# 摘要

自我国国债期货市场重启以来，市场运行平稳，发展迅速，国债期货交易规模不断扩大，交易品种不断的丰富，且在2020年3月起国债期货市场投资者限制放宽，允许商业银行、保险机构资金进入国债期货市场，为国债期货市场注入大量的流动性，使得市场活跃度大幅增加，有效性在逐渐增强，这为在国债期货市场进行统计套利奠定了基础。国债期货的套利交易可以提高国债期货市场的效率，为国债市场提供更加有效的参考，而在目前对于国债期货套利的研究以及应用较少，故此本文以国债期货跨品种套利进行研究，以期为投资者提供合理的套利策略建议，丰富国债期货跨品种套利研究，促进国债期货市场以及国债市场的发展。

本文是基于统计套利原理的国债期货跨品种套利，以2年期国债期货与5年期国债期货合约为套利标的，对TS2009和TF2009合约的3分钟收盘价进行分析，发现二者之间存在着长期的均衡关系，通过建立协整模型确定套利合约的配比以及去中心化价差序列，然后构建AR(3)-GARCH(1,1)模型确定开仓、平仓原则。在具体交易阈值的设计上，利用之前学者研究的经验阈值来确定止损值，同时以夏普比率最大化为目标利用穷举法寻求最优对称交易阈值和非对称交易阈值；通过不同交易阈值套利策略的样本内套利效果的分析，比较发现基于AR(3)-GARCH(1,1)模型的国债期货跨品种套利策略中非对称交易阈值策略更优，确定最终的套利策略是当去中心化价差超过0.8倍的标准差时进行正向套利，当去中心化价差超过-1.3倍的标准差时进行反向套利，当去中心化价差回归到均值或超过3.5倍的标准差时平仓。

最后对套利策略套利效果进行分析，计算该策略在样本外数据中的收益表现，检验套利策略在国债期货跨品种套利交易中的有效性。结果表明，该套利策略对样本内数据进行套利效果良好，成功率达到81.81%，92天累计收益到达30.5%，将该套利策略运用在样本外数据进行套利，成功率为62.96%，25天累计收益达到11.96%，成功率虽然有所下降，但收益率在提高，说明了所构建策略是可行的。

关键词： 国债期货；跨品种套利；AR-GARCH模型；交易阈值

# Abstract

Since the restart of our national debt futures market, the market has been running steadily and rapidly. The scale of treasury bond futures trading has been expanding and the trading varieties are constantly rich. Since march2020, the restrictions on investors in the bond futures market have been relaxed, allowing commercial banks and insurance institutions to enter the Treasury bond futures market, and inject a lot of liquidity into the national debt futures market, which makes the market active The increase in amplitude and the effectiveness are gradually increasing, which lays the foundation for statistical arbitrage in the Treasury bond futures market. Arbitrage transaction of treasury bond futures can improve the efficiency of treasury bond futures market and provide more effective reference for the national debt market. At present, there are few researches and applications of arbitrage in treasury bond futures. Therefore, this paper studies the cross variety arbitrage of treasury bond futures, in order to provide investors with reasonable arbitrage strategy suggestions, enrich the research on cross variety arbitrage of treasury bond futures, and promote the Treasury bond period The development of the goods market and the national debt market.

This paper is based on the statistical arbitrage principle of the national debt futures cross variety arbitrage, taking two-year Treasury futures and five-year Treasury futures contracts as arbitrage targets, analyzes the 3-minute closing price of ts2009 and tf2009 contracts, and finds that there is a long-term equilibrium relationship between them. Through the establishment of cointegration model, the ratio of arbitrage contracts and the decentralized price difference sequence are established, and AR (3) -garch (1,1) model is constructed determines the opening and closing principles. In the design of specific transaction threshold, the stop loss value is determined by using the empirical threshold studied by previous scholars. Meanwhile, the optimal symmetric transaction threshold and asymmetric transaction threshold are found by the exhaustive method aiming at the maximum sharp ratio. Through the analysis of arbitrage effect in the sample of different transaction threshold arbitrage strategies, it is found that AR (3) -garch (1, 1) is the best oneThe model of cross variety arbitrage strategy of treasury bond futures has better asymmetric trading threshold strategy. The final arbitrage strategy is to carry out positive arbitrage when the de centralization spread exceeds 0.8 times standard deviation, reverse arbitrage when the de centralization spread exceeds the standard deviation of -1.3 times, and close the position when the decentralized spread returns to the average or the standard deviation is more than 3.5 times.

Finally, the paper analyzes the arbitrage effect of arbitrage strategy, calculates the performance of the strategy in the data outside the sample, and tests the effectiveness of arbitrage strategy in the cross variety arbitrage transaction of treasury bond futures. The results show that the arbitrage strategy has good arbitrage effect on the data in the sample, with the success rate reaching 81.81%, the cumulative return in 92 days reaching 30.5%. The arbitrage strategy is applied to arbitrage with the data outside the sample, the success rate is 62.96%, and the cumulative return in 25 days reaches 11.96%. Although the success rate has decreased, the rate of return is improving, which indicates that the strategy is feasible.

Key words: Treasury bond futures; cross species arbitrage; AR-GARCH model; transaction threshold

目录

[摘要 I](#_Toc26044)

[Abstract II](#_Toc10166)

[1 引言 1](#_Toc12262)

[1.1 研究背景及意义 1](#_Toc19500)

[1.1.1 研究背景 1](#_Toc15178)

[1.1.2 研究意义 2](#_Toc15060)

[1.2 国内外文献综述 2](#_Toc19319)

[1.2.1 关于不同跨品种套利标的研究 2](#_Toc18938)

[1.2.2 关于跨品种套利方法的研究 5](#_Toc25249)

[1.2.3 统计套利交易阈值研究 7](#_Toc11211)

[1.2.4 文献评述 8](#_Toc26589)

[1.3 论文研究内容及方法 8](#_Toc14884)

[1.3.1 论文研究内容 8](#_Toc2124)

[1.3.2 论文研究方法 9](#_Toc1419)

[1.4 论文可能的创新及不足 9](#_Toc29338)

[2 期货跨品种套利的理论基础 10](#_Toc13325)

[2.1 基于协整模型的跨品种统计套利 11](#_Toc12051)

[2.2 期货价格及其波动的度量模型 12](#_Toc14098)

[2.2.1 期货价格及其波动的度量 12](#_Toc16978)

[2.2.2 AR模型 12](#_Toc19337)

[2.2.3 GARCH模型 13](#_Toc12527)

[2.3 交易原则 13](#_Toc14290)

[3 期货的套利交易现状 14](#_Toc3928)

[3.1 套利交易发展现状 14](#_Toc20456)

[3.2 国债期货套利在我国的发展与现状 16](#_Toc21952)

[4 国债期货跨品种套利策略的设计 18](#_Toc22223)

[4.1套利交易对象选择 18](#_Toc8270)

[4.2 数据选择及检验 19](#_Toc4220)

[4.2.1数据选择 19](#_Toc485)

[4.2.2 样本内数据检验 20](#_Toc12285)

[4.2.3 构建协整模型确定套利组合 21](#_Toc1579)

[4.3 2年期和5年期国债期货价差分析 22](#_Toc27631)

[4.3.1 价差序列分析 22](#_Toc9391)

[4.3.2自相关性检验 23](#_Toc4987)

[4.3.3 构建AR-GARCH模型 24](#_Toc13922)

[4.3.3 设定套利区间 25](#_Toc4217)

[4.4跨品种套利策略设计 26](#_Toc18370)

[4.4.1 套利策略评价指标的设定 26](#_Toc26472)

[4.4.2 套利成本的确定 28](#_Toc13668)

[4.4.3 套利交易信号设计 29](#_Toc3158)

[4.5 套利策略效果分析 30](#_Toc23544)

[4.5.1 对称交易信号策略的套利效果 30](#_Toc19046)

[4.5.2 非对称交易信号策略的套利效果 33](#_Toc17016)

[5 国债期货跨品种套利策略样本外回测效果及结论 35](#_Toc17439)

[5.1 样本外回测效果分析 35](#_Toc9671)

[5.2 结论 37](#_Toc27746)

[参考文献 38](#_Toc12909)

# 

# 1 引言

# 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 研究背景

国债期货(Treasury futures)是一种金融衍生工具，是合约双方预先确定好买卖价格，在未来特定的时间进行钱券交割。在1992年12月上海证券交易所最早试点推出了国债期货交易，但由于当时现货市场不发达，期货交易规则、政府监管、风险防范等都不健全，透支、超仓、[内幕交易](https://baike.so.com/doc/241141-255141.html" \t "https://baike.so.com/doc/_blank)、恶意操纵等违规行为盛行，接连发生了“327”、“319”等国债期货恶性违规事件，直到中国证监会宣布暂停国债期货交易，在1995年5月中国首次国债期货交易试点以失败而告终，历时两年半。从1995年到2013年在这18年间我国经济不断地增长，国债市场规模不断扩大，可以上市流通的债券数量也在不断增多，国债余额相较18年前增加了几十倍，市场良好的流动性和不断完善的期限结构以及监管当局对监管制度和交易制度的不断完善，这些良好的市场环境和政策为国债期货市场的稳定运行奠定了基础。

自我国国债期货市场重启后，市场运行平稳，发展迅速，2013年9月6日，经证监会批准5年期国债期货正式在中国金融期货交易所上市交易，紧随其后在2015年3月20日10 年期国债期货也重启交易。为适应市场的发展需求，2018年8月17日2年期国债期货成功上市交易。随着10年期、2年期国债期货的推出，我国国债期货市场的活跃程度、持仓规模、交割情况都较刚上市初期有了明显的进步。从2020年3月起国债期货市场投资者限制放宽，允许商业银行、保险机构资金进入国债期货市场，而商业银行是国债的主要承销商，涉及的体量巨大，所以这为国债期货市场注入大量的流动性，使得市场活跃度大幅增加，市场的有效性在逐渐增强，这使得在国债期货市场进行统计套利成为了可能。虽然随着市场的有效性不断提升简单明显的套利机会在不断地减少，但是伴随着计算机科技的高速发展，使得量化交易对数据的获取效率不断提高，对数据的处理时间逐步缩短，通过计算机进行套利机会的发现、下单交易，使在有效市场也能获利成为了可能。

总之，经过7年发展，我国国债期货市场逐渐成熟、交易机制不断完善、国债期货的产品线不断丰富，国债期货的市场规模和市场效率不断提升均为国债期货的跨品种套利创造了条件。

### 1.1.2 研究意义

套期保值者、投机者和套利者是期货市场的参与主体，其中套利者是市场的重要组成部分。一方面，因为套利者的存在对于完善国债期货的定价机制有很大的作用，使得国债期货的价格更合理更趋向于真实价格；另一方面对于增强国债期货市场流动性也有着重要作用。本文是基于统计套利原理来构建国债期货跨品种套利方案，以期为投资者提供合理的套利策略，这对于理论发展和实际应用均有一定的意义。

随着市场效率的不断提高，套利机会的寻找难度越来越大，一般价格的偏离只是瞬间，通过传统的人工寻找套利机会已经成为历史，越来越多的投资者将放眼于量化投资，通过计算机来寻找套利机会。本文将在现有的协整理论的基础上运用GARCH模型弥补恒定方差的缺陷，同时希望将投资的风险与收益考虑到策略中，一方面将策略的风险和收益进行分析，期望为投资者提供有借鉴意义的策略，另一方面丰富了国内对国债期货跨品种量化交易策略的研究。同时将充分利用计算机技术加速数据的处理，实现了对交易信号的快速识别，并且有效地克服人性贪婪和恐惧的弱点。

## 1.2 国内外文献综述

随着期货市场期货品种的不断增加和期货品种之间的相关性不断增大，跨品种套利的交易量在不断上升，对跨品种套利交易的关注程度也在不断增加，目前国内外对跨品种套利进行了大量的理论研究，并不断地在不同品种期货合约间进行了的跨品种套利的尝试。同时在套利方法上也在不断创新，不断寻找更合理的套利方法以及通过对交易阈值的选择寻求最优套利策略。基于本文的研究，将现有研究大体分为不同品种期货合约跨品种套利研究、跨品种套利方法和统计套利交易阈值研究三大类。

