



单位代码 10006

学 号 39032118

分 类 号 TP 301.6

北京航空航天大学
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

毕业设计(论文)

基于马尔可夫链的股票投资交易系统

学 院 名 称	<u>自动化科学与电气工程学院</u>
专 业 名 称	<u>自动化（机械电子工程）</u>
学 生 姓 名	<u>叶祥深</u>
指 导 教 师	<u>夏 俐</u>
	<u>王兴坚</u>

2013 年 6 月

北京航空航天大学

本科生毕业设计（论文）任务书

I、毕业设计（论文）题目：

基于马尔可夫链的股票投资交易系统

II、毕业设计（论文）使用的原始资料（数据）及设计技术要求：

收集股票交易数据，构建股票数据模型，利用马尔可夫模型分析时态变化，构建基于规划的交易策略，编制股票投资交易系统平台软件，实现股票投资交易评价，为交易决策提供评价和修正数据库。

III、毕业设计（论文）工作内容：

针对股票市场进行数据分析与预测，建立基于马尔可夫链的股票投资交易系统，具体包括如下两部分：

1. 建立一个初步的自动交易系统，从现有服务提供商中获取数据接口，建立一个简单的自动交易平台，并在此基础上实现交易规划和优化策略，使系统能够根据实时市场数据进行交易，以便检验交易策略的优劣；

2. 对股票市场进行建模和分析，并进行优化方法的尝试。通过文献调研了解现有的股票市场预测的基本情况并建立一个初步的模型。根据模型建立基于规则的交易策略并实施于交易平台，利用马尔可夫决策过程(MDP)理论进行优化算法的设计。

IV、主要参考资料：

[1]Cao X R, Stochastic Learning and Optimization: A sensitivity-based View[M]. Springer , 2007.

[2]丁晨华, 席裕庚. 基于马尔可夫链的股票投资组合问题研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(10): 366-369.

[3]Puterman M L. Markov Decision Processes[J]. Handbooks in Operations Research and Management Science, 1990, 2: 331-434.

[4]Markowitz H. Portfolio selection: efficient diversification of investments. Cowles Foundation Monograph No. 16[J]. 1959.

自动化 学院 自动化（机械电子工程） 专业类 390321 班

学生 叶祥深

毕业设计(论文)时间： 2013 年 3 月 5 日至 2013 年 6 月 13 日

答辩时间： 2013 年 6 月 13 日

成 绩：

指导教师： 夏俐 王兴坚

兼职教师或答疑教师（并指出所负责部分）：

系（教研室） 主任（签字）：

注：任务书应该附在已完成的毕业设计（论文）的首页。



本人声明

我声明，本论文及其研究工作是由本人在导师指导下独立完成的，在完成论文时所利用的一切资料均已在参考文献中列出。

作者：叶祥深

签字：

时间：2013 年 6 月





基于马尔可夫链的股票投资交易系统

学 生：叶祥深

指导教师：夏 俐

王兴坚

摘 要

股票市场是高风险市场，股价具有很大的波动性、不确定性，为了能够为用户的理性投资提供参考依据，我们希望开发一个新型的股票投资交易系统，既能对股票的情况进行分析，又可以根据实时市场数据在自动交易平台上进行程序化交易。

本文提出了一种基于马尔可夫链的优化算法。首先，通过将股票价格的时间序列分解为马尔可夫序列，建立投资组合的马尔可夫链模型；然后，结合采用策略迭代的随机优化算法，实现投资组合的滚动优化；最终构造出一个基于状态反馈的最优投资组合策略。通过上证 A 股的实证分析，结果表明，在新的优化模型及算法下能获得更高的计算效率和投资收益。

与此同时，本文设计了一种新型的股票投资交易系统，可根据实时股票市场数据，在自动交易平台上进行程序化、网络化、智能化的交易，该系统界面友好，可操作性强，设计模式灵活，性能稳定，拥有良好的用户体验。

本文探索性地提出通过历史数据建立股票投资组合的马尔可夫链模型，在达到预测实时性、准确性要求的基础上，采用策略迭代的随机优化方法，使计算效率大大提高；在新的投资组合方案中由于将随机因素纳入考虑范围，为投资者提供了更多的投资机会，从而带来更高的投资收益。

关键词：马尔可夫链，随机优化，投资组合，股票交易系统



A Stock Investment Trading System Based on Markov Chain

Author: YE Xiang-Shen

Tutor: XIA Li

WANG Xing-Jian

Abstract

The stock market always goes with high risks because of its fluctuating and uncertain characteristics. In order to provide the reference for users' rational investment, we hope to develop a new stock investment trading system. The system can not only analyze the situation of stocks, but also complete the program trading on the automated trading platform according to real-time market data.

In this paper, a stochastic optimization algorithm based on Markov chains was proposed. The stock price was decomposed into Markov sequence by time series to establish the Markov chain model. With the help of stochastic optimization algorithms based on policy iteration, a rolling optimization of portfolio was achieved. Eventually, a set of investment strategies based on state feedback can be determined. An empirical study on the Chinese A-Share Market was used, whose results show that higher efficiency and return of investment can be achieved under the new model and algorithms.

Meanwhile, a new type of stock investment trading system was designed. According to real-time stock market data, the system can complete the program trading on the automated trading platform intelligently. In addition, the system is user-friendly and easy to operate, with flexible design patterns and stable performance.

An explorative method was proposed, in which a Markov chain model of stocks portfolio was constructed through historical data. On the basis of instantaneity and accuracy, policy iteration made the computation efficiency greatly improved. Since random factors were taken into consideration, the method provided investors with more opportunities and higher income.

Key word: Markov chain, Stochastic optimization, Portfolio, Stock Trading Systems



目 录

1	绪论	1
1.1	课题背景.....	1
1.2	研究意义.....	2
1.2.1	来自用户的实际需要.....	2
1.2.2	传统的分析预测模式不能适应新形势下的股票分析和预测需求.....	3
1.2.3	信息环境的发展使网络化、程序化交易系统能够很好地实现.....	3
1.2.4	原有股票分析和预测软件功能不够完善.....	4
1.3	国内外研究状况.....	4
1.3.1	ARIMA 模型 (Autoregressive Integrated Moving Average Model)	5
1.3.2	人工神经网络模型 (Artificial Neural Networks Model)	5
1.3.3	灰色模型 (Grey Model)	6
1.3.4	马尔可夫链模型 (Markov Chain Model)	6
1.4	课题研究方法.....	7
1.4.1	研究目标.....	7
1.4.2	研究内容.....	7
1.4.3	拟解决的关键问题.....	9
1.5	论文构成及内容.....	10
2	马尔可夫模型及基本方法	11
2.1	马尔可夫过程.....	11
2.2	马尔可夫链.....	12
2.2.1	马尔可夫链的定义.....	13
2.2.2	马尔可夫链的性质.....	14
2.2.3	马尔可夫链的应用.....	16
2.3	马尔可夫决策过程.....	17
2.3.1	马尔可夫决策过程的概念.....	18



2.3.2	马尔可夫决策过程的应用.....	20
3	基于马尔可夫链的随机优化算法	21
3.1	投资组合问题的数学模型.....	21
3.1.1	股票投资组合问题.....	21
3.1.2	传统投资组合方法的缺陷与解决方案.....	21
3.1.3	数学模型的建立.....	22
3.2	马尔可夫链模型的建立.....	24
3.2.1	时间和状态的离散化.....	24
3.2.2	样本路径和状态转移矩阵的计算.....	24
3.3	优化性能指标.....	25
3.4	策略迭代算法.....	26
3.4.1	基本原理.....	26
3.4.2	性能势.....	26
3.4.3	性能差分公式.....	27
3.5	优化算法设计.....	28
4	股票投资交易系统设计	30
4.1	需求分析.....	30
4.1.1	总体目标.....	30
4.1.2	管理需求.....	30
4.1.3	用户需求.....	31
4.1.4	技术需求.....	31
4.2	可行性分析.....	31
4.2.1	经济可行性.....	31
4.2.2	技术可行性.....	32
4.3	系统设计.....	33
4.3.1	体系结构设计.....	33
4.3.2	功能模块设计.....	34
4.3.3	界面设计.....	35
5	系统实现与实证分析	36



5.1	系统实现与效果.....	36
5.1.1	股票信息界面.....	36
5.1.2	股票信息查询.....	37
5.1.3	股票 K 线图查询.....	38
5.1.4	投资策略优化.....	38
5.1.5	投资交易界面.....	40
5.1.6	菜单栏.....	41
5.2	基于历史数据的实证分析.....	43
5.2.1	优化性能分析.....	43
5.2.2	算法效率分析.....	45
5.3	基于实时数据的实证分析.....	45
结论		48
致谢		49
参考文献		51



1 绪论

1.1 课题背景

现实生活中的大多数经济现象都受到许多不确定因素的影响而呈现出一种随机变化的形式,这种随机性的存在使得人们很难用一个确切的方程来描述它们,股票指数也不例外。所以历来的这方面的研究及从业人员都力图找出一种方法使得人们至少能掌握其变化规律,或者达到控制它的目的。

股票市场是金融市场的重要组成部分,与国民经济发展密切相关^[1]。股票作为资本证券化的工具,一种虚拟资本的代表,可以很便捷地在国际市场筹集和融通资金。股票价格就是股票在市场上的买卖价格,又称股票市价或股票行市。股票作为一种有价证券的凭证,本身并不具有价值,它之所以有价格,是因为它能够在市场上进行流通并给持有者带来收益,因而具有价值形态,从而成为一种特殊商品,并在股票市场上流通。股票价格指数是衡量证券市场发展状况的一个重要指标,是衡量一个国家或地区经济发展状况的“晴雨表”,其联动效益已在世界各市场中表现出来^[2]。股票市场的各种数据一直对预测者有着巨大的吸引力,也是各种预测方法应用的热门领域。股票的数据貌似杂乱无章,但某一时期的数据常常在另一时期不同程度地再现^[3]。另外,金融时间序列样本发生频率非常高,在很短的时间内可以取得很大的样本,人们可以轻松地获得所需要的数据。

我国股票发行市场伴随股份制改革的开始而出现^[4],其萌芽期可以追溯到 20 世纪 80 年代初期,1980 年 8 月,中国人民银行抚顺市新抚办事处率先在国内第一次代理发行尚未规范的股票,其后陆续有其它的股票上市。1990 年 3 月,国务院在文件中明确规定上海、深圳两市为股份制改革、公开发行股票的试点地区,使股票市场初具规模,此后股票市场进入了稳步发展阶段。随着股票市场的不断规范壮大,越来越多的人进入股票交易市场,也相应地产生了不少股票分析和预测软件。但是现今流行的股票软件中,进行测试的较少,且大多为预测趋势的,在预测的准确度和软件的功能性上仍存在很大的改善空间,因此我们希望开发一个股票投资交易系统,既能对股票的情况进行分析又能对股票的价格进行预测,并可根据实时市场数据在自动交易平台上进行程序化交易



[5,6]。

1.2 研究意义

我国的股票市场,从沪、深两个交易所成立日算起,已有二十余年的历史。虽然中国股票市场具有与生俱来的制度性缺陷,但我们不能否定股票市场对中国经济增长的积极作用,它的跨越式的发展为国有企业改革和国民经济的持续健康发展做出了积极的贡献^[7]。股票市场在经济发展中有许多不可替代的作用,股票集资能大量、迅速地筹集社会闲散资金从而极大提高社会资金的使用效率,开创了横向经济联系的新渠道,并能把企业与职工和管理者的经济利益密切地联系起来,促进企业不断提高管理水平和经营效益,刺激企业不断创新^[8]。

总体上看,中国股票市场正在不断规范中得到较快的发展,那么我们就应该以发展的眼光看待中国股票市场,在完善有关法规和规范市场主体的前提下,进一步发展和壮大股票市场,使其在国民经济建设中发挥更大的作用。

二十一世纪是知识化、信息化的网络时代。计算机信息技术的使用对股票市场的发展空间带来了质的变革,极大地拓展了股票市场的时空界限,提高了人们对股票软件产品的学习兴趣和利用效率。以网络手段来获得股票数据资源的方式和利用网络作为基本的操作股票的形式,实现以资源共享为核心的全新的股票分析和预测方式,必将冲击着传统的股票市场模式。

程序化交易拥有快捷的实现方式,能够快速根据指令来完成下单,最大程度提高交易效率^[9]。通过使用计算机指令,可以克服人性贪婪和恐惧的弱点。通过设计好的风险管理和资金管理模型条件,帮助投资者建立起有效的风险控制及成本控制系统,精细把握市场上的投资机会。目前,程序化交易已经在国内外的证券市场中被广泛采用^[10],2010年国内股指期货市场的推出为程序化交易带来了更加迅猛的发展。

通过调研,我们认为主要有如下几个方面可以说明开发一个新型的股票投资交易系统的必要性:

1.2.1 来自用户的实际需要

1. 传统的股票分析和预测,对初入股票市场的用户不适合。因为软件要求用户自己有根据对提供的数据进行预测的能力,这必然要对股票市场行情有充分的了解才能做到,这一方式已经不能满足用户的需要,尤其是他们既不能对影响股票的因素有一定的



了解，又没有掌握基本的分析术语，所以在操作和判断上难免会有困难，这就需要一个智能化的操作简单的软件产品来帮助这些用户来完成他们的需要；

2. 现有的股票软件以分析为主，预测的少，这种方式已越来越不适合数据激增的需要，频繁地发行的股票数量的增加，股票交易的频繁，股价的动荡，用户们迫切地需要一个方便快捷的股票分析和预测软件来满足炒股的要求，因为没有过多的时间来花费在掌握市场行情与各种会影响到股票价格的因素上，而且这些因素要想正确估计也是有一定的难度的；

3. 从事股票市场分析的人员和宏观调控的人员虽然掌握了系统化的股票分析基础理论知识和快速的分析股价的能力，但他们也需要一个完善的股票分析和预测系统，以满足当今对股票的价格变化估计的需要。

1.2.2 传统的分析预测模式不能适应新形势下的股票分析和预测需求

主要表现在以下两个方面：

1. 使用方式不能满足用户的需要，对分析和预测人员没有吸引力，不能激发人们的使用热情。对普通用户来说操作又有一定的难度，很多的预测软件只给出了预测的趋势，没有真正能给出股票的大约价格以供参考；

2. 分析工作趋于形势，达不到预测的准确度的要求。系统的分析主要是将现有的数据的一个整理，不能提供更多有价值的信息。用户想要做出预测还是要靠自己来完成，对于有经验的人来说，这可能不是一件难事，仅仅是花费时间上的问题，但是对于不了解行情的人来说，要做出正确的判断是不太可能的。

1.2.3 信息环境的发展使网络化、程序化交易系统能够很好地实现

1. 当今社会信息化发展迅速，尤其是股票的发展，更加需要大力依托信息系统的支持，这样才能使股票分析和预测有一个理想的网络平台，为网络化的股票分析和预测系统的设计、实现和发展奠定了良好的基础；

2. 现代编程技术的发展、新的编程语言的出现及传统编程语言的进化，使信息系统的性能越来越完善和强大，借助这些编程工具可以开发出适合用户使用的股票投资交易系统；

3. 计算机设备的硬件发展为实现高性能的股票分析和预测提供了硬件基础。计算机的高性能使得处理数据越来越快，对用户的请求也能快速反应。程序化交易高度依赖



技术条件和硬件设施,这很大程度上决定了交易的成败,更高的技术条件和速度意味着能比别人更快地获取并反应信息。

1.2.4 原有股票分析和预测软件功能不够完善

原有股票分析和预测由于受编程工具及早期计算机硬件性能的限制,在功能上不够完善,主要表现在以下几个方面:

1. 分析和预测不适合更新的发展,不适合相互交流;
2. 界面不够友好,可操作性差;
3. 设计模式不够灵活,维护工作量大,难以在实际应用中广泛地开展和使用;
4. 性能不稳定,让人缺少信任感。

综上所述,采用开放、动态的系统架构,将传统的股票分析和预测与先进的网络应用及程序化交易方式相结合,开发出可使用户完全根据自身应用特点快速构建的股票分析和预测平台,方便对股票分析和预测的学习和高效的管理,不但是普通用户的需要,也是股票公司和国家金融机构所希望的。

1.3 国内外研究状况

20 世纪 60 年代,金融学家开展了许多关于金融市场理论基础的研究,并导致了有效资本市场理论的发展。Fama 和 Roberts 提出有效市场假说(EMH)理论^[11,12],将有效市场分成三个层次:

一是强型有效市场(Strong-Form Efficiency),在该市场中,现时的股票价格反映了所有信息,没有人能够利用包括内幕消息在内的任何信息获得超额收益;

二是半强型有效市场(Semi-Strong-Form Efficiency),在该市场中,现时股票价格反映了所有公开的相关信息,如年报、简报、报纸专栏等等;

三是弱型有效市场(Weak-Form Efficiency),在该市场中,现时股票价格反映了所有过去的相关信息。

市场效率的决定因素是市场对不同信息的反应程度,包括历史信息、公开信息和内部信息。EMH 理论认为在弱型有效市场上,历史信息如股票过去的价格等对未来价格的影响已体现在现有价格中,投资者一般不能简单依靠过去信息获取超额利润,过去的信息对未来的收益而言只有随机影响。

对中国股票市场的有效性检验,基本集中于弱有效市场或无效市场这两个层次上



[13]。大量分析发现中国股票价格波动具有长期记忆性,即股市涨跌存在自身的规律,无论长期和短期都存在着可预测的成分,因而技术分析是有用的,通过采用相应策略,投资者可以获得超常利润^[14]。中国证券市场呈现弱有效性的原因^[15]可能在于,作为一个新兴市场,法制、监管等因素造成市场信息传递效率低下,投资者在博弈中存在严重的信息和资金实力不对称,而且这种不对称状态并不能在市场中迅速消除。

