
利率走廊下的央行数字货币研究*

刘晓蕾[†] 马长宙[‡] 董博文[§] 肖筱林^{**}

摘要：基于我国自2014年以来逐渐成型但尚需完善的利率走廊体制，本文构建了包含央行数字货币和债券的基准模型，刻画了金融机构在银行间市场交易和获取央行常备借贷便利的微观基础，以全方位探讨付息的央行数字货币在利率走廊下可以发挥的作用。模型的结果显示，央行数字货币利率在上行和下行利率区间都能充分发挥作用，必要时可以成为走廊的下限利率，从而起到重要的引导市场利率的作用。在扩展模型中，通过引入实物资本，我们研究的视角从批发金融端进一步延伸到实体经济，研究了央行数字货币利率和其他政策工具对银行间市场交易和实物资本投资的作用。基于我国央行数字货币（即数字人民币）的研发和试点紧密推进的现状，我们的研究带来重要的政策建议：给央行数字货币付息并随经济状况及时调整其利率，可以完善我国利率走廊体制，进一步提升货币政策传导的效果；也能在批发端激励商业银行，有助于进一步推广数字人民币。

关键词：央行数字货币，批发金融端，利率走廊，数字人民币

中图分类号：F822.1； **文献标识码：**A

一、引言

2022年5月国际清算银行发布的关于央行数字货币（central bank digital currency，以下简称CBDC）的调查显示，超过90%的央行（对应着全球76%的人口和94%的产出）正在

*我们感谢北京大学光华管理学院Money Reading Group, 2022年第二届CCER-NCER中国经济研讨会，2022年第二十二届中国经济学年会以及2023年经济波动与增长会议(forthcoming)上各位学术同行的建议和反馈。肖筱林感谢国家自然科学基金（编号：72073006）的资金支持。

[†] 北京大学光华管理学院金融学系

[‡] 北京大学光华管理学院应用经济学系

[§] 芝加哥大学Kenneth C. Griffin经济系

^{**} 通讯作者：北京大学光华管理学院应用经济学系，邮编：100871；Email: sylvia.xiao@gsm.pku.edu.cn

探索央行数字货币，而超过半数的央行已经进入实质性研发和试点阶段（Kosse and Mattei, 2022），全球范围内数字化法币的时代即将来临^①。我国是众多国家中进行央行数字货币（即数字人民币）密集研发和试点的先锋国家：自2019年末以来，我国已在国内多个城市密集进行数字人民币的试点；2022年1月还在试点地区推出了数字人民币APP；另外，数字人民币钱包已关联多家线上平台，可以便捷地进行线上支付。因此，我国的数字人民币，事关法币这一最基本也最重要的金融基础设施的数字化升级和变革，正在国内各地和多种线上线下场景中进行广泛试点和推广，距离全面推出，可以说呼之欲出。目前关于数字人民币的讨论和相关文章呈现快速增长的趋势，但是使用新货币主义研究框架进行前瞻性理论研究的并不多，本文通过构建具有微观基础的货币模型，从前瞻性理论研究的角度，分析引入央行数字货币对货币政策调控的影响，尤其是在利率走廊这一货币政策操作体制下能起的作用。

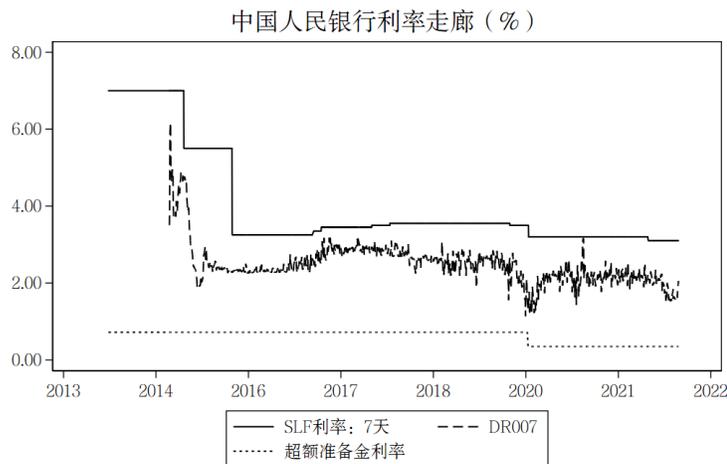


图1 我国的利率走廊

来源：根据Wind数据整理

2014年我国央行提出利率走廊构想，截至目前利率走廊框架已逐渐成型，上限为短期常备借贷便利（Standing Lending Facility, 简称SLF）利率，下限是超额准备金利率（易纲，2021）。图1根据Wind数据整理了2013-2022年间我国的利率走廊形态；可以看出，我国利率走廊已逐渐成型，市场基准利率（DR007，即7天期银行间债券质押式回购利率）一般处在上限和下限利率之间。但是，我国利率走廊仍存在问题，有待进一步完善。例如，2008至2019年我国超额准备金利率一直未作调整，2020年新冠疫情爆发后才从0.72%调整到0.35%，调整频率极低，也可以解读为走廊的下限利率基本未起到引导市场利率的作用。此外，我国利率走廊还存在走廊宽度过大，以及上限利率有时被市场利率穿透等问题。

再回到数字化法币的视角：央行数字货币本质上是一种数字账号，因此，相较于无法付息的纸币，对其付息是可能的^②。我国数字人民币目前定位于M0且未付息（中国人民银行，2021b）。但是，除了以我国数字人民币为代表的零售型以外，国际上也有多个国家尝试了批发型的央行数字货币，比如加拿大银行的Jasper项目，新加坡金管局的Ubin项目，日本银行和欧洲央行的Stella项目，以及香港金管局的LionRock项目等^③。面向批发金融端的央行数字货币，不仅涉及一国（或地区）范围内金融机构之间利用央行数字货币进行的交易和清算，近年来也越来越受到金融机构或者央行之间跨境结算需求的驱动。2022年10月，香港金管局联合BIS（香港）创新中心、中国人民银行数字货币研究所、泰国央行以及阿联酋央行，发布了“货币桥项目”（Project mBridge）报告。该项目尝试利用基于分布式账本技术（DLT）的公共平台进行跨境支付，多家央行可在平台上发行和交换各自的央行数字货币；试点中，来自上述四个国家和地区的20家商业银行代表其公司客户，利用该平台上各自央行发行的央行数字货币顺利进行了跨境支付和外汇交易（BIS，2022）。该“货币桥项目”还在持续，今年6月末各参与方在北京进行了新的探讨。^④由此可见，央行数字货币未来的发展方向还在探索中。