### 1.2.1 关于不同跨品种套利标的研究

1.商品期货跨品种套利

在对商品期货跨品种套利研究中最先开始研究的是存在上下游产业链关系的农产品期货的跨品种套利，随后开始了非农产品期货的跨品种套利。

在农产品领域，在国外Kenyon和Clay（1987）较早对豆粕和玉米的跨品种套利进行了研究，同时针对特定商品跨品种套利效果进行了比较，发现豆粕和玉米跨品种套利无论是交易平均收益还是风险上都好于生猪和饲料套利保值。Simon（1999）通过对芝加哥商品交易所大豆、豆粕、豆油期货价格数据进行协整检验等分析，研究发现期货价差存在长期均衡关系同时这种关系有很强的的季节性并且是短暂的，对此进行跨品种套利可以获利。Liu（2005）通过实证证明了生猪与玉米、豆粕价格之间的协整关系，同时发现三者之间存在获利的可能性，他发现可以通过套利交易管理敞口风险来减少利润波动、增加盈利性。在国内关于农产品期货的跨品种套利的研究较多，如胡宇璇（2016）通过对棕榈油期货和豆油期货进行研究，设计了商品期货跨品种套利交易策略，认为具有长期协整关系的商品期货之间存在跨品种套利机会。刘建和、梁仁方等人（2016）综合运用协整检验、误差修正模型(ECM)证明了我国大豆期货及豆粕和豆油期货三者价格之间存在长期均衡关系且三者进行跨商品套利可行，能够获得正向的套利收益率；同时通过设置不同的开平仓阈值得出了Elman神经网络模型较均值回归模型能够得到更好的套利结果的结论。

在非农产品领域，Ma和Soenen（1988）首次研究了贵金属跨品种套利交易，研究了黄金和白银期货之间的套利，通过对两期货价格之间的关系进行分析，发现两者价差变动活跃，且经常偏离均衡价差，而这种价差的偏离为套利提供了机会，但在考虑交易成本的情况下套利机会则明显减少。Emery和Lin(2002)通过对天然气期货与电力期货两个期货品种进行统计套利研究，发现这两个期货品种之间的价格存在着长期稳定均衡的关系，通过利用历史数据进行回测模拟交易，发现有套利机会存在。Kanamura，Rachev和Fabozzi( 2010)认为跨品种套利的期货品种首先要进行价格关系分析，他们对取暖油和天然气期货价格之间的关系进行研究，同时在建立套利模型时也考虑了期货价格的季节性特征、均值回复和高波动率等特点。贾瑞斌（2017）对能源化工产业链上的原材料与产成品之间进行了套利研究，发现甲醇与聚丙烯之间存在长期均衡关系，并进行了套利方案的设计。

2.股指期货跨品种套利

不管国内还是国外，在研究初期大多数文献都是对两种期货之间是否存在套利机会，即对跨品种套利可行性的分析研究，Bollerslev和Chance（1988）则第一次对基于价差套利的指数期货跨品种套利进行了研究，研究发现纽交所商品指数期货合约和标普500之间的价差存在长期稳定的关系，因而可以利用两指数期货价差是否偏离其均衡价差来寻找套利机会，实证证明了存在套利机会。Brenner（1989）通过对大阪股指50合约和日经平均指数期货合约之间的价差关系进行研究，研究发现两者之间实际价差偏离理论价差时存在跨品种套利机会。在国内因为股指期货上市较晚一些，

仅从两种期货合约的实际价差偏离均衡价差上来看很多跨品种套利交易是存在套利机会的，但考虑到交易成本时套利的收益可能会出现不能覆盖其交易成本的可能，如Butterworth和Holmes（1999）对英国富时100指数和英国富时250指数的期货合约进行了跨品种套利研究，通过对两期货价格之间的关系进行分析，发现两期货之间存在很多的套利机会，在不考虑交易成本的情况下可以获得利润，但是在考虑交易成本后套利结果并不令人满意，套利的收益不能覆盖其成本。Cummins和Bucca( 2011)则认为价差是决定套利交易机会的关键因素，而交易成本决定套利的可行性，可靠的套利模型要能够预测套利期货价格之间的基差变动，并预测交易机会，根据交易成本的变化做出及时调整。

3.国债期货跨品种套利

国外对国债期货的研究较早且大多数集中在对国债期货定价、国债期货套期保值及期现套利上的研究，Russell Poskitt（2002）利用交易日数据集研究了新西兰银行票据期货市场的定价和套利机会（Cornell，1979；Hegde、 Branch，1985），而对国债期货合约间的跨品种套利研究较少。

在国内，国债期货在1995年试点失败以后直到2013年才再次上市交易，这使得我国国债期货市场长期缺席，对国债期货套利的研究较少，在国债期货正式上市之前更多的是对重新推出国债期货的可行性、国债期货功能及定价等定性方面的研究。直到2012年中国金融期货交易所才推出国债期货的仿真交易，对国债期货的相关研究也慢慢增多，但由于受到市场上国债期货品种单一没有条件进行跨品种交易，更多研究的是国债期货期现套利和跨期套利，直到近些年以来国债期货市场的不断完善，国债期货品种的不断增多，为国债期货的跨品种套利创造了条件。

在现有的文献中对利用协整方法进行国债期货套利研究的文献较多，其中如杨威（2017）基于协整方法的统计套利策略原理，构建了10年期和5年期国债期货的跨品种交易策略，并设计了一套模拟交易系统。杨艳军和陈思岑（2018）则基于GARCH方法的统计套利策略，研究了我国5年期和10年期国债期货之间的跨品种套利关系，按照市场中性的假设采取1:1的套利比例，使用GARCH（1,1）模型设计基于时间序列异方差性的统计套利方案，但在交易信号的确定上使用经验方法给出5种可能的阈值，以2倍的开仓值来确定止损信号，然后选择未考虑交易成本下绝对收益最大的阈值。刘文文（2019）通过对5年期和10年期国债期货主力合约的1分钟收盘价数据进行分析的出两者之间存在很强的相关性，经过协整检验发现二者之间存在长期均衡关系，运用误差修正模型得出两个合约的配比，同时构建三机制的门限自回归模型得出门阈值，设置套利开仓信号、平仓信号和止损信号（设置的止损信号为3倍的标准差）。通过对运用该策略的套利效果进行检验发现，样本内数据的套利效果好于样本外数据的套利效果，但整体来说该策略的效果十分有效。

### 1.2.2 关于跨品种套利方法的研究

期货的跨品种套利是通过对两期货合约价格之间的关系进行分析，从而判断两者之间是否存在套利的机会。目前跨品种基本是利用统计套利原理进行套利研究的，随着计算机科技的广泛应用和不断进步，基于统计数据进行建模（如协整方法、GARCH方法、遗传算法、神经网络等）的方法不断涌现，并愈发受到学界与投资者的重视。

1.传统的价差、比例套利

运用两期货比例价差进行套利更多的应用在商品期货领域，最早期更多的是产业链上下游生产比例关系套利，如Tzang和Leuthold（1990）对大豆、豆粕和豆油期货之间的长期关系进行了研究，发现三者之间存在着长期关系，通过大豆在压榨过程中三者之间的比例建立了最优套保比例，开启了对大豆压榨套利的研究。JohnB．Mitchen(2007)通过对豆油期货和豆粕期货之间的价差进行统计分析，发现两者之间的价差始终在一定的区间内上下波动，而且随着时间的推移这一个均衡的区间也会发生相应的变化。

2.基于协整模型的套利

Engle和Granger（1987）指出若非平稳变量之间存在协整关系，则变量之间可以建立误差修正模型，为统计套利策略的研究提供了理论基础。利用协整模型进行套利研究是目前比较成熟的方法之一，首先对两期货价格序列进行平稳性检验和协整检验，分析两种期货合约价格之间的长期均衡关系，利用价差的均值回归特性，在价差偏离均衡价差是存在套利机会，以此理论进行套利。

Alexander和Dimitriu(2004)首次引入了协整模型，在建立传统的套利模型过程中对资产价格序列进行处理。通过对指数跟踪，发现将协整理论引入到传统套利模型中可以很好的促使整体的价差更加符合正态分布。Carol Alexander和 Anca Dimitriu(2005)对比了协整优化的统计套利方法和其他的统计套利方法，认为基于协整的统计套利的模型表现稳定，且属于市场中性策略，普遍优于其他统计套利方法。Jacobsen（2008）则在之前的研究基础上引入了误差修正模型，对协整模型进行了优化和改进，为统计套利策略的研究提供了新的指导方法。Caldeira和Moura（2013）基于协整模型，Miao（2014）基于两阶段的相关性协整模型，构建了统计套利策略，对统计套利策略进行了实证检验，研究结果表明能获取一定的收益。在国内较早利用协整模型进行两期货合约间的跨品种套利研究的如丁秀玲、华仁海（2007）研究了豆粕期货与大豆期货价差间的协整关系，发现两者之间存在长期稳定关系，通过回测发现利用协整模型建立套利策略可以获利。后来越来越多的学者在商品期货、金融期货、股票等市场进行了基于协整方法的统计套利研究。杨倩诗（2015）则通过对传统统计套利的改进,利用波动平稳的股票建立协整方程，进行统计套利发现，改进后的统计套利不仅提高了套利次数,而且使套利组合不局限于相关性最高的两只股票。

3.基于GARCH模型的套利

Bollerslev（1986）提出GRACH模型（广义自回归条件异方差模型），是在ARCH模型（自回归条件异方差模型）的基础上发展而来的。金融时间序列数据一般存在异方差性，且其方差在时间序列上存在着某种自相关性，这种特征称为“波动聚集”，ARCH和GARCH模型的出现正是为了解释线性模型无法解释的金融市场“波动聚集”的现象。

在国外更多的学者是将GARCH模型应用于风险的度量，也有少数学者将其应用于套利策略。Haigh和Holt（2002）通过利用普通最小二乘法、移动平均法和GARCH方法分别构建套利策略并进行套利效果比较，发现在不考虑交易成本的情况下，使用GARCH模型构建的套利策略的套利效果最好。Nikos S．Thomaidis(2006)将GARCH模型和神经网络模型相结合用来研究各股票之间的套利机会，通过GARCH模型得到时变方差，从而利用时变的条件标准差来设定开平仓点和止损点；通过神经网络模型来预测未来价格走势，来决定是否要改变目前的操作方向，再将两模型相结合能够不断的改变套利标准从而发现更多的套利机会。L.cui(2013)则基于统计套利的原理通过建立GARCH模型来研究两期货合约之间的套利，发现利用GARCH模型来分析短期价格之间的协整关系时表现效果不佳。作者通过一系列分析，引入T-GARCH模型，从而建立新的套利模型。研究发现，新模型能够建立比GARCH模型更稳定的交易信号，从而获得更稳定的交易号和更高的收益。

在国内，李世伟（2011）和何树红等（2013）考虑到方差的时变性，对协整套利模型进行了改进，引入了GARCH模型。周亮（2017）则利用铁矿石和螺纹钢期货合约60分钟价格数据，分别建立了协整模型和GARCH模型以确定两者价差关系进行套利，结果发现GARCH模型无论在胜率还是在收益率方面都要优于普通的协整模型。朱丽蓉等（2015）则将两期货存在的协整关系考虑到基于GARCH模型的套利策略构建中，研究发现，基于协整关系的 GARCH 模型在各种套利模型中是最为有效的。苗宇和朱家明（2019）则通过对沪深300与上证50股指期货收盘价数据进行检验并建立误差修正模型求得两者之间的套利比例，然后建立GARCH模型，计算出一条基于时变的标准差的线，基于这个标准差给出了以1倍的标准差作为套利模型的开仓标准，2倍的标准差作为止损标准的套利策略，发现其收益更高。而邹战勇、陈红纯和李星（2019）也通过对美国芝加哥商品交易所的大豆、玉米、小麦和大米期货的收盘价序列分别建立ARMA模型、ARCH模型与EGARCH模型对收益率的非对称性进行了研究，研究得出，国际大宗农产品期货价格存在波动非对称性，且对坏消息的敏感程度大于好消息的敏感程度。

4.其他套利方法

两种期货合约的价格之间并不一定总是协整线性的关系，这样基于协整理论的统计套利策略不能很好的进行套利，从而引入了神经网络模型，Dunis, Laws 和 Evans(2006)运用多层感知网络、递归神经网络和高阶神经网络等模型研究了 WTI原油期货和无铅汽油期货之间的套利交易，研究发现运用高阶神经网络模型构建的套利策略不管在数据的拟合优度还是在套利收益上都要好于其他两种神经网络模型。后来Christian L. Dunis等人（2008）研究了石油期货合约价差组合的建模和交易。在以前的研究基础上，还采用了一些交易过滤器来进一步改进模型的交易统计。

靳朝翔等（2016）在确定螺纹钢，铁矿石，焦炭期货之间具有协整关系后，利用BP神经网络模型和NAR动态神经网络模型来构建套利策略，通过回测发现：NAR 动态神经网络模型优于BP神经网络模型，能够获得更优的套利效果。张威波和胡艳英（2018）通过豆类期货合约5分钟高频数据，构建VAR模型脉冲效应分析、方差分解分析等方法发现我国豆类期货合约高频数据存在长期均衡关系，可以基于此进行套利。唐瑞波（2019）以螺纹钢、铁矿石和焦炭期货作为跨品种套利的研究对象，研究发现利用遗传算法优化Elman神经网络建立的策略比BP神经网络和Elman神经网络能够产生更高的年化收益率,且收益率在长期内保持了稳定增长。

