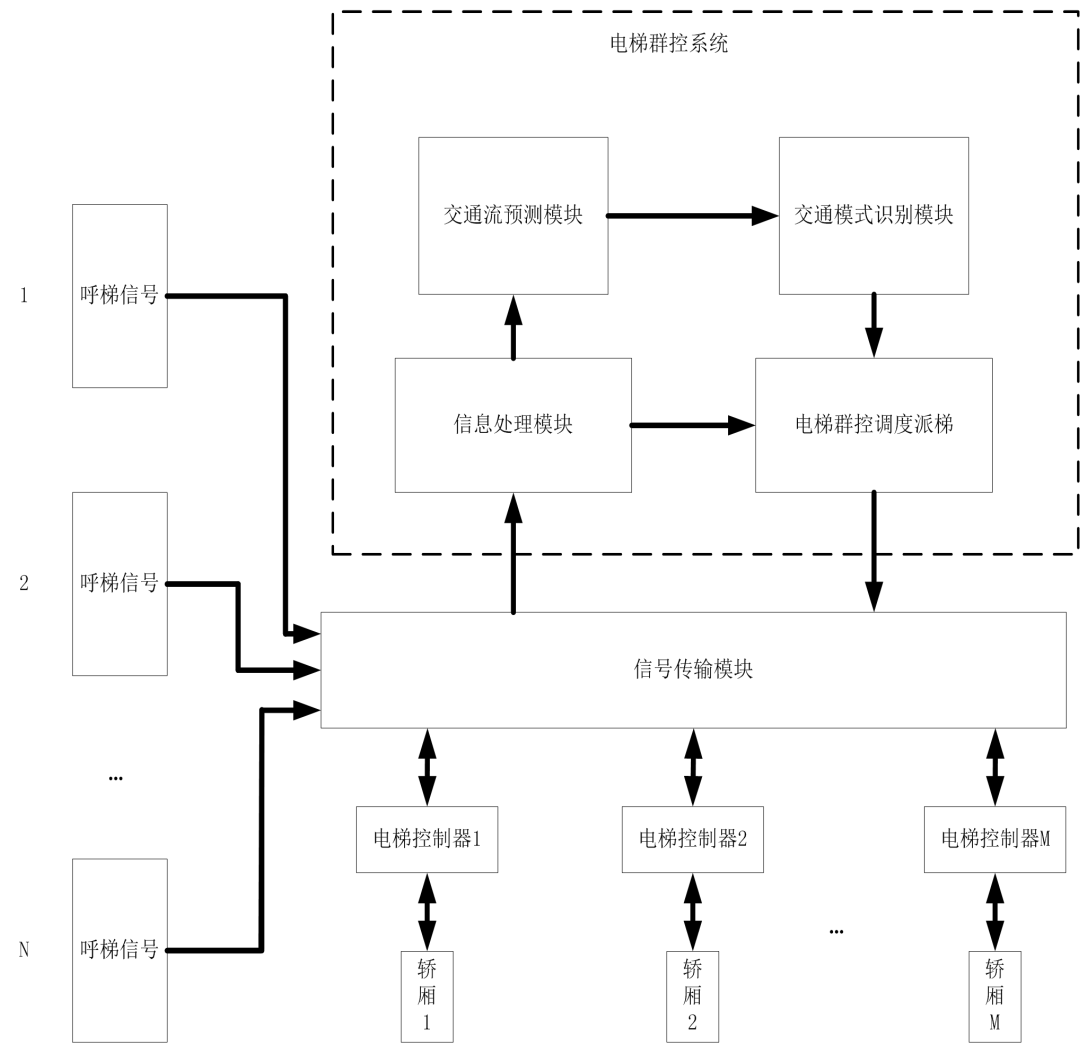


图 2.1 电梯智能群控系统结构图

Fig. 2.1 Elevator intelligent group control system structure

电梯智能群控调度系统主要运行过程：

- (1) 楼内乘客按下电梯呼梯按钮；
- (2) 呼梯信号经通讯模块传到电梯智能群控调度中心；
- (3) 周期性预测交通客流量；
- (4) 周期性识别电梯交通模式；
- (5) 分析当前客流状态和各台电梯运行状态，根据派梯规则选择某一台电梯去响应外呼信号；
- (6) 电梯开门，乘客进入电梯并选择目标楼层，群控系统接收目的楼层信号并关门运行；
- (7) 当到达目的楼层时，电梯开门。

对于整个电梯智能群控调度系统而言，乘客交通流预测是前提，交通模式识别是基础，智能群控调度算法是核心。一般选取 5min 作为交通流预测的周期，当一个周期结束时，电梯智能群控调度系统根据预测模型预测所得的交通流识别出下一个电梯运行周期的交通流所属的交通模式，根据识别所得的交通模式选择合适的智能群控调度算法来满足不同模式下的乘客乘梯需求。

2.2 电梯群控系统的基本特征

电梯智能群控调度系统是一个非常复杂的派梯系统，除了当前建筑物大楼的结构用途之外，大楼内乘客出现的随机性、电梯本身特性等都会对智能群控调度系统产生派梯影响。大体可概括为电梯的模糊性、扰动性、非线性、多目标性。

2.2.1 电梯群控系统的随机性

电梯智能群控调度系统具有随机特性：

- (1) 楼层的呼梯信号是随机发生的；
- (2) 各个楼层的候梯人数是随机的；
- (3) 当电梯内乘客载重确定时，由于个体的差异性，无法得知电梯轿厢内具体人数，即无法获知电梯轿厢拥挤度；
- (4) 电梯内每个乘客的到达楼层是无法事前精确得知的。

电梯智能群控调度系统因各个变量存在随机性与模糊性，无法获知各种精确数值，因此增加了电梯智能群控调度的难度。

2.2.2 电梯群控系统的扰动性

电梯运行时，电梯智能群控调度系统常常随机出现扰动，常见的扰动包括：

- (1) 错误的内外呼梯信号导致的电梯不必要的停靠;
- (2) 人为导致电梯长时间保持开门状态, 导致电梯运行延迟;
- (3) 乘客临时改变目的楼层;
- (4) 电梯本身系统设备的不稳定性。

2.2.3 电梯群控系统的非线性

电梯智能群控调度系统具有非线性, 其原因主要是由于:

- (1) 对于某一固定建筑物而言, 大楼内电梯的数量是确定的, 故电梯智能群控调度系统无法无限量分配电梯;
- (2) 电梯实际所能承载的重量是一定的, 电梯无法超载运行;
- (3) 对于同一楼层外呼信号, 在不同的智能群控调度算法和时间标度下, 有着不同的派梯方案;
- (4) 电梯在运行时会因内呼信号产生而改变电梯原有的运行方向。

2.2.4 电梯智能群控调度系统的多目标性

电梯智能群控调度系统为了满足不同情况下的乘客乘梯需求, 因此需要同时考虑多个目标评价函数, 通常包括:

(1) 平均候梯时间短。乘客候梯时间是指当大楼内乘客按下外呼按键到电梯来到乘客所在楼层需要的时间, 乘客的平均候梯时间是衡量一个智能群控调度系统优劣的指标之一。

(2) 平均乘梯时间短。乘梯时间是指从乘客进入到电梯轿厢内部开始到达大楼内目的楼层之后离开的这一时间段。通常要尽量保持乘梯时间不要超过 90S, 若是超过的话通常会加剧乘客的心理焦躁程度。

(3) 电梯运行能耗低。电梯的能耗一般是由电梯的匀速运行能耗和电梯因响应内外呼梯信号所带来的启停能耗组成, 而由于电梯特殊的对重装置, 往往电梯的启停能耗要远大于匀速运行能耗, 一般想要减少电梯的总能耗, 从控制的角度来讲, 可通过减少电梯不必要的启停次数来降低电梯的能耗。

(4) 电梯轿厢的拥挤度。电梯拥挤度严重影响了乘客的乘梯心情, 通常拥挤度过大会加剧乘客焦躁心理的程度, 同时拥挤度过大也会导致电梯内乘客的出梯时间增加。

(5) 长时间候梯率。指大楼内当前时间间隔期间乘客候梯时间超过 60S 的人数占当前总人数的比例。通过大量实验研究探索, 研究人员得出人们的心里焦躁程度和候梯时间有直接的关系: $PSY=K*T^2$ 。

其中, K 为比例系数, T 为乘客的候梯时间。

2.3 电梯群控系统仿真模型

电梯智能群控调度系统仿真平台是一个理想化的模拟仿真平台，通常由大楼电梯配置模块、交通流产生模块、交通模式识别模块、智能群控调度算法模块、数据通信模块、仿真模块等构成，其结构如下图 2.2 所示：

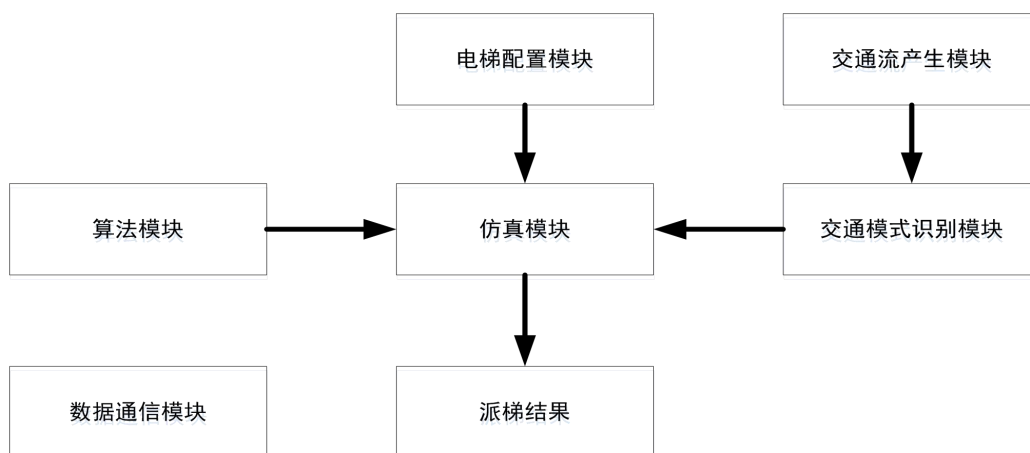


图 2.2 电梯仿真平台结构图

Fig. 2.2 elevator simulation platform structure

(1) 电梯配置模块

配置模块是对大楼信息和电梯基本功能信息的设置，通过设定大楼的信息和电梯的参数进行模拟仿真，设置的参数一般包括：建筑物楼层数、每层高度、电梯数量、电梯开关门时间、电梯内乘客进出时间、电梯额定载重、电梯的运行速度、电梯加速度等等。这些基本参数可由用户根据实际情况设定。

(2) 电梯交通流产生模块

电梯交通流的信息包括乘客具体到达起始楼层时间、乘客的起始目的楼层，通过控制这三个参数来进行交通流的仿真。

1. 乘客到达时间确定

由于在实际乘梯过程当中，大楼内部乘客的到达是离散的，通常认定这种到达服从于泊松分布，即大楼内部乘客的平均到达率 λ ，在 t 时间段内发生 n 次外呼信号的概率：

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

当呼梯信号服从泊松分布的时候，通常认为乘客的到达间隔 T 也会服从于负指数分布。在 $[0, t]$ 的时间间隔内，大楼内部最少有一个乘客到达电梯门口的概率为

$$1 - P_0(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

而这概率又可以表示为

$$P\{T \leq t\} = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

设 τ_i 表示大楼内第 i 个乘客的到达电梯门口的时刻, τ_{i+1} 表示第 $i+1$ 个乘客到达电梯门口时刻, 则

$$P\{t_i \leq t\} = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

若已知大楼内部乘客的平均到达率以及第 i 个乘客的达到率 P_d , 则该乘客最大的到达时间间隔为

$$t_i = -\frac{\ln(1 - P_d)}{\lambda} \quad (2.5)$$

则

$$\tau_i = \tau_{i-1} + t_i = \tau_{i-1} - \frac{\ln(1 - P_d)}{\lambda} \quad (2.6)$$

乘客的到达分为两步产生, 首先利用[0,1]的随机数根据式(2.5)得出乘客到大间隔 t_i , 再根据式(2.6)与前一个乘客到达时可累加, 推出各个乘客到达时刻。

2. 乘客的起始楼层

大楼内乘客的求取方式根据大楼内乘客上行乘客的百分比 X , 下行乘客的百分比 Y , 楼内层间乘客的百分比 Z 以及大楼内每层分布的乘客人数得出起始密度向量及起始-目标矩阵, 之后根据 Monte Carlo 的方法获得大楼内乘客的起始楼层, 并在其基础之上得出该乘客目标楼层, 求取步骤:

(1) 起始密度向量

假设该建筑物楼层层数位于 N , 每层乘客数为 $\text{pop}(i)$, $i=1,2,\dots,N$, 那么到达或着离开该楼层的乘客与该层总乘客成正比关系, 那么起始密度向量为:

$$\begin{cases} \text{origin}(1) = X \\ \text{origin}(i) = (Y + Z)\xi_i \end{cases} \quad (2.7)$$

式中,

$$\xi_i = \frac{\text{pop}(i)}{\sum_{i=2}^N \text{pop}(i)} \quad (2.8)$$

若 X 表示大楼内将门厅作为起始楼层的人数占总人数的比例, Y 表示大楼内将门厅作为目标楼层的人数占总人数的比例, Z 表示大楼内不把门厅当做起始目标楼层的

乘客占总乘客的比例， $origin(i)$ 是指起始楼层为 i 的乘客占总乘客的比例，其中， $i=1,2,\dots,N$ 。

(2) 起始目标矩阵

定义起始目标矩阵

$$\begin{bmatrix} od(1,1) & od(1,2) & \dots & od(1,N) \\ od(2,1) & od(2,2) & \dots & od(2,N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ od(N,1) & od(N,2) & \dots & od(N,N) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$od(i,j)(i,j=1,2,\dots,N)$ 是大楼内将第 i 层当作起始楼层, j 当作目的楼层的相对乘客人数，其求法如下列公式所示：

$$od(1,j) = \begin{cases} 0 & j=1 \\ \xi_i & j=2,3,\dots,N \end{cases} \quad (2.10)$$

$$od(i,1) = \begin{cases} 0 & i=1 \\ \frac{Y}{Y+Z} & i=2,3,\dots,N \end{cases} \quad (2.11)$$

$$od(i,j) = \begin{cases} 0 & i=j \\ \frac{Z\eta_{ij}}{Y+Z} & i \neq j \end{cases} \quad (2.12)$$

式中，

$$\eta_{ij} = \frac{pop(j)}{\sum_{\substack{k=2 \\ k \neq j}}^N pop(k)} \quad (2.13)$$

(3) 求取乘客的起始楼层

已得知大楼内乘客的起始密度向量，根据 Monte Carlo 方法求取乘客的起始楼层，通过一个分为 N 份的圆盘，将该大楼的楼层号与圆盘每份一一对应，圆盘的每份比例与大楼内此楼层的起始密度成正比关系，当求取大楼内某一乘客起始楼层时，只要转动圆盘，圆盘的指针静止时所指的楼层就是此乘客的起始楼层，详细步骤为：

1. 求出所有楼层起始密度之和

$$F = \sum_{i=1}^N origin(i) \quad (2.14)$$

2. 计算各楼层选择概率

$$p_i = \frac{origin(i)}{F} \quad (2.15)$$

3. 计算各楼层累计概率

$$q_i = \sum_{k=1}^i p_i \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (2.16)$$

4. 按照先后顺序求得大楼内每个乘客的起始楼层，随机产生一个位于[0,1]区间段内的数，当产生的数小于第一个楼层的累积的概率时，起始楼层则是 1，当 $q_i \geq r \leq q_{i-1}$ ，那么起始楼层为 i。

(4) 求取乘客的目标楼层

1. 确定起始楼层 i;
2. 求取起始目标矩阵中第 i 行的全部元素之和，其中不包括将 i 作为目标楼层的元素

$$F(i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N od(i, j) \quad (2.17)$$

3. 求取大楼内乘客将第 j 层作为目的楼层的概率

$$p_{ij} = \frac{od(i, j)}{F(i)} \quad (j=1,2,\dots,N, j \neq i) \quad (2.18)$$

4. 计算每个楼层的累加概率

$$q_{ij} = \sum_{k=1}^i p_{ij} \quad (j=1,2,\dots,N, j \neq i) \quad (2.19)$$

5. 按照顺序求得大楼内每位乘客的目的楼层，随机产生一个位于[0,1]区间段内的数，若这个数小于 q_{ij} ，则将第一层当作目的楼层，若 $q_{ij} \geq r \geq q_{ij-1}$ ，那么该乘客的目的楼层为 j。

下图 2.3 为交通流产生的流程图：

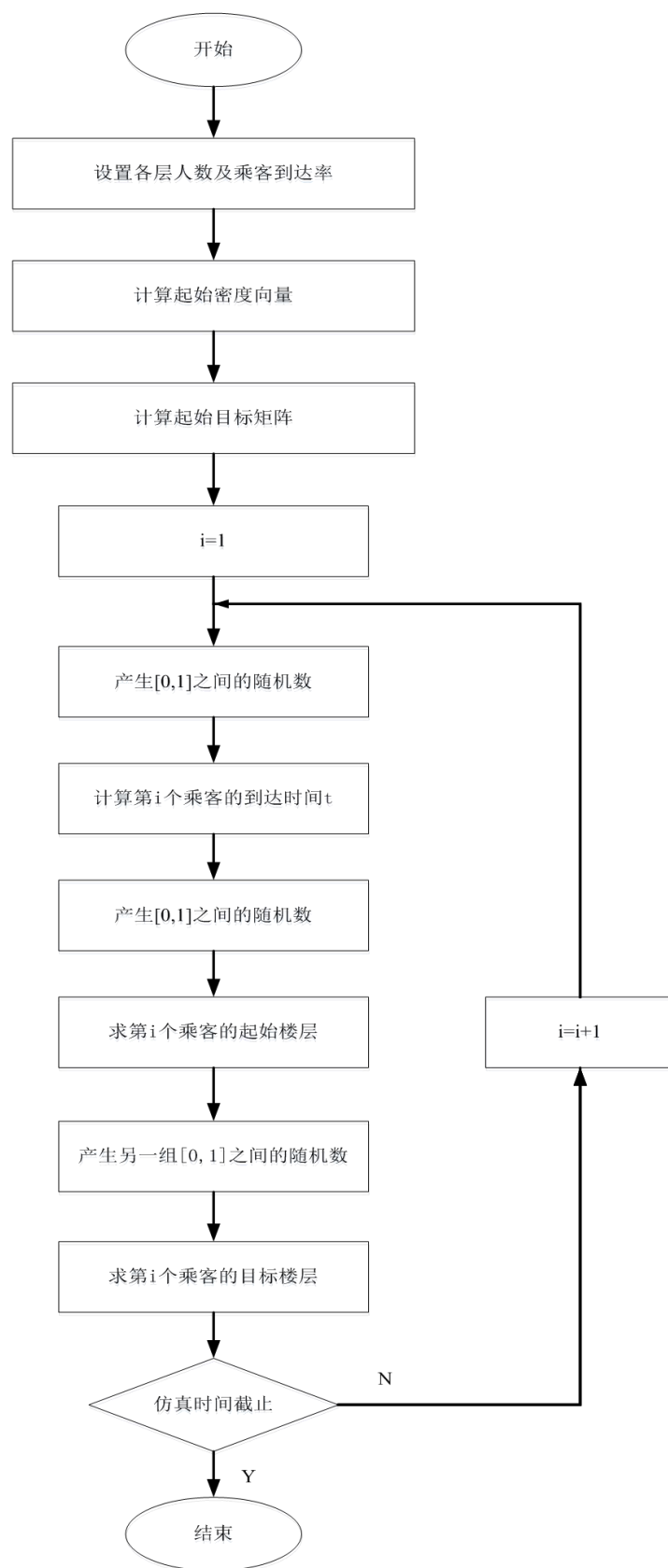


图 2.3 交通流产生流程图

Fig.2.3 Elevator traffic flow generation flow chart

（3）电梯数据通信模块

智能群控调度系统不仅需要实时采集大楼内各部电梯的状态信息以及乘客内外呼梯信息，也要根据大楼内的呼梯信号做出派梯响应，当乘客有乘梯需求并按下呼梯按钮时，电梯群控系统从各个电梯的控制器获取该电梯的内呼信号和当前电梯状态，电梯的状态信息包括大楼内部各个电梯当前所在的楼层位置，内呼信号，运行方向和状态，电梯轿厢内乘客人数。电梯智能群控调度系统根据外呼信号采集板采集的外呼信号，通过电梯智能调度算法做出派梯方案，选择大楼内一台最符合派梯指标的电梯去响应乘客的呼梯请求。

（4）电梯交通模式识别模块

电梯交通模式主要可分为上高峰交通模式，下高峰交通模式，层间交通模式，空闲交通模式。电梯交通模式识别是为了指导电梯智能群控调度算法的选择，电梯智能群控调度系统根据不同的交通模式选择合适的调度算法进行派梯响应呼梯信号，从而满足大楼内乘客的乘梯需求，进一步提升电梯智能群控调度的服务性能。

（5）电梯群控调度算法模块

智能群控调度算法是整个电梯智能群控调度系统的核心部分，其调度算法的优劣直接决定着大楼内各电梯服务性能的高低。本文的调度算法为遗传算法。

第3章 电梯交通流预测

3.1 引言

电梯乘客交通流预测是实现电梯智能群控调度的前提，是系统进行交通模式识别的基础，有效提高电梯交通流的预测精度能够使智能群控系统更加合理派梯，从而缩短乘客等待电梯时间，减少大楼内电梯不必要的停靠，节约电梯运行的能源消耗。因为乘客乘梯的随机性导致了电梯交通流的杂乱无序性，故无法用一固定的函数来对交通流预测模型进行表达。