此外，我国数字人民币自2019年末进行试点以来，开展了很多自上而下的推广活动，但对于参与运营的商业银行（批发端）而言，缺乏足够的激励去推广一种可能会分流银行存款的新支付方式；这大概也是公众层面（零售端）目前使用数字人民币进行支付的比例和频率都相对较低的原因。因此，在批发金融端付息有望起到激励商业银行推广数字人民币的作用。基于这些考虑，本文试图回答以下问题：作为金融基础设施的央行数字货币，一旦引入，会对我国利率走廊这一货币政策操作体制产生何种作用？付息的央行数字货币是否有助于理清走廊上限和下限发挥作用的微观基础，进而提升货币政策传导的效果？基于金融服务实体经济的视角，引入付息的央行数字货币是否能够进一步完善我国的利率传导机制，真正实现货币政策对实体经济的“精准滴灌”？最后，基于政策探讨的视角，付息的央行数字货币是否能够激励商业银行推广数字人民币，以及该如何激励？

为了回答上述问题，我们基于新货币主义的框架构建了包含银行间市场（第一阶段）和清算市场（第二阶段）的基准模型。在这一无限期动态模型里，每期包含两个阶段/市场，第一阶段是银行间市场，每个银行都持有央行数字货币和政府债券的资产组合，这两者的核心区别是央行数字货币是唯一的交易媒介。央行数字货币是付息的，名义利率是 i_c ；政府债券也是付息的，但不能作为交易媒介，有流动性需求的银行只有将其所持有的债券抵押融资以获取央行数字货币后，才能完成交易所需的支付。在每期的开始，银行都会经受流动性冲击，冲击实现之后，银行分化为需要额外流动性的壹型银行（“1”）和拥有冗余资金的零型银行（“0”）。两类银行进行随机的“搜寻与匹配”，匹配成功的银行

将相互交易。而在第二阶段，所有的银行与央行进行支付和清算，同时银行决定下一期的资产配置。特别要说明的是，我们选择搜寻与匹配的框架来刻画银行间市场，主要因为现实中的银行间市场里金融机构需要搜寻交易对手，具有鲜明的“搜寻”与“匹配”特点；另外，这也是文献中刻画银行间市场交易的经典范式（Berentsen and Monnet, 2008; Bech and Monnet, 2016; Afonso et al., 2019; Chiu et al., 2023, 等）。另外，基于我国央行常备借贷便利的相关特征事实，基准模型也对其功能进行了刻画：需要额外流动性的壹型银行，可以使用政府债券作为抵押品，向央行的便利窗口申请贷款；而有冗余资金的零型银行，可以将多余的央行数字货币存入央行的存款便利。这生动地体现了央行作为“银行的银行”的特点。

基准模型的主要目的，是通过一个简洁的模型构建出模型经济体的利率走廊框架，以显示作为上限的常备便利贷款利率 i_p 和作为下限的常备存款利率 i_d ，具体是如何发挥作用的。通过引入付息的央行数字货币，我们也探索了其利率 i_c 在利率走廊中能够发挥的作用，尤其是与上限和下限利率之间的互动关系。值得注意的是，由于央行数字货币支付利率 i_c ，这意味着真实的下限利率是 $i_d - i_c$ ，当 $i_d \geq i_c$ 时，该利率为非负，我们将这一利率区间称之为“上行利率区间”；当 $i_d < i_c$ 时，该利率为负，我们将其称之为“下行利率区间”^⑥。特别要说明的是，我们的“下行利率区间”涵盖了各种比较宽泛的负利率情形，具体来说， $i_d < i_c$ 涵盖了 $i_d < i_c \leq 0$ ，或 $i_d \leq 0 \leq i_c$ 等不同情形。

基准模型的主要结果是，央行数字货币利率可以成为利率走廊下利率组合的重要补充，在上行和下行利率区间都有政策效果；尤其在下行利率区间时，数值模拟结果显示 i_c 作为（实际的）下限利率比没有央行数字货币时的 i_d 弹性更大，政策效果更灵敏。另外，基准模型里，所有的政策利率 (i_p, i_d, i_c, i) 以及利率走廊宽度和中点的分析也都能清晰地显示政策效果。更进一步，我们在附录F中提供了基准模型的另一版本，去掉常备便利存款，直接以央行数字货币利率作为下限利率，以深入探讨批发金融端央行数字货币的涵义，并对我国数字人民币的推广，以及如何在批发金融端激励参与运营的商业银行提出了相应的建议。

但是，基准模型也存在一定不足，比如没有刻画银行间市场的市场利率，且来自央行贷款便利的贷款主要取决于抵押品的多少，并未与作为银行自有资金持有的央行数字货币之间形成真正的替代关系，也因此利率走廊的上限利率所起的作用较为有限。为此，我们通过在银行间市场之后引入实物资本市场，对基准模型进行了拓展，也由此将对银行的刻画从批发金融端的银行间市场延伸到包含实物资本的贷款和投资领域。扩展模型中的银行，可以理解为融银行与企业投资的角色于一体，类似于Keister and Sanches (2023)中对银行的刻画。具体来说，我们进一步细化了银行间市场上的交易，刻画了需要额外资金的壹

型银行在匹配和未匹配两种情况下的融资情况：那些能在银行间市场上搜寻到交易对手（零型银行）的银行，以债券作为抵押品，直接向持有冗余资金的零型银行抵押融资；而那些无法搜寻到交易对手的，则以债券作为抵押品，向央行申请常备便利贷款。接着，这两种不同融资安排下的壹型银行所代表的企业家，以央行数字货币作为内源融资，加上获取的外源融资（抵押贷款或央行常备便利贷款），进入第二阶段，购买实物资本，以备在第三阶段投入实际生产。