### 1.2.3 统计套利交易阈值研究

目前对统计套利的研究除了在套利方法上不断深入研究更加精准的方法，而且在交易阈值上的研究也越来越多。早期很多交易策略阈值的取值更加偏向于经验值，如以0作为平仓值，0.75、1、1.5作为开仓值，2、2.5、3作为止损值等。而近些年来很多学者希望通过选择最优的阈值来寻求最优的套利策略，其中覃良文、唐国强、林静(2016)利用GARCH模型进行价差序列预警套利信号，通过穷举法历遍所有开平仓阈值来寻求标准残差套利的最优阈值和风险测度，建立最优套利方案。结果表明，以历史数据建立的最优套利方案对样本外数据进行套利，与传统利用标准正态分布置信水平确定阈值进行套利相比效果更好，其收益和套利成功率均更高，在最优阈值套利方案中量化了风险值。周亮（2017）则在设计铁矿石、螺纹钢以及焦炭期货跨品种套利策略时，引入统计套利期望函数，以套利期望收益函数能取到最大值为目标对开仓阈值进行取值，发现当开仓阈值取1时，样本内外均有不错的收益。邢知、郝继升（2018）考虑了收益—风险综合管理，从基于协整—GARCH模型的统计套利策略出发，以单位风险下期望收益最大化为优化目标对统计套利模型下的沪深300股指期货与现货的交易阈值进行了研究，使用MATLAB2016软件进行了Mote Carlo模拟，从而确定建仓阈值和止损阈值。还有一些文献累计收益最大化（方军、李星野，2019）、绝对收益最大化等为目标来进行交易阈值的求解，从而设计出最优的套利策略。

### 1.2.4 文献评述

从文献中总结出以下三点：第一，利用统计套利的思想建立GARCH模型来进行期货套利的效果要比协整模型套利的效果更优，其可以改变恒定方差的缺陷，使得套利结果更优。第二，相对于其他期货的跨品种套利国债的跨品种套利研究较少，同时在现有的国债期货的套利研究中相比于其他方法，GARCH方法的运用更少。第三，在套利区间设计上，现有文献中大多学者在设计套利策略时运用了经验阈值，或以收益最大化寻求最优交易信号，但是在现有的期货套利的文献中很少有学者将套利收益最优问题、收益与所承受的风险之间关系问题，两者同时考虑到套利策略的设计中。

在以前学者研究的基础上，本文考虑到两种期货合约套利比例对套利效果的影响，本文将根据两期货之间的协整关系来确定其套利比例，对按照市场中性假设的以1:1比例套利的策略进行改进，因此本文通过对国债期货之间的价差建立

AR-GARCH模型，然后对国债期货跨品种套利策略进行研究，并试图将风险控制加入策略的构建之中，根据经验阈值来确定止损信号，在设计开平仓信号是考虑到收益与风险之间的关系，以夏普比率最大化为目标确定开平仓交易信号从而设计最优国债期货跨品种套利策略。

## 1.3 论文研究内容及方法

### 1.3.1 论文研究内容

本文共分为五个部分，具体安排如下：

第一部分介绍研究背景及研究意义，对国内外不同品种期货合约跨品种套利研究、跨品种套利方法和统计套利交易阈值研究的文献进行归纳和总结，得出本文的研究方向及思路。

第二部分介绍跨品种套利交易的理论基础，主要分析了跨品种套利的统计套利策略及其涉及的相关模型，说明了套利交易原则。

第三部分为期货套利交易发展现状的分析，主要对套利交易发展现状与问题、国债期货及其目前的套利现状和发展趋势进行分析。

第四部分为跨品种套利策略设计及评估，首先对确定的交易对象的数据进行处理以及检验，根据两种期货合约之间的协整关系来确定套利比例以及价差序列，建立国债期货跨品种套利模型得到时变方差序列；然后根据两种期货合约价差偏离其均衡价差一定倍数的标准差设定交易信号和止损信号，建立套利策略。在交易信号的确定上，利用之前学者研究的经验阈值来确定止损值，同时以夏普比率最大化为目标利用穷举法寻求最优对称开平仓阈值和非对称交易阈值，然后确定国债期货具体的最优套利方案。

第五部分通过样本外数据测试评估和分析策略套利效果以及对该策略套利的收益进行比较分析，然后对该策略进行总结。

### 1.3.2 论文研究方法

1.文献研究法，通过查阅国内外套利相关的文献，对期货套利的理论得到了进一步的认识，通过对现有的跨品种套利策略进行研究，了解了当前跨品种套利最新的研究动向以及较好的套利策略，为本文的套利方案的设计提供了理论依据。

2.计量模型分析法，在套利方案设计中利用Eviews软件对两种国债期货样本内的价格序列分别进行平稳性检验、协整检验；在存在长期协整关系的基础上，以两期货长期协整关系式计算价差序列，然后对去中心化后的价差序列进行自相关性及ARCH检验，然后建立AR-GARCH模型。

3.理论与实证相结合的方法，在国债期货与量化投资的现状与发展层面结合国债期货套利所需用到的相关理论为基础，建立了两种不同的量化交易方案并进行实证研究，并对研究结果作出收益的比较分析与总结。

4.对比分析法，在交易信号的确定中利用对比分析，使用穷举法历遍寻求所有的止损阈值、开仓阈值，将不同止损、开平仓阈值下的夏普比率进行对比分析，得出最优开平仓阈值；在套利结果分析中，对样本内外数据的套利效果进行对比分析，运用对比分析验证该方案的有效性及该策略的可行性。

## 1.4 论文可能的创新及不足

1.本文的可能创新总结为以下三点：

（1）在现有的文献中虽然很多学者引入了GARCH模型弥补了方差恒定的缺陷，同时又设定了止损阈值来控制风险，但是没有考虑收益与风险之间的关系，本文将从夏普比率最大化的角度倒推交易策略，一方面考虑了单位风险下获得的收益，另一方面以夏普比率最大化为目标通过对开仓阈值参数进行调试以挑选最优的参数组合，改进了经验值的缺陷。

（2）在交易信号的设计上将对称交易信号的策略与非对称交易信号的策略进行比较，发现非对称交易信号的策略要更优。

（3）国内对利用GARCH模型进行国债期货跨品种套利的研究较少，本文利用两种期货合约价格间的长期稳定关系得出最佳套利组合比例，对原有的套利模型进行了改进，选择更合适的模型来设计我国国债期货市场的跨品种套利策略。

2.本文的不足

（1）本文是利用两种期货之间长期均衡关系来建立协整模型，从而确定价差序列，然而很多交易品种理论上存在长期均衡关系，但不一定能通过协整检验，故本文对套利品种之间的关系条件要求严格，策略存在一定的局限性。

（2）本文使用的AR-GARCH模型对价差的波动预测时间过长可能存在预测无效的情况，故需要对策略进行定期更新。

# 2 期货跨品种套利的理论基础

本文是基于统计套利原理的跨品种套利策略，而统计套利是经典的量化投资策略之一，在对冲基金公司中应用广泛，该类型策略的主要特点有：（1）主要的方法为统计方法；（2）统计套利一般都是程序化交易；（3）追求市场中性；（4）交易高频率。统计套利策略一般包括配对交易策略、均值回归策略、主成分分析法和协整策略。配对交易策略是一种市场中性策略，是指通过对历史股价走势相近的股票进行配对，在配对股票之间的价差偏离历史均值时，做空股价较高的股票同时买入股价较低的股票，当股价回归到长期均衡关系时进行反向操作，从而赚取两种股票价格收敛的报酬。均值回归策略是利用股票价格无论高于或低于均值都会以很高的概率向均值回归，因此在价格偏离均值时买入或卖出股票，在价格回归到均值时反向操作，从中赚取差价的套利策略。主成分分析法是利用主成分分析确定股票池的主成分变量，以此来建立套利策略。本文是基于统计套利原理的国债期货跨品种套利，在此就与本文套利策略相关的协整策略进行详细阐述。

## 2.1 基于协整模型的跨品种统计套利

在跨品种套利中首先选择两个相关性较强的期货合约，其价格序列具有一定的相关性，然后判断两者之间的关系从长远来看是否稳定，若依旧稳定，则说明两中期货合约价格序列之间具有协整关系。即使短期内价差偏离这种均衡关系时，长期也将回复到合理价差区间。

1.相关性分析

一般来说，不同期货品种之间相关性越高，其反映在其价格上就会使得同涨同跌的趋势现象越明显，通过对冲操作可以对分析进行对冲，从而出现套利机会的可能性越大。两种期货X、Y的相关程度可以用相关系数r来衡量，如下式（2.1）

 （2.1）

相关系数r取值在-1到1之间，其中-1表示两者之间完全负相关，且变动方向相反；1表示两者之间完全正相关，变动方向一致。则|r|在0到1之间，|r|越大说明两者之间的相关性越大，X、Y越相关，|r|越靠近0说明两者之间的相关性越小，越不相关。

2.基于协整模型的套利设计

在判断两期货价格之间存在较强的相关性后，首先对两种期货价格序列进行平稳性检验，然而金融时间序列的一个显著的特点就是其序列通常不平稳，许多时候建模通常采用差分的方式消除这种非平稳的趋势。但是，这种方法限制了许多经济金融问题的探讨，消除了序列中的一些特征。故Engle和Granger在20世纪80年代提出了协整理论，建立了非平稳序列模型的方法，认为一些非平稳时间序列的变量通过线性组合可能形成平稳的时间序列，说明几个变量之间存在着长期稳定的均衡关系。短期受到多种因素的干扰，序列可能偏离均值，但是随着时间的推移，偏离会逐渐消失，回到均衡状态。故判断两者之间是否存在长期的均衡关系，即进行协整检验。

判断变量之间是否存在协整关系的检验方法有多种，但是首先要确定的一定是变量之间在理论上存在着联系，在理论上可能存在着长期均衡关系。具备了理论支撑后才可以对其之间的协整关系进行检验，可以通过常用的方法EG检验，主要通过对变量线性组合后的回归方程的残差进行单位根检验来检验变量之间的协整关系。当变量之间存在协整关系时，线性组合的回归方程能够解释二者之间的关系，对于被解释变量其存在的不能被解释变量所解释的部分就构成了残差序列，该序列应该是平稳的。因此，检验变量之间的协整关系就可以变成检验该残差序列是否是平稳序列。

若两变量时间序列之间存在协整关系，则说明两变量之间存在长期均衡关系，短期受到多种因素的干扰，序列可能偏离均值，但是随着时间的推移，偏离会逐渐消失，回到均衡状态。因此可以利用均值回归的特性进行套利，当两种期货的价格的时间序列偏离长期均衡关系的均值时，对两种期货进行买入价格较低的期货同时卖出价格较高的期货，在价格回归时做反向操作，从而实现了套利。

## 2.2 期货价格及其波动的度量模型

两种期货之间的套利是利用两种期货价格之间具有较强的相关性，根据两种期货价格之差偏离均衡价差的程度确定套利区间从而进行套利策略设计，因此本文核心是利用价差序列的波动性来进行套利，当价差的波动超过某一指标时开启价差的交易，即买入一种国债期货同时卖出另一种国债期货。在这个套利的过程除了对价差波动率的度量外，最基础的参数为套利比率、套利区间设计。

### 2.2.1 期货价格及其波动的度量

例如期货A其价格序列为和期货B其价格序列为,两种期货价格具有较强相关性且价格序列在理论上存在长期均衡关系，且检验通过，其协整模型为：，其均值是Average=，价差为e=||=||,去中心化价差为。在金融时间序列数据波动性的衡量中，一般利用方差来衡量波动性，因此在本文中方差来衡量价差e的波动性。Peter R 和Asger（2005）通过使用6种不同的函数对样本内样本外进行评估，对比GARCH（1,1）和其他GARCH 类波动率模型预测后一天条件方差的能力，验证了复杂的波动率模型并不比简约的 GARCH（1,1）模型能更好地描述金融时间序列，且在IBM收益分析中表现得更加优异，复杂模型的优势在于更全面的考虑了模型中的不确定因素，没有使用概率不等式，这样通常容易导致保守预测，故此一般使用GARCH(1,1)就可以表示所有信息。

### 2.2.2 AR模型

时间序列模型一般包括自回归模型（AR）、移动平均模型（MA）、自回归移动平均模型（ARMA）和积分自回归移动平均模型（ARIMA）四种。如果随机模型中的变量仅受其滞后项和服从白噪声过程的随机扰动项的影响，则称这种模型为自回归模型（AR），如一阶自回归模型，记为 AR（1）。q 阶自回归模型，记作 AR（q），可用下式表示：  （2.2）

