

电 子 科 技 大 学

UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

博士学位论文

DOCTORAL DISSERTATION

(电子科技大学图标)

论文题目 基于隐性交易成本的算法交易策略研究

学 科 专 业 企业管理

学 号 201011110502

作 者 姓 名 燕汝贞

指 导 教 师 曾 勇 教 授

分类号 _____ 密级 _____

UDC ^{注1} _____

学 位 论 文

基于隐性交易成本的算法交易策略研究

(题名和副题名)

燕汝贞

(作者姓名)

指导教师	曾 勇	教 授
	电子科技大学	成 都
	李 平	副教授
	电子科技大学	成 都

(姓名、职称、单位名称)

申请学位级别 博士 学科专业 企业管理

提交论文日期 2014.10.16 论文答辩日期 2014.12.08

学位授予单位和日期 电子科技大学 2014 年 12 月 25 日

答辩委员会主席 _____

评阅人 _____

注 1：注明《国际十进分类法 UDC》的类号。

STUDY ON ALGORITHMIC TRADING STRATEGIES BASED ON THE INVISIBLE TRANSACTION COSTS

A Doctoral Dissertation Submitted to

University of Electronic Science and Technology of China

Major: **Enterprise Management**

Author: **Yan Ruzhen**

Advisor: **Prof. Zeng Yong**

School: **School of Management and Economics**

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

作者签名：_____ 日期：_____ 年 _____ 月 _____ 日

论文使用授权

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技大学可以将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、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：_____ 导师签名：_____

日期：_____ 年 _____ 月 _____ 日

摘要

在传统投资理论假设下，金融市场具有完美的流动性，投资者提交的所有订单均可以快速、无隐性交易成本地被执行，此时的投资者只需关注在不同市场环境下如何构建最优投资组合。然而，在现实证券市场上，受到市场流动性有限的影响，投资者所提交的订单在执行过程中可能会产生较大的隐性交易成本，特别是价格冲击。为了减少这种价格冲击，投资者通常利用算法交易将大额订单拆分为多个中、小规模子订单，并根据市场环境的变化择机逐次提交。现有对于算法交易的研究并没有结合我国证券市场特征，分析价格冲击的度量与主要影响因素；没有考虑机会成本等隐性交易成本对算法交易策略的影响，也没有分析算法交易策略对投资组合选择的影响。投资者在实际使用算法交易时都将面临这些问题，因此有必要对这些问题展开深入研究。

本论文立足于国内外算法交易的研究现状，分析了投资者在交易过程中产生的隐性交易成本、度量方法以及主要影响因素；研究了投资者在最小化交易成本目标下如何根据具体市场环境制定最优算法交易策略的问题；分析了算法交易策略对投资组合选择的影响。本论文主要研究内容和结论如下：

首先，分析了投资者在交易过程中所面临的各种隐性交易成本；给出了计算价格冲击时利用交易量加权平均价格作为基准价格的理论依据；利用我国的高频交易数据，估计了价格冲击，分析了价格冲击的主要影响因素，并对比这种影响在日内不同交易时段的差异。研究结论表明，对中等规模和小规模股票而言，订单规模是影响价格冲击的显著因素，并且订单规模越小，价格冲击也越小；由于大规模股票的流通市值和成交量较大，投资者的订单可能会隐藏在众多其他投资者订单中进行交易，所以大规模股票订单规模对价格冲击的影响并不显著；与其他交易时段相比，在每天开盘后的第一个交易时期内，订单规模对价格冲击的影响最小。

进一步，针对许多大盘股股票中部分流通股长期处于不流动状态的情形，提出了一个股票的“真实”流动性指标，并利用股票成交金额与流通市值（去除长期不流通部分后的流通市值）的比值来衡量；同时，利用我国证券交易所的高频交易数据，分析了“真实”流动性对价格冲击的影响。研究发现，“真实”流动性

对股票价格冲击具有显著的负向影响。股票流通市值对价格冲击的影响并不显著，虽然大盘股股票的流通市值非常大，但是其很大部分流通股处于不常流动状态，导致其“真实”流动性较差。在年底阶段，受基金排名等因素的影响，基金公司在调仓时应该特别关注那些“真实”流动性较差的股票，以防止其他基金公司的“砸盘”行为；从监管的角度而言，监管层在年底时应该重点监管那些“真实”流动性较差的大盘股股票，以防止出现人为的价格操纵行为。

其次，利用最优化理论和方法，针对投资者的订单未全部执行的情形，提出了机会成本的度量方法，在最小化隐性交易成本的目标下分析如何制定最优交易策略的问题，并针对可预期未来成交量的投资者，给出了相应的最优交易策略。研究结论表明，本文所提出最优交易策略的交易成本均小于常用的 VWAP 交易策略，表明采用此交易策略可以为投资者减少交易成本，提高投资收益，也为投资者制定合理交易策略提供重要的参考依据。

最后，分析了投资者在考虑算法交易策略影响下如何构建投资组合的问题，并利用我国深圳证券交易所的历史交易数据分析了投资组合不同调整频率对投资收益的影响。研究表明，在考虑了算法交易策略的影响下，投资者的投资组合调整并不是越频繁越好；在构建投资组合时，投资者必须要综合考虑股票的预期收益、风险以及交易成本等因素。在对比分析了投资者分别在一年、半年、一个季度、两个月调整一次投资组合时的总收益情况，发现投资者在每一季度调整一次投资组合时的总收益最大。

关键词：中国股票市场，算法交易，高频交易，交易成本，价格冲击

ABSTRACT

According to the assumptions of traditional investment theory, the orders can be quickly executed at no invisible costs in the financial market with perfect liquidity. In this case, the investors will mainly be concerned with the topic of how to construct the optimal portfolio under various market conditions. However, the realistic stock market is limited with liquidity. The investors have to bear transaction costs, especially the price impact cost, when they execute their orders. In order to reduce the price impact costs, the investors usually split the large orders into several small orders, and then choose the optimal moment to submit to the market by algorithmic trading. Nowadays, existing researches related to algorithmic trading have not analyzed the estimation and main factors of price impact costs in Chinese securities markets, and not considered the influences of the opportunity cost and other invisible transaction costs on algorithmic strategies, and not analyzed the portfolio selection from the view of algorithmic trading strategy. These issues are inevitable in practical applications and need further studies.

Based on the current researches of algorithmic trading, this dissertation analyzes the transaction costs, the measuring methods of transaction costs, and the major influential factors in the trading process. Then, this dissertation studies how to construct the optimal algorithmic trading strategy under the objective of minimizing transaction costs. Lastly, this dissertation researches the effects of algorithmic trading strategies on portfolio selection. The contents contain three aspects as follows.

Firstly, this dissertation analyzes all kinds of transaction costs in the trading process, develops theoretical evidence when using volume weight average price as a benchmark price in the course of estimating the price impact. Using the high-frequency data of Shenzhen securities market, this dissertation estimates the price impact cost and analyzes its related influential factors, and compares the differences of those influences at different trading periods. The results show that the order size is significantly correlated with the price impact in the case of middle-cap and small-cap stocks. The smaller the order size is, the smaller the price impact will be. Considering the large market value and trading volumes in the large-cap stocks, the investor's orders might be

traded hiding among a multitude of other orders, which leads to the insignificant correlation between the order size and the price impact in the case of large-cap stocks. In addition, compared with other trading periods, the effect of order size on the price impact was the smallest during the first trading period after the opening.

In order to describe the phenomenon that some outstanding shares do not participate in transaction, this dissertation develops an indicator to measure the liquidity of those stocks. The indicator is calculated by the ratio of the turnover to the market capitalization of tradable shares. Using the high-frequency data of Chinese securities markets, this paper analyzes the factors influencing the price impact, including the new liquidity indicator. The results show that this indicator is significantly negative correlated with the price impact. The market capitalization of tradable shares is insignificantly correlated with the price impact. However, the large-cap stocks may have the worse liquidity if most shares are actually in the state of illiquidity. Therefore, at the end of the year, the funds should pay attention to those stocks with lower liquidity in order to avoid the unfavorable behaviors from other companies. Meanwhile, the supervision organization should also pay attention to the large-cap stocks with lower liquidity in order to avoid price manipulation.

Secondly, considering the situation that only some of orders can be executed on time, this dissertation develops a method to estimate the opportunity cost, and establishes a new algorithmic trading strategy to minimize implicit trading cost by using the optimization theory and methods. Moreover, this paper gives an analytical solution in the special case that investor can predict the total trading volume. The results show that the performance of our optimal algorithmic trading strategy is better than VWAP strategy. This new algorithmic trading strategy can effectively reduce the trading cost, improve the investment return, and provide an important basis for selecting the optimal trading strategy.

Lastly, this dissertation studies the influences of the algorithmic trading strategy of the portfolio selection problem, and then analyzes how the frequency of investment portfolio adjustment affect portfolio returns by using the historical trading data in Shenzhen stock market. The results show that it is not the best to frequently adjust investment portfolios. The investors should consider the factors such as the stock expected return, risk and transaction costs, etc. After the comparisons of the total profits

ABSTRACT

with portfolios adjustment at the interval of one year, semi-annual, one season, and two months, this dissertation finds that investors can achieve the maximum return when they adjust their portfolios quarterly.

Keywords: Chinese securities markets, algorithmic trading, high-frequency trading, transaction costs, price impact

目录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 算法交易概述	2
1.3 文献综述	7
1.3.1 隐性交易成本的研究	8
1.3.2 算法交易策略的研究	10
1.3.3 算法交易策略对投资组合的影响	12
1.4 问题提出	13
1.5 本文的主要内容及结构安排	15
1.6 本文的主要创新点	17
第二章 隐性交易成本中价格冲击的估计与影响因素研究	19
2.1 引言	19
2.2 交易成本的构成与度量	20
2.2.1 隐性交易成本	20
2.2.2 显性交易成本	27
2.3 基于交易量加权平均价格的价格冲击度量与影响因素研究	29
2.3.1 交易量加权平均价格的理论依据与价格冲击的度量	29
2.3.2 实证研究设计	31
2.3.3 样本数据	32
2.3.4 实证结果与分析	33
2.4 基于股票流动性的价格冲击研究	35
2.4.1 实证研究设计	38
2.4.2 样本数据	40
2.4.3 实证结果与分析	40
2.5 本章小结	50
第三章 基于价格冲击的算法交易策略研究	52
3.1 引言	52
3.2 受价格冲击和机会成本共同影响的交易模型	53

3.2.1 模型描述	53
3.2.2 每个交易时期的订单成交概率都相等	55
3.2.3 所有交易时期订单的成交概率不一致	55
3.2.4 数值示例	57
3.3 受价格冲击、机会成本与择时风险等因素影响的算法交易策略	68
3.3.1 模型描述	68
3.3.2 可预期未来成交量	69
3.3.3 数值示例	70
3.4 本章小结	77
第四章 基于算法交易策略的投资组合构建研究	79
4.1 引言	79
4.2 均值-方差模型与隐性交易成本	80
4.2.1 均值-方差模型	80
4.2.2 算法交易策略的隐性交易成本	82
4.3 模型构建与结果	83
4.3.1 基于线性隐性交易成本的投资组合选择模型	83
4.3.2 基于非线性隐性交易成本的投资组合选择模型	85
4.4 本章小结	89
第五章 结论与研究展望	91
5.1 全文总结	91
5.2 研究展望	93
致谢	95
参考文献	96
附录	107
作者攻读博士期间完成的论文	114
作者攻读博士期间参加的科研项目	115

第一章 绪论

1.1 引言

随着经济全球化的高速发展，资本市场日益繁荣，出现了许多规模巨大的养老基金、对冲基金等机构投资者。由于受到证券流动性有限的影响，机构投资者在短时间内大量买入或卖出证券会产生较高交易成本^①。为了减少这种交易成本，投资者迫切需要一种低廉高效的交易方法；同时，计算机技术、通信技术的不断进步促使交易市场电子化的快速发展。算法交易正是产生于这一背景下，算法交易利用计算机程序制定具体的交易策略，决定投资者的交易时间、交易价格、交易数量。

与传统的交易方式相比，算法交易具有非常明显的优势。算法交易通过将大额订单拆分为多个中、小规模子订单，降低了订单执行过程中对市场的冲击；算法交易是利用计算机程序制定的交易策略，避免了交易过程中可能出现的人为因素干扰；同时，金融市场上的很多交易机会都是转瞬即逝，比如外汇市场上的三角套利等，这种短暂的可获利时机往往都是在数秒之内，投资者在依靠传统的人工交易时无法抓住这类交易机会，而算法交易凭借计算机快速反应速度和强大计算能力，利用相应的数学模型，根据事先确定好的目标和约束条件，可以把握住这类短暂的交易机会，这一点对于高频交易者尤为重要；利用算法交易还便于在交易后进行成本分析，继续改进算法。

与国外的研究相比，我国对于算法交易的研究起步较晚，对算法交易的相关研究还比较少，但随着计算机和通讯技术的快速发展，我国证券市场已初步具备实施算法交易的硬件条件，而且量化思想也开始被普通投资者所接受。目前，国内的一些证券公司也已经逐步认同算法交易，并对算法交易开展了一定的研究，甚至有些公司已经推出了一些算法交易的相关产品，如深圳国泰安信息技术有限公司推出了“国泰安算法交易系统”、上海海通证券也推出了“海通彩虹算法交易平台”，同时光大证券、中银国际、招商证券等公司也都在积极研究和开发各自的算法交易系统，但是大多数证券公司对算法交易的研究和使用还仅限于介绍和引

^① 此处的交易成本主要是指价格冲击。价格冲击是指投资者订单对股票价格所造成的影响。这种影响一般是由于短时间内市场流动性不足，以及订单传递的信息所造成的。投资者的订单规模越大，其传递的信息越多，对市场上短时间内流动性的需求也就越大，此时也就越容易对股票价格造成较大的影响，交易成本也就越大。

进，目前所提出的算法交易策略也是最简单的几种交易策略，如交易量加权平均价格交易策略、时间加权平均价格交易策略等。在 2013 年，光大证券量化交易平台出现的“乌龙指”事件（参见附录 1），也表明我国证券公司对算法交易的研究还有待于进一步提高和完善。因此，结合我国证券市场特点，对算法交易开展相应研究具有十分重要的实际意义。

本章首先介绍算法交易的基本概念；然后梳理常见的算法交易策略；继而从交易成本的度量、算法交易策略的制定、以及算法交易对投资组合的影响三个方面分析研究现状，评述相关文献；接着提出本文的研究问题、研究内容和结构安排，并描述全文研究框架；最后阐述本文的主要创新点。

1.2 算法交易概述

现代投资组合理论为投资者如何合理、有效地构建投资组合提供了重要的理论依据。投资者通过均值方差模型的启发，利用分散投资的方式，根据自身风险偏好有效地权衡投资组合的收益和风险。投资者在短时间内的数量买入或卖出证券会对证券价格造成较大的冲击，导致投资者很难在交易前预期的价格上完成交易（Chakravarty, 2001）^[1]，因此，机构投资者会专门雇佣交易员负责交易，尽可能地减少交易过程中产生的交易成本，以期获得有利的成交价格。算法交易（Algorithmic trading）的出现在很大程度上替代了交易员在这一方面的工作，采用算法交易后，交易员不用再紧盯着交易平台，时刻准备进行手工执行，计算机会自动帮助交易员选择交易时间、订单大小、成交价格等指标，并在市场满足条件自动进行操作。

目前，学术界和业界对算法交易的定义还没有形成统一的认识（Aldridge, 2013）^[2]。Domowitz 和 Yegerman（2005）^[3]认为算法交易是为达到某一特定目标，利用计算机程序自动执行订单的交易方法。Hendershott 和 Moulton（2011）^[4]认为算法交易是利用计算机程序和算法自动提交订单，并对所提交的订单进行后续管理的交易方法。刘逖（2012）^[5]认为对算法交易的理解可以从两个方面来分析。从广义上看，算法交易是利用计算机程序自动制定交易决策、提交订单，并在整个交易过程中有效管理订单的一种交易技术，包含了投资组合选择、交易策略制定与执行等；从狭义上看，算法交易是一种订单执行策略，是借助计算机高速运算速度，利用特定数学模型，并依据交易前确定好的目标和约束条件，制定订单提交策略，以便完成预定数量的证券交易。

一般而言，算法交易是利用计算机程序和算法，根据一定规则自动决定订单的提交时间、订单规模、委托价格以及订单类型的交易方法。本论文所研究的算法交易主要是指狭义上的算法交易，分析的重点是针对投资者已构建投资组合的执行问题，也就是在整个投资过程中的订单执行部分，如图 1-1 所示。

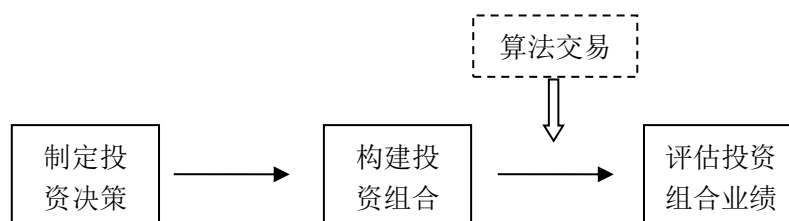


图 1-1 投资过程

算法交易自上世纪 70 年代末出现于金融市场上以来，受到了众多机构投资者的青睐。在证券市场上，由算法交易所完成交易量的比重也在逐年增加。现在许多机构投资者都将算法交易作为促进自身发展的重要源泉（陈梦根，2013）^[6]。

根据美国 Aite Group 的统计数据显示：在 2006 年欧洲和美国股票市场上，由自动交易系统或算法交易完成的交易量大约占市场总交易量的三分之一左右。在 2011 年的美国证券市场上采用算法交易完成的交易量已占美国证券市场上的总交易量的 63%，而在欧洲市场上这一占比也已经达到 32%，相对而言，亚洲市场发展的略显滞后，在 2011 年亚洲市场上的总交易量中大约有 20% 是采用算法交易完成；预计在 2014 年的美国、欧洲、以及亚洲证券市场上，采用算法交易完成的交易量将会分别占到其市场总交易量的 65%、42%、31%（AITE Group，2012）^[7]，如图 1-2 所示。

在证券市场上，投资者在交易过程中一般都会根据自身情况设计出相应的最优算法交易策略。因此，证券市场上的算法交易策略种类繁多，适用情形各有不同。经过近几十年的快速发展，目前在证券市场上已经出现了许多有效的交易算法，如交易量加权平均价格算法、时间加权平均价格算法、交易量固定百分比算法等。本章将介绍几种投资者比较常用的算法交易策略。

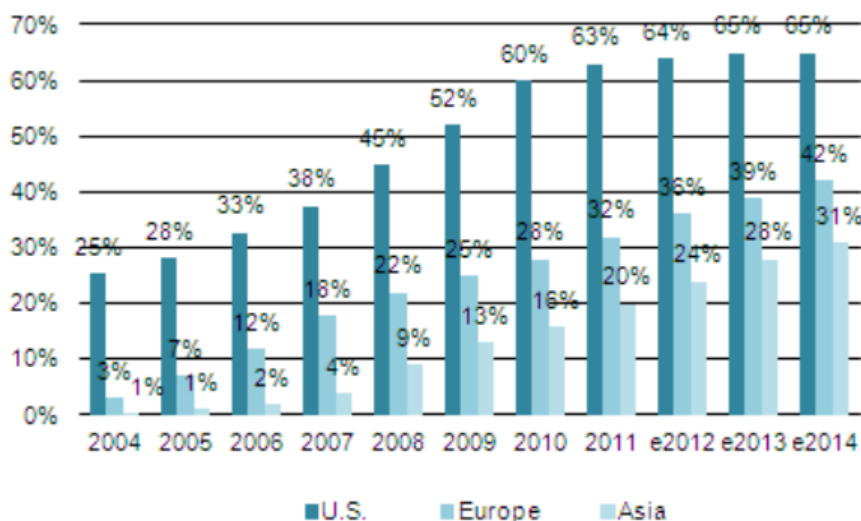


图 1-2 算法交易发展变化图

（1）交易量加权平均价格交易策略（VWAP）

交易量加权平均价格（Volume weighted average price, VWAP）交易策略是将大额订单拆分为多个中、小规模子订单，并根据市场环境的变化择机逐次提交，以使其成交价尽可能接近市场交易量加权平均价格的一种交易策略（Madhavan, 2002）^[8]。此交易策略可以有效地减少短时间内大额订单对证券价格的冲击，是实业界较为常用的一种算法交易策略。根据 THE TRADE 公司的相关统计，2005 年美国证券市场上采用算法交易执行的交易量中，大约有 50% 都是利用 VWAP 交易策略完成的。其中，直接利用 VWAP 交易策略完成交易的约占 27% 左右，还有 23% 左右的交易量是利用投资者特别定制的 VWAP 交易策略完成（镇磊，2010）^[9]。

VWAP 交易策略的目的是利用合适的订单提交策略，最小化投资者的交易成本。由于投资者并不知道未来交易日当天市场的总交易量情况，因此，投资者需要根据最近一段时间（通常是一个月）内交易数据来预测交易日当天市场预期成交量，并将整个交易时期划分为多个交易时间段，根据每个时间段内市场交易量占总交易量的比值确定此时段内应该提交的订单规模。因此，VWAP 交易策略的制定一般也可以分为两个步骤：将交易日划分为多个时间段，预测每一时间段内市场交易量占整个交易日内市场交易量的比例；按照这一比例将总订单拆分为多个子订单，并在每一交易时段初期进行提交。

在对股票未来价格趋势没有任何预测的情况下，VWAP 交易策略是最优的算法交易策略，其订单执行价格等于交易时期内的市场交易量加权平均价格。投资者的目标是订单平均成交价格尽可能等于交易量加权平均价格，在交易时期内的

订单平均成交价格 (P_{avg}) 为:

$$P_{avg} = \sum_{t=1}^m w_t p_t \quad (1-1)$$

其中, p_t 表示在 t 时期订单的成交价格; w_t 表示在 t 时期所提交订单规模占总订单规模的比例; m 是总的交易时期。

在交易时期内的交易量加权平均价格可以表示为:

$$VWAP = \frac{\sum_{t=1}^m v_t p_t}{\sum_{t=1}^m v_t} = \sum_{t=1}^m \alpha_t p_t \quad (1-2)$$

其中, α_t 表示在 t 时期内市场交易量占交易时期内市场总成交量的比例。

采用这一交易策略投资者的目标就是使得订单的平均成交价格等于交易量加权平均价格, 因此可以用如下数学模型表示:

$$\text{Min } \eta = (VWAP - P_{avg})^2 \quad (1-3)$$

由一阶条件可知:

$$\frac{d\eta}{dx} = 2(w - \alpha)^T p^2 = 0 \quad (1-4)$$

求解上式可得:

$$w = \alpha \quad (1-5)$$

其中, α 是一个 $m \times 1$ 维的列向量。

由于该模型的二阶条件大于零, 即:

$$d^2\eta/dw^2 > 0 \quad (1-6)$$

因此, VWAP 交易策略就是投资者的最优交易策略。

(2) 时间加权平均价格交易策略 (TWAP)

时间加权平均价格算法 (Time weighted average price, TWAP), 是投资者将整个交易时期划分为多个特定的时间段, 并在每个时间段内平均提交订单的交易策略。

TWAP 交易策略是一种非常简单的平均提交订单策略, 其目的在于最小化价格冲击的同时, 促使投资者达到一个平均成交价格。此交易策略主要是应用于投资者无法获取历史交易信息, 或投资者订单规模远小于市场流动性。

(3) 交易量固定百分比交易策略 (VP)

交易量固定百分比交易策略（Volume participation, VP）是指投资者按照市场交易量的某一比例提交订单的交易策略。

采用此交易策略的投资者主要是希望紧跟市场变化趋势，如果市场的交易量在某一时间突然增加，则此时投资者所提交的订单规模也会相应增大；反之，如果股票交易量减小，则投资者的订单规模也会进行相应的减少。由于此交易策略总是跟风操作，所以其交易成本可能会比较大。

（4）执行短缺算法交易策略（IS）

对于规模较大的证券交易，如果投资者一次性全部按市价提交订单，这种交易行为将会造成很大的价格冲击。为减少这种价格冲击，投资者可能会将此订单拆分为多个中、小规模子订单进行分别提交，但是这种交易方式会使得投资者面临未来股票价格、市场流动性等因素发生变动的风险。

执行短缺算法交易策略（Implementation shortfall, IS）是按照投资者的风险偏好，权衡交易过程中的成本和风险。IS 等于订单的实际成交金额与预期目标金额之间的差额，再去除交易过程中的一些固定交易成本等。在一定的风险承受水平下，使得订单成交价格与预期目标价格之间的差额最小（详见附录 2），这种算法交易策略在开盘初期的订单提交量比较大，是一种比较典型的前期大量成交的算法交易策略（Almgren 和 Chriss, 2001）^[10]。

（5）基准价算法交易策略（Price in line）

如果股票价格与基准价格接近，则此交易策略将加大订单的提交数量；若股票价格远离基准价格，则减少订单数量。同时，此交易策略还必须在规定时间内完成交易。此交易策略总的基准价格一般是股票交易的前一天收盘价。此交易策略使用于哪些对基准价格比较敏感的投资者。

（6）隐藏交易单算法交易策略（Hidden）

在股票价格未达到投资者预期值时，投资者的订单会一直处于隐藏状态。一旦市场中的股票委托价达到预期值，投资者将立即提交订单，以尽量确保订单在该价位上成交。如果在预期值价格下市场上的委托量不能满足投资者要求，此交易策略要求投资者继续等待，直至出现合适的交易机会。

（7）紧盯市场算法交易策略

紧盯市场交易策略是随时根据市场环境变化情况调整所提交的限价订单规模，如果投资者计划买入或卖出一定数量的股票，则可以按照以下步骤进行：

Step1: 对于买入订单，需要按照当前的最高买价提交一定数量的限价交易指令，并等待结果；反之，如果是卖出订单，则需要当前最低的卖价进行提交一定

数量的限价订单，并等待结果；

Step2: 如果订单未执行，并且市场上股票的成交价格已经渐渐偏离预计成交价格，则撤销此限价订单，然后重新按现有市场情况执行第一步；

Step3: 如果提交的所有限价订单全部执行完毕，则重复第一步，直至完成所有交易或到了执行交易的最后期限。

(8) 搜寻者算法交易策略 (Sniffers)

此交易策略是先提交少量订单，并以此订单为诱饵，判断市场上是否存在对手的交易策略。若存在对手的交易策略，则可以根据对手情况调整自己的交易策略。搜寻者算法交易策略通常用于搜寻其他交易商的交易行为。此交易策略的目标是寻找市场中其他交易商正在使用的算法交易软件，从中获得交易机会。

随着证券市场、计算机技术以及通讯技术的高速发展，算法交易正日益逐渐成为一种重要的证券交易方式。与传统的人工交易方式相比，算法交易具有明显的优势：

(1) 算法交易的执行速度很快，能够发现一些在传统人工交易方式时所无法发现的交易机会 (Chang 等, 2013; Bowe 等, 2013) ^[11, 12]。在证券市场上，很多交易机会的存在时间都是非常的短暂，有时一些可获利的交易机会往往仅存在几秒钟时间。对于传统的人工交易方式而言，这样的交易机会很难抓住，但对于算法交易而言，凭借计算机的运行速度可以比较容易的抓住类似的交易机会，从而获利。

(2) 采用算法交易有利于减少交易成本，提高投资收益。利用算法交易，投资者可以在一定程度上减少交易成本，特别是价格冲击成本 (Eisler 等, 2012; Kothare 和 Laux, 1995; Brownlees 等, 2010) ^[13-15]。同时，由于订单都是采用计算机自动执行，所以投资者也在一定程度上节省了人力成本。

(3) 采用算法交易有利于投资者在交易过程中减少人为因素的影响。在实际的操作中，有些交易员可能会出于某种非理性原因违反公司的相关规定，从而给公司带有一些较大的风险。利用算法交易和相应的监管措施，可以保证交易系统按照投资者事先设定好的交易策略进行交易，从而避免交易员主观情绪等因素的影响。

1.3 文献综述

一个算法交易策略优劣的主要评价标准是交易成本。交易成本，也称为交易

费用，是投资者在整个交易过程中所付出全部费用的总和（Shleifer, 1986; 赵胜民, 2010）^[16, 17]。按照是否可以在市场中直接进行观测可将交易成本分为显性交易成本（Explicit cost）和隐性交易成本（Implicit cost）。隐性交易成本是投资者总交易成本中的最重要组成部分。投资者只有在明确了隐性交易成本的构成、度量以及影响因素后，才能根据具体的市场环境设计出最优算法交易策略，也才能够进一步分析算法交易策略对投资组合的影响。因此，本论文将首先分析隐性交易成本的研究现状；然后分析算法交易策略的相关研究；最后分析算法交易策略对投资组合构建影响的研究现状。

1.3.1 隐性交易成本的研究

传统投资理论假设，金融市场具有完美的流动性，投资者所提交的任何订单均可无隐性交易成本地被执行，因而投资者只需关注在不同市场环境下如何构建最优投资组合。然而，在现实证券市场上，受市场流动性有限的影响（Hasbrouck, 2007; Flood, 1991）^[18, 19]，投资者所提交的订单在执行过程中可能会产生较大的隐性交易成本，特别是价格冲击成本。如果交易成本过高，那么投资者的投资收益可能会低于预期值。Florackis 等（2011）^[20]、Kissell 和 Lie（2011）^[21]、Leshik 和 Cralle（2011）^[22]指出隐性交易成本是投资者总交易成本中的最主要组成部分，并且价格冲击是隐性交易成本的最重要组成部分之一，因此投资者必须重视对交易成本的研究和控制，特别是价格冲击成本。

为了估计价格冲击成本，Kyle（1985）^[23]在理性预期框架下推导出市场可预期交易量对证券价格变化的影响是一种线性关系，并利用交易量与价格变化的回归系数来刻画价格冲击程度，有些学者也将此系数称为价格冲击系数。Glosterm 和 Harris（1988）^[24]考虑了带交易方向的交易量对价格变化的影响，认为价格的变化与带正负号的交易量存在一个正向关系。Lillo 等（2003）^[25]构建了一个价格冲击函数，指出价格冲击与市场的交易量存在一个正相关关系，而与市场流动性负相关。除此之外，Sornette 等（2002）^[26]认为订单不平衡程度对证券价格的冲击是线性冲击过程。进一步，陈收等（2010）^[27]分析了订单差、市场交易量变化对价格冲击的影响，认为订单差、市场总交易量变化与证券价格变化都呈正相关关系。Alzahrani 等（2013）^[28]、Ryu（2013）^[29]分别对沙特证券市场和韩国期货市场的价格冲击进行了研究，研究发现订单规模与价格冲击存在一个正相关关系。Huberman 和 Stanzl（2004）^[30]、Almgren 等（2005）^[31]从理论上证明了永久性价格冲击成本与交易量的关系是线性的，而临时性价格冲击与交易量间的关系可以

是线性的，也可以是非线性的。

对于特定的投资者而言，当采用某种交易策略进行交易时，不但需要估计市场交易量对证券价格变化的影响程度，更需要考虑自己的订单对市场造成的额外冲击。事实上，从交易策略角度来看，真正的价格冲击是指投资者订单被执行后所引起证券价格的变化（Kissell 和 Glantz, 2003; Keim, 2003）^[32, 33]。对于一个买单而言，价格冲击的大小等于订单执行价格与市场上不存在此订单时的证券价格的差额。然而，在现实市场上，由于这两个价格是不可能同时存在，因此在计算价格冲击成本时，许多学者提出利用订单成交价格与某一基准价格（刻画市场上订单不存在时的证券价格）的差额来衡量价格冲击，如昨日收盘价（Kogan 等, 2006）^[34]、交易日的证券最高价和最低价的平均值（Blum 等, 1986）^[35]、交易日的证券最高价、最低价、开盘价、收盘价的平均值（Domowitz 等, 2001）^[36]等。然而，这种采用一个或几个特殊时刻的证券价格作为基准价格，并不能反映在整个交易时期内证券的所有交易信息。Berkowitz 等^[37]提出了一个基准价格——交易量加权平均价格（Volume weighted average price, VWAP），并利用订单的执行价格与 VWAP 基准价格的差额来度量价格冲击。所谓的 VWAP 基准价格是将某一时期交易量占总交易量比值作为权重，对整个交易时期内的成交价格进行加权平均。

投资者在执行投资决策过程中，即便面对的是相同市场环境，投资者所提交的买单和买单对市场所造成的价格冲击可能会存在一定的差异（Keim 和 Madhavan, 1996; Ahn 等, 2010; Han 等, 2012; Ryu, 2012; Schlag 和 Stoll, 2005）^[38-42]。Hu（2009）^[43]认为造成这种差异的主要原因可能是在于计算价格冲击时采用了不同的基准价格，从而导致了投资者买单和卖单价格冲击的差异；而其他一些学者则认为这种差异主要是由市场总成交量、订单买卖不平衡、信息、证券市场发展程度等因素造成的（Alzahrani 等, 2012; Lehmann, 2003; Kang 和 Ryu, 2010; Bank 和 Baum, 2004; Schied 和 Schoneborn, 2009; Hopman, 2007）^[44-49]。

为了减少价格冲击，许多投资者都会将大额订单拆分为多个中、小规模的子订单，并采用限价订单的方式逐笔提交委托单。显然，这种交易方式增加了订单总的执行时间；同时，由于证券市场中证券价格的高度不确定性，投资者事前制定的订单提交策略并不能保证每一阶段订单都能全部按时成交。事实上，根据 Tkatch 和 Alam（2007）^[50]对特拉维夫证券交易所的研究发现，市场上大约只有 48% 的订单能够完全成交。由于订单未能全部执行而给投资者带来的损失，称之为机会成本。机会成本会是证券交易过程中的一项不可忽视的因素（Wagner 和 Edwards, 1993）^[51]。

目前很多文献在计算价格冲击时虽然都是利用的 VWAP 基准价格，但是并没有结合我国证券市场特征分析价格冲击的主要影响因素，以及在日内不同交易时段的差异。

1.3.2 算法交易策略的研究

近几十年来，一些学者与业界专家对算法交易开展了许多研究，并提出了一些切实有效的算法交易策略，如交易量加权平均价格算法交易策略（VWAP）、时间加权平均价格算法交易策略（TWAP）、交易量固定百分比算法交易策略（VP）等。VWAP 交易策略是将大额订单拆分为多个中、小规模子订单，并根据市场环境的变化择机逐次提交，以使其成交价尽可能接近市场交易量加权平均价格的一种交易策略，其在实业界是较为常用的一种算法交易策略。在 2005 年的美国证券市场，采用算法交易执行的交易量中约有 50% 都是利用 VWAP 交易策略完成的。其中，直接利用 VWAP 交易策略完成交易的约占 27% 左右，还有 23% 左右的交易量是利用特别定制的 VWAP 交易策略完成（镇磊，2010）^[9]。近年来，虽然采用 VWAP 交易策略的交易量占市场总交易量的比例逐渐减少，但 VWAP 交易策略仍然是构建其他交易策略的一项重要基准。