扩展模型在两个方面都有新的结果。第一，央行数字货币利率 i_c 依然在上行利率和下行利率区间都有效果且作用不尽相同，以及 i_c 上升能一定程度上起到增加实物资本投资的作用。这一结果初看似乎是反直觉的，但也正体现了央行数字货币利率 i_c 与传统货币政策利率的核心区别：传统货币政策利率上升，一般会降低实物资本投资，但央行数字货币利率 i_c 上调提供了一种直达式货币政策，可以理解为央行对货币持有者的补贴^⑥。因此，对持有央行数字货币的金融机构而言， i_c 上升意味着其持有的资金增加，同时净融资成本下降，在一定的条件下，可以带来其对企业放款的增加。这意味着，从批发金融端延伸到实体经济领域后，央行数字货币利率的政策效果更加全面，显示出更强大的政策工具效应。第二，利率走廊的上限利率 i_ρ 能够充分地发挥政策效应， i_ρ 上升对两类实体投资产生了再分配效应。具体来说，当 i_ρ 上升时，直接效应是银行会减少向央行申请常备便利贷款；常备便利贷款与央行数字货币资金持有存在替代效应，前者下降，使得作为替代的央行数字货币资金持有上升。 i_ρ 对银行间市场抵押贷款的影响稍微复杂一些，其在抵押贷款价格（即利率 i_m ）和资金额度（即 l_m ）两个维度上都会起作用。一方面，由于常备便利贷款与抵押贷款的替代关系， i_ρ 上升使得后者的额度上升；另一方面，作为走廊上限利率， i_ρ 上升的传导效应导致“水涨船高”，银行间市场的利率 i_m 也随之上升，因此抑制市场上的贷款额度。一般均衡时的净效应，是 i_ρ 的传导效应大于替代效应，银行间市场的融资额度 l_m 下降。最终， i_ρ 的上升，对银行间市场融资与央行常备便利贷款所对应的实物投资，产生了再分配效应：有利于前者，而不利于后者。

本文余下内容结构如下：第二部分是文献述评与本文创新，第三部分是模型设定，第四部分是基准模型和均衡分析，第五部分是引入了实物资本的扩展模型和相关分析，最后部分讨论并总结全文。

二、文献述评与本文创新

本部分主要是文献述评，并通过述评进一步确认本文的创新之处。具体来说，本文与以下四个方向的文献相关。

第一是关于利率走廊和银行间市场的文献。本文基于新货币主义的框架对利率走廊进行研究，而这支文献中Berentsen and Monnet（2008）最先构建了新货币主义的利率走廊模型，并发现优配置下的利率走廊的宽度大于零，以及利率走廊的中点和宽度都是重要的货币政策工具。在Berentsen and Monnet（2008）先驱性的工作下，不少学者基于他们的研究对利率走廊的其他方面展开了更多研究：Martin and Monnet（2011）比较了利率走廊和利率下限两种不同的货币政策操作体制下的社会福利；Bech and Monnet（2016）在利率走廊的模型中加入了准备金约束，进而研究了超额准备金如何影响银行间市场的流动性、交易量与利率分散化程度。在银行间市场交易方面，Duffie et al.（2005）基于搜寻与匹配的框架研究了银行间市场上的资产定价，而Lagos and Zhang（2019）则研究了货币政策如何影响银行间市场的定价和流动性。我们对于利率走廊的刻画一定程度上受到了这支文献的启发，但更具特色地融入了中国银行间市场交易的特征并进一步拓展到对实物资本市场的研究。此外，本文与上述文献的核心区别在于研究主题。这些文献主要聚焦于利率走廊下货币政策操作体系的最优设计，或者银行间市场的资产定价和流动性问题，而本文聚焦于利率走廊操作体制下引入付息的央行数字货币以及央行数字货币利率与走廊上限和下限利率的互动关系等。尤其跟Berentsen and Monnet（2008）相比，我们通过一个更简洁的包含货币（央行数字货币）和债券的基准模型，即可清晰地显示利率走廊下货币政策的传导机制；更重要的是，我们的研究焦点是央行数字货币，且基准和扩展模型都显示，央行数字货币利率无论在上行利率还是下行利率区间，都能起到很好的政策传导效果，也基于批发金融端视角对我国数字人民币的推广提出了切实的政策建议。

第二是关于央行数字货币的文献。近年来相关文献增长很快，代表性文献包括Andolfatto（2021），Chiu et al.（2023），Keister and Sanches（2023）以及Dong and Xiao（2023）等。这支文献一般以付息货币来刻画央行数字货币，且大部分基于新货币主义的框架进行研究，研究的框架和范式有别于传统的现金先行模型（Cash-in-Advance Model, CIA模型）和内含货币效用模型（Money-in-Utility Model, MIU模型），因为传统货币模型中货币是不付息的。本文在对央行数字货币进行建模时，一定程度上受到这些文献央行数字货币刻画的启发。然而，本文的研究主题与这些文献存在较大的差别。具体而言，这些文献研究了引入零售型央行数字货币对商业银行和企业投资的影响，本文则聚焦于批发金融端，研究引入付息的央行数字货币对银行间市场交易的影响。此外，本文还探讨了利率走廊体制下的引入央行数字货币后不同利率的政策调控效果，为央行数字货币研究领域拓展了新的研究视角。近年来国内关于数字人民币的文章和相关研究也呈快速增长之势（姚前，2017，2018，2019；王鹏等，2020，2022；刘凯等，2021，2023；张乐和王淑敏，2021；肖筱林，2022；赵恒和周延，2022；肖筱林等，2023）^⑦。这些文献对于央行

数字货币从理论和中国现实的角度进行了多维度的刻画，在一定程度上加深了我们对央行数字货币与中国现实之间关联的理解。但本文的研究主题和研究方法则与这些文献不同：在主题上，我们聚焦于央行数字货币对利率走廊这一货币政策工具的影响；在方法上，我们基于新货币主义的理论框架，研究利率走廊体制下引入付息的央行数字货币的影响，总体上属于前瞻性理论研究。

第三是关于负利率的研究。现有研究中以实证研究为主，主要关注负利率如何影响商业银行，以及如何影响货币政策传导。肖筱林（2023）对负利率作为发达经济体推行的一种非常规货币政策进行了全面述评。关于对商业银行的影响，Demiralp et al.（2017）发现欧洲央行在2014年引入负利率之后，银行显著调整了他们的资产负债表；Heider et al.