其中为自回归参数，随机扰动项服从均值为 0、方差为的正态分布，且是相互独立的白噪声序列。

### 2.2.3 GARCH模型

在很多情况下，时间序列的波动存在着一种集聚性现象，即在某一段时间范围内价格波动剧烈，在下一个时间段波动平缓。这种情况下的时间序列大多存在异方差性，即使得方差并不为常数，当期的价格条件方差受上一期的方差值的影响。GARCH模型能够精准的刻画出随时间变化的条件异方差，并且拟合度高、预测效果较好。GARCH（1,1）模型假定方程依赖于其滞后值（）和残差平方的滞后值（），GARCH（1,1）模型由下式描述。

均值方程： （2.3）

条件方差方程： （2.4）

且<0,由上式（2.3）可知当期的方差依赖于三个因素：常数项、ARCH项、前一期的预测方差（GARCH项）。对时间序列{}拟合GARCH模型时，要求序列{}是均值为0，纯随机的异方差序列。如果回归方程不能充分发掘原始时间序列的信息，则说明序列{}有可能存在自相关，不是纯随机的过程。

因此本文在对去中心化价差序列{}建模前，首先要对{}进行自回归检验，判断自回归的阶数，建立AR模型，再判断自回归方程的扰动项序列是否存在异方差，如果扰动项存在异方差，则可以用GARCH模型拟合，这样建立的模型为AR-GARCH模型。

统计套利策略的中心思想主要是利用价差的均值回复特性，而GARCH模型能较好的刻画价差序列扰动项的波动情况，因此，本文基于统计套利的假设以及均值回复性，研究两种国债期货价格之间的相关性以及价差序列的均值回复性，同时在此基础上运用AR-GARCH模型建模，来刻画价差序列的波动，将计量模型与跨品种套利策略相结合，以此来研究两种国债期货价格之间的关系以及基于AR-GARCH模型的国债期货跨品种套利策略在我国金融市场上的适用性以及对策略结果进行统计分析和策略的有效性进行分析。

## 2.3 交易原则

根据统计套利原理，若两种期货价格之间有长期的稳定关系，那么即使价差出现了短暂的偏离均衡价差，但在长期价差在大概率下是向均衡价差收敛的，因此可以利用价差偏离一定程度的均衡价差进行套利。而价差偏离程度即波动程度可以用方差来表示，因此可以利用价差与标准差之间的关系进行套利策略的研究。套利交易原则如下：

当价差偏离均衡价差，且大于均衡价差时，若偏离程度超过n倍的标准差，进行反向套利，即做空价差。

当价差偏离均衡价差，且小于均衡价差时，若偏离程度超过-n倍的标准差，进行正向套利，即做多价差。

# 3 期货的套利交易现状

随着市场的不断发展以及投资者对金融产品、金融知识的深入研究，使得投资者对资金的应用效率、回报、风险有了更加精细的研究，故对金融产品的交易研究也在不断增多。最早更多的是商品期货与现货间的套利，投资者利用期货来回避现货的价格波动，从而达到套期保值的作用。随着市场逐渐的成熟出现了套利者、投机者利用金融产品现货与期货价格之间的关系、同一金融产品不同期限期限价格之间存在的关系、同一金融产品在不同市场上的价格关系以及存在较大相关性金融产品价格之间的关系进行套利交易、投机交易。本文主要研究的国债期货的套利策略，以下是对国内套利现状以及国债期货套利的简单阐述。

## 3.1 套利交易发展现状

1. 套利交易发展现状

套利策略是投资者在金融市场上利用一些金融产品的收益率与其价格的短期性的不一致从而获取收益的策略。一般可以利用套利策略消除系统性风险，获得无风险或低风险收益，套利策略的类型主要包括期现套利、跨期套利、跨市场套利、跨品种套利。当资产价格以某种形式发生偏差时，套利策略发现机会并赚取价差。套利策略通过一次次的微小利润，实现收益的稳定增长，是一种低风险、中等收益的策略。套利策略都是基于量化模型的，也是程序化交易运用最广泛的领域，因为无论是发现机会还是执行交易计算机都能发挥优势。期货套利一般是同时持有两个相反方向的期货合约，使得同时影响两个期货合约价格的共同因素被抵消，只保留单独影响不同期货合约价格的因素，而这部分因素的数量较少。假设某个投资者不能对宏观经济变化、重点行业变化和现货市场情绪等因素很好把握，那么在价格交易中，该投资者很难实现盈利，但在套利交易中，由于共同的影响因素被对冲掉了，可能实现稳定获利。

早在欧美资本市场套利交易盛极一时，创造了辉煌的投资业绩，但在国内由于缺乏做空机制使得套利交易受到阻碍，截至目前套利规模最大的前十种套利品种仍然是商品期货的套利，然而商品期货套利的相关法规政策也相对更加完善。在融资融券、股指期货和国债期货推出以后，这一局面得到了缓解，各大券商和其他资产管理机构对套利交易展开了深度的研究，套利交易在国内市场如火如荼地发展起来了，除商品期货套利外在国内运用得比较广泛的是股指期货套利、分级基金套利、ETF套利等，在2014-2015年套利被投资者狂热追捧，但在股灾之后，随着一些对股指期货限制政策的出台，股指期货的套利受到限制，套利成本增加，套利空间缩小，在2020年年末股指期货套利的日平均成交量仅在1万手左右，与商品期货的套利规模相差甚远。由于国债期货上市晚，近几年来交易品种才在不断增多，故套利规模小于股指期货套利规模。

2.国内套利市场环境存在的问题

（1）中国衍生品的流动性比较差，市场的有效性比较弱，市场价格的反应不足，因此理论的套利区间与实际脱节，存在价格不合理且长时间偏离的情况，从而影响套利交易的进行。

（2）交易成本比较高。目前的交易成本还是偏高，包括现在的保证金，以及交易的手续费。在四家期货交易所中只有大连商品交易所制定套利交易的保证金比率以及手续费率，且套利交易的手续费低于单边交易的手续费率，但是其他期货交易所对于套利交易的手续费与单边交易的手续费相同，且在股灾之后，中金所出台了三大政策，对股指期货的日内开仓量、保证金、平今仓交易手续费进行了限制。这些政策的实施使得套利受到限制，套利成本增加，套利空间缩小，可能存在套利收益被高额的成本抵消，其不利于市场的发展。中金所上市的金融期货交易成本如下表3.1：

表3.1 金融期货交易成本

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 最低交易保证金 | 多头合约保证金标准 | 空头合约保证金标准 | 交易手续费 | 平今仓收取率 |
| 沪深300股指期货 | 8% | 12% | 12% | 万分之0.23 | 1500% |
| 中证500股指期货 | 8% | 14% | 14% | 万分之0.23 | 1500% |
| 上证50股指期货 | 8% | 12% | 12% | 万分之0.23 | 1500% |
| 2年期国债期货 | 0.50% | 1% | 1% | 3元/手 | 0 |
| 5年期国债期货 | 1% | 2% | 2% | 3元/手 | 0 |
| 10年期国债期货 | 2% | 3% | 3% | 3元/手 | 0 |

数据来源：中金所官网

根据上文对我国套利交易现状以及套利市场存在问题的分析，发现进行国债期货高频套利是势在必行的，相较于股指期货国债期货的交易成本较低，且属于高速发展阶段，市场虽然不完善但套利机会也较多，同时套利交易也会促进市场效率，使得国债期货市场不断完善，故本文选择国债期货市场。

## 3.2 国债期货套利在我国的发展与现状

自从1995年结束国债期货试点以来，中国经济一直保持着快速发展的势头，在这个过程中社会主义市场经济体系在慢慢健全和完善，同时金融改革也初步取得了一定的成效。经过18年的发展和充分准备，中国开展国债期货试点交易的条件已经初步构建了起来。自2013年9月5年期国债期货上市以来我国的国债期货市场在不断的完善，可交易的国债期货的品种也在不断的增多，目前我国国债期货市场有2年期国债期货合约、5年期国债期货合约以及10年期国债期货合约，目前中国金融期货市场所推出的三类国债期货品种的具体合约表如下：

表3.2 三类国债期货合约表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 品种 | 2年期国债期货合约表 | 5年期国债期货合约表 | 10年期国债期货合约表 |
| 合约标的 | 面值为200万元人民币、票面利率为3%的名义中短期国债 | 面值为100万元人民币、票面利率为3%的名义中期国债 | 面值为100万元人民币、票面利率为3%的名义长期国债 |
| 可交割国债 | 发行期限不高于5年，合约到期月份首日剩余期限为1.5-2.25年的记账式附息国债 | 合约到期月份首日剩余期限为4-5.25年的记账式附息国债 | 合约到期月份首日剩余期限为6.5-10.25年的记账式附息国债 |
| 报价方式 | 百元净价报价 | 百元净价报价 | 百元净价报价 |
| 最小变动价位 | 0.005元 | 0.005元 | 0.005元 |
| 合约月份 | 最近的3个季月（3月、6月、9月、12月中的最近3个月循环） | 最近的3个季月（3月、6月、9月、12月中的最近3个月循环） | 最近的3个季月（3月、6月、9月、12月中的最近3个月循环） |
| 交易时间 | 09:30-11:30，13:00-15:15 | 09:30-11:30，13:00-15:15 | 09:30-11:30，13:00-15:15 |
| 最后交易日交易时间 | 09:30-11:30 | 09:30-11:30 | 09:30-11:30 |
| 每日价格最大波动限制 | 上一交易日结算价的±0.5% | 上一交易日结算价的±1.2% | 上一交易日结算价的±2% |
| 最低交易保证金 | 合约价值的0.5% | 合约价值的1% | 合约价值的2% |
| 最后交易日 | 合约到期月份的第二个星期五 | 合约到期月份的第二个星期五 | 合约到期月份的第二个星期五 |
| 最后交割日 | 最后交易日后的第三个交易日 | 最后交易日后的第三个交易日 | 最后交易日后的第三个交易日 |
| 交割方式 | 实物交割 | 实物交割 | 实物交割 |
| 交易代码 | TS | TF | T |

数据来源：中金所官网

从成交量进行分析，自国债期货重新上市以来，三种国债期货的成交量在不断的上涨，其中10年期国债期货的成交量最大，从2016年11月至今平均日成交量总体大于10000手，2年期和5年期的国债期货成交量也逐渐增加。然而大额成交量保证了国债期货交易的正常进行，同时提高了市场的运行效率，使得投资者想买时有人卖，想卖时有人买，这为投资者在国债期货市场进行投资交易提供了流动性保障，也降低了套利交易中发生的冲击成本，这为国债期货的投资者提供了投机、套利以及套期保值的机会。在2020年2月经批准商业银行和保险公司允许进入国债期货市场，一方面增加了国债期货的流动性，提高了市场的效率；另一方面对国债期货的套利策略的需求也在不断的增加，市场有效性的提高使得简单的套利机会基本不复存在，套利机会也是稍纵即逝，故此应该寻求更加精准更加快速的套利策略。

随着我国国债期货市场交易规模的不断扩大，交易品种也在不断地推陈出新，国债期货套利交易量也有大幅度的提高。目前我国国债期货的套利交易主要类型包括期现套利、跨期套利、跨品种套利，由于我国的政策原因，只有中金所能交易国债期货，所以在国债套利中不存在跨市场套利。目前存在的热门的国债期货套利有10种，7种跨品种套利即2\*TS-TF、TF-T、2\*TF-T、2\*TS-T、4\*TS-T、2\*TS-3\*TF+T、4\*TS-4\*TF+T，其中后2中为蝶式价差套利，日均成交量、持仓量规模最大的两种套利为TF-T、2\*TF-T的套利，两种套利策略的日均成交量均达到了2.16万手，持仓量为57228手；3种跨期套利即三种国债期货的主力合约与次主力合约进行的套利，跨期套利的规模远远小于跨品套利的规模。

在2020年12月底交易规模排名前十的期货公司有上海东证、国泰君安、中信期货、华泰期货、海通期货、宝城期货、申银万国、国金期货、国投安信、国信期货，然而华泰期货等期货公司在对国债期货跨品种套利的运用以及研究上，利用国债期货是利率期货的本质，从国债现货市场上不同债券之间的利差上发现两种债券存在套利机会，而由于期货市场是现货市场未来价格，同时期货市场比现货市场更加有效，故现货市场的套利机会可能在期货市场也存在，因此期货公司根据两现货间的到期收益率之差偏离均衡利差的幅度确定套利区间，将现货市场发现的套利机会运用在期货市场进行两期货品种间的套利交易。