算法交易的主要目的是为投资者最大限度地降低交易成本，而要实现这一目标关键在于根据市场环境的变化设计出合理的算法交易策略，以确定订单最优的提交时间、价格以及数量（Johnson, 2006; Kim, 2010）^[52, 53]。Almgren（2003）^[54]考虑了当证券价格为一个随机变量，并且价格冲击是一个关于交易量的线性函数时，在最小化总交易成本的目标下给出了一个最优交易策略。进一步，Konishi（2002）^[55]对于证券价格和交易量都是随机变量，提出了一种按照 VWAP 基准价格进行交易的静态最优交易策略。仲黎明等（2002）^[56]针对价格冲击是一个关于交易量的线性函数情形，考虑了机构投资者在既定风险承受能力下期望损失最小的算法交易策略问题。Kissell 等（2004）^[57]分析了价格冲击成本和择时风险对投资者交易策略的影响，并分别基于开盘价基准和收盘价基准，在最小化总交易成本的目标下构建了相应的优化模型，并利用相应的数值示例给出了具体的交易策略。Kissell 和 Malamut（2006）^[58]分析了投资者同时考虑价格冲击成本和择时风险时的最优交易策略问题，引入一个常数交易速率，并且针对投资者面临所有时期预期市场成交量都相等的特殊情形给出了解析解。进一步，Monch（2009）^[59]、林辉等（2011）^[60]分别从订单执行的交易速率、流动性等的角度，分析了投资者所承担的交易成本情况，并给出了相应的最优交易策略。

算法交易是利用计算机程序自动为投资者完成交易，不同投资者的算法交易

策略可能会有很大差异；即便同一投资者在面临不同的市场环境时的算法交易策略也可能会有很大不同（Jovanovic 和 Menkveld, 2010; Foucault 和 Menkveld, 2008）^[61, 62]。在制定交易策略时，许多因素都可能会影响到投资者对算法交易策略选择，如交易风格、交易速度、交易频繁度、交易者经验和技术水平、交易成本以及硬件基础设施等（Aitken 等, 2012; Almgren 和 Lorenz, 2007; Cuoco 等, 2008; Almgren 和 Chriss, 1999）^[63-66]。

在交易过程中，投资者利用合理的算法交易策略可以有效地减少交易成本，提高投资收益，但是投资者利用算法交易在市场上进行交易的同时也会对其他投资者和证券市场产生一些影响。Chiarella 和 Lori（2002）^[67]、Schwartz 等（2006）^[68]认为算法交易减少了市场摩擦，优化了风险配置，提高了资产定价的效率。Gsell（2008）^[69]、Engle 等（2012）^[70]、Hendershott 和 Riordan（2013）^[71]、Brunnemeier 和 Pedersen（2009）^[72]、Berke（2010）^[73]、Schmitz（2011）^[74]认为算法交易的使用可以降低证券市场上的交易成本，提高证券市场的流动性。算法交易虽然可以减少投资者交易成本，提高市场流动性，但是可能会对证券市场带来较大风险。2010 年 5 月 6 日下午美国股市“闪电暴跌”，道琼斯 30 种工业股平均指数盘中一度下跌近千点，导致许多其他股票股价也大幅下挫。事后调查发现，造成这一现象的原因在于：一家交易公司的算法交易软件出现问题，该公司的计算机在短时间内自动向证券市场上提交了大量的卖出订单，导致市场上的巨大连锁反应。类似的事件在英国、日本、中国、马来西亚等证券交易所都曾经出现过。Lenglet（2010）^[75]、Biais 等（2012）^[76]认为算法交易存在巨大的负外部效应，算法交易的广泛使用，可能会对市场造成冲击，同时也对现行的监管体制提出了新的挑战。针对美国股市 2010 年 5 月 6 日的暴跌事件，Kirilenko 等（2011）^[77]指出，在面临市场崩盘等情形时，采用算法交易的投资者交易行为与股票价格变化方向是非常一致的，这种行为会加大股票价格的波动。因此，在使用算法交易时，投资者必须要对算法交易进行有效管控。

在现实证券市场上，面对不断变化的市场环境，大多数投资者都希望其交易策略可以根据市场变化情况进行及时调整。Bialkowski 等（2008）^[78]、Humphery-Jenner（2011）^[79]对 VWAP 交易策略进行了改进，利用一个动态模型来预测未来市场的交易量，并且可以针对市场上随机到达的新订单及时的调整交易策略。Obizhaeva 和 Wang（2013）^[80]考虑了流动性需求和供给如何影响投资者交易策略的问题，建立了一个基于限价订单簿上流动性需求和供给动态关系的交易模型，并给出了相应的最优交易策略。

在期货市场上,许多学者对隐性交易成本进行了研究。**Berkman** 等(2005)^[81]利用欧洲交易所 **FTSE100** 股指期货合约的相关数据对股指期货的价格冲击进行了实证研究,结果表明股指期货的价格冲击成本低于股票市场,并且股指期货买卖订单的价格冲击不存在非对称现象。**Frino** 和 **Oetomo** (2005)^[82]研究了悉尼期货交易所股指期货的价格冲击成本情况,发现股指期货市场的价格冲击成本要小于股票市场,并且期货市场的价格冲击主要是由临时性冲击构成。胡晓波(2011)^[83]指出在期现套利交易中固定交易成本、冲击成本以及期货头寸维持保证金成本是三个主要交易成本,占到了最终套利平均收益的 30%左右。黄伟(2009)^[84]研究了基于备用保证金和冲击成本的期货无套利定价区间模型,并对我国铜期货市场进行实证研究,提出了相应的交易时机选择策略。通过以上文献可以看出,期货市场上的冲击成本与股票市场中的冲击成本存在一定差异,并且期货市场冲击成本要明显小于股票市场。本研究主要考虑股票市场中的算法交易策略问题,所考虑的隐性交易成本主要是价格冲击、机会成本、价格升量以及择时风险。然而,目前很多文献在研究股票市场上的交易策略时大都仅是考虑价格冲击成本,并没有分析投资者在同时考虑机会成本、价格冲击等其他一些隐性交易成本时的最优交易策略的问题。

1.3.3 算法交易策略对投资组合的影响

投资者在选择投资组合时,不仅要考虑到预期收益,而且还应考虑可能出现的风险。作为现代投资组合理论的基础,1952年,**Markowitz**在假设投资者是风险厌恶的情况下,利用投资组合收益的均值与方差分别表示投资者的预期收益和风险,建立了均值-方差投资组合选择模型(**Markowitz**, 1952)^[85],奠定了现代投资组合选择理论的基础。

投资组合理论主要研究的是投资者在面对不确定环境下,如何有效配置投资者的财富以实现期望收益最大化与承担风险最小化之间的权衡。无论是在理论上,还是在实际应用中,投资组合选择问题都有着重要的学术价值和广泛的社会经济意义(**Leippold** 等, 2004; **Zhu** 等, 2004)^[86, 87]。

Markowitz 的投资组合模型是在许多理想假设条件下得到的,然而,在现实生活中,这些假设条件并不一定成立。事实上,投资者在执行投资组合的过程中,不同交易策略的交易成本存在很大差异,不考虑交易成本对投资组合选择的影响可能导致构建无效的资产组合(**Arnott** 和 **Wagner**, 1990; **Mitchell** 和 **Braun**, 2013)

[88, 89]。因此, 投资者在构建投资组合时需要考虑交易策略对构建投资组合的影响。Best 和 Hlouskova (2003)^[90]、Lobo 等 (2007)^[91]考虑了交易费用函数的形式为线性函数时的投资组合优化问题。陈志平等 (2005)^[92]、任大源等 (2012)^[93]考虑了在线性交易成本、预算、交易量等约束的情形下如何构建最优投资组合问题。Konno 和 Yamazaki (1991)^[94]利用期望收益的绝对偏差来刻画风险, 并提出了一个投资组合选择的线性规划模型, 也被称之为均值—绝对偏差模型。Young (1998)^[95]将投资者的投资组合收益的最小次序统计量作为风险的度量, 采用极小极大规则提出了一个关于投资组合选择的线性规划模型。Cai 等 (2000)^[96]将投资组合收益的最大期望绝对偏差作为风险的度量, 也给出了一个投资组合选择的线性规划模型, 并给出了相应的解析解。

在现实的证券市场上, 对于投资者而言, 特别是机构投资者, 其投资行为一般都是一个长期性的, 其投资组合往往会根据市场环境的变化, 适时地进行有效调整投资组合的头寸。投资者很少在期初构建投资组合后就一成不变的持有到投资计划期期末, 而是会根据市场环境的变化不断调整持有头寸。此时, 投资者在交易过程中所面临的交易成本并不一定是一个关于交易量的线性函数。Muthuraman (2007)^[97]、Pliska (1997)^[98]、Li 和 Ng (2000)^[99]等考虑了当投资者面临“V”型交易成本时, 利用动态规划方法分析了多期的均值方差模型问题。薛宏刚等 (2011)^[100]利用一个凹函数来拟合实际交易费用函数, 建立了均值-方差框架下的投资组合优化模型并给出了相应的求解算法。

以上文献主要是考虑了在给定交易成本函数情形下, 研究对投资者投资组合选择的影响, 并没有将交易策略的制定与投资组合选择结合起来进行分析, 也没有分析不同的投资组合调整频率对投资组合选择的影响。

1.4 问题提出

随着证券市场和计算机技术的快速发展以及交易所之间竞争的日益激烈, 越来越多的经纪商和机构投资者在证券交易过程中开始采用算法交易。在 2011 年, 美国股票市场上采用算法交易完成的交易量已占美国证券市场上总交易量的 63%; 而在欧洲市场和亚洲市场上, 采用算法交易所完成的交易量已经分别占到市场总交易量的 32% 和 20%。国外许多学者针对算法交易策略的设计、算法交易策略的成本以及算法交易的影响进行了广泛的研究, 但是还存在一些问题, 本文主要针对以下几个问题进行了研究。

第一，在现实的证券市场中，投资者能否获得预期投资收益，一方面是凭借其所构建的投资组合；另一方面是依靠在执行投资策略时对交易成本的有效控制。即便是一个具有某种优势的投资组合，如果其交易成本过高，那么此投资组合的收益可能会低于预期值，甚至可能出现亏损。因此，投资者必须重视对交易成本的研究和控制。投资者常用的 VWAP 基准价格与交易量对股票价格进行冲击后的期望值之间存在什么关系，这种关系的理论依据又是什么？在我国证券市场上，投资者的价格冲击主要受到哪些因素的影响？许多大盘股股票中的部分流通股长期处于不流通状态，这类股票的流动性如何，投资者在构建投资组合时对这类股票又应该如何取舍？这些问题对于投资者减少交易成本、提高投资收益具有十分重要的意义，也是本文必须要解决的一个重要问题。

第二，对任何机构投资者而言，一旦交易机会出现，并且拟配置的资金已确定，则其需要交易的证券数量就已经基本确定。然而，受到市场流动性有限的影响，投资者所提交的大额订单在执行过程中可能会产生较大的价格冲击。为了减少这种价格冲击，投资者一般会考虑将大额订单拆分成若干小额子订单择机逐次提交。然而，这种多阶段逐次提交的交易策略可能会导致订单无法全部按时成交以及由于证券价格变动而出现风险，从而产生机会成本和择时风险等交易成本。投资者在这种情形下应该如何度量机会成本？投资者在同时考虑价格冲击、机会成本、择时风险等交易成本时又应该如何制定最优算法交易策略？这些问题是投资者使用算法交易时所必须要面对的问题，也是本文一个亟待解决的问题。

第三，在现实证券市场上，投资者并不是处于一个无摩擦的市场环境，在执行投资组合过程中投资者面临着各种交易成本的影响。不同的算法交易策略之间的交易成本可能会存在很大差异，这种差异又会影响到投资组合的构建。算法交易策略如何影响投资组合构建是本文将要研究的一个重要问题。同时，由于投资者的投资组合并不是一成不变的，投资者可能会针对市场环境变化不断调整投资组合头寸。如果投资者对投资组合的调整过于频繁，则会产生较大的交易成本。投资者应该如何确定投资组合的调整频率是一个复杂且现实的问题，也是本文需要解决的重要问题。

隐性交易成本分析、算法交易策略的制定以及算法交易策略对投资组合的影响三个问题相辅相成、互相联系，构成了一个统一的整体。隐性交易成本的研究是分析投资者最优交易策略问题的基础；只有明确了隐性交易成本的构成、度量以及影响因素，才能够设计出最优算法交易策略，也才能够进一步分析算法交易

策略对投资组合的影响。这几个问题相辅相成、互相联系，本文将在统一的背景下将得到相关结论。

1.5 本文的主要内容及结构安排

本论文立足于国内外算法交易的发展现状，结合我国证券市场的具体特征，利用最优化理论和计量经济学的相关方法，分析了基于隐性交易成本的算法交易策略问题。隐性交易成本无法从市场上直接进行观测，主要包括价格冲击、机会成本等。由于隐性交易成本是投资者总交易成本中的最重要组成部分，并且在交易前不容易进行准确估计，所以对隐性交易成本的研究显得尤为重要。本文所考虑的隐性交易成本主要是指价格冲击、机会成本、价格升量以及择时风险；进一步，考虑了投资者在最小化交易成本的目标下，如何根据市场环境的变化制定最优交易策略的问题；最后，分析了基于算法交易策略的投资组合选择问题，并分析了不同投资组合调整频率对投资者总利润的影响。本论文结构安排如图 1-3 的技术路线图所示。

全文共分为 5 章，具体内容如下：

第一章，介绍算法交易的基本概念和常见的算法交易策略，从隐性交易成本的度量、算法交易策略的制定、算法交易策略对投资组合选择的影响三个方面分析了研究现状，并评述相关文献。进一步，提出了本文的主要研究问题、研究内容、以及结构安排，描述了全文研究框架述，阐述了本文的主要创新点。

第二章，分析交易成本的构成及其度量方法，并分析价格冲击成本的估计方法及其主要影响因素。利用 VWAP 基准价格计算投资者订单的价格冲击成本，指出投资者常用的 VWAP 基准价格就是交易量对股票价格进行冲击后的期望值，给出了相应的理论依据；在此基础上，利用我国深圳证券交易所创业板的高频交易数据，分析了投资者的订单规模、买卖价差、成交价格以及订单不平衡量等因素对价格冲击的影响，并分析了这种影响在日内不同交易时段的差异。进一步，针对许多大盘股股票中的部分流通股长期处于不流动状态的情形，提出了一个股票的“真实”流动性指标，其大小等于股票成交金额与流通市值的比值，并利用我国证券交易所的高频交易数据，分析“真实”流动性和股票流通市值等因素对价格冲击的影响。

第三章，分析了基于价格冲击成本等隐性交易成本的算法交易策略问题。在证券交易过程中，为了减少交易成本，投资者一般会将大额订单分拆为若干个中、

小规模子订单，并根据市场环境的变化择机逐次提交，但是这种交易方式可能会导致投资者的订单没有全部按时成交以及证券价格变动带来的风险。因此，在制定算法交易策略时，投资者不但要考虑价格冲击成本，还需要考虑机会成本和择时风险等其他隐性交易成本的影响。本章提出了一种估计机会成本的方法，并在最小化交易成本目标下，根据市场环境具体特征给出了相应的最优算法交易策略。

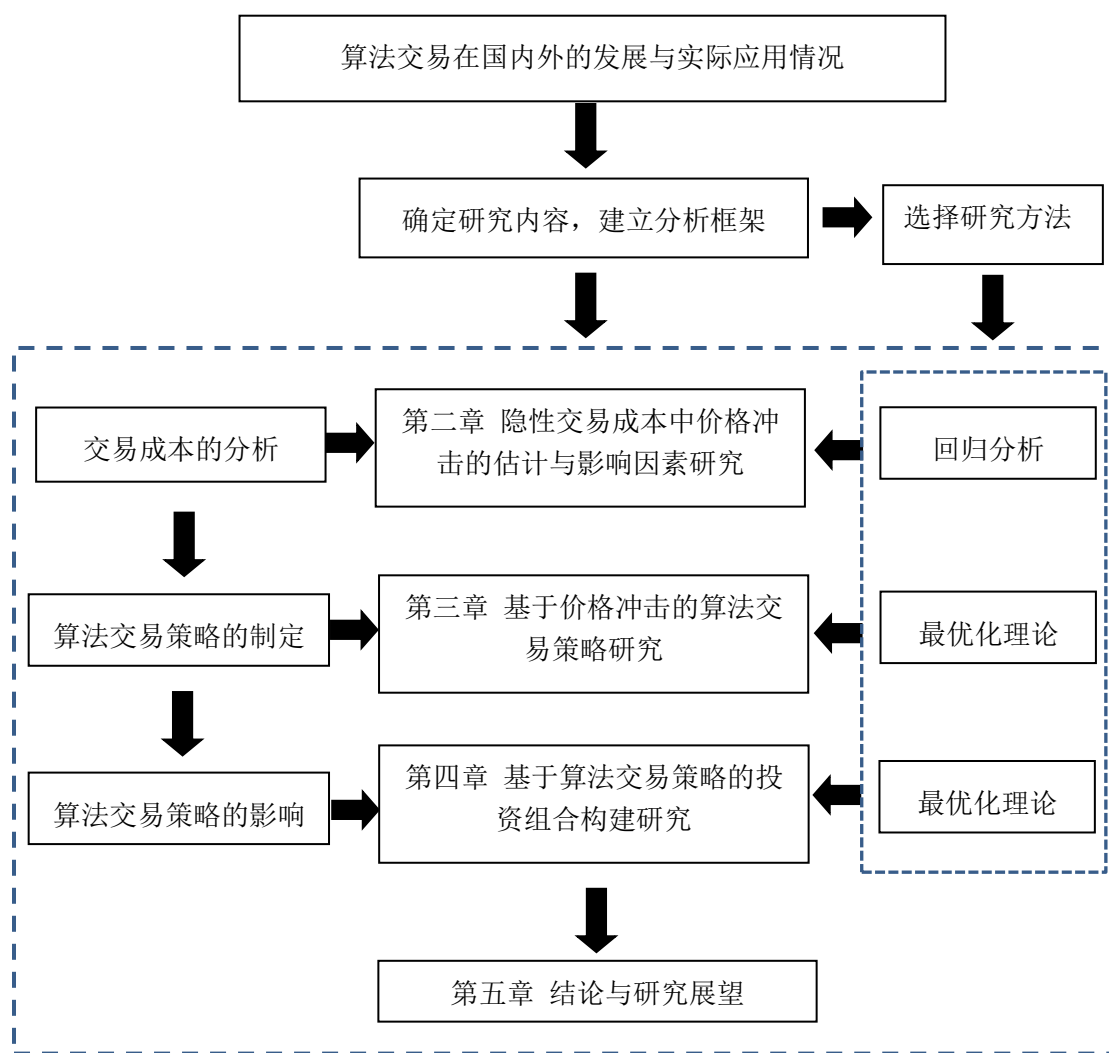


图 1-3 技术路线图

第四章，考虑了基于算法交易策略的投资组合构建问题。受到市场流动性等因素的影响，采用算法交易的投资者在执行投资组合过程中会面临着各种交易成本的影响。不同算法交易策略之间的交易成本会存在较大差异，这种差异又会反

过来影响投资组合的构建。本章考虑了算法交易策略对投资者最优投资组合的影响，利用我国深圳证券交易所的股票交易数据分析了投资组合的不同调整频率对投资者总利润的影响，并对比分析了投资者每年、每半年、每个季度、每两个月调整一次投资组合时的总利润情况。

第五章是全文总结和研究展望。

1.6 本文的主要创新点

虽然我国关于算法交易的研究和应用起步较晚，但是随着我国经济的高速发展和计算机技术的不断进步，我国证券市场已具备了实施算法交易的硬件条件，而且投资者也已经开始逐渐接受量化的思想，因此结合我国证券市场的特点，分析投资者隐性交易成本的度量与主要影响因素、考虑投资者在隐性交易成本影响下的最优算法交易策略等问题显得尤为重要。

本论文以算法交易的最新研究成果为基础，综合运用回归分析、最优化理论与方法，分析了算法交易策略的隐性交易成本，研究了算法交易策略的制定，考虑了算法交易策略对投资者投资组合的影响。相对于已有研究，本文结合我国证券市场高频交易数据分析了价格冲击成本的主要影响因素，并针对许多大盘股股票中部分流通股长期处于不流动状态的情形，提出了一个衡量股票流动性的指标；进一步，分析了投资者在同时考虑价格冲击、机会成本等隐性交易成本时的最优算法交易策略问题；最后，考虑了算法交易策略对投资组合构建的影响，并分析了不同投资组合调整频率对投资者总利润的影响。本文主要创新点具体体现在以下三个方面：

(1) 从市场微观结构理论的角度指出，**VWAP** 基准价格实际上是市场可预期交易量对证券价格进行冲击后的期望值，并给出了相应的理论依据；分析了订单规模、买卖价差、成交价格以及订单不平衡量等因素对价格冲击的影响，并对比分析这种影响在日内不同交易时段的差异；同时，针对许多大盘股股票中部分流通股长期处于不流动状态的情形，提出了一个股票的“真实”流动性指标，并分析“真实”流动性等因素对价格冲击的影响，相关研究结论可为投资者制定最优交易策略提供重要的参考依据。

(2) 针对投资者订单未全部执行的情形，提出了机会成本的度量方法，并结合具体的证券市场环境，给出了投资者在同时考虑价格冲击、机会成本、择时风险以及其他隐性交易成本时的最优交易策略，以期达到最小化交易成本的目标；

将此最优交易策略与投资者常用的 VWAP 交易策略进行了对比分析，研究发现此交易策略的交易成本小于 VWAP 交易策略。此研究的相关结论可以为投资者制定最优算法交易策略提供有效指导。

（3）在考虑了算法交易策略对投资组合构建的影响下，分析了投资组合不同调整频率对投资收益的影响，并对比分析了不同投资组合调整频率（一年调整一次、半年调整一次、一个季度调整一次、两个月调整一次）下的总利润情况，研究发现投资者在每一季度调整一次投资组合时的总利润最大。相关结论可为投资者在构建投资组合时提供具体指导。

第二章 隐性交易成本中价格冲击的估计与影响因素研究

2.1 引言

随着证券市场和计算机网络通信技术的快速发展以及交易所之间日益激烈的竞争，算法交易正势不可挡地席卷全球金融市场。算法交易策略的交易成本主要是产生于执行投资决策的过程中。投资者能否获得预期投资收益不但要凭借其所构建具有优势的投资组合，还要依靠有效的成本控制技术。一个具有某种优势的投资组合，如果其交易成本过高，那么此投资组合的实际收益可能会低于预期值，甚至可能出现亏损。理解交易成本的构成和主要影响因素，对于投资者减少交易成本、提高投资收益具有十分重要的现实意义。

价格冲击是投资者的订单在证券市场上执行后所引起的证券价格变化，其大小等于订单的执行价格与市场不存在此订单时的证券价格之间差额。显然，在现实证券市场上这两个价格不可能同时存在，因此，在计算价格冲击时，许多学者提出利用某一基准价格来刻画市场上不存在此订单时的证券价格，但是这种利用日内一个或几个特殊时刻的证券价格作为基准价格，并不能反映在整个交易时期内证券的所有交易信息。Berkowitz 等（1988）^[37]提出了一个交易量加权平均价格基准价格（Volume weighted average price, VWAP），这一基准价格是利用日内不同时段交易量占日内总交易量的比值作为权重，并利用此交易量加权平均价格来刻画订单不存在时的股票价格。本章借鉴 Kyle（1985）^[23]的思想，指出 VWAP 基准价格实际上是市场可预期交易量对证券进行冲击后形成的期望值。因此，对特定的投资者而言，VWAP 基准价格可看作是市场上不存在自己提交订单时的基准价格，在此基础上，投资者就可以准确地估计在执行特定订单时所需要额外承担的价格冲击成本。

价格冲击是投资者交易成本中的最重要组成部分之一，且不容易进行准确度量。本章利用深圳证券交易所的高频交易数据，估计了投资者的价格冲击，并分析了投资者的订单规模、买卖价差、成交价格以及订单不平衡量等因素对价格冲击的影响及其在日内不同交易时段的差异。进一步，针对许多大盘股股票中的许多流通股并没有经常处于流动状态的问题，本章提出了一个衡量股票“真实”流动性的指标，以交易量与价格变化的回归系数来刻画证券市场的价格冲击，并利

用我国证券市场高频交易数据，分析了“真实”流动性、流通市值、订单规模等因素对证券价格冲击的影响。

2.2 交易成本的构成与度量

按照是否可以直接在市场上进行观测，交易成本可以分为显性交易成本和隐性交易成本。交易成本还可以分为固定交易成本和可变交易成本。其中，固定交易成本是指手续费和各种税费等，其大小是按照交易金额的一定比例进行计算，并且这部分费用不会随着投资者交易策略的不同而变化；可变交易成本一般不会按照交易金额的固定比例收取，与投资者具体的交易策略有关。投资者采用不同的交易策略，其可变交易成本会存在很大差异。投资者在交易过程中所面临交易成本的具体分类如表 2-1 所示。

表 2-1 交易成本的构成与分类

	固定交易成本	可变交易成本
显性交易成本	佣金	买卖价差
	交易费	
	税费	
隐性交易成本	无	延误成本
		价格升量
		冲击成本
		择时风险
		机会成本

2.2.1 隐性交易成本

隐性交易成本是在证券交易过程中由于市场环境等因素的不确定产生的，隐性交易成本主要包括价格冲击、机会成本、延误成本、价格升量、择时风险等（Fersterberg, 2000; Hill, 2001, Wagner 和 Banks, 1992; Parlour, 1998）^[101-104]。隐性交易成本是投资者总交易成本中最重要的组成部分，并且无法在交易前进行准确估计，在交易后也无法准确测量，所以对隐性交易成本的研究显得尤为重要。本文所研究的隐性交易成本主要是价格冲击、机会成本、价格升量以及择时风险。

2.2.1.1 价格冲击

价格冲击（Price impact）是指由投资者某一订单的执行所引起股票价格的变化（Kraus 和 Stoll, 1972）^[105]，如图 2-1 所示，图中实线表示的是由于投资者的订单提交到市场后对股票价格造成的影响，虚线表示在市场上没有此订单时的股票价格变化趋势。价格冲击的大小等于该订单执行时股票价格和市场上不存在该订单时股票价格之间的差额，一般会受到订单大小、市场流动性、波动性以及市场其他投资者交易量等因素的影响（Barron 和 Karpoff, 2004）^[106]。

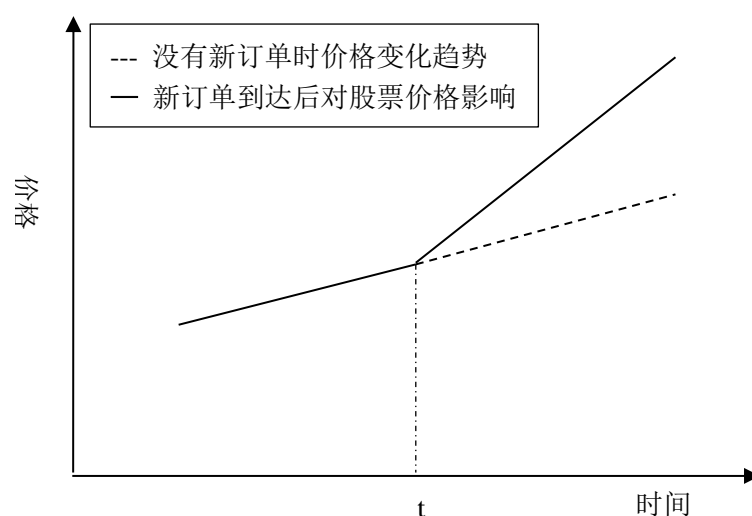


图 2-1 价格冲击对股票价格的影响

价格冲击是交易成本的最主要组成部分之一，学术界与实业界都十分关注对价格冲击的研究和控制（Freyre-Sanders 等，2004；Dufour 和 Engle，2000；Bessembinder，2003；Holthausen 等，1987）^[107-110]。

价格冲击可以分为临时性价格冲击成本和永久性价格冲击成本。其中，临时性价格冲击是指证券价格的变动仅仅是由于证券的临时性供需不平衡所导致的价格变化，经过一段时间的调整后证券价格会回复到原水平，如图 2-2 所示。

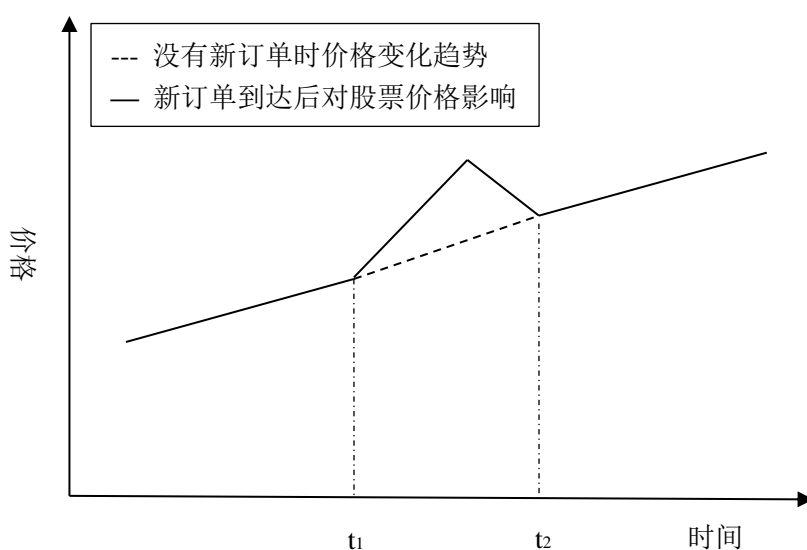


图 2-2 临时性价格冲击对股票价格的影响

如果投资者订单所传递的信息改变了市场对证券未来价格的预期，使得证券的内在价值发生了变化，那么这种价格冲击就被称为永久性价格冲击。这种冲击对证券价格的影响是会持续很长一段时间，并且证券价格不会再调整到原有的价格水平上，如图 2-3 所示。

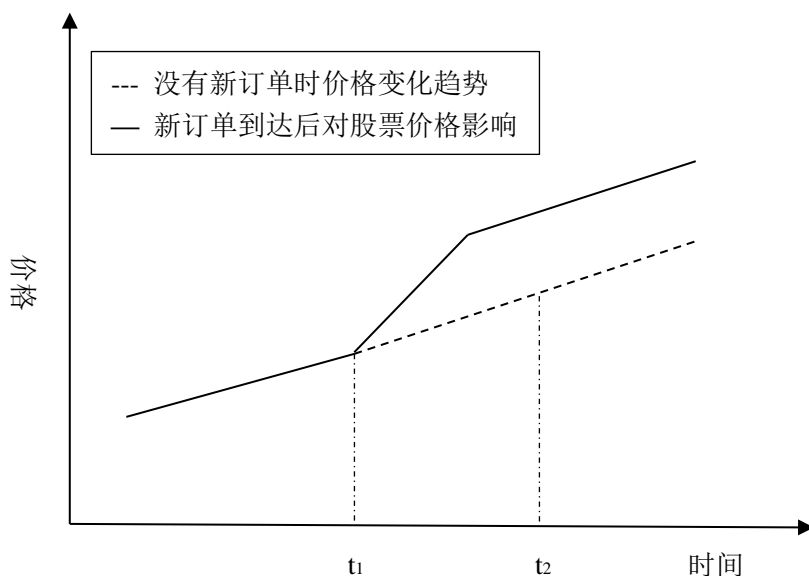


图 2-3 永久性价格冲击对股票价格的影响

价格冲击成本是交易成本的最重要组成部分之一，并且其总是会使得证券价格向反方向变化，因此，投资者要降低交易成本、增加投资收益必须要研究价格

冲击成本。Kissell 和 Glantz (2003) [32]提出了一种计算价格冲击的方法, 假设投资者计划在未来 m 个交易时期内利用分阶段交易策略 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)'$ 交易总量为 S 的证券, $x_t (t \in [1, m])$ 是投资者在 t 时期的订单大小, 瞬时冲击成本为 I ^①, 令 α 表示临时性价格冲击占总价格冲击的比例, 且 $\alpha \in [0, 1]$, 则临时性价格冲击成本为 αI ; 永久性价格冲击成本为 $(1 - \alpha)I$ 。价格冲击成本等于临时性价格冲击成本与永久性价格冲击成本的总和, 可以表示为:

$$PI = \alpha I + (1 - \alpha)I \quad (2-1)$$

在 t 时期内的临时性和永久性价格冲击成本分别为:

$$PI_t^{temp} = \frac{\alpha I x_t}{S} \quad (2-2)$$

$$PI_t^{perm} = \frac{(1 - \alpha) I x_t}{S} \quad (2-3)$$

假设在整个交易过程中只有流动性需求者才会受到临时性价格冲击的影响。因此, 在 t 时期单位证券的临时性价格冲击成本为:

$$PI_{t, share}^{temp} = \frac{\alpha x_t I}{v_t^d S} \quad (2-4)$$

其中, v_t^d 表示在 t 时期流动性需求者的交易量。

永久性价格冲击是由于订单本身所传递的信息导致证券价格发生变化。当一个买单提交到市场上交易, 这一买单所传达的信息会使得证券价格在一定程度上提高; 若一个卖单提交到市场上交易, 则会使得证券价格降低。同时, 为了简化分析, 假设相同规模的卖单和买单所传递的信息恰好可以相互抵消。因此, 在 t 时期单位证券的永久性价格冲击成本为:

$$PI_{t/share}^{perm} = \frac{(1 - \alpha) I}{S} \quad (2-5)$$

通过以上分析可知, 采用交易策略 x 的投资者在整个交易过程中的价格冲击成本为:

$$PI(x) = \sum_{t=1}^m x_t \left[\frac{\alpha x_t I}{v_t^d S} + \frac{(1 - \alpha) I}{S} \right] \quad (2-6)$$

^① 如果投资者在某段时间内需要交易总量为 X 的证券, 且采用不拆单交易策略, 即将所有订单以市价订单的形式一次性提交至证券市场进行交易, 此时投资者所受到的冲击成本称为瞬时冲击成本。Kissell 和 Glantz (2003) [32]提出了如下方法进行估计: $I = a_1 (S/ADV)^{a_2} \sigma P_0 S$, 其中, S 表示交易量; ADV 表示市场的日均交易量; σ 表示证券收益的年波动率; P_0 表示证券交易初始价格。