灰色预测理论所需预测信息较少，方法简单，对系统“部分”已知信息进行发掘，发现杂乱无章的数据中隐藏的规律，获得最有价值的信息，从而实现对乘客交通流规律的正确认识及有效预测^[48-50]。对于一个办公大楼的电梯交通系统而言，乘客的到达并不是一个杂乱无序的随机过程，其根据办公大楼的特点，有一定的规律性可循，因此借助灰色预测理论来发掘出电梯乘客交通流的乘梯规律。通过对办公大楼乘客交通流的研究发现，对于不同工作日的相同时间来说，乘客的到达虽然存在一定的波动，但总体而言有一定的稳定性。本文根据等维新息的原则提出了一种优化改进的灰色GM(1,1)电梯交通流预测模型，分别对电梯乘客交通流时间序列进行周期特性以及发展变化趋势预测。综合考虑大楼内乘客交通流的周期特性以及发展趋势，将两组预测所得数据自适应加权组合预测，与小波神经网络预测模型的预测结果对比。实验表明，在实际获取的交通流数据量较少的情况下，组合预测比小波神经网络预测具有更小的预测误差。

3.2 电梯交通流预测问题分析

乘客交通流是根据大楼内部乘客乘梯的人数、乘梯的周期性和乘梯时所在楼层的情况来进行描述的，大楼内乘客的交通流反映出了电梯智能群控调度时大楼内当前的交通情况^[51]。Barney^[52]等人根据对办公大楼电梯乘客交通流长时期研究分析发现：不同工作日的同一时间段内，大楼内电梯的交通流模式及客流量十分类似，大约97%的电梯运行可理解为周期性的变化。一般来说，电梯乘客交通流时间序列是根据大楼内单位时间间隔内乘客进入电梯门厅数，离开电梯门厅数，乘客乘梯时总的乘客人数，层间乘客的客流最大层与次大层人数来进行表示的。一般情况下选取5分钟（电梯高峰模式下往返一次的运行时间）作为电梯交通流时间序列的时间选取间隔。通过乘客交通流时间序列 $\{x(t_i)\}$ 的过去观测值 $x(t_i-1)$ ， $x(t_i-2)$ ， \dots ， $x(t_i-m)$ ，进行预测模型

的建立，对电梯群控系统未来时刻 $t_i + k$ (k 为正整数)的值 $x(t_i + k)$ 预测。

3.3 电梯交通流预测模型

3.3.1 灰色 GM(1,1)预测模型

定理 1 设非负序列 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$ ，其中 $x^{(0)}(k) \geq 0$ ， $k = 1, 2, \dots, n$ ； $X^{(1)}$ 为 $X^{(0)}$ 的 1-AGO 序列：

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (3.1)$$

其中，

$$X^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

$Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列： $Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$ ，其中

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)) \quad (3.3)$$

$$k = 2, 3, \dots, n。$$

若 $\hat{a} = (a, b)^T$ 为参数列，且

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

则 GM(1,1)预测模型 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 的参数列满足 $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y$ 。

定义 1 设 $X^{(0)}$ 是一个非负的数列， $X^{(1)}$ 是原始序列 $X^{(0)}$ 的一次累加序列，称 $Z^{(1)}$ 是 $X^{(1)}$ 的均值生成序列， $[a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$ ，那么 $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$ 是灰色 GM(1,1)预测模型 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 的白化方程。式中， a 为发展系数； b 为灰色作用量。

定理 2 设 B ， Y ， \hat{a} 如定理 1 所述， $\hat{a} = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$ ，则：

1) 白化方程 $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$ 的解为：

$$x^{(1)}(t) = \left(x^{(1)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (3.5)$$

2) GM(1,1)模型 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 的时间响应序列为：

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (3.6)$$

$$k = 1, 2, \dots, n。$$

3) 还原值

$$\begin{aligned}
\hat{x}^{(0)}(k+1) &= \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \\
&= (1 - e^a) \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} \\
k &= 1, 2, \dots, n.
\end{aligned} \tag{3.7}$$

3.3.2 灰色 GM(1,1)模型的优化改进

由于灰色 GM(1,1) 预测模型所需要的计算数据少, 计算过程简单方便, 可进行检验, 相比其他的预测方法则拥有更好的适用性、移植性。但从公式(3.5)可以看出, GM(1,1) 预测模型的预测结果具有明显的指数形式, 当原始序列是振荡序列时, 灰色 GM(1,1) 模型预测的精度并不是特别理想, 因此, 需要对原始振荡序列合理的变换。文献[53-55] 相关研究已证实, 传统灰色 GM(1,1) 预测模型的背景值构造取值 $z^{(1)}(k)$ 存在不合理的地方, 因此导致预测模型中的发展系数 a 以及灰色作用量 b 的取值不合理, 最终影响模型的预测精度。通过对原始序列数据合理的变换, 同时优化预测模型的背景值选取公式, 以此提升预测模型的预测精度。

3.3.3 原始灰色振荡序列的变换

定义 1 假设原始数据序列为: $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$,

- 1) 若 $\forall k = 2, 3, \dots, n, x(k) - x(k-1) > 0$, 则称 X 为单调增长序列;
- 2) 若 $\forall k = 2, 3, \dots, n, x(k) - x(k-1) < 0$, 则称 X 为单调衰减序列;
- 3) 若 $\exists k, k' \in \{2, 3, \dots, n\}$, 有 $x(k) - x(k-1) > 0, x(k') - x(k'-1) < 0$, 则称 x 为随机振荡序列。设 $M = \max\{x(k)\}, m = \min\{x(k)\}, k = 1, 2, \dots, n$, 称 $M - m$ 为序列 X 的振幅。

定义 2 设原始数据序列为: $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$, 设 $T = M - m$, 那么则称此变换 $x(k)d_1 = x(k) + (k-1)T, k = 1, 2, \dots, n$ 为原始序列的平移变换, 记为 D_1 。

性质 1 任意原始序列 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ 经过平移变换之后成为单调递增的序列。即 $XD_1 = \{x(1)d_1, x(2)d_1, \dots, x(n)d_1\}$ 为单调递增序列。

定义 3 设原始数据序列为: $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$, $x(i) > 0, i = 1, 2, \dots, n$, 则称变换 $x(k)d_2 = \left[\prod_{i=1}^k x(i) \right]^{\frac{1}{k}}, k = 1, 2, \dots, n$ 为几何平均变换, 记为 D_2 。

性质 2 几何平均变换可以减小原始序列的随机性。

定义 4 称 $\rho(k) = \frac{x(k)}{\sum_{i=1}^{k-1} x(i)}, k = 2, 3, \dots, n$ 为序列 X 的光滑比。

性质 3 假如 X 是非负的单调增长序列并且满足准指数规律, 那么几何平均变换就可以提升其光滑性, 即

$$\frac{x(k)}{\sum_{i=1}^{k-1} x(i)} > \frac{x(k)d_2}{\sum_{i=1}^{k-1} x(i)d_2} \quad (3.8)$$

证明 假设 $x(k) = Ae^{ak}$ ($A > 0, a > 0$)

则

$$x(k)d_2 = A \left[\prod_{i=1}^k e^{ai} \right]^{\frac{1}{k}} = Ae^{\frac{a(k+1)}{2}} \quad (3.9)$$

令

$$f(k) = \frac{a^{ax}}{e^{\frac{a(x+1)}{2}}} (a > 0) \quad (3.10)$$

可证 $f'(x) > 0$ ，即函数 $f(x)$ 为单调递增函数。

由 $A > 0, a > 0$ 知

$$\frac{Ae^{ak}}{Ae^{\frac{a(k+1)}{2}}} > \frac{Ae^{a(k-1)}}{Ae^{\frac{ak}{2}}} \quad (3.11)$$

即

$$\frac{x(k)}{x(k)d_2} > \frac{x(k-1)}{x(k-1)d_2} \quad (3.12)$$

由上式知对 $\forall i < k$ ，均有

$$\frac{x(k)}{x(k)d_2} > \frac{x(i)}{x(i)d_2} \quad (3.13)$$

故有 $x(k)x(i)d_2 > x(i)x(k)d_2$ 。

两边对 i 从 1 到 $k-1$ 进行累加，有

$$\frac{x(k)}{\sum_{i=1}^{k-1} x(i)} > \frac{x(k)d_2}{\sum_{i=1}^{k-1} x(i)d_2} \quad (3.14)$$

平移变换可使任意原始数据序列变成一个单调递增的序列；几何平均变换不但可以使原始序列的随机波动性得到减弱，还能够保持其原来的单调性，并且提高数据序列的光滑性。故此，如果将时间序列数据进行平移变换以及几何平均变换之后所获得的数据建立灰色 GM(1,1) 预测模型，即可提高灰色 GM(1,1) 模型预测精度。

3.3.4 GM(1,1)模型的背景值改进

如图 3.1 所示，常用的传统灰色 GM(1,1) 预测模型的背景值公式是根据接近的梯形面积公式得出灰色 GM(1,1) 预测模型的背景值 $S_{\text{梯形}BCDE}$ 。然而实际的背景值是 $x^{(1)}(t)$ 在区间 $[k-1, k]$ 上与 t 围成的面积 S_{BCDG} 。而在一般情况下， $S_{\text{梯形}BCDE} \neq S_{BCDG}$ 。所以说，当实际模型曲线变化过大时，把 $z^{(1)}(k)$ 当做模型背景值公式进行预测会比模型实际的背

景值公式有较大的误差。因此，应对预测模型背景值的均值生成法进行改进，以此来减少由模型本身造成的误差。由文献[54]可得背景值优化公式：

$$Z^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)}{\ln x^{(1)}(k) - \ln x^{(1)}(k-1)}, \quad k = 2, 3, \dots, n. \quad (3.15)$$

用公式(3.15)替代原模型中的公式(3.3)。

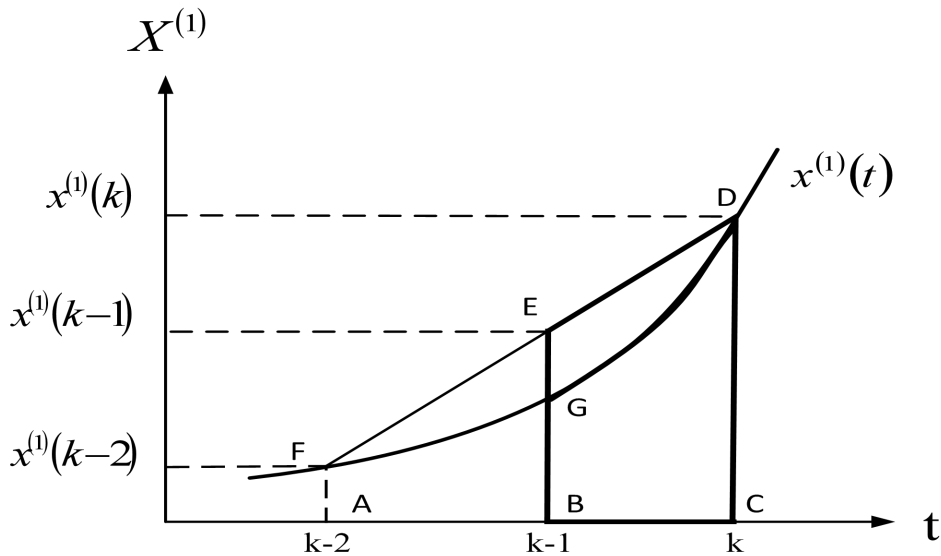


图 3.1 模型误差来源示意图

Fig.3.1 The schematic of model error source

3.4 基于等维新息原则优化 GM(1,1)模型

本文根据交通流历史数据，综合考虑电梯交通流的周期特性以及发展趋势，采用等维新息原则优化两组改进的 GM(1,1) 模型滚动预测未来的数据。其原理是不断地丢弃旧数据，增添新数据，及时地跟随数据序列的变化规律。首先利用已知数据，建立 GM(1,1) 预测模型，得到预测数据，再去掉前一次建模时的第一个历史数据，增加获得的最新数据，始终保持数据列维度不变，如此反复，逐一进行预测。

具体优化步骤如下：

Step1: 对电梯交通流时间序列 $X^{(0)}$ 进行振荡序列判断，若否，则直接进入 Step3；若是，则进行 Step2；

Step2: 将振荡的原始数据序列 $X^{(0)}$ 先平移变换，再进行几何平均变换，最终获取变换后的数据序列 $Y^{(0)}$ ；

Step3: 将电梯乘客交通流序列数据进行 1-AGO 操作得到 $X^{(1)}$ ；

Step4: 把累加后的数据带入优化后的模型进行预测，得到预测值 $x'(k+1)$ ；

Step5: 再次判断原始序列是否为振荡序列，若是，则将预测值 $x'(k+1)$ 进行反几何

平均变换以及反平移变换得到实际预测值；若否，直接进入 Step6；

Step6: 根据等维新息原则，重复上述步骤，滚动预测。

3.5 电梯交通流预测

对某一办公楼的电梯客流实际采集了 6 个工作日的电梯交通流数据。统计办公大楼单位时间内电梯乘客的总人数，构成了乘客交通流的时间数据。客流数据采集时间为 7:00—19:00，时间间隔取 5 min，每天采集 144 个数据。

连续 6 日电梯乘客总交通流量趋势，如图 3.2。

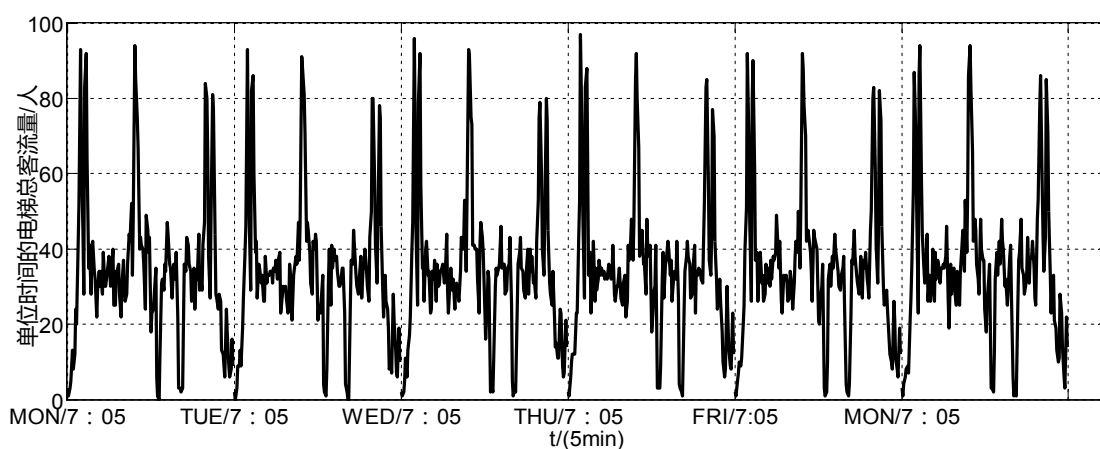


图 3.2 电梯乘客总交通流示意图

Fig.3.2 Elevator passenger traffic trends

3.5.1 基于电梯交通流周期特性灰色 GM(1,1)预测

分析采集的某典型办公楼的客流数据，为了预测某一工作日电梯总交通流量时间序列 $\{x(t_i)\}$ ，选取其前 5 个工作日同一时刻的值 $x(t_i-5)$ ， $x(t_i-4)$ ， \dots ， $x(t_i-1)$ 作为灰色 GM(1,1) 模型的原始数据预测当前 $x(t_i)$ 的值。

选用前 5 个工作日的实测电梯交通总客流量当做灰色 GM(1,1) 模型的输入，进行下一个工作日交通流总客流量的预测，得到预测结果如图 3.3。

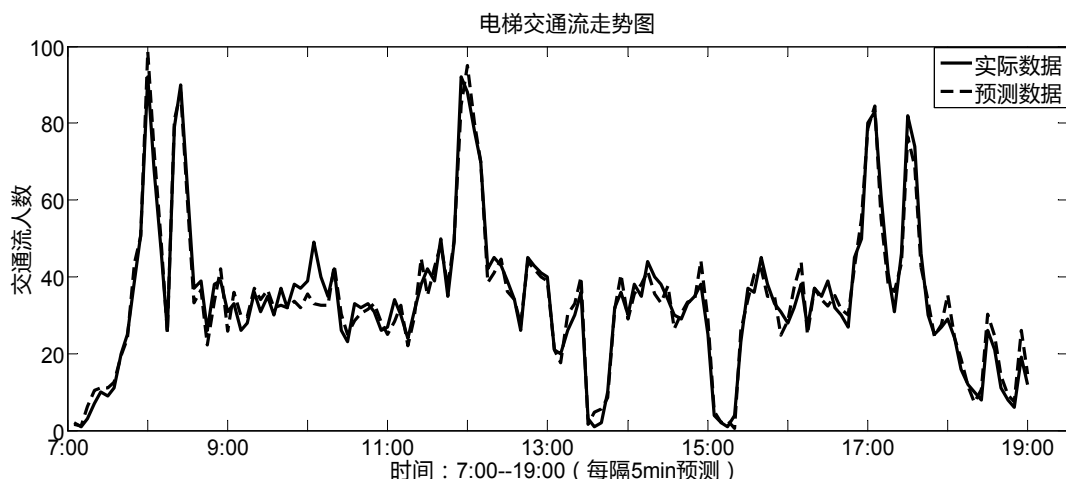


图 3.3 基于乘客交通流周期特性灰色 GM(1,1) 预测

Fig. 3.3 Gray GM(1,1) prediction based on periodic characteristics of Elevator Traffic Flow

由仿真图可知，将前 5 日的同一时刻的数据 $x(t_i - 5)$, $x(t_i - 4)$, ..., $x(t_i - 1)$ 作为灰色 GM(1,1) 模型的原始数据来预测当前 $x(t_i)$ 的值，能够很好地预测出当前工作日的电梯交通总客流量，但在 9:50-10:10 这段时间内交通流预测结果与实际交通流相差较大，原因是这段时间内交通流产生了较大的非周期性变化，采用前 5 个工作日同一时刻的数据作为 GM(1,1) 预测模型的原始数据进行预测并不能反映这一变化。

3.5.2 基于电梯交通流发展趋势的滚动 GM(1,1) 预测

通过分析电梯交通流整体的变化趋势发现，任意工作日的交通流客流数据都是杂乱无章、波动无序的，难以满足灰色预测模型固有的齐次指数变化规律，因此无法直接采用灰色 GM(1,1) 模型对交通流进行预测。但将客流数据序列以固定时间段分割来看，电梯乘客交通流的变化趋势又有规律可循。因此采用等维新息滚动 GM(1,1) 模型对乘客交通流发展趋势来进行滚动预测。

等维新息滚动 GM(1,1) 预测模型能否对电梯交通流的变化发展趋势进行精确预测的关键是滚动周期 T 的选取，为了评价不同的滚动周期 T 对电梯乘客交通流的预测性能，本文引入平均相对误差 (Mean Relatively Error, MRE)、均方误差 (Mean Square Error, MSE) 和均等系数 (Equalization Coefficient, EC, 即拟合度) 这三种评价指标：

1) 平均相对误差

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_t \left| \frac{Y_p(t) - Y_r(t)}{Y_r(t)} \right| \times 100\% \quad (3.16)$$

2) 均方误差

$$MSE = \sqrt{\sum_t (Y_p(t) - Y_r(t))^2} \quad (3.17)$$

3) 拟合度

$$EC = 1 - \frac{\sqrt{\sum_t (Y_p(t) - Y_r(t))^2}}{\sqrt{\sum_t (Y_p(t))^2} + \sqrt{\sum_t (Y_r(t))^2}} \quad (3.18)$$

式中: $t=1,2,\dots,n$, $Y_p(t)$ 为预测的输出, $Y_r(t)$ 为实际的输出。

一般情况下, MRE 通常用来说明预测值和实际大小值的偏离程度。其值越小就表明预测值跟真实值之间的偏离越小, 其效果越好。MSE 通常用来反应预测值与实际值的误差分布状况, 其值越小就说明误差分布相对较为集中, 其预测效果就越好。EC 通常用来表示模型预测值和实际值之间的拟合度大小, 它的值越接近整数 1, 就表明其预测效果也就越好。

采用滚动周期 T 的灰色 GM(1,1) 预测, 选取工作日的某一时刻前 T 个数据进行这一时刻的乘客交通流量预测, 对于不同的周期 T, 其性能指标对比见表 3.1。