# 4 国债期货跨品种套利策略的设计

本文是利用统计套利原理对国债期货跨品种套利策略的研究，在对套利策略进行确定时，首先利用不同国债期货之间的相关性的强弱确定本次套利交易的对象以及交易时间段，然后对所选择的交易对象进行检验，即对两种国债期货进行平稳性检验以及协整检验，根据两种国债期货价格之间的协整关系来确定套利组合的比例，再对其两种期货合约价格之差进行分析，得出其价差的标准差序列，根据价差偏离均衡价差的程度即价差偏离均衡价差一定倍数的标准差确定套利交易的开仓信号以及平仓信号。而在开仓信号与平仓信号的设计上本文选择对称阈值与非对称阈值两种方式的交易信号，对套利结果进行比较确定最终的套利策略，具体套利策略的设计如下文所述。

## 4.1套利交易对象选择

目前，我国国债期货市场上市交易的有2年期国债期货、5年期国债期货、10年期国债期货，三种国债期货交易代码分别为TS、TF、T。本文要进行国债期货的跨品种套利策略设计，首先根据跨品种套利标的之间必须具有较强相关性的要求需要对三种国债期货价格之间的相关性进行分析，不同期货品种之间相关性越高，反映在其价格上就会使得同涨同跌的趋势现象越明显，从而出现套利机会的可能性越大。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | T | TF | TS |
| T | 1 | 0.956663 | 0.937738 |
| TF | 0.956663 | 1 | 0.994421 |
| TS | 0.937738 | 0.994421 | 1 |

表4.1 不同国债期货之间相关系数表

数据来源：根据Eviews软件整理而得

根据三种国债期货两两之间的相关系数表4.1可以看出国债期货价格之间的相关系数均大于0.9，故存在较强的相关关系，但5年期国债期货价格TF与10年期国债期货价格T之间的相关系数0.956663小于5年期国债期货价格TF与2年期国债期货价格TS之间的相关系数0.994421。相关性越大，出现套利机会的可能性越大，故应该选择2年期国债期货与5年期国债期货为套利对象。同时在现有的文献中对5年期国债期货与10年期国债期货的研究相对于2年期的研究较多，本着对套利策略不断创新和完善，对套利品种不断丰富的目的，对国债期货跨品种之间是否存在套利机会以及可能的套利策略进行了检验。再加之根据之前学者的研究发现在期货上市初期由于市场的不完善以及效率比较低使得套利的可能性以及机会更大一些。从而本文在国债期货跨品种套利策略的设计中选择2年期国债期货与5年期国债期货作为套利对象。因为在本文策略所交易的规模较小，所以对于2年期国债期货相对于10年期国债期货的成交量和持有量偏低这一点可以忽略。

## 4.2 数据选择及检验

期货合约与股票不同，股票一般具有无限存续期，而期货合约存续期是有限的，有具体的到期日和交割日，当然国债期货合约也有期限的限制。在进行建模以及策略设计前需选择样本内数据并进行检验。

### 4.2.1数据选择

在现有研究中一般是对主力连续合约收盘价进行研究，而主力连续合约只能用于分析不能进行实际交易，故基于策略的实用性，本文选取同年同期的两种国债期货合约进行跨品种套利研究，即2年期国债期货合约中的TS2009和5年期国债期货合约中的TF2009，合约上市日期是2019年12月16日，最后交易日是2020年9月11日。对于数据频率大部分文献选择1分钟、5分钟收盘价，根据张玉希（2018）研究表明在套利操作时，选择高频数据获利的可能性更大，获利更多。但由于在万得数据库中1分钟数据缺失值较多存在不连续性，会对研究有影响，故此本文选择的是TS2009合约与TF2009合约的3分钟收盘价数据。

通过对交易冲击成本以及样本量的考虑，为了使得交易能够有效进行剔除了交易不活跃的时间数据。安麒溢（2017）也验证发现国债期货在刚入市交易的几天中的价格与即将交割时的价格波动往往会非常大，两个期货价格序列之间的价差波动也会非常大，一般也不存在着均衡关系，更不存在协整关系。再根据合约的成交量进行分析，要确保交易能够顺利进行，避免有价无市。因此本文选取2020年4月29日到2020年7月24日作为样本内时间段，样本内数据共5195对；2020年7月27日到2020年8月20日作为样本外时间段，样本外数据共1615对。用TS代表TS2009合约3分钟收盘价序列，用TF代表TF2009合约的3分钟收盘价序列，本文数据来源于万得数据库。

### 4.2.2 样本内数据检验



图4.1 样本期内TF合约与TS合约3分钟收盘价走势

根据上文分析两种国债期货具有较强的相关性，且从图4.1看出其价格序列走势呈现出相同的规律存在长期稳定的关系，故可能存在协整关系，因此在建模前需要对两种国债期货之间的协整关系进行检验。

1.平稳性检验

通常金融序列是非平稳的，虽然两变量之间具有很高的线性相关系数但有可能是因为在某时间段内同步下跌或同步上涨所致，并不一定具有长期均衡关系，即存在伪回归。因此在确定2年期国债期货与5年期国债期货是否存在协整关系之前，需要证实它们的时间序列是同阶单整的。

本文使用ADF单位根检验对2年期国债期货价格序列TS、5年期国债期货价格序列TF平稳性进行检验。

表4.2 原时间序列ADF单位根检验

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | T统计量 | 1%临界值 | 5%临界值 | 10%临界值 | P值 | 结论 |
| TS | -1.924773 | -3.431428 | -2.861901 | -2.567005 | 0.3210 | 非平稳 |
| TF | -1.986491 | -3.431428 | -2.861901 | -2.567005 | 0.2930 | 非平稳 |
| D (TS) | -73.04149 | -3.431428 | -2.861901 | -2.567005 | 0.0001 | 平稳 |
| D (TF) | -71.59718 | -3.431428 | -2.861901 | -2.567005 | 0.0001 | 平稳 |

数据来源：根据Eviews软件整理而得

从表4.2以看出，2年期国债期货和5年期国债期货合约的高频数据的原序列数据进行ADF检验后，T统计量都大于临界值，说明两个序列的T统计量在1%、5%、10%的显著性水平下不显著，且P值明显不等于0，故不能拒绝原假设，即两个时间序列存在单位根，是非平稳的。在对原序列进行一阶差分之后再次进行ADF检验，发现不管在任何显著性水平下其T统计量都远远小于临界值的，且P值接近0，故拒绝原假设，即2年期国债期货和5年期国债期货一阶差分序列不存在单位根，是平稳的。因此TS、TF两时间序列为一阶单整序列。

2.协整检验

在确定2年期国债期货和5年期国债期货价格序列均为一阶单整序列，后还需要对两种期货之间的协整关系进行检验，采用EG两步法对TS和TF合约进行协整关系检验，设解释变量为TF,被解释变量为TS。第一步，对两个单整的变量进行OLS回归估计，得到残差序列；第二步，对残差序列进行平稳性检验。

表4.3 OLS回归结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 变量 | 系数 | T统计量 | P值 |
| C | 53.49391 | 672.9425 | 0.0000 |
| TF | 0.469298 | 601.8751 | 0.0000 |
| =0.985867 | | 调整后=0.985865 | |
| F统计量=362253.6 | | P值=0.0000 | |

数据来源：根据Eviews软件整理而得

根据OLS回归得到残差序列，对残差序列进行平稳性检验，检验结果如下表4.4：

表4.4 残差序列平稳性检验结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| T统计量 | 1%临界值 | 5%临界值 | 10%临界值 | P值 |
| -3.422283 | -3.431428 | -2.861901 | -2.567005 | 0.0103 |

数据来源：根据Eviews软件整理而得

残差序列的T统计量的值-3.422283，小于5%显著性水平下临界值，故在5%的显著性水平下通过了平稳性检验，残差序列平稳说明TS和TF合约之间存在协整关系,因此TS和TF合约可能存在套利机会，可以进行下一步的分析与设计。

### 4.2.3 构建协整模型确定套利组合

根据表4.4的回归结果可得TS和TF合约之间的回归方程如下：

 = 53.49391 + 0.469298\* +  （4.1）

由回归结果可知，其变量所对应的P值均为0，各变量的系数显著不为0，同时调整拟合优度为0.985865，说明TS和TF的协整关系拟合较好，因为TS和TF合约价格之间存在长期的均衡关系，经过检验其关系式如（4.1）式，故在跨品种套利时可以以此来确定两种期货套利组合的比例情况。可以将套利比例确定为1:0.469298，由于每一个期货合约的最少买卖数量为1手，故将套利组合确定为10:5，如买入10手的TS合约，同时卖出5手的TF合约。

## 4.3 [2年期和5年期国债期货价差](#_Toc10103)分析

本文是对2年期国债期货和5年期国债期货进行套利，本质是利用两种期货之间价格关系，即两种国债期货价差存在长期均衡关系，当价差偏离均衡价差时存在套利机会，因为价差在很大概率下是会收敛于均衡价差的，因此需要对两种期货合约之间的价差进行分析。

### 4.3.1 价差序列分析

两种期货之间的价差序列是利用两资产长期均衡关系的得出的按照1：0.469298进行组合之后得出的差值，根据上文TS和TF合约之间的回归方程式可以推导出两种期货的价差序列，价差序列用表示：

= -0.469298\* （4.2）

根据上式（4.1）与（4.2）可知= 53.49391+，其中价差序列的均值用Average()表示：

Average()= 53.49391 + Average() （4.3）

又因为残差序列的均值Average()接近于0，故将其视为0，则价差序列均值Average()=53.49391。对价差序列进行去中心化处理得到的去中心化后的价差序列为上文中协整方程的残差序列。



图4.2 残差序列的描述性统计

根据图4.2对残差序列进行描述性统计分析，发现残差序列主要集中在[-1.5,1.5]之间。中位数为 -0.003177，均值接近于0，标准差为 0.059707，并且呈右偏分布，Jarque-Bera 值为26.77226，P值为0，拒绝残差序列服从正态分布的原假设，说明残差序列不服从正态分布。

### 4.3.2自相关性检验



图4.3 残差序列的走势图

图4.3为残差序列（去中心化价差序列）的走势图。从残差序列走势图可以看出残差序列在0附近波动，同时发现两种国债期货的价格差波动时大时小，即当前的波动受到前一期波动的影响，意味着价差序列存在异方差性，因此残差序列的方差并不是恒定不变的，具有时变方差特点，故在接下来要对价差的方差波动性进行进一步的分析。

1）自相性检验

利用Eviews软件进行自相关检验，判断残差序列是否存在自相关性。

表4.5 残差序列自相关检验

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
| Autocorrelation | Partial Correlation |  | AC | PAC | Q-Stat | Prob |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
| |\*\*\*\*\*\*\* | |\*\*\*\*\*\*\* | 1 | 0.991 | 0.991 | 5103.3 | 0.000 |
| |\*\*\*\*\*\*\* | |\* | | 2 | 0.985 | 0.183 | 10149. | 0.000 |
| |\*\*\*\*\*\*\* | |\* | | 3 | 0.980 | 0.076 | 15144. | 0.000 |
| |\*\*\*\*\*\*\* | | | | 4 | 0.975 | 0.039 | 20094. | 0.000 |
| |\*\*\*\*\*\*\* | | | | 5 | 0.971 | 0.032 | 25000. | 0.000 |
| |\*\*\*\*\*\*\* | | | | 6 | 0.967 | 0.013 | 29864. | 0.000 |
| |\*\*\*\*\*\*\* | | | | 7 | 0.963 | 0.011 | 34686. | 0.000 |
| |\*\*\*\*\*\*\* | | | | 8 | 0.958 | 0.003 | 39467. | 0.000 |
| |\*\*\*\*\*\*\* | | | | 9 | 0.954 | 0.008 | 44209. | 0.000 |
| |\*\*\*\*\*\*\* | | | | 10 | 0.950 | -0.019 | 48907. | 0.000 |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

数据来源：Eviews软件

从表4.5残差序列自相关性检验的结果得出残差序列的自相关图呈现出拖尾特征，而偏自相关图在3阶截尾特征，根据此判断出残差序列存在3阶自相关性，因此残差序列存在AR(3)的过程。

2）ARCH效应检验

从上文的分析中得出去中心化价差序列不仅具有异方差性也具有自相关性，首先对序列建立自回归方程，然后对自回归方程的随机扰动项进行ARCH效应检验,本文使用ARCH-LM检验。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
| F-statistic | 86.17360 | Prob. F(2,5187) | | 0.0000 |
| Obs\*R-squared | 166.9013 | Prob.Chi-Square(2) | | 0.0000 |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

表4.6 ARCH效应检验

数据来源：Eviews软件

根据表4.6 ARCH-LM检验结果显示F统计量的值为 86.17360，Obs\*R-squared统计量的值为 166.9013，其对应的P值为0，说明自回归方程的随机扰动项序列存在异方差，因此存在ARCH效应。