在 t 时期流动性需求者交易量包括市场中流动性需求者的交易量和投资者的订单，即： $v_t^d = x_t + 0.5v_t$ ，其中 v_t 是在 t 时期市场的总成交量。因此，上式可以简化为：

$$PI(x) = \sum_{t=1}^m x_t \frac{\alpha I x_t}{X(x_t + 0.5v_t)} + (1-\alpha)I \quad (2-7)$$

由上式可以看出，永久价格冲击的大小并不会受到具体交易策略的影响，其原因在于永久价格冲击成本是由于订单本身所传递的信息造成的，与采用何种交易策略无关。

2.2.1.2 机会成本

当投资者采用分阶段的订单提交策略时，受市场流动性不足和证券价格快速变化的影响，投资者在不同阶段提交的订单可能会未全部被执行。因此，除了价格冲击，投资者在交易过程中还可能面临一项新的成本——机会成本（Opportunity cost）。机会成本是指未能执行完全部订单而损失的那部分收益（Kissell, 2011）^[111]。

如果投资者订单趋向于全部执行的时候，那么机会成本将相应的逐渐减少直至完全消失。通常情况下，为了减少在交易过程中产生的机会成本，投资者会尽可能的促使订单全部执行。但是，当面对不利的市场环境时，如果投资者仍然选择执行全部订单，无疑会大幅增加价格冲击成本。如果投资者选择交易，那么其交易行为会对市场造成冲击；如果此投资者不进行交易，则同样会被市场其他投资者所冲击（Venkataraman, 2001）^[112]。对于采用算法交易的投资者而言，机会成本也是其制定交易策略时的一项不可忽视的重要因素。

假设投资者还是计划在未来 m 个交易时期内利用分阶段的订单提交策略 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)'$ 交易总量为 S 的证券。投资者在交易时期 t 的机会成本与将来未成交证券数量、价格变化量有关。投资者采用此交易策略时的机会成本可表示为：

$$E(OC(x)) = \sum_{t=1}^m x_t (1 - \rho_t) [E(P_m) - P_0] \quad (2-8)$$

其中， ρ_t 为 t 时期订单的成交概率， $\rho \in [0, 1]$ ； P_0 和 P_m 分别表示是第一个和最后一个时期的证券价格。临时性价格冲击不会改变证券的内在价值，并且假设临时性价格冲击只是影响当前的一个交易时期，因此最后一个交易时期证券价格的期望值可以表示为：

$$E(P_m) = P_0 + \frac{(1-\alpha)I}{X} \quad (2-9)$$

其中, X 表示所有时期总的订单成交数量, 即: $X = \sum_{i=1}^m x_i \rho_i$ 。

下面考虑一种极端情况, 如果投资者仅仅关注机会成本, 并不考虑其他交易成本对算法交易策略的影响, 那么投资者总的交易成本就是各个时期机会成本之和。此模型可以表示为:

$$\text{Min TC}(x) = \sum_{t=1}^m \left(X - \sum_{i=1}^t x_i \right) (1-\rho^t) [E(P_t) - P_0] \quad (2-10)$$

$$\text{s.t. } X = \sum_{t=1}^m x_t \quad (2-10a)$$

求解此模型, 可得: $x_1 = X$, $x_t = 0 (t \in [2, m])$ 。

通过以上分析可知, 采用高频交易的投资者如果在交易过程中只考虑机会成本, 其最优交易策略就是在第一个交易时期就提交所有订单。在此情形下, 投资者采用此交易策略的总交易成本(机会成本)最小。

2.2.1.3 择时风险

择时风险(Timing risk)是指由于证券的市场价格、市场流动性等因素在不同时期内变动所带来的风险(Coppejans 和 Domowitz, 2000; Jones 和 Lipson, 1999) [113, 114]。

为了简化分析, 本研究所考虑的择时风险主要是指证券价格波动所带来的风险。假设投资者计划在未来 m 个交易时期内, 利用某一订单提交策略 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)'$ 交易总量为 S 的证券, 即: $S = \sum_{t=1}^m x_t$ 。择时风险可表示为:

$$\mathfrak{R}(x) = \sqrt{\sum_{t=1}^m \left(\sum_{k=t}^m x_k \right)^2} \sigma^2 \quad (2-11)$$

其中, σ 是每一时期内证券的波动率。

如果投资者仅考虑择时风险对交易策略的影响, 那么其构建最优交易策略问题可以表示为:

$$\text{Min TC}(x) = \sqrt{\sum_{t=1}^m \left(\sum_{k=t}^m x_k \right)^2} \sigma^2 \quad (2-12)$$

$$\text{s.t. } x_t \geq 0 \quad (2-12a)$$

求解此模型易知，最优交易策略为 $x = (S, 0, 0, \dots, 0)'$ ，即投资者在第一个时期内提交全部订单，此时的总交易成本为 $S\sigma$ 。

2.2.1.4 价格升量

价格升量（Appreciation cost）是指证券价格的自然变化，是证券价格的内在变化趋势，描述了证券在没有不确定性影响下的证券价格变动情况（Kissell 和 Glantz, 2003）^[32]。一般而言，价格升量被认为是价格变化情况，是证券价格在没有受其他因素影响下的自然变动。

价格升量是指证券价格的内在变化趋势，描述了如果证券市场上没有不确定性、意外事件、以及噪声的影响下证券价格的变动情况。一般的，价格升量可以理解为价格变化趋势或漂移项等，是投资者隐性交易成本中的一项重要组成部分。

假设投资者计划利用分阶段的交易策略 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)'$ ，在未来 m 个交易时期内执行订单规模为 S 的交易，即： $S = \sum_{t=1}^m x_t$ 。投资者在交易时期 t 的价格升量与未来交易量、交易时期以及价格变化量有关。在整个交易期间，投资者总的价格升量为：

$$PA(x) = \sum_{t=1}^m tx_t \Delta p \quad (2-13)$$

其中， Δp 表示在每一交易时期内股票价格的平均变化量，即：

$$\Delta p = \frac{1}{m}(p_m - p_0) \quad (2-14)$$

2.2.1.5 其他隐性交易成本

买卖价差（Bid-ask spread）是指证券市场上的最优卖价和最优买价之间的差额，主要是衡量潜在的订单执行成本，也可以看作为证券市场对于做市商所提供及时性交易服务的一种补偿（O'Hara 和 Oldfield, 1986; Mcinish 和 Wood, 1992）^[115, 116]。

买卖价差一般分为绝对买卖价差和相对买卖价差。绝对买卖价差是最优卖出报价减去最优买入报价。相对买卖价差是绝对买卖价差与最优买卖价格平均值的比值。绝对买卖价差一般会受到股票价格变化的影响，而相对买卖价差可以去除股票价格的这种影响。

假设 $B1$ 是最优买价， $A1$ 是最优卖价，则绝对买卖价差（ $Spread$ ）和相对买卖价差（ $Rspread$ ）可以分笔表示为：

$$Spread = A1 - B1 \quad (2-15)$$

$$Rspread = \frac{A1 - B1}{(A1 + B1)/2} \quad (2-16)$$

对于做市商市场而言，买卖价差主要包括三部分：订单处理成本、逆向选择成本以及存货成本。

订单处理成本是指交易员等人工费用和交易系统正常运行费用，是交易商撮合买卖双方完成交易的固有成本（Roll, 1984）^[117]。一般而言，订单驱动市场的订单处理成本要低于做市商市场。

在做市商市场中，逆向选择成本是对提供流动性的做市商提供一种补偿，以弥补与拥有私人信息的知情交易者交易时可能所遭受的损失。逆向选择成本通常与交易量成正比（Glosten 和 Milgrom, 1985；Easley 和 O'Hara, 1987）^[118, 119]。

存货成本是做市商因为存货所付出的成本，做市商根据订单的变化情况制定相应的报价以确保一个稳定的存货水平（Amihud 和 Mendelson, 1980）^[120]。

延误成本（Delay cost）是指从投资者做出投资决策直到订单被提交到市场这段时间内所造成的损失（Kritzman 等, 2006）^[121]。特别是在投资者选择“追涨杀跌”的交易行为时，延误成本显得尤为重要。投资者的延误成本与订单规模、价格变化量有关。

假设投资者时刻 t_d 当股票价格为 p_d 做出投资决策，计划在未来利用某一交易策略买入总量为 S 的股票。投资者在 t_0 时刻将订单提交到市场，此时股票价格为 p_0 。则投资者的延误成本为：

$$DC(S) = (p_0 - p_d)S \quad (2-17)$$

2.2.2 显性交易成本

显性交易成本可以在交易前进行准确测算，也可以比较容易的从市场历史交易数据中获得，一般包括手续费、税费、交易费等。相对于隐性交易成本而言，显性交易成本占总交易成本的比例的较小。

证券交易费用是指投资者在委托买卖证券时应支付的各种税收和费用的总和，通常包括印花税、佣金、过户费、监管费、其他费用等几个方面的内容。我国上

海证券交易所和深圳证券交易的证券交易费明细如表 2-2 所示。

表 2-2 我国上交所和深交所的证券交易费用明细表

	上海证券交易所		深圳证券交易所	
	A 股	B 股	A 股	B 股
印花税	出让方按成交金额的 0.1%收取, 受让方不再征收	出让方按成交金额的 0.1%收取, 受让方不再征收	出让方按成交金额的 0.1%收取, 受让方不再征收	出让方按成交金额的 0.1%收取, 受让方不再征收
佣金	不得高于成交金额的 0.3%, 也不得低于代收的证券交易监管费和证券交易经手费, 起点 5 元	不得高于成交金额的 0.3%, 也不得低于代收的证券交易监管费和证券交易经手费, 起点 5 港元	不得高于成交金额的 0.3%, 也不得低于代收的证券交易监管费和证券交易经手费, 起点 5 元	不得高于成交金额的 0.3%, 也不得低于代收的证券交易监管费和证券交易经手费, 起点 5 港元
过户费	按成交金额双边收取 0.06%	出让方按成交金额的 0.05%收取	无	无
证管费	按成交金额双边收取 0.002%	按成交金额双边收取 0.002%	按成交额双边收取 0.002%	按成交额双边收取 0.002%
经手费	按成交额双边收取 0.00696%	按成交金额双边收取 0.026%	按成交额双边收取 0.00696%	按成交额双边收取 0.0301%

注：数据来源于上海证券交易所和深圳证券交易所官方网站。

印花税是根据国家税法规定，在股票成交后对买卖双方投资者按照规定的税率分别征收的税费。印花税的收取是由证券经营机构在同投资者交割中代为扣收，并在证券经营机构同证券交易所或登记结算机构的清算交割中集中结算，最终由登记结算机构统一收取。

印花税是投资者交易费用的主要组成部分，是调节投资者交易成本的一个重要手段。我国证券交易印花税率经历过多次调整，最初 1990 年 6 月 28 日深圳市

颁布《关于对股权转让和个人持有股票收益征税的暂行规定》，首先开征股票交易印花税，由卖出股票者按成交金额的 0.6% 缴纳。后历经十余次调整，目前收费标准是按照成交金额的 1% 进行单项收取（卖方缴纳）。

佣金是投资者按照成交金额的一定比例支付给证券公司的费用，主要包括券商的经纪佣金、管理机构的监管费等。2012 年 9 月 1 日起最新佣金收费标准为：不得高于成交金额的 0.3%，也不得低于代收的证券交易监管费和证券交易经手费。

过户费是投资者在完成交易后向证券公司支付的费用，主要是用以弥补证券公司为买卖双方变更股权登记的费用。此项费用一般是由证券交易机构在与投资者清算交割时代为收取。2012 年 9 月 1 日起最新过户费的收费标准为：上海证券交易所 A 股过户费为成交金额的 0.06%，没有最低的收费标准；深圳证券交易所不收取 A 股和基金的过户费。

其他费用主要包括委托费（通讯费）、查询费、开户费、撤单费等，这些费用主要弥补证券公司在通讯、设备、单证制作等方面的所付出的成本。这些费用的收取一般都是由券商根据自身需要而设定的，并没有一个明确收费标准，但是这个收取比例必须要得到当地物价部门批准。目前，许多证券经营机构出于市场竞争等方面的考虑都减免部分或全部此类费用。

2.3 基于交易量加权平均价格的价格冲击度量与影响因素研究

价格冲击成本是投资者交易成本中的最重要组成部分之一，并且在交易前不容易进行准确估计。因此，本章主要是分析隐性交易成本中价格冲击的估计和影响因素研究。价格冲击是订单执行价格与市场上不存在此订单时的证券价格之间差额。在现实证券市场上，投资者是无法同时观测到这两种不同情况下的股票价格。本研究借鉴 Berkowitz 等（1988）^[37]提出的计算价格冲击方法，即价格冲击等于成交价格与交易量加权平均价格（Volume weighted average price, VWAP）的差额。进一步，本研究指出 VWAP 基准价格实际上是市场可预期交易量对证券进行冲击后形成的期望值。对特定的投资者而言，VWAP 基准价格可看作是市场上不存在自己提交订单时的基准价格，在此基础上，投资者就可以准确地估计在执行特定订单时所需要额外承担的价格冲击。

2.3.1 交易量加权平均价格的理论依据与价格冲击的度量

假设投资者计划在未来 n 个交易时期内完成一定数量证券的交易。在任意交易时期 t ，证券价格的变化量为 Δp_t ，交易量为 v_t 。Kyle（1985）^[23]分析了投资者的

交易行为对证券价格变化的影响，其模型可表述为：

$$\Delta p_t = \lambda v_t \quad (2-18)$$

其中， λ 表示市场预期交易量对证券价格变化的影响程度。

在整个交易时期内，证券的总交易量和价格变化量之间存在如下关系：

$$\sum_{t=1}^n \Delta p_t = \lambda \sum_{t=1}^n v_t \quad (2-19)$$

将（2-18）式除以（2-19）得：

$$\frac{\Delta p_t}{\Delta P} = \frac{v_t}{V} \quad (2-20)$$

其中， ΔP 是整个交易时期内的价格变化量； V 表示整个交易时期内的总交易量。

在订单全部执行后，证券的预期价格为：

$$\begin{aligned} E(p) &= \sum_{t=1}^n p_t \Pr(p = p_t) \\ &= \sum_{t=1}^n p_t \frac{\Delta p_t}{\Delta P} \\ &= \sum_{t=1}^n p_t \frac{v_t}{V} \end{aligned} \quad (2-21)$$

其中， $\Pr(p = p_t)$ 表示在 t 时刻证券价格为 p_t 的概率。

VWAP 基准价格是描述市场上不存在投资者自己订单时的股票价格，是利用日内不同时段交易量占总交易量的比值作为权重，对不同时段成交价格进行加权平均而得到的一个基准价格，即：

$$P_{VWAP} = \sum_{t=1}^n \frac{p_t v_t}{V} \quad (2-22)$$

根据式（2-21）和式（2-22）可知，证券未来的预期价格实际上就是一段交易时期内的交易量加权平均价格。

本研究利用 VWAP 基准价格计算价格冲击，即价格冲击等于订单执行价格与 VWAP 基准价格的差额。由于不同证券的价格可能存在较大差异，所以借鉴 Hu (2009)^[43]、Chiyachantana 等 (2004)^[122] 的方法对价格冲击进行标准化，即：

$$PI_i = \frac{Side_i \times (P_i - P_{vwap_i})}{P_i} \quad (2-23)$$

其中， PI_i 是第 i 笔交易的价格冲击， P_i 表示第 i 笔交易的成交价格； $Side_i$ 是一个

标识变量,若第 i 笔交易为买方发起,则 $Side_i = 1$,若卖方发起,则 $Side_i = -1$; P_{vwap_i} 是第 i 笔交易对应的交易量加权平均价格,也就是去除了第 i 笔交易后的交易量加权平均价格。由于 VWAP 基准价格描述的是市场上不存在投资者自己订单时的股票价格,所以在计算第 i 笔交易的 VWAP 基准价格时需要去除第 i 笔交易的交易量。

2.3.2 实证研究设计

2.3.2.1 研究假设

在证券市场上,投资者所提交的订单规模越小,则订单越容易被快速地执行,其价格冲击成本也比较小。反之,如果投资者的订单规模较大,且要求在较短时间内全部执行,则会产生较大的价格冲击成本。Alzahrani 等(2013)^[28]、Ryu(2013)^[29]分别对沙特证券市场和韩国期货市场的价格冲击成本情况进行研究,结果表明订单规模与价格冲击成本存在一个正相关关系。进一步,与小规模证券相比,大盘股证券的流通市值和成交量一般比较大,投资者的订单可能会隐藏在众多其他投资者订单中进行交易,导致其订单对价格冲击的影响不明显。

假设 2-1:对于中等规模和小规模股票而言,订单规模与冲击成本存在一个正相关关系,而对大盘股证券这种关系可能并不成立。

在流动性较好的市场上,投资者的订单可快速、低成本的被执行。如果市场缺乏足够流动性,投资者在交易过程中会承担较大的价格冲击成本。Choudhary 和 Nanda(1989)^[123]、Copeland 和 Galai(1983)^[124]指出流动性是影响证券市场价格冲击的一个重要因素。如果证券市场缺乏足够的流动性,那么投资者可能会承受较大的交易成本,并且交易速度较慢,甚至可能出现交易难以完成的情形。本节利用市场微观结构研究中常用的相对买卖价差来衡量证券市场的流动性,并提出如下假设:

假设 2-2:价差与价格冲击成本正相关,即价差越小,价格冲击成本也越小。

除此之外,Foster 和 Viswanathan(1993)^[125]利用 NYSE 交易数据发现,日内流动性呈现出“U”型特征。进一步,屈文洲和吴世农(2002)^[126]利用深圳证券市场数据研究发现,我国证券市场流动性也呈现出“L”型模式,即在开盘后的一段较短时间内流动性较好,随后流动性逐渐变差,直至收盘。

假设 2-3:与日内其他时段相比,在开盘后的较短时间内订单规模对价格冲击没有显著影响。

2.3.2.2 变量设计

本节所考虑的被解释变量是价格冲击成本，主要的解释变量是订单规模和买卖价差。订单不平衡量和成交价格是两个控制变量，主要是为了控制市场可预期交易量和价格水平对价格冲击成本的影响。由于无法获得投资者的账户交易数据，所以在研究价格冲击的主要影响因素时利用市场预期外交易量来表示投资者总的订单规模（*Size*），即每笔交易量与过去 5 天的平均交易量的差额。同时，还利用平均交易量指标对每笔订单的规模进行了标准化处理。

在影响价格冲击的因素中，流动性是一个重要的指标。本研究利用市场微观结构研究中常用的相对买卖价差来衡量证券市场的流动性。在交易时期 t 内，证券的平均相对买卖价差为：

$$Rspread_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(S1_i - B1_i)}{(S1_i + B1_i)/2} \quad (2-24)$$

其中， $S1_i$ 表示第 i 条记录的最优卖价； $B1_i$ 表示第 i 条记录的最优买价； n 表示交易时期 t 内所有记录的数量。

对特定的投资者而言，其他投资者的交易意愿可通过观察限价订单簿的变化情况来推测。为了控制这种由其他投资者的交易行为对价格冲击的影响，本研究采用市场的订单不平衡程度来控制这种影响。借鉴雷觉铭等（2010）^[127]和廖静池（2011）^[128]计算订单不平衡量的方法，即订单不平衡量等于卖方报价深度和买方报价深度的差额，在交易时期 t 内，市场的不平衡量为：

$$Orderimb_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |BV_i - SV_i| \quad (2-25)$$

其中， BV_i 表示第 i 条记录上买方的报价深度； SV_i 表示第 i 条记录上卖方的报价深度； n 表示交易时期 t 内所有记录的数量。

此外，成交价格（*Price*）也是影响价格冲击的一个因素。本研究利用简单平均的方式计算一段时间内的平均成交价格。

2.3.3 样本数据

证券的流通市值越大，价格冲击越小。相对于小盘股股票，大盘股股票的价格冲击特别小，研究这类股票价格冲击的实际意义不大，因此，本节主要针对流通市值较小的一些证券，研究价格冲击的主要影响因素。本节选取深圳市国泰安信息技术有限公司提供的创业板高频交易数据，时间跨度为 2011 年 1 月 4 日至 2012

年 12 月 30 日。按照证券流通市值的大小，分别选取大规模、中等规模以及小规模证券各 1 组，每组 20 只证券，共 60 只证券（详见附录 3）。同时，删除明显存在记录错误的的数据，如买卖报价为零，最低卖价小于最高买价等。

2.3.4 实证结果与分析

2.3.4.1 描述性统计

本节主要是研究影响价格冲击的主要因素，利用我国深圳证券交易所创业板 2011 年 1 月 4 日至 2012 年 12 月 30 日的高频交易数据，计算每个交易日的价格冲击、订单规模、相对买卖价差、成交价格以及订单不平衡量等指标的平均值。

表 2-3 描述性统计

变量	大			中			小		
	均值	中位数	标准差	均值	中位数	标准差	均值	中位数	标准差
<i>PI</i>	0.017	0.018	0.085	0.025	0.026	0.085	0.030	0.030	0.086
<i>Size</i>	0.0008	0.0006	0.0007	0.0014	0.0011	0.0011	0.0019	0.0016	0.0013
<i>Rspread</i>	0.1485	0.1329	0.067	0.1836	0.1662	0.0804	0.2148	0.1977	0.0891
<i>Price</i>	31.89	24.16	24.14	19.32	17.21	10.41	14.86	13.55	6.27
<i>Orderimb</i>	21513	15958	22535	17399	13254	14703	14332	11293	11662

注：价格冲击 *PI*，订单规模 *Size*，相对买卖价差 *Rspread*，成交价格 *Price*，订单不平衡量 *Orderimb*。价格冲击、相对买卖价差、订单规模的单位是百分比；订单不平衡量的单位是股；成交价格单位是元。

表 2-3 描述了大规模、中等规模以及小规模股票中各变量的描述性统计结果。从表 2-3 中可以看出，大规模股票的平均冲击成本最小，小规模股票的平均冲击成本最大。此外，相对于中等规模和小规模股票而言，大规模股票的相对价差更小，表明股票流通市值越大，相对价差越小，流动性越好，其价格冲击也就越小。

2.3.4.2 回归分析

以价格冲击为被解释变量，订单规模和买卖价差为主要解释变量，成交价格和市场订单不平衡量等为控制变量的多元回归模型为：

$$PI_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 Size_{i,t} + \beta_2 Rspread_{i,t} + \beta_3 1/Price_{i,t} + \beta_4 \ln(Orderimb_{i,t}) + \mu_{i,t} \quad (2-26)$$

其中, $PI_{i,t}$ 表示证券 i 在交易日 t 的平均价格冲击; $Size_{i,t}$ 表示证券 i 在交易日 t 的平均订单规模; $Rspread_{i,t}$ 表示证券 i 在交易日 t 的平均相对买卖价差; $1/Price_{i,t}$ 表示证券 i 在交易日 t 平均成交价格的倒数; $\ln(Orderimb_{i,t})$ 表示证券 i 在交易日 t 的平均订单不平衡量的自然对数; $\mu_{i,t}$ 为误差项, $i=1,\dots,N$, $t=1,\dots,T$; N 是证券总的数量, T 是总的交易天数。

表 2-4 价格冲击影响因素的回归结果

变量	大	中	小
$Size$	2.567 (0.160)	5.939*** (0.000)	6.165*** (0.000)
$Rspread$	0.223*** (0.000)	0.213*** (0.000)	0.196*** (0.000)
$1/Price$	0.110*** (0.025)	0.138*** (0.002)	0.170*** (0.000)
$\ln(Orderimb)$	0.011*** (0.000)	0.013*** (0.000)	0.016*** (0.000)
$AdjR^2$	0.05	0.07	0.09

注: 括号内的数值是估计系数对应的 p 值。***表示在 1% 的置信水平下显著; **表示在 5% 的置信水平下显著; *表示在 10% 的置信水平下显著。下同。

采用面板数据分析中的截面固定效应模型进行回归估计, 结果见表 2-4。从表 2-4 可知, 对中、小规模股票而言, 订单规模是影响价格冲击的显著因素, 并且投资者的订单规模越大, 向市场上所传递的信息更多, 对证券价格的冲击也就越大。由于大规模股票的流通市值和成交量比较大, 并且交易比较活跃, 所以投资者的订单可能会隐藏在众多其他投资者订单中进行交易, 从而使得订单规模对价格冲击的影响并不显著, 即假设 2-1 成立。同时, 从表中可以看出, 在小规模股票的回归模型中, 作为拟合度统计量的 $AdjR^2$ 是 0.09, 而大盘股回归模型的 $AdjR^2$ 为 0.05。Alzahrani 等 (2013) [28]、Berkowitz 等 (1988) [37]、Chiyachantana 等 (2004) [122] 等学者对价格冲击也进行研究, 在这些学者所考虑的模型中, $AdjR^2$ 数值也较小, 分别为 0.06, 0.01, 0.04。

作为衡量市场流动性的重要指标, 买卖价差也是价格冲击的显著影响因素。

无论是大规模、中等规模还是小规模股票，相对价差越小，市场流动性越好，价格冲击也越小，即假设 2-2 成立。与现有研究结论一致，本研究发现代表市场预期交易量的订单不平衡程度与价格冲击存在显著的正相关关系。此外，成交价格与价格冲击存在显著的负相关关系，即成交价格越大，价格冲击越小。

进一步，为了考察投资者的订单提交时机问题，本节还将分析在日内不同交易时段订单规模、买卖价差等指标对价格冲击的影响。将日内交易时间平均分为 8 个交易时段，分别计算每一交易日不同交易时段的平均买卖价差等指标，并利用所选样本中的小规模股票数据分析在不同交易时段投资者订单规模、相对买卖价差、成交价格、订单不平衡量对价格冲击的影响。采用面板数据分析中的截面固定效应模型进行回归估计，结果如表 2-5 所示。从表 2-5 可知，在日内 8 个不同交易时段中，相对价差、订单不平衡量对价格冲击具有显著的正向影响，成交价格对价格冲击具有显著的负向影响。除第 1 个交易时段外，订单规模在其他交易时段对价格冲击的影响都是显著的。如果投资者选择在开盘后的第 1 个时段提交订单，即便是规模较大的订单，该订单也可以较好地隐藏于其他投资者的大量订单中进行交易，而不会产生较大的价格冲击。换言之，投资者在开盘后第 1 个交易时段内的价格冲击相对较小。因此，假设 2-3 成立。

2.4 基于股票流动性的价格冲击研究

流动性是反映证券市场质量的最重要指标之一，流动性的适度增加既保证了金融市场的正常运转，又促进了市场中资源的有效配置和经济增长。流动性好坏与证券价格变化幅度密切相关，同时也是影响证券市场价格冲击的一个重要因素（Lillo 等，2003；燕汝贞等，2014）^[25, 129]。如果市场的流动性较好，那么投资者订单可以快速、低成本地被执行。反之，如果市场缺乏足够流动性，则投资者在交易过程中会承担较大的交易成本。

关于流动性的定义，学术界目前还没有形成统一的认识（刘逖，2012）^[5]。Amihud 和 Mendelson（1989）^[130]认为流动性是在一定时间范围内执行交易所需要付出的时间或成本。Massimb 和 Phelps（1994）^[131]、Jacoby 等（2000）^[132]指出流动性是订单迅速执行且不会导致证券价格快速、剧烈变化的能力。同时，流动性还会直接影响到不同类型投资者的交易行为，投资者对流动性较低证券所要求的预期收益会比较高（Easley 等，2002；Brennan 和 Subrahmanyam，1996；Datar 等，1998；Easley 等，1996）^[133-136]。

表 2-5 不同交易时段的回归结果

	1 _ρ	2 _ρ	3 _ρ	4 _ρ	5 _ρ	6 _ρ	7 _ρ	8 _ρ
<i>Size</i> _ρ	0.093 _ρ -0.299 _ρ	0.423 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.186 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.120 ^{***} _ρ -0.001 _ρ	0.260 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.174 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.277 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.227 ^{***} _ρ -0.003 _ρ
<i>Rspread</i> _ρ	0.188 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.265 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.256 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.223 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.265 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.233 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.217 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.252 ^{***} _ρ 0.000 _ρ
<i>1/Price</i> _ρ	0.356 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.211 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.248 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.202 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.235 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.227 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.229 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.142 ^{***} _ρ 0.000 _ρ
<i>ln(Orderimb)</i> _ρ	0.006 ^{***} _ρ 0.000 _ρ	0.003 ^{**} _ρ -0.019 _ρ	0.003 ^{***} _ρ -0.004 _ρ	0.003 ^{***} _ρ -0.003 _ρ	0.002 ^{**} _ρ -0.032 _ρ	0.002 _ρ -0.111 _ρ	0.003 ^{***} _ρ -0.005 _ρ	0.004 ^{***} _ρ 0.000 _ρ
<i>AdjR²</i> _ρ	0.21 _ρ	0.1 _ρ	0.16 _ρ	0.13 _ρ	0.18 _ρ	0.15 _ρ	0.12 _ρ	0.14 _ρ

Harris (1994)^[137]、liu (2006)^[138]、Chordia 等 (2001)^[139]认为流动性应该包含间接交易成本、交易速度、弹性等多个维度。间接成本主要包括买卖价差、有效价差、已实现价差等 (曾勇等, 2008)^[140]。市场深度衡量在特定价位上市场能够实现的交易量。市场深度越大, 市场的流动性也就越好, 在最优价位上达成的交易量也就越大。换手率衡量的是在一定时间内证券周转的速度, 其大小等于一段时间内个股成交金额与个股流通市值的比值。换手率越高, 市场的流动性越好。张峥等 (2013)^[141]以时间加权的买卖价差作为基准, 利用中国分时高频交易数据和日交易数据, 研究了买卖价差间接指标在中国股市的适用性, 发现换手率等指标对于我国市场而言并不是一个良好的流动性度量指标。Hasbrouck (2009)^[142]利用美国股票市场数据分析了高频和低频流动性指标的差异, 研究发现用来测度直接交易成本的低频指标与有效价差是高度相关。

在证券市场上, 许多大盘股股票中的部分流通股长期处于不流动状态^①, 这一问题导致许多大盘股股票的流动性并不像其流通市值所表现的那样好。表 2-6 是本研究所选取的两只代表性股票的成交金额、流通市值等指标情况。从表 2-6 可以明显看出, 在 2012 年, 大盘股股票 601398 (工商银行) 流通股中大约有 95.63% 的流通股是处于不经常流动的状态, 这部分股票是由中央汇金投资有限责任公司、中华人民共和国财政部、香港中央结算代理人有限公司等持有。

表 2-6 大盘股和小盘股股票的“真实”流动性对比 (2012 年)

股票代码	名称	个股年交易金额 (10 亿元)	个股年流通市值 (10 亿元)	流通股中不常流通部分比例 (%)	“真实”流动性 ^②
601398	工商银行	42.62	1090.72	95.63	0.01
300104	乐视网	45.71	3.05	0.00	0.15

一般而言, 相同数额的一笔资金对大盘股股票的价格冲击会小于小盘股股票。然而, 由于许多大盘股股票中部分流通股长期处于不流动状态, 所以对于这种大盘股股票而言, 其价格冲击可能会比较大, 为了衡量这种情况下的股票流动性, 本节提出了一个股票的“真实”流动性指标, 并用成交金额与流通市值 (去除不经常流动部分的流通市值) 的比值来衡量。在 Kyle (1985)^[23]模型基础上, 本研

^① 对于某一股票而言, 如果某一股东所持有流通股在过去一段时间内都没有发生变化, 则认为这部分流通股股票是处于不常流动状态。

^② “真实”流动性指标是利用成交金额与流通市值 (去除不常流动部分的流通市值) 的比值来衡量。

究以交易量与价格变化的回归系数来刻画证券市场的价格冲击程度，并利用我国证券市场高频交易数据，分析股票的“真实”流动性等因素对股票价格冲击的影响。

2.4.1 实证研究设计

2.4.1.1 研究假设

2013 年 8 月 16 日 11 点 05 分 31 秒，中国石化的股票价格突然猛涨，股价瞬间从 4.48 元跳升至 4.58 元，升幅为 2.23%；11 点 05 分 54 秒，受中国石化瞬间大幅上涨的影响，市场迅速猜测是否有重大利好消息突然出现，大量资金开始涌入市场，导致工商银行等股票大幅上涨；截止到 05 分 56 秒，作为两市第一大市值股票的工商银行触及涨停。在 8 月 16 日的早盘，许多大盘股股票离奇盘中封至涨停。对于此事件，证监会公布原因是光大证券自营业务部门的交易系统故障。此事件中，光大证券仅利用七十余亿资金将众多大盘股证券瞬间拉至涨停。这些大盘股股票在短时间内迅速涨停的可能原因，一方面是大量的资金涌入，导致大盘股股票迅速上涨；另一方面是由于许多大盘股股票中很大部分的流通股长期处于不流动状态，所以这种大盘股股票的“真实”流动性较差，导致其价格冲击也比较大。

假设 2-4：流通市值对价格冲击没有显著性的影响。

流动性是订单迅速交易且不造成证券价格剧烈变化的能力（Hasbrouck 和 Schwartz, 1988; Loderer 等, 1991; Farmer 等, 2004）^[143-145]，也是投资者依据市场的供需变化情况，以恰当的价格快速完成订单交易的能力（Weber 和 Rosenow, 2005）^[146]。当订单以较小的成本迅速执行时，市场的流动性较好。换言之，在流动性较好的市场上，投资者所提交的订单可快速、低成本地被执行。如果市场缺乏足够流动性，那么投资者在交易过程中会承担较大的交易成本，特别是价格冲击成本。在我国的证券市场上，许多大盘股股票的流通市值虽然非常大，但是其部分流通股长期处于不流动状态，导致其真实流动性可能并不像其流通市值表现的那么好，所以本节提出了一个衡量这类股票的“真实”流动性指标，并利用股票的成交金额与流通市值的比值来衡量。

假设 2-5：针对这种大盘股股票中部分流通股长期处于不流动状态的情况，“真实”流动性是价格冲击的一个主要影响因素。

在每年的 12 月份，许多基金公司都会进行频繁调仓。对于这一现象，新浪财

经、和讯网、网易财经等网站也都会进行相应的报道。其原因在于，全国年度基金排名一般都是在次年的 1 月初公布，这一基金排名将直接影响到各基金公司未来的市场业绩。为了提高自身在年度基金榜上的排名，同时也是为了防止其他同行业公司“砸盘”行为，许多基金公司都会在临近年终时进行调仓。这些基金公司在年底时期的频繁调仓，可能会增加这阶段股票的“真实”流动性对价格的冲击。