表 3.1 不同的滚动周期 T 的性能指标

Table 3.1 Different rolling cycle T performance indicators

参数	T=4	T=5	T=6
MRE	44.61%	58.12%	81..12%
MSE	182.37	299.90	708.02
EC	0.82	0.70	0.45

通过表 3.1 性能对比发现, 当滚动周期 T=4 时能够较好的预测出电梯交通流序列的变化发展趋势。以滚动周期 T=4 进行的滚动预测, 预测结果如图 3.4。

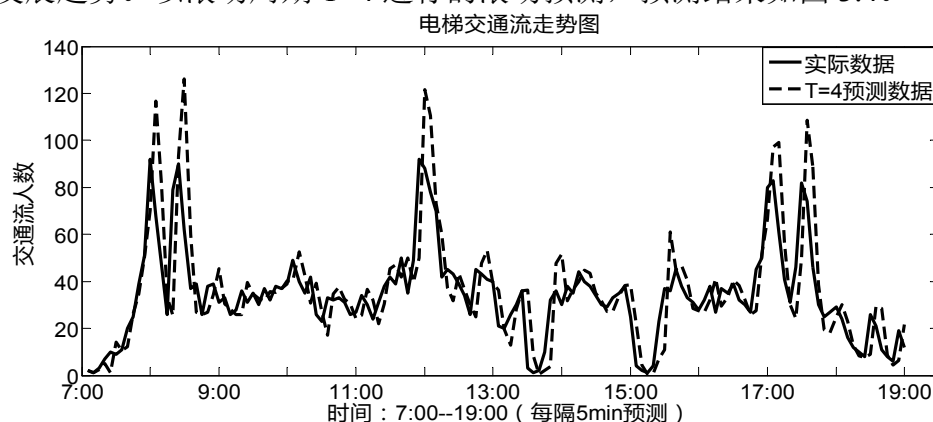


图 3.4 基于电梯交通流发展趋势的灰色 GM(1,1) 预测

Fig. 3.4 Gray GM(1,1) Prediction Based on the Development Trend of Elevator Traffic Flow

从仿真图 3.4 中可以看出,将某工作日某时刻前 4 个值 $x(t_i-4)$, $x(t_i-3)$, ..., $x(t_i-1)$ 作为灰色 GM(1,1) 模型的原始数据来预测当前 $x(t_i)$ 的值。预测得出的值跟实际数据对比发现,在交通流高峰模式下,预测的结果误差比较大,并有一定的预测滞后。但从总体来看,滚动 GM(1,1) 预测模型能够大致跟随电梯交通流的发展变化趋势。

3.5.3 组合预测

通过两组预测模型的仿真可知,两组预测模型各有利弊,周期预测能够有效预测出电梯交通流的周期特性,但是无法预测非周期性的电梯交通流;滚动预测能够及时应对电梯乘客交通流的突发事件,但在各个时间段内的高峰交通流模式下效果较差。综合考虑电梯乘客交通流的周期特性以及发展变化趋势,将两组改进的模型进行组合预测,既考虑了乘客交通流的周期特性,又能够及时应对电梯乘客交通流的突发事件。

提高预测质量的关键在于两种预测结果权重系数的比例分配[56-57],本文针对两种交通流预测结果进行分析,根据两组预测模型预测数据的误差大小采用自适应权重系数方法将两组预测数据进行加权组合,从而充分发挥两种预测模型的优越性。

本文所提出的改进灰色组合预测模型既考虑了大楼内乘客交通流时间序列前几个时刻的变化趋势(即横向变化趋势),也考虑了乘客客流时间序列不同工作日的同一时刻的变化趋势(即纵向变化趋势)。如图 3.5 是组合预测的数据仿真图。

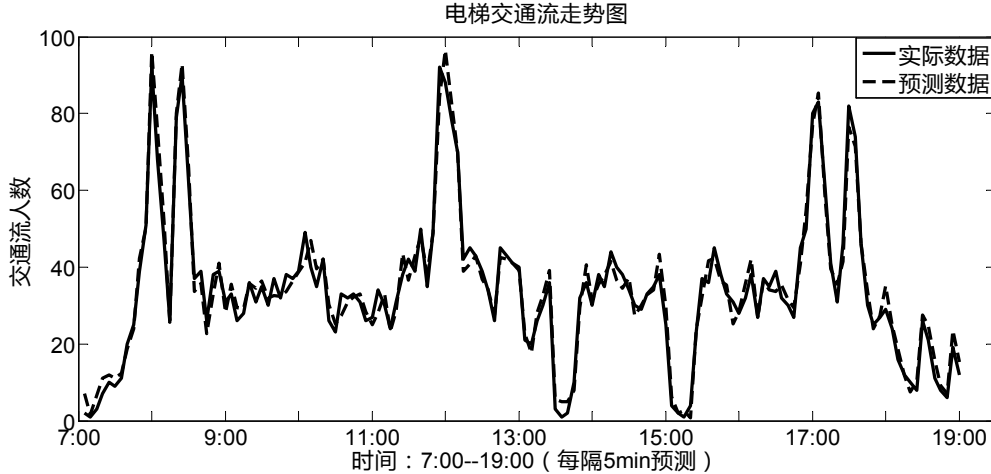


图 3.5 组合预测

Fig. 3.5 Combination forecasting

从上图 3.5 仿真结果可知,基于组合模型的预测结果相比单一预测模型的预测结果更好。组合模型综合考虑电梯交通流的周期特性以及发展趋势,充分发挥了两种预测的优势,不仅能够很好预测某一时刻交通流量,而且电梯交通流出现突发性的情况时,也能及时跟随交通流变化发展趋势。

为了证明本文算法的优劣，将乘客交通流组合预测的预测结果与文献[8]所提出的方法进行对比说明，其中，将电梯交通流客流数据的前五天进行模型的学习，后一天的乘客交通流客流进行模型的测试。文献[8]所提出的小波神经方法的预测结果如下图 3.6 所示，组合预测与其预测性能对比见表 3.2。

表 3.2 组合预测与小波神经预测性能对比

Table 3.2 Comparison of prediction and performance prediction of wavelet neural networks

参数	组合预测	小波神经
MRE	17.89%	50.1%
MSE	39.78	122.69
EC	0.95	0.87

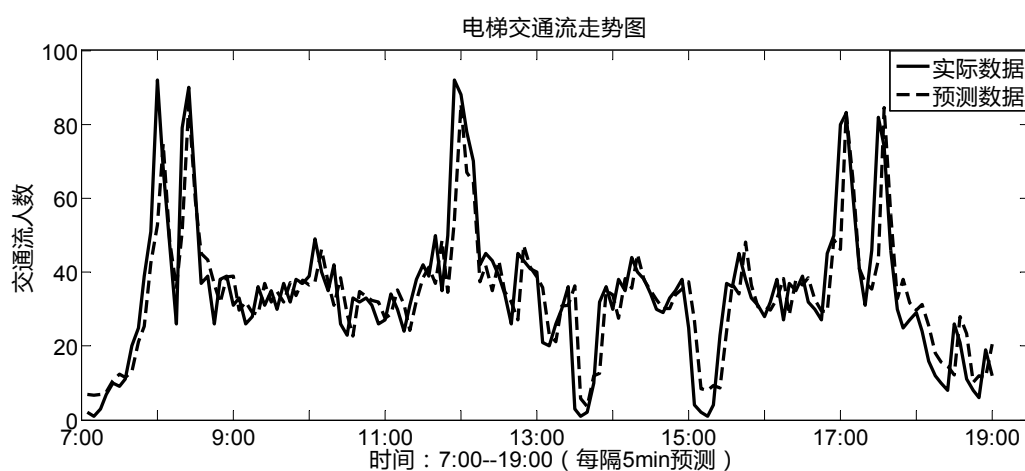


图 3.6 小波神经网络预测

Fig. 3.6 Wavelet Neural Network forecasting

对比上图 3.5 与图 3.6 的预测结果，结合表 3.2 的预测性能指标对比能够得知，在实际获取的交通流数据量较少的情况下，本文所提出的改进的灰色组合预测模型的预测性能更好，而且计算过程比较简单，不需要复杂的学习过程。

在智能群控派梯调度的过程中，智能群控系统仅仅依靠电梯乘客总交通流的预测无法完成调度，还需要根据大楼内的乘客进出门厅交通流的预测结果才能完成派梯调度。因此，分别将大楼内乘客进门厅以及出门厅交通流的数据代入灰色组合模型进行乘客交通流预测，预测结果如下图 3.7 和图 3.8 所示。

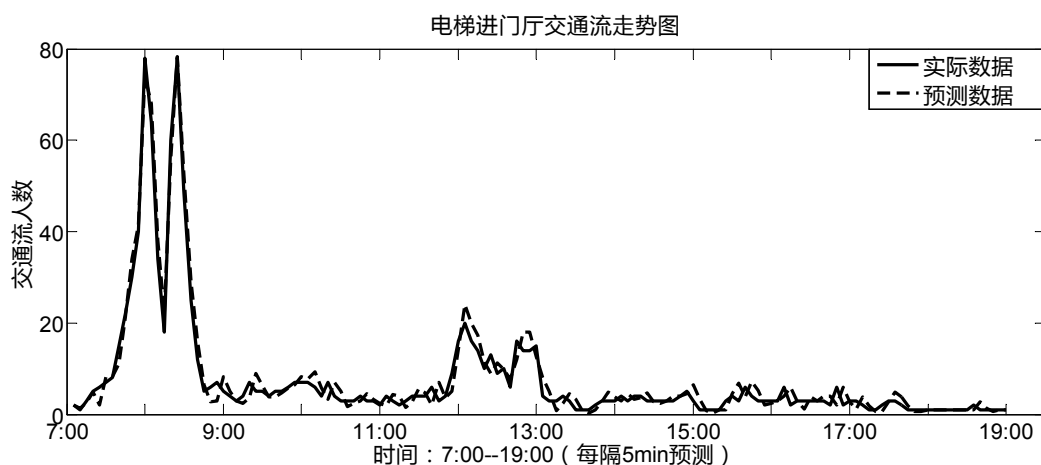


图 3.7 进门厅交通流预测

Fig. 3.7 Entrance hall traffic flow forecasting

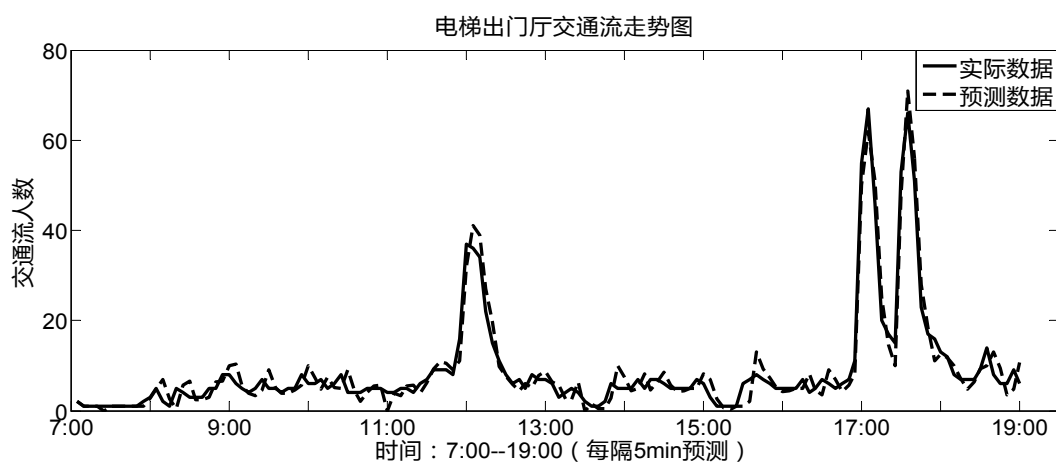


图 3.8 出门厅交通流预测

Fig.3.8 Out of the station traffic flow forecasting

3.6 本章小结

电梯乘客交通流的有效预测是实现智能群控调度系统最优派梯的前提。本文结合电梯交通流的特征，综合考虑电梯交通流的周期特性及发展趋势，提出了改进灰色GM(1,1)组合预测模型进行取长补短，综合考虑了电梯交通流的周期特性以及突发情况。实验表明，加权灰色组合预测模型预测精度要比小波神经网络的预测效果更好，且所需要的数据量少，模型计算过程简单方便，可移植性高。电梯乘客交通流预测是电梯智能群控调度的前提，电梯群控调度仿真结果表明，本文预测方法使智能群控系统更加合理派梯，缩短了乘候梯时间，减少了不必要的停靠，节约电梯运行的能源消耗。

第4章 电梯交通模式的识别

4.1 引言

电梯交通模式的识别是实现电梯智能群控节能优化调度的基础，根据预测所得客流对大楼内乘客交通流所属的交通模式进行准确识别，对不同的交通模式选择合适的智能群控算法，能够使智能群控调度系统更加合理的进行派梯。

由于电梯交通模式的分类不仅与预测的交通客流量及当前时刻交通客流量有关，还与实际运行的电梯台数有关，进行模式识别分类时情况较为复杂多变。本文提出了一种基于粗糙集属性约减的乘客交通流模糊识别方法。首先，根据采集的交通流数据计算出各层客流不同时刻客流变化率的取值范围，对交通流预测模型预测所得客流数据进行修正，减小了客流预测误差对模式识别造成的影响；其次，在交通模式识别之前确定当前实际运行的电梯台数（电梯载客率 X_{\max} ），电梯组在实际运行过程中，无法避免某些电梯因损坏停用或者某些时刻用作特殊用途的情况，这些因素都将影响载客率 X_{\max} 的大小，而 X_{\max} 的取值直接影响空闲交通模式与其他模式的区分；再者，针对影响电梯交通模式分类的预测客流量及当前时刻客流量，采用粗糙集理论对两者进行属性重要度划分，与分别进行预测客流及当前客流分析相比，不仅降低了模型处理客流数据的复杂性，而且减少了模型的模糊规则数目；同时，根据粗糙集属性约减理论删减不必要的模糊规则数目，精简模型。模型运用粗糙集理论对影响电梯交通模式识别的属性及模糊推理规则的两个方面进行属性约简，不仅增强了电梯模式识别的容错性，防止了电梯交通模式因电梯各层客流比例微小浮动做出的模式变化，降低了电梯系统因交通模式频繁改变造成的能源消耗，而且精简了模型的规则数目。同时，该模型不需要依赖大量客流数据分析，减少了模型数据分析的工作量，增强了模型的可移植性。

4.2 电梯交通模式识别方法

4.2.1 电梯客流预测修正

交通模式的识别分类主要是依靠大楼内各楼层客流百分比进行划分的。如果在当前时刻结束时对电梯系统各层客流进行统计分析，以此作为下一时刻的电梯交通模式划分依据，那么这种方式的电梯交通模式识别会存在滞后。因此，为了消除这种滞后

带来的影响，电梯智能群控调度系统有必要进行下一时刻的乘客客流预测。然而，不同的客流预测方法都有其适用的场合范围，而且对于一个电梯交通系统来说，不可能每时每刻预测的客流都是准确无误的。

通过分析实际采集的某一大楼的客流数据发现，虽然不同工作日的同一时刻的电梯客流数据不同，但是其各个时间段的客流变化率 $r_i = \frac{X(i) - X(i-1)}{5}$ ($X(i)$ 表示在 i 时刻的电梯乘客的客流量) 在某一变化区间内。根据这一特性，本文提出了一种客流变化率修正预测结果的方法。

对于一个电梯群控系统来说，当前时间段内的客流数据是确定已知的，而预测的下一时间段内的客流数据则是不确定的、后验性的。因此有必要对预测所得的电梯乘客客流数据的精确度进行检验修正。首先，根据已知的实际电梯客流数据找出不同时间段的电梯客流变化率的区间范围 $[r_{\min}, r_{\max}]$ 。再根据模型所预测的电梯客流数据 $X(i+1)$ 与当前时间段内确定的客流数据 $X(i)$ 计算出预测客流的变化率 r_{i+1} ，将 r_{i+1} 与 $[r_{i+1\min}, r_{i+1\max}]$ 相比较并修正电梯客流预测值。同时，当当前时刻的客流变化率 r_i 超出变化率区间 $[r_{i\min}, r_{i\max}]$ 的 2 倍时，则默认出现突发交通客流，不再对预测客流以及客流变化率 r_i 进行修正。具体步骤流程图如图 4.1。

具体优化步骤如下：

Step1: 在当前乘客客流时间段结束时，因当前时间段内的客流人数已确定（即 r_i 确定），对当前时间段内的客流变化率区间 $[r_{i\min}, r_{i\max}]$ 进行修正。若 $r_i \in [r_{i\min}, r_{i\max}]$ ，则不必修正，进入 **Step3**；否则进入 **Step2**；

Step2: 若 $r_i < r_{i\min}$ 且 $|r_i| \leq 2|r_{i\min}|$ ，则使 $r_{i\min} = r_i$ ，替换变化率区间最小值；同理，若 $r_i > r_{i\max}$ 且 $|r_i| \geq 2|r_{i\max}|$ ，则使 $r_{i\max} = r_i$ ，替换变化率区间最大值；若否，则不需修正变化率区间，进入 **Step3**；

Step3: 根据交通流预测模型预测所得下一客流时间段的客流人数 $X(i+1)$ ，计算出下一客流时间段的客流变化率 $r_{i+1} = \frac{X(i+1) - X(i)}{5}$ ，若 $r_{i+1} \in [r_{i+1\min}, r_{i+1\max}]$ ，则不需修正预测客流，即 $Y_{i+1} = X_{i+1}$ (Y_{i+1} 表示修正后的预测客流)，进入 **Step1**；若 $r_{i+1} \notin [r_{i+1\min}, r_{i+1\max}]$ ，进入 **Step4**；

Step4: 判断当前时间段内的客流变化率 r_i 是否发生突发客流情况，若 $r_i \notin [r_{i\min}, r_{i\max}]$ ，则表示发生突发客流情况，不需要修正预测客流，即 $Y_{i+1} = X_{i+1}$ ，进入 **Step1**；若 $r_i \in [r_{i\min}, r_{i\max}]$ ，则进入 **Step5**；

Step5: 若 $0 \leq r_{i+1\min} \leq r_{i+1\max}$ ，则进行预测客流修正， $Y_{i+1} = X_{i+1} + 5 \times r_{i+1\max}$ ，进入 **Step1**；若否，进入 **Step6**；

Step6: 若 $r_{i+1\min} \leq r_{i+1\max} \leq 0$ ，则进行预测客流修正， $Y_{i+1} = X_{i+1} + 5 \times r_{i+1\min}$ ，进入 **Step1**；若否，进入 **Step7**；

Step7: 若 $r_{(i+1)\min} \leq 0 \leq r_{(i+1)\max}$, 则进行预测客流修正, $Y_{(i+1)} = \frac{X_{(i)} + X_{(i+1)}}{2}$ 进入 Step1。

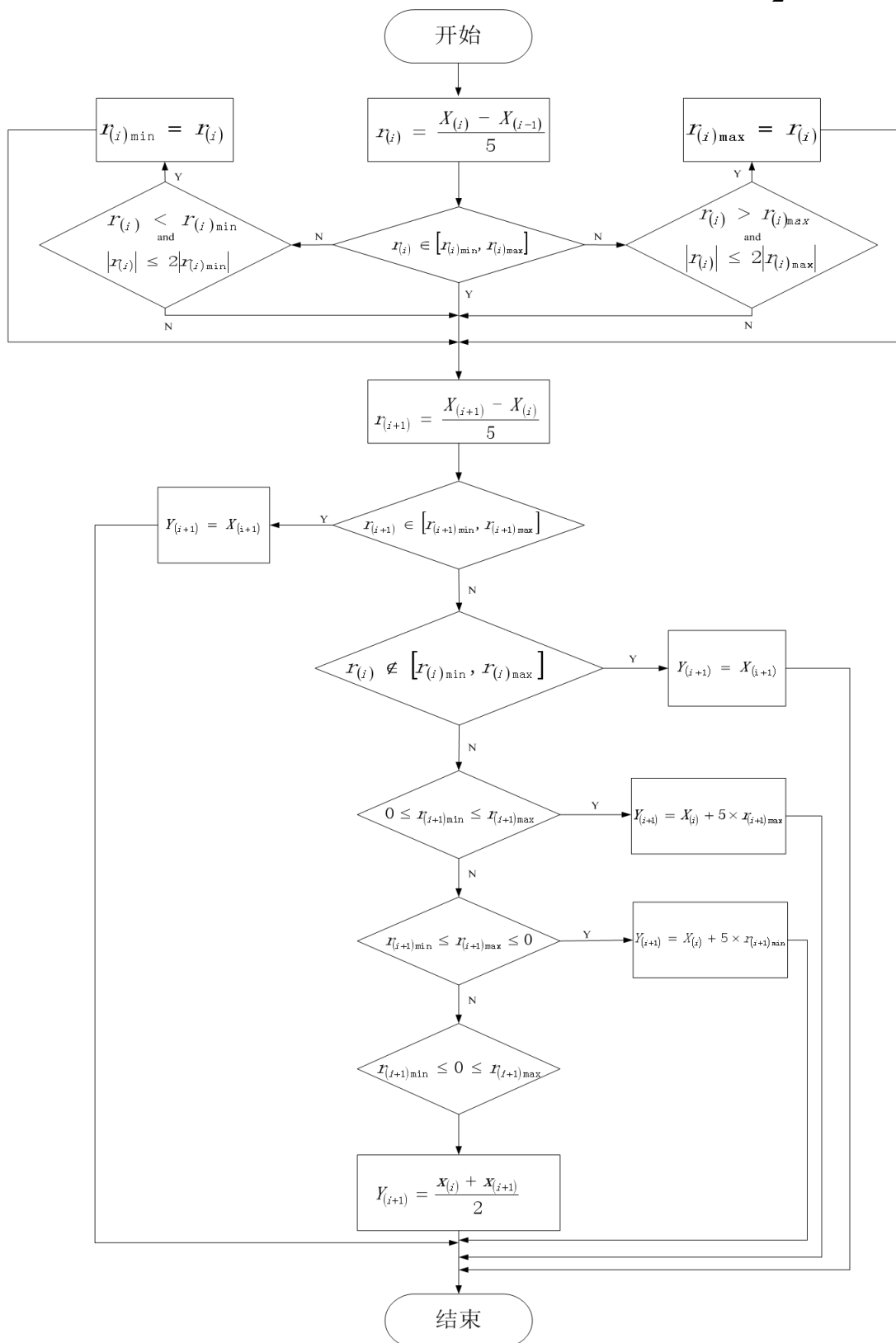


图 4.1 电梯客流预测修正

Fig. 4.1 Elevator passenger flow forecast correction

为了验证电梯客流预测修正模型的实用性，将滚动周期 $T=4$ 进行的滚动预测的结果（图 3.4）以及基于小波神经预测的预测结果（图 3.6）进行预测修正，修正后的预测结果如下图 4.2 和 4.3，修正后的性能对比如下表 4.1 所示。