正是由于这种市场结构的特点,使得某些“技术分析”成为信息挖掘的成本,加之各种经典理论以及计算机技术的发展,使得股价预测成为可能。国内外对股票价格进行预测的模型种类很多,依据其建模理论不同,主要的预测模型包括 ARIMA 模型、人工神经网络、灰色模型、马尔可夫链模型等。

1.3.1 ARIMA 模型 (Autoregressive Integrated Moving Average Model)

ARIMA 方法是一种以随机理论为基础的时间序列预测方法,它将预测对象随时间变化形成的序列,看作是一个随机序列(即序列中前后两个数的产生毫无关系),在此基础上建模预测。其建模的基本思想是:除去偶然原因产生的个别数外,某些时间序列是只依赖时间的一族随机变量。构成该时序的单个序列值虽然具有不确定性,但整个序列的变化却可以用一个平稳随机过程来刻画,使用 ARIMA(p,d,q)模型来近似描述这个平稳随机过程。

白营闪(2009)等通过 ARIMA 模型对上证指数走势进行了预测,结果表明在统计学允许的误差范围内(误差在正负 5%以内),该模型可用于预测股指日间短期走势^[16]。该模型的优点是计算速度较快,运用成本较低,适用随机序列的预测。然而对于股价的长期趋势以及突然上涨或下跌,该模型就会表现出局限性。

1.3.2 人工神经网络模型 (Artificial Neural Networks Model)

人工神经网络是一种大规模并行处理系统,具有良好的自学习能力、抗干扰能力和强大的非线性映射能力,能够从大量历史数据中进行聚类和学习,自动提取样本隐含的特征和规则,进而找到某些行为变化规律,可以实现任何复杂的因果关系。人工神经网络的模型很多,目前用得最多且最成熟的是 BP (Back Propagation) 神经网络。

伍海华(2003)等建立 BP 神经网络预测模型,对上证指数进行了预测,发现该模型收敛速度快,学习能力强,预测精度高,误差率较小,适合股指的短期预测^[17]。崔建福(2004)等发现 BP 模型普遍显著优于 GARCH (广义自回归条件异方差)模型,从



而认为对股票价格这样波动频繁的时间序列,从非线性系统角度建模略胜于从非平稳时间序列角度建模。由于传统算法收敛速度慢且全局寻优能力差,更多研究将精力放在对神经网络结构和参数的改进上。丁雪梅(2003)等发现改进后 BP 算法的预测结果比回归预测、指数平滑预测和灰色预测都要好^[19]。

与传统统计回归方法相比,神经网络的优点在于不仅能够学习训练集的例子,且能从训练集中提炼出某种一般性原理、规律,具有很强的非线性函数拟合特性,再加上其收敛速度快、预测精度高等特点,这对于预测短周期内股价波动有较强的适用性。神经网络的缺陷在于对股市中的假突破、强烈振荡等进行预测的正确率较低,网络的隐层数目不易恰当确定,学习时间长等。其最致命的缺点在于,无法表达和分析预测系统的输入输出之间的关系,难以解释系统输出结果。

1.3.3 灰色模型 (Grey Model)

灰色理论是我国控制学专家邓聚龙教授在 1982 年提出的^[20]。在客观世界中,大量存在的不是白色系统(信息完全明确)也不是黑色系统(信息完全不明确),而是灰色系统。灰色系统理论认为要充分利用已知的信息去揭示系统的规律。在社会、经济等系统普遍存在随机因素的干扰,这给系统分析带来了很大困难。灰色系统理论把随机量看作是在一定范围内变化的灰色量,尽管存在着无规则的干扰成分,经过一定的技术处理总能发现它的规律性。灰色预测就是建立在灰色理论基础上所建立起来的预测体系,根据过去及现在已知的或非确知的信息,建立一个以过去引伸到将来的 GM 模型(即灰色动态模型, Grey Dynamic Model),从而确定系统未来发展变化的趋势^[21]。GM (1, 1) 模型是最常用的一种灰色模型,它是由只包含单变量的一阶微分方程构成的模型。

覃思乾(2006)应用灰色 GM (1, 1) 模型对股票价格进行短期预测,并与 ARIMA 模型进行拟合比较,结果表明 GM (1, 1) 模型在样本区间内的预测结果的准确度比 ARIMA 模型高出 0.1 个百分点^[22]。灰色模型的优点是适用于部分信息已知、部分信息未知的市场(如弱势有效市场)的预测。其缺点在于当股价随机性波动较大时,该模型其预测值就会偏高或偏低。

1.3.4 马尔可夫链模型 (Markov Chain Model)

马尔可夫链预测模型的本质是指事物在以后的状态只与本阶段的状态有关,而与以前任何阶段所处的状态均无关,这称之为“无后效性”。如果市场满足马尔可夫条件,



则受多种随机因素影响的股市的未来的走势及演变仅仅与当前所处状态有关,而不受过去的状态影响,也就是具有马尔可夫性,此时我们可以通过马尔可夫链建立股价预测模型。马尔可夫链预测模型是研究某一事件的状态及状态之间转移规律的无后效性的随机过程。

关丽娟(2005)等运用马尔可夫链模型对上证指数日间走势的涨跌概率进行了预测^[23],台文志(2009)则运用该模型对个股的走势进行了预测^[24],均得出了该模型适合对股价作近期走势预测的结论。该模型的优点是对历史数据依赖较少、对各种分布均具有适应性。现有的马尔可夫链模型预测的准确性受状态分类的影响太大,预测时点没有状态分布的信息,未能充分发挥历史数据的作用。

不难发现,以上提及的众多股价预测模型存在有一些共同的特点,如重大盘综合指数预测轻个股预测,重历史数据拟合轻未知数据预测,预测方法的长期有效性也没有得到完全检验。因此,模型的预测能力、准确度和普适性有待进一步的提高。

目前,根据不同的股票预测模型,借助计算机技术,各国均开发了适合本国特点的股票分析和预测系统,所存在的问题是系统的兼容性差,不能够很好地通用。对股票分析和预测,无论是从网络的组建理论方面还是介质使用的影响方面,国内外文献均有过相关的报道,也有很好的理论给予支持。在计算机发展的起始,计算机涉足于股票界之初,软件开发人士就力求用计算机来实现各种股票交易及相关操作,如今相应的软件产品越来越多,也越来越适应社会和个人的需要。

1.4 课题研究方法

1.4.1 研究目标

根据现有的股票市场预测的基本情况,对股票市场进行建模和分析,开发出一套基于马尔可夫链的股票预测优化算法,设计一款新型的股票投资交易系统。针对股票市场进行数据分析与预测,旨在提供依据,使投资者在面对错综复杂的股市时能采取科学的投资策略,以避免盲目和不理性的行为,并且满足用户的智能化操作需要。

1.4.2 研究内容

本课题研究内容主要包括以下两个部分:

1. 新型的股票分析和预测模式



随着计算机及网络技术发展,对股票市场也带来了巨大的冲击。传统的股票分析和预测将发生彻底转变。新的股票分析和预测方式已应运而生,计算机及网络化信息的结合使用,使股票交易不受时间、空间和地域的限制,任何人在不同时间、不同地点通过网络可以自由地购买、抛售和分析股价,这使得股票交易越来越方便、快捷。

(1) 随着数据的增多,股票市场的变化也让人目不暇接,所以不可能以手工的形式快速来做出相对准确的预测。在这种情况下,开发股票投资交易系统来进行网络训练变得尤为重要。现在信息化管理已经走上了比较完善的轨道,借助网络信息平台,开发方便灵活的股票投资交易系统,使广大用户能够在自己认为适合的地点来进行及时地分析和预测股票价格,进而进行相应的操作显得尤为必要。这不仅方便了用户对股票的价格和趋势做出准确分析,也有效地解决了手工分析方式不能对股票价格进行快速反应的矛盾;

(2) 变以分析系统为主为以预测训练为主,将分析和预测结合起来。在过去,股票软件都是以分析系统为主,大多软件公司在编制软件时主要是将数据收集、整理为主,得出一个一般性的排序结果,认为只要有了数据集合,其它的预测就是用户自己的事情了。其实,这种做法是极不科学的。分析的目的是为了预测,广大用户真正关心的是对股票价格的掌握的程度,故前面的分析工作应是为最终的预测做准备,所以我们应该以预测作为我们开发的重点内容。以预测的训练为主,而不是以分析为主。因此,要想将股票分析和预测系统这一应用软件的应用范围扩展到一个更大、更好的领域,就应该提供一个很好的训练环境,这种环境应该具备易实现、便于学习、组织和管理、易于使用等特点,尤其是要做到用户的使用界面友好;

(3) 提倡在线方式进行预测,我们将网络模型取为马尔可夫链模型,并进行一定的优化。我们采用动态的建模方式在线进行预测,通过网络获取股票市场实时数据,在此模型的基础上建立一些基于规则的交易策略,并在交易平台上实施。利用时间序列方法或者马尔可夫决策过程(MDP)理论进行分析,实现一些基本的交易方法。

2. 程序化的自动交易系统

程序化交易(Program Trading)是指根据一定的交易模型和规则生成买卖信号,由计算机自动执行买卖指令的交易过程。简单的说就是用计算机程序来控制买进卖出的时机并自动执行。在这个定义中,突出的是交易模型、计算机程序对交易的重要性。建立于一定交易模型基础上的程序化交易被运用到实际投资中,不但可以加快投资的时间效



率，还能为我们创造出额外收益。自 1975 年产生以来，程序化交易经过三十年的发展已经得到大多数投资者的认同。

我们希望能够完成一套程序化的自动交易系统的构建，从现有的网络服务提供商中获取数据接口，找到合适的数据接口，将数据存储进数据库，建立一个简单的自动交易平台，可以在此基础上实现若干交易规则或者优化策略，让系统能够根据实时市场数据进行自动交易，以便检验交易策略的优劣。设计一套程序化的自动交易系统需要完成程序化交易策略的构建，包括以下几个步骤：

(1) 是选定交易策略以及交易品种，具体的交易品种要考察其流动性、交易量，是否能进行日内交易、多个方向交易等等；

(2) 进行交易模型的设计构建，设定好交易参数、交易条件等，对模型进行统计检验，这时需要精密计算在考虑成本下该模型是否能盈利，包括计算最大盈利/最大亏损、最大连续盈利次数/最大连续亏损次数、最大本金损失比率、盈利次数比率/亏损次数比率、平均盈利金额/平均亏损金额等等；

(3) 要对交易系统进行检测，考察交易通道的可行性，是否足够迅速，成本低廉，再使用该交易系统进行实证分析。并在实践中不断地对参数进行跟踪调整，保证模型的有效性。

1.4.3 拟解决的关键问题

本课题的关键问题和难点主要包括以下两个方面：

1. 基于马尔可夫链的优化算法

在众多的预测方法中，利用马尔可夫链方法建模的研究文献较少，其中李海涛（2002）^[25]，汪森（2005）^[26]等曾应用马尔科夫法对我国证券市场进行过研究，但并未就其中关键的模型参数进行研究，也就不能建立完整的预测模型。

在研究股票价格变动规律时，通常用均值、方差等指标将趋势性变动特征反映出来，反映价格变化的主要趋势，而没有对其中的随机波动作详细分析，经典的马科维茨 (Markowitz) 投资组合模型^[27]正是基于这样的方法。但是，随机变动中同样存在着许多投资机会，如果忽略随机变动的影响，则将大大影响投资组合的收益水平。其次，传统的投资组合优化方法在既定的投资期内，投资方案不变，而在实际操作中，由于市场情况的变化，需要根据实际情况对投资方案进行调整。如何建立股票投资组合的马尔可夫链



模型并为多期投资设计优化算法成为了研究重点和难点。

2. 股票市场实时数据的获得和处理

获取股票市场的实时数据是该股票投资交易系统进行实时程序化交易的基础,因此如何从现有的网络服务提供商中获取数据接口,找到合适的数据接口,将数据存储到数据库中并进行相关的计算和处理是本课题的重点。

考虑到本系统的实用性和适用性,应该选用性能稳定、吞吐量大、便于管理的数据库作为数据平台,故应选择既便于安装调试又非大型的数据库系统。

1.5 论文构成及内容

论文第一章介绍了课题背景、研究意义、国内外研究状况,并在课题研究方法中讲述了本课题的研究目标、研究内容及拟解决的关键问题。

第二章将重点介绍马尔可夫链模型的基本方法,包括马尔可夫过程、马尔可夫链以及马尔可夫决策过程的有关基础知识。

第三章中针对本文研究的问题提出详细的基于马尔可夫链的随机优化算法,包括投资组合模型的建立,马尔可夫链模型的建立,优化性能指标的选取以及基于策略迭代的优化算法的设计。

第四章里详细介绍了股票交易系统的设计,包括需求分析、可行性分析以及含体系结构设计、功能模块设计以及界面设计在内的系统设计。

第五章是股票交易系统的实现与效果展示,并根据历史数据和实时数据进行了实证分析,大大提高了计算效率并增加了投资收益,从而体现出基于马尔可夫链的优化算法的可行性与优越性。

最后是毕业设计的结论、致谢、参考文献以及附录。



2 马尔可夫模型及基本方法

2.1 马尔可夫过程

随机过程的理论研究起源于生产、科研中的实际问题。实践证明在分析实际问题的时候,往往只用初等概率论中研究的一个或有限个随机变量(或随机向量)是不够的,虽然有时我们也讨论了随机变量序列,但基本都是假定序列之间是相互独立的,这使得讨论研究的范围更加缩小化,从而使得所研究的问题更加理想化,研究的重点也集中于分析各变量独立情况下比较完美的理论,然而现实问题却是非常复杂,很难用初等概率论的研究方法来解决。在这种情况下,随机过程理论在上个世纪的初期产生了。特别在 1929 年由 Kolmogorov 奠定了概率论的数学基础之后,随机过程理论得到了更快、更深刻的发展。随着人们对现象的认识越来越深入,它已被广泛的应用于自然、社会科学的许多领域中,并在课题的研究和解决中起着重大的作用^[28]。

在随机过程理论中,马尔可夫过程是一类占有重要地位、具有普遍意义的随机过程,也是随机过程理论中比较完善和成熟的一个理论,随着社会向多样化的发展,它的应用也在多种行业中展现出来,尤其在预报、预测等方面发展显著,其建模的依据是在对实测数据统计所得的先验概率基础上来分析其统计特性的。它广泛地应用于近代物理、生物学、公用事业、地质学、水资源科学、大气科学各个领域。马尔可夫过程充分考虑到了现实中的不确定性,从不确定性中找出一种规律。下面我们简单介绍一下作为本文基础的马尔可夫过程。

定义2.1.1 给定随机过程 $\{X(t), t \in T\}$, 若对于参数中任意 n 个时刻 $t_i, i=1, 2, \dots, n$, $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ 有:

$$\begin{aligned} &P\{X(t_n) < x_n \mid X(t_1) = x_1, X(t_2) = x_2, \dots, X(t_{n-1}) = x_{n-1}\} \\ &= P\{X(t_n) < x_n \mid X(t_{n-1}) = x_{n-1}\} \end{aligned} \quad (2.1)$$

则称随机过程 $\{X(t), t \in T\}$ 为马尔可夫过程, 简称马氏过程^[29]。具有公式(2.1)所示的性质称为具有马尔可夫性 or 无后效性。

由条件分布函数的定义, 公式(2.1)等价于:



$$F(x_n; t_n | x_1, x_2, \dots, x_{n-1}; t_1, t_2, \dots, t_{n-1}) = F(x_n; t_n | x_{n-1}; t_{n-1}) \quad (2.2)$$

如果密度函数存在, 它等价于:

$$f(x_n; t_n | x_1, x_2, \dots, x_{n-1}; t_1, t_2, \dots, t_{n-1}) = f(x_n; t_n | x_{n-1}; t_{n-1}) \quad (2.3)$$

为了定义可以完全描述系统在某个时刻的状态, 需要引入马尔可夫性。随机过程具有马尔可夫性指的是, 当给定 $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_{n-1})$ 时, $X(t_n)$ 的条件分布只依赖于 $X(t_{n-1})$ 的已知值, 而与在 t_{n-1} 以前 $X(t)$ 的取值无关。即如果给定当前状态, 该过程的未来行为与它过去的历史无关; 换句话说, 如果已知一个过程的当前状态, 可以预测该过程的未来行为, 就如我们知道它的整个历史(当前状态加上过去历史)一样; 该过程过去的历史并不能提供有助于预测的任何额外的信息。

定义2.1.2 给定马尔可夫过程 $\{X(t), t \in T\}$, 条件概率:

$$p(s, t; x, y) = P\{X(t) < y | X(s) = x\} \quad (2.4)$$

称为马尔可夫过程的转移概率。马尔可夫过程 $\{X(t), t \in T\}$ 中 $X(t)$ 的取值 x 称为状态, $X(t) = x$ 表示过程在时刻 t 处于状态 x , 过程所有取值的全体:

$$S = \{x: X(t) = x, t \in T\} \quad (2.5)$$

称为状态空间。

马尔可夫过程的分类与一般随机过程的分类法一样, 可按参数集 T 和状态空间 E 的离散或连续分类如表 2.1 所示, 本文中主要研究离散参数马尔可夫链。

表 2.1 马尔可夫过程的分类

状态空间 S \ 参数集 T	离散	连续
	离散	连续
离散	离散参数马尔可夫链	连续参数马尔可夫链
连续	离散参数马尔可夫过程	连续参数马尔可夫过程

2.2 马尔可夫链

将随机过程应用于股票市场的思想由来已久, 马尔可夫链仅是它的一个应用, 它对股市的预测能够起到一定的指导作用。随着中国股票市场的发展以及计算机和网络技术的进步, 更多股票市场数据能够及时被获得。进而合理分析我国股市的波动特性以及准确预测股市, 对于我国政府对证券市场加强宏观调控和管理, 引导股民进行正确的投资,



使股价指数真正成为经济发展的晴雨表,保障我国证券市场的健康持续发展都具有重要的意义。对于投资者而言利用马尔可夫链方法对股票进行预测和投资,避免了投资的盲目性和非理性。