假设 2-6: 与其他时间相比，年底阶段“真实”流动性对价格冲击的具有显著的影响。

2.4.1.2 变量设计

本节主要分析“真实”流动性和流通市值等指标对价格冲击的影响，被解释变量是价格冲击。价格冲击的大小等于订单的执行价格与该市场上不存在此订单时的证券价格差额。显然，在现实证券市场上，投资者是无法同时观察到这两种不同情形下的股票价格。为了估计价格冲击成本，早在 1985 年，Kyle 在理性预期框架下推导出市场可预期交易量对证券价格变化的影响是一种线性关系，并利用交易量与价格变化的回归系数来刻画价格冲击程度。根据这种估计方法，Ho(1981)^[147]、Cont 等(2013)^[148]、Werner(2003)^[149]、Ren 和 Zhong(2012)^[150]学者分析了投资者的交易方向、公司规模、市场的订单不平衡程度等因素对股票市场价格冲击的影响。

本研究借助 Kyle(1985)^[23]模型，利用交易量与价格变化的回归系数来刻画股票的价格冲击：

$$\Delta p_t = \lambda_0 + \lambda_1 volume_t + \varepsilon_t \quad (2-27)$$

其中， λ_1 表示股票的价格冲击系数， Δp_t 表示股票在 $t-1$ 时期至 t 时期内的变化情况，即： $\Delta p_t = p_t - p_{t-1}$ ； $volume_t$ 表示 t 时期内的交易量，如果是买方发起的，则为正值，若为卖方发起的，则为负值； $t=1, \dots, T$ ， T 是总的交易日数目。

在有关价格冲击的研究中，订单规模是一个重要的指标。由于无法获得投资者的账户交易数据，本研究利用市场预期外交易量来刻画投资者总的订单规模（size），即交易量与过去一段时间（5 天）平均交易量的差额。同时，还利用此平均交易量指标对订单规模进行了标准化处理。

在影响价格冲击的因素中，流动性是一个重要的指标。由于许多大盘股股票中的部分流通股长期处于不常流动状态，所以本节提出一个股票的“真实”流动

性指标 (liq), 并利用成交金额与处于流通状态股票流通市值的比值来衡量。股票 i 在时期 t 的“真实”流动性可表示为:

$$liq_{it} = \frac{dnvaltrd_{it}}{dsmvosd_{it}} \quad (2-28)$$

其中, $dnvaltrd_{it}$ 表示股票 i 在第 t 个交易时期的成交金额; $dsmvosd_{it}$ 表示股票 i 在第 t 个交易时期的流通市值; $i=1, \dots, m$, m 是总的证券数目; t 表示交易时期, $t=1, \dots, T$; T 是总的交易日数目。

在时期 t 市场的“真实”流动性 ($mktliq$) 可表示为:

$$mktliq_t = \frac{mdnvaltrd_t}{mdsmvosd_t} \quad (2-29)$$

其中, $mdnvaltrd_t$ 表示在时期 t 市场上总成交金额; $dsmvosd_t$ 表示在时期 t 市场上总的流通市值。

此外, 股票的流通市值 ($dsmvosd$) 也是影响价格冲击的一个因素。

2.4.2 样本数据

本节利用深圳市国泰安信息技术有限公司提供的高频交易数据, 样本分别选取了 10 只在光大证券“816”事件中封至涨停的大盘股, 以及 10 只小盘股股票, 共 20 只股票。样本选择的时间段是 2012 年 01 月 04 至 2012 年 12 月 31 日。同时, 删除明显存在记录错误的部分样本数据, 如买卖报价为零, 最低卖价小于最高买价等。

2.4.3 实证结果与分析

2.4.3.1 描述性统计

表 2-7 描述了所选择样本的股票代码、交易金额、流通市值、流通股中不常流动部分比例以及“真实”流动性。从表 2-7 可以看出, 大盘股股票的流通市值远大于小盘股股票, 大盘股股票流通股中的处于不经常流通的流通股比例平均为 69.05%, 部分股票的不经常流动的流通股比例甚至达到 97.75%, 而小盘股股票的流通股股票基本上都是处于经常流动状态。由于大盘股股票中许多的流通股都处于不经常流动状态, 所以大盘股股票的“真实”流动性较差, 其平均值仅为 0.015, 远小于小盘股股票“真实”流动性指标的 0.168。

表 2-7 证券交易金额与流通市值

证券代码	年交易金额 (10 亿元)	年流通市值 (10 亿元)	不流通部分比例 (%)	“真实”流动性
600028	48.56	484.68	95.00	0.02
600031	87.19	74.46	56.38	0.03
600036	134.91	242.91	48.44	0.01
600048	112.71	97.08	42.14	0.02
601088	72.07	413.48	90.01	0.02
601166	154.51	180.03	39.36	0.01
601328	55.22	161.58	63.56	0.01
601398	42.62	1090.72	95.63	0.01
601668	52.79	117.00	62.19	0.01
601857	33.08	1460.16	97.75	0.01
300051	16.48	0.49	0.00	0.34
300055	18.75	1.05	0.00	0.18
300077	27.24	2.38	0.00	0.11
300084	19.88	0.88	0.00	0.23
300085	3.36	0.30	0.00	0.11
300104	45.71	3.05	0.00	0.15
300118	12.19	1.23	0.00	0.10
300155	3.36	0.30	0.00	0.11
300157	15.96	1.98	0.00	0.08
300162	9.83	0.37	0.00	0.27

表 2-8 是市场指数、中国工商银行（601398）、乐视网（300104）与其他股票的相关性矩阵。从表 2-8 中可以看出，相对于小盘股股票乐视网而言，大盘股股票中国工商银行与市场指数的相关性更大，并且中国工商银行与其他股票的相关性也比较高。这一结果与光大证券“816”事件中证券市场上大盘股股票的表现相符合。在光大证券“816”事件中，股票价格的大幅上涨是首先从许多大盘股股票（如中国工商银行）开始的，接着市场上的其他股票价格也开始大幅上涨，随后市场指数也开始迅速攀升。

表 2-8 个股与市场指数的相关性矩阵

	300051	300055	300077	300084	300085	300104	300118
市场指数	0.09	0.06	0.12	0.15	0.28	0.06	0.08
300104	0.09	0.06	0.13	-0.04	0.21	1.00	0.11
601398	0.08	0.08	0.24	0.11	0.08	0.05	0.18
	300155	300157	300162	600028	600031	600036	600048
市场指数	0.16	0.17	0.01	0.18	0.17	0.26	0.19
300104	0.11	0.19	0.06	-0.04	0.09	0.06	0.20
601398	0.09	0.08	0.21	0.02	0.20	0.14	0.07
	601088	601166	601328	601398	601668	601857	
市场指数	0.34	0.09	0.21	0.18	0.36	0.23	
300104	0.11	0.05	0.05	0.05	0.06	-0.04	
601398	0.11	0.10	0.26	1.00	0.15	0.01	

将日内交易时间平均分为 8 个交易时段，并结合业界实际操作经验，选取日日最后一个交易时段作为研究对象。计算每天此交易时段内的价格冲击、“真实”流动性、流通市值、订单规模、市场“真实”流动性等指标的平均值。表 2-9 描述了这些变量的描述性统计结果。从表 2-9 中可以看出，所选样本的平均流通市值大约为 $2.1E+11$ ；“真实”流动性指标平均值大约为 0.0078。

表 2-9 描述性统计

变量	均值	中位数	最大值	最小值	标准差
λ	7.14E-07	3.13E-07	1.58E-05	9.00E-10	9.16E-07
liq	0.0078	0.0036	0.0981	0.0002	0.0107
$dsmvosd$	2.10E+11	4.40E+10	1.71E+12	2.49E+08	3.90E+11
$size$	0.0070	0.0055	0.1182	0.0013	0.0054
$mktliq$	0.0074	0.0071	0.0177	0.0039	0.0021

2.4.3.2 回归分析与结果

以价格冲击(λ)为被解释变量,以“真实”流动性(liq)和流通市值($dsmvosd$)作为解释变量,将订单规模($size$)和市场“真实”流动性($mktliq$)作为控制变量,回归方程为:

$$\lambda_{i,t} = \beta_i + \beta_1 liq_{i,t} + \beta_2 dsmvosd_{i,t} + \beta_3 Size_{i,t} + \beta_4 mktliq_{i,t} + \mu_{i,t} \quad (2-30)$$

其中, $\lambda_{i,t}$ 表示证券 i 在交易日 t 的价格冲击; $Size_{i,t}$ 表示证券 i 在交易日 t 的订单规模; $liq_{i,t}$ 表示证券 i 在交易日 t 的“真实”流动性; $mktliq_{i,t}$ 表示证券 i 在交易日 t 的市场的“真实”流动性; $\mu_{i,t}$ 为误差项, $i=1, \dots, N$, $t=1, \dots, T$; N 是证券的数目, T 是总的交易天数。

采用面板数据分析中的截面固定效应模型进行回归估计,具体结果见表 2-10。从表 2-10 中的模型 2、模型 4、模型 6 中可以明显看出,股票流通市值对价格冲击的影响并不显著,即假设 2-4 成立;从模型 1 和模型 5 可知,“真实”流动性对股票的价格冲击具有显著的负向影响;从模型 6 可以看出,即便是在控制了订单规模和市场指数因素后,流通市值对价格冲击的影响还是不显著,而“真实”流动性对价格冲击具有显著的负向影响,即假设 2-5 成立。这一结果表明许多股票的流通市值虽然很大,但是对价格冲击的影响并不明显,也就说其流动性可能并不是很好;而作为衡量流动性新指标的“真实”流动性对价格冲击的影响非常显著,并且“真实”流动性越大,股票的价格冲击就越小。从模型 3 和模型 4 中可以看出,订单规模与股票价格冲击存在显著的负相关关系。同时,由于订单规模和股票“真实”流动性指标之间存在一定的相关性,所以在加入“真实”流动性指标

后的模型 5 和模型 6 中，订单规模对价格冲击的影响不再显著。

表 2-10 价格冲击回归结果（2012 年）

变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
<i>liq</i>	-0.1424*** (0.0000)				-0.1341*** (0.0000)	-0.1681*** (0.0000)
<i>dsmvosd</i>		-0.0013 (0.2160)		-0.00002 (0.9790)		-0.0005 (0.6213)
<i>size</i>			0.09824*** (0.0000)	0.09821*** (0.0000)	0.0117 (0.5273)	0.0128 (0.4847)
<i>mktliq</i>			-0.1638*** (0.0001)	-0.1641*** (0.0001)	-0.0780** (0.0458)	-0.0724* (0.0736)
AdjR ²	0.66	0.64	0.65	0.65	0.66	0.66

注：括号内的数值是估计系数对应的 p 值。***表示在 1% 的置信水平下显著；**表示在 5% 的置信水平下显著；*表示在 10% 的置信水平下显著。下同。

流通市值因素对股票价格冲击不显著的原因可能是，许多大盘股股票中部分流通股长期处于不流动状态，如 601398（工商银行），其流通股中大约有 95.63% 的股票是由中央汇金投资有限责任公司、财政部、香港中央结算代理人有限公司持有，而这部分股票基本上是处于不流通状态。

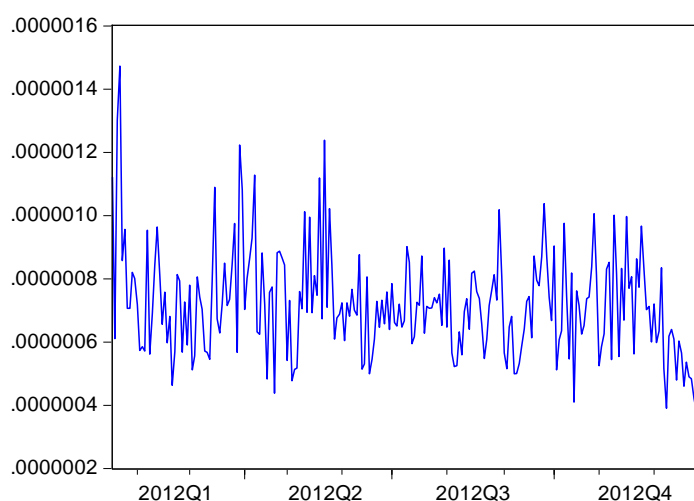


图 2-4 样本股票的价格冲击系数变化图（2012 年）

对于投资者而言，与流动性较差的股票相比，投资于流动性较好的股票，其价格冲击也比较小，可为投资者降低交易成本，提高投资收益；从基金公司排名的角度而言，基金公司应该高度关注那些“真实”流动性较差的股票，以防止其他基金公司的不利影响；从监管的角度而言，监管层应该对这些流动性较差的大盘股股票进行重点监管。

在每年年底，许多基金公司经常进行频繁调仓，在每年 12 月份，新浪财经、和讯网、网易财经等网站都会有许多的相关新闻报道。造成这一现象的主要原因可能在于，每年全国年度基金排名都会在次年的 1 月 4 日左右公布，而这一排名直接影响各大基金公司未来业绩和市场推广效果，并且从图 2-4 可以看出，与年内其他交易时间相比，基金公司在年底阶段的价格冲击比较小。因此，为了提高自身在年度基金榜上的排名，同时也是为了防止其他同行业基金公司的“砸盘”行为，许多基金经理都会在临近年终时进行集中调仓。

下面将利用上文所选样本股票在 2012 年 12 月的高频交易数据，以价格冲击系数为被解释变量，以个股的流通市值和“真实”流动性作为解释变量，将投资者的订单规模和市场的“真实”流动性指标作为控制变量，采用面板数据分析中的截面固定效应模型进行回归估计，结果如表 2-11 所示。从表 2-11 可以看出，在年末阶段“真实”流动性指标对价格冲击具有显著的负向影响，而流通市值对价格冲击的影响并不显著，即假设 2-6 成立。

表 2-11 价格冲击回归结果（2012 年 12 月）

变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
<i>liq</i>	-0.2430*** (0.0000)				-0.1840*** (0.0001)	-0.1844*** (0.0001)
<i>dsmvosd</i>		-0.0056 (0.2830)		-0.0004 (0.9495)		-0.0013 (0.8243)
<i>size</i>			0.2529*** (0.0000)	0.2523*** (0.0000)	0.1245** (0.0346)	0.1221** (0.0414)
<i>mktliq</i>			-0.2132*** (0.0020)	-0.2157*** (0.0070)	-0.1684** (0.0142)	-0.1770** (0.0251)
AdjR ²	0.81	0.79	0.81	0.81	0.82	0.82

2012 年股票型基金年度收益排名前 3 名分别为：景顺长城核心竞争力股票、中欧中小盘股票、新华行业周期轮换股票，在 2012 年的收益率分别为 31.79%、29.34%、28.83%。这 3 只股票型基金的详细信息如表 2-12 所示。

表 2-12 股票型基金年度收益排名前 3 名（2012 年）

基金代码	基金名称	收益率（%）	成立日期
260116	景顺长城核心竞争力股票	31.79	2011.12.20
166006	中欧中小盘股票（LOF）	29.34	2009.12.30
519095	新华行业周期轮换股票	28.83	2010.07.21

表 2-13 介绍了 2012 年第 4 季度“景顺长城核心竞争力股票基金”累计买入价值前 10 名股票的情况，表中粗体部分股票表示在分析“真实”流动性对股票价格冲击影响时所选择的样本股票。从表中可以看出，与市场的平均水平相比，此基金所买入股票的“真实”流动性较小。

表 2-13 景顺长城核心竞争力股票累计买入价值前 10 名股票（2012 年第 4 季度）

股票代码	成交金额	流通市值	流通股中不变部分比例	“真实”流动性
002572	2.78	1.35	1.73	0.02
000651	70.70	76.15	28.79	0.01
000002	116.41	97.78	15.95	0.01
002325	10.51	4.82	31.48	0.03
600518	61.28	28.89	30.42	0.03
601299	37.88	46.54	69.72	0.03
002081	21.64	31.87	53.75	0.01
600383	74.33	31.39	13.57	0.03
000423	51.63	26.42	23.14	0.03
601166	154.51	180.03	39.36	0.01

注：成交金额和流通市值的单位都是 10 亿元，流通股中不变部分比例的单位为%，粗体部分是在研究“真实”流动性对股票价格冲击影响时所选择的部分样本股票。下同。

表 2-14 描述了 2012 年第 4 季度“景顺长城核心竞争力股票基金”累计卖出价值前 10 名股票的情况。从表 2-14 中可以看出，“景顺长城核心竞争力股票基金”

在 2012 年第 4 季度卖出股票的“真实”流动性普遍较小，其平均值为 0.041。保利地产（600048）、兴业银行（601166）以及长盈精密（300115）是在分析“真实”流动性对价格冲击影响所选择的样本股票。

表 2-14 景顺长城核心竞争力股票累计卖出价值前 10 名股票（2012 年第 4 季度）

股票代码	成交金额	流通市值	流通股中不变部分比例	“真实”流动性
002081	21.64	31.87	53.75	0.01
600518	61.28	28.89	30.42	0.03
600048	112.71	97.08	42.14	0.02
601166	154.51	180.03	39.36	0.01
002415	19.63	16.71	7.93	0.01
000982	11.89	5.82	38.01	0.03
000651	70.70	76.15	28.79	0.01
002236	19.80	14.05	12.87	0.02
601231	29.73	1.26	0.00	0.24
300115	9.92	2.89	1.73	0.03

表 2-15 中欧中小盘股票累计买入价值前 10 名股票（2012 年第 4 季度）

股票代码	成交金额	流通市值	流通股中不变部分比例	“真实”流动性
600016	160.12	177.54	42.33	0.02
600036	134.91	242.91	48.44	0.01
000858	184.63	107.15	56.07	0.04
000024	50.55	20.45	0.00	0.02
601668	52.79	117.00	62.19	0.01
000001	65.57	49.75	14.74	0.02
600015	67.34	51.65	41.92	0.02
600048	112.71	97.08	42.14	0.02
002142	35.05	26.48	47.37	0.03
601166	154.51	180.03	39.36	0.01

表 2-15 介绍了 2012 年第 4 季度“中欧中小盘股票基金”累计买入价值前 10 名股票的情况。从表 2-15 中可以看出，在 2012 年的第 4 季度，“中欧中小盘股票基金”买入股票的“真实”流动性较小。招商银行（600036）、中国建筑（601668）以及长盈精密（300115）是在研究“真实”流动性对价格冲击影响时所选择的样本股票。

表 2-16 介绍了“中欧中小盘股票基金”在 2014 年的第 4 季度累计卖出价值前 10 名股票的情况。从表 2-16 中可以看出，“中欧中小盘股票基金”卖出价值前 10 只股票的“真实”流动性平均值仅为 0.027，低于市场上的平均水平。招商银行（600036）和中国建筑（601668）是分析“真实”流动性对价格冲击影响时所选用的样本股票。

表 2-16 中欧中小盘股票累计卖出价值前 10 名股票（2012 年第 4 季度）

股票代码	成交金额	流通市值	流通股中不变部分比例	“真实”流动性
601668	52.79	117.00	62.19	0.01
600067	28.07	7.72	40.03	0.06
600823	8.11	13.70	68.13	0.02
000402	34.78	20.42	26.55	0.02
000926	17.57	4.99	0.00	0.04
600376	29.84	19.61	62.04	0.04
000069	48.07	23.36	0.00	0.02
000024	50.55	20.45	0.00	0.02
600036	134.91	242.91	48.44	0.01
002285	5.46	4.57	58.21	0.03

表 2-17 描述了 2012 年第 4 季度“新华行业周期轮换股票基金”累计买入价值前 10 名股票的情况。从表中可以看出，“新华行业周期轮换股票基金”买入价值前 10 只股票的“真实”流动性比较差。招商银行（600036）、兴业银行（601166）以及三一重工（600031）是在分析“真实”流动性对价格冲击影响时所选用的样本股票。

表 2-18 描述了“新华行业周期轮换股票基金”累计卖出价值前 10 名股票的情况。从表中可以看出，在 2012 年第 4 季度，“新华行业周期轮换股票基金”所卖出价值前 10 只股票的“真实”流动性也是比较差，其平均值仅为 0.031。表 2-18 中的招商银行（600036）、兴业银行（601166）、三一重工（600031）以及保利

地产（600048）是分析“真实”流动性对价格冲击影响时所选用的样本股票。

表 2-17 新华行业周期轮换股票累计买入价值前 10 名股票（2012 年第 4 季度）

股票代码	成交金额	流通市值	流通股中不变部分比例	“真实”流动性
601318	212.90	216.78	30.16	0.01
002375	14.32	5.81	0.00	0.02
300072	6.75	2.43	1.07	0.03
000157	104.08	57.78	50.84	0.04
600031	87.19	74.46	56.38	0.03
000728	28.62	21.88	65.19	0.04
600030	204.25	131.12	34.64	0.02
601939	31.15	44.13	92.58	0.10
601166	154.51	180.03	39.36	0.01
600036	134.91	242.91	48.44	0.01

表 2-18 新华行业周期轮换股票基金累计卖出价值前 10 名股票（2012 年第 4 季度）

股票代码	成交金额	流通市值	流通股不变部分比例	“真实”流动性
601318	212.90	216.78	30.16	0.01
002375	14.32	5.81	0.00	0.02
000157	104.08	57.78	50.84	0.04
600031	87.19	74.46	56.38	0.03
600036	134.91	242.91	48.44	0.01
601939	31.15	44.13	92.58	0.10
300072	6.75	2.43	1.07	0.03
000728	28.62	21.88	65.19	0.04
600048	112.71	97.08	42.14	0.02
601166	154.51	180.03	39.36	0.01

表 2-19 是 2012 年股票型基金年度收益前 3 名基金的“真实”流动性情况。从表 2-19 中可以看出，这 3 只基金在 2012 年第 4 季度买入、卖出前 10 名股票的“真

实”流动性指标的平均值都明显低于市场上所有股票“真实”流动性的平均值。在每年第 4 季度，基金公司需要高度关注那些“真实”流动性较差的股票，以防止同行业其他公司的“砸盘”行为；监管层也应该重点监控这类股票，以防止出现人为的价格操纵行为。

表 2-19 股票型基金年度收益前 3 名基金的“真实”流动性对比（2012 年）

	沪市大盘股	深市大盘股	中小板	创业板
2012 年所有股票	0.351	0.337	0.615	0.872
2012 年基金年度收益第 1 名买入	0.025	0.017	0.020	--
2012 年基金年度收益第 1 名卖出	0.075	0.020	0.013	0.030
2012 年基金年度收益第 2 名买入	0.015	0.027	0.030	--
2012 年基金年度收益第 2 名卖出	0.028	0.025	0.030	--
2012 年基金年度收益第 3 名买入	0.030	0.040	0.020	0.030
2012 年基金年度收益第 3 名卖出	0.030	0.040	0.020	0.030

2.5 本章小结

本章利用 VWAP 基准价格估计了价格冲击的大小，从市场微观结构理论的角度指出，VWAP 基准价格实际上是市场可预期交易量对证券价格进行冲击后的期望值，给出了相应的理论依据，并采用深圳证券交易所创业板的高频交易数据，实证检验了投资者的订单规模、买卖价差、订单不平衡程度、成交价格等市场微观结构指标对价格冲击的影响；同时，还对比分析了这种影响在日内不同交易时段之间的差异。

研究结果表明，相对买卖价差、订单不平衡量对价格冲击都具有显著的正向关系。对中等规模和小规模股票而言，订单规模是影响价格冲击成本的显著因素，即订单规模越小，价格冲击也越小。由于大规模这类股票的流动市值和成交量较大，所以这类股票的订单规模对价格冲击影响并不显著。因此，为了减少价格冲击成本，提高投资收益，投资者在制定的交易策略时应该重点考虑那些规模比较大的股票；在交易时尽量将大额订单拆分为多个中、小规模子订单，并在开盘后较短时期内逐次提交。

进一步，针对许多大盘股股票中很多流通股长期处于不流动状态的情形，提

出了一个股票的“真实”流动性指标，并利用股票成交金额与流通市值的比值来衡量，此处流通市值是去除了不经常流动部分的流通股市值；利用我国证券交易所的高频交易数据，分析了“真实”流动性对股票价格冲击的影响。研究发现，“真实”流动性对价格冲击具有显著的负向影响，而流通市值对价格冲击的影响并不显著，其原因可能在于：许多大盘股股票的流通市值很大，但其流通股中存在大部分的流通股长期处于不流动状态，导致其“真实”流动性较差，价格冲击较大，这类证券也更容易受到投资者大额订单的影响。受基金排名等因素的影响，基金公司在年底集中调仓时应该高度关注那些“真实”流动性较差的股票，以防止其他基金公司的“砸盘”行为；监管层在年底时应该重点监管“真实”流动性较小的大盘股股票，以防止出现人为的价格操纵行为。

第三章 基于价格冲击的算法交易策略研究

3.1 引言

随着我国经济的持续快速发展，证券交易技术得到了前所未有的高速发展，技术的快速发展降低了证券市场交易的准入门槛，从而导致证券交易所之间的竞争日益激烈，而激烈的市场竞争又反过来推动了证券交易技术的不断创新和变革。算法交易正是这些技术创新的典型代表。虽然算法交易发展的时间并不长，但其发展非常迅速。在证券交易过程中，越来越多的经纪商和机构投资者逐渐开始采用算法交易。根据 Aite Group 的相关统计，在美国证券市场上，算法交易所占市场份额已经从 2004 年的 25% 上升到 2011 年的 63%；在欧洲证券市场上，算法交易所完成的交易量占市场总成交量的比例已经由 2004 年 3% 增加到 2011 年的 32%；相对而言，亚洲市场发展较为缓慢，在 2011 年的亚洲证券市场上，算法交易完成的交易量占据总成交量的 20% 左右。

算法交易的最主要目的是通过设计合理的交易策略，最大限度地为投资者降低交易成本，提高投资收益（Leach 和 Madhavan, 1993; Holthausen 等, 1990; Loeb, 1983）^[151-153]。即便一个具有某种优势的投资组合，若其交易成本过高，那么此投资组合的收益可能会低于预期值。交易成本一般可分为显性交易成本和隐性交易成本。显性交易成本是可以直接在证券市场上进行观察和测量；隐性交易成本作为总交易成本中的重要组成部分不容易被直接观察和测量。因此，业界和学术界的专家、学者都十分关注对隐性交易成本的控制和研究。

隐性交易成本主要包含价格冲击成本、机会成本、择时风险以及价格升量等。隐性交易成本对投资者制定算法交易策略起到了十分重要的作用。算法交易的关键在于如何根据市场环境变化设计出最优算法交易策略，以便可以确定订单的最优提交时间、价格以及数量。Berkowitz 等（1988）^[37]给出了一种估计价格冲击成本的方法，并在最小化交易成本的目标下提出了著名的 VWAP 交易策略。当证券价格是一个随机变量时，Bertsimas 和 Lo（1998）^[154]考虑了投资者在最小化价格冲击成本目标下的最优交易策略问题。在此基础上，Lorenz 和 Almgren（2011）^[155]、燕汝贞等（2012）^[156]、方兆本和镇磊（2011）^[157]等提出了相应的静态最优交易策略。从现有算法交易的研究来看，大部分研究文献所考虑的交易成本主要是价格

冲击成本，部分文献也涉及到了择时风险。然而，在现实的证券市场上，受到市场流动性等因素的影响，投资者所提交到证券市场上的订单可能会出现未全部成交情形，此时将会产生机会成本。针对这一问题，本章分析了机会成本、价格冲击等隐性交易成本对投资者算法交易策略的影响，并在最小化交易成本目标下给出了相应的最优交易策略。

3.2 受价格冲击和机会成本共同影响的交易模型

3.2.1 模型描述

价格冲击是指由某一订单所引起股票价格的变化，其大小等于该订单的执行价格和市场上不存在该订单时股票价格的差额。显然，在估计价格冲击成本时，投资者需要同时观察到在两种不同情况下的股票价格。事实上，在现实股票市场上，投资者是无法同时观察到这两组数据；同时，由于价格冲击是隐性交易成本的主要组成部分，所以学术界与实业界都十分关注对价格冲击的研究。

对于研究市场微观结构理论的学者而言，必须要关注价格冲击，因为价格冲击反映了交易、价格和三者之间复杂的联系，具有重要的理论意义；对于机构投资者来说，由于价格冲击是交易成本的最重要组成部分之一，并且它总是会使得价格向反方向变化。投资者只有在有效控制了价格冲击成本后，才可能降低交易成本、提高投资收益。

假设投资者将在未来 m 个交易时期内利用分阶段交易策略 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)'$ 交易总量为 S 的证券。其中， $x_t (t \in [1, m])$ 是此投资者在交易时期 t 所提交订单大小。此交易策略的价格冲击成本可以表示为：

$$MI_{\$}^{total}(x) = \sum_{t=1}^m x_t \left[\frac{\alpha I x_t}{S(x_t + 0.5v_t)} + \frac{(1-\alpha)I}{S} \right] \quad (3-1)$$

其中， I 表示瞬时冲击成本； α 表示临时性价格冲击成本占总价格冲击成本的比例， $\alpha \in [0, 1]$ ； v_t 表示在 t 时期市场的预期交易量^①。

除了价格冲击成本外，机会成本也是投资者必须要考虑的一个重要成本。当投资者提交限价订单时，受市场流动性不足和证券价格变化的影响，投资者在不

^① 对于市场未来某段时间的交易量，本研究是利用过去一段时间内的市场交易情况进行的预测。在算法交易策略的相关研究中，Berkowitz 等（1988）^[37]、Kissell 和 Glantz（2003）^[32]、Bialkowski 等（2008）^[78]等学者在研究算法交易策略问题时也是利用市场上的历史交易情况来预测市场未来某一时期交易量情况。本研究主要考虑算法交易策略的制定，并没有对如何预测未来市场成交量进行过多分析。在制定算法交易策略时，对于未来市场成交量指标，本研究可以也借鉴其他学者关于预测未来市场成交量的相关研究成果。

同阶段提交的订单可能会没有全部执行，此时就会产生机会成本。机会成本就是由于那些未能全部执行订单而损失的收益。当投资者订单趋向于全部执行的时候，机会成本将会相应减少。一般而言，为了减少在交易过程中产生的机会成本，投资者会尽可能的促使订单全部执行。然而，在面对不利的市场环境时，如果投资者仍然选择执行全部订单，无疑会大幅增加价格冲击成本。因此，对于采用高频交易的投资者而言，机会成本是其制定交易策略时的一项不可忽视的重要因素。

投资者的机会成本与证券未成交数量、价格变化量有关。在交易时期 t ，投资者采用交易策略 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)'$ 时所承担的机会成本可表示为：

$$E(OC(x)) = \sum_{t=1}^m x_t (1 - \rho_t) \frac{(1 - \alpha)I}{X} \quad (3-2)$$

其中， ρ_t 为 t 时期订单的成交概率， $\rho \in [0, 1]$ ， $t = 1, 2, \dots, m$ 。

在制定算法交易策略时，如果投资者只关注价格冲击成本，那么根据前文可知其最优交易策略为 VWAP 交易策略，即根据历史成交量来确定未来不同交易时期所提交订单大小，使得订单的平均执行价格尽可能等于交易量加权平均价格；如果投资者只考虑机会成本，那么其最优交易策略就是采取不拆单的交易策略，也就是在开始阶段就将所有订单进行全部提交。事实上，在现实证券交易中，投资者很少仅仅关注这两种成本中的某一项，而是需要综合考虑价格冲击成本和机会成本的共同影响。

假设投资者还是计划在未来 m 个交易时期内采用分阶段的交易策略 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)'$ 交易总量为 S 的订单。其中， x_t 表示投资者在时期 t 准备提交的订单数量，对应的成交概率为 ρ_t 。若投资者同时考虑价格冲击成本和机会成本，那么他面临的决策问题可以用如下数学规划模型表示：

$$\begin{aligned} \text{Min } E(TC(x)) = & \sum_{t=1}^m x_t \rho_t \left[\frac{\alpha I x_t \rho_t}{X (x_t \rho_t + 0.5 v_t)} + \frac{(1 - \alpha)I}{X} \right] \\ & + \sum_{t=1}^m \frac{x_t (1 - \rho_t) (1 - \alpha)I}{X} \end{aligned} \quad (3-3)$$

$$\text{s.t. } X = \sum_{t=1}^m x_t \rho_t \quad (3-3a)$$

$$S = \sum_{t=1}^m x_t \quad (3-3b)$$

$$x_t \geq 0 \quad (3-3c)$$

3.2.2 每个交易时期的订单成交概率都相等

如果投资者所有交易时期的订单成交概率都相等，即 $\rho_t = \rho$ 。其中， ρ_t 为在时期 t 订单的成交概率， $\rho \in [0, 1]$ ， $t = 1, 2, \dots, m$ 。此时，投资者同时考虑价格冲击成本和机会成本时的最优交易策略问题可以表示为：

$$\text{Min } TC(x) = \sum_{t=1}^m x_t \rho \left[\frac{\alpha I x_t \rho}{S \rho (x_t \rho + 0.5 v_t)} + \frac{(1-\alpha) I}{S \rho} \right] \quad (3-4)$$

$$+ \sum_{t=1}^m \frac{x_t (1-\rho)(1-\alpha) I}{S \rho}$$

$$\text{s.t. } S = \sum_{t=1}^m x_t \quad (3-4a)$$

$$x_t \geq 0 \quad (3-4b)$$

利用 Kuhn-Tucker 条件求解，可得：

$$x_t = S \frac{v_t}{V}, \quad t \in [1, m] \quad (3-5)$$

其中， V 是表示市场上的预期交易量，即：

$$V = \sum_{i=1}^m v_i \quad (3-6)$$

此模型目标函数的 Hessian 阵为：

$$\nabla^2 TC(x) = \frac{\alpha I \rho}{S} \begin{bmatrix} \frac{2(0.5v_1)^2}{(x_1 \rho + 0.5v_1)^3} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{2(0.5v_m)^2}{(x_m \rho + 0.5v_m)^3} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

显然，Hessian 阵 $\nabla^2 TC(x)$ 的特征值都大于零，所以它是一个正定矩阵。同时，此模型的约束条件为线性函数，可行域为凸集，所以此问题为凸规划问题。对于凸规划问题而言，Kuhn-Tucker 条件既是最优解的必要条件，也是充分条件。因此，式 (3-5) 是此模型问题的全局最优解。