### 4.3.3 构建AR-GARCH模型

根据上文检验可知具有自相关性，同时自回归方程的随机扰动项序列存在ARCH效应，故对序列建立GARCH（p,q）模型。然而根据上文2.2节GARCH模型理论介绍可知，本文通过建立GARCH(1,1)模型就可以达到本文的目的以及可以很好的解释去中心化价差序列的波动性。

表4.7 AR-GARCH模型估计结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 变量 | 系数 | z统计量 | P值 |
| 均值方程 | AR(1) | 0.726972 | 51.80417 | 0.0000 |
| AR(2) | 0.160861 | 8.328168 | 0.0000 |
| AR(3) | 0.107421 | 7.314917 | 0.0000 |
|  | C | 5.18E-06 | 12.30075 | 0.0000 |
| 条件方差方程 | RESID(-1)^2 | 0.181702 | 17.64785 | 0.0000 |
|  | GARCH(-1) | 0.741692 | 52.99227 | 0.0000 |
| 拟合优度=0.983115 | | | | |

数据来源：根据Eviews软件整理而得

根据表4.7 AR-GARCH模型估计结果可知，如下均值方程和条件方差方程：

=0.726972\*+ 0.160861\*+ 0.107421\*+ （4.4）

=0.00000518 + 0.181702\*+ 0.741692\* （4.5）

由于均值方程和条件方差方程各系数的P值均为0，故拒绝系数为零的原假设，说明各个系数显著不为0，ARCH项和GARCH项的系数之和为0.923394小于1，满足GARCH模型的参数约束条件，同时调整后的拟合优度=0.983115,表明拟合优度较好，由上述分析可知均值方程和条件方差方程成立。

本文基于统计套利的原理在价差的均值回复特征，在价差偏离均值超过一定程度时进行两种国债期货合约的买卖操作，也就是利用价差的波动情况进行分析判断策略的入场点和离场点。因此为了更加精准本文利用自回归方程的残差序列代替去中心化价差序列，通过建立的AR-GARCH模型计算价差序列的时变方差，根据自回归方程的残差序列偏离均值的程度与时变标准序列来确定交易信号。

### 4.3.3 设定套利区间

在套利模型建立完成后根据模型得到残差序列、时变标准序列对套利区间进行设定，在何时买入何时卖出何种合约以及交易原则，因此接下来是对套利区间的设定，但是不能忽略存在价差长期偏离均衡价差（均值）的情况，这样可能造成资金的占用，考虑时间成本以及避免风险，我们需要设计止损值，才能使得策略更加完整和实用，使得策略更加有效。

利用自回归方程的残差序列（下文简称）偏离其均值=0的情况来确定何时开仓买卖TS合约和TF合约的，何时进行平仓操作以及何时启动止损。为了使策略便于控制和方便，在已开仓后不能重复开仓，在平仓之后才能再次开仓。假设存在对称的交易信号，分别将开仓、止损参数设为n\*、m\*且n<m。

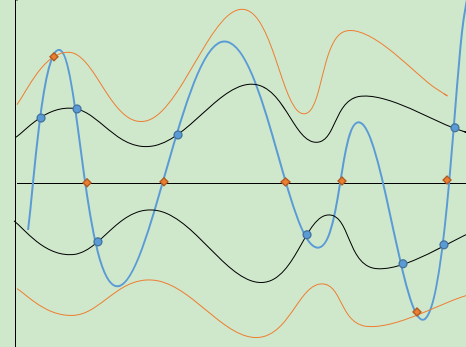


图4.4 套利区间示意图

图4.4为套利区间示意图，蓝色线表示序列，黑色线表示n\*，即开仓信号，橙色线表示m\*，即止损信号，其中蓝色点时开仓，买入价差组合，橙色点时平仓。具体套利区间及套利交易如下：

1）若残差序列>n\*且<m\*时，2年期国债期货TS2009合约相对于5年期国债期货TS2009合约被高估，因此根据低买高卖的原则，做空价差，即卖出10手TS合约，同时买入5手TF合约，然后在回复到均值时，进行反向操作，买入10手TS合约，同时卖出5手TF合约，进行平仓，此次做空价差的套利被定义为正向套利。

2）若<-n\*且>- m\*时，2年期国债期货TS2009合约相对于5年期国债期货TS2009合约被低估，因此根据低买高卖的原则，做多价差，即买入10手TS合约，同时卖出5手TF合约，然后在回复到均值时，进行反向操作，卖出10手TS合约，同时买入5手TF合约，进行平仓，此次做多价差的套利被定义为反向套利。

3）若> m\*时，可能出现价差长期偏离均衡价差，2年期国债期货TS2009合约将在很长的时间高于5年期国债期货TS2009合约，基于资金的时间成本以及安全性，在此时对之前的头寸进行平仓，启动止损程序及时进行止损，此时应买入10手TS合约，同时卖出5手TF合约，进行平仓。

4）若<-m\*时，可能出现2年期国债期货TS2009合约将在很长的时间低于5年期国债期货TS2009合约，基于资金的时间成本以及安全性，对之前的头寸进行平仓，此时应卖出10手TS合约，同时买入5手TF合约，进行平仓止损。

## 4.4跨品种套利策略设计

本文是利用夏普比率最大化以及套利结果最优来寻求最优套利策略，故此策略设计部分首先需要对套利策略评价指标的设定以及套利交易成本进行分析，之后进行交易信号设计。

### 4.4.1 套利策略评价指标的设定

由于本文要以夏普比率最大化作为寻找最优开仓阈值的目标，因此在本文对交易信号设计前需要对策略评价体系进行介绍，主要为后文止损信号、开平仓信号设计做铺垫。

1.套利交易的收益计算

套利策略的盈利能力是交易者最为关注的，净利润以及最终权益是最为直观看出策略的盈亏结果的，因此只有保证了套利策略有正的净利润和出现资产升值才能说明此套利策略为好的策略。在本文中每完成一次套利交易从中获得的利润的计算如下式：

正向套利： =10\*（-）\*20000+5\*（-）\*10000-45\*2 （4.6）反向套利： =10\*（-+）\*20000+5\*（-）\*10000-45\*2 （4.7）

其中：为完成一次套利交易从中获得的利润；0时刻表示开仓时刻，1时刻表示平仓时刻，i表示第i次套利交易；对于正向套利（4.6）式是2年期国债期货TS2009合约的买入价，是2年期国债期货TS2009合约的卖出价；是5年期国债期货TF2009合约的卖出价,是5年期国债期货TF2009合约的买入价。对于反向套利（4.7）式是2年期国债期货TS2009合约的卖出价，是2年期国债期货TS2009合约的买入价；是5年期国债期货TF2009合约的买入价,是5年期国债期货TF2009合约的卖出价。

总收益（总的净利润）R= （4.8）

2.累计收益率

累计收益率是资产在某一个时间段内所产生的总收益除以期初总成本，这是对资产在持有期内发生的盈利的反映，利用累计收益率考虑了投入成本的大小对收益的影响，所以比总收益更客观更具有可比性。假设交易n次，每一交易的收益率用表示，累计收益率的计算如下：

r =  = （4.9）

其中：R由（4.8）式计算而来，C是套利期初投入的总成本。

3.年化收益率

年化收益率是指投资期限为一年所获得的收益率。因为累计收益率没有考虑时间因素的影响，对于不同投资期限的投资组合，单纯的比较累计收益是不严谨的，时间越长可能累计的收益越大。对于现在很多的理财产品以及投资都是以年化收益率来衡量其收益情况的，因此本文也利用年化收益率。年化收益率的计算公式如下：

 （4.10）

其中：是年化收益率，n是样本个数，假设一年有250个交易日

4.年化收益率标准差

=  （4.11）

其中：是平均收益率，是每隔3分钟的收益率

5.夏普比率

夏普比率是由诺贝尔经济学奖获得者威廉夏普提出的，它综合地考量了期望收益相对于风险的表现效果，即一单位总风险下的超额收益。如果夏普比率的值为正，则说明投资期内的净收益增长率是大于无风险利率的，通常来说，夏普比率越大，说明风险的溢价回报越高，也就意味着该投资策略越好。

Sharpe= （4.12）

其中：为年化收益率，由（4.10）式计算而来；为无风险收益率，本文以银行1年期存款利率作为无风险收益率；为年化收益率的标准差，由（4.11）式计算而来。

在之前学者的研究中通常以夏普比率作为对策略套利结果的评价标准，而本文以夏普比率最大为目标来寻求最优的开平仓阈值，以夏普比率为目标不但衡量了策略的收益，同时也衡量了风险，也就是以单位风险下的收益最大化为目标，进行寻求最优的交易信号，为投资者提供同时考虑风险和收益的策略。

6.胜率与盈亏比

胜率是指在套利策略中套利的盈利交易的次数与总交易次数的比值。胜率大于50%，说明该套利策略的盈利次数大于其亏损次数，但也不是胜率越高意味着越可能获得更高的收益，当盈利次数虽然较多但盈利值不大，亏损次数虽然较少但亏损值加大时，有可能使得策略出现亏损。盈亏比是对策略总体的盈利值和亏损值进行比较，盈亏比越大说明该策略的盈利效果越好。

### 4.4.2 套利成本的确定

在此次套利交易中所涉及到的成本有保证金、手续费、税金以及冲击成本等。由于本文所套利的规模相对较小，再加之本文选取的数据是交易活跃的数据，因此在本文的交易成本的分析中忽略有卖无买或有买无卖造成的冲击成本，仅考虑保证金和手续费。

1.保证金

期货市场交易采用保证金制度进行交易，国债期货的具体保证金比率由中金所规定的。根据表2.1可知2年期国债期货的最低保证金是合约价值的0.5%，5年期国债期货的最低保证金是合约价值的1%，投资者只需要缴纳充足的保证金就可以进行交易，但是保证金交易属于杠杆交易，在收益放大的同时投资者需要承担的风险也较大，因此期货市场的保证金采用的是逐日盯市制度，投资者的保证金必须大于等于中金所所规定的最低保证金比例，当保证金低于最低保证金比例时会将所持有的期货自动进行强行平仓，这样可能会出现亏损或破坏策略的执行。为避免保证金不足强行平仓，本文将2年期国债期货的保证金比率确定为1%，将5年期国债期货的保证金比率确定为2%。根据前文构建的套利组合可知每次交易的合约分别是10手2年期国债期货合约和5手5年期国债期货合约，因此10手2年期国债期货合约需要的保证金为10\*20000\*100\*1% = 200000元，5手5年期国债期货合约需要的保证金为5\*10000\*100\*2% = 100000元。因此将初始套利交易所需要的保证金为300000元。

2.手续费及税金

手续费是指投资者需要向期货交易所、期货公司及相应经纪人缴纳的费用；而税金是指投资者在交易中必须依法向税务机关缴纳的税金，主要包括印花税、资本利得税，在我国期货交易过程中只收取印花税，在国外除了收取印花税外还会收取资本利得税，但我国金融期货市场规定投资者在交易金融期货的过程中不需缴纳印花税。因此，国债期货的跨品种套利交易中交易成本仅包括交易手续费，中金所规定国债期货合约的手续费为每手3元，因此本文套利策略中所交易的合约共15手，故每次交易信号时所需要的手续费为15\*3=45元，完成一次套利交易需要手续费为90元。

### 4.4.3 套利交易信号设计

1.止损信号设计原则

本文利用的是统计套利原理进行跨品种套利策略研究，而这一原理主要是基于均值回复特征进行套利的，当价差偏离均衡价格是在一定概率下价差会收敛于均衡价差，但是并非绝对收敛，如果继续持仓可能会造成很大的损失，因此为了控制风险需要将价差不收敛的情况考虑到策略设计中，故应该将风险控制加入策略的构建之中，对亏损进行衡量和控制。

本文在止损信号的设置上通过参考现有文献，Vidyamurthy（2004）提出以±0.75、±2倍标准差开仓和止损参数，张河生和闻岳春（2013）通过研究表明在止损阈值的确定上应尽量大一些，刘影（2019）对止损阈值分别为2、3、3.5、4进行测试选择止损阈值为3.5。因此本文根据现有研究在止损阈值的确定上通过分析和测试经验值（3.5、3、2.5）来进行设计，因为止损阈值的设置事关策略的成败，因此选择合适的止损阈值是策略的关键之一。本文是国债期货的跨品种套利，套利交易本身是一种低风险交易，但并非无风险，所以为了更好的确保投资者资金的安全性使得套利更加符合低风险投资者的要求，因此对于这些经验值进行比较，选择最优的止损阈值。

当m等于2.5、3、3.5时的情况分别进行验证，根据样本内数据（历史收盘价数据）用MATLAB软件进行对上述策略求解最优止损阈值，通过验证测试选择止损阈值相对于其他值更好的策略，在去中心化价差序列超过正负m倍的标准差时进行止损平仓，将损失控制在相对较小的范围内，使得该策略更加有效。