（2019）指出欧洲央行引入的负利率导致欧元区的银行承担更多风险，更少向外借款，更大程度上依赖存款提供的资金；Amzallag et al.（2019）使用意大利的数据发现，负利率之下不同资产结构的银行支付不同的存款利率。熊启跃和王书朦（2020）基于2004—2017年欧洲负利率地区102家主要上市银行的年度非平衡面板数据对负利率环境下银行净息差的调整机制进行了研究，认为负利率政策的实施对银行业净息差产生了显著的负面影响。至于对货币政策传导的影响，Altavilla et al.（2018）发现负利率之下传统货币政策工具的效果得到了加强而非减弱。在结构性理论研究方面，Eggertsson et al.（2017）基于新凯恩斯主义模型研究了政策利率的传导，发现在负利率下政策利率的传导渠道破裂，而Berentsen et al.（2020）利用新货币主义的框架研究了负利率对银行融资支持的实体投资的长期影响，发现负利率会扭曲投资决策并降低产出和社会福利。这些文献对于负利率进行了多个角度的详尽刻画，从而加深我们对利率走廊下负利率典型特征的理解，即负利率本质体现了使用存款便利的负收益，该收益甚至使得直接持有法币有更高的名义回报，基于此，我们可以通过较为简单的建模方式对负利率进行刻画。与这些文献相比，本文中“下行利率区间”概念涵义更为广泛，既包括绝对意义上的负利率（ $i_d \leq 0$ ），也包含相对意义上的负利率（ $0 \leq i_d \leq i_c$ ）。更为重要的差别在于研究对象的选择，本文聚焦于利率走廊体制下的央行数字货币，探讨了央行数字货币利率在经济下行情况下提供新的实施负利率政策的工具选择。此外，相比于现有文献更多聚焦于实证研究，本文总体属于前瞻性理论研究，通过理论模型的构建和分析，能够对尚未发生也没有可得数据的政策效果做出一些前瞻性推演。

最后，是关于中国利率市场化和货币政策传导效果的文献。国内学者通过多种理论与实证方法对于此主题进行了丰富的研究。理论方面，牛慕鸿等（2015）在利率走廊建设之初对利率走廊的运行机制及政策效果进行了前瞻性推演并给出相应建议。刘明康等

（2018）构建了一个内部资金转移定价框架下的银行利率决定模型，发现基准利率、市场

溢价和政策溢价是影响利率决定的重要外部因素，且利率市场化改革能够提升贷款利率在存款定价中的作用，提高外部因素影响的有效性。侯成琪和黄彤彤（2020）则构建了一个包含银行间市场的DSGE模型，对借贷便利类货币政策工具的传导机制和传导效果进行了理论和实证研究。陆军和黄嘉（2021）通过多部门局部均衡模型研究利率市场化程度和货币政策银行利率传导之间的关系，并且基于数据进一步验证了模型，发现仍需要进一步改革以疏通货币政策传导。实证方面，邓伟等（2021）利用我国借贷便利工具创新这一准自然实验，考察了借贷便利工具对商业银行贷款利率的影响；研究发现，借贷便利工具创设后，商业银行持有的合格担保品规模越大，其贷款利率越低，且这一效应随着时间推移逐渐增强。这些重要的研究多数聚焦于中国的利率市场化及相关问题，但也部分涉及利率走廊，加深了我们对于中国利率走廊的现状、发展以及政策效应的理解。而本文的核心研究焦点是央行数字货币，这也是本文在这支文献基础上的进一步扩展与发展。此外，这些研究多使用了传统的宏观经济学方法对中国利率走廊与利率市场化进行刻画，结合稳健的参数校准支持，能够起到非常好的经济学预测与政策建议的作用。本文则是基于新货币主义框架构建利率走廊作用的微观基础，并在此基础上进一步考虑宏观层面的一般均衡，从而与现有文献形成了很好的互补。

综上所述，与现有文献相比，本文的创新与贡献可总结为三点。首先是基础货币理论的研究创新。通过构建一个包含货币（即央行数字货币）和债券的模型，本文为利率走廊这一宏观货币政策操作体制提供了微观基础，并清晰揭示了该体制下不同利率调整所产生的货币政策传导的机制，尤其是央行数字货币利率调整提供了一种直达式的货币政策，可以理解为央行对货币持有者的一种补贴（利率为正时）或者一种税收（利率为负时），因此提供了一种崭新的、甚至更强大的直达式货币政策工具。研究与拓展宏观货币理论的微观基础也正是当前货币经济学领域一个方兴未艾的前沿分支。这一基础货币理论的创新是具有普适性的，对于实施利率走廊体制的经济体都有相应的理论启发。其二是对批发金融端央行数字货币的研究。本文尤其基于中国利率走廊和银行间市场的重要特征事实，研究利率走廊体制下引入付息的央行数字货币对货币政策传导的影响，以及央行数字货币利率与利率走廊中原有利率组合的互动。这部分的创新，既有对批发金融端央行数字货币理论研究的普适性意义，也有针对我国国情的建模和分析的中国特色。其三是政策建议上的创新。本文基于逻辑严密的宏观建模和数值模拟分析，一方面，针对我国利率走廊政策实践中下限利率调整极不频繁的现状，指出央行数字货币利率有望成为一种新的货币政策工具，在必要时起到利率走廊下限的作用；另一方面，基于目前数字人民币在零售端试点的现状和挑战，建议可通过在批发端对央行数字货币单独付息来激励商业银行推广数字人民币。这部分的创新直接针对我国利率走廊和数字人民币的相关议题。

三、模型设定

在基准模型里，我们基于Lagos and Wright（2005）这一新货币主义的理论框架，引入付息的央行数字货币，进行批发金融视角的研究。这里借鉴了Berentsen et al.（2007）对银行的刻画来刻画央行，即作为“银行的银行”的央行如何通过常备借贷便利，为需要额外资金的金融机构（后简称“银行”）提供便利贷款，并吸收银行的冗余资金作为便利存款。

我们构建了一个无限期离散时间的动态模型，每期之间的贴现因子为 β 。每期包括两个阶段：第一阶段（S1）是一个去中心化的银行间市场（DM），流动性冲击实现之后，银行搜寻交易对手，按需申请央行的常备借贷便利；第二阶段（S2）是一个完全竞争的中央化的清算市场（CM），银行通过一个通用的CM商品 x_t 进行清算，要么清偿贷款本息，要么获取存款或央行数字货币利息。基准模型的时间线，如图2所示。以下按照S1和S2较为详细地解释事件发生的先后顺序。