3.2.3 所有交易时期订单的成交概率不一致

对于所有交易时期订单成交概率不一致的一般情形，此时通常无法获得此问

题的解析解。但是，在投资者可以预期总的可执行订单大小的特殊情况下，可以得到此模型的解析解。

假设投资者预期总的可成交订单大小为：

$$X = S\bar{\rho} \quad (3-8)$$

其中， $\bar{\rho} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \rho_t$ 。在此情形下，投资者同时考虑价格冲击成本和机会成本时的最优交易策略问题可以表示为：

$$\begin{aligned} \text{Min } TC(x) = & \sum_{t=1}^m x_t \rho_t \left[\frac{\alpha I x_t \rho_t}{S\bar{\rho}(x_t \rho_t + 0.5v_t)} + \frac{(1-\alpha)I}{S\bar{\rho}} \right] \\ & + \sum_{t=1}^m \frac{x_t(1-\rho_t)(1-\alpha)I}{S\bar{\rho}} \end{aligned} \quad (3-9)$$

$$\text{s.t. } S = \sum_{t=1}^m x_t \quad (3-9a)$$

$$x_t \geq 0 \quad (3-9b)$$

利用 Kuhn-Tucker 条件求解可得：

$$x_t = \frac{0.5v_t}{\rho_t} \left[\left(1 - \frac{S\bar{\rho}\lambda^*}{\alpha I \rho_t} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right], \quad t \in [1, m] \quad (3-10)$$

其中， λ^* 是广义拉格朗日乘子。为了简化计算，不妨令：

$$f(\lambda^*) = \left(1 - \frac{S\bar{\rho}\lambda^*}{\alpha I \rho_t} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3-11)$$

将上式 $f(\lambda^*)$ 在 $\lambda^* = 0$ 处进行泰勒展开可得：

$$f(\lambda^*) = 1 + \frac{S\bar{\rho}\lambda^*}{2\alpha I \rho_t} + O(\lambda^*) \quad (3-12)$$

由此，式 (3-11) 可以表示为：

$$x_t = \frac{0.5v_t S\bar{\rho}\lambda^*}{2\alpha I \rho_t^2}, \quad t \in [1, m] \quad (3-13)$$

将式 (3-13) 与式 (3-9a) 联立求解，可得：

$$\lambda^* = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{0.5v_i\bar{\rho}}{2\alpha I\rho_i^2}} \quad (3-14)$$

将 λ^* 值代入(3-13)式, 可得:

$$x_t = S \frac{v_t}{\rho_t^2 \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{\rho_i^2}}, \quad t \in [1, m] \quad (3-15)$$

与所有时期订单执行概率都相等情形相同, 此模型也是一个凸规划问题。因此, 式(3-15)是此模型的全局最优解。

3.2.4 数值示例

在现实的证券市场上, 受到市场流动性等因素的影响, 投资者在所有交易时期的订单成交概率并非都相等。此时投资者在制定最优交易策略时所面对的数学模型过于复杂, 很难求得其解析解。下面将利用三个不同的数值示例来具体分析投资者在面对不同阶段的订单成交概率递减、递增与 U 型情形下应该如何制定最优交易策略的问题。

3.2.4.1 订单成交概率递减

投资者在交易过程中可能会面对许多不同的市场环境。如果投资者计划在某一交易日上午的早盘时间内完成所有交易, 由于证券市场的流动性在这段时间内是逐渐减小的, 所以投资者所提交订单能够全部成交的概率也会逐渐降低。此时, 投资者就会面临一个订单成交概率逐渐减少的情况。针对这种情况, 本研究利用相应的数值示例进行了分析, 并给出了相应的算法交易策略。

当投资者面对不同交易时期的订单成交概率 ρ 为递减情形时, 在保持总订单大小、瞬时冲击成本、交易时期个数、临时性价格冲击成本比例等参数^①不变的情形下, 图 3-1 描述了在投资者同时考虑价格冲击成本和机会成本时的最优交易策略(MIOC)与 VWAP 交易策略在各阶段的订单大小, 其中, 变量 x 和 $xvwap$ 分别表示本研究所提出 MIOC 交易策略和 VWAP 交易策略在每一时期提交的订单规模。

^① 本例及以下各情形中的订单大小、瞬时价格冲击、临时性价格冲击比例均取自 Kisell 和 Glantz (2003) [32]:
 $I=100000; S=60000; \alpha=0.95$; 同时, 根据本文的需要假设交易时期的数目 $m=16$; 假设在 ρ 为递减情形时,
 不同交易时期的预期市场成交量和订单成交概率分别为:
 $v=[100000 \ 95000 \ 90000 \ 85000 \ 80000 \ 75000 \ 70000 \ 65000 \ 60000 \ 55000 \ 50000 \ 45000 \ 40000 \ 35000 \ 30000 \ 25000]$,
 $\rho=[0.90 \ 0.85 \ 0.80 \ 0.75 \ 0.70 \ 0.65 \ 0.60 \ 0.55 \ 0.50 \ 0.45 \ 0.40 \ 0.35 \ 0.30 \ 0.25 \ 0.20 \ 0.15]$ 。

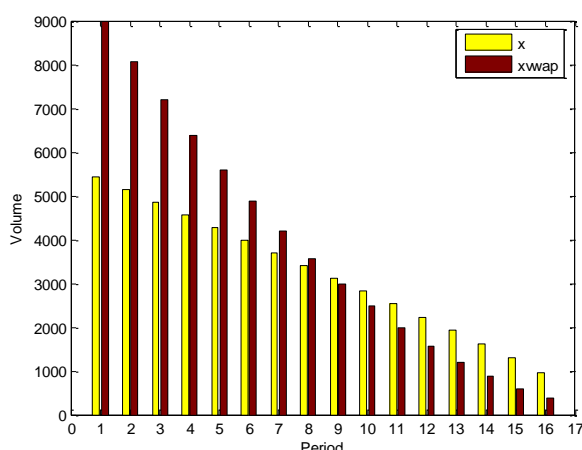


图 3-1 不同交易策略的对比 (ρ 为递减)

由图 3-1 可知，MIOC 与 VWAP 交易策略存在明显不同，受价格冲击成本的影响，在前 8 个交易时期内，MIOC 交易策略在各时期所提交订单明显小于投资者常用的 VWAP 交易策略；在第 9 个交易时期至最后一个交易时期，本节提出的 MIOC 交易策略所提交的订单规模要明显大于 VWAP 交易策略。从林辉等(2011)^[60]的研究结论不难看出，在证券市场的行情看跌时，无论是买入证券还是卖出证券所采用的最优交易策略都是递减型，而本研究所考虑的成交概率 ρ 为递减情形可在一定程度上理解为这种市场行情看跌的情形，从上文的分析可以明显看出，在 ρ 为递减情形下本节的研究结论与其一致，投资者在整个交易过程中都是采用递减型的交易策略。

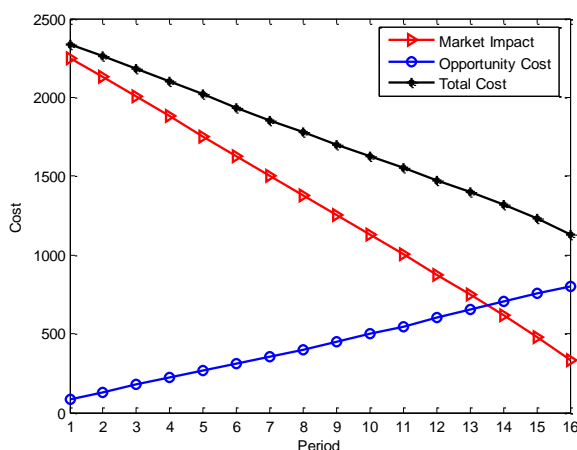


图 3-2 交易策略 (MIOC) 的交易成本 (ρ 为递减)

图 3-2 给出了 MIOC 交易策略在不同交易时期内的交易成本变化情况。从图

3-2 可以看出,在整个交易时期 ($1 \leq m \leq 16$) 内,随着交易的不断进行,投资者的价格冲击成本会逐渐减小;受到订单成交概率逐渐减小的影响,投资者所承担的机会成本逐渐增大。从图中可以明显看出,价格冲击成本和机会成本是呈反方向变化的,并且投资者的总交易成本是逐渐减小。

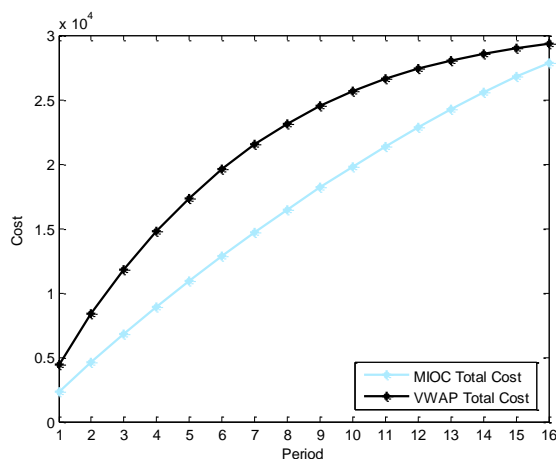


图 3-3 不同交易策略的总交易成本 (ρ 为递减)

图 3-3 描述了本节所提出交易策略 MIOC 和 VWAP 交易策略的总交易成本变化情况,横轴表示交易时期;纵轴表示累积成本。由图 3-3 可知,这两种交易策略的累积交易成本都是逐渐增加的,但是本研究所提出交易策略的交易成本始终明显小于投资者常用的 VWAP 交易策略。从最后一个交易时期来看,本研究所提出的交易策略要比 VWAP 交易策略大约减少了 4.92% 的交易成本。

下面将利用我国证券市场中的股票 600663(陆家嘴)、600779(水井坊)、600997(开滦股份)历史交易数据,时间范围是 2012 年 12 月 1 日至 12 月 31 日,分析本研究所提出 MIOC 交易策略与 VWAP 交易策略的总交易成本情况,并且研究临时性价格冲击占总价格冲击的比例 α 、不同时期的订单成交概率 ρ 、投资者的订单规模 S 等因素对交易成本减少比例的影响。

假设投资者计划在未来 16 个交易时期内分别购买股票 600663、600779、600997 各 100 万股。在交易时期 t 的市场预期交易量 v_t 是利用过去一个月的平均交易量进行估计,不同交易时期内的市场预期交易量情况如表 3-1 所示;利用曾勇等(2008)^[140]的相关研究结果可知,股票 600663、600779、600997 的价格冲击系数分别为: 1.21E-07、1.22E-07、1.06E-07。假设投资者在不同交易时期所面临的订单成交概率分别为: $\rho = [0.92 \ 0.88 \ 0.84 \ 0.80 \ 0.76 \ 0.72 \ 0.68 \ 0.64 \ 0.60 \ 0.56 \ 0.52 \ 0.48 \ 0.44 \ 0.40 \ 0.36 \ 0.32]$ 。

表 3-1 不同交易时期的市场预期交易量

股票代码	时期 1	时期 2	时期 3	时期 4	时期 5	时期 6	时期 7	时期 8
600663	266399	172984	185670	143942	190369	101238	163378	128480
600779	343756	305893	327541	300178	281277	303877	241456	242685
600997	222095	208968	162698	192956	228498	189230	200653	163650
股票代码	时期 9	时期 10	时期 11	时期 12	时期 13	时期 14	时期 15	时期 16
600663	168531	126110	137312	94833	90266	99724	104715	72921
600779	221036	198565	193101	182849	175989	174537	183124	154693
600997	147287	142351	82362	156332	116757	130937	138019	110718

表 3-2、表 3-3 以及表 3-4 分别描述了股票 600663、600779、600997 的临时性价格冲击占总价格冲击比例 α 与交易成本减少比例的关系。从这 3 个表中可以看出, 本研究所提出交易策略 (MIOC) 的交易成本要小于 VWAP 交易策略, 并且随着临时性冲击比例 α 的逐渐减小, 交易成本减少比例也在变小。

表 3-2 临时性价格冲击比例对交易成本减少比例的影响 (股票 600663)

α	冲击系数	100 万股股票的瞬时冲击成本 (I)	MIOC 交易策略的总交易成本	VWAP 交易策略的总交易成本	交易成本减少比例 (%)
0.99	1.21E-07	121000	43317	47959	9.68
0.97	1.21E-07	121000	46717	50631	7.73
0.95	1.21E-07	121000	50075	53312	6.07
0.93	1.21E-07	121000	53340	55974	4.71
0.9	1.21E-07	121000	58149	59982	3.06
0.85	1.21E-07	121000	65850	66661	1.22
0.8	1.21E-07	121000	73140	73341	0.27

根据 Kissell 和 Glantz (2003)^[32] 的估计, 临时性价格冲击占总价格冲击的比例一般约为 0.95。从表 3-2、表 3-3 以及表 3-4 中可以看出, 当 $\alpha=0.95$ 时, 这 3 只股票的交易成本减少比例平均值约为 6.30%。这表明如果投资者在交易过程中采用本研究所提出的 MIOC 交易策略, 那么投资者可以节省大约 6.30% 的交易成本。

表 3-3 临时性价格冲击比例对交易成本减少比例的影响（股票 600779）

α	冲击系数	100 万股股票的瞬时冲击成本（ I ）	MIOC 交易策略的总交易成本	VWAP 交易策略的总交易成本	交易成本减少比例（%）
0.99	1.22E-07	122000	30402	34278	11.31
0.97	1.22E-07	122000	34096	37292	8.57
0.95	1.22E-07	122000	37727	40305	6.40
0.93	1.22E-07	122000	41295	43319	4.67
0.90	1.22E-07	122000	46523	47839	2.75
0.85	1.22E-07	122000	54900	55373	0.85
0.80	1.22E-07	122000	62837	62907	0.11

表 3-4 临时性价格冲击比例对交易成本减少比例的影响（股票 600997）

α	冲击系数	100 万股股票的瞬时冲击成本（ I ）	MIOC 交易策略的总交易成本	VWAP 交易策略的总交易成本	交易成本减少比例（%）
0.99	1.06E-07	106000	34128	38158	10.56
0.97	1.06E-07	106000	37267	40644	8.31
0.95	1.06E-07	106000	40353	43130	6.44
0.93	1.06E-07	106000	43383	45616	4.90
0.90	1.06E-07	106000	47822	49346	3.09
0.85	1.06E-07	106000	54925	55561	1.14
0.80	1.06E-07	106000	61643	61776	0.22

在本研究所考虑的模型中，不同时期的订单成交概率会影响到交易策略的制定，进而会影响到投资者的总交易成本。针对样本股票 600663（陆家嘴）、600779（水井坊）以及 600997（开滦股份），假设临时性冲击占总冲击成本的比例 $\alpha=0.95$ ，在保持其他参数不变的情况下，下面将分析订单成交概率 ρ 与交易成本减少比例的关系。

（1）对于股票 600663，如果不同交易时期内的成交概率为： $\rho=[0.92\ 0.89\ 0.86$

0.83 0.80 0.77 0.74 0.71 0.68 0.65 0.62 0.59 0.56 0.53 0.50 0.47], 那么本研究所提出交易策略的总交易成本为 52712 元; VWAP 交易策略的总交易成本为 54246 元; 相对于 VWAP 交易策略, 此交易策略交易成本的减少比例约为 2.83%。

(2) 针对股票 600663, 如果不同时期的订单成交概率为: $\rho = [0.92 \ 0.885 \ 0.85 \ 0.815 \ 0.78 \ 0.745 \ 0.71 \ 0.675 \ 0.64 \ 0.605 \ 0.57 \ 0.535 \ 0.50 \ 0.465 \ 0.43 \ 0.395]$, 则本研究所提出交易策略的总交易成本为 51430 元; VWAP 交易策略的总交易成本为 53717 元; 与 VWAP 交易策略相比, 此交易策略交易成本的减少比例约为 4.26%。

(3) 针对股票 600663, 如果不同时期的订单成交概率为: $\rho = [0.92 \ 0.88 \ 0.84 \ 0.80 \ 0.76 \ 0.72 \ 0.68 \ 0.64 \ 0.60 \ 0.56 \ 0.52 \ 0.48 \ 0.44 \ 0.40 \ 0.36 \ 0.32]$, 那么本研究交易策略的总交易成本为 50058 元; VWAP 交易策略的总交易成本为 53303 元; 与 VWAP 交易策略相比, 此交易策略交易成本的减少比例约为 6.09%。

(4) 针对股票 600779, 如果不同时期的订单成交概率为: $\rho = [0.92 \ 0.89 \ 0.86 \ 0.83 \ 0.80 \ 0.77 \ 0.74 \ 0.71 \ 0.68 \ 0.65 \ 0.62 \ 0.59 \ 0.56 \ 0.53 \ 0.50 \ 0.47]$, 则本研究交易策略的总交易成本为 39628 元; VWAP 交易策略的总交易成本为 40911 元; 与 VWAP 交易策略相比, 此交易策略交易成本的减少比例约为 3.14%。

(5) 针对股票 600779, 如果不同时期的订单成交概率为: $\rho = [0.92 \ 0.885 \ 0.85 \ 0.815 \ 0.78 \ 0.745 \ 0.71 \ 0.675 \ 0.64 \ 0.605 \ 0.57 \ 0.535 \ 0.50 \ 0.465 \ 0.43 \ 0.395]$, 则本研究交易策略的总交易成本为 38699 元; VWAP 交易策略的总交易成本为 40557 元; 与 VWAP 交易策略相比, 此交易策略交易成本的减少比例 4.58%。

(6) 针对股票 600779, 如果不同时期的订单成交概率为: $\rho = [0.92 \ 0.88 \ 0.84 \ 0.80 \ 0.76 \ 0.72 \ 0.68 \ 0.64 \ 0.60 \ 0.56 \ 0.52 \ 0.48 \ 0.44 \ 0.40 \ 0.36 \ 0.32]$, 则本研究交易策略的总交易成本为 37727 元; VWAP 交易策略的总交易成本为 40305 元; 与 VWAP 交易策略相比, 此交易策略交易成本的减少比例为 6.40%。

(7) 针对股票 600997, 如果不同时期的订单成交概率为: $\rho = [0.92 \ 0.89 \ 0.86 \ 0.83 \ 0.80 \ 0.77 \ 0.74 \ 0.71 \ 0.68 \ 0.65 \ 0.62 \ 0.59 \ 0.56 \ 0.53 \ 0.50 \ 0.47]$, 那么本研究交易策略的总交易成本为 42597 元; VWAP 交易策略的总交易成本为 43923 元; 与 VWAP 交易策略相比, 此交易策略交易成本的减少比例约为 3.02%。

(8) 针对股票 600997, 如果不同时期的订单成交概率为: $\rho = [0.92 \ 0.885 \ 0.85 \ 0.815 \ 0.78 \ 0.745 \ 0.71 \ 0.675 \ 0.64 \ 0.605 \ 0.57 \ 0.535 \ 0.50 \ 0.465 \ 0.43 \ 0.395]$, 那么本研究交易策略的总交易成本为 41521 元; VWAP 交易策略的总交易成本为 43479 元; 与 VWAP 交易策略相比, 此交易策略交易成本的减少比例 4.50%。

(9) 针对股票 600997, 如果不同时期的订单成交概率为: $\rho = [0.92 \ 0.88 \ 0.84$

0.80 0.76 0.72 0.68 0.64 0.60 0.56 0.52 0.48 0.44 0.40 0.36 0.32], 那么本研究交易策略的总交易成本为 40353 元; VWAP 交易策略的总交易成本为 43130 元; 与 VWAP 交易策略相比, 此交易策略交易成本的减少比例约为 6.44%。

从以上各种情况的分析中可以看出, 本节所提出的 MIOC 交易策略的总交易成本要小于 VWAP 交易策略, 并且不同交易时期的订单成交概率变化越剧烈, MIOC 交易策略的交易成本减少比例也越大, MIOC 交易策略的成本优势也就越明显。

表 3-5 订单规模对交易成本减少比例的影响 (股票 600663)

S	冲击系数	瞬时冲击成本 (I)	MIOC 交易 策略的总交 易成本	VWAP 交易 策略的总交 易成本	交易成本减少 比例 (%)
100	1.21E-07	121000	50075	53312	6.07
80	1.21E-07	77440	28489	30396	6.27
60	1.21E-07	43560	13694	14613	6.29
50	1.21E-07	30250	8595.2	9158.8	6.15
30	1.21E-07	10890	2341.8	2467.73	5.10
20	1.21E-07	4840	848.2	880.1	3.63

表 3-6 订单规模对交易成本减少比例的影响 (股票 600779)

S	冲击系数	瞬时冲击成本 (I)	MIOC 交易 策略的总交 易成本	VWAP 交易 策略的总交 易成本	交易成本减少 比例 (%)
100	1.22E-07	122000	37727	40305	6.40
80	1.22E-07	78080	21346	22748	6.16
60	1.22E-07	43920	10261	10869	5.59
50	1.22E-07	30500	6469	6814	5.07
30	1.22E-07	10980	1811	1870	3.17
20	1.22E-07	4880	677.5	687.6	1.47

除了订单成交概率和临时性价格冲击占总价格冲击比例外, 投资者的订单规

模对交易成本的减少也有一定影响。针对样本股票 600663（陆家嘴）、600779（水井坊）以及 600997（开滦股份），假设临时性冲击占总冲击成本的比例为 0.95，即 $\alpha=0.95$ ，投资者分 16 个交易时期进行交易，成交概率为 $\rho=[0.92\ 0.88\ 0.84\ 0.80\ 0.76\ 0.72\ 0.68\ 0.64\ 0.60\ 0.56\ 0.52\ 0.48\ 0.44\ 0.40\ 0.36\ 0.32]$ ，不同交易时期内的市场预期成交量如表 3-1 所示。投资者的订单规模与交易成本减少比例之间的关系如表 3-5、表 3-6 以及表 3-7 所示。

从表 3-5、表 3-7 中可以看出，随着投资者订单规模的减小，交易成本减少比例呈现出先增加后逐渐减小的趋势；从表 3-6 中可以看出，其交易成本减少比例是随着订单规模的减少逐渐减小。

表 3-7 订单规模对交易成本减少比例的影响（股票 600997）

S	冲击系数	瞬时冲击成本 (I)	MIOC 交易 策略的总交 易成本	VWAP 交易 策略的总交 易成本	交易成本减少 比例 (%)
100	1.06E-07	106000	40353	43130	6.44
80	1.06E-07	67840	22904	24501	6.52
60	1.06E-07	38160	11001	11748	6.35
50	1.06E-07	26500	6912.4	7359.6	6.08
30	1.06E-07	9540	1898.4	1991.8	4.69
20	1.06E-07	4240	695.5	716.8	2.98

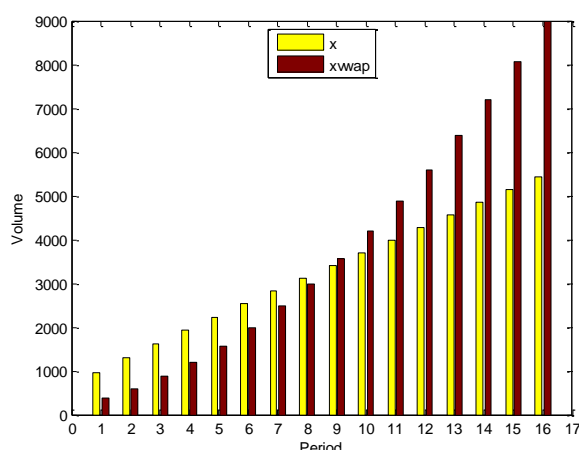
3.2.4.2 订单成交概率递增

如果投资者计划在未来某一段特定的交易时期内完成交易，比如在临近收盘的交易时期，由于这段时期内的市场流动性一般是逐渐增加的，因此投资者所提交订单的成交概率也是逐渐增加。针对这种情况本节利用相应的数值示例进行了分析，并给出了相应的算法交易策略。当订单成交概率 ρ 为递增情形时，在保持总订单规模、瞬时冲击成本、交易时期个数、临时性价格冲击比例等参数^①不变的情形下，图 3-4 描述了 MIOC 与 VWAP 交易策略在各时期的订单大小情况。

^① 在 ρ 为递增情形时，不同时期的预期市场成交量和订单成交概率分别为：

$v=[25000\ 30000\ 35000\ 40000\ 45000\ 50000\ 55000\ 60000\ 65000\ 70000\ 75000\ 80000\ 85000\ 90000\ 95000\ 100000]$

$\rho=[0.15\ 0.20\ 0.25\ 0.30\ 0.35\ 0.40\ 0.45\ 0.50\ 0.55\ 0.60\ 0.65\ 0.70\ 0.75\ 0.80\ 0.85\ 0.90]$ 。

图 3-4 不同交易策略的对比 (ρ 为递增)

从图 3-4 可以明显看出，在订单成交概率递增的情形下，MIOC 交易策略与 VWAP 交易策略存在明显差异。在整个交易的前 8 个交易时期 ($1 \leq m \leq 8$) 内，本研究所提出交易策略 (MIOC 交易策略) 的订单规模明显大于 VWAP 交易策略；在其他交易时期内，MIOC 交易策略所提交的订单规模明显要小于 VWAP 交易策略。此情形下的递增成交概率可在一定程度上理解为林辉等 (2011)^[60] 考虑的行情看涨情形。本研究在成交概率 ρ 为递增情形下的结论与林辉等 (2011)^[60] 的研究结论一致，都是采用递增型的交易策略。

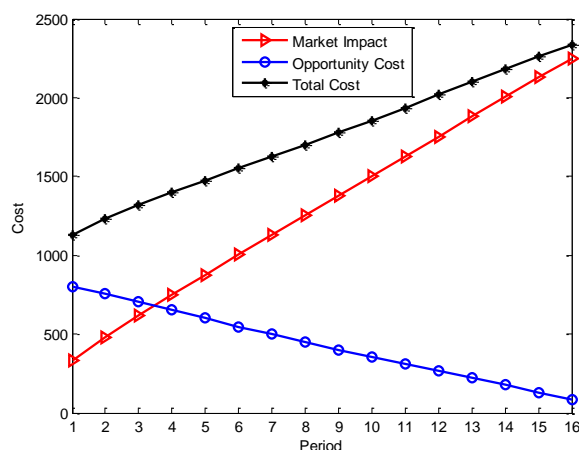
图 3-5 交易策略 (MIOC) 的交易成本 (ρ 为递增)

图 3-5 是 MIOC 交易策略在不同交易时期内的交易成本变化情况。从图 3-5 可以看出，在整个交易时期 ($1 \leq m \leq 16$) 内，受到订单成交概率逐渐递增大的影响，投资者的机会成本逐渐减小，但是价格冲击成本却是逐渐增加的。在此情形下，

价格冲击成本和机会成本还是呈现出明显的反方向变化趋势。

上文给出了投资者在面临执行概率递增情形下的最优交易策略，比较了此交易策略和 VWAP 交易策略的差异，并分析了此交易策略在不同时期内的交易成本变化情况。图 3-6 描述了 MIOC 交易策略与 VWAP 交易策略的累积交易成本情况。从图 3-6 可以明显看出，相对于 VWAP 交易策略，在前几个交易时期内 MIOC 交易策略的交易成本较大，但是从整个交易时期来看，MIOC 交易策略的总交易成本还是小于 VWAP 交易策略。

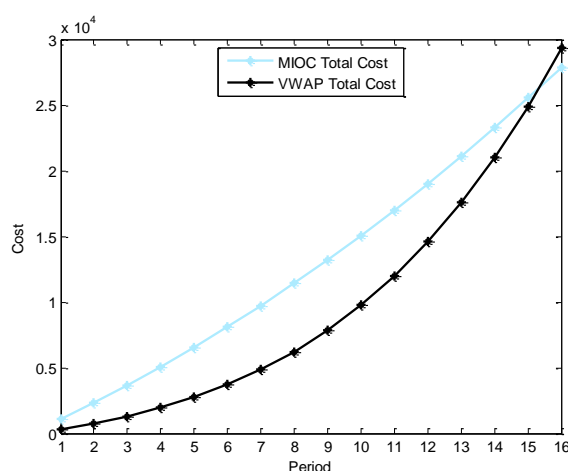


图 3-6 不同交易策略的总交易成本（ ρ 为递增）

3.2.4.3 订单成交概率为 U 型

在现实证券市场上，市场流动性的日内模型一般是 U 型的，也就是说在每天开盘后的较短时间内流动性最好，随后将会逐渐降低，而在接近收盘时流动性将会逐渐变好。因此，投资者也需要考虑在交易过程中订单成交概率为 U 型时的情形。

当不同交易时期内的成交概率 ρ 为 U 型时，在保持总订单大小、瞬时冲击成本、交易时期个数以及临时性价格冲击成本比例等参数^①不变的情形下，图 3-7 描述了本节所提出交易策略（MIOC）与 VWAP 交易策略在不同交易时期内的订单大小情况。从图 3-7 可以看出，MIOC 交易策略与 VWAP 交易策略存在明显差异。受价格冲击成本和机会成本的共同影响，采用 MIOC 交易策略的投资者在前 4 个交易时期和最后的 3 个交易时期内所提交的订单规模明显小于 VWAP 交易策略；

^① 假设 ρ 为 U 型时，不同时期的预期市场成交量和订单成交概率分别为：

$v=[136875 \ 110625 \ 87875 \ 68625 \ 52875 \ 40625 \ 31875 \ 26625 \ 24875 \ 26625 \ 31875 \ 40625 \ 52875 \ 68625 \ 87875 \ 110625]$;

$\rho=[0.96 \ 0.78 \ 0.62 \ 0.49 \ 0.38 \ 0.30 \ 0.24 \ 0.20 \ 0.19 \ 0.20 \ 0.24 \ 0.30 \ 0.38 \ 0.49 \ 0.62 \ 0.78]$;

而在其他几个交易时期（ $5 \leq m \leq 13$ ）内，MIOC 交易策略的订单规模要大于与 VWAP 交易策略。

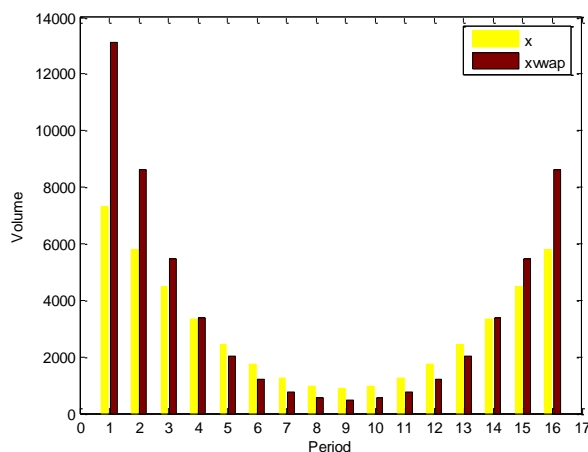


图 3-7 不同交易策略的对比（ ρ 为 U 型）

图 3-8 给出了 MIOC 交易策略在各交易时期的交易成本变化情况。由图 3-8 可知，在前 6 个交易时期（ $1 \leq m \leq 6$ ）内，受订单成交概率逐渐减小的影响，而机会成本逐渐增大，价格冲击成本逐渐减小；在最后 4 个交易时期（ $13 \leq m \leq 16$ ）内，随着订单成交概率的逐渐增大，机会成本逐渐减小，而价格冲击成本逐渐增大。在此情形下，从整个交易时期来看，价格冲击成本和机会成本还是呈反方向变化。

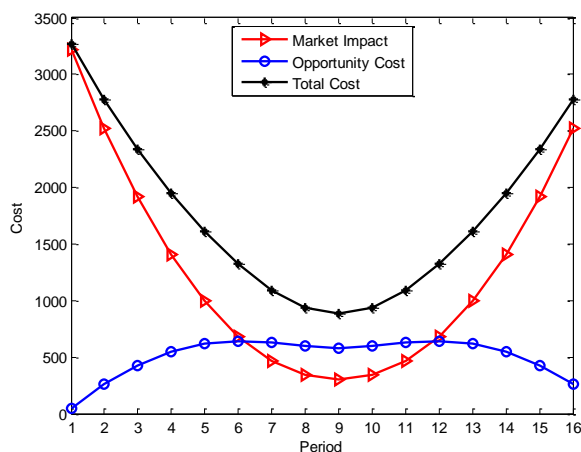


图 3-8 交易策略（MIOC）的交易成本（ ρ 为 U 型）

本节将进一步分析 MIOC 交易策略与投资者常用的 VWAP 交易策略的优劣。图 3-9 描述了 MIOC 与 VWAP 交易策略的总交易成本情况。从图 3-9 可以看出，MIOC 交易策略的总交易成本小于 VWAP 交易策略，表明在此情形下，MIOC 交

易策略优于投资者常用的 VWAP 交易策略。

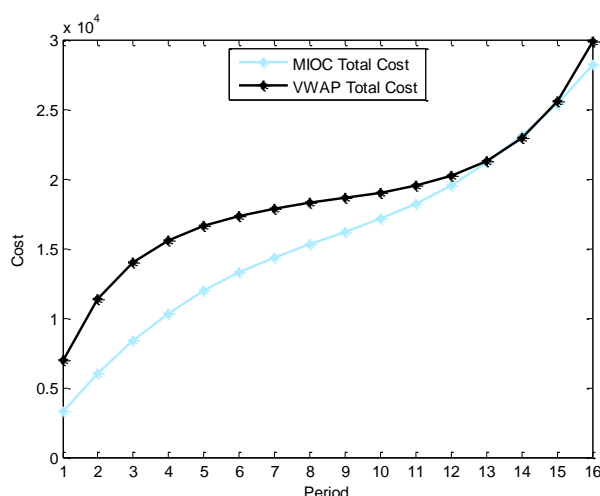


图 3-9 不同交易策略的总交易成本（ ρ 为 U 型）

3.3 受价格冲击、机会成本与择时风险等因素影响的算法交易策略

3.3.1 模型描述

在执行投资决策时，投资者可能会面临多种订单提交方式，比如将所有订单一次全部进行提交，或是将订单拆分为许多个小规模订单再进行提交。如果投资者将大额订单一次性全部提交到市场上进行交易，那么此时投资者的订单可能会对市场上的证券价格产生较大冲击。若将大额订单拆分成多个中、小规模订单提交，则可在一定程度上减少价格冲击。然而，这种将订单拆分并逐次提交的交易方式增加了总的交易时间，投资者可能要承担证券价格变动的风险，以及订单未全部成交而造成的损失。因此，在设计最优交易策略，投资者必须要同时考虑价格冲击、机会成本、择时风险以及价格升量等隐性交易成本。