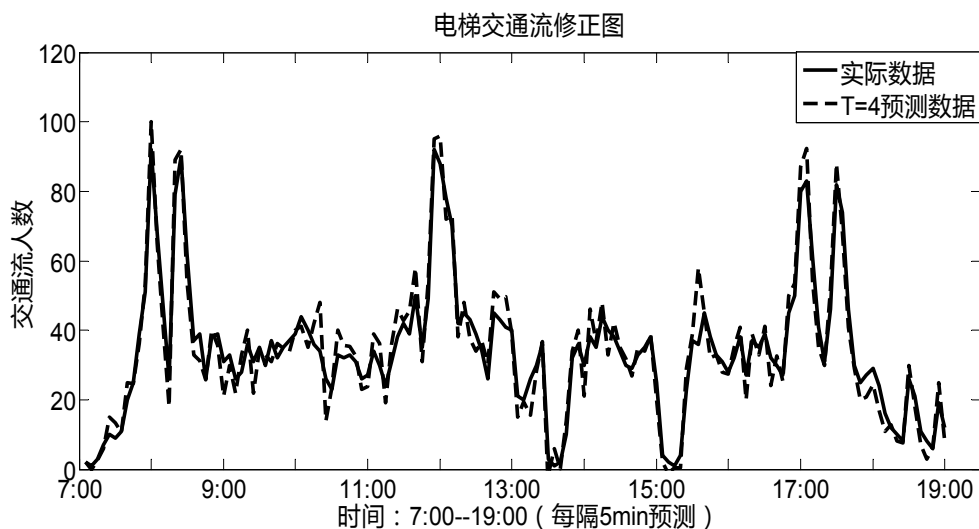


图 4.2 滚动预测修正

Fig. 4.2 Rolling Forecast Correction

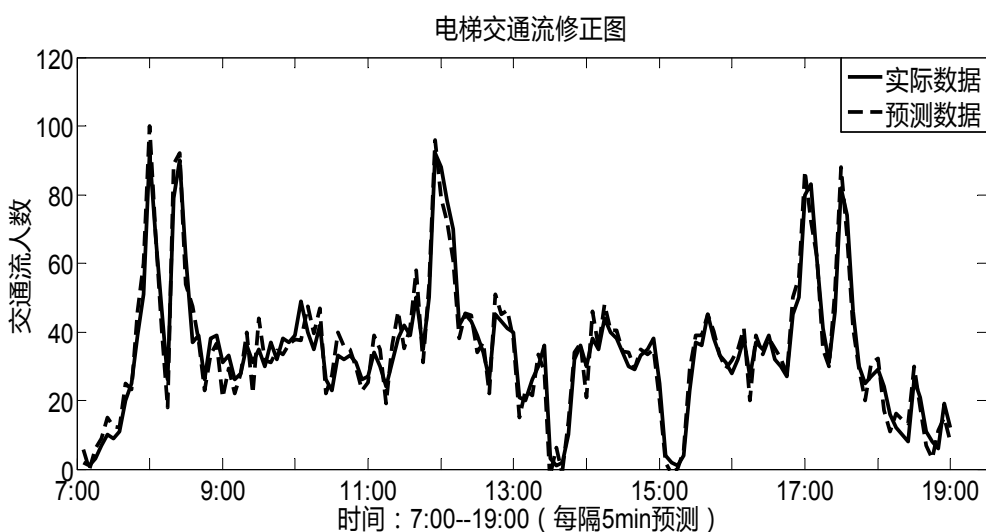


图 4.3 小波神经预测修正

Fig. 4.3 Wavelet neural prediction correction

表 4.1 修正前后性能对比

Table 4.1 Corrected before and after performance comparison

参数	滚动预测	滚动预测修正	小波神经预测	小波神经预测修正
MRE	44.61%	21.61%	50.10%	24.38%
MSE	182.37	62.98	122.69	58.45
EC	0.82	0.93	0.87	0.93

由上表可以看出, 电梯客流滚动预测以及小波神经网络预测的预测结果经过客流修正模型的修正之后, 相比较修正之前的 MRE、MSE、EC 参数, 各个参数的性能均有提升, 证明了本文提出的客流修正模型的有效性。

4.2.2 电梯交通模式分析

电梯乘客人数、乘客的到达楼层和乘客的到达时间通常具有需求多样性和随机性, 若电梯群控系统要满足不同需求且随机出现的乘客需求, 对这些乘客服务需求不加判断采用同一调度策略显然是不合理的, 因此需要对电梯客流所处的交通模式进行识别。电梯的交通模式是指某一时间段内(一般为 5min)的人员乘坐电梯的流动情况。主要以大楼内人员进出门厅电梯和层间电梯的人数比例以及客流的强度为划分依据。对一个固定的建筑物办公大楼而言, 大楼内电梯交通模式可以划分为: 电梯上行高峰模式, 电梯下行高峰模式, 电梯两路、四路模式, 电梯平衡层间模式及电梯空闲模式。

1) 上高峰交通模式(up-peak traffic pattern)

当大楼内大部分的乘客从大楼的门厅进入电梯并上行, 且乘客目的楼层分布于大楼内的不同楼层, 这时层间与下行客流很少或没有。该模式通常发生于上班的时刻。

2) 下高峰交通模式(down-peak traffic pattern)

当大楼内大部分的乘客从不同的楼层乘坐电梯下行前往门厅, 这时候大楼内层间客流及上行客流极少或没有。该模式通常发生于大楼内下班时间。

3) 两路、四路交通模式(two、four traffic pattern)

当大楼内的主要乘客客流是前往某一楼层进入或着从某一楼层出来时, 且该楼层不是大楼的门厅, 那么称此交通模式是两路交通模式。当大楼内的主要乘客客流是前往某两个楼层或者从某两个楼层乘坐电梯分散到大楼内其他楼层, 那么称此交通模式为四路交通模式。这两种特殊的层间交通模式是因为大楼内的特殊楼层造成的, 比如某一个楼层或两个楼层有餐厅或娱乐场所等等。若大楼内无特殊楼层存在, 那么此时就不必再对电梯乘客的交通模式进行两路、四路交通模式的识别。

4) 平衡层间交通模式(balanced inter-floor traffic pattern)

大楼内上行客流与下行客流数量相差无几, 无明显的进出电梯的客流层, 不同楼层进出电梯的乘客基本相同。

5) 空闲交通模式(idle traffic pattern)

当某一时间段内大楼客流数量较少, 几乎无电梯外呼信息, 这种电梯交通模式称之为空闲模式, 该模式可由电梯总客流直接判断得出。

4.2.3 粗糙集理论

粗糙集理论是由一位波兰数学家提出来的一种处理模糊和不确定知识的理论[58-59]。利用粗糙集理论，对影响电梯交通模式分类的各种因素进行属性约简分析，得出不同时刻影响电梯交通模式划分的主要因素，从而最终求出大楼内乘客交通模式识别最简单的分类规则。

定义1 设信息系统为 $S=(U,A,V,f)$ ，其中： U 为论域； A 为属性的非空有限集合； $V=\bigcup_{a \in A} V_a$ ， V_a 是属性 a 的值域； $f:U \times A \rightarrow V$ 是一个信息函数， $\forall a \in A, x \in U, f(x,a) \in V_a$ 。

定义2 设信息系统为 $S=(U,A,V,f)$ ，若 $A=C \cup D, C \cap D = \emptyset$ ， C 是条件属性集， D 是决策属性集，这样的信息系统称之为决策表。

定义3 设 P, Q 为属性集， Q 中的任意属性为不可省。如果 $Q \subseteq P$ 且 $Ind(Q)=Ind(P)$ ，称 Q 为 P 的一个约简，记为 $Red(P)$ 。 P 属性集中所有不可省略的集合是 P 的核，记为 $Core(P)$ ，它的表达式是 $Core(P)=\bigcap Red(P)$ 。

对于一个知识库中的知识而言，并非所有的知识都同等重要的，在不同情况下，有些知识是冗余的[60-61]。属性约简能够在不降低原有分类能力的情况下，删除其中不重要或不相关的知识。

4.2.4 实际交通模式分析

对某办公楼的电梯客流采集了一周(5个工作日)和下一周一个工作日的电梯客流数据，最后获得6个工作日中的7:00—19:00电梯客流数据。电梯客流数据采集的时间间隔取5min，每天每种客流采集145个数据，某一个典型工作日的电梯客流数据走势图如图4.4。

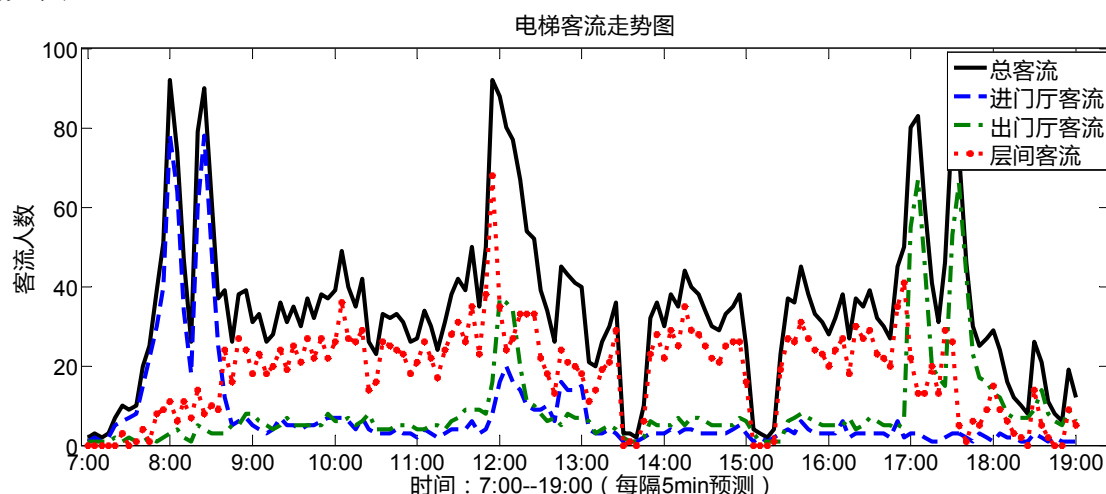


图 4.4 电梯客流数据曲线图

Fig.4.4 Elevator passenger flow chart

通过对这一办公大楼所采集的电梯客流数据分析后，发现此办公大楼的第三层为

一个餐厅，所以中午午休吃饭时间段内该大楼的此楼层有着较大的乘客客流流量，故此办公大楼存在电梯两路交通模式。因此，当电梯交通模式属于层间交通模式时，只需判断当前时间段内电梯交通模式是属于两路交通还是平衡层间交通模式。

为减少模型识别的复杂程度，进一步对这些特征值分析，将电梯交通模式识别分3步完成：1) 根据大楼内总乘客客流大小将模式分为空闲交通模式与繁忙交通模式；2) 根据进门客流、出门厅客流、总层间客流分为上下高峰交通模式以及层间交通模式；3) 根据最大层间客流、其他层间客流分为两路、平衡层间模式。具体划分如图4.5。

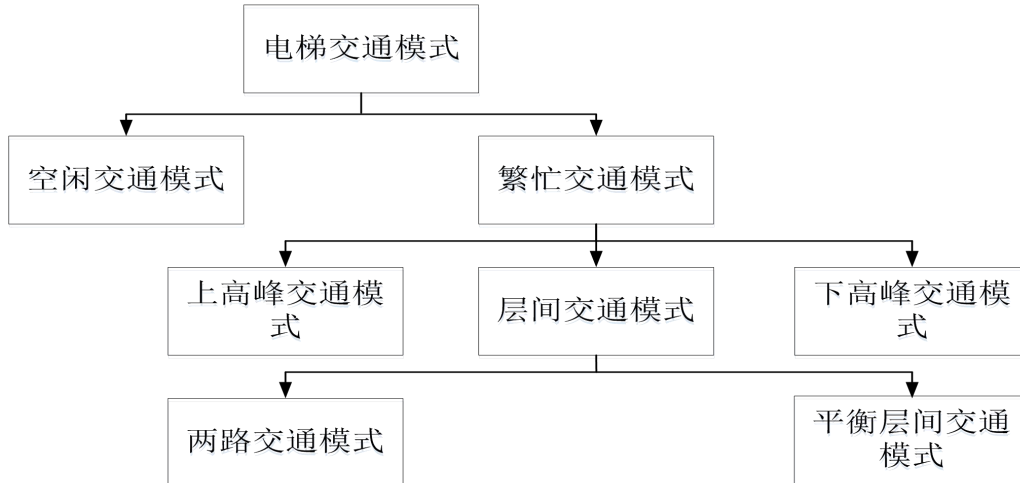


图 4.5 电梯交通模式划分

Fig. 4.5 Elevator traffic pattern division

当大楼内的电梯交通模式存在两路、四路交通模式时，将其与其他模式分步识别能够提高识别的准确性。

结合文献[14]对此办公大楼电梯客流数据分析，得出电梯交通模式划分标准：当大楼内电梯总客流人数小于电梯载客率 X_{\max} 的 25% 时，那么当前电梯交通模式为空闲交通模式；当大楼内部上行或者下行客流人数大于单位时间总客流流人数的 50% 时，则电梯交通模式为上行或者下行交通模式；当大楼内部上行或下行客流人数相差不多或者层间客流人数较大时，那么电梯交通模式为层间交通模式；当大楼内当前电梯交通模式属于层间交通模式时，若特殊楼层的客流人数大于总层间客流人数的 50%，那么电梯交通模式为两路交通模式，否则为平衡层间交通模式。

4.2.5 电梯载客率 X_{\max} 的确定

对于一个确定的电梯系统而言，电梯运行的台数是固定不变的，因此一般情况下电梯群控系统的载客率 X_{\max} 也是固定的。但在实际运行过程中，无法避免某些电梯因损坏停用或者某些时刻用作特殊用途的情况，这些因素都将直接影响载客率 X_{\max} 的大小，电梯交通模式识别过程中，电梯载客率的取值直接影响空闲交通模式与其他模式

的区分，因此，在对大楼内的交通模式进行识别分类时，必须确定当前电梯智能群控调度系统的实际载客率 X_{\max} 的大小，即当前实际运行的电梯台数。

4.2.6 电梯交通模式属性约简

电梯交通模式识别过程中，影响模式识别的因素不仅有预测所得各层客流比例，还有前一时间刻电梯交通模式所属类别，尤其是预测所得各层客流比例相差不多时，因电梯交通流预测模型预测所得数据存在一定的误差和不确定性，仅仅根据电梯预测的客流数据进行交通模式识别分类往往会造成大楼内部模式识别的错误。

而在电梯交通模式识别过程中若时时考虑前一时间段的客流数据，将会大大增加电梯交通模式识别的模糊推理规则数目，而电梯大多数交通模式基本上属于阶段性的变化过程，交通模式改变很少随机出现。因此，只需在预测所得各层客流比例相差无几难以区分时考虑前一时间刻电梯交通模式即可。

文章根据粗糙集属性约减理论，对电梯交通模式识别规则进行改善：当有任意一层客流人数大于总客流人数的 55% 时，不需要考虑前一时间刻交通模式；当任意当各层客流人数有任意一层客流人数在总客流人数的 45%-55% 之间时，结合预测客流量与前一时间刻客流量重新计算各层客流比例，相应的属性重要度为 $\{0.7, 0.3\}$ ，即当前客流比例为：

$$X'(i+1) = \frac{Y(i+1) \times 0.7 + Y(i) \times 0.3}{W(i+1)} \quad (4.1)$$

其中， $Y(i+1)$ 为预测的乘客客流量， $Y(i)$ 为前一时间刻的乘客客流量， $W(i+1)$ 为预测的总乘客客流量。

通过对交通模式属性值直接进行属性约简，不仅减少了模糊推理规则数目，而且增强了电梯模式识别的容错性，防止电梯交通模式因电梯各层客流比例较小的浮动做出的模式变化，提高了电梯交通模式识别的准确性，降低了智能群控调度系统因交通模式频繁改变造成的能源消耗。

4.2.7 电梯输入量模糊化

模糊推理系统是将模糊集和以及模糊推理方法等当作处理问题的基础，能够处理模糊信息能力的系统^[62]。

本文根据电梯交通模式识别的划分标准，为了精准识别出电梯交通所属模式，使用客流交通比例以及总客流交通强度作为模式识别的输入变量。各个输入变量的具体求法如下：

1) 进门厅客流比例

$$X_{11} = \frac{X_1}{X} \quad (4.2)$$

2) 出门厅客流比例

$$X_{22} = \frac{X_2}{X} \quad (4.3)$$

3) 总层间客流比例

$$X_{33} = \frac{X_3}{X} \quad (4.4)$$

4) 最大层间客流比例

$$X_{44} = \frac{X_4}{X_3} \quad (4.5)$$

5) 其它所有层间客流比例

$$X_{55} = \frac{X_5}{X_3} \quad (4.6)$$

6) 总客流交通强度

$$X_0 = \frac{X}{X_{\max}} \quad (4.7)$$

其中, X 表示大楼中本时间段内总的乘客客流量, X_1 表示进入大楼门厅的乘客客流量, X_2 表示出门厅的乘客客流量, X_3 则表示总的层间交通客流量 ($X_3 = X - X_1 - X_2$), X_4 表示最大特殊楼层的乘客客流量, X_5 表示其他剩余层间乘客客流量 ($X_5 = X_3 - X_4$), X_{\max} 表示电梯智能群控调度系统的载客率, 通常其值大小近似等于大楼内部进入高峰时期时的最大 5min 的乘客数。

模糊化的实质就是把输入变量转换为模糊集合的过程。为简化模糊规则, 根据模糊推理算法, 使用矩阵型隶属函数描述构成交通模式的各层客流比例 X_i 。那么模式构成的隶属函数为 X_i , E 为其模糊集合, $X_i \in E$, 其中, ($i=11,22,33,44,55$), $\mu_E(X_i)$ 代表隶属度, 则有

$$\mu_E(X_i) = \begin{cases} 1 & (0.45 < X_i \text{ or } X_i > 0.55) \\ 0 & (0.45 < X_i < 0.55) \end{cases} \quad (4.8)$$

为增强模式识别分类时容错性, 本文结合粗糙集理论, 当客流比例 X_i 在 (0.45, 0.55) 之间时, 根据公式 (4.1) 属性重要度划分原则重新计算 X_i 值。

同理, 大楼内总乘客客流交通强度 X_0 的隶属函数是

$$\mu_E(X_0) = \begin{cases} 1 & (X_0 \leq 0.25) \\ 0 & (X_0 > 0.25) \end{cases} \quad (4.9)$$

划分交通模式强度的目的是用来区分大楼内的交通模式是属于空闲模式还是繁重交通模式。

4.2.8 电梯交通模式模糊推理

结合实际客流数据, 并根据粗糙集理论属性约简原则对模糊推理规则进行约简,

共得出 19 条规则如下：

- 规则 1 若 $X_0 < 0.25$ ，则模式为空闲交通模式；
- 规则 2 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $X_{11} \geq 0.55$ ，则模式为上高峰交通模式；
- 规则 3 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $X_{22} \geq 0.55$ ，则模式为下高峰交通模式；
- 规则 4 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $X_{33} \geq 0.55$ 且 $X_{44} \geq 0.55$ ，则模式为两路交通模式；
- 规则 5 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $X_{33} \geq 0.55$ 且 $X_{55} \geq 0.55$ ，则模式为平衡层间交通模式；
- 规则 6 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $X_{33} \geq 0.55$ 且 $X_{44}, X_{55} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{44} > X'_{55}$ ，则模式为两路交通模式；
- 规则 7 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $X_{33} \geq 0.55$ 且 $X_{44}, X_{55} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{44} \leq X'_{55}$ ，则模式为平衡层间交通模式；
- 规则 8 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $\forall X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0.45, 0.55]$ 且 $(X'_{11} = X'_{22}$ 或 $X'_{11} = X'_{33}$ 或 $X'_{22} = X'_{33})$ ，则模式为平衡层间交通模式；
- 规则 9 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $\forall X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{11} > \{X'_{22}, X'_{33}\}$ ，则模式为上高峰交通模式；
- 规则 10 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $\forall X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{22} > \{X'_{11}, X'_{33}\}$ ，则模式为下高峰交通模式；
- 规则 11 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $\forall X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{33} > \{X'_{11}, X'_{22}\}$ 且 $X_{44} \geq 0.55$ ，则模式为两路交通模式；
- 规则 12 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $\forall X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{33} > \{X'_{11}, X'_{22}\}$ 且 $X_{55} \geq 0.55$ ，则模式为平衡层间交通模式；
- 规则 13 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $\forall X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{33} > \{X'_{11}, X'_{22}\}$ 且 $X_{44}, X_{55} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{44} > X'_{55}$ ，则模式为两路交通模式；
- 规则 14 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $\forall X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{33} > \{X'_{11}, X'_{22}\}$ 且 $X_{44}, X_{55} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{55} \geq X'_{44}$ ，则模式为平衡层间交通模式；
- 规则 15 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0, 0.45]$ 且 $(X_{11} = X_{22}$ 或 $X_{11} = X_{33}$ 或 $X_{22} = X_{33})$ ，则模式为平衡层间交通模式；
- 规则 16 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0, 0.45]$ 且 $X_{33} > \{X_{11}, X_{22}\}$ 且 $X_{44} \geq 0.55$ ，则模式为两路交通模式；
- 规则 17 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0, 0.45]$ 且 $X_{33} > \{X_{11}, X_{22}\}$ 且 $X_{55} \geq 0.55$ ，则模式为平衡层间交通模式；
- 规则 18 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0, 0.45]$ 且 $X_{44}, X_{55} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{44} > X'_{55}$ ，则模式为两路交通模式；
- 规则 19 若 $X_0 \geq 0.25$ 且 $X_{11}, X_{22}, X_{33} \in [0, 0.45]$ 且 $X_{44}, X_{55} \in [0.45, 0.55]$ 且 $X'_{55} \geq X'_{44}$ ，则模式为平衡层间交通模式。