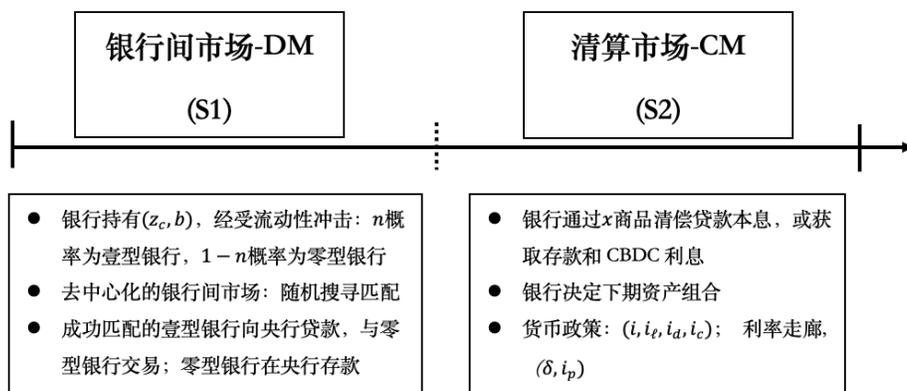


图 2 基准模型时间线

每期的开始，代理人持有央行数字货币和债券的资产组合 (z_c, b) ，并受到随机且独立的流动性冲击：以 n 的概率，一家银行成为壹型银行（以下标1来代表），想要“消费”但不“生产”；以 $(1 - n)$ 的概率，成为零型银行（以下标0来代表），只“生产”但不“消费”。这里的“消费”和“生产”都是象征性的说法，重点是刻画两类银行缺乏双重需求巧合(lack of coincidence-of-wants)，从而佐证央行数字货币在批发端作为交易媒介的必要性。以批发金融的视角来看，壹型银行代表银行间市场上需要额外流动性从而向央行申请常备便利贷款的金融机构，而零型银行代表有冗余资金、可以选择将其存入央行常备存款便利的金融机构。具体来说，我们用随机搜寻与匹配的框架来刻画银行间市场上存在的摩擦： α 衡量一家银行在银行间市场成功找到交易对手完成交易的可能性：一家银行以 α 的概率与另一家银行搜寻与匹配，成功匹配后可以在该市场上进行交易；以 $(1 - \alpha)$ 的概率，银行无法

匹配到交易对手，只能直接进入第二阶段的CM。我们在附录A介绍了我国质押式回购的询价交易的特征事实，就是具有“搜寻与匹配”特色的银行间交易。

在银行间市场上，成功匹配的壹型银行可以通过央行的常备借贷便利窗口，获取贷款以完成交易^⑥。具体来说，壹型银行以政府债券 b 作为抵押，向央行申请常备便利贷款 ℓ ，利率为 i_ρ 。对应地，零型银行可以选择将冗余资金存放在央行的常备存款便利，利率为 i_d 。央行数字货币支付 $i_c < i_\rho$ 的利率，零型银行是否存款以及存多少，取决于 i_d 与 i_c 的大小：只有在 $i_d \geq i_c$ 时，存款对零型银行才是有利可图的，这是我们定义的上行利率区间；而当 $i_d < i_c$ 时，零型银行选择不存款，这是我们定义的下行利率区间。

特别要指出的是，我们的模型与Berentsen et al. (2007)在此处的设定不尽相同，他们模型中的银行仅仅在流动性冲击和银行间市场交易开始之间短暂开放，而我们模型中的中央银行（常备借贷便利）在整个S1当中始终保持开放。这一设定符合我国常备借贷便利窗口在整个银行间市场交易期间都保持开放的事实（详见附录A），而该窗口与银行间市场交易存在的时间差，也体现了央行可在必要时为金融机构提供流动性，发挥“银行的银行”的作用。

在S2阶段，所有代理人都可以消费或者生产CM商品 x_t ，以清算S1中产生的借贷关系：壹型银行向央行偿还贷款本息，并赎回抵押品；零型银行则获取便利存款的利息。同时，所有的银行重新配置资产组合，以进入下一期。在 t 期，壹型和零型银行的偏好和效用函数分别为 $\mathcal{U}(q_t, x_t) = u(q_t) + x_t$ 及 $\tilde{\mathcal{U}}(q_t, x_t) = -c(q_t) + x_t$ ，其中 q_t 指代 t 期DM交易的商品，对应着现实中银行间市场的交易量， $u(\cdot)$ 与 $c(\cdot)$ 分别对应该商品产生的价值与提供该商品的成本； x_t 指代CM交易的商品，也是模型经济体中的实物计价单位。

模型中有两种资产，一种是央行数字货币 $m_{c,t}$ ，另一种是政府债券 b_t 。在 t 期，央行以 ϕ_t 的实物价格（即以CM商品 x_t 衡量）发行新的货币，并在期末按照名义利率 i_c 对其付息，且可以有 $i_c \geq 0$ 或 $i_c < 0$ ； b_t 是短期政府债券，存续一期，政府在每期的S2阶段以 ψ_t 的价格发行债券，每单位的债券在下一期的S2阶段支付1单位的CM商品 x_t 。因此，我们可以定义债券的名义利率 i_b 如下：

$$1 + i_b = \frac{1/\phi_{t+1}}{\psi_t/\phi_t} = \frac{\phi_t}{\phi_{t+1}\psi_t}, \quad (1)$$

在稳态时，货币净增长率等于通货膨胀率 π ，即 $\phi_t/\phi_{t+1} = 1 + \pi$ 。缺乏双重需求巧合，以及有限承诺或缺乏公共纪录等摩擦使得信贷不可行，意味着银行间市场交易中参与者只接受以央行数字货币作为唯一的交易媒介。至于政府债券 b_t ，则是获取央行常备贷款便利时必须提供的抵押品。在均衡分析中，我们主要聚焦于稳态解和相关分析，因此下文都省略时间下标 t 。

政府是财政部与央行的联合体。不失一般性地，我们假设每期政府收支平衡，货币政策带来的变化可以通过财政政策的调整来达到平衡，也因此本文得以聚焦于货币政策这一研究重点。政府的预算约束方程是：

$$\phi(M - M_-) + \psi B + \phi(i_\ell L - i_d D) = G + T + B_- + \phi i_c M. \quad (2)$$

我们用下标“ $-$ ”表示上一期的变量，如 M_- 代表上一期的货币供应量。等式左侧为政府的收入，各项依次为铸币税、发行新债券所得和央行便利窗口的净收入，其中 B 为本期的债券发行总量， L 为央行便利贷款总量， D 为便利存款总量。等式右侧为政府的支出，依次为政府购买 G 、一次性转移支付 T 、上期到期的债券 B_- 和需要支付的央行数字货币利息。