马尔可夫链属随机过程的一个分支,是研究事物的状态转移概率的一种数学方法。它是在已知序列先验性概率的基础上对总体的未来走势做出预测。这种预测技术不需要连续不断的历史资料和数据,只需当前和最近的状态数据。本文将应用马尔可夫链预测模型对股票历史和实时数据进行分析和处理。

2.2.1 马尔可夫链的定义

状态空间 S 和参数集 T 都是离散的马尔可夫过程称为离散参数马氏链,本文中主要研究离散参数马尔可夫链。

定义2.2.1 设 $\{X(n), n=0,1,2,\dots\}$ 为随机序列, 状态空间为 $S=\{0,1,2,\dots\}$ 。如果对任意非负整数 k 及 $n_1 < n_2 < \dots < n_l < m$ 以及 $i_{n_1}, i_{n_2}, \dots, i_{n_l}, i_m, i_{m+k} \in S$, 马尔可夫性:

$$\begin{aligned} P\{X(m+k)=i_{m+k} | X(n_1)=i_{n_1}, \dots, X(n_l)=i_{n_l}, X(n_m)=i_m\} \\ = P\{X(m+k)=i_{m+k} | X(n_m)=i_m\} \end{aligned} \quad (2.6)$$

成立, 则称 $\{X(n), n=0,1,2,\dots\}$ 为离散参数马尔可夫链, 简称马尔可夫链或马氏链。

定义2.2.2 设 $\{X(n), n=0,1,2,\dots\}$ 为马尔可夫链, 状态空间为 $S=\{0,1,2,\dots\}$ 。则称条件概率:

$$p_{ij}(m,k) = P\{X(m+k)=j | X(m)=i\} \quad (2.7)$$

为马尔可夫链 $\{X(n), n=0,1,2,\dots\}$ 在 m 时刻的 k 步转移概率。

k 步转移概率的直观意义是: 质点在时刻 m 时处于状态 i , 再经过 k 步 (即 k 个单位时间) 后处于状态 j 的条件概率。特别地, $k=1$ 时有:

$$p_{ij}(m,1) = P\{X(m+1)=j | X(m)=i\} \quad (2.8)$$

称为一步转移概率, 简称转移概率。

定义2.2.3 称矩阵:

$$P(m,k) = (p_{ij}(m,k)) (i, j \in S) = \begin{pmatrix} p_{00}(m,k) & p_{01}(m,k) & \cdots & p_{0n}(m,k) & \cdots \\ p_{10}(m,k) & p_{11}(m,k) & \cdots & p_{1n}(m,k) & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n0}(m,k) & p_{n1}(m,k) & \cdots & p_{nn}(m,k) & \cdots \end{pmatrix} \quad (2.9)$$



为马尔可夫链 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots\}$ 在时刻 m 的 k 步转移矩阵。一步转移矩阵 $P(m, 1)$ 简称转移矩阵。

由转移概率的定义，显然有：

$$p_{ij}(m, k) \geq 0; \sum_{i, j \in S} p_{ij}(m, k) = 1 \quad (2.10)$$

定义2.2.4 若马尔可夫链 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots\}$ 的状态转移概率 $p_{ij}(m, k)$ 与 m 无关，即：

$$\begin{aligned} p_{ij}(m, k) &= P\{X(m+k) = j | X(m) = i\} = p_{ij}(k) \\ p_{ij}(m, 1) &= P\{X(m+1) = j | X(m) = i\} = p_{ij}(1) \end{aligned} \quad (2.11)$$

成立，则称 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots\}$ 为齐次马尔可夫链，简称齐次马氏链。

齐次马尔可夫链的 k 步转移矩阵，记为：

$$P(m, k) = P(k) = (p_{ij}(k)), i, j \in S \quad (2.12)$$

一步转移矩阵，简称转移矩阵，记为：

$$P(m, 1) = P(1) = (p_{ij}(1)), i, j \in S \quad (2.13)$$

齐次马尔可夫链的转移概率具有如下性质：

$$0 \leq p_{ij}(k) \leq 1, \sum_{i, j \in S} p_{ij}(k) = 1 \quad (2.14)$$

按照股票交易市场的运行机制，可以将交易时间进行离散化，即 $t = 1, 2, 3, \dots$ ，在不同的交易时间点，股票所处的状态可以用随机变量来表示，并且每一种不同的状态都有着相应的概率，该概率称为状态概率。当证券从一种状态转移到另一种状态时，在这个转移过程中，存在着状态转移的概率，称为状态转移概率。如果状态转移概率只与目前相邻的状态变化有关，那么这种离散状态按照离散时间的随机转移系统过程，称为马尔可夫过程，其数学模型可以由公式(2.1)表示，且该随机过程为齐次马尔可夫链。在该数学模型中，表示 n 时刻的 $P\{X(t_n) < x_n\}$ 只与 $n-1$ 时刻的状态有关，而与其它时刻的状态无关。

2.2.2 马尔可夫链的性质

性质2.2.1 齐次马尔可夫链 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots\}$ 的状态转移概率 $p_{ij}(k)$ 满足切普曼-



柯尔莫哥洛夫方程(Chapman-Kolmogorov 方程, 即 C-K 方程):

$$p_{ij}(k+l) = \sum_{r \in S} p_{ir}(k)p_{rj}(l) \quad (2.15)$$

采用矩阵记号可记为:

$$P(k+l) = P(k)P(l) \quad (2.16)$$

C-K 方程提供了高步转移概率分解为低步转移概率的表达式。

性质2.2.2 齐次马尔可夫链 $\{X(n), n=0,1,2,\dots\}$ 的 n 步转移概率矩阵等于一步转移矩阵的 n 次方, 即:

$$P(n) = P^{(n)} \quad (2.17)$$

由此得知, 齐次马尔可夫链的 n 步转移概率可由一步转移概率确定。

定义2.2.5 给定齐次马尔可夫链 $\{X(n), n=0,1,2,\dots\}$, 称其在初始时刻的概率分布:

$$p_i = P\{X(0) = i\}, i \in S \quad (2.18)$$

即 $X(0)$ 的概率分布为齐次马尔可夫链的初始分布, 其中 $0 \leq p_i(k) \leq 1, i \in S, \sum_{i,j \in S} p_i(k) = 1$

。

定义2.2.6 给定齐次马尔可夫链 $\{X(n), n=0,1,2,\dots\}$, 称其在 n 时刻的概率分布:

$$p_i(n) = P\{X(n) = i\}, i \in S \quad (2.19)$$

即 $X(n)$ 的概率分布为齐次马尔可夫链的绝对分布, 其中 $0 \leq p_i(k) \leq 1, i \in S, \sum_{i,j \in S} p_i(k) = 1$

。

性质2.2.3 绝对分布由初始分布和转移概率确定, 且满足:

$$p_j(n) = \sum_i p_i p_{ij}(n) \quad (2.20)$$

性质2.2.4 齐次马尔可夫链的任何有限维分布可由初始分布与转移概率完全地确定了, 且满足:

$$\begin{aligned} & P\{X(n_1) = i_1, X(n_2) = i_2, \dots, X(n_k) = i_k\} \\ &= \sum_{i \in S} p_i p_{i i_1}(n_1) p_{i_1 i_2}(n_2 - n_1) \dots p_{i_{k-1} i_k}(n_k - n_{k-1}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

其中 $P\{X(n_1) = i_1, X(n_2) = i_2, \dots, X(n_k) = i_k\}$ 为齐次马尔可夫链的 k 维概率分布。

对于齐次马尔可夫链, 转移概率的研究是一个很重要的内容, 要进一步研究转移概率, 必须研究状态本身的特性, 其随着状态的不同而有异。但我们看到在随机游动的例



子中, 状态有吸收态、反射态、弹性态和自由态的区别。另外, 即使在状态有限的情况下, n 步转移概率 $p_{ij}(n)$ 当 $n \rightarrow \infty$ 时的极限仍然是重要的问题。一般来说, 此极限如果存在, 则应与 i, j 有关, 大量的实际问题是, 当 n 充分大时, 系统(或质点)位于 j 的概率几乎不依赖于开始所处的位置。具有这种性质的马尔可夫链称为具有遍历性。

定义2.2.7 给定齐次马尔可夫链 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots\}$, 如果对于一切状态 $i, j \in S$, 存在与 i 无关的极限:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p_{ij}(n) = \pi_j > 0, i, j \in S \quad (2.22)$$

则称此马尔可夫链具有遍历性。

若 $\pi_j > 0, j \in S$ 且 $\sum_{j \in S} \pi(j) = 1$, 则称 $\{\pi_j, j \in S\}$ 为齐次马尔可夫链 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots\}$ 的极限分布, 或最终分布, 记为:

$$\Pi = \{\pi_j, j \in S\} \quad (2.23)$$

定义2.2.8 给定齐次马尔可夫链 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots\}$, 若存在 $\{v_j, j \in S\}$ 能够满足下列条件:

$$(1) \quad v_j \geq 0, j \in S \quad (2.24)$$

$$(2) \quad \sum_{j \in S} v(j) = 1 \quad (2.25)$$

$$(3) \quad v_j = \sum_{i \in S} v_i p_{ij} \quad (2.26)$$

则称此马尔可夫链是平稳的或具有平稳性, 称 $\{v_j, j \in S\}$ 为此马尔可夫链的平稳分布。其中平稳性的含义是指: 过程在任何时刻处于状态 j 的概率都相等。

性质2.2.5 遍历的齐次马尔可夫链的极限分布是平稳分布。

2.2.3 马尔可夫链的应用

马尔可夫链理论在经济领域中的应用非常广泛, 我们可以利用马尔可夫链理论对股市行情进行预测。事实上, 为了将马尔可夫链理论应用于股票交易市场, 可对股价综合指数的涨(跌)幅, 进行状态分类, 建立起对市场运行周期、稳态概率、稳定程度、投资利润、收益率等的分析预测模型。此前已经在绪论中进行了介绍, 这里就不再赘述。

马尔可夫链理论在计算机网络技术、软件设计等方面也展开了广泛的应用。1999 年李文波等将随机 Petri 网与马尔可夫链预测理论有机地结合起来^[30], 2001 年李虎等创



造性地将马尔可夫链理论结合工业供应链的结构优化软件设计,提出了系统的集成框架结构及其软件设计技术^[31]。

马尔可夫链理论在医学领域的应用也取得了很大的进展。2001 年巴剑波等通过应用设定参数的马尔可夫链模型,检验了该模型在海军疟疾疫情预测中应用的可行性并利用此模型预测此后五年内的疫情^[32]。马尔可夫链理论还在炭疽病、黑热病发病趋势预测上都得到了有效的应用。

此外,在自然灾害、作物病虫害预测、应用土地利用、水环境污染状态预测和风险评价以及水文水资源科学应用等方面,国内各行业的科技工作者都在运用马尔可夫链理论结合自己的实际情况写出了许多有实用价值的论文。

2.3 马尔可夫决策过程

马尔可夫决策过程简称为马氏决策过程(Markov Decision Processes, 简记为 MDP, 也被称作马尔可夫决策规划、马尔可夫控制系统、受控的马尔可夫过程、序贯随机最优化、随机最优控制或者随机动态规划)。其主要内容是研究一类可控随机动态系统序贯决策优化问题。马尔可夫决策过程不仅包含了概率统计方面的内容,而且也是随机运筹学的一个分支,同时作为最优控制的理论,它也属于随机系统最优控制的范畴。

马尔可夫决策过程研究的是马尔可夫型随机序贯决策问题。所谓的随机序贯决策问题指的是在一系列相继的或者连续的时刻(称为决策时刻)点上做出的决策,决策者根据观察到的系统的状态从可以用的若干个决策中选择一个决策,而这个决策给决策者带来一项相应的报酬(或者费用等)并且会影响系统在下一时刻点所处的状态。系统在下一决策时刻点的状态是随机的。在这个新的决策点上,决策者要观察系统所处的新的状态并且选择新的决策,然后按照这个步骤一步一步的进行下去。决策者进行决策的目的是使系统的运行在某种意义(称为准则)下达到最优。将马尔可夫过程和随机序贯决策相结合就得到了马尔可夫型随机序贯决策问题^[33]。

马尔可夫决策过程是二十世纪五六十年代发展起来的一门新兴学科,由 20 世纪 50 年代 Bellman 和 Shapley 的工作开启了马尔可夫决策过程研究的先河^[34],20 世纪 60 年代 Howard 和 Blackwell 等人的工作为马尔可夫决策过程奠定了理论基础,并确立了马尔可夫决策过程作为一个独立学科的地位^[35]。此后,国内外展开了对 MDP 的学习和研究并取得了丰硕的成果。



根据研究对象的时间参数的不同, 马尔可夫决策过程可以分为三个最基本的模型: 离散时间马氏决策模型、连续时间马氏决策模型和半马氏决策模型。在此基础上联系实际问题的模型有部分状态可观的、多目标的、自适应的和带约束条件的等一系列模型。在此, 我们仅简单介绍离散时间马尔可夫决策过程的数学模型。

2.3.1 马尔可夫决策过程的概念

假设在时刻点 $n=0,1,2,\dots$ 处观察系统 $\{X_n\}$, 那么马尔可夫决策过程中最为基本的离散时间马尔可夫决策模型由五个基本元素组成, 它们是:

$$\{S, A(i), p_{ij}(a), f(i, a), d, V, i, j \in S, a \in A(i)\} \quad (2.27)$$

(1) S 为一非空集合, 是 $\{X_n\}$ 所有可能状态组成的状态集合, 也被称作系统的状态空间。它可以是有限集、可列集或者任意的非空集。我们用小写字母 i, j, k 等来表示状态。系统的行为被建模成状态空间为 $S = \{1, 2, \dots, S\}$ 的马尔可夫链 $X = \{X_0, X_1, \dots\}$ 。

(2) 对系统的任意状态 $i \in S$, 选取一个行动 $a \in A(i)$ 并作用于系统, $A(i)$ 表示当系统处于 i 时可用的行动集, 系统的行动集为 $A = \bigcup_{i \in S} A(i)$, 它由所有 (有限的) 行动构成。

(3) 行动决定状态转移概率, 当系统在时刻点 n 处于状态 i 时, 如果采取行动 a 时, 那么系统在 $n+1$ 时刻处于状态 j 的概率为 $p_{ij}(a)$, 满足 $p_{ij}(a) \geq 0$ 且 $\sum p_{ij}(a) = 1$, $i, j \in S, a \in A(i)$ 。 $P = \{p_{ij}(a), i, j \in S\}$ 称作系统的状态转移概率族, 它与系统在时刻点 n 以前的历史无关 (即具有马尔可夫性), 而且与时刻点 n 无关 (即具有时齐性)。

(4) 当系统处于状态 i 并且采用策略 a 时, 系统在该阶段获得的 (即时) 报酬为 $f(i, a)$, 将 f 称作报酬 (或性能) 函数。

(5) V 表示准则函数, 准则函数决定一个策略的最优性。

从以上的定义可以看出, MDP 的历史由相继的状态和决策组成, 其形式为:

$$h_n = (i_0, a_0, i_1, a_1, \dots, i_{n-1}, a_{n-1}, i_n), n \geq 0 \quad (2.28)$$

其中 $i_t \in S$ 和 $a_t \in A(i_t)$ 分别表示在决策时刻点 t 观察到的系统所处的状态和采取的行动, $t=0,1,2,\dots,n-1$, $i_n \in S$ 表示系统当前所处的状态。称 h_n 为系统到 n (即第 n 个决策时刻点) 时的一个历史, 其全体记为 H_n 。

定义2.3.1 设 d 是从 S 到 A 的函数 (或映射), 即 $d: S \rightarrow A$, 记为 $d: a = d(i)$ 。如果对于每一个状态 $i \in S$, 有对应的可选决策 $d(i) \in A(i)$, 则称 d 为确定性决策规划, 或称



为决策函数。决策函数的集合记为 $D = \{d : S \rightarrow A\}$ 。

d 决定了在状态 i 时采取的行动，因此如果采用了策略 d ，则状态转移概率矩阵为 $P(d) = \{p_{ij}(d(i)), i, j \in S\}$ ，报酬函数为 $f(i, d(i))$ 。

定义2.3.2 称 $\phi = (d_0, d_1, \dots, d_n, \dots)$ 为确定性马氏策略，其中 $d_n \in D$ 表示时刻 n 选用的决策函数，即在时刻 n 所选用的策略。

定义2.3.3 若 $\phi = (d_0, d_1, \dots, d_n, \dots)$ ，如果 $d_n = d, n = 0, 1, 2, \dots$ ，即与时刻 n 无关，则称 $\phi = (d_0, d_1, \dots, d_n, \dots)$ 为确定性平稳策略。

定义2.3.4 称 $\phi = (\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_n, \dots)$ 为随机策略，其中 $\phi_n = \phi_n(\bullet | h_n)$ 是在给定历史 h_n 时定义在 $A(i_n)$ 上的概率分布，即：

$$\phi_n(A(i_n) | h_n) = 1 \quad (2.29)$$

$\phi_n(A(i_n) | h_n)$ 表示时刻 n 在历史 h_n 下采取行动 a 的概率。策略全体记为 Φ ，称为 MDP 的策略空间。

对于 $\phi = (\phi_n, n \geq 0) \in \Phi$ 如果 $\phi_n(\bullet | h_n)$ 为退化分布，即从 H_n 到 $A(i_n)$ 的函数满足：

$$\phi_n(d_n(h_n) | h_n) = 1, (h_n \in H_n, n \geq 0) \quad (2.30)$$

则称 $\phi = (d_0, d_1, \dots, d_n, \dots)$ 为确定性策略。

定义2.3.5 如果 $\phi_n(\bullet | h_n) = \phi_n(\bullet | i_n), (h_n \in H_n, n \geq 0)$ ，表明与历史完全没有关系，则称 π 为随机平稳策略。

定义2.3.6 如果 $\phi_n(\bullet | h_n) = \phi_n(\bullet | i_n), (h_n \in H_n, n \geq 0)$ ，表明与历史完全没有关系，则称 π 为随机马氏策略。