### 2.开平仓信号设计原则

将平仓信号的参数设为0，开仓信号的初始参数设为n=0.1，首先固定止损阈值m，然后开仓阈值以步长为0.1，历遍区间[0,m]，即将区间[0,m]的值一一赋予n，求解每一个开仓阈值下的套利策略的累计收益率，再根据累计收益为正的参数进行年化收益率、夏普比率计算，通过对收益率、夏普比率的综合考虑和比较，选择最大的夏普比率对应的n的值，得到对称交易信号的套利策略。对于非对称交易信号的确定通过对对称交易信号的套利策略套利效果进行分析，在其基础进行改进，寻求最优的非对称交易信号的套利策略。

## 4.5 套利策略效果分析

### 4.5.1 对称交易信号策略的套利效果

1.对称交易信号设计

在考虑到将正反向套利交易信号设为对称信号时，通过用MATLAB软件进行对上述策略求解最优止损阈值，测试发现样本内止损阈值m为3时策略更优，故确定止损阈值为3。在确定了止损阈值m=3时，根据样本内数据（历史收盘价数据）用MATLAB软件进行测试和计算，计算累计收益率结果如下图：

图4.5 当m=3时不同开仓阈值下的策略累计收益率

通过图4.5可以看出不同开仓阈值下的策略的累计收益率可能为正也可能为负，因此开仓阈值的取值十分重要，它决定着整个策略的成功与否。其中当开仓阈值n=0.6、0.7、0.8是累计收益率为正，通过对累计收益为正对应的开仓阈值下的策略的夏普比率进行比较，比较结果如下表：

表4.8 不同开仓阈值下的夏普比率

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 开仓阈值 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
| 年化收益率 | 14.66% | 14.66% | 28.62% |
| 夏普比率 | 0.0223 | 0.0223 | 0.0464 |

根据表4.8可知，本文应该选择的夏普比率最大时的开仓阈值n=0.8，同时也是累计收益最大的开仓阈值，因此本文的交易信号确定为波动超过正负0.8倍的标准差进行开仓，达到正负3倍的标准差或为0时进行平仓。即（1）若残差序列> 0.8\*且< 3\*时，卖出10手TS合约，同时买入5手TF合约，然后在回复到均值0时或若> 3\*时，进行反向操作，买入10手TS合约，同时卖出5手TF合约，进行平仓或止损平仓。（2）若<-0.8\*且>-3\*时，买入10手TS合约，同时卖出5手TF合约，然后在回复到均值0时或<-3\*时，进行反向操作，卖出10手TS合约，同时买入5手TF合约，进行平仓或止损平仓。

2.样本内回测效果分析

上文将最优阈值确定为（0.8，3），以这个最优阈值对样本内回测，将从策略的收益率、胜率以及交易次数几个方面进行评价。



图4.6 策略样本内回测过程

图4.6是根据对称最优阈值，开仓信号为0.8倍的标准差，止损信号为3倍的标准差时的回测过程，其中KUP、KDOWN为上下开仓线，ZUP、ZDOWN为上下止损线，中间在0附近波动的曲线E2为样本内去中心化价差序列的残差序列，可以看出该序列具有一定的均值回复特性。

表4.9 对称阈值样本内正向套利情况

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 正向套利次数 | 开仓时间 | 平仓时间 | 套利盈亏 | 套利收益率(%) |
| 1 | 2020/4/29 9:30 | 2020/5/6 9:39 | 6660 | 2.22 |
| 2 | 2020/5/6 9:42 | 2020/5/18 9:39 | 17160 | 5.72 |
| 3 | 2020/5/18 10:03 | 2020/5/19 9:54 | 9410 | 3.14 |
| 4 | 2020/6/4 13:03 | 2020/6/9 9:45 | -29840 | -9.95 |
| 5 | 2020/6/9 9:51 | 2020/6/16 9:18 | 28660 | 9.55 |
| 6 | 2020/6/16 9:33 | 2020/6/18 9:18 | 1660 | 0.55 |
| 7 | 2020/6/18 9:21 | 2020/6/24 10:03 | 16160 | 5.39 |
| 8 | 2020/6/24 10:06 | 2020/6/29 15:12 | -8340 | -2.78 |
| 9 | 2020/6/29 15:15 | 2020/7/6 9:18 | 7660 | 2.55 |
| 10 | 2020/7/6 9:21 | 2020/7/6 14:45 | 18660 | 6.22 |
| 11 | 2020/7/6 15:00 | 2020/7/8 15:03 | 17910 | 5.97 |
| 12 | 2020/7/8 15:15 | 2020/7/9 13:12 | 12660 | 4.22 |
| 13 | 2020/7/9 13:15 | 2020/7/10 10:45 | -9840 | -3.28 |
| 14 | 2020/7/10 10:51 | 2020/7/15 9:45 | 7910 | 2.64 |
| 正向套利总收益以及累计收益率 | | | 96490 | 32.16 |

表4.10 对称阈值样本内反向套利情况

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 反向套利次数 | 开仓时间 | 平仓时间 | 套利盈亏 | 套利收益率(%) |
| 1 | 2020/5/19 10:18 | 2020/5/21 9:18 | -34590 | -11.53 |
| 2 | 2020/5/21 9:39 | 2020/5/26 9:51 | -13340 | -4.45 |
| 3 | 2020/5/26 9:54 | 2020/5/26 10:24 | -29340 | -9.78 |
| 4 | 2020/5/26 10:27 | 2020/6/4 11:30 | -14090 | -4.70 |
| 5 | 2020/7/15 10:15 | 2020/7/24 15:15 | 13910 | 4.64 |
| 反向套利总收益以及累计收益率 | | | -77450 | -25.82 |

表4.11 套利结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 套利收益 | 累计收益率 | 年化收益率 | 胜率 | 夏普比率 |
| 19404 | 6.35% | 28.62% | 66.67% | 0.0464 |

根据表4.9和表4.10可知，基于AR-GARCH模型的2年期国债期货和5年期国债期货之间的套利策略在对称交易信号的情况下样本时间段当中共进行了21次套利，该策略的总的收益为19404元，胜率为66.67%，累计收益率为6.35%，年化收益率为28.62%，夏普比率为0.464。其中正向套利为14次，盈利为11次，亏损为3次，正向套利总体为盈利，其总收益为96490元；反向套利为5次，盈利为1次，亏损为4次，反向套利总体为亏损，且单次套利的金额超过了初始资金的10%，其总亏损为77450元，正向套利的收益其中82%都用来了弥补反向套利的亏损，该策略在样本时间内正向套利交易的套利效果相对反向套利效果较好，因此仅从样本内套利结果看应该减少反向套利交易，故可以设计非对称的交易阈值。

### 4.5.2 非对称交易信号策略的套利效果

1.非对称交易信号设计

根据上文对称阈值的策略结果可以看出反向套利的效果相对较差，正向套利的效果相对较好，在考虑到非对称交易阈值时应该对止损阈值和开仓阈值都进行调整，对反向套利的套利区间进行减小处理，而对套利效果相对更好的正向套利对其套利区间进行扩大。由于本文止损阈值的确定是利用经验阈值，利用控制变量和试错方法，在确定套利的止损信号为3倍标准差、2.5倍的标准差或3.5倍的标准差，再确定正反向套利的开仓信号。设正向套利时的开仓阈值为n1，反向套利时的开仓阈值为n2，止损阈值为m1，为操作简便，本文对正向套利和反向套利的止损阈值同时进行处理，通过测试将套利的止损信号设置为m1=3.5倍的标准差，对套利策略开仓阈值n1、n2进行寻求最优阈值。因此考虑非对称交易信号的套利策略为：（1）若残差序列> n1\*且< 3.5\*时，卖出10手TS合约，同时买入5手TF合约，然后在回复到均值0时或若> 3.5\*时，进行反向操作，买入10手TS合约，同时卖出5手TF合约，进行平仓或止损平仓。（2）若<-n2\*且>-3.5\*时，买入10手TS合约，同时卖出5手TF合约，然后在回复到均值0时或<-3.5\*时，进行反向操作，卖出10手TS合约，同时买入5手TF合约，进行平仓或止损平仓。

在考虑到将正反向套利交易信号设为非对称信号时，将止损阈值确定为3.5时，根据样本内数据（历史收盘价数据）用MATLAB软件进行测试和计算，选择累计收益为正的对应的策略，对其夏普比率进行比较，选择最大夏普比率的策略，通过测试发现样本内夏普比率最大的策略的交易阈值为n1=0.8，n2=1.3。

2.样本内回测效果分析



图4.7 策略样本内回测过程

图4.7是根据非对称的最优阈值，正向套利开仓信号为0.8倍的标准差，止损信号为3.5倍的标准差，反向套利开仓信号为-1.3倍的标准差，止损信号为-3.5倍的标准差时的回测过程，其中KUP、KDOWN为上下开仓线，ZUP、ZDOWN为上下止损线，中间在0附近波动的曲线E2为样本内去中心化价差序列的残差序列，可以看出该序列具有一定的均值回复特性。此时套利结果为如下：

表4.12 非对称阈值样本内正向套利情况

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 正向套利次数 | 开仓时间 | 平仓时间 | 套利盈亏 | 套利收益率(%) |
| 1 | 2020/4/29 9:30 | 2020/5/6 9:39 | 6660 | 2.22 |
| 2 | 2020/5/6 9:42 | 2020/5/18 9:39 | 17160 | 5.72 |
| 3 | 2020/5/18 10:03 | 2020/5/19 9:54 | 9410 | 3.14 |
| 4 | 2020/5/21 9:42 | 2020/6/16 9:18 | 50160 | 16.72 |
| 5 | 2020/6/16 9:33 | 2020/6/18 9:18 | 1660 | 0.55 |
| 6 | 2020/6/18 9:21 | 2020/7/6 9:18 | 11410 | 3.80 |
| 7 | 2020/7/6 9:21 | 2020/7/10 10:45 | 34660 | 11.55 |
| 8 | 2020/7/10 10:51 | 2020/7/15 9:45 | 7910 | 2.64 |
| 9 | 2020/7/15 10:24 | 2020/7/20 9:39 | -17590 | -5.86 |
| 正向套利总收益以及累计收益率 | | | 121440 | 40.48 |

表4.13 对称阈值样本内反向套利情况

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 反向套利次数 | 开仓时间 | 平仓时间 | 套利盈亏 | 套利收益率(%) |
| 1 | 2020/5/19 10:24 | 2020/5/21 9:18 | -30590 | -10.20 |
| 2 | 2020/7/20 9:51 | 2020/7/24 15:15 | 660 | 0.22 |
| 反向套利总收益以及累计收益率 | | | -29930 | -9.98 |

表4.14 套利结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 套利收益 | 累计收益率 | 年化收益率 | 胜率 | 夏普比率 |
| 91510 | 30.5% | 197.13% | 81.81% | 0.3375 |

根据表4.12和表4.13可知，基于AR-GARCH模型的2年期国债期货和5年期国债期货之间的套利策略在考虑非对称交易信号的情况下样本时间段当中共进行了11次套利，该策略的总的收益为91510元，胜率为81.81%，累计收益率为30.5%%，年化收益率为197.13%，夏普比率为0.3375。其中正向套利为9次，盈利为8次，亏损为1次，正向套利总体为盈利，其总收益为121440元；反向套利为2次，盈利为1次，亏损为1次，反向套利总体为亏损，且单次套利的金额超过了初始资金的20%，其总亏损为29930元，正向套利的收益其中24.65%用来弥补反向套利的亏损。相对来说在基于AR-GARCH模型的套利策略中考虑非对称阈值的策略比对称阈值的策略在样本时间内整体套利交易的套利效果相对较好，因此仅从样本内套利结果看应该选择非对称阈值进行套利交易信号的设计。

## 5 国债期货跨品种套利策略样本外回测效果及结论

根据上文确定的国债期货跨品种套利策略对样本数据进行检测，其中根据AR(3)-GARCH模型求出的残差序列以及上文求出的最优阈值可以求出入场和离场的上下触发点，对两种期货合约进行交易以期获得相对较好的盈利。下文首先将对此策略的样本外数据进行回测，分析策略的具体效果；然后本文进行总结。

## 5.1 样本外回测效果分析

根据样本内检测结果得出的最优阈值，从而确定了完整的套利策略，但是作为一个套利策略必须通过样本外回测或实盘交易测试检验来判断策略的有效性以及策略的优劣。本文选取与样本内研究的期货合约相同且时间与样本内时间连续的2年期国债期货和5年期国债期货的3分钟收盘价作为样本外数据进行测试，共1615对数据。由样本内套利策略的套利结果可知，对称交易信号的策略套利效果较差，作为一名理性的投资者则不会选择对称交易信号的策略，因此需要对该策略进行改进或说明以设定为对称交易信号的策略无效，故样本外仅对有效策略进行回测。