我们讨论三种货币政策工具。第一种为常规的货币增长率 μ ，定义为：

$$\frac{M}{M_-} = 1 + \mu, \quad (3)$$

在稳态时， $\mu = \pi$ ， π 为通货膨胀率。基于费雪恒等式， $1 + i = (1 + \pi)/\beta$ ，稳态时调节货币增长率等价于调节名义利率 i 。

第二种是利率走廊相关的政策工具，并可大致分为对称和非对称调整两种工具。一种是央行可以对称地调整走廊的宽度 $\delta \equiv i_\ell - i_d$ ，或走廊的中点即政策利率 $i_p \equiv (i_\ell + i_d)/2$ 。另一种则是单独调整走廊的上限 i_ℓ 或下限 i_d ，即进行非对称的调整。

最后，当央行发行付息的央行数字货币时，利率 i_c 也可能成为一种独立的货币政策工具。此时， i_c 作为一种新的政策工具会如何与已有的利率走廊相关利率进行互动，是值得研究的重要问题。例如，当 $i_d < i_c$ 时，存储超额准备金的收益低于成本，此时央行常备便利存款的实际收益为负，银行会理性地选择不存入。如果引入实物资本，下行利率的效果可能还会通过商业银行的借贷业务进一步传递到实体经济（见第五部分的扩展模型）。与之类似，实际借贷成本 $i_\ell - i_c$ 同样会受到 i_c 影响。

四、基准模型

从时间线来看，我们从当期S2阶段开始，随后进入下一期的S1，分别用 W 和 V 代表值函数。在当期S2，一家银行持有央行数字货币与债券的资产组合 (z_c, b) ，其中 $z_c \equiv \phi m_c$ 为央行数字货币的实际余额，银行可能持有存款 d （如果是零型银行）或者贷款 ℓ （如果是壹型银行），因此，银行的价值函数为：

$$W(z_c, b, d, \ell) = \max_{x, \hat{z}_c, \hat{b}} \{x + \beta \mathbb{E}V(\hat{z}_c, \hat{b})\} \\ \text{st. } x + (1 + \mu)\hat{z}_c + \psi \hat{b} = (1 + i_c)z_c + b + (1 + i_d)d - (1 + i_\ell)\ell + T. \quad (4)$$

银行选择消费 x 与下一期的资产组合 (\hat{z}_c, \hat{b}) ，在预算约束(4)下，来最大化S2的值函数，即

当期消费 x 与下一阶段的S1的折现期望值函数 $\beta\text{EV}(\hat{z}_c, \hat{b})$ 之和。预算约束(4)的左侧是银行的总支出，包括当期消费 x ，以及持有下一期资产组合 (\hat{z}_c, \hat{b}) 的支出，而右侧则为其总的净收入，包括当期资产组合 (z_c, b) 的回报以及从央行借贷便利中获取的净收益 $(1+i_d)d - (1+i_\ell)\ell$ ，以及一次性转移支付 T 。当银行为壹型时，银行向央行贷款而不会有存款， $d=0$ ；当银行为零型时，银行在央行存款而不向央行贷款， $\ell=0$ 。将预算约束中的 x 代入目标函数，

$$W(z_c, b, d, \ell) = (1+i_c)z_c + b + (1+i_d)d - (1+i_\ell)\ell + T + \max_{\hat{z}_c, \hat{b}} \{-(1+\mu)\hat{z}_c - \psi\hat{b} + \beta\text{EV}(\hat{z}_c, \hat{b})\}. \quad (5)$$

根据包络条件，我们可以得到：

$$\frac{\partial W}{\partial z_c} = 1+i_c, \quad \frac{\partial W}{\partial b} = 1, \quad \frac{\partial W}{\partial d} = 1+i_d, \quad \frac{\partial W}{\partial \ell} = -(1+i_\ell).$$

资产配置的一阶条件是：

$$\hat{z}_c: 1+\mu = \beta \frac{\partial \text{EV}(\hat{z}_c, \hat{b})}{\partial \hat{z}_c} \quad (6)$$

$$\hat{b}: \psi = \beta \frac{\partial \text{EV}(\hat{z}_c, \hat{b})}{\partial \hat{b}}. \quad (7)$$

在下一期的开始，随机冲击将银行转化为壹型或者零型，值函数的期望为：

$$\text{EV}(\hat{z}_c, \hat{b}) = nV_1(\hat{z}_c, \hat{b}) + (1-n)V_0(\hat{z}_c, \hat{b}), \quad (8)$$

其中 V_1 和 V_0 分别对应壹型银行和零型银行的DM值函数：

$$\begin{aligned} V_1(\hat{z}_c, \hat{b}) &= \alpha[u(q) + W(\hat{z}_c + \ell - p, \hat{b}, 0, \ell)] + (1-\alpha)W(\hat{z}_c, \hat{b}, 0, 0) \\ &= \alpha[u(q) - (1+i_c)p - (i_\ell - i_c)\ell] + W(\hat{z}_c, \hat{b}, 0, 0) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V_0(\hat{z}_c, \hat{b}) &= \alpha[-c(q) + W(\hat{z}_c + p - d, \hat{b}, d, 0)] + (1-\alpha)W(\hat{z}_c - \tilde{d}, \hat{b}, \tilde{d}, 0) \\ &= \alpha[-c(q) + (1+i_c)p + pi_\Delta] + W(\hat{z}_c - \tilde{d}, \hat{b}, \tilde{d}, 0). \end{aligned} \quad (10)$$

其中 (q, p) 为交易条件， $i_\Delta \equiv \max\{i_d - i_c, 0\}$ 。表达式(9)的含义是，一家壹型银行以 α 的概率成功匹配一个交易对手，通过从自有央行数字货币与央行贷款中支出 p ，来得到 $u(q)$ 的价值，从而匹配上带来的总价值为 $[u(q) + W(\hat{z}_c + \ell - p, \hat{b}, 0, \ell)]$ ；而若其未匹配上（概率为 $1-\alpha$ ），其资产不产生变化，得到 $W(\hat{z}_c, \hat{b}, 0, 0)$ 的价值。类似地，表达式(10)意味着，零型银行在匹配时提供 q 单位DM商品，从壹型银行获得 p 的支付，之后决定以 d 的额度存入央行常备存款便利，得到总价值为 $[-c(q) + W(\hat{z}_c + p - d, \hat{b}, d, 0)]$ ；而未匹配上时，由于所持有流动性不同，其会选择存款额度为 \tilde{d} 并最终得到 $W(\hat{z}_c - \tilde{d}, \hat{b}, \tilde{d}, 0)$ 的总价值。零型银行在常备存款便利的存款决策主要取决于 $\max\{i_d - i_c, 0\}$ 大小的影响。当 $i_c \leq i_d$ 时，实际存款利率为非负，零型银行会理性地存入全部资金，且若该银行在银行间市场匹配成功，有 $d = \hat{z}_c + p$ ；如果该银行没有匹配，则 $\tilde{d} = \hat{z}_c$ 。当 $i_c > i_d$ 时，实际存款利率