定义2.3.7 如果 $\phi_n(\bullet | h_n) = \phi_0(\bullet | i_n), (h_n \in H_n, n \geq 0)$ ，表明与时刻 n 没有关系，则称 π 为随机平稳策略。

根据准则函数的类型进行划分，马尔可夫决策过程主要包括以下几个最基本的类型：有限阶段马氏决策模型、折扣准则马氏决策模型、折扣矩最优准则马氏决策模型、期望总报酬马氏决策模型、概率准则马氏决策模型、样本路径准则马氏决策模型和平均准则马氏决策模型。

本课题主要研究的是平均准则马氏决策模型，即若假设对系统行为建模的马尔可夫链在所有策略都是遍历的，则 V 可用长期平均报酬 η 替代：



$$V = \eta^d = \lim_{L \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} f(X_l, d(X_l)) \right\} = \pi^d f^d \quad (2.31)$$

公式(2.31) 其中 π 表示稳态概率向量, η 以概率 1 存在, 并且对遍历链而言, 它与初始状态无关。马尔可夫决策过程的目标是找到在所有策略中性能最优的策略 d^* 。

2.3.2 马尔可夫决策过程的应用

经过半个多世纪的研究, 马尔可夫决策过程已经发展成为一门比较丰富的学科, 尤其是在理论研究方面, 已经形成了一个比较完善的体系。对于上述几个最基本模型: 离散时间马氏决策模型、连续时间马氏决策模型和半马氏决策模型, 包括状态空间有限和无限、行动集有限和无限、收益函数有界和无界等等各种不同的组合情况。它们的最优策略的存在性、唯一性、平稳性都已经充分得到了理论上的解决, 相应的还有一大批的求解最优策略的方法, 比如策略迭代法, 逐次逼近法, 线性规划法和状态逼近法等等, 对这些基本算法的改进工作也一直在进行, 新的算法也不断的涌现^[36]。在对原有基本模型持续深入研究的同时, 也不断的有新的模型建立, 模型中的参数等条件变得更加复杂。

随着理论的日趋完善, 马尔可夫决策过程也被逐渐应用到其它许多不同的领域。马尔可夫决策过程研究的对象是可控随机动态系统, 在很多领域都存在这样的系统而且需要对它们进行序贯决策优化处理, 所以在这些领域里马尔可夫决策过程同益显现出它的重要作用。马尔可夫决策过程在存储销售, 设备最优更换维修, 排队系统, 可靠性工程, 水库调度及管理, 通讯网络等领域已经有了许多成功的应用。如马尔可夫决策过程在通讯网络中的应用^[37]; 在存货控制中的应用^[38]; 在水库调度和管理中的应用^[39]。另外在文献[40][41]中还给出了许多马尔可夫决策过程的应用例子。而近十多年来, 马尔可夫决策过程又在许多高科技以及金融投资风险等新领域显示了它的作用^{[42][43][44]}。



3 基于马尔可夫链的随机优化算法

3.1 投资组合问题的数学模型

3.1.1 股票投资组合问题

投资组合问题,顾名思义,即如何将有限的资金合理分配给市场中的风险资产,从而使收益(Return)最大,风险(Risk)最小^[45]。股票在许多投资性投资组合的价值中都占据了很大一部分。对无数投资者而言,首先要决定把投资组合中的多少来配置给股票,其次重要的是在各种投资方式中选择一种来进行股票投资。如今,股票市场是财富的一个重要来源。如在 2004 年 9 月 30 日,摩根士丹利资本国际所有国家世界指数(MSCI ACWI)中股票的总市值就超过了 19 万亿美元,其中几乎一半的股票代表的是美国外的市场,足以见得包含股票在内的证券市场的繁荣。

大量的股票资产是被个人和机构投资组合所持有的。那么如何对股票进行投资组合,以降低投资风险,增加投资收益就成为了投资者所关注的问题。在投资组合理论尚未发展起来的时候,大多数投资者总是分别观察自己所持有的每只股票和债券,既没有考虑它们与其他资产的内在相关性,也不考虑他们在这紧密相连的整体中各自具有的不容忽视的重要性。而 20 世纪 50 年代马科维茨(Markowitz)首次以书面的形式揭开了证券投资组合的完整含义和重要性,并强调了一个重要的观点:证券投资组合是保证在风险与收益之间取舍时利益最大化的主要工具^[46]。

3.1.2 传统投资组合方法的缺陷与解决方案

传统的优化模型和方法主要存在以下不足之处:首先,在研究股票价格的变动规律时,通常用均值、方差等指标将股票价格的趋势性变动特征反映出来,反映价格变化的主要趋势,而没有对其中的随机波动作详细分析,经典的马科维茨(Markowitz)投资组合模型正是基于这样的方法。但是,随机变动中同样存在着许多投资机会,如果忽略随机变动的影响,则将大大影响投资组合的收益水平。其次,传统的投资组合优化方法在既定的投资期内,投资方案不变,而在实际操作中,由于市场情况的变化,需要根据实际情况对投资方案进行调整。如何建立股票投资组合的随机模型并为多期投资设计优



化算法成为了研究重点和难点。

针对上述情况,本章结合马尔可夫链^[47]、马尔可夫决策过程以及滚动优化的思想,提出了基于状态反馈的股票投资组合的马尔可夫链模型和基于马尔可夫链的随机优化算法。该模型和算法有如下两个创新点:第一,通过马尔可夫随机过程进行建模,将随机因素纳入考虑范围,为投资者提供了更多的投资机会,从而增加投资组合的收益;第二,基于状态反馈的随机优化算法会根据当前投资组合所处的状况来决定下一时刻的投资方案,如是实现滚动优化(即多期投资),在降低投资风险的同时,增加了投资组合的收益水平。本文还将在下一章中,以上证 A 股三家上市公司的历史数据和实时数据为样本,进行实证分析,通过比较研究从而较好地说明新的股票投资组合随机模型和基于马尔可夫链的随机优化方法的可行性及优越性。

3.1.3 数学模型的建立

首先,我们有如下假设:

(1) 股市的运行只受全球或地区的经济、政治、社会等各种随机因素的影响,证券管理部门的宏观政策是平稳的,投资者操纵的影响可忽略不计;

(2) 股票价格在某一日的涨跌以及收益率的大小只跟前一日的收盘价密切相关,而与过去的涨落关系不大,因此过去的行情可忽略不计;

(3) 股票价格从一种状态 i 经过相同的时间间隔跳到另一种状态 j 的概率,与状态 i 所处的时刻完全无关;

(4) 时间的变化是离散的,以天或周为单位。

由假设(2)可得, $\forall i_0, i_1, \dots, i_m, i_{m+1} \in S$, 有

$$\begin{aligned} P\{X(m+1)=i_{m+1} | X(0)=i_0, \dots, X(1)=i_1, X(m)=i_m\} \\ = P\{X(m+1)=i_{m+1} | X(m)=i_m\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

成立,即该随机过程 $\{X(n), n=0,1,2,\dots\}$ 为离散参数马尔可夫链,且具有马氏性。

由假设(3)可得,该马尔可夫链 $\{X(n), n=0,1,2,\dots\}$ 的状态转移概率 $p_{ij}(m,k)$ 与所在时刻 m 无关,即:

$$\begin{aligned} p_{ij}(m,k) &= P\{X(m+k)=j | X(m)=i\} = p_{ij}(k) \\ p_{ij}(m,1) &= P\{X(m+1)=j | X(m)=i\} = p_{ij}(1) \end{aligned} \quad (3.2)$$

成立,即该马尔可夫链 $\{X(n), n=0,1,2,\dots\}$ 具有齐次性,是时齐马尔可夫链。

在满足以上假设的条件下，我们可以将股票的价格当作时齐马尔可夫链进行处理，并将股票的价格波动行为用维纳过程（马尔可夫随机过程的一种特殊形式，即布朗运动）来描述，维纳过程与金融理论的弱市场有效性不谋而合（即一种股票的现在价格已包含所有信息），而我国的股票市场正是一个弱有效型市场^[48]，此前在绪论中的国内外研究状况部分已经有所介绍。

在风险投资（如股票市场）中，使用 $S_t^i, i=1,2,\dots,m$ 表示 t 时刻第 i 个风险投资产品的价格，其服从如下所示随机微分方程^[49]：

$$dS_t^i = u_t^i S_t^i dt + S_t^i \sum_{j=1}^m \sigma_t^{ij} dW_t^j, j=1,2,\dots,m \quad (3.3)$$

其中 m 表示风险资产的个数， $u_t^i > r_t > 0, \sigma_t^{ij} \in R, u_t^i$ 为第 i 个风险资产在时间 t 的预期收益率， σ_t^{ij} 为第 i 个风险资产预期收益率在时间 t 受到第 j 个风险因素 $W_t^j, (j=1,2,\dots,m)$ 影响的方差， W_t^j 表示互相独立的维纳过程。

假设投资者在时刻 t 可供投资的资金总量为 Z_t ，可供选择的投资品种共有 m 种风险资产，并且用于风险资产的投资比例分别为 $u_t^i \in [0,1], i=1,2,\dots,m$ ，且满足 $u_t^1 + u_t^2 + \dots + u_t^m = 1$ ，称 $U_t = (u_t^1, u_t^2, \dots, u_t^m)$ 为 t 时刻的投资组合方案。同时定义投资组合方案集 $A = \left\{ (u_t^1, u_t^2, \dots, u_t^m) \mid u_t^i \in [0,1], \sum_{i=1}^m u_t^i = 1 \right\}$ ，则有：

$$\frac{dZ_t}{Z_t} = \sum_{i=1}^m u_t^i \frac{dS_t^i}{S_t^i} \quad (3.4)$$

离散化处理后得

$$\frac{Z_{t+1} - Z_t}{Z_t} = \sum_{i=1}^m u_t^i \frac{S_{t+1}^i - S_t^i}{S_t^i} \quad (3.5)$$

令 $M_t^Z = \frac{Z_{t+1} - Z_t}{Z_t}$ ， $M_t^{S_i} = \frac{S_{t+1}^i - S_t^i}{S_t^i}$ 分别表示投资组合和风险资产在 $t+1$ 时刻的收益率，则

投资组合收益率可以表示为：

$$M_t^Z = \sum_{i=1}^m u_{t-1}^i M_t^{S_i}, M_0^Z = 0, t=1,2,\dots \quad (3.6)$$

即 t 时刻投资组合的收益率等于 $t-1$ 时刻决定的投资方案与 t 时刻相对应的股票收益率乘积的和。



3.2 马尔可夫链模型的建立

马尔可夫链是一种离散型的随机时间序列，其特点是无后效性，即若已知系统现在的状态，则系统未来状态的规律就可确定，而不管过去的状态如何。如果某种事物或某种现象的各种状态的时间序列为马尔可夫链，则可按转移概率，根据 n 时刻的状态预测 $n+1$ 时刻的状态。这就是应用马尔可夫链的方法解决各种预测问题的基本思想。基于这种思想，先建立股价运动的随机过程模型，然后在合理的假设下（如 3.1.3 小节中所述），把股价的运动当作时齐马尔可夫链进行处理^[50]。

3.2.1 时间和状态的离散化

假设投资组合的收益率 M_t^Z 落在区间 $(a, b]$ 内，即 $M_t \in (a, b], t = 1, 2, \dots$ ，将此区间 n 等分，且记每个子区间对应于一个状态 $i \in S, S = \{1, 2, \dots, n\}$ ，则 t 时刻 M_t^Z 所处的状态定义为 $X_t = i, i \in S, \forall M_t^Z \in \left[a + \frac{b-a}{n}(i-1), a + \frac{b-a}{n}(i) \right]$ 。从而，在任一时刻 $t = 1, 2, \dots$ 的收益率 M_t^Z 都可以用对应的 t 时刻的状态 X_t 来表示，状态空间（即所有状态的集合）记为 S 。

在实际操作中，投资者一般会根据 t 时刻投资组合的状态 X_t 来决定下一时刻的投资方案 U_{t+1} ，由于该建模马尔可夫链的时齐性，投资方案 U_{t+1} 与时间无关，只与 t 时刻的状态 X_t 有关，所以可以用 $U(X_t)$ 来代替 U_{t+1} ，进而任一时刻的投资方案 $U(X_t)$ 只与 t 时刻的状态 X_t 有关，而与时间无关。由此我们将优化问题转化为寻找不同状态所对应的投资方案，称该集合为一个投资策略，定义 $d = \{U(X_t) = (u^1(X_t), \dots, u^m(X_t)) | U(X_t), X_t \in S\}$ ，使得在尽可能不增加风险的情况下将投资收益最大化。

通过以上时间和状态的离散化，投资组合收益率的变化过程可看作是一个时齐马尔可夫链，下面具体介绍如何计算马尔可夫链模型中的 t 时刻的状态 X_t ，以及如何确定状态转移矩阵 P 。

3.2.2 样本路径和状态转移矩阵的计算

对于状态转移矩阵 P ，考虑到历史数据比较真实的反映了股票在受到外部干扰时的变化，本文采用历史数据来计算状态转移概率。根据历史数据 S_t^i 和 $M_t^{S_t}$ 的定义式可以得到在过去 T 个有限时刻各种风险资产投资的收益率 $M_t^{S_t}$ 。然后，在事先给定的投资组合策略 d 下，可公式(3.6)计算各时刻的投资组合收益率 M_t^Z ，并得到相应的状态 X_t ，这些

状态刻画了系统的样本路径，记为 $Path(T) = \{X_0, X_1, \dots, X_T\}$ 。

系统经过 k 个时间单位从 X_t 到 X_{t+k} 的过程，称之为系统发生了一次 k 步状态转移，若 $k=1$ ，则称之为一步状态转移（本文主要讨论的是一步状态转移）。对于有限时长为 T 的样本路径，系统总共发生了 $T-1$ 次一步状态转移。对这些一步状态转移进行统计，可得到一步状态转移次数矩阵 $C = \{c_{ij}, i, j \in S\}$ ，其中 c_{ij} 表示由状态 i 转移到状态 j 的次数。

然后，通过公式(3.7)可计算得到一步状态转移概率矩阵 $P = \{p_{ij}, i, j \in S\}$ ，其中 p_{ij} 表示由状态 i 转移到状态 j 的概率。

$$p_{ij} = c_{ij} / \sum_{j=1}^n c_{ij} \quad (3.7)$$

在建立投资组合优化问题马尔可夫链模型后，需要了解一些有关马尔可夫链的性质。对于有 n 种状态的不可约有限马尔可夫链，令 $\pi = (\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_n)$ 为转移概率矩阵为 P 的马尔可夫链的平稳概率（行）向量，则 π 满足下面的概率平衡方程：

$$\pi P = \pi \text{ 且 } \pi e = 1, \text{ 其中 } e = (1, 1, \dots, 1) \quad (3.8)$$

稳态平稳（行）向量 π 对于投资组合问题而言的意义在于，不论投资组合初始时刻处于何种状态，只要经过足够长的时间，投资组合处于各个状态的概率分布是个定值，因此我们可以利用平稳性计算该时齐马尔可夫链的最终分布。

3.3 优化性能指标

将原问题转化为马尔可夫链模型后，在有限时长 T ，对于不同的投资策略 d ，会有不同的样本路径，而对路径上每一时刻 t 的状态 X_t ，存在一个报酬函数^[51]。记为：

$$f(X_t, U(X_t)), X_t \in S, U(X_t) \in A \quad (3.9)$$

定义在当前时刻状态为 X_t 的情况下，下一时刻投资组合收益率的期望值为：

$$f(X_t, U(X_t)) = \sum_{j=1}^n \left\{ P_{X_t, j} \times \left[a + \frac{b-a}{n} \times \left(X_t - \frac{1}{2} \right) \right] \right\} \quad (3.10)$$

则系统的长期平均报酬可定义为：

$$\eta = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} f(X_t, U(X_t)) \quad (3.11)$$

对于长度无限的样本路径问题，系统的长期平均报酬可定义为：

$$\eta = E(\eta_T) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} f(X_t, U(X_t)) = \sum_{i \in S} \pi(i) f(i, U(i)) = \pi f \quad (3.12)$$

假设投资者期望投资组合的长期平均收益率最大化, 则优化问题可定义为寻找一个最优的投资策略 d (即在不同状态下应采用何种投资方案), 使得:

$$d = \arg(\max_d \eta) \quad (3.13)$$

因此, 问题的关键即转化为通过算法找到一个最优的投资策略, 使投资的长期平均收益率达到最大值。而在马尔可夫决策过程中, 由于策略空间太大 (用 $|A(i)|$ 表示 $A(i)$ 上的行动数, 共有 $\prod_{i \in S} |A(i)|$ 个策略), 通过求解所有策略的稳态概率来比较其性能并不可行, 也就是说穷举搜索的方法只对非常小的问题才可行。因此需要设计高效的算法, 而策略迭代就是这样的一种算法。

3.4 策略迭代算法

3.4.1 基本原理

策略迭代算法的基本原理是在某些假设下, 通过分析系统在一个策略下的行为, 我们总能找到另外一个使系统表现的更好的策略^[52]。如果这样的策略存在, 在找到一个更好的策略之后, 可以分析这个策略, 再去寻找另一个更好的策略, 重复这个不断更新的过程, 直到获得最优策略 d^* , 如图 3.1 所示。

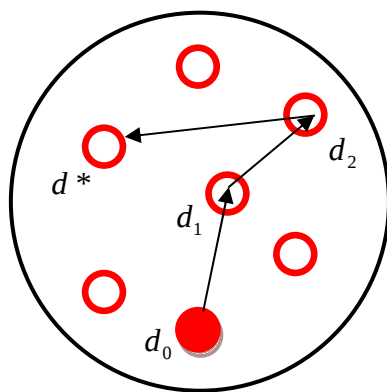


图 3.1 策略迭代原理示意图

3.4.2 性能势

对策略数目有限的优化问题, 总存在最优策略且不一定唯一。为了提高搜索的效率, 需要引入马尔可夫系统优化中性能势的概念, 记为 g , 不同的策略 d 下状态 i 的性能势 $g(i)$ 会有不同, 它与函数中的梯度概念相类似, 直观解释就是测量了状态 i 对长期平均报酬 η 的贡献, 定义为:

$$g(i) = E \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} [f(X_t - \eta) | X_0 = i] \right\} \quad (3.14)$$