1.收益分析

通过样本内数据得出的AR-GARCH模型以及非对称交易阈值n1=0.8，n2=1.3,m1=3.5对样本外数据进行回测，其结果如下：

表5.1 样本外非对称阈值回测结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 反向交易次数 | 总交易次数 | 盈利次数 | 套利收益 | 累计收益率 | 年化收益率 | 胜率 | 夏普比率 |
| 12 | 54 | 34 | 35890 | 11.96% | 342.32% | 62.96% | 6.8555 |

根据表5.1的样本外回测结果可知，设定非对称阈值的套利策略的收益在样本外的套利累计收益相对于样本内较低，但整体分析，该策略在样本外的年化收益以及夏普比率都是较高的，故该策略是比较成功的，其总共进行了54次套利，正向套利为42次，反向套利为12次，总盈利35890元，累计收益率为11.96%，胜率为62.96%，表明2年期国债期货和5年期国债期货的跨品种套利策略是可行的。

表5.2 样本内外套利结果比较

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 阈值 |  | 套利期间 | 盈利次数 | 套利收益 | 累计收益率 | 年化收益率 | 胜率 | 夏普比率 |
| n=0.8,m=3 | 样本内 | 92天 | 12 | 19404 | 6.35% | 28.62% | 66.67% | 0.0464 |
| n1=0.8,n2=1.3m1=3.5 | 样本内 | 92天 | 9 | 91510 | 30.5% | 197.13% | 81.81% | 0.3375 |
| 样本外 | 25天 | 34 | 35890 | 11.96% | 342.32% | 62.96% | 6.8555 |

根据表5.2样本内外将两种不同形式阈值策略的套利结果进行比较，从上表可知样本内的套利效果总是优于样本外的套利效果，而对于不同交易阈值的策略，非对称阈值的策略的胜率、累计收益率较好，故考虑到非对称阈值的交易策略不管在样本内还是样本外的套利效果都是优于对称阈值的策略，因此利用AR-GARCH模型的2年期国债期货和5年期国债期货的跨品种套利策略中应该选择非对称交易信号。

2.风险分析

本文通过对样本外的收益率与相同期间国债指数的收益率进行比较，对基于AR-GARCH模型的2年期国债期货和5年期国债期货的跨品种套利策略的风险进行分析。2020年7月27日的国债指数收盘价为182.51，2020年8月20日国债指数收盘价为182.68，在与样本外的时间段相一致的19个交易日内国债指数收益率为0.09%，而本文的设计非对称信号的跨品种套利策略的收益率为11.96%，证明了基于AR-GARCH模型的跨品种套利策略在考虑非对称阈值的情况下是有效的，在国债指数走势上涨时，套利获利要较持有指数获利的幅度大，体现了该策略的有效性。但收益与风险总是呈正相关的，相对于无风险收益策略本文策略可能面临不可忽略的风险，在样本内的夏普比率为0.3375，即在单位风险下该策略的年化收益率为33.75%，而在样本外风险收益更高，但不能排除偶然性的存在。本文策略可能存在以下的风险：

（1）统计套利风险

由于本文是基于统计套利原理的国债期货跨品种套利交易策略的研究，而统计套利是有风险套利，是基于两种套利对象之间的长期稳定关系进行套利，假设两种套利对象之间价差在大概率下是向均衡价差回复的，但当价差出现长期性偏离均衡价差，且未达到止损条件，将会带来资金的长时间占用，该套利策略为有风险套利策略。

（2）模型风险

在建立AR-GARCH模型时利用的是国债期货历史价格数据，在寻求交易信号时也是利用历史数据进行分析，故本文策略是基于历史价格会再次出现的假设。当价格大幅度偏离历史价格轨道时，本文建立的模型将会失效，投资者将会面临较大风险。同时自回归方程的残差序列代替去中心化价差序列存在误差，利用AR-GARCH模型对样本外套利时机的预测存在时效性。

综上所述，本文策略存在一定的风险，需对模型进行实时更新，还策略适用于风险中型投资者。

## 5.2 结论

本文通过实证分析得知2年期国债期货合约与5年期国债期货合约价格之间存在协整关系，在其存在协整关系的基本前提下，可知两期货价差具有一定的均值回复特性，统计套利策略的核心正是借鉴均值回归思想，认为价差在短时期可能会偏离均值，但长期会回复均值。在以往统计套利文献中大多数是基于残差恒定波动模型构建套利策略，而现实中，价差序列的方差不是固定的，因此，本文的研究重点是对两种期货价差序列进行分析，运用AR-GARCH模型构建一套完整的国债期货跨品种套利策略，同时在设计入场点时运用非对称信号与以往文献中研究更多的对称信号进行对比，通过对比发现在样本内得到的最优阈值的基础上对阈值进行改进能获得更高的收益。

本文对策略设计步骤具体包括建模、参数优化、统计样本内外套利结果、样本外回测，并且与改进前对称阈值的套利策略进行对比分析，从而评价策略的可行性和有效性。首先，对样本内的两种国债期货的价差序列进行分析，由于协整方程的残差序列是去中心化价差序列，故用协整方程的残差序列可以替代价差序列，通过对残差序列的自相关检验和自回归方程扰动项的异方差检验得知残差序列存在一定的自相关且扰动项存在异方差，因此，本文对去中心化价差序列建立了 AR（3）-GARCH（1,1）模型；其次，将AR-GARCH模型与套利策略相结合，构建跨品种套利策略,在样本内进行参数优化，选取在样本内累计收益以及夏普比率较好的参数组n=0.8,m=3，分析在该参数下样本内的策略回测表现，通过分析样本内策略的回测结果对策略进行非对称阈值的改进，改进后的参数组为n1=0.8,n2=1.3,m1=3.5，然后对改进前后的策略的样本内外套利经过进行比较，发现非对称阈值的策略不管在样本内外其收益相对更优。

# 参考文献

[1] Kenyon D，Clay J．Analysis of profit margin hedging strategies for hog producers［J］．Journal of Futures Markets，1987，7(2):183-202．

[2] Simon D P．The soybean crush spread:Empirical evi-dence and trading strategies ［J］．Journal of Futures Markets，1999，19(3):271-289

[3]LIU Q．Price Relations among Hog，Corn，and Soybean Meal Futures[J]．Journal of Futures Markets，2005，25(5)：491—514．

[4] Ma C K and Soenen L A．Arbitrage opportunities in metal futures markets［J］.Journal of Futures Markets，1988，8(2):199 －209

[5]Emery G.W. and Lin Q.An analysis of the relationship of between electricity

and trading strategies[J]．Joumal of Future Markets，2002，22：95-122．

[6]Kanamura T，Rachev S T，Fabozzi F J． A profit modelfor spread trading with an application to energy futures［J］． The Journal of Trading，2010，5( 1) : 48 - 62．

[7]BollerslevT.Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity[J]. Eeri Research Paper,1986,31(3):307–327

[8 Dunis C L，Laws J and Evans B． Modelling and trading the gasoline crack spread: A non－linear story［J］．DerivativesUse，Trading Regulation，2006a，12(1):126 －145

[9]Tzang D N and Leuthold R M．Hedge Ratios Under Inherent Risk Reduction in a Commodity Complex[J]．Journal of Futures Markets，1990，10(5)：497—504．

[10] Darren Butterworth, Phil Holmes. Inter-market spread trading: evidence from UK index futures markets[J]. Applied Financial Economics, 2002, 12(11):783-790

[11] Cummins M and Bucca A． Quantitative spread trading on crude oil and refined products markets ［J］． Quantitative Finance，2012，12(12):1857－1875

[12]Christian L. Dunis,Jason Laws,Ben Evans. Trading futures spread portfolios: applications of higher order and recurrent networks[J]. The European Journal of Finance,2008,14(6).

[13] Haigh M S, Holt M T. Crack spread hedging: accounting for time-varying volatility spillovers in the energy futures markets [J]. Journal of Applied Econometrics,2002, 17(3):269–289.

[14] Brennan M J, Schwartz E S. Arbitrage in Stock Index Futures[J]. Journal of Business, 1990, 63(1):S7-31

[15] Darren Butterworth, Phil Holmes. Inter-market spread trading: evidence from UK index futures markets[J]. Applied Financial Economics, 2002, 12(11):783-790

[16] Alexander C, Dimitriu A. A comparison of cointegration and tracking error models for mutual funds and hedge funds[J]. ISMA Centre Discussion Papers in Finance, 2004, 4: 1-26

[17] Alexander C, Dimitriu A. Indexing and statistical arbitrage[J]. The Journal of Portfolio Management, 2005, 31(2): 50-63.

[18] Jacobsen B. Demonstrating error-correction modelling for intraday statistical arbitrage[J]. Applied Financial Economics Letters, 2008, 4(4): 287-292.

[19]Caldeira J, Moura G V. Selection of a portfolio of pairs based on cointegration: A statistical arbitrage strategy[J]. Available at SSRN 2196391, 2013.

[20]Miao J, Laws J. Profitability of a simple pairs trading strategy: recent evidences from a global context[J]. International Journal of Theoretical and Applied Finance, 2016, 19(04): 1650023.

[21]Thomaidis N S. Efficient Statistical Analysis of Financial Time -Series Using Neural Networks and GARCH Model [C].Social Science Electronic Publishing, 2006.

[22]Russell Poskitt. An intraday test of pricing and arbitrage opportunities in the New Zealand bank bill futures market[J]. Journal of Futures Markets,2002,22(6).

[23]Vidyamurthy G. Pairs Trading: quantitative methods and analysis[M]. John Wiley & Sons, 2004.

[24]贾瑞斌. 基于协整的甲醇与聚丙烯跨品种套利方案设计[D].对外经济贸易大学,2017.

[25]靳朝翔,梁仁方,刘建和.基于神经网络模型的商品期货跨品种套利策略——以焦炭、铁矿石和螺纹钢为例[J].云南财经大学学报,2016,32(04):150-160.

[26]周亮.基于GARCH模型的商品期现套利研究[J].吉林工商学院学报,2017,33(06):78-84.

[27]刘文文. 国债期货跨品种套利策略研究[D].山西财经大学,2019.

[28]杨艳军,陈思岑.基于高频数据的我国国债期货市场套利研究[J].财务与金融,2018(02):1-6.

[29]何树红,张月秋,张文.基于GARCH模型的股指期货协整跨期套利实证研究[J].数学的实践与认识,2013,43(20):274-279

[30]邢知,郝继升.基于协整-GARCH模型的统计套利策略最优阈值改进研究[J].延安大学学报(自然科学版),2018,37(03):41-45.

[31]苗宇,朱家明.基于GARCH对沪深300股指期货套利策略的实证分析[J].北京印刷学院学报,2019,27(05):77-80.

[32]邹战勇,陈红纯,李星.国际大宗农产品期货波动非对称性实证研究[J].韶关学院学报,2019,40(01):88-93.

[33]覃良文,唐国强,林静.基于协整-GARCH 模型最优阈值统计套利研究[J].桂林理工大学学报, 2016, 36(03):625-631.

[34]胡宇璇.[商品期货跨品种套利策略的实证研究——以棕榈油期货和豆油期货为例](https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?filename=YNJR201623198&dbcode=CJFQ&dbname=CJFD2016&v=" \t "https://kns.cnki.net/kcms/detail/frame/kcmstarget)[J]. 时代金融. 2016(23)

[35]刘建和,梁仁方,王玉斌,吴伟.大豆期货合约均值回归套利策略和Elman神经网络套利策略对比研究[J].湖南财政经济学院学报,2016,32(03):13-20.

[36]杨威. 中国国债期货跨品种套利量化策略设计[D].华中科技大学大学,2017.

[37]丁秀玲,华仁海.大连商品交易所大豆与豆粕期货价格之间的套利研究[J].统计研究,2007(02):55-59.

[38]李世伟.基于协整理论的沪深300股指期货跨期套利研究[J].中国计量学院学报,2011,22(02):198-202.

[39]朱丽蓉,苏辛,周勇.基于我国期货市场的统计套利研究[J].数理统计与管理,2015,34(04):730-740.

[40]张威波,胡艳英.基于高频数据的豆类期货套利实证研究[J].时代金融,2018(06):155-156+158.

[41]方军,李星野.基于协整理论的DFT-GARCH模型的统计套利研究[J].经济数学,2019,36(02):57-62.

[42]张玉希.高频数据下的沪深 300 股指期货量化交易策略设计[D].上海师范大学, 2018.

[43]李洋, 郑志勇.量化投资 : 以MATLAB为工具[M].电子工业出版社,2015.

[44]张河生,闻岳春.基于参数调整的协整配对交易策略:理论模型及应用[J].西部金融, 2013(01):11-16.

[45]唐瑞波. 基于遗传算法优化Elman神经网络的黑色金属期货跨品种套利策略[D].华中科技大学,2019.