为负，零型银行不会存入任何资金，即 $\bar{d} = d = 0$ 。我们用 $p = d - \bar{d}$ 对成功匹配带来的额外存款量，而银行因此获得的额外剩余则可以表示为 $(d - \bar{d})(i_d - i_c) = pi_\Delta$ 。

(一) 议价

在第一阶段，给定双方的资产配置，匹配上的交易双方通过Kalai议价来确定交易条件。其中壹型银行的议价能力设为 $\theta \in (0,1)$ ，零型银行的议价能力设为 $1 - \theta$ 。议价问题如下：

$$\max_{q,p,\ell} \{u(q) - (1 + i_c)p - (i_\ell - i_c)\ell\} \quad (11)$$

$$\text{st. } \frac{u(q) - (1 + i_c)p - (i_\ell - i_c)\ell}{u(q) - c(q) - (i_\ell - i_c)\ell + pi_\Delta} = \theta \quad (12)$$

$$p \leq \hat{z}_c + \ell \quad (13)$$

$$(1 + i_\ell)\ell \leq \chi \hat{b}. \quad (14)$$

这里的目标函数（11）为壹型银行在交易中获得的剩余，（12）是Kalai议价的界定，即壹型银行的剩余占总剩余的 θ 比例；（13）是预算约束，要求总支付 p 不超过壹型银行持有的 \hat{z}_c 加上常备便利贷款 ℓ ；（14）是贷款的抵押约束，要求贷款的本息 $(1 + i_\ell)\ell$ 不高于债券所能提供的抵押价值 $\chi \hat{b}$ ，其中 $\chi \in (0,1]$ 是债券的抵押率。

从(12)中，我们可以得到，

$$p = \frac{(1 - \theta)u(q) + \theta c(q) - (1 - \theta)(i_\ell - i_c)\ell}{1 + i_c + \theta i_\Delta}. \quad (15)$$

将 p 代入，构建如下的拉格朗日函数：

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(q, \ell, \lambda_1, \lambda_2) = & u(q) - c(q) - (i_\ell - i_c)\ell + \frac{(1 - \theta)u(q) + \theta c(q) - (1 - \theta)(i_\ell - i_c)\ell}{1 + i_c + \theta i_\Delta} i_\Delta \\ & + \lambda_1 \left[\hat{z}_c + \ell - \frac{(1 - \theta)u(q) + \theta c(q) - (1 - \theta)(i_\ell - i_c)\ell}{1 + i_c + \theta i_\Delta} \right] + \lambda_2 [\chi \hat{b} - (1 + i_\ell)\ell], \end{aligned} \quad (16)$$

注意这里我们将最大化的目标改为总剩余，由于壹型银行的剩余和总剩余之间的比例是固定的，这样的转换是成立的。对应 $(q, \ell, \lambda_1, \lambda_2)$ 的一阶条件分别为：

$$\xi(q) = \frac{\theta(\lambda_1 - i_\Delta)}{1 + i_c + \theta i_\Delta} \quad (17)$$

$$i_\ell - i_c = (\lambda_1 - i_\Delta) \frac{(1 - \theta)(i_\ell - i_c)}{1 + i_c + \theta i_\Delta} + \lambda_1 - \lambda_2(1 + i_\ell) \quad (18)$$

$$\lambda_1 \left[\hat{z}_c + \ell - \frac{(1 - \theta)u(q) + \theta c(q) - (1 - \theta)(i_\ell - i_c)\ell}{1 + i_c + \theta i_\Delta} \right] = 0 \quad (19)$$

$$\lambda_2 [\chi \hat{b} - (1 + i_\ell)\ell] = 0, \quad (20)$$

这里我们定义了 $\xi(q) \equiv \theta[u'(q) - c'(q)] / [(1 - \theta)u'(q) + \theta c'(q)]$ ，易证 $\xi'(q) < 0$ 。 $\lambda_1 \geq 0$ 与 $\lambda_2 \geq 0$ 为拉格朗日乘子。

(二) 均衡分析

我们定义一般均衡如下：

定义1 给定政策参数 G, T 和 $\{B, i, i_d, i_\ell, i_c\}$ ，稳态时的货币均衡是一系列内生变量 $\{q, p, \ell, d, \tilde{d}, \hat{z}_c, \hat{b}, i_b\}$ ，同时满足三方面的条件：（i）银行间市场议价解；（ii）零型银行的最优存款决策；（iii）资产市场出清。

将 V_1 与 V_0 的表达式（9）和（10）代入（8），可重写DM值函数的期望为：

$$\begin{aligned} EV(\hat{z}_c, \hat{b}) = & n\{\alpha u(q) - (1 + i_c)p - (i_\ell - i_c)\ell\} + W(\hat{z}_c, \hat{b}, 0, 0) \\ & + (1 - n)\{\alpha - c(q) + (1 + i_c)p + pi_\Delta\} + W(\hat{z}_c - \tilde{d}, \hat{b}, \tilde{d}, 0). \end{aligned} \quad (21)$$

一阶条件（6）和（7）可以重写为：

$$\frac{1 + \mu}{\beta} = n\alpha \left[u'(q) \frac{\partial q}{\partial \hat{z}_c} - (1 + i_c) \frac{\partial p}{\partial \hat{z}_c} - (i_\ell - i_c) \frac{\partial \ell}{\partial \hat{z}_c} \right] + (1 + i_c) + (1 - n)i_\Delta \quad (22)$$

$$\frac{\psi}{\beta} = n\alpha \left[u'(q) \frac{\partial q}{\partial \hat{b}} - (1 + i_c) \frac{\partial p}{\partial \hat{b}} - (i_\ell - i_c) \frac{\partial \ell}{\partial \hat{b}} \right] + 1. \quad (23)$$