即系统的性能势可由样本路径估计或计算出来。用矩阵形式表示：

$$(I - P)g + \eta e = f \quad (3.15)$$

上式被称为泊松方程，它的解不唯一，不同解之间仅相差一个常数。即如果 g 是公式(3.15)的解，则对任意一个常数 c ， $g + ce$ 也是它的解。下式为公式(3.15)的每一个分量：

$$g(i) = f(i) - \eta + \sum_{j \in S} p(j|i)g(j) \quad (3.16)$$

该方程具有清楚的含义：表示状态 i 对平均性能的长期贡献 $g(i)$ ，等于它在当前时刻的这一步的贡献 $f(i) - \eta$ ，加上下一个状态的长期“潜在”贡献的数学期望。通过令 $\pi g = \eta$ 将解正规化可以使公式(3.15)的解唯一。在这种情况下，公式(3.15)的形式可以变为：

$$(I - P + e\pi)g = f \quad (3.17)$$

其中 π 为该策略下的稳态概率（行）向量，由于 $(I - P + e\pi)$ 的特征值为 $\{1, 1 - \lambda_1, \dots, 1 - \lambda_s\}$ ，其中 λ_i 满足 $|\lambda_i| < 1, i=1, 2, \dots, S$ ，是转移概率矩阵 P 的特征值^[53]。因此 $(I - P + e\pi)$ 可逆且 $(I - P + e\pi)^{-1}$ 的特征值为 $\left\{1, \frac{1}{1 - \lambda_1}, \dots, \frac{1}{1 - \lambda_s}\right\}, |\lambda_i| < 1, i=1, 2, \dots, S$ ，这样就可以得到性能势的计算公式：

$$g = (I - P + e\pi)^{-1} f \quad (3.18)$$

结合公式(3.8)可知，稳态行向量 π 实际上是状态转移概率矩阵 P 关于特征值 1 的特征向量。只要系统经过足够长的时间，投资组合处于各个状态的概率分布是个定值，即为 π 。由公式(2.20)我们可以不考虑投资组合初始时刻处于何种状态，利用时齐马尔可夫链的平稳性计算它的最终分布 π ，从而结合报酬函数 f 和状态转移矩阵 P 计算出系统的性能势 g 。

3.4.3 性能差分公式

策略迭代算法的基本思想是通过观察或分析可以系统在某个策略下的性能，找到一个更好的策略，如果这样的策略存在，从（平均报酬）性能差分公式即公式(3.19)可以很容易得到这个想法。

假设原策略为 d ，新策略为 h ，由泊松方程，即公式(3.15)容易推出性能差分公式：

$$\eta^h - \eta^d = \pi^h \left[(P^h - P^d)g^d + (f^h - f^d) \right] \quad (3.19)$$

$$\sum_{j=1}^S p^{h(i)}(j|i)g^d(j) = \max \left\{ \sum_{j=1}^S p^a(j|i)g^d(j) : a \in A(i) \right\} \quad (3.20)$$

Figure 1 illustrates the framework of the proposed algorithm. The system consists of two main components: a Policy Iteration (PI) block and a Poisson Equation Solver (PE) block. The PI block receives a performance signal g^d and updates a distance function $d(X)$. The PE block receives a source function f^d and a probability distribution P^d , and outputs a performance signal g^d . A state X_l is shown as a Markov chain with three states (1, 2, 3) and their transitions.

作为滚动优化算法，需要在每一决策时刻根据系统的实际状态在线优化投资方案，

但由于马尔可夫链模型的时齐性（即在固定策略 d 下，状态转移矩阵 P 不随时间变化）， t 时刻的一步状态转移矩阵 P_t 和 $t+k$ 时刻的一步状态转移矩阵 P_{t+k} 是相同的，都等于 P 。所以只要 $t+k$ 时刻和 t 时刻系统所处的状态相同，则对应优化问题求解得到的投资方案也是相同的。由于状态数目有限，不必在每一决策时刻根据系统的实际状态进行在线优化，而只需离线对每一状态寻找对应的最优决策，并把结果保存，在线时只需根据系统所处的实际状态，选择相应的最优投资方案予以实施即可^[55]。

上述离线优化问题针对的是有限个状态，分别寻找与时间无关，只与状态有关的最优策略 d ，使得投资组合的长期平均收益率最大。对于这类随机优化问题，可采用上文中提到的基于策略迭代的优化算法。在寻找更优策略的过程中，根据行动独立性原则（即改变某一状态 i 下的投资方案 $U(i)$ ，只会影响状态转移矩阵 P 中第 i 行的数据，而不影响状态转移矩阵 P 中其它行的数据），在寻找更优策略 h 时，可逐状态与原策略 d 中的投资方案进行比较。从而可以大大减少搜索范围，将原本几何级数的搜索空间降为算数级数的搜索空间。于是，设计出如图 3.3 所示的基于马尔可夫链的随机优化算法。

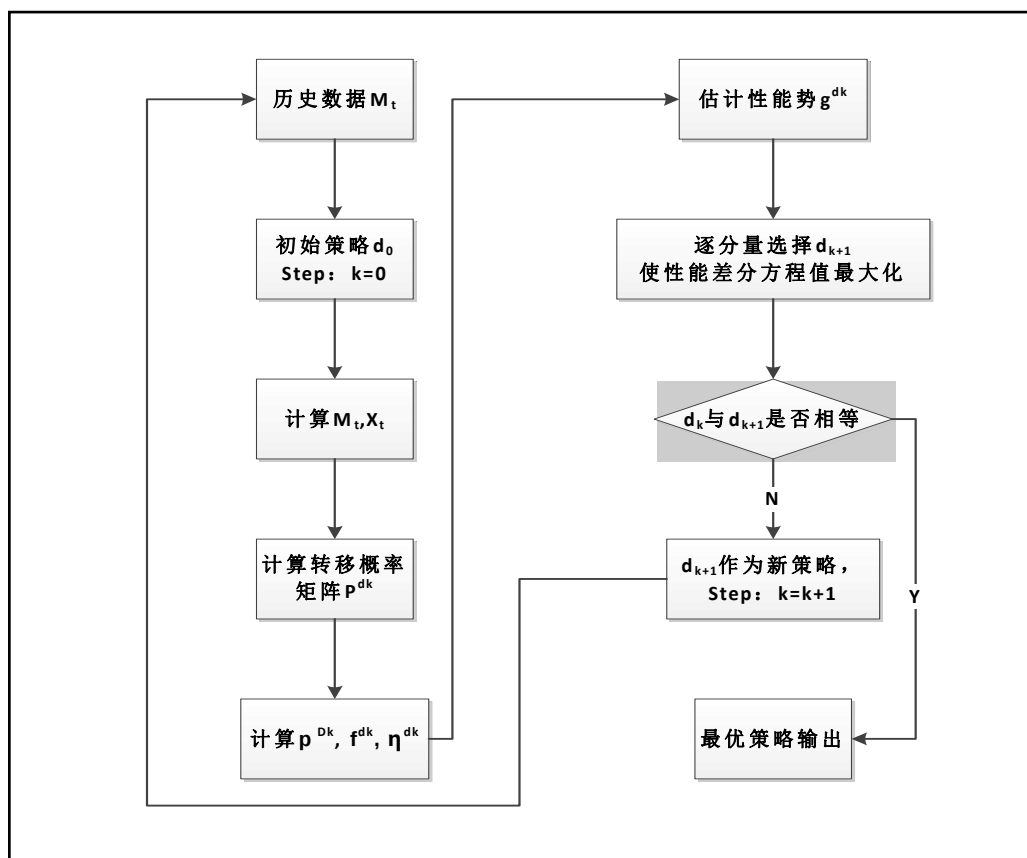


图 3.3 基于马尔可夫链的随机优化算法流程图



4 股票投资交易系统设计

4.1 需求分析

需求分析是系统开发的基础，是一个软件工程项目经计划后所实施的第一步，需求分析的成功与否是系统开发成功与否的关键^[56]。下面详细论述该股票投资交易系统的需求分析。

4.1.1 总体目标

该股票投资交易系统的开发目的主要在于根据现有的股票市场的基本情况，对股票市场进行建模和分析，结合上一章所介绍的基于马尔可夫链的随机优化算法，帮助用户在面对错综复杂的股市时能够采取科学的投资策略，避免盲目和不理性的行为，并且满足用户的智能化的操作需要。

在这个交易系统中，主要包括推荐股票选择、查看股票信息、优化股票比例、完成股票交易这几大特色功能，从而为用户理性、轻松地理财；该系统将行情、咨询、图表、技术与财务数据有机组合，帮助用户多角度、全方位地进行观察和分析，捕捉最佳交易时机；与此同时，系统还充分为各种用户考虑，增加了很多人性化的设计，用户可根据自身需求和喜好选择相应的功能设置。

4.1.2 管理需求

股票投资交易系统对管理方面的需求有其独特严格的要求：

(1) 对数据资源的维护需求：对该股票投资交易系统而言，离开信息资源的支持就会无法进行下去。因此，应该有一个完善、丰富、开放的信息系统作支持。股票信息本身是开放性的，而不是加密型的，以利于不同系统的交流，进而可以进行相应的股票交易操作。

(2) 对分析过程的管理：能够随时监控股票交易的情况，如交易量、交易额，及相应的技术参数变化，包括股票持有量、股票开盘收盘价、股票最高最低价、交易是否已经提交等信息。

(3) 对预测结果的管理：可以通过查看分析的结果，再根据信息资源提供的数据，



限定股票数据的有效时间段,来进行股票价格的预测,并能够用图例显示预测的结果并为用户提供一个最优的投资策略。

(4) 对系统维护的管理:系统维护是为了使系统能够正常使用的保障,任何一个软件都要把系统维护作为一个重要的方面来考虑,我们这里也不例外,不能把这一方面的重要性忽视掉。

4.1.3 用户需求

(1) 使用系统的方便性:应该使不熟悉股票交易系统的用户,可以通过本系统的友好界面,方便自己的各种操作,使他们感到操作方便,便于驾驭,进而能在广大用户中真正流行起来。

(2) 可以查阅个人以前的信息:每个用户不可避免地想查看自己曾经做过的每笔业务,来衡量自己的分析与预测能力,并以此作为参考的信息,为以后的买卖提供一个经验或教训。

(3) 发布信息的功能:可以通过系统给别人留言、发布个人信息,便于交流经验,每个用户都会对不同的股票有不同的心得,所以经常有人在私下交流心得体会,对他人也能够起到指导帮助的作用。

4.1.4 技术需求

(1) 对数据库技术的要求:考虑到本系统的实用性和适用性,应该选用性能稳定、吞吐量大、便于管理的数据库作为数据平台,故应选择既便于安装调试又非大型的数据库系统。

(2) 使用语言的要求:服务器端管理直接对数据库操作,故应选择对数据库访问比较方便的编程工具。因此结合面向对象与数据操纵的要求,综合考虑选择使用 MATLAB 作为服务端管理的编程工具。客户端也可以使用 MATLAB 编程工具。考虑到数据的安全性和操作的灵活性,建议使用 XML 文件保存部分数据。

4.2 可行性分析

4.2.1 经济可行性

经济可行性分析主要是对开发系统的经费进行预算,同时掌握经费的支出情况,控制项目在经费预算的范围内开发执行,以提高项目开发的性价比。由于越来越多的人



进入了股票市场,所以会有越来越多的人会关注股票的价格,因此该股票投资交易系统市场前景广阔。并且作为这个系统本身来说,预测速度快,开发这个系统所花费的人力和物力少,费用低,具有可观的经济价值和较好的经济效益。因此,本系统从经济上分析是可行的,应积极进行开发。

4.2.2 技术可行性

由于当今技术的发展,无论从软件方面还是硬件方面来说都很成熟,能够满足我们实施快速的股票分析和预测的需要,足以保证产品的开发成功性和质量可靠性。

已有很多学者对采用基于马尔可夫链的方法对股票市场的预测进行了探索,充分说明了该方法的可行性,在上文中已有提到,这里不再一一赘述。本文旨在提供一种采用策略迭代进行随机优化的马尔可夫链方法,从而大大减少搜索范围,进而提高服务器的计算效率。

MATLAB 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件,用于算法开发、数据可视化、数据分析以及数值计算的高级技术计算语言和交互式环境,主要包括 MATLAB 和 Simulink 两大部分。MATLAB 是由美国 mathworks 公司发布的主要面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。它将数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中,为科学研究、工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案,并在很大程度上摆脱了传统非交互式程序设计语言(如 C、Fortran)的编辑模式,代表了当今国际科学计算软件的先进水平。

其中, MATLAB 金融工具箱构建于统计和优化工具箱功能之上,它提供广泛的金融特定函数支持。帮助用户进行优化投资组合,确定风险,分析利率水平,对股权衍生定价,处理和转化商业日期等。从而,在软件开发语言上为本系统提供了强有力的技术支持。

SQL Server 是一个功能完备的数据库管理系统,它包括支持开发的引擎、标准的 SQL 语言、扩展的特性(如复制、OLAP、分析)等功能,兼容性好。其强大的数据挖掘功能能够揭示出隐藏在大量数据中的倾向及趋势,它允许组织或机构最大限度的从数据中获取价值,并且通过对现有数据进行有效分析,这一功能可以使用在对未来的趋势预测上。

4.3 系统设计

4.3.1 体系结构设计

常用的体系有层次体系、客户机/服务器结构、浏览器/服务器结构。在本课题的体系结构选取中，采用 C/S（客户机/服务器）结构。主要从以下几个方面考虑：

（1）多数的股票交易所都有比较完善的网络基础，所以适合开发依托网络平台的软件系统；

（2）股票分析和预测是一个实时性较强的系统，它注重体现实时变化，即各种股票交易的实时性。所以，采用 C/S 结构更合理；

（3）软件的生存不但与软件的使用性和实用性有关，而且更重要的还与可维护性有极大的关系，有时候可维护性可能更重要于其性能。使用 C/S 结构设计本项目，也是主要基于这一出发点。C/S 结构的物理拓扑图如图 4.1 所示：

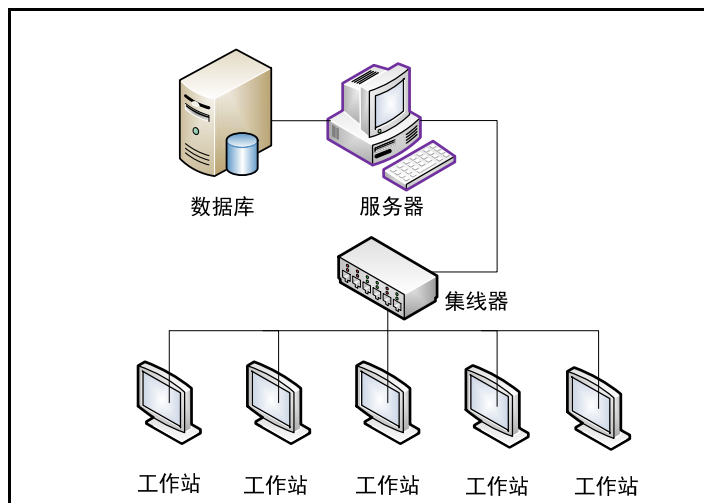


图 4.1 C/S 结构的物理拓扑图

该股票投资交易系统是基于微软公司 Windows 操作系统与 SQL Server 数据库平台构建，由客户端、服务器端两大部分组成，采用 C/S 模式，具有高度的安全性、稳定性与可靠性。

该系统工作原理是：当系统从网络中获得实时/历史股票市场数据时，将数据存入数据库。由服务对数据库中的数据进行建模仿真，并进行算法的优化，通过策略迭代选择为用户带来最佳收益的最佳策略，通过自动交易平台与用户进行人机交互，完成程序化交易。其体系结构如图 4.2 所示：

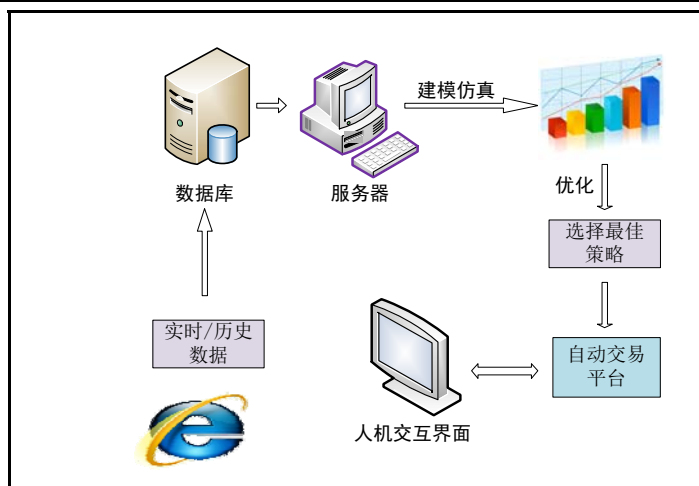


图 4.2 股票投资交易系统体系结构图

4.3.2 功能模块设计

1. 服务器端应实现以下功能:

(1) 数据采集

接收由网络中采集到的数据,从公共接口采集数据,得知各股信息。

(2) 技术分析

对采集来的数据进行处理,得出股市动态。通过基于马尔可夫链的随机优化算法进行技术分析是本系统的核心。

(3) 预测

主要是根据股票历史和实时数据情况,进行机器学习,得出股票在以后的价格或趋势,本系统采用马尔可夫链方法来建立网络模型,并根据采集的股票信息为用户提供最优的投资策略,判断当前组合收益率所处的状态,并计算出几只股票的最优投资比例。