4.3 仿真结果

将图 4.4 中的数据整理后进行仿真并与理论分析的实际交通模式进行比较，仿真结果如图 4.6-4.10。

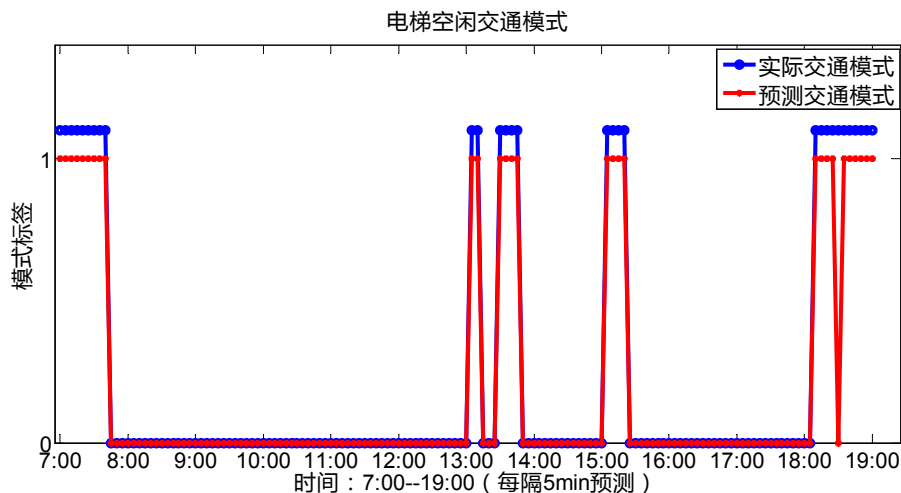


图 4.6 电梯空闲交通模式

Fig. 4.6 Elevator idle traffic pattern

从电梯空闲交通模式识别结果可得知：早晨 8:00 上班之前和傍晚 18:00 下班之后，大楼内乘客数量较少，属于空闲交通模式，另外，在一天当中由于 13:35 左右与 15:15 左右乘客稀少，也出现空闲交通模式。

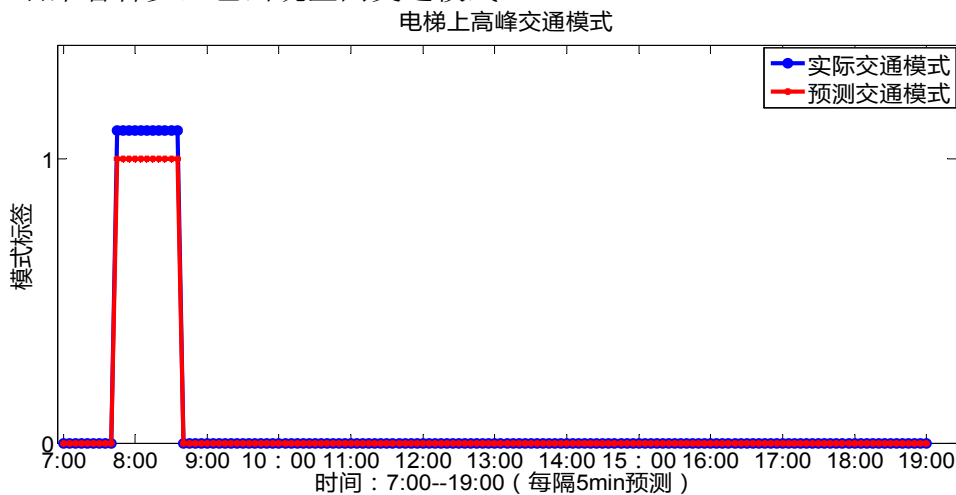


图 4.7 电梯上高峰交通模式

Fig. 4.7 Elevator up-peak traffic pattern

从电梯上高峰交通模式识别的结果可得知：早晨 7:40-8:40 之间是上班高峰时期，上行客流占很大比例，属于上高峰交通模式，另外，12:05-12:50 之间也有相当比例的上行客流，说明乘客外出用餐或办事完毕之后返回大楼，但是其客流比例相对其他楼层比例较少，故不属于上高峰交通模式。

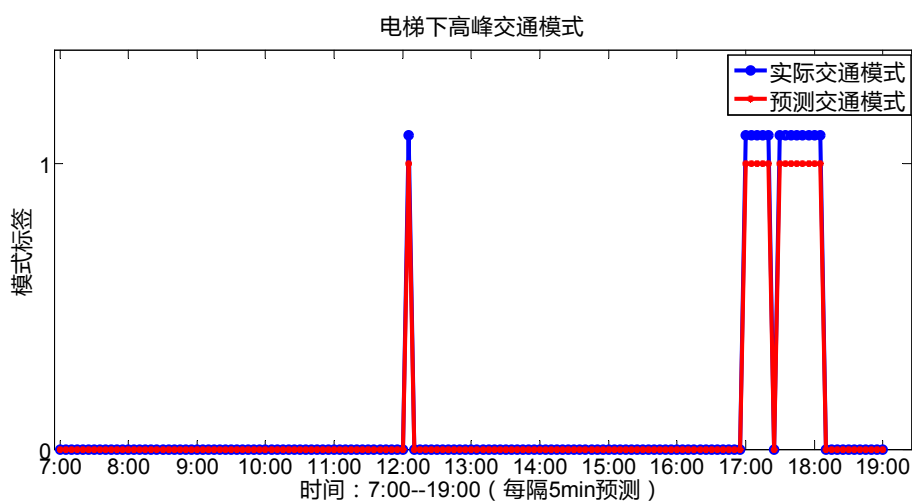


图 4.8 电梯下高峰交通模式

Fig.4.8 Elevator down-peak traffic pattern

从电梯下高峰交通模式识别的结果可得知：傍晚 17:00-18:00 之间此办公大楼属于下班时间，下行客流占很大比例，属于下高峰交通模式，另外，11:50-12:30 大部分时间段也有相当比例的下行客流，说明部分乘客选择出楼用餐或办事，但是其客流比例相对其他楼层比例较少，故不属于下高峰交通模式，只有中午 12:00-12:05 这段时间，其客流比例远高于其他楼层的客流比例，属于下高峰交通模式。

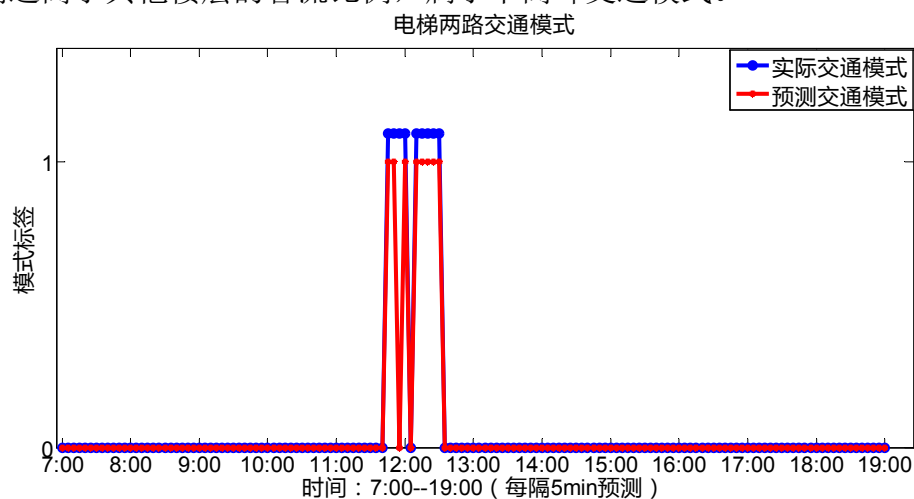


图 4.9 电梯两路交通模式

Fig. 4.9 Elevator two traffic pattern

从电梯两路交通模式识别的结果可得知：由于此办公大楼第 3 层为餐厅，中午时间多数乘客选择去第 3 层用餐，完毕之后返回所在楼层或者外出办事，因此，除却 12:00-12:05 时间段之外，大楼内 11:40-12:35 之间第 3 层客流占很大比例，属于两路交通模式。

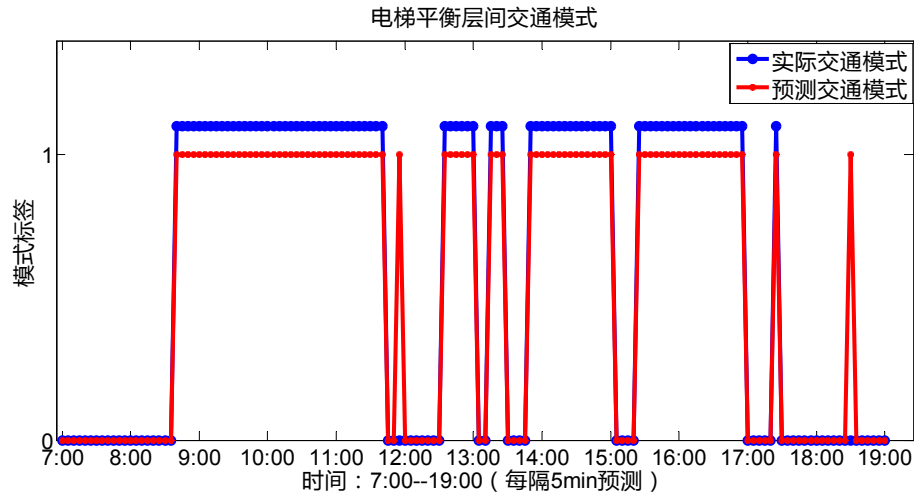


图 4.10 电梯平衡层间交通模式

Fig. 4.10 Elevator balanced inter-floor traffic pattern

从电梯平衡层间交通模式的识别结果可得知：大楼内大部分时间段内，进出门厅以及各层客流比例相差不多，属于平衡层间交通模式。

计算各模式识别结果的准确率 θ （ θ 为各模式识别正确的时间段数目除以总识别时间段数目），空闲交通模式、上高峰交通模式、下高峰交通模式、平衡层间交通模式、两路交通模式准确率分别为：99.31、100.00、100.00、98.62、99.31。根据电梯客流数据示意图以及电梯交通模式识别的仿真结果可以看出，虽然本文所提出的交通模式识别方法存在个别错误分类的情况，但在不同时间段内识别出的电梯所属模式与大楼内实际交通模式基本相符，表明文章所提出的基于粗糙集属性约减的交通模式模糊识别方法具有较强的识别能力。

将粗糙集属性约减的交通模式模糊识别方法的准确率与文献[20]提出的基于LSSVM的电梯交通模式的模糊识别方法相比，交通模式识别准确率对比见表4.2。

表 4.2 交通模式识别准确率对比

Table 4.2 Comparison of accuracy rate of traffic pattern recognition

电梯交通模式	本文方法识别准确率 θ /%	LSSVM 方法识别准确率
空闲交通模式	99.31	100.00
上高峰交通模式	100.00	99.31
下高峰交通模式	100.00	97.93
平衡层间交通模式	98.62	97.24
两路交通模式	99.31	98.62

由表4.2可以得出，本文提出的基于粗糙集属性约减的模糊交通模式识别方法的平均准确率为99.45%，其识别准确率高于文献[20]基于LSSVM的电梯交通模式的模糊识别的平均准确率98.62%。基于LSSVM的电梯交通模式的模糊识别方法在识

别过程中，无法避免某些情况下一值多类情况的发生，该方法的容错性较弱。本文采用粗糙集理论对客流数据进行属性重要度划分，增强了识别时的容错性，提高了识别的准确率。

4.4 本章小结

交通模式的识别是实现智能群控调度的重要前提，由于影响模式识别的客观因素较多，文章根据粗糙集理论，提出一种基于电梯属性约简的交通模式模糊识别方法。该模型运用粗糙集理论对影响电梯交通模式识别的属性及模糊推理规则的两个方面进行属性约简，不仅增强了电梯模式识别的容错性，防止了电梯交通模式因电梯各层客流比例微小浮动而做出的模式变化，提高了电梯交通模式识别的准确性，降低了电梯系统因交通模式频繁改变造成的能源消耗，而且精简了模型的规则数目。同时，为了解决目前电梯交通流预测精度的不稳定性，提出了一种基于客流变化率修正的方法。仿真结果表明，该方法提高了模型的识别精确度，为电梯群控系统的节能优化提供了理论支持，且模型不需要依赖大量客流数据分析，减少了模型数据分析的工作量，增强了模型的可移植性。

第5章 基于改进遗传算法的电梯智能群控调度系统研究

5.1 引言

电梯智能群控调度系统的核心是群控调度算法,它能够根据大楼内乘客实际乘梯需求得出最优化的派梯方案。本章首先以乘客候梯时间、乘客乘梯时间、电梯能耗为最终优化目标建立电梯智能群控多目标优化模型,并通过改进遗传算法对智能群控调度系统的派梯方案进行优化,然后根据智能群控调度系统的仿真平台对本设计方法进行仿真,实验结果说明通过改进的遗传算法可以减少乘客乘候梯时间及降低能耗。最后,针对目前电梯调度过程中因电梯载重临界满载以及空间满载导致的无效停车,提出了一种双重判别方法来减少电梯无效停车的几率。

5.2 电梯智能群控调度系统的多目标优化问题模型

5.2.1 多目标优化概述

在解决实际问题的过程中,通常很难用一个指标去衡量这个问题,一般需要几个指标协调衡量一个设计方案的优劣,然而这些指标通常是属于相互制约的,若要改善某一指标,通常只能牺牲掉其他的性能指标,因此在处理相关问题时需要在各个指标间寻找到一个平衡点,这种寻找两个以上指标的最优化问题就是多目标优化的问题^[63],多目标优化问题一般具有下列几个基本要素:

(1) 决策变量

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (5.1)$$

(2) 目标函数

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \quad m \geq 2 \quad (5.2)$$

(3) 可行解集

$$D \subseteq R^n$$

$$D = \{x \in R^n \mid g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p; h_k(x) = 0, k = 1, 2, \dots, q\} \quad (5.3)$$

通常多目标优化问题都是由决策变量、目标函数以及约束条件这三个方面构成,具体描述为:

目标函数:

$$\min Z = f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \quad (5.4)$$

满足约束条件：

$$\begin{cases} g_i(x) \geq 0 & i = 1, 2, \dots, p \\ g_k(x) = 0 & k = 1, 2, \dots, q \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \end{cases} \quad (5.5)$$

每个决策变量的取值范围在 x_{\max} 与 x_{\min} 内，目标函数 $f(x)$ 需要满足 p 个不等式和 q 个等式约束条件。

Pareto 最优解： $X \subseteq R^n$ ， $f(x) \in R^p$ 是向量目标函数， $x^* \in X$ ， 假如找不出 x 相较于 x^* 更优， 那么通常就将 x^* 称为 Pareto 最优解。

5.2.2 多目标优化函数选取

(1) 候梯时间评价函数

乘客的候梯时间 $WT(i, j)$ 是由电梯行驶时间 t_{run} 以及电梯运行停止的时间 t_{stop} 这两个部分所组成。

$$WT(i, j) = t_{run} + t_{stop} \quad (5.6)$$

电梯的行驶时间是由电梯的匀速行驶时间以及电梯的加减速时间所构成， 因此， 影响电梯运行时间的因素有电梯的运行速度 v ， 电梯的加速度 a ， 电梯的加速度变化率 ρ 以及电梯需运行的距离长度 s 。

当 $s \geq \frac{a^2 v + \rho v^2}{a \rho}$ 时， 电梯能够到达额定的匀速状态， 那么电梯行驶运行的时间为：

$$t_{run} = \frac{a^2 v + v^2 \rho + a \rho s}{a v \rho} \quad (5.7)$$

当 $\frac{a^2 v + \rho v^2}{a \rho} > s \geq \frac{2a^3}{\rho^2}$ 时， 由于电梯不能够达到额定的运行速度， 但能够达到最大

的运行加速度， 那么电梯的行驶运行时间为：

$$t_{run} = \frac{a}{\rho} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\rho^2 s}{a^3}} \right) \quad (5.8)$$

当 $s < \frac{2a^3}{\rho^2}$ 时， 电梯不能够达到最大的运行速度和加速度， 那么电梯行驶运行时间

为:

$$t_{run} = \sqrt[3]{\frac{32s}{\rho}} \quad (5.9)$$

电梯的停止时间是由电梯的开关门时间 t_{open} 和 t_{close} 以及电梯轿厢内乘客进出电梯的时间 t_{pas} 所组成的。

$$t_{stop} = t_{open} + t_{close} + t_{pas} \quad (5.10)$$

由于实际过程中乘客进出电梯的人数是无法精确获知的, 因此用平均进出电梯的乘客数量来进行替换, 并假定一个乘客的进出电梯时间为一固定值。

$$t_{pas} = r_{ave} \times t_{ave} \quad (5.11)$$

计算电梯的运行停止时间, 可以求出大楼内第 i 部电梯运行至第 j 层去响应楼层的外呼信号的时间。

当大楼内部某一楼层有外呼信号时, 设置乘客候梯时间评价函数为 1, 随着乘客候梯时间的增长, 那么候梯时间评价函数逐渐减少并接近于 0, 假设长候梯时间为 60s。则

$$f_w(i, j) = \begin{cases} 1 & WT(i, j) = 0s \\ e^{x \cdot WT^2(i, j)} & WT(i, j) = 60s \end{cases} \quad (5.12)$$

当大楼内乘客的候梯时间是 60s 的时候, 假设评价函数的值是 0.001, 可求出 $x = -0.0019$, 故候梯时间评价函数为:

$$f_w(i, j) = e^{-0.0019WT^2(i, j)} \quad (5.13)$$

候梯时间评价函数表如下表:

表 5.1 候梯时间评价函数表

Table 5.1 Waiting time evaluation function table

$WT(i, j)$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$f_w(i, j)$	0.954	0.827	0.752	0.468	0.305	0.181	0.097	0.048	0.021	0.009	0.003

(2) 乘梯时间评价函数

乘客的乘梯时间由电梯行驶时间以及停止时间所构成, 具体的求解方法跟上述候梯时间求解方法相同, 假设大楼内乘客的长乘梯时间为 90s。则

$$f_r(i, j) = \begin{cases} 1 & RT(i, j) = 0s \\ e^{x*RT^2(i, j)} & RT(i, j) = 90s \end{cases} \quad (5.14)$$

当大楼内乘客的乘梯时间是 90s 的时候，设定评价函数的值是 0.001，可求取出 $x=-0.00085$ ，故乘客的乘梯时间评价函数表达式为：

$$f_r(i, j) = e^{-0.00085 RT^2(i, j)} \quad (5.15)$$

乘客的乘梯时间评价函数表如下表：

表 5.2 乘梯时间评价函数表

Table 5.2 Ride time evaluation function table

$RT(i, j)$	10	20	30	40	50	60	70	80
$f_r(i, j)$	0.919	0.712	0.465	0.257	0.119	0.047	0.016	0.004

(3) 电梯能耗评价函数

电梯的能耗通常是由电梯的启停能耗和匀速运行能耗这两部分所构成，因为电梯有着特殊的对重存在，一般而言，电梯在实际运行过程中的启停能耗要远高于匀速运行能耗，故此可通过减少电梯的不必要停靠次数来减少电梯能耗。由于本文的设计是针对的 16 层的办公大楼，电梯内的乘客人数最多不超过 15 人，停靠范围在[0,15]之间，而电梯停靠次数也和电梯能耗满足指数曲线，故电梯能耗评价函数为：

$$f_e(i, j) = \begin{cases} 1 & n(i) = 0 \\ e^{x*n^2(i)} & n(i) = 15 \end{cases} \quad (5.16)$$

其中， $n(i)$ 为停靠次数。

当电梯的停靠次数是 15 时，设定能耗评价函数是 0.001，可求取出 $x=-0.0307$ ，故电梯能耗评价函数表达式是：

$$f_e(i, j) = e^{-0.0235 n^2(i)} \quad (5.17)$$

电梯能耗评价函数表如下表：

表 5.3 电梯能耗评价函数表

Table 5.3 Elevator energy consumption evaluation function table

$N(i)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_e(i, j)$	0.970	0.884	0.758	0.612	0.464	0.331	0.222	0.140	0.083	0.046

5.2.3 多目标评价函数

为求得智能群控调度多目标优化的最优解，本文综合考虑乘客的候梯时间，乘客的乘梯时间，电梯能耗这三种派梯指标，利用加权系数的方法，构成新的目标评价函数。

$$F(x) = \max \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (5.18)$$

其中， $F(x)$ 是新的目标函数， $f_i(x)$ 是各个指标的评价函数， w_i 是各个评价指标的权值，且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。