假设投资者计划在未来 m 个交易时期内，利用交易策略 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)'$ 交易总量为 S 的证券。其中， x_t 表示投资者在第 t 个交易时期的订单大小。假设投资者在第 t 个交易时期内的订单成交概率为 ρ_t ， $t = 1, 2, \dots, m$ 。在整个交易时期内，投资者的总成交量 X 可以表示为： $X = \sum_{t=1}^m x_t \rho_t$ 。在最小化交易成本的目标下，投资者的最优交易策略问题可用如下模型表示：

$$\begin{aligned} \text{Min } E(TC(x)) = & \sum_{t=1}^m x_t \rho_t \left[\frac{\alpha I x_t \rho_t}{X(x_t \rho_t + 0.5 v_t)} + \frac{(1-\alpha)I}{X} \right] \\ & + \sum_{t=1}^m x_t (1-\rho_t) \left(m \Delta p + \frac{(1-\alpha)I}{X} \right) \\ & + \sum_{t=1}^m x_t \rho_t t \Delta p + \lambda \sqrt{\sum_{t=1}^m \left(\sum_{k=t}^m x_k \right)^2} \sigma^2 \end{aligned} \quad (3-16)$$

$$\text{s.t. } S = \sum_{t=1}^m x_t \quad (3-16a)$$

$$x_t \geq 0 \quad (3-16b)$$

模型 (3-16) 的目标函数表示投资者在整个交易期间所有交易费用的总和。其中，第一项表示投资者的价格冲击成本，是在整个交易时期内所有已成交证券价格冲击成本的总和；第二项表示机会成本，是在整个交易时期内所有未成交证券所带来损失的总和；第三项表示价格升量，是在整个交易时期内所有已成交证券价格升量的总和；第四项表示择时风险，是在整个交易时期内由于证券价格的变化所带来风险的总和。

3.3.2 可预期未来成交量

针对投资者仅考虑机会成本和价格冲击成本的情形，在最小化价格冲击和机会成本的目标下本章已经给出了相应的最优交易策略 (MIOC)。如果投资者同时关注机会成本、价格冲击成本以及价格升量等隐性交易成本因素，而不考虑未来交易风险的影响，那么此时投资者的最优交易策略问题可以用如下数学规划模型来表示：

$$\begin{aligned} \text{Min } E(TC(x)) = & \sum_{t=1}^m \left[\frac{\alpha I x_t^2 \rho_t^2}{X(x_t \rho_t + 0.5 v_t)} + \frac{x_t \rho_t (1-\alpha)I}{X} \right] \\ & + \sum_{t=1}^m x_t (1-\rho_t) \left(m \Delta p + \frac{(1-\alpha)I}{X} \right) + \sum_{t=1}^m x_t \rho_t t \Delta p \end{aligned} \quad (3-17)$$

$$\text{s.t. } S = \sum_{t=1}^m x_t \quad (3-17a)$$

$$x_t \geq 0 \quad (3-17b)$$

假设投资者能够根据证券市场的历史交易情况估计出未来的成交量 S_0 ，则原问题可以简化为：

$$\begin{aligned} \text{Min } TC(x) = & \sum_{t=1}^m \frac{\alpha I x_t^2 \rho_t^2}{S_0 (x_t \rho_t + 0.5 v_t)} + \sum_{t=1}^m x_t (1 - \rho_t) m \Delta p \\ & + \sum_{t=1}^m x_t \rho_t t \Delta p + \frac{(1 - \alpha) SI}{S_0} \end{aligned} \quad (3-18)$$

$$\text{s.t. } S = \sum_{t=1}^m x_t \quad (3-18a)$$

$$x_t \geq 0 \quad (3-18b)$$

利用 Kuhn-Tucker 条件求解得：

$$x_t = \frac{0.5 v_t}{\rho_t} \left[\left(1 + \frac{S_0 \Delta p t}{\alpha I} + \frac{S_0 \lambda}{\alpha I \rho_t} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right], \quad t \in [1, m] \quad (3-19)$$

其中， λ 为广义拉格朗日乘子。为了便于计算，不妨令：

$$f(\lambda) = \frac{0.5 v_t}{\rho_t} \left[\left(1 + \frac{S_0 \Delta p t}{\alpha I} + \frac{S_0 \lambda}{\alpha I \rho_t} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (3-20)$$

将 $f(\lambda)$ 在 $\lambda = 0$ 处进行泰勒展开，可得：

$$f(\lambda) = \left(1 + \frac{S_0 \Delta p t}{\alpha I} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{S_0 \lambda}{2 \alpha I \rho_t} \left(1 + \frac{S_0 \Delta p t}{\alpha I} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 + O(\lambda) \quad (3-21)$$

将上式与式 (3-18a) 中的第一个约束条件联立求解得：

$$x_t = C_t^1 \frac{S - \sum_{i=1}^m B_i}{\sum_{i=1}^m A_i} - C_t^2, \quad t \in [1, m] \quad (3-22)$$

$$\text{其中, } C_t^1 = \frac{0.5 v_t}{\rho_t^2} \left(1 + \frac{S_0 \Delta p t}{\alpha I} \right)^{-\frac{3}{2}}, \quad C_t^2 = \frac{0.5 v_t}{\rho_t} \left(1 + \frac{S_0 \Delta p t}{\alpha I} \right)^{-\frac{1}{2}} - \frac{0.5 v_t}{\rho_t}.$$

3.3.3 数值示例

在最小化交易成本的目标下，模型 (3-16) 描述了投资者在同时考虑价格冲击成本、机会成本、择时风险以及价格升量等四种隐性成本时的最优交易策略问题。

由于此优化模型过于复杂，无法直接求得其解析解，因此本节将利用数值示例进行分析。针对不同交易时期的订单成交概率分别为单调增加、单调减少以及 U 型的情形，下面将分析 MIOC 交易策略、VWAP 交易策略以及本节所提出交易策略（MIOCTRPA）之间的差异。

3.3.3.1 订单成交概率递增

如果投资者在交易过程中面临的是一个流动性逐渐变好的交易时期，那么此时投资者所提交订单的成交概率也会逐渐增加。针对这种情况，本节利用相应的数值示例进行了分析，并给出了相应的算法交易策略。假设投资者计划在未来 m 个交易时期内，利用某一交易策略交易总量为 S 的证券^①。受市场流动性等因素的影响，不同交易时期的订单成交概率会有所不同。当不同交易时期的订单成交概率为单调递增时，图 3-10 描述了 MIOCTRPA、MIOC 以及 VWAP 交易策略在各时期的订单规模，其中， x_1 、 x_2 和 x_3 分别表示 MIOCTRPA 交易策略、MIOC 交易策略以及 VWAP 交易策略。

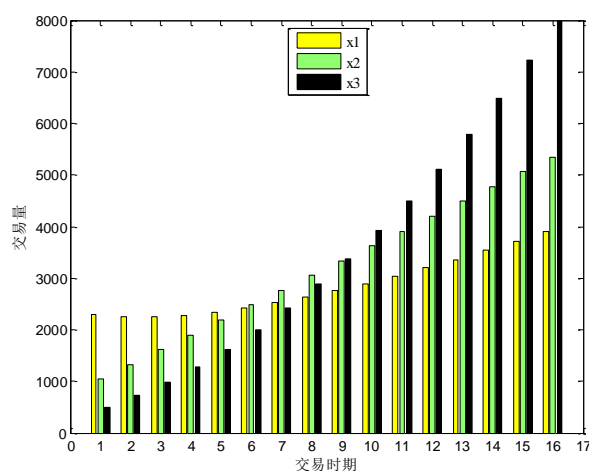


图 3-10 不同交易策略的对比（ ρ 递增）

图 3-10 结果表明，无论采用 MIOCTRPA、MIOC 或 VWAP 交易策略，投资者所提交的订单规模均随订单执行概率的递增而增加。同时，MIOCTRPA 交易策略与 MIOC、VWAP 交易策略之间又存在着明显差异。MIOCTRPA 交易策略在前 5 个交易时期内的订单规模都大于 MIOC 交易策略，而在其他交易时期内，情况恰

^① 以下参数来源于 Kissell 和 Glantz (2003) [32]，并针对本模型研究的问题进行了适当修改：

$S = 60000, m = 16, I = 100000, \alpha = 0.95, \sigma = 0.05, \Delta p = 0.05$

$v = [25000 \ 30000 \ 35000 \ 40000 \ 45000 \ 50000 \ 55000 \ 60000 \ 65000 \ 70000 \ 75000 \ 80000 \ 85000 \ 90000 \ 95000 \ 100000]$;

$\rho = [0.3 \ 0.34 \ 0.38 \ 0.42 \ 0.46 \ 0.5 \ 0.54 \ 0.58 \ 0.62 \ 0.66 \ 0.7 \ 0.74 \ 0.78 \ 0.82 \ 0.86 \ 0.9]$ 。

好相反。与 VWAP 交易策略相比，MIOCTRPA 交易策略在第 7 个时期之前的订单规模都比较大，而在其他交易时期，情况恰好相反。出现这种情况的原因在于：在投资者整个交易初期，其订单成交概率比较小，投资者手中持有大量还没有提交订单，择时风险较大，此时择时风险对投资者的影响程度要大于机会成本、价格冲击成本以及价格升量的总和。在交易后期，投资者所提交的订单规模较大，价格冲击成本也就比较大，此时价格冲击对投资者交易策略影响程度要大于择时风险。

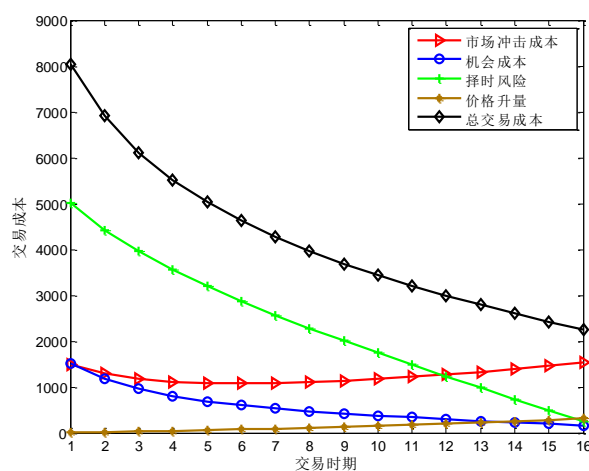


图 3-11 交易策略（MIOCTRPA）的交易成本（ ρ 递增）

图 3-11 描述了 MIOCTRPA 交易策略的价格冲击成本、机会成本、择时风险以及价格升量在不同交易时期内的变化情况。从图 3-11 中可以看出，随着订单执行概率的增大，MIOCTRPA 交易策略的机会成本逐渐减小，而价格升量有所增加；同时，由于投资者的证券持有量不断减少，择时风险也在逐渐减小；在此过程中，由于投资者的订单规模是逐渐增大的，所以相应的价格冲击成本会逐渐增加。从这四种隐性交易成本的共同影响来看，MIOCTRPA 交易策略在不同交易时期内的总隐性交易成本是逐渐减少。

图 3-12 描述了 MIOTRC、MIOC 和 VWAP 交易策略的总交易成本在不同时期的变化情况。从图 3-12 中可以明显看出，MIOCTRPA 交易策略的总交易成本小于 MIOC 或 VWAP 交易策略。这也表明，在不同交易时期的订单成交概率单调增加的特殊情形下，本节提出的 MIOCTRPA 交易策略要优于 MIOC 和 VWAP 交易策略。

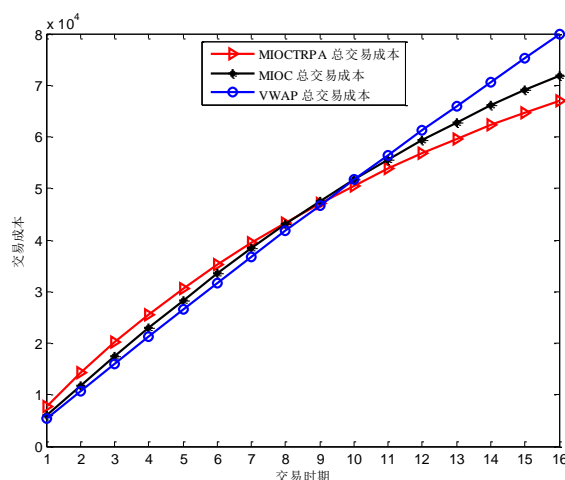


图 3-12 不同交易策略的总交易成本 (ρ 递增)

3.3.3.2 订单成交概率递减

受到市场环境等因素的影响，投资者在交易过程中可能会面临市场流动性逐渐变差的情形，也就是说在不同交易阶段的订单成交概率逐渐减小，此时投资者的交易策略会受到订单成交概率的影响。本节将针对这一情形展开分析。

当不同交易时期的订单成交概率递减时，在保持投资者的总订单规模、总交易时期数目等参数不变情况下^①，图 3-13 描述了本节提出的 MIOCTRPA 交易策略、MIOC 交易策略以及 VWAP 交易策略在不同时期内的订单规模情况。从图 3-13 中可以看出，无论采用 MIOCTRPA 交易策略、MIOC 交易策略，还是 VWAP 交易策略，投资者在各交易时期内所提交订单规模均随着订单成交概率的减小而减少；受到择时风险的较大影响，与 MIOC 交易策略相比，MIOCTRPA 交易策略在前 6 个交易时期内所提交的订单规模较大，而在其他交易时期，MIOCTRPA 交易策略所提交的订单规模都比较小；同时，与投资者常用的 VWAP 交易策略相比，MIOCTRPA 交易策略在前 5 个交易时期内所提交的订单规模较大，而在其他交易时期内，MIOCTRPA 交易策略所提交订单规模比较小。

^① 假设不同交易时期的订单成交概率 ρ 为单调减少，预期市场成交量和订单成交概率分别为：
 $v=[100000\ 95000\ 90000\ 85000\ 80000\ 75000\ 70000\ 65000\ 60000\ 55000\ 50000\ 45000\ 40000\ 35000\ 30000\ 25000]$
 $\rho=[0.95\ 0.9\ 0.85\ 0.8\ 0.75\ 0.7\ 0.65\ 0.6\ 0.55\ 0.5\ 0.45\ 0.4\ 0.35\ 0.3\ 0.25\ 0.2]$ 。

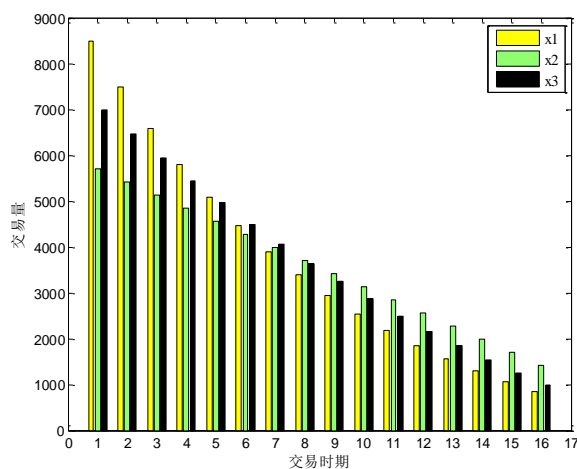


图 3-13 不同交易策略的对比 (ρ 递减)

在不同交易时期内的订单成交概率单调减少时,图 3-14 描述了 MIOCTRPA 交易策略的价格冲击成本、机会成本、择时风险以及价格升量的变化情况。从图 3-14 可以看出,由于不同交易时期订单执行概率的减少,投资者的订单规模也在逐渐减小,所以 MIOCTRPA 交易策略的价格冲击成本也会逐渐减少;不同时期的订单成交概率逐渐减小,但是受订单规模也在逐渐减小的共同影响, MIOCTRPA 交易策略的机会成本变化并不大;由于价格升量是衡量证券价格的内在变化趋势,受到投资者订单成交概率和订单成交数量的共同影响,在投资者整个交易初期和后期的价格升量要小于其他时期。在整个交易时期内,受到机会成本、价格冲击成本、择时风险以及价格升量的共同影响, MIOCTRPA 交易策略的总隐性交易成本逐渐减少。

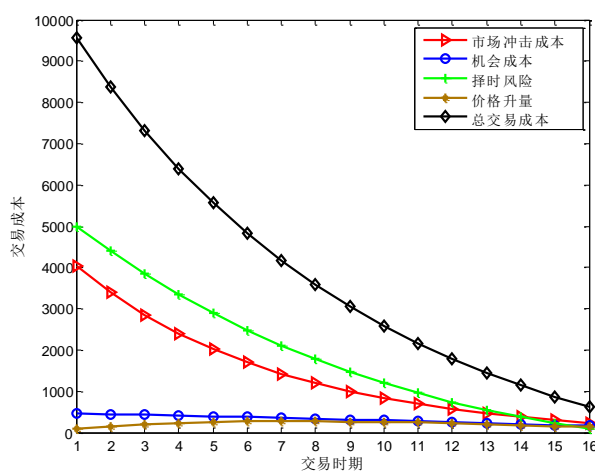


图 3-14 交易策略 (MIOCTRPA) 的隐性交易成本 (ρ 递减)

当订单成交概率单调减少时，图 3-15 描述了 MIOCTRPA 交易策略、MIOC 交易策略以及 VWAP 交易策略的总交易成本变化情况。从图中可知，本节所提出的 MIOCTRPA 交易策略的总交易成本小于 MIOC 和 VWAP 交易策略。这也表明，在订单成交概率递减的情形下，本节所提出的 MIOCTRPA 交易策略还是要优于 MIOC 交易策略和 VWAP 交易策略。

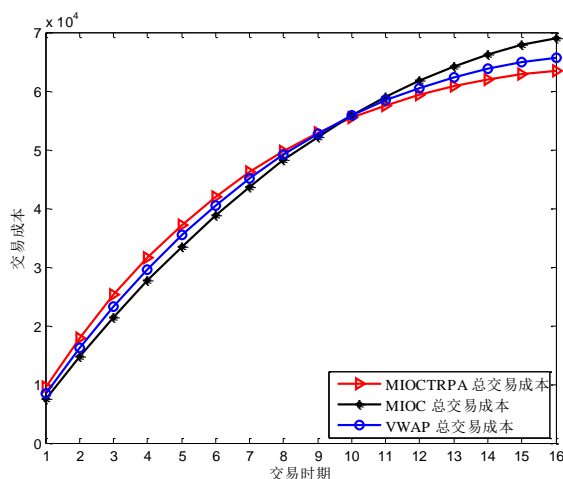


图 3-15 不同交易策略的总交易成本（ ρ 递减）

3.3.3.3 订单成交概率为 U 型

在现实证券市场上，市场流动性的日内模型一般是 U 型的，也就是说市场流动性在每天开盘后的较短时间内最好，随后将会逐渐变差，而在接近收盘时流动性又会再次逐渐变好。因此，本研究也需要考虑当投资者面临订单成交概率为 U 型时的特殊情况。

受市场流动性的日内模式等因素影响，日内不同交易时期订单执行概率可能呈现为 U 型。在保持总订单规模、交易时期数目等参数不变情形下^①，图 3-16 给出了 MIOCTRPA、MIOC 以及 VWAP 交易策略在不同交易时期的订单规模情况。从图 3-16 可以看出，在前 7 个交易时期内，MIOCTRPA 交易策略在不同时期所提交的订单规模都大于 MIOC 交易策略，而在其他时期，MIOCTRPA 交易策略的订单规模均小于 MIOC 交易策略。MIOCTRPA 交易策略在第 1 个至第 9 个交易时期内提交的订单规模均大于 VWAP 交易策略，而在其他交易时期内，情况恰好相反。

^① 假设不同交易时期的订单成交概率 ρ 为 U 型，预期市场成交量和订单成交概率分别为：

$v=[136875 \ 110625 \ 87875 \ 68625 \ 52875 \ 40625 \ 31875 \ 26625 \ 24875 \ 26625 \ 31875 \ 40625 \ 52875 \ 68625 \ 87875 \ 110625]$;

$\rho=[0.958 \ 0.778 \ 0.622 \ 0.49 \ 0.382 \ 0.298 \ 0.238 \ 0.202 \ 0.19 \ 0.202 \ 0.238 \ 0.298 \ 0.382 \ 0.49 \ 0.622 \ 0.778]$ ；。

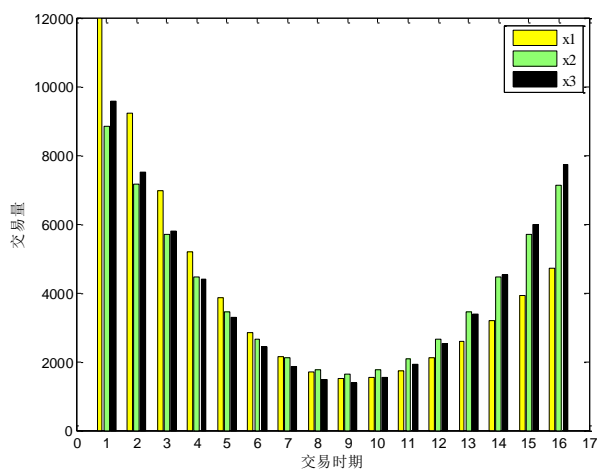


图 3-16 不同交易策略的对比 (ρ 为 U 型)

在订单成交概率为 U 型时，图 3-17 描述了本节所提出的 MIOCTRPA 交易策略在不同时期的价格冲击成本、机会成本、择时风险以及价格升量随时间的变化情况。从图 3-17 上可以看出，在整个交易时期内，MIOCTRPA 交易策略的择时风险会逐渐减小；在前 9 个交易时期内，受订单执行概率和订单规模逐渐减小的影响，价格冲击成本和机会成本逐渐变小，而价格升量是先增加后减少。从第 9 个交易时期开始，随着投资者订单执行概率的逐渐增加，该交易策略的价格冲击成本、价格升量以及机会成本都会逐渐增大。从整个交易时期来看，受这 4 种隐性交易成本的影响，MIOCTRPA 交易策略的总交易成本呈现出先减小后增大的趋势。

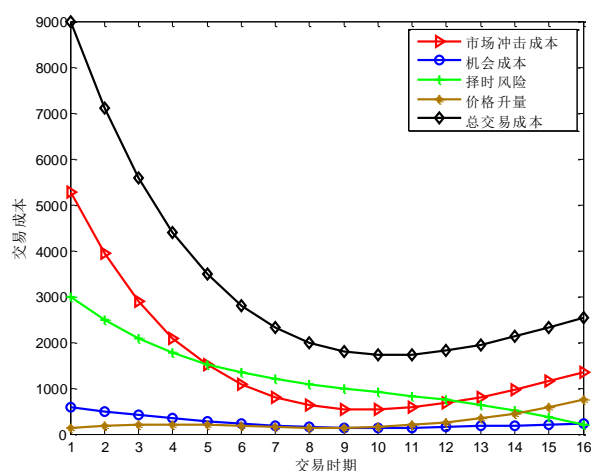


图 3-17 交易策略 (MIOCTRPA) 的交易成本 (ρ 为 U 型)

图 3-18 描述了 MIOCTRPA、MIOC 以及 VWAP 交易策略总交易成本的变化情况。从整个交易时期来看，投资者采用 MIOCTRPA 交易策略所承担的总交易成本要小于 MIOC 和 VWAP 交易策略，表明在此情形下 MIOCTRPA 交易策略优于 MIOC 和 VWAP 交易策略。

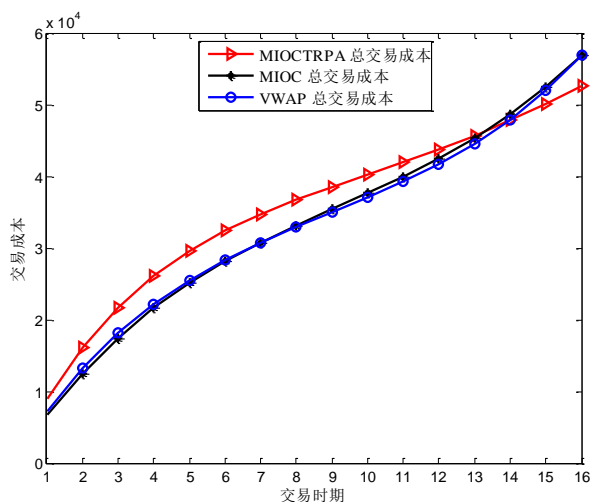


图 3-18 不同交易策略的总交易成本 (ρ 为 U 型)

3.4 本章小结

在未来的某一段时间内，如果投资者计划完成一定数量的证券交易，那么为了避免大额订单可能导致的巨大价格冲击，投资者一般会将大额订单拆分为多个中、小规模子订单，并根据市场环境的不同选择恰当交易时机逐次提交，但是这种交易方式可能会导致投资者的部分订单无法按时完成交易。此时，投资者将会承担机会成本和择时风险等隐性交易成本。针对各个交易时期订单可能没有全部成交的情况，本章分析了投资者在同时考虑价格冲击成本和机会成本时的最优算法交易策略问题；针对投资者在各个交易时段的订单成交概率不一致，但能够预期可执行订单规模的特殊情形，本章给出了此问题的解析解；针对各个交易时期内订单成交概率不一致的一般情形，本章利用三个数值示例进行了相应的对比分析。

研究结论表明，如果各阶段的订单成交概率都相等，那么投资者的最优算法交易策略仍然是常用的 VWAP 交易策略；当不同时期的订单成交概率递减时，投资者在同时考虑价格冲击和机会成本情形下的最优交易策略 (MIOC) 与 VWAP 交易策略具有明显的不同，在前 8 个交易时期内 MIOC 交易策略的订单规模都小于 VWAP 交易策略，而在其他时期，情况恰好相反；当订单的成交概率递增时，

在前 8 个交易时期内 MIOC 交易策略在各时期提交的订单规模都大于 VWAP 交易策略，而在其他交易时期，情况恰好相反；当订单的成交概率为 U 型时，在前 4 个和最后 3 个交易时期内 MIOC 交易策略在各时期提交的订单规模都小于 VWAP 交易策略，而在其他交易时期内，情况相反。通过以上三个数值示例可以看出，无论不同交易时期的订单成交概率是递减、递增还是 U 型，MIOC 交易策略的总交易成本都小于 VWAP 交易策略。

进一步，针对投资者在交易中可能面临的择时风险、价格升量等隐性交易成本，本章分析了投资者在同时考虑这 4 种隐性交易成本时如何构建最优交易策略的问题。针对投资者可预期未来成交量情形给出了此问题的解析解；对于一般情形，利用数值示例分析了 MIOCTRPA 交易策略、MIOC 交易策略、VWAP 交易策略的差异。研究结果表明，无论订单成交概率是递增、递减还是 U 型，MIOCTRPA 交易策略的总交易成本明显低于 MIOC 或 VWAP 交易策略，表明本章所提出的 MIOCTRPA 交易策略可以帮助投资者有效地减少交易成本，提高投资收益。

第四章 基于算法交易策略的投资组合构建研究

4.1 引言

随着经济的快速发展以及全球经济一体化进程的加快,我国的资本市场也在不断发展和完善。受宏观经济政策以及投资者思想观念等因素影响,我国的资本市场变化幅度较大,投机套利等活动较为频繁。投资者急需相关投资理论的指导,以便进行理性的投资活动。同时,随着计算机、通讯技术的快速发展及其在金融市场上的广泛应用,金融市场上的风险也在与日俱增。因此,深入研究现代投资组合理论具有十分重要的现实意义。

投资组合选择是指投资者在面对不确定性环境下如何对各种金融资产进行有效配置,以便满足投资者对风险和收益的权衡。1952年,Markowitz假设投资者是风险厌恶的,利用收益的均值与方差分别表示预期收益和风险,讨论了在不确定条件下最优投资组合选择问题,建立了均值-方差投资组合选择模型。资产组合的均值-方差模型是现代投资组合理论的基石,也是整个现代金融理论的基础。

均值-方差模型是假设市场无摩擦的,也没有考虑交易成本对投资组合选择的影响。事实上,在执行投资决策的过程中,由于不同交易策略的交易成本存在很大差异,而忽略交易成本往往可能导致无效的资产组合。因此,投资者在构建投资组合时需要考虑交易策略对投资组合构建的影响。在现实的证券市场上,投资者很少只是进行一个阶段的投资活动,一般都是根据市场环境的变化及时对投资组合进行调整。Mossin (1968)^[158]将 Markowitz 单一阶段模型推广到多阶段的情况。随后, Merton (1969)^[159]、Chen 等 (1971)^[160]、Hakansson (1971)^[161]、Elton 和 Gruber (1974)^[162]、Dumas 和 Luciano (1991)^[163]、Seppi (1992) 等^[164]对多阶段投资组合选择问题进行了深入探讨,提出了多阶段的投资组合选择模型与算法。Dantzig 和 Infanger (1993)^[165]、Consigh 和 Dempster (1998)^[166]利用多阶段随机规划模型来解决动态投资组合选择问题。由于动态的均值-方差投资组合选择模型求解十分困难,所以 Li 等 (2007)^[167]将多阶段均值-方差投资组合选择问题简化为一个可用动态规划处理的问题,并得到了有效前沿组合的解析式。

综上所述,目前许多学者已经对投资组合选择问题进行了研究,但是大都考虑的是给定交易成本函数,分析对投资者投资组合选择的影响,并没有将投资组

合的选择与算法交易策略的制定结合起来进行研究。不同算法交易策略之间的交易成本存在很大差异，并且算法交易策略对投资组合选择具有非常重要的影响，因此，本章将算法交易策略的设计和投资组合的选择结合起来进行分析。通过上文研究可知，本论文第三章所提出交易策略（MIOC）的交易成本要小于投资者常用的 VWAP 交易策略。由于 MIOC 交易策略与投资组合构建问题结合起来考虑的模型过于复杂，所以，为了简化分析，本章主要是考虑 VWAP 交易策略对投资组合构建的影响，并分析了投资组合的不同调整频率对投资者总利润的影响，相关结论可以为投资组合的构建提供了一定理论指导。

4.2 均值-方差模型与隐性交易成本

4.2.1 均值-方差模型

投资组合理论由美国经济学家 Harry Markowitz 在 1952 年于《证券组合选择》一文中首先提出，将证券收益率看作为一个随机变量，利用这个随机变量的均值表示投资收益，利用这个随机变量的标准差表示投资的风险。因此，可以将投资组合证券选择问题归结为求解一个适当的投资比例，以便使得投资组合收益达到给定均值而方差最小的数学规划问题，这一问题就被称之为均值-方差模型。该模型的应用可以使投资者对风险进行量化，开创了现代金融理论和投资分析理论的先河，金融学从此不再是纯粹描述性和单凭经验操作的定性研究，开始利用定量方法研究金融问题。

Markowitz 所提出的均值-方差模型是在许多假设条件下得到的，主要有：

- （1）投资者的效用函数是递增的，也就是说投资者对于收益的态度都是多多益善，在一定的风险水平下追求最大的收益，或是在一定的收益水平下追求风险最小；
- （2）投资者的效用函数是边际递减的，也就是说投资者都是风险厌恶的；
- （3）风险资产的收益率服从正态分布；
- （4）没有交易成本。

在具有相同收益率的资产组合中，将最小方差的资产组合称之为前沿边界的资产组合。对于资产组合 p 而言，如果其为前沿边界的资产组合，那么当且仅当 n 维的资产组合权重向量 w 是以下数学规划问题的解（Markowitz, 1952）^[85]。

$$\min_{\{w\}} \frac{1}{2} w^T D w \quad (5-1)$$

$$s.t. \quad w^T e = E(\tilde{r}_p) \quad (5-1a)$$

$$w^T I = 1 \quad (5-1b)$$

其中， D 表示 n 资产的协方差矩阵； e 是一个 n 维的向量，表示这 n 项资产的期望收益率； $E(\tilde{r}_p)$ 是资产组合的期望收益率； I 表示 n 维的单位向量。

模型 (5-1) 的目标函数表示是在给定的期望收益率 $E(\tilde{r}_p)$ 下，最小化资产组合的方差 $w^T D w$ ；约束条件 (5-1a) 表示资产组合的期望收益率为 $E(\tilde{r}_p)$ ；约束条件 (5-1b) 表示资产组合权重的总和为 1。

数学规划模型 (5-1) 可以利用拉格朗日方法进行求解，资产组合权重向量 w_p 是以下问题的解：

$$\min_{\{w, \lambda, \gamma\}} L = \frac{1}{2} w^T D w + \lambda (E(\tilde{r}_p) - w^T e) + \gamma (1 - w^T I) \quad (5-2)$$

其中， λ 和 γ 是两个正的常数。此模型的一阶条件为：

$$\frac{\partial L}{\partial w} = D w_p - \lambda e - \gamma I = 0 \quad (5-3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = E(\tilde{r}_p) - w^T e = 0 \quad (5-4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \gamma} = 1 - w^T I = 0 \quad (5-5)$$

将以上各式与 (5-1a)、(5-1b) 联立求解可得：

$$\lambda = \frac{A_3 E(\tilde{r}_p) - A_1}{A_4} \quad (5-6)$$

$$\gamma = \frac{A_2 - A_1 E(\tilde{r}_p)}{A_4} \quad (5-7)$$

其中，

$$A_1 = I^T D^{-1} e \quad (5-8)$$

$$A_2 = e^T D^{-1} e \quad (5-9)$$

$$A_3 = I^T D^{-1} I \quad (5-10)$$

$$A_4 = A_2 A_3 - A_1^2 \quad (5-11)$$

将式 (5-6)、式 (5-7) 代入式 (5-3) 中可得,

$$w_p = g + hE(\tilde{r}_p) \quad (5-12)$$

其中,

$$g = \frac{A_2 D^{-1} I - A_1 D^{-1} e}{A_4} \quad (5-13)$$

$$h = \frac{A_3 D^{-1} e - A_1 D^{-1} I}{A_4} \quad (5-14)$$

4.2.2 算法交易策略的隐性交易成本

隐性交易成本是由于市场环境等因素不确定而产生的交易成本, 主要包括价格冲击成本、机会成本、价格升量、择时风险等。隐性交易成本的估计比较困难, 无法在交易前进行准确估计, 而且在交易后也没有办法进行准确测量。然而, 通过 Plexus 公司的调查可知, 隐性交易成本占据了投资者总交易成本绝大部分, 所以研究隐性交易成本非常重要。

价格冲击是投资者订单在被提交到市场上执行后所引起证券价格的变化, 是隐性交易成本的最重要组成部分之一, 并且反映了交易、价格以及信息三者之间复杂的联系。因此, 在本章中所考虑的交易成本主要是指价格冲击。价格冲击的大小可以用投资者订单执行价格和证券市场上不存在该订单时证券价格的差额来衡量。

在证券交易过程中, 投资者无法同时直接观察到这两个价格, 因此许多学者提出了不同的价格冲击成本估计方法。Brown 等 (1988)^[168]、Easterwood 和 Nutt (1999)^[169]、Krinsky 和 Lee (1996)^[170]等认为价格冲击是一个关于交易量或交易速度的线性函数, 即投资者在整个交易过程中的价格冲击成本可以表示为:

$$PI = \beta z \quad (5-15)$$

其中, PI 表示价格冲击, β 是一个大于零的常数, z 表示投资者的订单规模、成交金额或交易速度。

当投资者订单中所传递的信息使得市场对公司长期增长潜力的看法发生变化时, 其他的市场参与者在了解到这些信息后会迅速将股票价格调整到新的合理水

平，而这些活动将会影响到股票价格的未来预期，使得股票的内在价值发生了变化，那么这种冲击就是永久性价格冲击。永久性价格冲击是投资者订单所传递的信息而引起的，所以许多学者都认同永久性价格冲击是关于交易量或交易速度的一个线性函数。