(4) 系统维护

为了保证系统正常,为了系统维护的方便而在程序内部设计中做出的安排,包括在程序中专门安排用于系统的检查与维护的检测点和专用模块。

(5) 备份

对股票信息进行备份,可以作为以后的参考。每天收盘时要进行数据的备份,将数据信息保存在数据库中。

(6) 帮助

为用户使用提供方便,有不了解的问题可以进行查询。帮助包括功能键的使用,软



件的操作说明等。

(7) 退出

指本系统需要结束时，退出本系统。

2. 客户端

(1) 数据采集（从服务器端采集数据）

通过自己定义的接口，从服务器端采集数据。

(2) 用户接口

接收用户的请求并把结果返回给用户，以及用户间的交流。

(3) 备份

用户对股票信息进行备份，可以作为以后的参考。

(4) 帮助

为用户使用提供方便，有不了解的问题可以进行查询。

(5) 退出

指本系统需要结束时，退出本系统。

4.3.3 界面设计

界面设计在程序设计中也占有很重要的位置。一个好的界面不仅使用户更容易接受，而且更主要的目的是为了使程序更便于交互，在本课题的设计中，主要从以下几个方面考虑界面的设计：

(1) 颜色协调，分界明显，便于识别。

(2) 界面简洁、明了，便于交互，方便使用。

(3) 功能模块简化、流畅，避免繁琐的菜单内容。

其实，一个好的界面设计也是与用户沟通的重要手段，在需求分析的初期，为了更好地和用户沟通，可以使用很简单的手法虚构一个程序的界面，使用户看起来一目了然，起到了很好的沟通作用。

5 系统实现与实证分析

5.1 系统实现与效果

股票投资交易系统由 MATLAB 的 GUI 功能实现,以基于马尔可夫链的随机优化算法为基础,它由股票信息界面和投资交易界面两个界面组成,可通过在网络上获取实时和历史的股票数据,完成包括推荐股票选择、查看股票信息、优化股票比例、完成股票交易在内的几大特色功能。

该系统可以为用户提供最优的投资策略,帮助用户理性、轻松地理财;该系统将行情、咨询、图表、技术分析与财务数据有机组合,协助用户多角度、全方位地进行观察和分析,捕捉最佳交易时机;与此同时,系统还充分为各种用户考虑,增加了很多人性化的设计,用户可根据自身需求和喜好选择相应的功能设置。

5.1.1 股票信息界面

用户在登录之后,首先进入股票投资交易系统的首页面,即股票信息界面。用户可以在该页面查询股票的信息和趋势,并完成投资策略的优化,获得当前状态的最优投资比例。股票信息界面如图 5.1 所示。

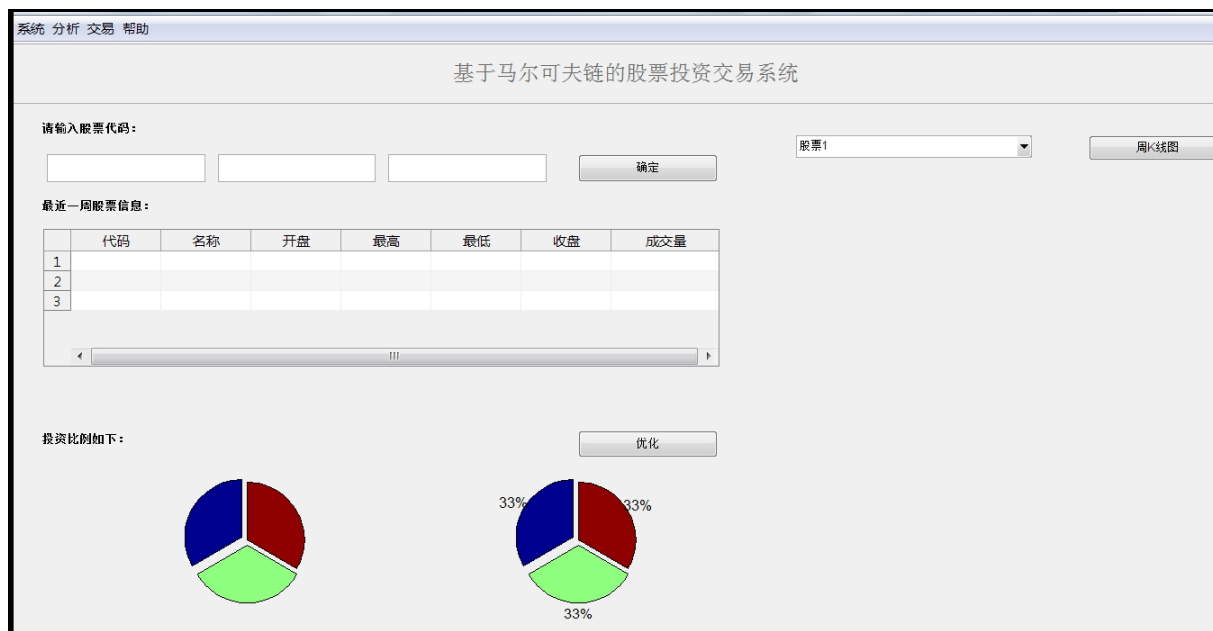


图 5.1 股票信息界面示意图

5.1.2 股票信息查询

用户进入股票信息界面后,可以在股票代码输入框中输入想要查询的 3 只股票代码,如宝钢股份 600019、上海汽车 600104、三一重工 600031 等。在用户点击股票代码确认按钮后,系统将会连接网络,在网络上查询并获得股票信息,如图 5.2 所示。

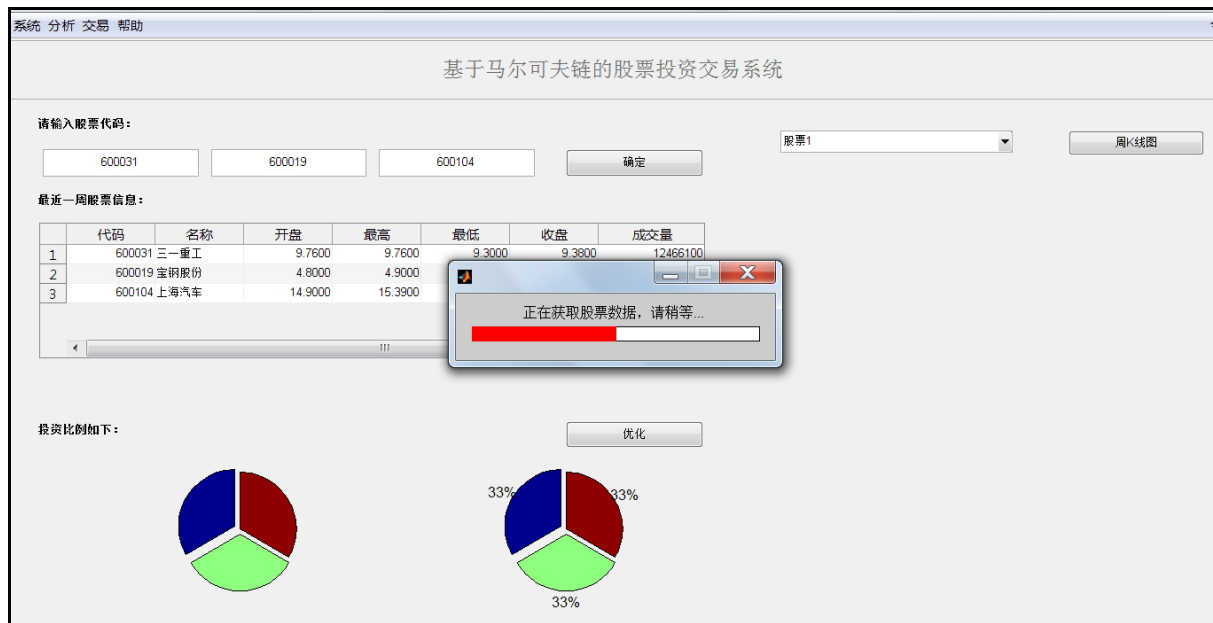


图 5.2 系统加载股票信息示意图

在完成股票信息加载后,系统会如图 5.3 中虚线所示股票信息框中显示几只股票最近一周的信息,包括代码、名称、开盘价格、最高价格、最低价格、收盘价格和成交量。

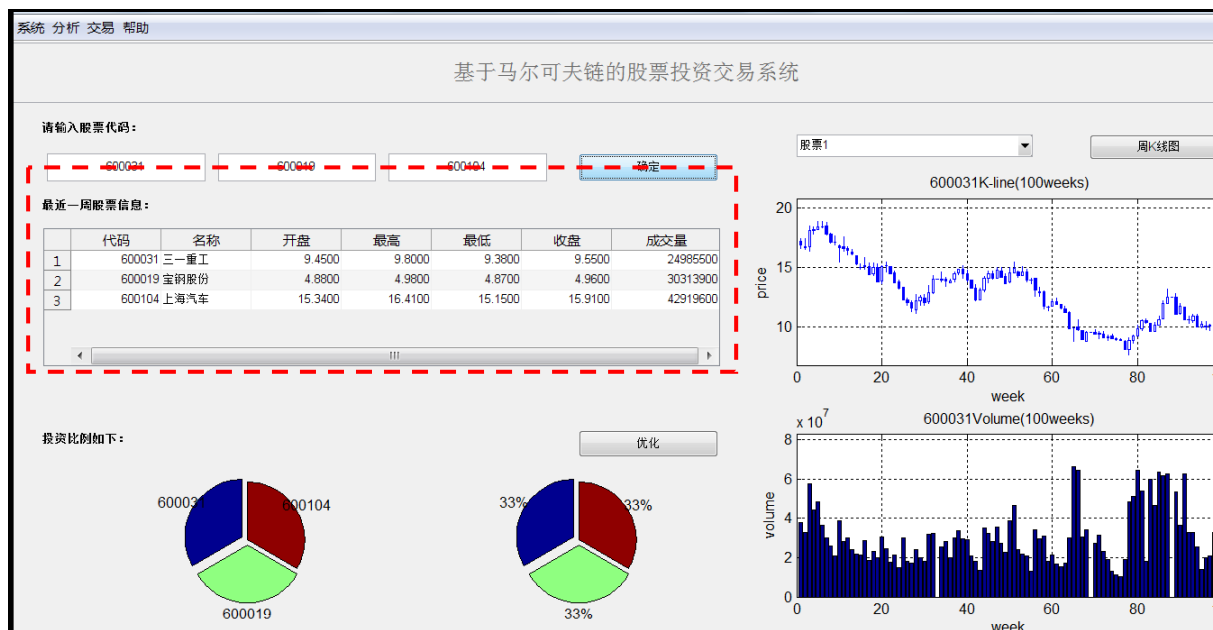


图 5.3 股票信息示意图

5.1.3 股票 K 线图查询

用户可以在查阅完几只股票的信息后,可以通过股票信息界面右侧的 K 线图查询模块查询股票的涨跌趋势,根据此前查得的股票信息决定是否投资该股票,如图 5.4 中虚线框所示。

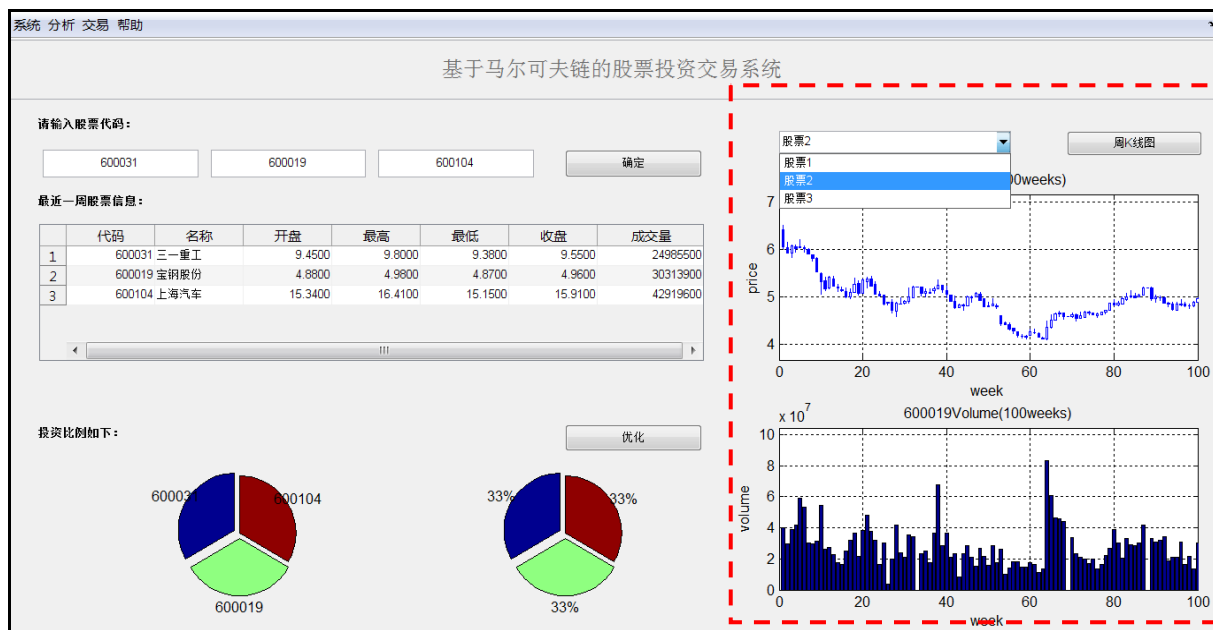


图 5.4 股票 K 线图查询示意图

在加载股票信息完成后, K 线图查询模块会自动完成股票 1 的周 K 线图的绘制,用户还可以在下拉列表中选择股票 1/股票 2/股票 3,点击 K 线图绘制确定按钮,绘制相应的周 K 线图,帮助自己进行股票投资的分析。由于此前已经把股票历史数据储存在服务器或电脑中,因此绘制 K 线图的过程迅速而便捷。

5.1.4 投资策略优化

投资策略优化模块位于股票信息界面的左下方,如图 5.5 虚线框中所示。它是本系统的核心模块,系统经过分析网络上获得的几只股票的历史数据,建立马尔可夫链模型,采用基于策略迭代的优化算法,寻找到这几只股票的最优投资策略,并向用户推荐。



图 5.5 投资策略优化模块示意图

点击优化确定按钮后，系统将根据股票历史数据结合此时的收益状态，为用户推荐最优的投资比例，并绘制出性能指标的对比图，如图 5.6 所示。它表示采用最优策略与平均策略之间两项优化评价指标的对比，即长期平均收益率以及其所处的状态，通过多次实验可以验证，采用最优投资方案组合用户可以获得更高的长期平均收益率，从而带来更高的收益。与平均策略相比，新的股票投资组合随机模型和基于马尔可夫链的随机优化方法的可行性及优越性，我们还将采用历史数据进行实证分析以突显出来。

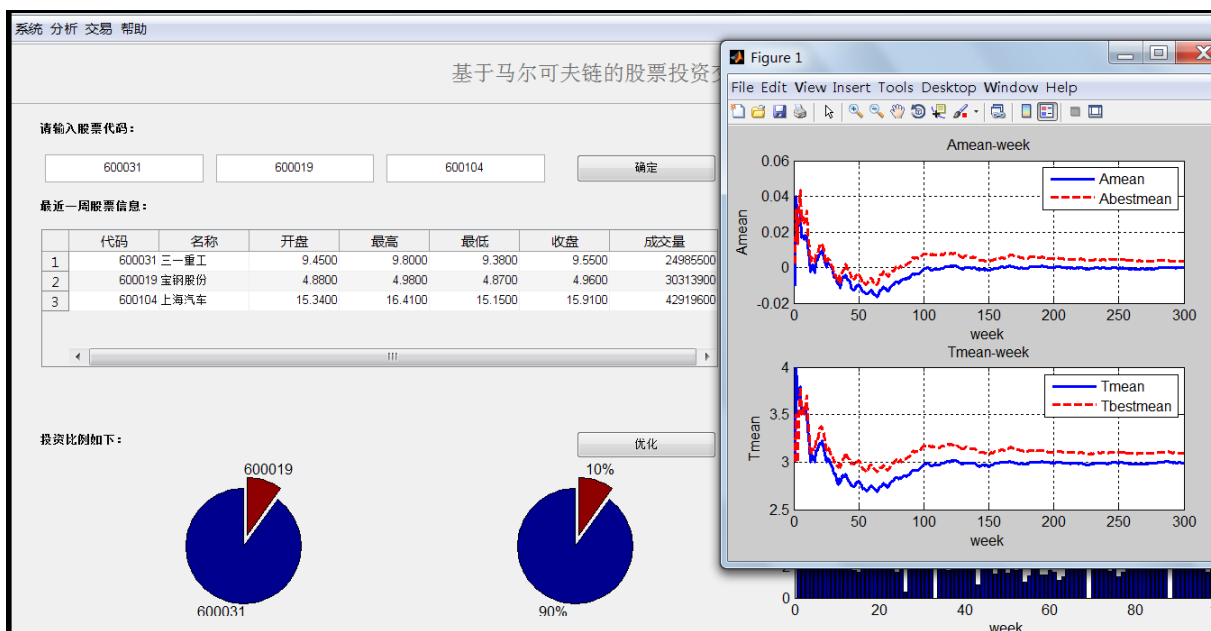
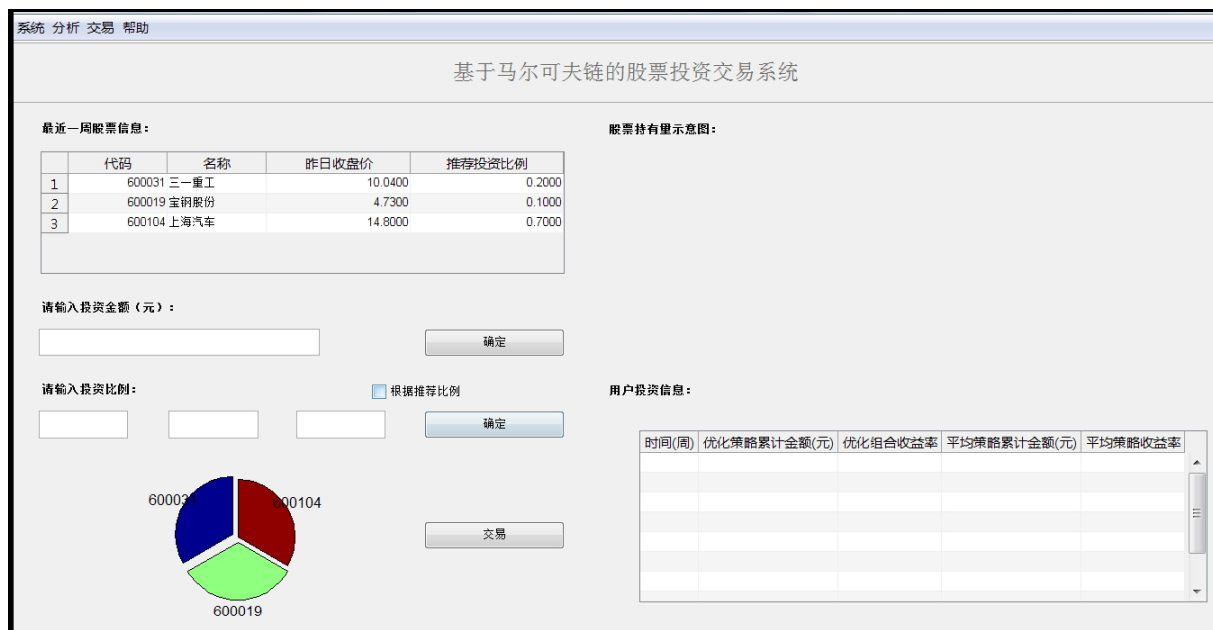