当智能群控调度系统派遣大楼内的第*i*部电梯去响应大楼内第*j*层的外呼信号的时候，它的目标评价函数为：

$$F(i, j) = w_1 f_w(i, j) + w_2 f_r(i, j) + w_3 f_e(i, j) \quad 1 \leq i \leq M \quad (5.19)$$

其中， $f_{w(i,j)}$ 代表的是大楼内第*i*部电梯去响应第*j*个外呼信号时的候梯时间评价函数， $f_{r(i,j)}$ 代表的是大楼内第*i*部电梯去响应第*j*个外呼信号时的乘梯时间评价函数， $f_{e(i,j)}$ 代表的是大楼内第*i*部电梯去响应第*j*个外呼信号时的电梯能耗评价函数，*M*则表示智能群控调度系统的电梯台数。

由于电梯群控的三个指标之间相互制约，因此在电梯群控调度派梯时，无法同时使三个指标达到最优，为了满足乘客的实际乘梯需求，针对不同的交通模式分别设置三个指标的权重系数。当电梯交通模式为上行高峰模式或者下行高峰模式的时候，由于大楼内的乘客客流量较大，应以乘客的乘候梯时间为主要考虑因素，电梯能耗为次要考虑；当电梯交通模式识别是在层间交通模式的时候，大楼内的乘客客流量一般，应该综合考虑多方面乘梯需求；在电梯处于空闲交通模式下，大楼内的乘客客流稀少，应该以电梯的能耗做为主要考虑因素，本文对各交通模式下的权重系数选择如下表：

表 5.4 交通模式权重系数表

Table 5.4 Traffic mode weight coefficient table

模式	w_1	w_2	w_3
上行高峰交通模式	0.5	0.4	0.1
下行高峰交通模式	0.4	0.5	0.1
层间交通模式	0.3	0.4	0.3
空闲交通模式	0.2	0.3	0.5

针对不同的交通模式选择合适的派梯方案，由目标评价函数可知， $F(i, j)$ 越大，得到的智能群控派梯方案就越好。

5.2.4 电梯智能群控多目标函数调度算法设计

电梯群控调度算法的目的是当呼梯信号产生时选择性价比最高的那台电梯去响应乘客的乘梯需求，电梯群控调度的步骤为：

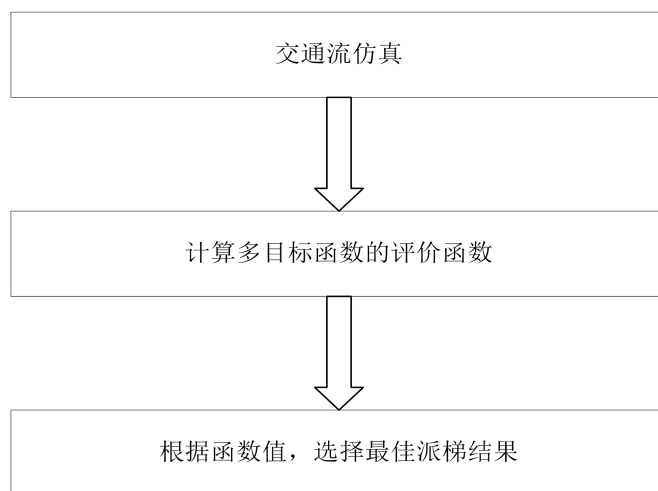


图 5.1 电梯群控调度步骤

Fig. 5.1 Elevator group control scheduling steps

在模拟乘客交通流仿真时，当呼梯信号产生，智能群控调度系统需要得知乘客所在楼层和各部电梯当前的状态，比如大楼内各个电梯的运行状态，电梯内的乘客数量，电梯当前所在的楼层。为了提高电梯智能群控调度系统的效率，当有呼梯信号时，引入算法队列，其中包含两种类型的呼梯信号。一个是新发生的乘客呼梯信号，一个是当前还没有派梯结束的乘客呼梯信号，每相隔一个固定时间段，电梯智能群控系统就会对呼梯信号重新计算并派梯。该算法队列的长度与大楼的层数直接相关，若大楼共有 N 个楼层，那么完成一次扫描，登记最多的呼梯信号是 $2(N-1)$ ，故可定义算法长度为 $2(N-1)$ ，电梯智能群控调度系统每隔一定周期就会向队列加入新的呼梯信号。

5.3 基于改进遗传算法的电梯智能群控调度算法

5.3.1 遗传算法概述

遗传算法指的是一种模拟自然界生物自然选择及遗传的概率搜索算法^[64]，它能够通过不断地进化操作，根据适者生存的原则把适应性能相对比较有优势的个体一代代往下遗传，同时不断地把适应性能相对较差的个体淘汰，从而最终得到该问题目标

函数的最优解值。

在遗传算法理论里，对其中术语做如下说明：

遗传因子：它是能够决定生物的某些特性可进行遗传下来的最小单位，即基因；

染色体：它是基因所组成的承载着遗传信息的主要载体；

种群：所有的个体构成的集合就是种群，种群的大小就是个体的总个数；

适应度：评价个体相对于外界的环境的适应性能优劣；

选择：根据各个个体适应度大小，从本代种群中选出适应性能相对较好的个体遗传到下一代的过程；

交叉：种群当中每对染色体上的基因随机相互交换的过程；

变异：针对种群当中的单独个体，通过某一概率对基因进行改变，从而让基因的某一位置发生突变；

编码：将所要求解的问题转换成遗传算法自己可进行语言处理的过程；

解码：将遗传算法处理问题时的语言转换成为具体问题的过程。

相较其他的优化算法，遗传算法在求解问题时有如下的优点：

(1) 自组织适应学习性。在求解问题时，遗传算法根据问题需求制定编码方式，并根据编码方式得出遗传算子及适应度函数，将这三者确定之后，遗传算法则可以利用进化过程获取的信息进行自组织搜索。

(2) 遗传算法求取最优解的时候，只需要考虑将目标函数变成适应度函数，不需要考虑所求目标函数的导数值等等，由于遗传算法对于所求问题本身的限制极少，而且可剔除掉适应度较小的搜索空间，这样提高了算法的搜索效率。

(3) 遗传算法具有并行性，可以同时进行搜索空间内的多个点，从一组解经过选择交叉变异等操作顺带得出另一组解，能够有效防止搜索过程收敛于局部最优解，提高获得全局最优解的概率。

(4) 遗传算法是采用的启发式的搜索方式，对于搜索空间没有什么特殊的要求，适用范围较广，不需要导数梯度等信息，可以搜索离散大规模的复杂空间。

5.3.2 改进遗传算法设计

本文的电梯智能群控调度算法为遗传算法，当呼梯信号产生时，根据遗传算法的优化功能寻找得出最优的派梯方案，首先，根据专家经验生成遗传算法的初始种群，并根据实际要求构造出适应度函数，之后求出个体的适应度大小，选择拥有较大适应度的个体来交叉变异，最后，不停地重复上述操作，直到得出满足要求的染色体，这就是电梯智能群控调度系统所需要的派梯方案。

(1) 编码

遗传算法的编码过程就是将所涉及问题的可行解从其解空间转换到算法可以处理

的搜索空间的转换过程，不同的编码方式通常会影响到寻找最优解的速度，在遗传算法中，常用的编码方式有二进制编码以及实数编码两种方式。

在遗传算法中，因为二进制编码方法的染色体的基因非 0 即 1，所以采用二进制编码有利于理论分析和计算机处理信息数据，也有利于简化染色体交叉变异过程。而采用二进制编码时为了确保所求解能够达到精度要求，这就必须使染色体的长度符合一定条件，故如果采用二进制编码会加大算法的运算量，降低了算法求解的效率。同时，将所求最优解的二进制数转变成十进制的时候，往往会浪费解码时间及降低最优解的精度。

若在遗传算法里选择实数编码，实数编码不涉及二进制跟十进制之间的转换问题，因此这种编码方式不会降低最优解的精确度，再者，实数编码可以减短染色体的长度，减小数据的计算量，同时，实数编码的方式不会发生非法编码的情况。

鉴于实数编码的种种优点，考虑到实际的派梯需求，文章将采取实数编码方式，每个染色体就是一个派梯方案，染色体的每个基因对应着一个呼梯信号，基因值则表示分配给此呼梯信号的电梯号数。假设某个建筑物的大楼层数为 20，电梯智能群控调度系统的电梯数目为 4，若出现 N 个呼梯信号，那么就会产生一个长度为 N 的染色体，其中，每个基因的数组位于 $[1,4]$ 之间。在电梯群控调度中，因为建筑物内的呼梯信号是不断变化的，因此染色体的长度也随之改变，所以本文采用变长染色体，染色体的长度随着呼梯信号的改变而改变。

（2）初始种群的产生

进行编码过后需要对遗传算法的初始种群进行设定，一般为了加快算法搜索的速度，通常根据专家经验设定，以初始种群为遗传算法的起点开始遗传进化，新个体不断取代上一辈个体，直到得出最优解终止进化。由于每个变量的取值范围已经作为初始条件在运算开始时就已给出，故种群中的个体都应符合取值范围，一般种群取值范围是 20~100。

（3）适应度函数的构造

遗传算法进行评价个体优劣的时候完全不必借助外部的信息，仅仅根据适应度函数数值的大小就可得出个体优劣程度。需要注意的是，适应度函数和评价函数有着本质的区别，适应度函数是通过目标评价函数的映射得来，它代表的是种群个体的适应能力，其值越大那么就表示个体生存能力越强，就表明能够遗传到下一代的几率更大。针对智能群控调度多目标优化问题来说，构造的第 k 个个体的适应度函数能够用下式来表达：

$$F_k = \sum_{j=1}^L F(i, j) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (5.20)$$

上式当中， L 表示的是建筑物内部所有呼梯信号的总和， j 是呼梯信号， i 则是表示响应第 k 个个体的电梯号， $F(i, j)$ 是指大楼内第 i 部电梯去响应第 j 个乘客呼梯信号的评价函数值， F_k 表示的是第 k 个个体的适应度函数值的大小，其值越大越能够表明电梯智能群控调度系统的派梯方案越合理。

(4) 选择操作

选择算子借用的是达尔文的生存进化原则，选择算子操作的主要功能还是为了能够从该代种群里找出适应度相对较好的优良个体，使适应度越好的个体越能够遗传到下一代种群里面。选择操作通常比较常用的有赌盘选择法、最优保存策略、随机竞争选择等等。

赌盘选择法：它是按照种群个体的适应度大小占所有个体适应度之和来进行确立个体可以遗传到下一代的几率。比如说有一个种群中的个体数目是 M ，其个体的适应度大小是 F_i ，那么某一个体被选到的几率是：

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^M F_i} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (5.21)$$

因为赌盘选择法的选择具有一定的随机性，无法确保所有适应度相对较好的个体能够遗传到下一代。

最优保存策略：个体在种群中选择交叉变异最终可获得优于父辈的优良个体，但是因为选择操作具有随机性特性，无法保证每次都能选择出适应度相对较好的个体。采用最优保存策略，通过将适应度最高的个体替换当前种群的最差个体，能够保证遗传算法得出收敛性，提高种群的平均适应度。

赌盘选择法操作步骤可归纳成：

Step1 计算种群当中所有个体的适应度大小，并对其值求和；

Step2 求出单一个体适应度所占的个体适应度总合比例大小；

Step3 随机生成一个位于 $[0, 1]$ 之间的数；

Step4 将个体适应度按照从小到大的顺序进行依次排列，将每个个体的适应度值依次累加成为 $s_1, s_2, \dots, 1$ ，随机数 r 处于那个区间，则其对应的个体被保存下来；

最优保存策略的具体操作步骤：

Step1 当新一代个体产生后，找出种群里面适应度最大以及最小的个体；

Step2 如果当前的种群里面适应度最大的个体大于目前来说最优个体的适应度，那么就把当前种群中的最优个体当成新的最优个体；

Step3 用目前种群里面适应度最优的个体顶替掉目前种群里面的最差个体。

为了扬长避短，本文选择将赌盘选择法与最优保存策略相互结合，具体流程如下：

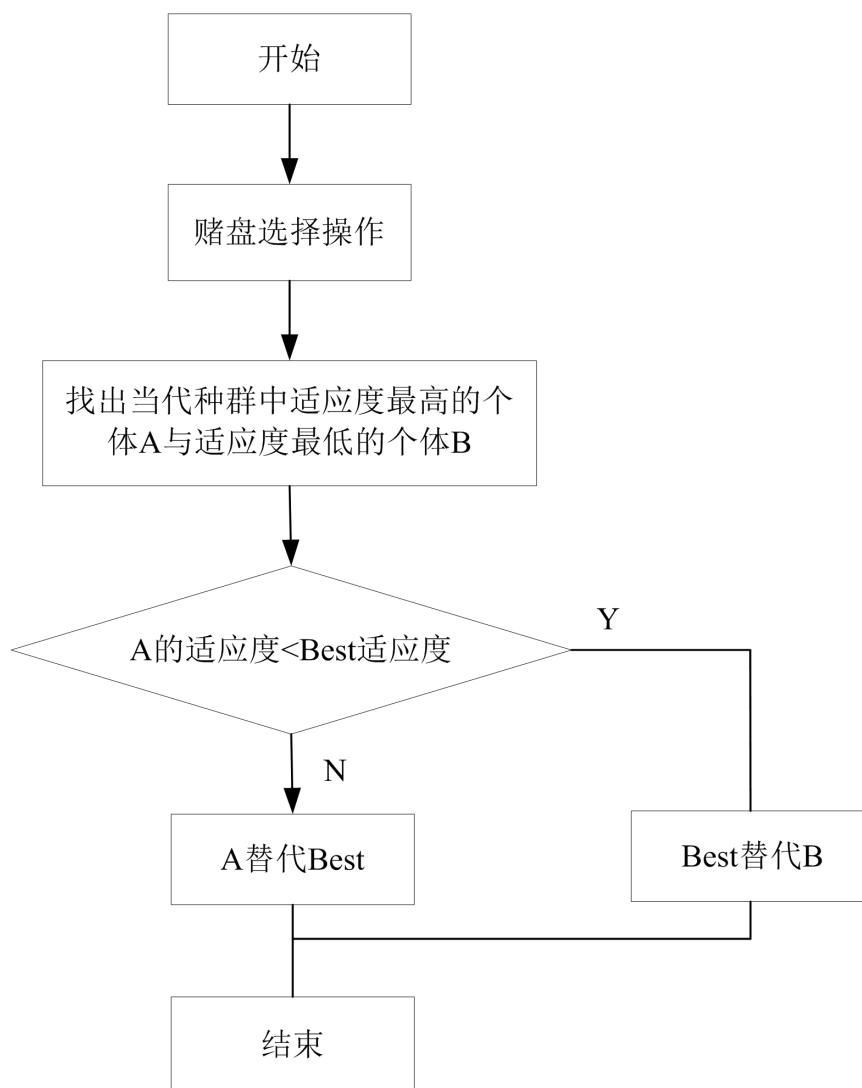


图 5.2 最优个体保存策略流程图

Fig.5.2 Optimal individual save strategy flow chart

(5) 交叉操作

交叉操作是将两个个体按照一定概率互换部分基因，得出两新个体的操作，算法通过交叉操作才能够实现全局搜索。一般而言，常使用的交叉操作主要包括单点交叉、两点交叉以及均匀交叉三种：

1.单点交叉指的是在染色体上随机产生出一个交叉点，在交叉操作时互换交叉点的左右染色体从而得出两条新的染色体。单点交叉的流程如下：

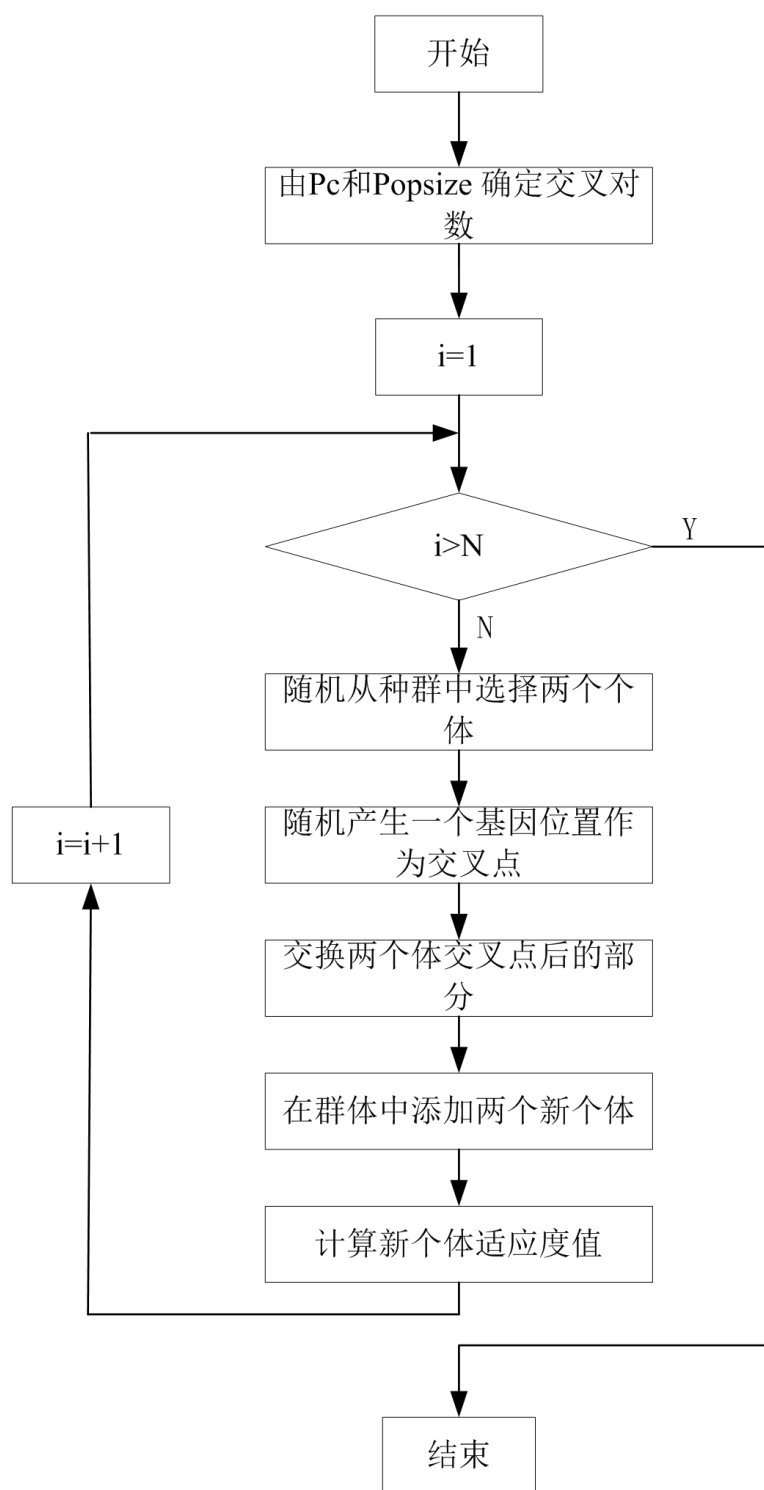


图 5.3 单点交叉的流程图

Fig.5.3 Single-point cross-flow chart

2.双点交叉指的是在染色体上随机的选择两个位置当作交叉点，交叉操作时交换两交叉点之间的染色体，从而得出两条新染色体。

3.均匀交叉是按照相同的概率对一对染色体上的基因相互交换，操作过程是随机

产生和染色体上基因数目相同的一串屏蔽字，若屏蔽字是 1 就相互交叉，否则是 0 就不交叉。

在遗传算法的交叉操作中，随着交叉点的增加，染色体的结构被破坏的几率也随之增加，从而影响遗传算法的性能，故本文选择单点交叉。

（6）变异操作

在遗传算法中，变异操作指的是以一个较小概率 p 随机更改种群里面染色体的个别基因从而得出一条新的染色体。若编码方式为二进制编码，通过变异 0 会变为 1，1 会变为 0。因本文采用的是实数编码，通过变异操作会将原有的基因变为在实数范围内的其他基因。通过变异操作能够加强原本算法的局部搜索能力，同时因为变异操作改变了染色体的结构，也保持了种群多样性，尽可能的减少了遗传算法还未成熟就过早收敛情况的发生。