如果投资者的订单被提交到证券市场后，订单所传递的信息没有改变股票的内在价值，只是由于暂时的买卖供需不平衡引起的，那么此时订单对市场的价格冲击就是临时性价格冲击。这种临时冲击通常都是比较短暂的，是由于及时性要求和短时期内的流动性需求不平衡而造成的价格冲击，并不会对股票的内在价值产生任何的影响，同时，股票的价格也会在较短时间回归到最初的价格水平。临时性价格冲击与交易量、交易时间、订单类型、市场流动性等因素密切相关，因此，Kissell 和 Glantz（2003）^[32]认为临时性价格冲击应该是一个关于交易量等因素的非线性函数，具体估计方式如下。假设某投资者计划在未来 m 个交易时期内采用分阶段的算法交易策略 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)'$ 交易总量为 S 的证券。其中， x_t 表示投资者在时期 t 准备提交订单规模。采用此交易策略投资者的价格冲击成本为：

$$PI(x) = \sum_{t=1}^m x_t \left[\frac{\alpha I x_t}{(x_t + 0.5 v_t) S} + \frac{(1 - \alpha) I}{S} \right] \quad (5-16)$$

其中， v_t 表示 t 时期的预期市场成交量， $t = 1, 2, \dots, m$ ； S 表示整个交易时期内总的订单大小，即： $S = \sum_{t=1}^m x_t$ ； I 表示瞬时冲击成本； α 表示临时性价格冲击占总价格冲击的比例。

4.3 模型构建与结果

出于简化模型的目的，本研究所考虑的隐性交易成本主要是指价格冲击成本。不同算法交易策略的隐性交易成本会存在很大差异，而交易成本的不同又会影响到投资组合的选择。本研究考虑在算法交易策略的影响下，投资者应该如何构建投资组合的问题，并分析不同投资组合调整频率对投资者总利润的影响。

4.3.1 基于线性隐性交易成本的投资组合选择模型

由于价格冲击是隐性交易成本的主要组成部分，所以本研究所考虑的隐性交易成本是指价格冲击成本。假设价格冲击成本是关于成交金额的线性函数，由于此时价格冲击成本与投资者采用何种交易策略无关，所以不妨假设隐性交易成本

(价格冲击成本) 函数为:

$$PI_k = \beta_k y_k, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5-17)$$

其中, β_k 是第 k 证券的价格冲击系数。

此时, 投资者的投资组合选择问题可以表示如下:

$$\min \frac{1}{2} y^T D y \quad (5-18)$$

$$s.t. \quad y^T e - y^T \beta = RE(\tilde{r}_p) \quad (5-18a)$$

$$y^T I = R \quad (5-18b)$$

其中, e 是投资者所投资资产的期望收益率向量; y 表示投资组合中不同证券的资金量向量; $E(\tilde{r}_p)$ 表示资产组合的期望收益率; I 表示 n 维的单位向量; R 表示投资者总的资金持有量。

由拉格朗日法, y_0 是下式的最优解:

$$\min_{\{y_0, \lambda, \gamma\}} L = \frac{1}{2} y_0^T D y_0 + \lambda (RE(\tilde{r}_p) - y_0^T e + y_0^T \beta) + \gamma (R - y_0^T I) \quad (5-19)$$

其中, λ 和 γ 是两个正的常数。

模型 (5-19) 的一阶最优性条件为:

$$\frac{\partial L}{\partial y_0} = D y_0 - \lambda e + \lambda \beta - \gamma I = 0 \quad (5-20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = RE(\tilde{r}_p) - y_0^T e + y_0^T \beta = 0 \quad (5-21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \gamma} = R - y_0^T I = 0 \quad (5-22)$$

以上各式与式 (5-18a)、(5-18b) 联立求解可得:

$$y = (D^{-1} e - D^{-1} \beta) \frac{R - B_2 (B_1 RE(\tilde{r}_p) - RB_3)}{B_1 (B_1 B_4 - B_2 B_3)} + \frac{B_1 RE(\tilde{r}_p) - RB_3}{B_1 B_4 - B_2 B_3} D^{-1} \beta \quad (5-23)$$

其中,

$$B_1 = I^T D^{-1} e - I^T D^{-1} \beta \quad (5-24)$$

$$B_2 = I^T D^{-1} \beta \quad (5-25)$$

$$B_3 = e^T D^{-1} e - e^T D^{-1} \beta - \beta^T D^{-1} e + \beta^T D^{-1} \beta \quad (5-26)$$

$$B_4 = e^T D^{-1} \beta - \beta^T D^{-1} \beta \quad (5-27)$$

4.3.2 基于非线性隐性交易成本的投资组合选择模型

如果隐性交易成本是一个关于投资者交易量的非线性函数，则此隐性交易成本函数不容易进行确定。由于价格冲击是投资者隐性交易成本中最重要组成部分之一，所以此处的隐性交易成本主要是指价格冲击。本研究利用 Kissell 和 Glantz (2003) [32] 提出一种估计价格冲击成本的方法来进行衡量，投资者价格冲击成本函数可以表示为：

$$PI(x) = \sum_{t=1}^m x_t \left[\frac{\alpha I x_t}{(x_t + 0.5v_t)S} + \frac{(1-\alpha)I}{S} \right] \quad (5-28)$$

其中， m 表示交易时期数目； v_t 表示 t 时期的预期市场成交量； x_t 表示 t 时期的订单大小； S 表示整个交易时期内总的订单大小，即： $S = \sum_{t=1}^m x_t$ ； I 表示瞬时冲击成本； α 表示临时性价格冲击比例。

投资者在仅考虑价格冲击成本时的最优交易策略问题可以用如下模型描述：

$$\min PI(x) = \sum_{t=1}^m x_t \left[\frac{\alpha I x_t}{(x_t + 0.5v_t)S} + \frac{(1-\alpha)I}{S} \right] \quad (5-29)$$

$$s.t. \quad S = \sum_{t=1}^m x_t \quad (5-29a)$$

$$x_t \geq 0, \quad t = 1, 2, \dots, m \quad (5-29b)$$

此问题的最优解为：

$$x_t = S \frac{v_t}{V}, \quad t = 1, 2, \dots, m \quad (5-30)$$

显然，投资者仅考虑价格冲击成本时的最优交易策略为交易量加权平均价格交易策略（VWAP）。此时，投资者总的价格冲击成本为：

$$PI(S) = \frac{\alpha IS}{S + 0.5V} + (1-\alpha)I \quad (5-31)$$

投资者的投资组合选择模型可以用如下数学规划模型表述：

$$\min \frac{1}{2} R^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \sigma_{ij} \quad (5-32)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^n R w_i E(\tilde{r}_i) - \sum_{i=1}^n P I_i(R w_i / p_i) \geq R E(\tilde{r}_p) \quad (5-32a)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (5-32b)$$

$$0 \leq w_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (5-32c)$$

其中, w_i 是投资者投资于证券 i 的资金比例; $E(\tilde{r}_i)$ 是证券 i 的预期收益率; $E(\tilde{r}_p)$ 表示资产组合的期望收益率; p_i 表示证券 i 的价格; R 表示投资者的资金持有量。

由于以上基于非线性价格冲击成本的投资组合构建模型过于复杂, 无法求得其解析解, 所以下文将采用数值示例来分析。本研究选取深圳 A 股市场的 10 只股票, 如表 4-1 所示。假设投资者所构建的投资组合预期日均收益为 0.0002, 投资者的资金持有量为 1,000,000。

表 4-1 样本股票名称

股票代码	股票名称	交易天数 (天)	市场类型
000004	国农科技	233	深圳 A 股
000009	中国宝安	234	深圳 A 股
000011	深物业 A	238	深圳 A 股
000016	深康佳 A	238	深圳 A 股
000018	中冠 A	237	深圳 A 股
000025	特力 A	238	深圳 A 股
000078	海王生物	236	深圳 A 股
000151	中成股份	238	深圳 A 股
000153	丰原药业	228	深圳 A 股
000591	桐君阁	236	深圳 A 股

表4-2 不同投资期限下的投资组合

	12个月 调整一次	6个月调整一次		3个月调整一次				2个月调整一次					
		1	2	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
000004	0.0134	0.0123	0.1605	0.0242	0.0061	0.1353	0.2012	0.1344	0.0030	0.0984	0.1130	0.0148	0.0424
000009	0.0001	0.1353	0.0689	0.0109	0.1621	0.0333	0.1243	0.0627	0.4469	0.1875	0.2187	0.0517	0.4019
000011	0.0299	0.0569	0.0636	0.3095	0.4827	0.0912	0.0194	0.1465	0.0034	0.0354	0.5911	0.0873	0.0331
000016	0.1456	0.0126	0.0000	0.1215	0.0000	0.0129	0.0592	0.2657	0.0624	0.2128	0.0000	0.1183	0.0979
000018	0.2707	0.0754	0.2758	0.0124	0.1171	0.4822	0.0328	0.0674	0.0618	0.0167	0.0295	0.0130	0.0180
000025	0.0433	0.0742	0.2285	0.0731	0.0249	0.0201	0.0465	0.0712	0.0633	0.1158	0.0028	0.1832	0.0077
000078	0.0275	0.0000	0.0540	0.1474	0.0461	0.1192	0.1275	0.1330	0.0785	0.1598	0.0000	0.1423	0.2758
000151	0.0298	0.2885	0.0200	0.0323	0.0848	0.0618	0.0246	0.0000	0.1466	0.0510	0.0203	0.1742	0.0241
000153	0.2626	0.1999	0.0596	0.2537	0.0191	0.0168	0.1160	0.0091	0.1323	0.0393	0.0000	0.0912	0.0150
000591	0.1771	0.1451	0.0690	0.0151	0.0591	0.0274	0.2485	0.1152	0.0018	0.0832	0.0294	0.1239	0.0842
收益	1813100	631000	1253000	852320	872460	1419800	-733860	800700	494490	407000	811650	64829	-143990
成本	153660	116724	147032	105410	108816	198488	91924	111454	91620	97834	87912	86212	85674
利润	1659440	514276	1105968	746910	763644	1221312	-825784	689246	402870	309166	723738	-21383	-229664

本章利用我国深圳证券交易所 2013 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日的相关交易数据，对比分析了投资者在一年、半年、一个季度、两个月调整一次投资组合时的总收益情况。表 4-2 是不同的调整频率下投资组合中各股票的投资比例、收入、成本等情况。

表 4-3 描述了不同时期的股票价格，此表中的价格主要是投资者在每次调整投资组合时股票的价格和期末价格；因此，结合表 4-2 中投资者在每次调整投资组合时所投资于不同股票的资金量，就可以得到投资者在投资组合持有期内的利润。对于每半年、每季度、每两个月调整一次投资组合的情形，投资者总利润就等于每次调整后所得利润的总和。

表 4-3 样本股票在不同时期的价格

	2012.12	2013.02	2013.03	2013.04	2013.06	2013.08	2013.10	2013.12
000004	8.18	10.05	9.54	10.64	10.00	12.16	11.67	11.65
000009	8.80	9.11	9.96	9.92	11.00	9.92	9.86	9.45
000011	7.19	7.10	6.17	7.39	7.93	9.07	7.91	7.81
000016	3.16	3.44	3.16	3.41	3.41	3.52	3.79	3.86
000018	6.69	7.62	8.52	7.77	8.83	9.83	8.90	9.57
000025	6.15	6.75	6.18	6.03	6.03	6.61	6.95	8.78
000078	5.82	7.88	7.26	7.41	7.41	6.71	7.40	7.55
000151	6.86	7.42	8.08	8.05	8.05	7.75	7.35	7.30
000153	6.48	7.26	7.82	8.12	8.12	7.47	7.39	7.82
000591	6.29	7.03	6.82	6.31	7.17	8.27	8.86	8.21

注：股票价格都是利用的相应月份最后一个交易日收盘价。

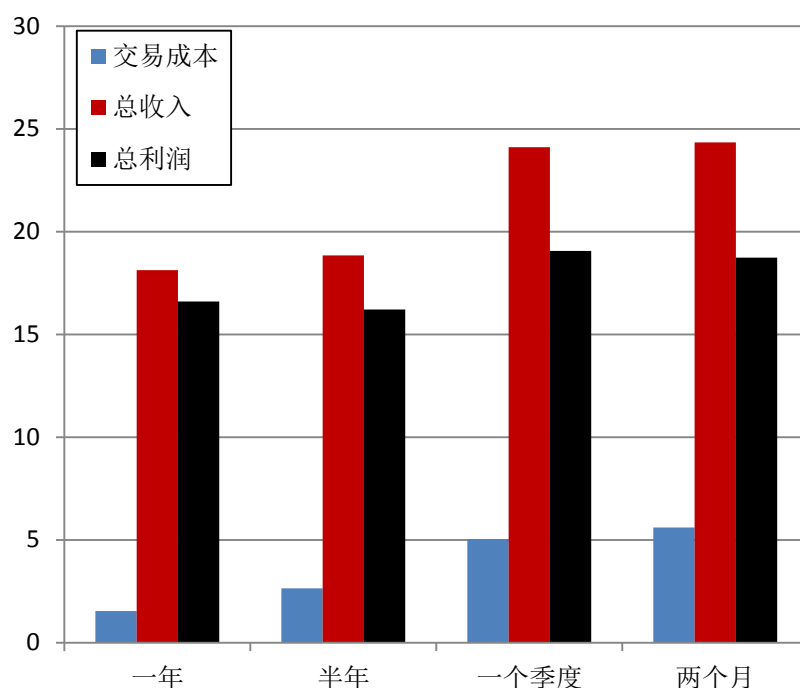


图 4-1 投资者在不同调整间隔下的投资收入和成本

注：横坐标表示投资者调整一次投资组合的时间；纵坐标单位是 10 万元。

图 4-1 是投资者在不同投资组合调整间隔下的总利润和交易成本情况。从图 4-1 中可以看出，随着投资者投资调整投资组合频率的增加，投资者的总收入、交易成本、以及总利润也都随之增加；算法交易策略对投资组合的影响主要是通过交易成本体现的，考虑了算法交易策略的影响后，投资组合调整的越频繁，交易成本就会越大，并且随着调整频率的增加，相对于投资者总收入的边际增长率，交易成本的边际增长率更大。通过对比分析投资者在每年、每半年、每个季度、每两个月调整一次投资组合时总利润情况可知，投资者在每个季度调整一次的时候总利润最大。

4.4 本章小结

在现实的证券市场上，投资者在执行投资组合过程中面临着各种交易成本的影响。本章将算法交易策略的设计和投资组合的构建结合起来进行分析，考虑了在算法交易策略的影响下，投资组合不同调整频率对投资者总利润的影响。研究表明，相对于每年、每半年、每两个月调整一次投资组合，投资者在每一季度调整一次投资组合时的利润最大，此时的投资收益较大，而相对调整较为频繁

情形，此时的交易成本也较小。综上所述，在考虑了算法交易策略的影响下，投资者的投资组合调整并不是越频繁越好，必须要综合考虑股票的预期收益、风险以及交易成本等因素。本章考虑了算法交易策略影响下的投资组合构建问题，以及不同投资组合调整频率对投资者总利润的影响。相关研究结论可为投资者构建合理的投资组合提供一定的理论指导。

第五章 结论与研究展望

5.1 全文总结

随着世界经济的快速发展，在全球资本市场上出现许多规模巨大的养老基金、对冲基金等机构投资者。然而，受到证券市场流动性有限等因素的影响，机构投资者想要在短时间内大量买入或卖出证券，往往会造成股票价格在短时间内的剧烈变动，从而增加交易成本，特别是价格冲击成本。为了减少这种交易成本，投资者迫切需要一种低成本、高效率的交易方法。算法交易正是产生于这一背景之下。

采用算法交易的投资者可以利用计算机程序将大额订单拆分为多个中、小规模子订单择机逐次提交，这种交易方式有效地降低了订单执行过程中的价格冲击成本。在美国和欧洲的证券市场上，许多投资者都已经开始利用算法交易来执行其投资决策。我国关于算法交易的研究和应用起步较晚，但是随着我国经济的高速发展和计算机、通信技术的不断进步，我国证券市场已初步具备实施算法交易的硬件条件，而且投资者也开始接受量化思想，因此结合我国证券市场特点，考虑价格冲击、机会成本等隐性交易成本影响下的算法交易策略问题显得尤为重要。

本论文以国内外算法交易的最新研究成果为基础，分析了投资者在交易过程中所面临的各种隐性交易成本、度量方法及其主要影响因素；接着，研究了投资者如何根据具体市场环境制定最优算法交易策略的问题；最后，分析了算法交易策略对投资组合构建的影响。本论文的主要工作和研究结论主要包含以下几个方面：

第一，在现实证券市场中，投资者能否获得预期投资收益，一方面是凭借其所构建的最优投资组合；另一方面是依靠在执行投资组合过程中的有效成本控制。即便是一个具有某种优势的投资组合，如果其交易成本过高，那么此投资组合的收益可能会低于预期值，甚至可能出现亏损。理解价格冲击的度量和影响因素，对于投资者减少交易成本，提高投资收益具有十分重要的现实意义。本文分析了投资者在交易过程中所面临的各种隐性交易成本，利用 VWAP 基准价格计算价格冲击成本，指出 VWAP 基准价格就是交易量对股票价格进行冲击后的期望值，并

给出了相应的理论依据；进一步，利用我国深圳证券市场的高频交易数据，分析了价格冲击的主要影响因素，并对比分析这种影响在日内不同交易时段之间可能存在的差异。研究表明，对中等规模和小规模股票而言，投资者订单规模是影响价格冲击的显著因素，并且订单规模越大，对股票价格的冲击也越大；对于大规模股票而言，其流通市值和成交量较大，投资者的订单可能会隐藏在众多其他投资者的订单中进行交易，从而使得订单规模对价格冲击的影响并不显著。无论是大规模、中等规模还是小规模股票，市场订单不平衡程度与价格冲击存在显著的正相关关系。

第二，传统观点认为，在证券交易过程中，同样一笔资金对大盘股股票的冲击要小于小盘股股票。然而，在现实证券市场上，许多流通市值非常大的大盘股股票，其流动性并不像流通市值所表现的那么好。究其原因在于这类股票的流通股中存在很大部分流通股长期处于不流动状态。针对这种现象，本论文提出一个股票的“真实”流动性指标，并利用成交金额与流通市值（去除了长期不流动部分的流通市值）的比值来衡量；进一步，以交易量与价格变化的回归系数来刻画证券的价格冲击程度，利用我国证券交易所的高频交易数据，分析“真实”流动性、流通市值等因素对证券价格冲击的影响。研究发现，“真实”流动性对价格冲击具有显著的负向影响，股票的“真实”流动性越好，价格冲击越小；流通市值对价格冲击的影响并不显著；在每年年底时，“真实”流动性对价格冲击具有显著的影响。因此，为了防止其他基金公司的“砸盘”行为，投资者在年底频繁调整投资组合时应该着重关注那些“真实”流动性较小的股票；监管层应该在年底阶段应该重点监管那些“真实”流动性较小的大盘股股票，以防止出现人为的价格操纵行为。

第三，对任何机构投资者而言，一旦交易机会出现，并且拟配置的资金也已经确定，那么投资者需要交易的证券数量就基本确定。然而，受到证券市场流动性有限的影响，投资者所提交的大额订单在执行过程中可能会产生较大的价格冲击。为了减少这种价格冲击，投资者通常会考虑将大额订单拆分成若干个中、小规模子订单择机逐次提交，这种多阶段逐次提交的交易策略可能会导致订单无法全部按时成交以及由于证券价格变动而出现风险。针对现有文献大都考虑订单全部执行以及未考虑时间风险因素的不足，本文利用最优化理论和方法，分析了投资者在最小化隐性交易成本目标下的最优算法交易策略问题。研究结论表明，无论订单成交概率是单调增加、单调减少还是 U 型，本研究所提出的最优交易策

略的交易成本均小于交易量加权平均价格交易策略，表明采用此交易策略可以为投资者减少交易成本，提高投资收益；此结论也为投资者根据市场情况制定合理交易策略提供重要的参考依据。

第四，在执行投资组合的过程中，如果投资者采用不同的算法交易策略，那么其交易成本可能会存在较大差异，而交易成本的这种差异又会反过来影响到投资者投资组合的构建。本文考虑了算法交易策略对投资组合的影响，并利用我国深圳交易所的股票交易数据分析了不同的投资组合调整频率对投资者总利润的影响。研究表明，在考虑了算法交易策略的影响下，投资者的投资组合调整并不是越频繁越好，必须要综合考虑股票的预期收益、风险以及交易成本等因素。本研究结合我国证券交易所的历史交易数据，对比分析了投资者每年、每半年、每个季度、每两个月调整一次投资组合时的总利润情况，研究表明投资者在每一季度调整一次投资组合时的总利润最大。

5.2 研究展望

本论文基于国内外算法交易的发展现状，结合我国证券市场的具体特征和高频交易数据，利用最优化理论和计量经济学的相关方法，分析了算法交易策略的隐性交易成本、算法交易策略的设计、算法交易策略对投资组合选择的影响等问题，得到一些研究成果。

本论文仍然存在一些不足和需要进一步改进的地方，下一步的研究将主要从以下几个方面展开：

第一，尽管本文分析了价格冲击成本的度量方法，也利用深圳证券市场创业板的高频交易数据分析了价格冲击的主要影响因素，并对比分析这种影响在不同交易时段之间的差异。然而，在相同时间段内的买单和卖单价格冲击可能还存在一定的差异，本文并没有分析这种差异的大小，影响这一差异的主要因素，以及这种差异在不同时间内的特点。

第二，针对订单未全部执行的情形，在最小化交易成本的目标下，本文给出了一个最优算法交易策略。然而，本文所提出的算法交易策略只是在明确了未来市场环境特征情况下的静态交易策略，并没有考虑投资者根据市场环境变化可以随时调整的动态算法交易策略。

第三，尽管本文考虑了算法交易策略对投资组合构建的影响，并分析投资者在考虑了这种影响下如何构建最优投资组合的问题。然而，在这种情况下所考虑

最优算法交易策略仅是基于价格冲击成本，并没有同时结合机会成本、择时风险等其他隐性交易成本，而这些隐性交易成本都对投资者算法交易策略的制定也起着非常重要的作用，下一步的研究将分析其他隐性交易成本对投资者投资组合构建的影响。

致谢

论文写到这里，即将结束。回想这四年多的时光，思绪万千，仿佛只是眨眼之间，又仿佛已是很久很久。回首往事，开学报到的情形，第一次参加周会的情形，第一次主持活动的情形，亦然是历历在目。四年多的时光就着这样溜走了，伴随着我的青春年少一起消逝，也伴随着我的学识和经历一起成长。在此期间，许多老师和同学给了我很多的指导和帮助，在此向他们表达最诚挚的谢意！

感谢我的导师曾勇教授！恩师以其严谨的态度、渊博的学识、独特的人格魅力一直在影响着我。从学习金融基础知识开始，从学习如何进行学术研究开始，也从担任老师与同学们之间的联络人开始，在恩师的鼓励和鞭策下，懵懵懂懂的我开始在跌跌撞撞中一路前行。感谢恩师用一颗包容的心，鼓励我学习与成长；也感谢恩师给了我一个向各位老师和同学学习的机会，让我学到了很多在课堂上无法学到的知识；还要感谢恩师对我的指导和帮助，让我体会到了关怀，懂得了用心，学会了严谨。严谨这个词、这种态度将会在我以后生活工作中伴我前行、随我成长，再次深深地感谢恩师！

感谢我的老师李平副教授！感谢李老师这些年来在学习和生活上给予我无微不至的关怀和帮助！也感谢李老师在小组会上对我的淳淳教诲！还要感谢李老师从如何做研究、如何做事、以及如何合理安排时间等各方面对我的教导！在我开始学习整理论文时，李老师逐字逐句的教我修改论文语句，细心地教我修改论文格式。这些年来，在李老师办公室里，在去餐厅的小路上，甚至是在餐厅的餐桌上，这些地方都见证了李老师对我的悉心指导和帮助，再次衷心地感谢李老师！

还要感谢马永开、周宗放、田益祥等教授的授课与指导，感谢学院孔刚、汤玲玉、田清等老师给我的关心和帮助！感谢夏晖、邓光军、李强、郭文新、沈玉清、王志刚、刘波、蔡强、赵武、陈磊等老师，也感谢通信楼726工作室和经管楼407工作室的师兄姐妹们，感谢你们陪我度过了这段痛并快乐的日子，特别感谢刘彬师兄，感谢你教我如何做事，也感谢你在我苦闷时为我带来的欢声笑语！

最后要感谢我那满身病痛的父亲和辛苦操劳了大半辈子的母亲，感谢他们这些年来的理解和支持！还要感谢我的爱人高伟女士，相识十三载，相守近两年，感谢你这些年陪我走过风风雨雨！

参考文献

- [1] S. Chakravarty. Stealth-trading: Which traders' trades move stock prices?[J]. Journal of Financial Economics. 2001, 61(2): 289-307
- [2] I. Aldridge. High-frequency trading: A practical guide to algorithmic strategies and trading systems[M]. New Jersey: John Wiley and Sons, 2013, 10-55
- [3] I. Domowitz, H. Yegerman. The cost of algorithm trading: A first look at comparative performance[J]. Trading, 2005, (1): 30-40
- [4] T. Hendershott, P. C. Moulton. Automation, speed, and stock market quality: The NYSE's hybrid[J]. Journal of Financial Markets, 2011, 14(4): 568-604
- [5] 刘逖. 市场微观结构与交易机制设计: 高级指南[M]. 上海: 上海人民出版社, 2012, 68-71
- [6] 陈梦根. 算法交易的兴起及最新研究进展[J]. 证券市场导报, 2013, (9): 11-17
- [7] AITE Group. The next generation of execution consulting services: Leveraging technology to build relationships[R]. AITE Group, 2012
- [8] A. N. Madhavan. VWAP strategies[J]. Trading, 2002, (1): 32-39
- [9] 镇磊. 基于高频数据处理方法对A股算法交易优化决策的量化分析研究[D]. 中国科学技术大学, 2010, 9-22
- [10] R. Almgren, N. Chriss. Optimal execution of portfolio transactions[J]. Journal of Risk, 2001, 3: 5-40
- [11] C. C. Chang, P. F. Hsieh, H. N. Lai. The price impact of options and futures volume in after-hours stock market trading[J]. Pacific-Basin Finance Journal, 2013, 21(1): 984-1007
- [12] M. Bowe, S. Hyde, L. Mcfarlane. Duration, trading volume and the price impact of trades in an emerging futures market[J]. Emerging Markets Review, 2013, 17: 89-105
- [13] Z. Eisler, J. P. Bouchaud, J. Kockelkoren. The price impact of order book events: Market orders, limit orders and cancellations[J]. Quantitative Finance, 2012, 12(9): 1395-1419
- [14] M. Kothare, P. A. Laux. Trading costs and the trading systems for Nasdaq stocks[J]. Financial Analysts Journal, 1995, 51: 42-53
- [15] C. T. Brownlees, F. Cipollini, G. M. Gallo. Intra-daily volume modeling and prediction for algorithmic trading[J]. Journal of Financial Econometrics, 2011, 9(3): 489-518
- [16] A. Shleifer. Do demand curves for stocks slope down?[J]. Journal of Finance, 1986, 41(3): 579-590

- [17] 赵胜民. 算法交易与套利交易[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2010, 162-174
- [18] J. Hasbrouck. Empirical market microstructure: The institutions, economics, and econometrics of securities trading[M]. Oxford University Press, 2007, 12-32
- [19] M. D. Flood. Microstructure theory and foreign exchange market[J]. Federal Reserve Bank of St. Louis, 1991, 73(6): 52-70
- [20] C. Florackis, A. Gregoriou, A. Kostakis. Trading frequency and asset pricing on the London stock exchange: Evidence from a new price impact ratio[J]. Journal of Banking and Finance, 2011, 35(12): 3335-3350
- [21] R. Kissell, H. Lie. U.S. exchange auction trends: Recent opening and closing auction behavior, and the implication order management strategies[J]. The Journal of Trading, 2011, 6(1): 10-30
- [22] E. Leshik, J. Cralle. An introduction to algorithmic trading: Basic to advanced strategies[M]. John Wiley & Sons, 2011, 146-149
- [23] A. S. Kyle. Continuous auctions and insider trading[J]. Econometrical, 1985, 53(6): 1315-1335
- [24] L. R. Glosten, L. E. Harris. Estimating the components of the bid/ask spread[J]. Journal of Financial Economics, 1988, 21(1): 123-142
- [25] F. Lillo, J. D. Farmer, R. N. Mantegna. Master curve for price-impact function[J]. Nature, 2003, 421(9): 129-130
- [26] D. Sornette, D. Stauffer, H. Takayasu. Market fluctuations II: Multiplicative and percolation models, size effects, and predictions[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2002, 410-435
- [27] 陈收, 李双飞, 黎传国. 订单差、交易量变化对股票价格的冲击[J]. 管理科学学报, 2010, 13(9): 68-75
- [28] A. A. Alzahrani, A. Gregoriou, R. Hudson. Price impact of block trades in the Saudi stock market[J]. Journal of International Financial Markets, Institutions and Money, 2013, 23: 322-341
- [29] D. Ryu. Price impact asymmetry of futures trades: Trade direction and trade size[J]. Emerging Markets Review, 2013, 14: 110-130
- [30] G. Huberman, W. Stanzl. Price manipulation and quasi-arbitrage[J]. Econometrica, 2004, 72(4): 1247-1275
- [31] R. Almgren, C. Thum, E. Hauptmann, et al.. Equity market impact[J]. Risk, 2005, 18(7): 57-62
- [32] R. Kissell, M. Glantz. Optimal trading strategies: Quantitative approaches for managing market impact and trading risk[M]. New York: Amacom, 2003, 51-167
- [33] D. B. Keim. The cost of trend chasing and the illusion of momentum profits[R]. Working paper,

University of Pennsylvania, 2003

- [34] L. Kogan, S. A. Ross, J. Wang, et al.. The price impact and survival of irrational traders[J]. The Journal of Finance, 2006, 61(1): 195-229
- [35] G. A. Blum, W. A. Kracaw, W. G. Lewellen. Determinants of the execution costs of common stock trades by individual investors[J]. Journal of Financial Research, 1986, 9(4): 291-301
- [36] I. Domowitz, J. Glen, A. Madhavan. Liquidity, volatility and equity trading costs across countries and over time[J]. International Finance, 2001, 4(2): 221-255
- [37] S. A. Berkowitz, D. E. Logue, E. A. Noser. The total cost of transactions on the NYSE[J]. Journal of Finance, 1988, 43(1): 97-112
- [38] D. B. Keim, A. Madhavan. The upstairs markets for large-block transactions: Analysis and measurement of price effects[J]. Review of Financial Studies, 1996, 9(1): 1-36
- [39] H. J. Ahn, J. Kang, D. Ryu. Information effects of trade size and trade direction: Evidence from the KOSPI200 options market[J]. Asia-Pacific Journal of Financial Studies, 2010, 39(3): 301-339
- [40] Q. Han, B. Guo, D. Ryu, et al.. Asymmetric and negative return-volatility relationship: The case of the VKOSPI[J]. Investment Analysts Journal, 2012, 76: 69-78
- [41] D. Ryu. The effectiveness of the order-splitting strategy: An analysis of unique data[J]. Applied Economics Letters, 2012, 19(6): 541-549
- [42] C. Schlag, H. Stoll. Price impacts of options volume[J]. Journal of Financial Markets, 2005, 8(1): 69-87
- [43] G. Hu. Measures of implicit trading costs and buy-sell asymmetry[J]. Journal of Financial Markets, 2009, 12(3): 418-437
- [44] A. A. Alzahrani, A. Gregoriou, R. Hudson. Can market frictions really explain the price impact asymmetry of block trades[J]. Emerging Markets Review, 2012, 13(2): 202-209
- [45] B. N. Lehmann. What we measure in execution cost measurement[J]. Journal of Financial Markets, 2003, 6(3): 227-231
- [46] J. Kang, D. Ryu. Which trades move asset prices: An analysis of futures trading data?[J]. Emerging Markets Finance and Trade, 2010, 46: 7-22
- [47] P. Bank, D. Baum. Hedging and portfolio optimization in financial markets with a large trader[J]. Mathematical Finance, 2004, 14(1): 1-18
- [48] A. Schied, T. Schöneborn. Risk aversion and the dynamics of optimal liquidation strategies in illiquid markets[J]. Finance and Stochastics, 2009, 13(2): 181-204

- [49] C. Hopman. Do supply and demand drive stock prices?[J]. Quantitative Finance, 2007, 7(1): 37-53
- [50] I. Tkatch, Z. S. Alam. Slice order in TASE-strategy to hide?[R]. Working paper, Georgia State University, 2007
- [51] W. H. Wagner, M. Edwards. Best execution[J]. Financial Analysts Journal, 1993, 49(1): 65-71
- [52] T. C. Johnson. Dynamic liquidity in endowment economies[J]. Journal of Financial Economics, 2006, 80(3): 531-562
- [53] K. Kim. Electronic and algorithmic trading technology: The complete guide[M]. New York: Academic Press, 2010, 13-46
- [54] R. Almgren. Optimal execution with nonlinear impact functions and trading-enhanced risk[J]. Applied Mathematical Finance, 2003, 10(1): 1-18
- [55] H. Konishi. Optimal slice of a VWAP trade[J]. Journal of Financial Markets, 2002, 5(2): 197-221
- [56] 仲黎明, 刘海龙, 吴冲锋. 机构投资者的最优变现策略[J]. 管理科学学报, 2002, 5(5): 18-22
- [57] R. Kissell, M. Glantz, R. Malamut. A practical framework for estimating transaction costs and developing optimal trading strategies to achieve best execution[J]. Finance Research Letters, 2004, 1(1): 35-46
- [58] R. Kissell, R. Malamut. Algorithmic decision-making framework[J]. The Journal of Trading, 2006, 1(1): 12-21
- [59] B. Monch. Liquidating large security positions strategically: A pragmatic and empirical approach[J]. Financial Markets and Portfolio Management, 2009, 23(2): 157-186
- [60] 林辉, 张涤新, 杨浩, 等. 流动性调整的最优交易策略模型研究[J]. 管理科学学报, 2011, 14(5): 65-76
- [61] B. Jovanovic, A. J. Menkveld. Middlemen in limit order markets[R]. Working paper, New York University, 2010
- [62] T. Foucault, A. J. Menkveld. Competition for order flow and smart order routing systems[J]. Journal of Finance, 2008, 63(1): 119-158
- [63] M. Aitken, D. J. Cumming, F. Zhan. Identifying international start dates for algorithmic trading and high-frequency trading[R]. Working paper, University of New South Wales, 2012
- [64] R. Almgren, J. Lorenz. Adaptive arrival price[J]. Trading, 2007, (1): 59-66
- [65] D. Cuoco, H. He, S. Isaenko. Optimal dynamic trading strategies with risk limits[J]. Operations