图 5.6 投资策略优化及性能指标比较示意图

5.1.5 投资交易界面

在完成优化后, 点击“交易”菜单下的子菜单“投资交易”即可进入投资交易界面, 如图 5.7 所示。它由股票信息查询、投资金额输入、投资比例输入、股票持有量示意图、用户投资信息 5 个模块组成, 系统可以为用户完成投资交易并保留用户的投资信息。



	代码	名称	昨日收盘价	推荐投资比例
1	600031	三一重工	10.0400	0.2000
2	600019	宝钢股份	4.7300	0.1000
3	600104	上海汽车	14.8000	0.7000

时间(周)	优化策略累计金额(元)	优化组合收益率	平均策略累计金额(元)	平均策略收益率

图 5.7 投资交易界面示意图

为完成股票投资, 用户需要输入投资金额以及投资比例, 当用户勾选了“根据推荐比例”确认框后, 系统会自动为用户填好由系统根据股票信息计算得出的推荐比例。在金额和比例填写并确认后, 点击交易确定按钮, 系统将进行股票投资交易。然后在股票持有量示意图中显示用户现存股票量以及用户自启用本系统以来的投资信息, 如图 5.8 所示。

在股票持有量示意图中用户可以看到完成交易后几只股票剩余的股数 (由于股票买卖 100 股/手为单位, 因此交易后的股票数目仍以百为单位); 在用户投资信息栏中用户可以看到使用时间、优化策略累计金额、优化组合收益率、平均策略累计金额、平均策略收益率几项内容。通过对比优化策略和平均策略下的累计金额, 我们可以看到在优化组合下往往能够为用户带来更高的收益。

此外系统提供了人性化的服务, 用户也可以根据自己个人的喜好自己决定股票投资比例以及每周的投资金额, 该系统旨在以基于马尔可夫链的方法为用户的理性投资提供若干参考依据, 从而避免盲目与非理性的投资。

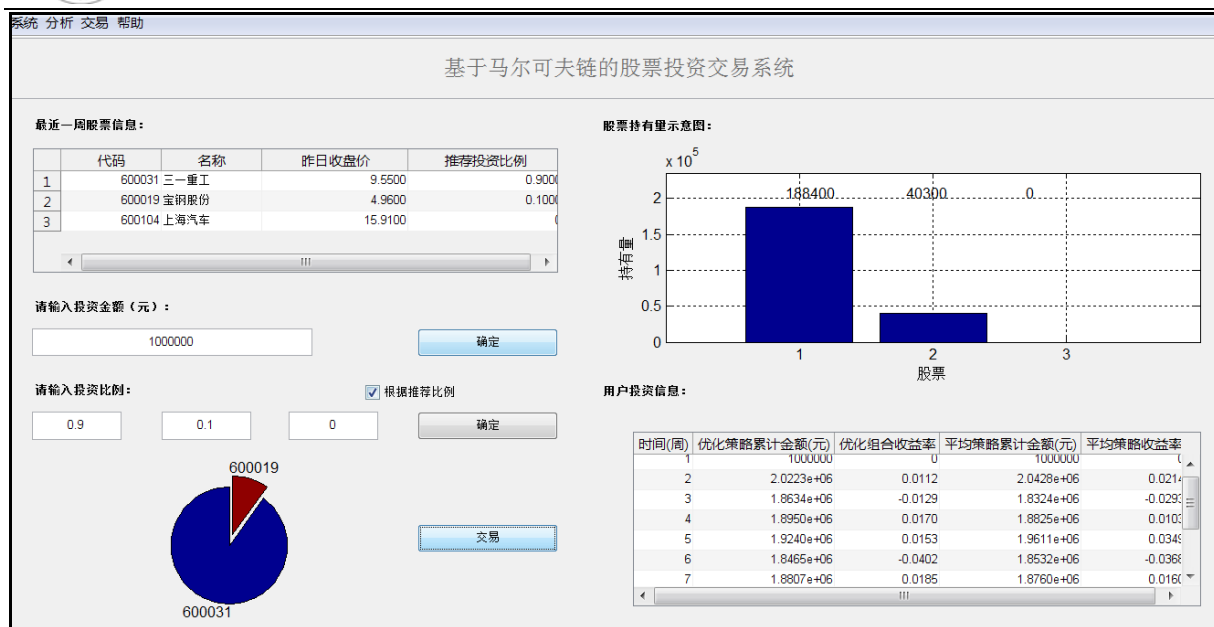


图 5.8 投资交易完成示意图

5.1.6 菜单栏

菜单栏位于股票信息与投资交易两个界面的左上角,如图 5.9 虚线框中所示。包括系统、分析、交易、帮助几个菜单,为用户的使用提供了便捷,也是该股票投资交易系统追求人性化和更佳的用户体验的体现。

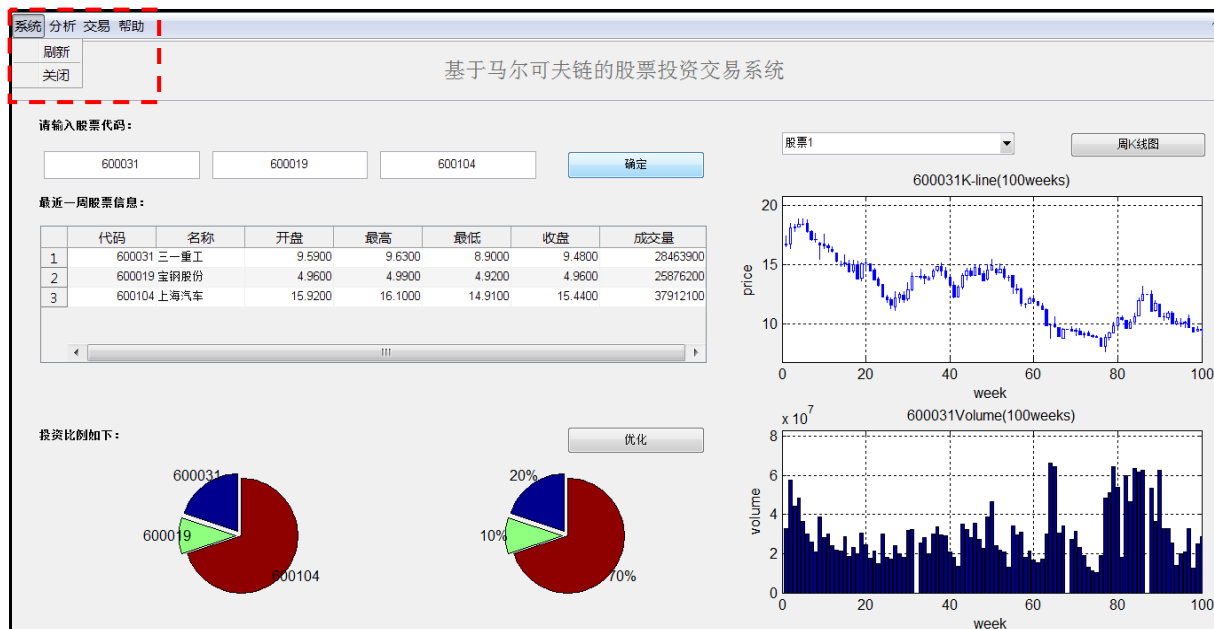


图 5.9 投资交易完成示意图

(1) 系统菜单: 包括刷新与关闭两个子菜单,刷新可以完成系统的初始化清零操作,关闭帮助用户退出该程序。

(2) 分析菜单：包括优化与参数两个子菜单，优化与策略优化模块中的优化确认按钮功能相同，在分析数据后为用户提供最优投资策略并绘制出优化策略与平均策略的性能指标对比图；参数菜单可以根据股票历史数据提取出股票收益率的均值和方差，为用户的投资提供参考，如图 5.10 所示的参数对话框。

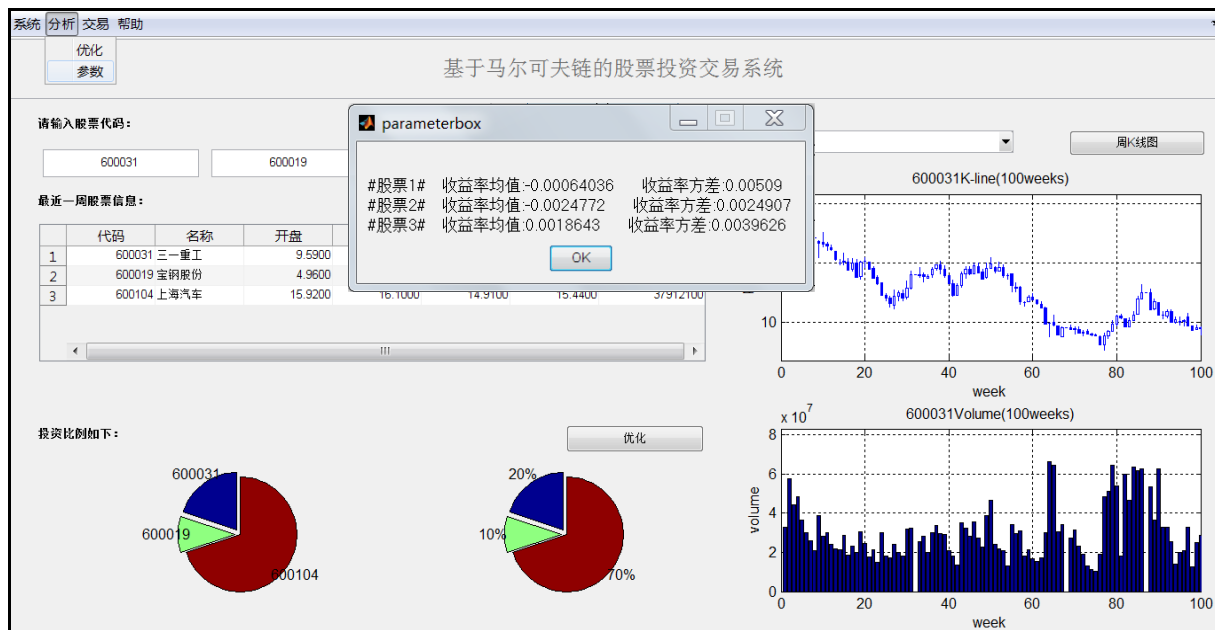


图 5.10 分析菜单及参数对话框示意图

(3) 交易菜单：包括股票信息与投资交易两个子菜单，即完成股票信息与投资交易两个主要界面之间的切换。

(4) 帮助菜单：包括使用说明和产品信息两个子菜单，如图 5.11 所示。使用说明子菜单描述了本系统的基本功能、产品特色和使用方法；产品信息子菜单介绍了本产品的版本信息、改进情况、发布日期等。

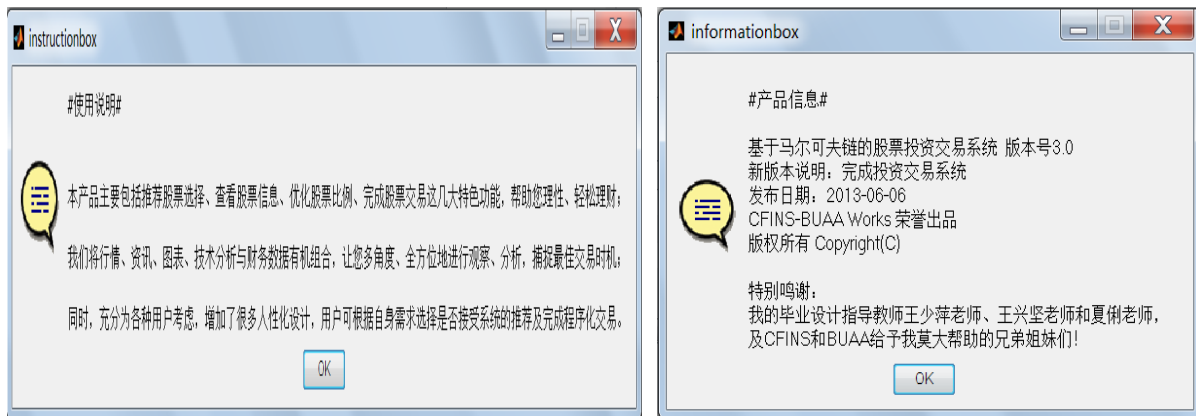


图 5.11 使用说明及产品信息对话框示意图



5.2 基于历史数据的实证分析

5.2.1 优化性能分析

本文以上证 A 股为例,选取了以下三支股票:宝钢股份、上海汽车和三一重工,并选取了它们自 2006 年 7 月至 2010 年 6 月(共计 209 周)的股价数据为样本计算各股票的周收益率,研究投资组合周收益率的状态的随机变化过程(周收益率=(周收盘价格-一周开盘价格)/周开盘价格)。经统计得到表 5.1 中各股票自 2006 年 7 月至 2010 年 6 月的平均周收益率(均值)和风险(方差)。

表 5.1 各股票周平均收益率与方差

投资组合	宝钢股份	上海汽车	三一重工
收益率	0.43%	0.91%	1.14%
方差	0.43%	0.62%	0.68%

观察各股票收益率的分布状况(收益率的取值范围),将投资组合的状态(即收益率的变化范围)划分为四个大小相等的区间 $[-30\%, -15\%]$, $(-15\%, 0]$, $(0, 15\%]$, $(15\%, 30\%]$, 并分别记为状态 1, 2, 3, 4。由于落在区间 $[-30\%, 30\%]$ 以外的值很少,所以可以忽略不计或单独处理。

假定一套初始投资方案组合:以最简单的平均策略为例,即不论投资组合当前处于何种状态,都采 $(1/3, 1/3, 1/3)$ 的投资方案,将资金平均投资于三个股票 (S_1, S_2, S_3) 。然后,从 $t=0$ 时刻开始一步步计算 M_t , $t=1, 2, \dots$ 。假定 $t=0$ 时刻,投资组合的收益率 M_t 为 0 (即当前处于状态 2),根据既定的投资方案组合中状态 2 所对应的投资方案(平均策略中状态 2 所对应的各股票的投资配比分别为 1/3, 1/3 和 1/3),结合第一周的历史数据,计算出 $t=1$ 时刻的投资组合的收益率 M_1 为-0.34%,状态发生了一次转移,新的状态仍为 2。如是,可得到自 2006 年 7 月至 2010 年 6 月,投资组合在既定投资方案集下的 209 个历史周收益率 M_t 对应的状态 X_t 。最后,根据既定投资方案组合下的历史状态,计算状态转移概率矩阵 P ,最后一周的状态转移未知,故不参与计算。

根据计算可得 π 和 f ,于是长期平均报酬 $\eta = \pi f = 1.11\%$,即系统长期运行的周平均收益率为 1.11%。在得到 P , f , η 后,可根据公式(3.18)计算 $g = [6.36\% \quad -0.44\%$



$2.32\% - 1.95\%]^T$, 同时, 将行动集作离散化处理, 得 $u^i(j) \in \{0, 0.1, 0.2, \dots, 1\}$, $i=1, \dots, m, j \in S$, 即各股票的投资比例能取 0 到 1 之间的 11 个值, 当改变状态 i 下各股票的投资比例, 而其它状态下投资方案不变时, 根据公式(3.19)逐分量搜索更优的投资方案组合, 直至搜索不到更优方案组合为止。

基于策略迭代的随机优化方法, 得到在以上条件假设下得到的最优投资方案集为:

$$D_{best} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0.3 & 0.1 \\ 1 & 0.1 & 0.4 & 0.9 \end{pmatrix}$$

在最优投资方案组合下, 2006 年 7 月至 2010 年 6 月年周平均收益率为 1.27%, 方差为 0.52%, 在没有大幅增加风险的情况下, 收益率却有了很大提高, 如图 5.12 所示。