由于本文的电梯群控系统是由 4 台电梯组成，变异操作随机产生的数的范围是 [1,4]，由这个随机数对原来的数进行替代，具体变异操作的流程如下：

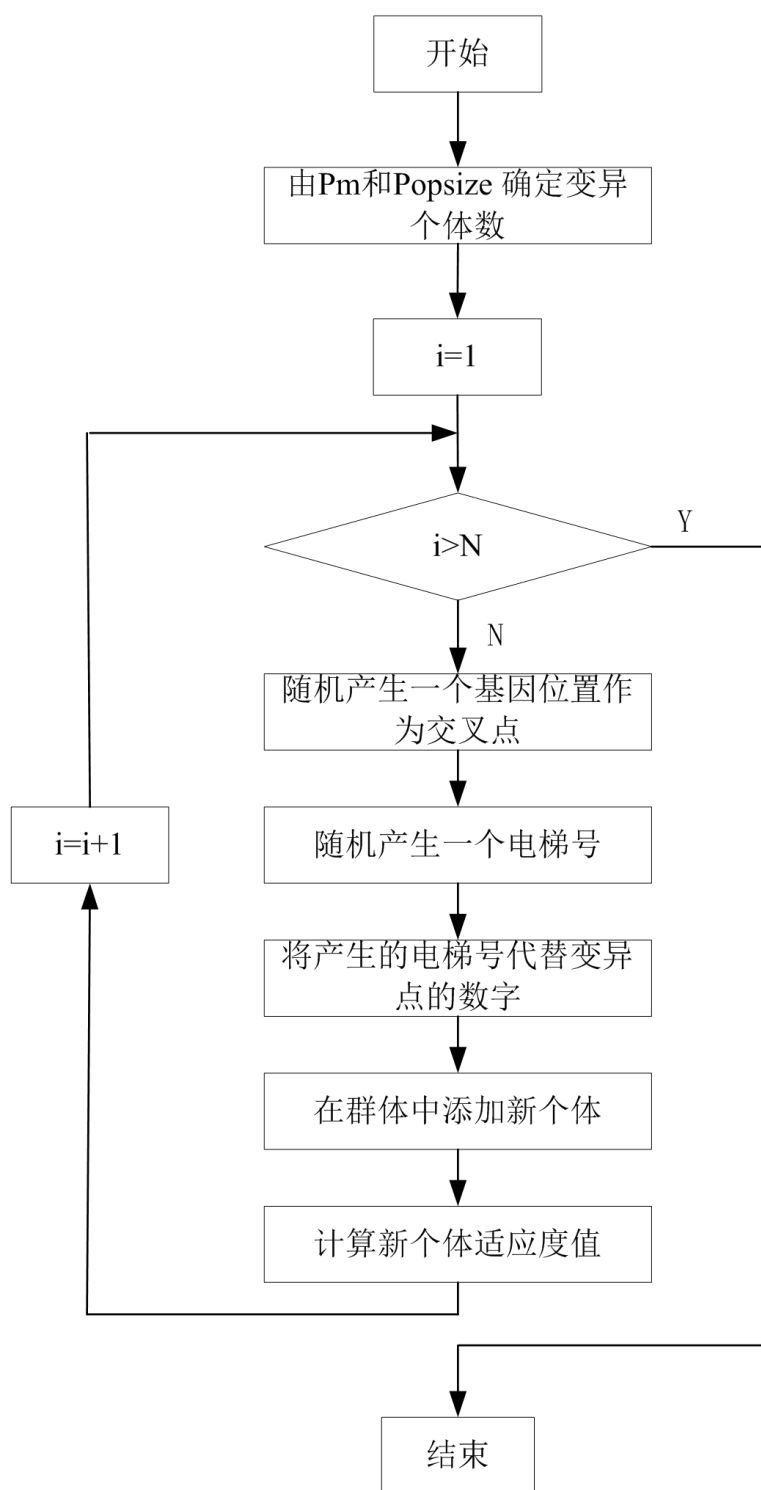


图 5.4 变异操作的流程图

Fig. 5.4 Variant operation flow chart

(7) 遗传算法控制参数的改进

遗传算法里面的交叉概率 p_c 以及变异概率 p_m 是能够影响算法优劣的主要因素。

若交叉概率的选择过大了，则容易破坏掉遗传算法的遗传模式，导致适应性能相对较好的个体也遭到破坏，若是交叉概率的选择过小了，往往会导致遗传算法产生出新个体的速率过于缓慢。与之类似，若变异概率 p_m 选择的过大了，就会导致遗传算法变为随机搜索算法，若其值选择的太小了，就会导致生成新个体的能力减弱，减少新个体的数量。

使用遗传算法解决实际问题时，交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 通常通过反复试验的方法得到，不仅过程复杂，而且难以得出参数的最佳值，因此，产生了一种自适应遗传算法，若种群里面的个体适应度高于群体平均适应度，那么就需要选择较小的交叉概率 p_c 以及变异概率 p_m ，从而保证优秀个体得以遗传到下一代；否则就需要选择较大的交叉概率 p_c 以及变异概率 p_m ，使它能够被淘汰掉。具体实现公示如下：

$$p_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f')}{f_{\max} - \bar{f}} & f' \geq \bar{f} \\ k_2 & f' < \bar{f} \end{cases} \quad (5.22)$$

$$p_m = \begin{cases} \frac{k_3(f_{\max} - f)}{f_{\max} - \bar{f}} & f \geq \bar{f} \\ k_4 & f < \bar{f} \end{cases} \quad (5.23)$$

上面式子中， \bar{f} 是种群里面的平均适应度， f_{\max} 为种群里面的最大适应度， f' 是表示要发生交叉的两个个体之中的适应度相对较大的， f 则是表示要发生变异的个体适应度， k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 这都是取值范围位于[0,1]之间的常数。

由上式可知，个体的适应度跟最大适应度的值之间的差距逐渐变小时，交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 就会越来越小，最后 p_c 和 p_m 等于 0，这种方法适用于遗传进化的后期，但是对于遗传算法的早期来说，这样会导致适应度较高的个体几乎不变化，从而导致局部最优解变成全局最优解。为了弥补这种方法所带来的缺陷，可以通过将群体里面最优个体的交叉概率 p_c 以及变异概率 p_m 分别从 0 提升为 p_{c2} 、 p_{m2} 而改变，计算公式如下：

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f_{\max} - f')}{f_{\max} - \bar{f}} & f' \geq \bar{f} \\ p_{c1} & f' < \bar{f} \end{cases} \quad (5.24)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2})(f_{\max} - f)}{f_{\max} - \bar{f}} & f \geq \bar{f} \\ p_{m1} & f < \bar{f} \end{cases} \quad (5.25)$$

本文中， $p_{c1} = 0.8$ ， $p_{c2} = 0.5$ ， $p_{m1} = 0.1$ ， $p_{m2} = 0.001$ 。

(8) 遗传算法终止条件

当遗传算法运行之后，只有当满足结束条件时算法才会停止遗传操作，得出最优解。较为常见的算法结束条件包括群体收敛准则以及最大进化代数的方法。本文采用最大进化代数的方法作为结束条件，算法不断进化产生新个体，直到满足结束条件，输出最优解，即电梯派梯方案。

5.4 电梯群控系统仿真平台

在智能群控调度系统测试平台上，根据模拟所得的乘客交通流数据进行基于改进遗传算法的电梯智能群控调度算法的测试，以乘客乘候梯时间以及电梯能耗这三个派梯指标作为判断标准，将电梯调度仿真结果与为改进之前算法相比较。

5.4.1 电梯群控系统测试平台

目前应用于可视化编程的语言有很多种，本文选择 VC++ 进行程序开发和可视化界面的开发。

为了使仿真平台界面便于操作分析，本文将操作界面分为基本参数设置，电梯群控动态仿真，电梯乘候梯服务质量和电梯能耗等四大模块，方便对电梯群控进行测试分析。

1. 电梯智能群控仿真平台的参数设置

参数设置包括建筑物参数、大楼内电梯参数以及乘客客流参数三部分。

(1) 建筑物参数

首先根据建筑物的实际情况对大楼的楼层数，每层楼层的高度，电梯的数量进行设置。因本文交通流数据来自一个 16 层 4 台电梯某办公大楼，因此本仿真平台设置默认楼层层数为 16，每层楼层高度是 3 米，电梯台数是 4 台，如下图 5.5 所示。

第一步：建筑物参数设置

层高(米) 3

楼层数 16

电梯数 4

设置>>

重置

图 5.5 建筑物参数设置

Fig. 5.5 Building parameters settings

(2) 电梯参数设置

为了应对群控系统中各台电梯运行参数不同的情况，可根据实际情况对电梯参数逐台进行设定或者将大楼内所有电梯设置为统一运行参数，本文将所有电梯运行参数设置为统一运行参数。具体设置如下图 5.6 所示。

第二步：电梯参数设置

典型配置

电梯号

0

开门时间 (s)

2

关门时间 (s)

2

等待时间 (s)

4

最短制动时间 (s)

1

额定载重 (人)

15

额定速度 (m/s)

2

额定加速度 (m/s²)

1

额定加加速度 (m/s³)

1.5

全部使用相同配置

自定义

逐个配置

重置

图 5.6 电梯参数设置

Fig. 5.6 Elevator Parameter Settings

(3) 客流参数设置

客流参数设置的目的是为了模拟大楼内实际的交通流情况，包括客流的周期及周期的数目，大楼每层乘客的人数，乘客的到达率，上下行客流百分比、层间客流百分比。并通过改变上下行客流以及层间客流的百分比来改变交通模式。下图 5.7 为该平台默认参数。

- 59 -

第三步：客流参数设置

周期T (s) 周期数目

楼层人数

楼层编号	人数
1:	100
2:	50
3:	100
4:	50
5:	100
6:	40
7:	100
8:	100
9:	50
10:	100
11:	50
12:	100
13:	100
14:	40
15:	100
16:	50
17:	100
18:	100
19:	50
20:	100
21:	40
22:	100
23:	50
24:	100
25:	40

到达率 (人/秒)

上行客流百分比

下行客流百分比

层间客流百分比

编号	到达率	上行	下行 (%)	层间 (%)
1:	0.50	80.00	5.00	15.00
2:	0.50	80.00	5.00	15.00
3:	0.50	85.00	5.00	10.00
4:	0.50	85.00	5.00	10.00
5:	0.50	90.00	5.00	5.00
6:	0.50	90.00	5.00	5.00
7:	0.50	85.00	10.00	5.00
8:	0.50	85.00	10.00	5.00
9:	0.50	85.00	10.00	5.00
10:	0.50	80.00	15.00	5.00
11:	0.50	80.00	15.00	5.00
12:	0.50	80.00	15.00	5.00

图 5.7 客流参数设置

Fig. 5.7 passenger flow parameter settings

2. 电梯群控动态仿真

当大楼内有乘客在某一楼层按下外呼信号按钮时，电梯智能群控调度系统根据调度算法进行派梯，如下图 5.8 所示。

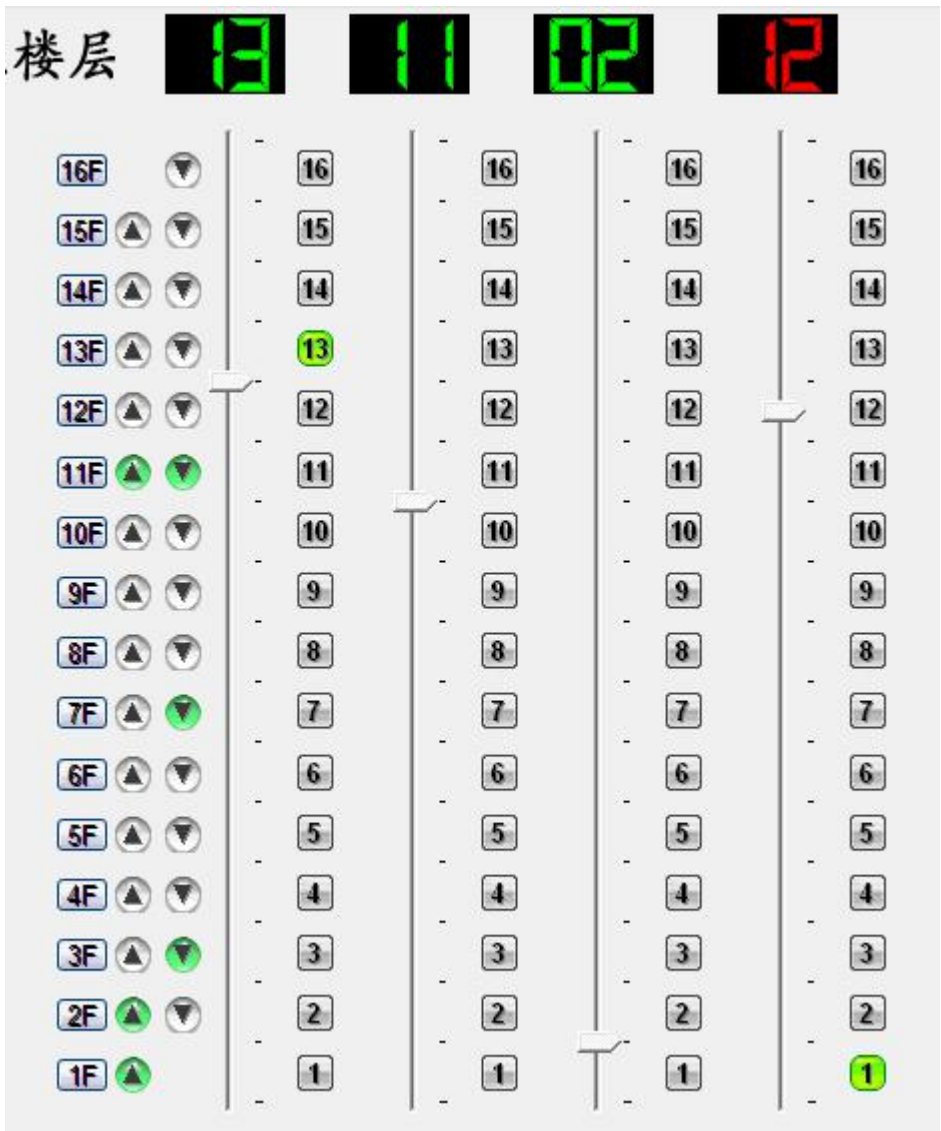


图 5.8 电梯动态仿真

Fig. 5.8 Elevator Dynamic Simulation

3. 电梯乘候梯服务质量以及电梯能耗

为了方便对智能群控调度算法的分析研究，当智能群控调度系统中的电梯响应楼层的呼梯信号时，仿真平台会根据智能群控调度系统中各台电梯的实际情况计算乘客的乘候梯时间以及各梯能耗。具体如下图 5.9 所示。

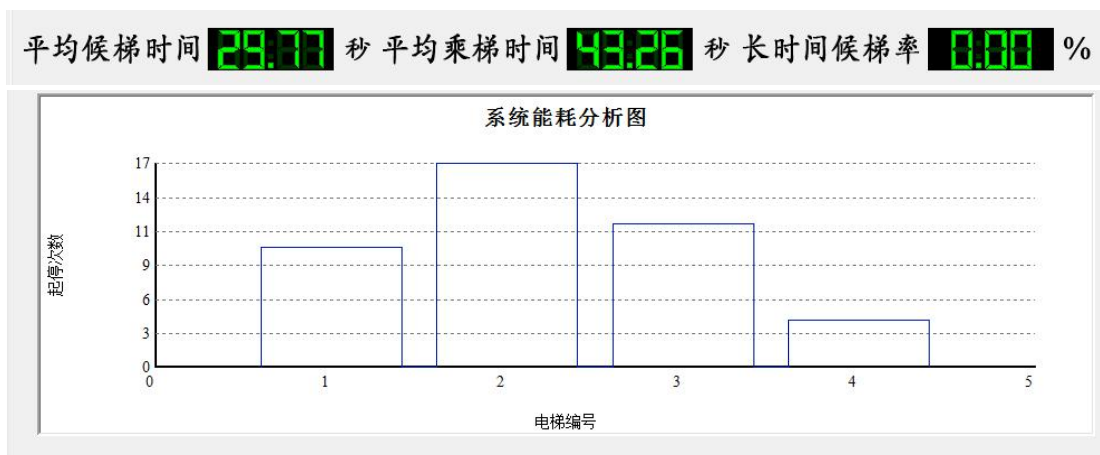


图 5.9 电梯服务质量及能耗

Fig. 5.9 elevator service quality and energy consumption

5.4.2 仿真结果分析

为了验证本文方法的有效性, 本文根据实际获得的交通流情况对各楼层人数及客流百分比进行设置, 在同一交通流的情况下, 通过比较基于改进遗传算法及传统遗传算法的大楼内乘客平均乘候梯时间以及电梯能耗来证明改进算法的有效性。

表 5.5 不同调度算法对比

Table 5.5 Comparison of different scheduling algorithms

交通模式	预测方法	乘客平均候梯 时间 (S)	乘客平均乘 梯时间 (S)	电梯启停 (次数)	长时间候梯 率 (%)
空闲	本文方法	21.90	28.58	17	0.00
	传统遗传	27.21	27.50	18	0.00
上行高峰	本文方法	28.73	52.16	54	0.00
	传统遗传	35.41	63.20	63	0.00
层间交通模 式	本文方法	31.23	33.32	43	0.00
	传统遗传	29.17	43.26	50	0.00
下行高峰	本文方法	28.38	47.26	60	0.00
	传统遗传	29.11	53.76	61	0.00

从上表的数据结果可以看出本文采用的改进遗传算法相比较传统算法, 大楼内乘客的平均乘候梯时间以及电梯能耗均有减少。

5.5 电梯临界满载运行状态识别

随着城市建设的日益发展, 建筑物的楼层的不断增加, 电梯的作用越来越明显,

人们也更加重视电梯的能耗问题。通常情况下电梯的能耗主要是由电梯运行能耗以及启停能耗两个部分所构成，而电梯能耗问题主要是由于电梯频繁启停过程造成的。当电梯的承载重量接近满载或者空间趋近饱和之后，电梯响应外呼信号没有任何意义，只会增加电梯启停的能耗以及乘客的等待时间。

在当前的电梯控制方法中，通常只会采用称重传感装置采集载重信息，之后根据载重信息判断电梯称重是处于轻载还是满载状态，如果电梯此刻的称重已经达到满载状态，那么将控制电梯在无需下人只有需要上人的楼层不再停留，通过减少无效停靠来减少电梯的能耗。

但目前这种满载状态的控制方法仅仅是考虑了电梯载重满载的情况，并没有根据实际情况考虑到电梯轿厢空间的拥挤情况，也不适用于电梯处于临界满载时的情况。现实生活中每个人的体重及进入电梯所占的面积因人而异，在电梯接近满载而未到达满载状态时，特别是与满载称重相差在不到1个人的体重重量时。或者，电梯的空间拥挤度已经达到饱和状态而电梯载重并未达到满载状态，那么电梯将会继续响应请求电梯的外呼进梯信号，当此台电梯在外呼信号楼层停靠之后，往往会发生乘客进入电梯之后，电梯发出载重超载提醒信号，或者由于电梯轿厢空间拥挤度很大，外部乘客无法进入电梯的情况。这就导致了大楼内电梯的无效停靠，同时也增加了楼层内乘客再次候梯的时间以及电梯轿厢内乘客到达目的楼层的时间。同时，此台电梯离开本层之后，在无乘客下车之前仍会继续响应其他外呼信号，这不仅仅浪费了大量能耗，影响了乘客的使用，也增加了电梯的损耗，减少了电梯的使用寿命。为了解决因电梯临界满载而导致的无效停车，本文提出了一种电梯临界满载识别的方法。

5.5.1 电梯临界满载识别

当电梯的载重或者空间拥挤度趋于饱和时，在无内呼信号响应之前，电梯响应外呼信号停车后，候梯乘客将无法进入电梯，从而导致乘客乘候梯时间增长，电梯能耗增加。为减少这种情况的发生，需要对电梯的载重满载以及空间满载分别进行判断，其中，电梯载重满载信息可通过传感器测量直接得到，电梯的空间满载则可通过判断候梯乘客的状态可得。具体识别过程为：

Step1: 当停靠的电梯完成乘客进梯，开始关门时，通过获得电梯载重信息，判断电梯是否出现电梯满载提醒信号或者电梯剩余载重量是否低于1人重量；若是，则判定电梯已经是满载状态，在没有响应下梯信号之前，不再响应外呼信号；若否，则执行步骤 Step2；

Step2: 通过获得电梯载重信息，判断电梯的剩余载重量是否在3人以下，若否，则电梯正常运行，不需要考虑轿厢空间拥挤度的问题；若是，则电梯有可能出现空间满载情况，则执行步骤 Step3；

Step3: 通过摄像头等设备获得所在楼层是否有人候梯，若否，则无法判断电梯是否处于空间满载状态，则执行步骤 **Step4**；若是，则判断是否存在与电梯运行方向相逆的外呼信号，若不存在，那么就可以判定电梯已经是空间满载状态，在没有响应电梯内乘客内呼信号之前，不再响应楼层的外呼信号；若存在，则无法立即判断此台电梯是否处于空间满载状态，继续执行步骤 **Step4**；

Step4: 当无法判断是否空间满载的电梯再次响应外呼信号停车之后，通过电梯载重量的变化判断门厅外是否有人进梯；若是，则电梯继续运行，并返回步骤 1 判断；若否，则判定为空间满载，不再响应大楼内楼层的外呼信号。