- Research, 2008, 56(2): 358-368
- [66] R. Almgren, N. Chriss. Value under liquidation[J]. Risk, 1999, 12(12): 61-63
- [67] C. Chiarella, G. Lori. A simulation analysis of the microstructure of double auction markets[J]. Quantitative Finance, 2002, 2(5): 346-353
- [68] R. A. Schwartz, R. Francioni, B. W. Weber. Decision making in equity trading: Using simulation to get a grip[J]. Journal of Trading, 2006, 1(1): 59-74
- [69] M. Gsell. Assessing the impact of algorithmic trading on markets: A simulation approach[C]. Proceedings of the 16th European Conference on Information Systems, Poznan, 2008, 587-598
- [70] R. F. Engle, R. Ferstenberg, J. Russell. Measuring and modeling execution cost and risk[J]. The Journal of Portfolio Management, 2012, 38(2): 14-28
- [71] T. Hendershott, R. Riordan. Algorithmic trading and the market for liquidity[J]. Journal of Financial and Quantitative Analysis, 2013, 48(4): 1001-1024
- [72] M. K. Brunnemeier, L. H. Pedersen. Market liquidity and funding liquidity[J]. Review of Financial Studies, 2009, 22(6): 2201-2238
- [73] L. J. Berke. US institutional equity brokerage 2010: Assets, commission management and concentration research report[R]. TABB Group, 2010
- [74] J. E. Schmitz. Algorithmic trading in the Iowa electronic markets[J]. Algorithmic Finance, 2011, 1(2): 157-181
- [75] M. Lenglet. Conflicting codes and coding: How algorithmic trading is reshaping financial regulation[J]. Theory, Culture and Society, 2011, 28(6): 44-66
- [76] B. Biais, T. Foucault, S. Moinas. Equilibrium high-frequency trading[C]. AFA 2013 San Diego Meetings Paper, 2012
- [77] A. A. Kirilenko, A. S. Kyle, M. Samadi, et al.. The flash crash: The impact of high frequency trading on an electronic market[R]. Working paper, MIT Sloan School of Management, 2011
- [78] J. Bialkowski, S. Darolles, G. Le Fol. Improving VWAP strategies: A dynamic volume approach[J]. Journal of Banking and Finance, 2008, 32(9): 1709-1722
- [79] M. L. Humphery-Jenner. Optimal VWAP trading under noisy conditions[J]. Journal of Banking and Finance, 2011, 35(9): 2319-2329
- [80] A. A. Obizhaeva, J. Wang. Optimal trading strategy and supply/demand dynamics[J]. Journal of Financial Markets, 2013, 16(1): 1-32
- [81] H. Berkman, T. Brailsford, A. Frino. A note on execution costs for stock index futures: Information versus liquidity effects[J]. Journal of Banking and Finance, 2005, 29(3): 565-577

- [82] A. Frino, T. Oetomo. Slippage in futures markets: Evidence from the Sydney futures exchange[J]. The Journal of Futures Markets, 2005, 25(12): 1229-1146
- [83] 胡晓波. 基于交易成本的股指期货期现套利交易机会分析[D].上海交通大学, 2011, 20-52
- [84] 黄伟. 基于隐性交易成本的期货市场交易策略研究[D].上海交通大学, 2009, 13-31
- [85] H. Markowitz. Portfolio selection[J]. Journal of Finance, 1952, 7(1): 77-91
- [86] M. Leippold, F. Trojani, P. Vanini. A geometric approach to multiperiod mean variance optimization of assets and liabilities[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2004, 28(6): 1079-1113
- [87] S. S. Zhu, D. Li, S. Y. Wang. Risk control over bankruptcy in dynamic portfolio selection: A generalized mean-variance formulation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(3): 447-457
- [88] R. D. Arnott, W. H. Wagner. The measurement and control of trading costs[J]. Financial Analysts Journal, 1990, 12: 73-80
- [89] J. E. Mitchell, S. Braun. Rebalancing an investment portfolio in the presence of convex transaction costs, including market impact costs[J]. Optimization Methods and Software, 2013, 28(3): 523-542
- [90] M. J. Best, J. Hlouskova. Portfolio selection and transactions costs[J]. Computational Optimization and Applications, 2003, 24(1): 95-116
- [91] M. S. Lobo, M. Fazel, S. Boyd. Portfolio optimization with linear and fixed transaction costs[J]. Annals of Operations Research, 2007, 152(1): 341-365
- [92] 陈志平, 袁晓玲, 郜峰. 多约束投资组合优化问题的实证研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(2): 10-17
- [93] 任大源, 徐玖平, 黄南京, 等. 含交易成本和机会成本的极小极大多期投资组合选择模型[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(1): 11-19
- [94] H. Konno, H. Yamazaki. Mean-absolute deviation portfolio optimization model and its application to Tokyo stock market[J]. Management Science, 1991, 37(5): 519-531
- [95] M. R. Young. A minimax portfolio selection rule with linear programming solution[J]. Management Science, 1998, 44(5): 673-683
- [96] X. Q. Cai, K. L. Teo, X. Q. Yang, et al.. Portfolio optimization under a minimax rule[J]. Management Science, 2000, 46(7): 957-972
- [97] K. Muthuraman. A computational scheme for optimal investment consumption with proportional transaction costs[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2007, 31(4):

1132-1159

- [98] S. R. Pliska. Introduction to mathematical finance[M]. Blackwell, 1997, 24-51
- [99] D. Li, W. L. Ng. Optimal dynamic portfolio selection: Multiperiod mean-variance formulation[J]. Mathematical Finance, 2000, 10(3): 387-406
- [100] 薛宏刚, 张川, 胡春萍, 等. 考虑大宗交易的均值-方差投资组合优化模型及其分支定界算法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(9): 1617-1627
- [101] R. Ferstenberg. Optimal execution strategies[C]. Berkeley Program in Finance Conference, 2000, 4: 42-49
- [102] J. Hill. Transaction costs and liquidity in Evolving markets[C]. Superbowl of Indexing Conference, 2001, 2: 109-116
- [103] W. H. Wagner, M. Banks. Increasing portfolio effectiveness via transaction cost management[J]. Journal of Portfolio Management, 1992, 19(1): 6-11
- [104] C. A. Parlour. Price dynamics in limit order markets[J]. Review of Financial Studies, 1998, 11(4): 789-816
- [105] A. Kraus, H. R. Stoll. Price impacts of block trading on the New York Stock Exchange[J]. The Journal of Finance, 1972, 27(3): 569-588
- [106] O. E. Barron, J. M. Karpoff. Information precision, transaction costs, and trading next term volume[J]. Journal of Banking and Finance, 2004, 28(6): 1207-1223
- [107] A. Freyre-Sanders, R. Guobuzaitė, K. Byrne. A review of trading cost models: Reducing trading costs[J]. Journal of Investing, 2004, 13(4): 93-115
- [108] A. Dufour, R. F. Engle. Time and the price impact of a trade[J]. Journal of Finance, 2000, 55(6): 2467-2498
- [109] H. Bessembinder. Issues in assessing trade execution costs[J]. Journal of Financial Markets, 2003, 6(3): 233-257
- [110] R. W. Holthausen, R. W. Leftwich, D. Mayers. The effect of large block transactions on security prices: Across-sectional analysis[J]. Journal of Financial Economics, 1987, 19(2): 237-267
- [111] R. Kissell. TCA in the investment process: An overview[J]. The Journal of Index Investing, 2011, 2(1): 60-64
- [112] K. Venkataraman. Automated versus floor trading: An analysis of execution costs on the Paris and New York exchanges[J]. Journal of Finance, 2001, 56(4): 1445-1485
- [113] M. Coppejans, I. Domowitz. The impact of foreign equity ownership on emerging market

- share price volatility[J]. *International Finance*, 2000, 3(1): 95-122
- [114] C. M. Jones, M. L. Lipson. Execution costs of institutional equity orders[J]. *Journal of Financial Intermediation*, 1999, 8(3): 123-140
- [115] M. O'Hara, G. S. Oldfield. The microeconomics of market making[J]. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 1986, 21(4): 361-376
- [116] T. H. Mcinish, R. A. Wood. An analysis of intraday patterns in bid/ask spreads for NYSE stocks[J]. *Journal of Finance*, 1992, 47(2): 753-764
- [117] R. Roll. A simple implicit measure of the effective bid-ask spread in an efficient market[J]. *Journal of Finance*, 1984, 39(4): 1127-1139
- [118] L. R. Glosten, P. R. Milgrom. Bid, ask and transaction prices in a specialist market with heterogeneously informed traders[J]. *Journal of Financial Economics*, 1985, 14(1): 71-100
- [119] D. Easley, M. O'Hara. Price, trade size and information in securities market[J]. *Journal of Financial Economics*, 1987, 19(1): 69-90
- [120] Y. Amihud, H. Mendelson. Dealership market: Market making with inventory[J]. *Journal of Financial Economics*, 1980, 8(1): 31-53
- [121] M. Kritzman, S. Myrgren, S. Page. Implementation shortfall[J]. *The Journal of Portfolio Management*, 2006, 33(1): 25-30
- [122] C. N. Chiyachantana, P. K. Jain, C. Jiang, et al.. International evidence on institutional trading behavior and price impact[J]. *The Journal of Finance*, 2004, 59(2): 869-898
- [123] B. Choudhary, S. Nanda. *Functional analysis with applications*[M]. New Delhi: Wiley, 1989, 15-31
- [124] T. E. Copeland, D. Galai. Information effects on the bid-ask spread[J]. *Journal of Finance*, 1983, 38(5): 1457-1469
- [125] F. D. Foster, S. Viswanathan. Variations in trading volume, return volatility, and trading costs: Evidence on recent price formation models[J]. *The Journal of Finance*, 1993, 48(1): 187-211
- [126] 屈文洲, 吴世农. 中国股票市场微观结构的特征分析——买卖报价价差模式及影响因素的实证研究[J]. *经济研究*, 2002, (1): 56-63
- [127] 雷觉铭, 李平, 曾勇. 深圳股市价差影响因素的实证研究[J]. *管理学报*, 2010, 7(10): 1535-1541
- [128] 廖静池. 中国股票市场停复牌制度的有效性研究[D]. 电子科技大学, 2011, 18-50
- [129] 燕汝贞, 李平, 曾勇. 一种面向高频交易的算法交易策略[J]. *管理科学学报*, 2014, 17(3): 88-96

- [130] Y. Amihud, H. Mendelson. The effects of beta, bid-ask spread, residual risk and size on stock returns[J]. *Journal of Finance*, 1989, 44(2): 479-486
- [131] M. N. Massimb, B. D. Phelps. Electronic trading, market structure and liquidity[J]. *Financial Analysts Journal*, 1994, 50(1): 39-50
- [132] G. Jacoby, D. J. Fowler, A. A. Gottesman. The capital asset pricing model and the liquidity effect: A theoretical approach[J]. *Journal of Financial Markets*, 2000, 3(1): 69-81
- [133] D. Easley, S. Hvidkjaer, M. O'Hara. Is information risk a determinant of asset returns?[J]. *Journal of Finance*, 2002, 57(5): 2185-2221
- [134] M. J. Brennan, A. Subrahmanyam. Market microstructure and asset pricing: On the compensation for illiquidity in stock returns[J]. *Journal of Financial Economics*, 1996, 41(3): 441-464
- [135] V. T. Datar, N. Y. Naik, R. Robert. Liquidity and stock returns: An alternative test[J]. *Journal of Financial Markets*, 1998, 1(2): 203-219
- [136] D. Easley, N. M. Kiefer, M. O'Hara, et al.. Liquidity, information, and infrequently traded stocks[J]. *Journal of Finance*, 1996, 51(4): 1405-1436
- [137] L. E. Harris. Minimum price variations, discrete bid-ask spreads, and quotation sizes[J]. *Review of Financial Studies*, 1994, 7(1): 149-178
- [138] W. Liu. A liquidity augmented capital asset pricing model[J]. *Journal of Financial Economics*, 2006, 82(3): 631-671
- [139] T. Chordia., R. Roll, A. Subrahmanyam. Market liquidity and trading activity[J]. *Journal of Finance*, 2001, 56(2): 501-530
- [140] 曾勇, 李平, 刘波, 等. 证券市场微观结构研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 5-25
- [141] 张峥, 李怡宗, 张玉龙, 等. 中国股市流动性间接指标的检验——基于买卖价差的实证分析[J]. *经济学(季刊)*, 2013, 13(1): 233-262
- [142] J. Hasbrouck. Trading costs and returns for U.S. equities: Estimating effective costs from daily data[J]. *Journal of Finance*, 2009, 64(3): 1445-1477
- [143] J. Hasbrouck, R. A. Schwartz. Liquidity and execution costs in equity markets[J]. *The Journal of Portfolio Management*, 1988, 14(3): 10-16
- [144] C. Loderer, J. W. Cooney, L. D. V. Drunen. The price elasticity of demand for common stock[J]. *Journal of Finance*, 1991, 46(2): 621-651
- [145] J. D. Farmer, L. Gillemot, F. Lillo, et al.. What really causes large price changes?[J]. *Quantitative Finance*, 2004, 4(4): 383-397

- [146] P. Weber, B. Rosenow. Order book approach to price impact[J]. Quantitative Finance, 2005, 5(4): 357-364
- [147] T. Ho. Optimal dealer pricing under transactions and return uncertainty[J]. Journal of Financial Economics, 1981, 9(1): 47-73
- [148] R. Cont, A. Kukanov, S. Stoikov. The price impact of order book events[J]. Journal of Financial Econometrics, 2013, 12(1): 47-88
- [149] I. M. Werner. NYSE order flow, spreads, and information[J]. Journal of Financial Markets, 2003, 6(3): 309-335
- [150] F. Ren, L. X. Zhong. The price impact asymmetry of institutional trading in Chinese stock market[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2012, 391(8): 2667-2677
- [151] J. C. Leach, A. N. Madhavan. Price experimentation and security market structure[J]. Review of Financial Studies, 1993, 6(2): 375-404
- [152] R. W. Holthausen, R. W. Leftwich, D. Mayers. Large-block transactions, the speed of response, and temporary and permanent stock price effects[J]. Journal of Financial Economics, 1990, 26(1): 71-95
- [153] T. F. Loeb. Trading cost: The critical link between investment information and results[J]. Financial Analysts Journal, 1983, 39(3): 39-44
- [154] D. Bertsimas, A. W. Lo. Optimal control of execution costs[J]. Journal of Financial Markets, 1998, 1(1): 1-50
- [155] J. Lorenz, R. Almgren. Mean-variance optimal adaptive execution[J]. Applied Mathematical Finance, 2011, 18(5): 395-422
- [156] 燕汝贞, 李平, 曾勇. 基于市场冲击成本与机会成本的算法交易策略[J]. 管理学报, 2012, 9(7): 952-959
- [157] 方兆本, 镇磊. 基于非对称效应ACD模型和分时VWAP算法对A股市场算法交易的量化分析研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2011, 41(9): 753-759
- [158] J. Mossin. Optimal multi-period portfolio policies[J]. Journal of Business, 1968, 41(2): 215-229
- [159] R. C. Merton. Lifetime portfolio selection under uncertainty: The continuous-time case[J]. Review of Economics and Statistics, 1969, 51(3): 247-257
- [160] A. H. Y. Chen, F. C. Jen, S. Zions. The optimal portfolio revision policy[J]. Journal of Business, 1971, 44(1): 51-61
- [161] N. H. Hakansson. Multi-period mean-variance analysis: Toward a general theory of portfolio

- choice[J]. *Journal of Finance*, 1971, 26(4): 857-884
- [162] E. J. Elton, M. J. Gruber. The multi-period consumption investment problem and single period analysis[J]. *Oxford Economics Papers*, 1974, 26(2): 289-301
- [163] B. Dumas, E. Luciano. An exact solution to a dynamic portfolio choice problem under transaction costs[J]. *Journal of Finance*, 1991, 46(2): 557-595
- [164] D. J. Seppi. Block trading and information revelation around quarterly earnings announcements[J]. *Review of Financial Studies*, 1992, 5(2): 281-305
- [165] G. B. Dantzig, G. Infanger. Multi-stage stochastic linear programs for portfolio optimization[J]. *Annals of Operations Research*, 1993, 45(1): 59-76
- [166] G. Consigh, M. A. H. Dempster. Dynamic stochastic programming for asset-liability management[J]. *Annals of Operations Research*, 1998, 81: 131-162
- [167] Z. F. Li, K. W. Ng, X. T. Deng. Continuous-time optimal portfolio selection using mean-CaR models[J]. *Nonlinear Dynamics and Systems Theory*, 2007, 7(1): 35-49
- [168] K. C. Brown, W. V. Harlow, S. M. Tinic. Risk aversion, uncertain information and market efficiency[J]. *Journal of Financial Economics*, 1988, 22(2): 355-385
- [169] J. C. Easterwood, S. R. Nutt. Inefficiency in analysts' earnings forecasts: Systematic reaction or systematic optimism?[J]. *Journal of Finance*, 1999, 54(5): 1777-1797
- [170] I. Krinsky, J. Lee. Earnings announcements and the components of the bid-ask spread[J]. *Journal of Finance*, 1996, 51(4): 1523-1535

附录

1. 光大证券“乌龙指”事件

2013 年 8 月 16 日 11 时 05 分，光大证券股份有限公司在利用公司新开发的策略交易系统进行交易时，因程序出现问题，导致光大证券所使用的策略交易系统在短时间内生成巨量市价委托单，并且直接提交到上海证券交易所进行交易。光大证券在 8 月 16 日共累计申报买入 234 亿元，实际成交 72.7 亿元；同日，光大证券将 18.5 亿元股票转化为 ETF 卖出，并卖空 7130 手股指期货合约，获利 8721 万元。

光大证券提交巨量市价委托单的行为直接导致许多权重股瞬间大幅上涨。同时，股指期货、蓝筹 ETF 同步大幅上涨，上证指数在午间收盘时收于 2149 点，最高曾经达到了 2191 点，如图 A1-1 所示。事件的具体过程、事件发生的原因以及此事件的进一步处理结果如下所述。

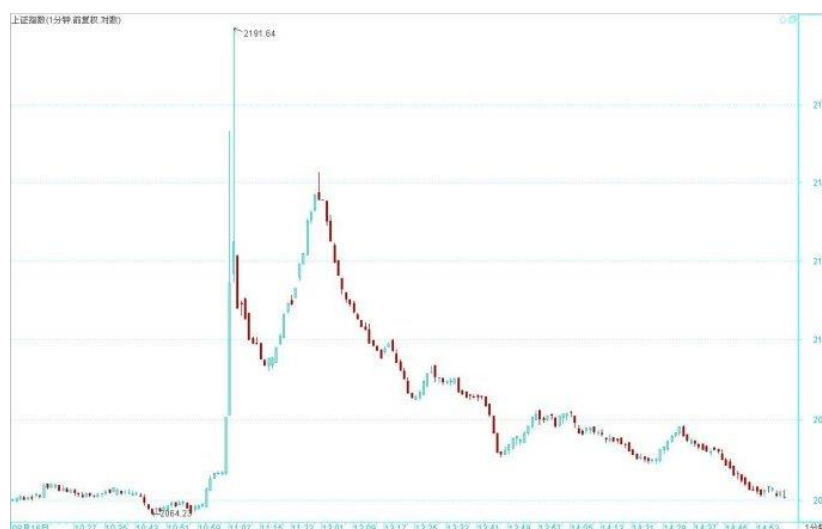


图 A1-1 上证指数变化图（2013 年 8 月 16 日）

（1）事件过程

2013 年 8 月 15 日，上证指数收于 2081 点。

2013 年 8 月 16 日，上证指数以 2075 点低开，截止到上午 11 点，上证指数一直在低位徘徊。

2013年8月16日11点05分31秒,中国石化在一秒内成交了五笔数额较大的订单,总成交量达到了49035手,股票价格在瞬间就从4.48元上涨到4.58元,升幅达到2.23%。

截止到11点05分43秒,中国石化又成交了6151手、9807手、3182手、7441手、7690手、4038手、4525手、8651手、4374手、5177手、2120手、6349手、1673手、2400手、2887手、3978手和9816手,股价上涨到4.90元,股价涨幅达到了6.98%。

2013年8月16日11点05分54秒,受中国石化在短时间内大幅上涨的影响,许多资金开始涌入其它权重股,工商银行一秒内成交了68502手,股价上涨至3.96元;05分55秒,工商银行的股价升至3.99元;截止到05分56秒,工商银行的股价已上涨到4.35元。至此,作为两市第一大市值股的工商银行涨停。从11点05分31秒到05分56秒,经过短短26秒钟,中国石化和工商银行这两大权重股先后涨停。

2013年8月16日11点15分起,上证指数开始继续上涨,这一次最高升至2198点,午间收盘时收于2149点。

2013年8月16日11点29分,有媒体称:上午的A股暴涨是由于光大证券自营盘70亿的乌龙指行为。

2013年8月16日13点,光大证券发布公告声称:因公司重要事项未公告,所以决定临时停牌。

2013年8月16日14点23分左右,光大证券发布公告,承认公司的策略投资部在进行ETF套利过程中出现问题,并表示公司正在进行相关核查工作。

2013年8月16日15点,上海证券交易所声称,当日交易系统运行正常,已达成交易将进入正常清算交收环节。

2013年8月16日16点27分左右,中国证监会表示上证综指瞬间大幅上涨,主要原因是光大证券自营账户的大额买入行为,并且表示上海证券交易所和上海证监局已经对光大证券异常交易行为展开调查。

(2) 事件发生的原因

证监会发言人表示,光大证券的策略交易部门并没有纳入公司统一的风险管控系统,而且该策略交易系统自2013年7月29日开始使用,截止到事件发生时,实际只使用了15个交易日。该策略交易系统中的“重下订单”功能从没有进行相应的实盘测试。

光大证券有限公司表示由于策略投资部使用的策略交易系统出现了问题，所以导致此次事件的发生。该公司的策略交易系统主要包含了订单生成系统和订单执行系统。在事件发生后的核查过程中发现，该订单执行系统中缺乏对可用资金的有效管控，在某些特定情况下，订单生成系统中的这个缺陷将会产生大量的预期外订单。在 2013 年 8 月 16 日，由于该策略交易系统存在的缺陷，导致了在 11 时 05 分 08 秒至 11 时 05 分 10 秒内瞬时产生了 26082 笔市价委托订单，并且由于该执行系统中缺乏对可用资金的管控，导致这些订单直接被提交到证券交易所进行交易。

（3）证监会的处理结果

2013 年 8 月 30 日，证监会通报了对光大证券“乌龙指”事件的处罚决定：此事件被定性为内幕交易，对光大证券的前总裁徐浩明、前总裁助理杨赤忠、前计财部总经理、前策略投资部总经理杨剑波分别给予警告、罚款 60 万元，终身禁止从事证券交易的相关工作，并且没收光大证券的非法所得 8721 万元，同时还处以 5 倍罚款，共计 5.23 亿。

针对这一判决，杨剑波在 2014 年 2 月 8 日正式向北京第一中级人民法院递交上诉状起诉证监会；北京市第一中级人民法院于 2014 年 2 月 18 日声称正式受理该案件。

2014 年 4 月 3 日，光大“乌龙指”事件主要当事人、原光大证券策略投资部总经理杨剑波起诉中国证监会一案，在北京市第一中级人民法院开庭审理。在此案中，杨剑波与证监会代表都认可以下事实：光大证券在 2013 年 8 月 16 日 11 时 5 分进行 ETF 套利交易时，因策略交易系统中存在的程序错误，致使该系统以 234 亿元的巨量资金申购 180ETF 成份股，实际成交 72.7 亿元。然而，有关此项交易是否构成内幕信息双方存在较大争议，这也成为本次庭审最大的辩论焦点。最终北京市第一中级人民法院决定择日宣判。

2014 年 5 月 16 日，北京市第一中级人民法院正式下达通知，由于杨剑波起诉证监会一案的案情复杂，经过向高级人民法院申请并且获得同意，延期审理最多三个月。

2014 年 8 月 15 日，北京市第一中级人民法院再次下达通知，根据相关法律规定，鉴于杨剑波起诉中国证监会一案的复杂性和重大性，经过向高级人民法院申请并且获得同意，再次延期三个月宣判。

2. IS 算法交易策略

受市场流动性有限的影响，投资者在执行交易过程中会面临较大的价格冲击。因此，为了减少这种价格冲击，投资者一般都会将大额的订单拆分为多个中、小规模子订单，并根据具体的市场环境择机进行提交。

假设投资者计划在未来一段时间 T 内完成总量为 S 的交易，在交易开始时的股票价格为 P_0 ，每个交易时期的长度为： $\tau = T/N$ ； N 表示交易时期数目； x_1, \dots, x_T 表示投资者在给定的风险水平下的最优交易策略； x_k 表示投资者在交易时期 k 所提交的订单规模。

投资者在每一个交易时期所持有的证券数量为：

$$n_k = S - \sum_{j=1}^k x_j, \quad k = 0, \dots, N \quad (\text{A2-1})$$

价格冲击可以分为永久价格冲击和临时价格冲击。在第 k 个交易时期，在考虑了永久价格冲击影响下的订单执行价格可以表示为：

$$P_k = P_{k-1} + \sigma\tau^{1/2}\xi_k - \tau g\left(\frac{x_k}{\tau}\right) \quad (\text{A2-2})$$

其中， σ 是波动率； ξ_k 是一个具有零均值和单位方差的随机变量； $g(v)$ 是一个关于交易速率 v 的永久价格冲击函数。

与永久价格冲击不同，临时价格冲击是由于证券市场的短时间内流动性供需不平衡导致的，一般只是会存在一个较短的时间内。假设临时价格冲击只是影响当期交易的股票价格，在下一期交易开始时上一期的这种临时性冲击将会消失。在第 k 个交易时期内，投资者在考虑了临时价格冲击影响下的订单执行价格可以表示为：

$$\tilde{P}_k = P_{k-1} - h\left(\frac{x_k}{\tau}\right) \quad (\text{A2-3})$$

其中， $h(v)$ 是一个关于交易速率 v 的临时价格冲击函数。

投资者交易数量为 X 的证券的总交易成本等于各交易时期股票价格与交易数量的乘积，即：

$$\sum_{k=1}^N x_k \tilde{P}_k = XP_0 + \sum_{k=1}^N n_k \left[\sigma\tau^{1/2}\xi_k - \tau g\left(\frac{x_k}{\tau}\right) \right] - \sum_{k=1}^N x_k h\left(\frac{x_k}{\tau}\right) \quad (\text{A2-4})$$

执行短缺 (IS) 等于投资者在整个交易过程中的总交易成本与交易开始时证券

价值的差额，即：

$$C(n) = SP_0 - \sum_{k=1}^N x_k \tilde{P}_k = \sum_{k=1}^N n_k \left[\tau g\left(\frac{x_k}{\tau}\right) - \sigma \tau^{1/2} \xi_k \right] + \sum_{k=1}^N x_k h\left(\frac{x_k}{\tau}\right) \quad (\text{A2-5})$$

此交易成本的均值和方差分别可以表示为：

$$E(C(n)) = \sum_{k=1}^N n_k \tau g\left(\frac{x_k}{\tau}\right) + \sum_{k=1}^N x_k h\left(\frac{x_k}{\tau}\right) \quad (\text{A2-6})$$

$$V(C(n)) = \sigma^2 \sum_{k=1}^N \tau n_k^2 \quad (\text{A2-7})$$

在 Markowitz 的均值-方差模型框架下，风险厌恶的投资者在最小化交易成本目标下的交易策略模型可以表示为：

$$\text{Min}_{n_k} E(C(n)) + \lambda V(C(n)) \quad (\text{A2-8})$$

其中， λ 表示风险厌恶程度。

假设永久性价格冲击和临时性价格冲击函数都是关于交易速率的线性函数，可以分别表示为：

$$g\left(\frac{x_k}{\tau}\right) = \gamma \frac{x_k}{\tau} \quad (\text{A2-9})$$

$$h\left(\frac{x_k}{\tau}\right) = \eta \frac{x_k}{\tau} \quad (\text{A2-10})$$

其中， γ 和 η 分别为常数。

因此，交易成本的均值可以表示为：

$$E(C(n)) = \frac{1}{2} \gamma S^2 + \frac{\tilde{\eta}_k}{\tau} \sum_{k=1}^N x_k^2 \quad (\text{A2-11})$$

其中， $\tilde{\eta}_k = \tilde{\eta} - \frac{1}{2} \gamma \tau$ 。

在式 (A2-11) 的基础上，投资者的最优算法交易策略模型 (A2-8) 可以简化为如下形式：

$$\text{Min}_{n_k} \frac{1}{2} \gamma S^2 + \frac{\tilde{\eta}_k}{\tau} \sum_{k=1}^N x_k^2 + \lambda \sigma^2 \sum_{k=1}^N \tau n_k^2 \quad (\text{A2-12})$$

此时可以将原问题化简为一个二阶齐次线性差分方程，即：

$$\frac{1}{\tau^2}(n_{j-1} - 2n_j + n_{j+1}) = n_j \tilde{\kappa}^2, \quad j = 0, \dots, N \quad (\text{A2-13})$$

其中,

$$\tilde{\kappa}^2 = \frac{\lambda \sigma^2}{\tilde{\eta}} = \frac{\lambda \sigma^2}{\eta \left(1 - \frac{\gamma \tau}{2\eta}\right)} \quad (\text{A2-14})$$

求解此最方程可以得到此问题的最优交易策略:

$$n_j = \frac{\sinh(\kappa(T-j))}{\sinh(\kappa T)}, \quad j = 0, \dots, N \quad (\text{A2-15})$$

$$x_j = \frac{2 \sinh\left(\frac{1}{2} \kappa \tau\right)}{\sinh(\kappa T)} \cosh(\kappa(T-j)), \quad j = 0, \dots, N \quad (\text{A2-16})$$

3. 研究股票价格冲击影响因素时所选样本股票明细

表 A3-1 研究股票价格冲击所用样本股票明细

股票代码	股票名称	所属板块	股票代码	股票名称	所属板块
300001	特锐德	创业板	300097	智云股份	创业板
300003	乐普医疗	创业板	300099	尤洛卡	创业板
300005	探路者	创业板	300101	振芯科技	创业板
300007	汉威电子	创业板	300104	乐视网	创业板
300013	新宁物流	创业板	300110	华仁药业	创业板
300015	爱尔眼科	创业板	300112	万讯自控	创业板
300017	网宿科技	创业板	300115	长盈精密	创业板
300022	吉峰农机	创业板	300118	东方日升	创业板
300023	宝德股份	创业板	300121	阳谷华泰	创业板
300024	机器人	创业板	300123	太阳鸟	创业板
300027	华谊兄弟	创业板	300124	汇川技术	创业板
300030	阳普医疗	创业板	300129	泰胜风能	创业板

附录

300037	新宙邦	创业板	300130	新国都	创业板
300039	上海凯宝	创业板	300140	启源装备	创业板
300041	回天新材	创业板	300142	沃森生物	创业板
300052	中青宝	创业板	300144	宋城演艺	创业板
300058	蓝色光标	创业板	300146	汤臣倍健	创业板
300059	东方财富	创业板	300150	世纪瑞尔	创业板
300061	康耐特	创业板	300153	科泰电源	创业板
300063	天龙集团	创业板	300156	神雾环保	创业板
300069	金利华电	创业板	300163	先锋新材	创业板
300070	碧水源	创业板	300167	迪威视讯	创业板
300071	华谊嘉信	创业板	300173	松德股份	创业板
300077	国民技术	创业板	300176	鸿特精密	创业板
300079	数码视讯	创业板	300184	力源信息	创业板
300085	银之杰	创业板	300192	科斯伍德	创业板
300087	荃银高科	创业板	300195	长荣股份	创业板
300092	科新机电	创业板	300199	翰宇药业	创业板
300094	国联水产	创业板	300200	高盟新材	创业板
300095	华伍股份	创业板	300201	海伦哲	创业板

作者攻读博士期间完成的论文

- [1] 燕汝贞, 李平, 曾勇. 一种面向高频交易的算法交易策略[J]. 管理科学学报, 2014, 17(3): 88-96. 第10届金融系统工程与风险管理国际年会 (FSERM'2012), 贵阳, 2012年27-28日, 获得“优秀论文奖”
- [2] 燕汝贞, 李平, 曾勇. 基于价格冲击成本与机会成本的算法交易策略[J]. 管理学报, 2012, 9(7): 952-959
- [3] 燕汝贞, 李平, 曾勇. 基于VWAP的价格冲击成本估计及其影响因素研究[J]. 管理工程学报. 已录用
- [4] Yan Ruzhen, Li Ping, Zeng Yong. Optimal algorithmic trading strategy with the price appreciation cost[C]. The 3rd International Conference on Information Technology and Management Innovation, Shenzhen, July 19-20, 2014
- [5] 燕汝贞, 李平, 曾勇. 考虑机会成本的高频交易策略[C]. 中国金融国际年会 (CICF'2012), 重庆, 2012年7月9日-12日
- [6] 燕汝贞, 李平, 曾勇. 基于股票流动性的价格冲击研究[R]. 工作论文
- [7] 燕汝贞, 李平, 曾勇. 一种基于算法交易策略的投资组合选择问题研究[R]. 工作论文

作者攻读博士期间参加的科研项目

- [1] 作为主研参与国家自然科学基金项目“基于市场微观结构和非线性协整的期货市场日内价格间关系研究”(71301019), 2014.01-2016.12
- [2] 主持中央高校基本科研业务费——优秀博士生支持计划项目“基于隐性交易成本的算法交易策略研究”(ZYGX2011YB036), 2011.09-2013.06
- [3] 作为主研参与国家自然科学基金项目“增长、创业企业市场定价与风险投资决策”(71102054), 2012.01-2014.12

基于隐性交易成本的算法交易策略研究

作者：[燕汝贞](#)
学位授予单位：[电子科技大学](#)

引用本文格式：[燕汝贞](#) [基于隐性交易成本的算法交易策略研究](#)[学位论文]博士 2014