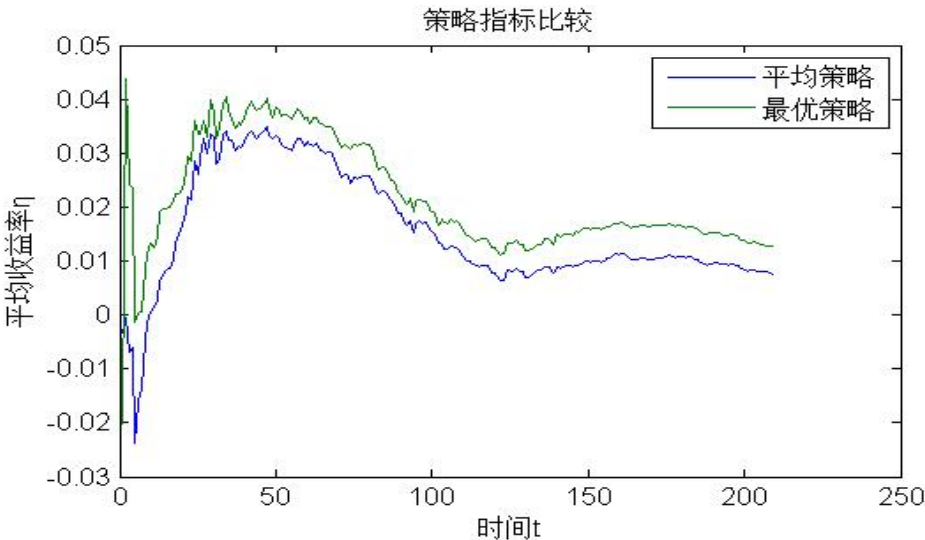


图 5.12 最优策略与平均策略的性能指标对比

表 5.2 显示了 5 种方案下各自的周平均收益率(均值)和方差, 其中前 3 个方案为将全部资金投资于单个股票。假定期初初始本金为 1 万元, 按最优策略投资, 209 周后回收资金 8.82 万元, 平均方案下的回收资金则只有 3.22 万元, 说明在新的投资策略下投资组合给投资者带来了更大的收益。

表 5.2 各方案集下周平均收益率和方差比较

投资组合	宝钢股份	上海汽车	三一重工	平均策略	最优策略
收益率	0.43%	0.91%	1.14%	0.76%	1.27%
方差	0.43%	0.62%	0.68%	0.40%	0.52%



5.2.2 算法效率分析

在搜索效率方面,基于策略迭代的随机优化方法也体现出了高效性。以本文投资组合优化问题为例(股票个数为 3,状态个数为 4,可能的投资行动集个数为 11),投资方案集的总搜索空间为 1.9×10^7 ($[(1+11) \times 11 \div 2]^4$)。经统计平均 4 次迭代可得到最优投资方案组合,而每一代计算中,采用贪婪性算法,遍历每种可能的组合 264 种($4 \times [(1+11) \times 11 \div 2]$),这样实际的搜索空间为 $264 \times 4 = 1056$,即基于策略迭代的随机优化方法只搜索了全域的 0.056%。如果增加基本参数的个数,优化算法会进一步体现其将几何级搜索空间降低为算数级搜索空间的高效性。

5.3 基于实时数据的实证分析

本文以上证 A 股为例,选取了以下三支股票:宝钢股份、上海汽车和三一重工,自 2013 年 4 月 21 日起开始进行了为期 6 周实时数据的实证分析。即采用本文中的股票交易系统,在以 4 月 21 日开始的 6 个周一进行股票交易,通过对比股票交易系统用户投资信息表中优化策略与平均策略下的平均收益率和最终收益,根据所获得的结果进行实证分析。

该股票交易系统采用交易当日之前 300 个星期的周收益率历史数据进行统计和学习,建立马尔可夫链模型,根据基于策略迭代的优化算法获得最优投资策略,将该算法和交易策略用实时数据进行验证。

在每个交易日,投资者会根据观察到的股票的状态,选择该状态下对应的几只股票的最优投资比例。根据此投资比例为接下来这周进行模拟投资。投资者会因执行这个方案而获得相应的报酬,同时也会影响股票投资组合在下一交易日的收益状态。等到了下一交易日,投资者又会根据新的状态,采取新的投资方案,如是一步一步进行下去,这就是本文提出的基于状态反馈的滚动优化算法的体现,也是马尔可夫决策过程思想的体现,从而实现了在现实生活中帮助用户在股票市场上进行多期投资的目标。

本课题从 2013 年 4 月 21 日进行模拟投资,初始投资金额为 100 万元,由于第 1 周投入本金,因此第 1 周的组合收益率为 0,累计金额即为本金 100 万元,此后每周都会有收益率及累计金额的变动,具体数值如表 5.3 所示,表中持股数目单位为:股,累计金额单位为: 10^5 元。



表 5.3 实时数据实证分析列表

时间	宝钢股份 600019		三一重工 600031		上海汽车 600104		最优策略		平均策略	
	投资 比例	持股 数目	投资 比例	持股 数目	投资 比例	持股 数目	收益率	累计 金额	收益率	累计 金额
1	0.5	102400	0.2	21300	0.3	19600	0	10	0	10
2	0.1	100800	0.2	20900	0.7	18800	0.0214	10.215	0.0215	10.214
3	0.1	20500	0.2	21500	0.7	46300	-0.0139	9.9756	-0.0234	10.073
4	0.1	20400	0.2	21000	0.7	45700	-0.0140	9.8599	-0.0116	9.8364
5	0.1	20500	0.2	21300	0.7	44100	-0.0024	9.9773	0.0119	9.8361
6	0.1	21400	0	0	0.9	59600	-0.0360	9.6208	-0.0357	9.6185

表 5.3 显示了平均投资策略和最优组合策略在进行 6 周之后,统计所得的收益率、累计金额以及 3 只股票投资比例和持股数的变动。假定期初初始本金为 100 万元,按最优策略投资,6 周后回收资金 96.208 万元,平均方案下的回收资金则为 96.185 万元,说明在新的投资策略下投资组合给投资者带来了更大的收益,且在 6 周内的大多数时间最优组合策略带来的收益都比平均策略高。我们使用别的股票做相同的实证分析试验,也能得到类似的结果。

然而,我们也看到,虽然最优组合策略带来的收益比平均策略高,但是二者并没有显著的差距。究其原因,是因为我们的马尔可夫链模型是建立在以下假设的基础上的:

(1) 股市的运行只受全球或地区的经济、政治、社会等各种随机因素的影响,证券管理部门的宏观政策是平稳的,投资者操纵的影响可忽略不计;

(2) 股票价格在某一日的涨跌以及收益率的大小只跟前一日的收盘价密切相关,而与过去的涨落关系不大,因此过去的行情可忽略不计;

(3) 股票价格从一种状态 i 经过相同的时间间隔跳到另一种状态 j 的概率,与状态 i 所处的时刻完全无关;

(4) 时间的变化是离散的,以天或周为单位。



而现实中的中国股市可能难以严格满足以上几点假设的要求，因此虽然优化算法能够为用户带来更高的收益，但是效果并不明显。因此需要开发更加贴合实际股市的新的优化算法，以适应瞬息万变的股票市场的需求，当然这将使用到更加复杂的数学模型和分析方法。本文只是作为股票投资组合马尔可夫链模型和优化算法的初步探索，接下来还需要持续对算法进行改进，进一步研究模型约束及算法的设计。



结论

本文提出了一种基于马尔可夫链的优化算法，在达到预测的实时性、准确性要求的基础上，采用策略迭代的随机优化方法，使得计算效率大大提高；在新的投资组合方案中由于将随机因素纳入考虑范围，为投资者提供了更多的投资机会，从而带来更高的投资收益。通过采用历史数据与实时数据进行实证分析，根据实验结果体现出该基于马尔可夫链的优化算法的可行性与优越性。

与此同时，本文设计了一种新型的股票投资交易系统，可根据实时股票市场数据，在自动交易平台上进行程序化、网络化、智能化的交易，该系统界面友好，可操作性强，设计模式灵活，性能稳定，拥有良好的用户体验。

本文从状态反馈和滚动优化的角度考虑了投资组合优化问题，探索性地提出了通过历史数据建立股票投资组合的马尔可夫链模型，使得在新的投资方案组合下，投资者可以获得更高的投资收益，另一方面，本文也说明了基于策略迭代的随机优化方法的可行性和高效性。特别是当决策变量较多时，算法可有效地将几何级数的运算降低为算数级数的运算，这为优化算法的推广奠定了基础。作为股票投资组合马尔可夫链模型和优化算法的初步探索，接下来还需进一步研究模型约束及算法的设计。



致谢

北航的四年转瞬即逝，在论文即将完成之际，谨向所有支持和帮助我的老师，同学及亲人朋友们致以深深的谢意。

感谢我的毕业设计指导教师，清华大学自动化系 CFINS 中心的夏俐老师和北京航空航天大学自动化学院机械电子工程系的王兴坚老师、王少萍老师，正是在他们的严格要求和孜孜不倦的教导下我的毕业设计才得以顺利完成。

感谢夏俐老师从选题、调研以及论文定稿过程中一直给予我莫大的帮助，并为我在清华大学提供了良好的科研环境，这令我十分感动。在清华大学 CFINS 中心进行毕业设计的半年时间里，夏老师治学严谨、认真负责，在毕业设计过程中为我指引道路、提供建议，在他的身上我看到了清华人自强不息、厚德载物的精神，为我以后的学习和工作树立了典范。

感谢王兴坚老师在我毕业设计期间及时的通知和提醒，以及对我前往清华进行毕业设计的理解和支持。感谢王少萍老师大学四年以来在学业上、生活上和思想上提供的无微不至的关怀和帮助，是王老师在我面临学业困惑和重大抉择时为我指明了方向，在此谨向她致以诚挚的谢意和崇高的敬意。在他们的身上我看到的是北航人德才兼备、知行合一的优良作风和勤劳创新、拼搏奉献的航空航天精神，纵使即将离开母校我也会将这份信念保存一生。

衷心感谢北京航空航天大学自动化学院的各位老师和辅导员，这四年对我的培养、教育和熏陶，从他们身上不仅学到了知识，更重要的学会了做人，这在我的一生中都将是一笔宝贵的财富。

感谢清华 CFINS 中心的程志金、侯琛、张渊明和黄琦龙师兄以及庄露萍师姐，在我这短暂的半年清华学习和生活中提供的帮助，我永远不会忘记这段愉快而难忘的岁月；感谢北航自动化学院的范文涛、李博文和崔应炫同学，在我毕业设计遇到困难时的帮助和鼓励，让我面对庞杂的程序时有了清晰的思路。

感谢北航 390321 班的同学们，四年以来我们相处的时光是那样美好，班集体取得的无数荣誉是作为学习委员的我大学以来最大的自豪。论文的顺利完成也与同学们的帮



助和支持密不可分，大学生活是我人生中一段重要经历，我将永远怀念这段人生历程，也将永珍惜与老师和同学们建立的友谊。

感谢我的母亲，二十二年的含辛茹苦，为了我的健康成长，她付出的实在太多太多，我十分期待即将到来的上海交通大学研究生期间的学习，希望能用更好的成绩报答这份沉甸甸的养育之恩。

最后，感谢家人和朋友们对我默默的支持和鼓励，我会带着这份感激和感动继续前行，始终朝着理想的方向进发。



参考文献

- [1] Durham J B. The effects of stock market development on growth and private investment in lower-income countries [J]. Emerging Markets Review, 2002, (3): 211-232.
- [2] Demirgti Kunt, et al. Stock Markets, Cooperate Finance, and Economic Growth: An Overview [J]. World Bank Economic Review, 1996, (10): 341—369.
- [3] 陈工孟, 芮萌. 中国股票市场的股票收益与波动关系研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 10: 12-21.
- [4] 吴敬琏. 吴敬琏: 十年纷纭话股市[M]. 上海: 上海远东出版社, 2001.
- [5] 彭蕾, 高春银. 中国证券市场程序化交易研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2005.
- [6] 彭蕾, 高增银. 美国证券市场程序化交易简介[J]. 集团经济研究, 2004 (5): 118-118.
- [7] 郝清民, 赵国杰. 中国股票市场在经济增长过程中的作用[J]. 中国农业大学学报 (社科版), 2005, 2: 60-64.
- [8] 郑江淮, 袁国良, 胡志乾. 转型期股票市场发展与经济增长关系的实证研究[J]. 管理世界, 2000, 6: 40-50.
- [9] 袁海亮. 基于计算实验方法分析程序化交易对股票市场的影响[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [10] 周健, 朱剑涛. 算法交易在国内的运用[J]. 资本市场, 2011 (4): 52-55.
- [11] Fama E. The Behavior of Stock Market Prices, Journal of Business [J], 1965 (38): 34-105.
- [12] Fama E, et al. Efficient Capiml markets: A Review of Theory and EmPirical Work [J], Journal of Finance, 1970 (2): 56—81.
- [13] 刘剑锋, 蒋瑞波. 中国证券市场弱有效性检验[J]. 金融理论与实践, 2010, 4: 83-87.
- [14] 苏治, 方明, 李志刚. STAR与ANN模型: 证券价格非线性动态特征及可预测性研究 [J]. 中国管理科学, 2008, (5): 9-16.



- [15]王浩. 中国证券市场股票价格预测模型综述[J]. 四川教育学院学报, 2009, 25(007): 58-60.
- [16]白营闪. 基于 ARIMA 模型对上证指数的预测[J]. 科学技术与工程, 2009 (016): 4885-4888.
- [17]伍海华, 马媛. BP 神经网络股指预测模型[J]. 中共青岛市委党校青岛行政学院学报, 2003 (001): 56-59.
- [18]崔建福, 李兴绪. 股票价格预测:GARCH模型与BP神经网络模型的比较[J]. 统计与决策, 2004 (6): 21-22.
- [19]丁雪梅, 伦立军, 高为. 基于BP算法的股票均价预测技术研究[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2003, 6: 638-640.
- [20]邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1986.
- [21]袁嘉祖. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [22]覃思乾. 股价预测的GM (1, 1)模型[J]. 统计与决策, 2006 (6): 22-23.
- [23]关丽娟, 赵鸣. 沪综指走势的马尔可夫链模型预测[J]. 山东行政学院山东省经济管理干部学院学报, 2005 (004): 95-96.
- [24]台文志. 利用马尔可夫链模型预测股票市场的近期走势[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2009, 35(3): 477-481.
- [25]李海涛. 运用马尔科夫预测法预测股票价格[J]. 统计与决策, 2002 (5) : 25-26.
- [26]汪森, 罗剑. 运用马尔科夫预测法构建股价预测模型[J]. 经济师, 2005 (1) : 34-35.
- [27]Markowitz H. Portfolio selection: efficient diversification of investments. Cowles Foundation Monograph No. 16[J]. 1959.
- [28]王江伟. 股票价格的灰色—马尔可夫预测法的改进研究[D]. 天津: 南开大学, 2008.
- [29]孙荣恒. 应用随机过程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [30]李文波, 吴冲锋, 王意冈. 随机 Petri 网应用于马尔可夫预测模型[J]. 1999.
- [31]李虎, 杨海燕, 高仲仪. 基于宽平稳马氏链的软件质量收敛性判定技术[J]. 计算机工程与应用, 2001, 37(21): 24-25.



- [32]巴剑波, 方旭东, 徐雄利. 马尔可夫链在海军疟疾疫情预测中的应用[J]. 解放军预防医学杂志, 2001, 19(2): 114-116.
- [33]温圣瑜. 证券投资的马尔可夫决策分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [34]Bellman R E, Blackwell D. On a Particular Non-Zero-Sum Game[J]. 1949.
- [35]Howard R A. DYNAMIC PROGRAMMING AND MARKOV PROCESSES.[J]. 1960.
- [36]Hauskrecht M. Value-function approximations for partially observable Markov decision processes[J]. arXiv preprint arXiv:1106.0234, 2011.
- [37]Altman E. Applications of Markov decision processes in communication networks[M]//Handbook of Markov decision processes. Springer US, 2002: 489-536.
- [38]Feinberg E A, Piunovskiy A B. Multiple objective nonatomic Markov decision processes with total reward criteria[J]. Journal of mathematical analysis and applications, 2000, 247(1): 45-66.
- [39]Lamond B F, Boukhtouta A. Water reservoir applications of markov decision processes[M]. Springer US, 2002.
- [40]Alden J M, Smith R L. Rolling horizon procedures in nonhomogeneous Markov decision processes[J]. Operations Research, 1992, 40(3-Supplement-2): S183-S194.
- [41]陈建忠, 周世勇, 徐福余. Markov 过程在森林资源结构动态预测中的应用——以福建省南平地区的树种结构为例[J]. 应用生态学报, 1994, 5(3): 232-236.
- [42]罗捍东. 证券动态投资策略[J]. 预测, 1999, 18(2): 53-54.
- [43]王微. 经济系统中马氏决策过程的状态跳跃研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1996, 36(11): 99-104.
- [44]韩东, 胡锡健. 经济和金融数学模型的理论与实践[M]. 上海交通大学出版社, 2003.
- [45]李善民, 徐沛. Markowitz 投资组合理论模型应用研究[J]. 经济科学, 2000, 1: 42-51.
- [46]Managing investment portfolios: a dynamic process[M]. Wiley, 2007.
- [47]房光友. 基于马尔可夫链的资产质量预测建模研究[J]. 计算机仿真, 2010 (012): 354-357.



- [48]刘剑锋, 蒋瑞波. 中国证券市场弱有效性检验——来自收益率方法比的证据[J]. 金融理论与实践, 2010 (004): 83-87.
- [49]Bauerle N, Rieder U. Portfolio optimization with Markov-modulated stock prices and interest rates[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2004, 49(3): 442-447.
- [50]Rieder U, Bauerle N. Portfolio optimization with unobservable Markov-modulated drift process[J]. Journal of Applied Probability, 2005, 42(2): 362-378.
- [51]Cao X R, Wan Y W. Algorithms for sensitivity analysis of Markov systems through potentials and perturbation realization[J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 1998, 6(4): 482-494.
- [52]Cao X R, Stochastic Learning and Optimization: A sensitivity-based View[M]. Springer , 2007.
- [53]Plemmons R J, Berman A. Nonnegative matrices in the mathematical sciences[J]. Ch, 1979, 6: 137.
- [54]丁晨华, 席裕庚. 基于马尔可夫链的股票投资组合问题研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(10): 366-369.
- [55]Puterman M L. Markov Decision Processes[J]. Handbooks in Operations Research and Management Science, 1990, 2: 331-434.
- [56]李红梅. 股票分析和预测系统[D]. 长春: 吉林大学, 2004.