下图 5.10 为电梯临界满载判别示意图。

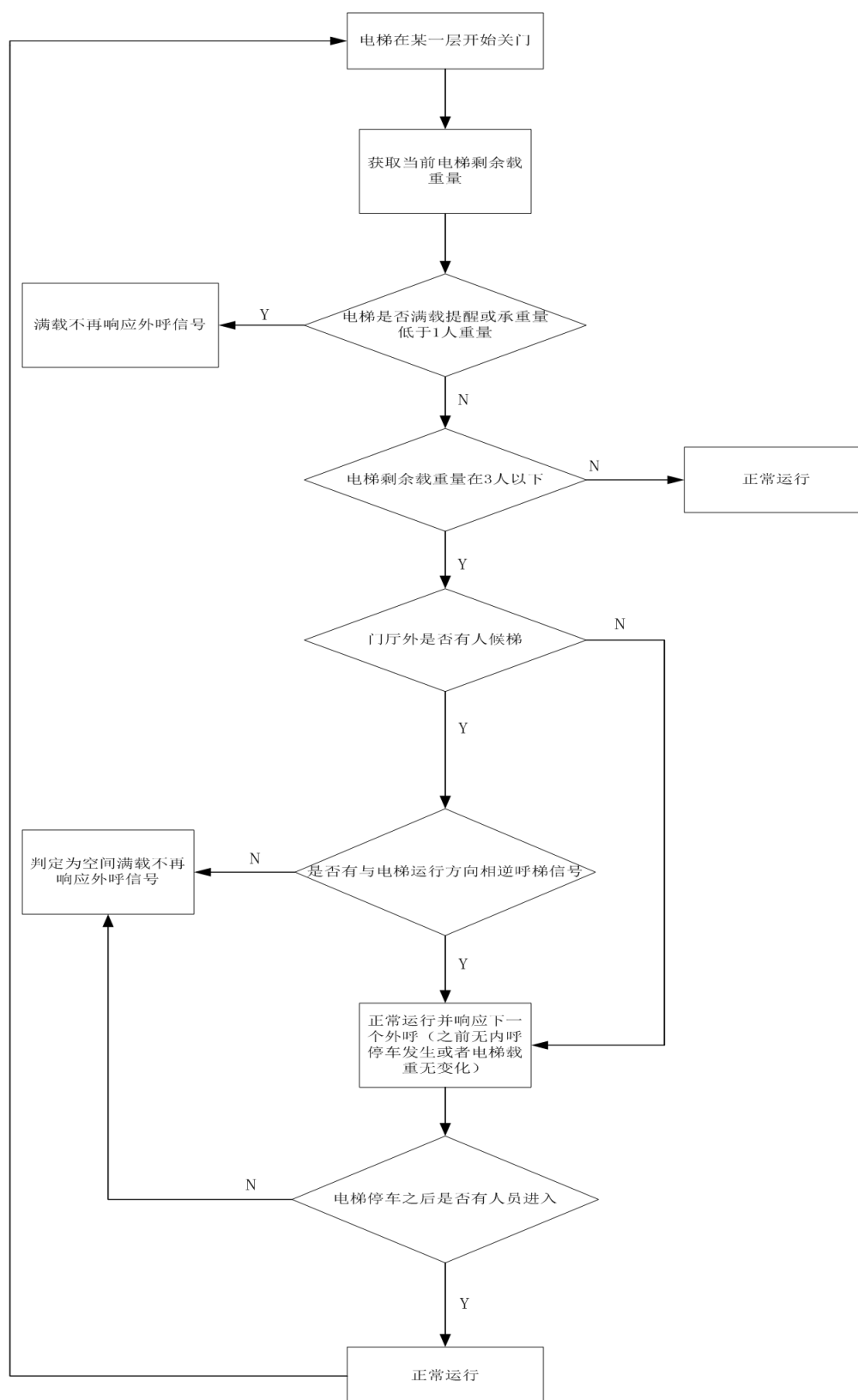


图 5.10 电梯满载判断

Fig. 5.10 Elevator full load judgment

假设某一大楼共有 20 层，有一台电梯，电梯走过一层时间是 2s，电梯停靠后开关门时间为 4s，电梯启停一次消耗 1kw.h 电能，电梯从 20 层运行到 1 层消耗 1kw.h 电能，大楼内电梯运行如下图所示。

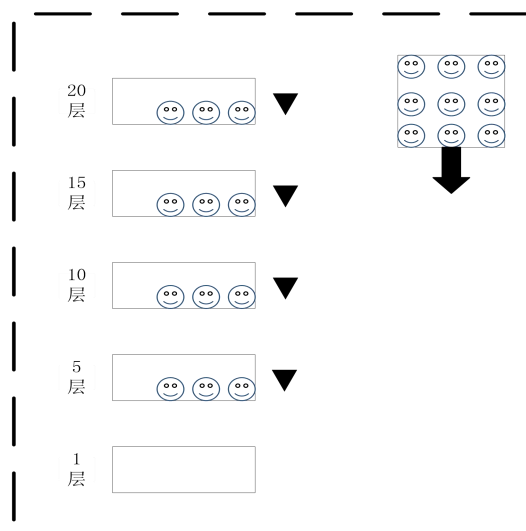


图 5.11 电梯运行

Fig. 5.11 Elevator operation

假设此台电梯在 20 层时进入 10 人后空间满载，但载重小于额定载重，大楼内电梯交通模式属于下高峰交通模式，乘客前往 1 楼大厅，大楼内 20 层，15 层，10 层，5 层均有乘客按下下行呼梯按钮。若无法电梯满载识别，当电梯下行至 15,10,5 层时，均会响应外呼信号停梯，若有满载识别，则电梯不再响应外呼信号，直接下行至 1 层。无电梯满载识别方法与本文满载识别方法相比，电梯能耗与电梯轿厢内乘客乘梯时间都将增加，具体如下表 5.6 所示。

表 5.6 性能对比

Table 5.6 Performance comparison

参数	无满载识别	满载识别
电梯耗能 (kw.h)	4	1
平均乘梯时间 (s)	52	40

从上表可以看出，当电梯空间满载之后，候梯乘客无法再进入电梯，若电梯继续响应其他楼层的呼梯信号，不但会增加电梯无意义的能耗，而且也会增加轿厢内乘客的乘梯时间和其他楼层乘客的候梯时间。

与现有技术相比，本方法有以下优点：

1.通过乘客进入电梯是否发生满载提醒信号或者电梯剩余载重量是否低于 1 人重

量来判断电梯是否处于满载，当电梯处于临近满载状态，或者发生满载提醒信号乘客退出之后，也将电梯判定为满载状态，不再响应其他外呼信号，减少了电梯无效的停车。

2.除了考虑电梯载重满载的情况，根据现实情况，进一步判断电梯是否处于空间满载情况，当电梯轿厢的拥挤度超过一定限度，虽然电梯载重没有达到满载，但是仍然无法满足乘客进梯需要。当一次停车无法判断出电梯是否空间满载时，那么继续响应下一个外呼信号，通过增加一次停车来判断是否空间满载。如果判断出是空间满载，那么之后的外呼信号将不在响应，从而减少电梯无效的停车。

3.综合考虑电梯的载重满载以及空间满载情况，最大程度减少的电梯的无效频繁停车，减少乘客的等待时间，提高大楼内乘客的使用电梯的质量，同时也减少了电梯的损耗，增加了电梯的使用寿命。

针对电梯群控派梯过程中出现的重复派梯行为和因电梯信息不完备产生的错误停站情况，尤其是电梯交通流处于下行高峰期时，因电梯拥挤程度饱和而轿厢负载未饱和出现的错误停站情况，提出了一种电梯满载状态识别方法来减少轿厢不必要的停站，减少了乘客乘候梯时间，降低了电梯系统能源的消耗。

5.6 本章小结

本章以大楼内乘客候梯时间、乘客乘梯时间、电梯能耗为优化目标建立智能群控调度多目标优化模型，明确了各个指标的具体计算过程，针对大楼内不同的交通模式通过改进的遗传算法选择最优派梯方案，并在智能群控调度仿真平台上对算法的可行性进行了验证分析。最后，针对目前电梯群控过程中因电梯拥挤程度饱和而轿厢负载未饱和出现的错误停站情况，提出了一种电梯满载状态识别方法来减少轿厢不必要的停站。

总结与展望

研究工作总结

本文分别对电梯智能群控调度系统的交通流预测、交通模式识别、智能群控调度算法以及电梯临界满载进行了研究，本文取得的成果具体如下：

(1) 基于灰色预测理论的交通流组合预测方法：针对乘客交通流时间序列小样本的特征，根据等维新息原则，提出一种改进的灰色GM(1,1)模型对电梯交通流分别进行周期特性及发展变化趋势预测。综合考虑电梯交通流的周期特性及发展变化趋势，将两组预测数据进行自适应加权组合预测。将交通流数据最优加权组合预测与小波神经网络预测模型相比较表明，在实际获取的乘客交通流数据量较少的情况下，最优加权组合预测的预测误差相对单一预测更小。

(2) 基于模糊粗糙集理论的交通模式识别方法：针对影响交通模式识别因素较多且复杂多变的问题，根据粗糙集理论，提出了一种基于属性约简的电梯交通模式模糊识别方法。对影响电梯交通模式识别的属性及模糊推理规则的两个方面进行属性约简，增强了模型识别电梯交通模式时的容错性，减少了模糊推理规则数目。仿真结果表明，该方法识别结果的准确率要高于应用(LSSVM)多值分类识别的准确率。

(3) 基于改进遗传算法的电梯智能群控调度算法：智能群控调度算法是智能群控系统的核心组成部分，它能够根据乘客实际乘梯需求得出最优派梯方案。本文以乘客乘候梯时间、电梯能耗作为优化目标，建立了电梯智能群控调度多目标优化模型，并通过改进遗传算法对派梯方案进行优化，最后借助仿真平台对本设计方案进行仿真测试，实验结果表明通过改进的遗传算法可以减少大楼内乘客的乘候梯时间以及降低电梯能耗。

(4) 电梯临界满载运行情况的判别：针对电梯群控派梯过程中出现的重复派梯行为和因电梯信息不完备产生的错误停站情况，尤其是电梯交通流处于下行高峰期时，因电梯拥挤程度饱和而轿厢负载未饱和出现的错误停站情况，提出了一种电梯满载状态识别方法来减少轿厢不必要的停站，减少了乘客乘候梯时间，降低了电梯系统能源的消耗。

研究工作展望

虽然本文对以上内容做了研究，但是由于时间和水平所限，电梯智能群控调度系统仍有很多研究方面需要进一步分析完善。

(1) 电梯智能群控调度系统的服务对象是乘客交通流,对交通流进行深入分析研究是实现电梯智能群控调度优化的一个重要前提,由于乘客交通流的随机性、非线性及不确定性等特性,且不同建筑物的交通流特性也不尽相同,要针对交通流特性选择合理的智能的预测及识别方法。本文主要是将某一典型办公楼的交通流当作研究对象,而未对其他类型建筑物交通流特性进行分析研究,故所提出的预测识别方法有一定的局限性。

(2) 电梯智能群控系统仿真平台的交通流产生采用基于泊松分布的乘客到达模型,因此无法有效反映出实际的乘客呼梯请求,因此需要结合实际大楼内乘客交通流情况对产生交通流的公式进一步研究创新。

(3) 本文仅采用改进遗传算法对电梯智能群控调度算法进行了改进,且群控仿真基于理想服务模型,下一步可以考虑与其他群控算法如模糊控制、神经网络、专家经验等相结合,充分发挥各群控算法的优势。

(4) 本文提出的电梯临界满载满载情况判别的方法虽然可以有效解决因电梯载重临界满载和空间满载导致的电梯无效停车,但无法直接运用于其他各种交通模式情况,其主要是针对办公大楼内电梯下行高峰交通模式的情况,且实际运用需要其他辅助设备的配合使用。

参考文献

- [1] 朱德文,付德江.电梯群控技术[M].北京:中国电力出版社. 2006.
- [2] Ohhoon Kwon, Eunji Lee, Hyokyung Bahn.Sensor-aware elevator scheduling for smart building environments.Building and Environment 72 (2014) 332-342.
- [3]李俊芳. 电梯交通流量特性分析及预测方法研究[D].天津大学,2013.
- [4]P. E. Utgoff, M. E. Connell, Real-time combinatorial optimization for elevator group dispatching, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2012, 42(1): 130-146.
- [5]Z. S. Yang.Traffic regularity evaluation for elevator vertical traffic system.International Conference on Technology of Architechure and Structure, (Xi'an, China, 2011)374-377.
- [6] L. J. Wang, Z. Y. Lv.Elevator traffic pattern fuzzy recognition based on least squares support vector machine. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(7): 1333-1338.
- [7] 万健如, 贾祖新, 智 渊. ACO-BP 神经网络在电梯交通流预测中的应用[J]. 传感器与微系统, 2015, (11): 153-156+160.
- [8] 黄敏, 崔宝同, 顾树生. 基于小波神经网络的电梯交通流预测[J]. 控制与决策; 2006,(05): 589-592.
- [9] 宗群, 岳有军. 电梯群控系统交通流的预测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2001,(07): 103-105.
- [10] 宗群, 赵占山, 商安娜. 基于季节自回归单整移动平均模型的电梯交通流递归预测方法[J].天津大学学报, 2008, (06): 653-659.
- [11] 胡志刚, 杨广全, 乔现玲. 基于小波支持向量机的电梯交通流预测模型[J]. 系统仿真学报, 2009,(19): 6321-6324.
- [12] 唐海燕, 于德亮, 丁宝, 齐维贵. 基于 SVR 的电梯交通流时间序列预测[J].控制工程, 2011,(05): 723-726+792.
- [13] Ding Bao, Zhang Yongming, Peng Xiyuan, Li Qingchao, Tang Haiyan. A hybrid approach for the analysis and prediction of elevator passenger flow in an office building[J]. Automation in Construction , 2013, (35): 69-78.
- [14]丁宝, 李庆超, 张永明, 等. 适于双子电梯群控系统的交通模式预测方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,(08):79-83.
- [15]宗群, 尚晓光, 严明, 等. 基于模糊神经网络的电梯系统交通模式识别 [J]. 系统工程学报, 2001,(06):418-424.
- [16]岳文姣, 杨祯山. 基于 SOM 的模糊 BP 神经网络技术的电梯交通模式识别 [J]. 渤海大学学报 (自然科学版),2015,(04):363-370.
- [17]刘美菊, 刘冬, 刘剑. 随机森林在群控电梯交通模式识别中的应用 [J]. 机械设计与制造,2013, (04):88-89+93.
- [18]沈亮. 基于群体智能聚类算法的电梯交通流分析 [J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2012 , (06) :118-121.
- [19]于德亮, 唐海燕, 丁宝, 等. 基于粒子群优化模糊核聚类的电梯群交通模式识别 [J]. 哈尔滨工

业大学学报,2012,(10):84-88.

[20]王鹿军, 吕征宇. 基于 LSSVM 的电梯交通模式的模糊识别[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, (07):1333-1338.

[21]秦臻, 赵建勇, 严义. 基于多值分类 SVM 的电梯交通模式识别[J]. 计算机工程, 2011, (09): 201-203+206.

[22]许玉格, 罗飞. 新型电梯群控系统交通模式识别方法 [J]. 控制理论与应用, 2005, (06):900-904.

[23]杨广全, 朱昌明, 王向红, 等. 基于粒子群 K 均值聚类算法的电梯交通模式识别 [J]. 控制与决策, 2007, (10):1139-1142.

[24]TANG G Z, ZHANG G M, ZHU W. EGCS traffic pattern identification[J]. Elevator World, 2005, 53(12) :116—120.

[25]李中华, 朱燕飞, 李春华, 等. 基于人工免疫聚类算法的电梯交通流分析 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003, (12):26-29.

[26]马福军. 基于贝叶斯决策理论的电梯群控交通模式识别 [J]. 机电工程, 2009, (09):104-107.

[27] L. Al-Sharif, A. Alqumsan, and R. Khaleel, Derivation of a universal elevator round trip time formula under incoming traffic, Building Services Engineering Research and Technology, 2014, 35(2): 198-213.

[28] S. W. Wang, C. C. Yan, F. Xiao, Quantitative energy performance assessment methods for exiting buildings, Energy and Buildings, 2012, 55: 873-888.

[29]Daniel , Carlos H. Llanos. Distributed approach to group control of elevator systems using fuzzy logic and FPGA implementation of dispatching algorithms. Engineering Applications of Artificial Intelligence 21 (2008) 1309–1320.

[30]Pablo Cortés , Luis Onieva. A viral system algorithm to optimize the car dispatching in elevator group control systems of tall buildings. Computers & Industrial Engineering 64 (2013) 403-411.

[31]P. Cortés , J. Larrañeta, L. Onieva. Genetic algorithm for controllers in elevator groups. Applied Soft Computing. 4 (2004) 159–174.

[32]Emre Oner Tartan. Cebail Ciftlikli. A Genetic Algorithm Based Elevator Dispatching Method For Waiting Time Optimization. IFAC-PapersOnLine 49-3 (2016) 424–429.

[33]Berna Bolat , Pablo Cortés . Genetic and tabu search approaches for optimizing the hall call—Car allocation problem in elevator group systems. Applied Soft Computing 11 (2011) 1792–1800.

[34]Berna Bolat , Oguz Altun . A particle swarm optimization algorithm for optimal car-call allocation in elevator group control systems. Applied Soft Computing 13 (2013) 2633–2642.

[35]Toni Tukia , Semen Uimonen , Marja-Liisa Siikonen. Explicit method to predict annual elevator energy consumption in recurring passenger traffic conditions. Journal of Building Engineering. 10(2016)2352-7102.

[36]M. Fatih Adak , Nevcihan Duru. Elevator simulator design and estimating energy consumption of an elevator system. Energy and Buildings 65 (2013) 272–280.

- [37]Mirko Ruokokoskia, Janne Sorsa. Assignment formulation for the Elevator Dispatching Problem with destination control and its performance analysis. *European Journal of Operational Research*. 252(2016) 397-406.
- [38] T. Nagatani, Complex motion in nonlinear-map model of elevators in energy-saving traffic, *Physics Letters A*, 2011, 375: 2047-2050.
- [39] T. Nagatani, K. Tobita, Effect of periodic inflow on elevator traffic, *Physica A*, 2012, 391: 4397-4405.
- [40] T. Nagatani, Complex motion of elevators in piecewise map model combined with circle map, *Physics Letters A*, 2013, 377: 2047-2051.
- [41]宗群. 虚拟环境下智能电梯群控调度方法的研究[D].天津大学,2003.
- [42]李中华. 垂直交通客流分析与电梯群控制优化研究[D].华南理工大学,2005.
- [43]唐海燕. 电梯交通分析及电梯优化控制方法研究[D].哈尔滨工业大学,2010.
- [44]张景龙. 电梯群控系统节能调度方法研究[D].天津大学,2014.
- [45]刘剑. 现代电梯交通系统客流分析与优化控制方法研究[D].东北大学,2015.
- [46]郎曼,李国勇,徐晨晨.电梯群控系统的节能调度优化仿真[J].*计算机仿真*,2017,34(02):375-379.
- [47]刘清,关榆君.基于多目标规划算法的电梯群控系统[J].*华北理工大学学报(自然科学版)*,2017,39(04):88-93.
- [48] 孙波军,尹伟石.改进的灰色模型及在短时交通流中的应用[J].*数学的实践与认识*,2016, 46(23):201-206.
- [49] 曾波,孟伟.基于灰色理论的小样本振荡序列区间预测建模方法[J].*控制与决策*,2016,31(07):1311-1316.
- [50] 赵宇哲,武春友.灰色振荡序列 GM(1,1)模型及在城市用水中的应用[J].*运筹与管理*, 2010, (05): 155-159+166.
- [51] Luo F, Ge X Y, Cao J Z. Elevator traffic flow prediction with least squares support vector machines[J]. *China:Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2005, (30): 312-316.
- [52] Barney G C. Elevator traffic handbook[M]. London,UK: Spon Press,2003: 10-13.
- [53] 彭振斌,张闯,彭文祥,王继武.GM(1,1)模型背景值构造的不同方法与应用[J].*东北大学学报(自然科学版)*,2017,38(06):869-873.
- [54] 罗党,刘思峰,党耀国.灰色模型 GM(1,1)优化[J].*中国工程科学*,2003(08):50-53.
- [55] 徐宁,党耀国,丁松.基于误差最小化的 GM(1,1)模型背景值优化方法[J].*控制与决策*,2015,30(02):283-288.
- [56] 邱子锋,沈简,傅旭东,罗浩威.基于最优加权组合预测的隧道监控量测数据分析[J].*长江科学院院报*,2016,33(05):53-57.
- [57] 裴瑞平,田丽,魏安静,王军,张艳.短期风功率自适应加权组合预测[J].*重庆工商大学学报(自然科学版)*,2016,33(02):26-29.
- [58]于霞,李铁鑫,于伟,等.一种基于粗糙集和模糊推理的生活方式病检查模型 [J]. *沈阳工业大学学报*,2016,(05):537-544.
- [59]YAO Y Y, ZHAO Y. Attribute reduction in decision-theoretic rough set models [J]. *Information Sciences* , 2008 , 178(17) : 3356 -3373.

- [60]高爽, 冬雷, 高阳, 等. 基于粗糙集理论的中长期风速预测 [J]. 中国电机工程学报, 2012, (01): 32-37+21.
- [61]翟兴隆, 李续武, 雷英杰. 基于粗糙集理论的不确定推理方法 [J]. 计算机工程与设计, 2011, (03): 1029-1032.
- [62]徐文峰. 基于模糊控制技术的电梯群控方法研究[D]. 吉林大学, 2017.
- [63]罗仁瑜. 电梯群控调度算法测试系统研究[D]. 山东建筑大学, 2015.
- [64]李庆超. 基于遗传算法的双子电梯群复合控制系统研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.

攻读硕士学位期间发表的学术论文

1、录用的论文

- [1] 李晨, 姜文刚. 基于灰色预测理论的电梯交通流组合预测[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 录用待发表.

致 谢

时光荏苒，短短三年的江科大研究生生涯即将步入尾声，驻足回顾过往岁月，往日学院里各学科老师对我们的敦敦教诲仍在耳边萦绕，师门朋友同学间的过往历历在目。匆匆三年，很荣幸能在我的研究生学业生涯中遇到姜文刚老师。从步入江苏科技大学学业开始的引导，到帮我选定研究课题，指导我的研究方法，具体到这次论文的撰写和定稿，都少不了姜文刚老师的呕心沥血。姜文刚老师不仅在学术上颇有建树，在人品上更是我的良师益友，跟我一起讨论学习上的问题，帮我解决生活上的困难。我还要感谢实验室中的师兄弟，他们在各个方面竭尽所能的帮助我完成本篇论文的撰写。

科研学术的研究虽在学校告一段落，但我不会放弃对它的热爱，它将在另一个地方重新开始。