基于经济学意义的考虑，我们重点关注满足以下条件的一般均衡：（i）货币均衡，即 $\hat{z}_c > 0$ ；（ii）非最优资源配置，即 $\xi(q) > 0$ ，也因此央行数字货币能在边际上提供流动性溢价。因此，我们集中关注预算约束和抵押约束都收紧的情况，且只考虑货币均衡，此时 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$ 。一般均衡的条件可归纳如下：

$$\frac{i - i_c}{1 + i_c} = n\alpha\xi(q) \left[1 + \frac{\theta i_\Delta}{1 + i_c} \right] + n\alpha \frac{\theta i_\Delta}{1 + i_c} + (1 - n) \frac{i_\Delta}{1 + i_c} \quad (24)$$

$$\frac{i - i_b}{1 + i_b} = n\alpha\theta\chi \left[\frac{\xi(q)}{\theta} \frac{1 + \theta(i_c + i_\Delta) + (1 - \theta)i_\ell}{1 + i_\ell} + \frac{i_\Delta - (i_\ell - i_c)}{1 + i_\ell} \right] \quad (25)$$

$$(1 - \theta)u(q) + \theta c(q) = (1 + i_c + \theta i_\Delta)\hat{z}_c + [1 + i_c + \theta i_\Delta + (1 - \theta)(i_\ell - i_c)]\ell \quad (26)$$

$$\ell = \frac{\chi \hat{b}}{(1 + i_\ell)} \quad (27)$$

$$\hat{b} = B_+. \quad (28)$$

上述（24）和（25）分别是央行数字货币和债券的需求方程，等式左侧都代表着每新增一单位的资产（央行数字货币或债券）所带来的边际成本，而右侧都代表着新增一单位资产所带来的边际收益。例如，（24）右侧第一项代表央行数字货币为银行间市场交易提供的流动性溢价，第二项代表成功匹配后零型银行获取的额外便利存款中央行数字货币带来的边际收益，以及第三项代表零型银行自身持有的央行数字货币转换为便利存款的边际收益（后两项都取决于 i_Δ ）。（26）是银行间市场的议价解；（27）是收紧的抵押约束，因而银行能获取的常备便利贷款 ℓ 主要由其所持有的抵押品即 \hat{b} 所决定，当然还受到抵押比例 χ 和上限利率 i_ℓ 的影响。最后（28）是债券市场出清条件。因此，通过上述五个方程，我们可以解得

$\{q, \hat{z}_c, \ell, \hat{b}, i_b\}$ 。但是，一般均衡的存在与唯一性需满足以下定理1的条件。

定理1 存在外生参数 $\Lambda_0, \Lambda_1, \Lambda_2$ 及 \bar{q} 使得：当 $i \in (\Lambda_1 + \Lambda_0, \Lambda_2 + \Lambda_0]$ 且

$$B < \frac{1 + i_\ell}{1 + i_c + \theta i_\Delta + (1 - \theta)(i_\ell - i_c)} \frac{v(\bar{q})}{\chi}, \quad (29)$$

上述一般均衡解存在且唯一。

证明和相关符号定义参见附录B。

(三) 政策分析

接着，我们考察政策参数的变化对 $\{q, p, \hat{z}_c, i_b, \ell\}$ 等变量的政策效应，即对银行间市场交易量、银行间市场的支付额、央行数字货币持有量、债券利率和央行常备便利贷款额度的影响。一方面，我们聚焦于改变不同政策利率的效果，包括调整央行数字货币利率 i_c 、非对称地调整利率走廊的上限和下限利率即 $\{i_\ell, i_d\}$ 的政策效果，也讨论改变名义利率 i 的影响，分析结果见定理2。另一方面，我们也研究了改变利率走廊宽度 δ 和政策利率 i_p 的政策效果，结果见定理3。应该说，定理2和3的政策分析，大部分都有清晰的解析解，显示了基准模型简洁但强大的理论解释力；对于部分不清晰的结果，我们还通过较贴近中国现实的参数取值和常规函数形式的选择，在附录D和E里提供了数值模拟结果，并在两个定理里做了简要说明。数值模拟结果，也相当于从定量的角度对政策效果进行了补充分析。另外，附录D和E中，我们还做了其他参数取值下的稳健性检验，发现结果不变。

定理2 基准模型中调整不同利率的效果如下（括号中补充说明数值模拟的结果）：

1. 调节央行数字货币利率 i_c 在上行与下行利率区间都有效果，定性的方向一致，即 i_c 上升都会使得银行间市场交易量 q 上升、债券利率 i_b 上升，以及对 \hat{z}_c 和 p 的影响不确定（数值模拟结果为上升）；但定量的影响存在差异（下行利率区间下对 q 的调节效果更好）。
2. 调节利率走廊上限 i_ℓ 的效果是， i_ℓ 上升使得便利贷款 ℓ 下降，银行的央行数字货币持有量 \hat{z}_c 上升，总支付 p 下降，以及债券利率 i_b 上升。
3. i_d 仅在上行利率区间有效果， i_d 上升使得银行间市场交易量 q 上升、债券利率 i_b 上升，对 \hat{z}_c 和 p 的影响不确定（数值模拟结果均为上升）。
4. 名义利率 i 上升使得银行间市场交易量 q 下降， \hat{z}_c 和 p 都下降，对 i_b 的影响不确定（数值模拟结果为上升）。

证明和数值模拟结果分别参见附录C和D。

定理2的核心是新增的央行数字货币利率 i_c 这一政策工具。具体而言，当央行数字货币利率 i_c 上升时，持有央行数字货币的回报增加，能够支持的银行间市场交易量 q 也随之

增加，该机制在上行和下行利率区间从定性角度来看是相同的；不过，附录D的数值分析显示，下行利率区间时 i_c 上升对 q 的调节效应更加明显（见后文更多解释）。但是， i_c 上升也意味着央行数字货币支付能力增加，所以央行数字货币的持有量可能还有所下降，一正一反的效应加总，最终 i_c 上升对 \hat{z}_c 的效应无法明确；类似地，对总支付额度 p 的效应也不明确。但是，附录D的数值分析显示 i_c 上升对 \hat{z}_c 和 p 的效应是上升的。注意， i_c 上升对贷款额度 ℓ 没有影响，因为抵押约束收紧时， ℓ 只取决于抵押物的价值。至于对债券利率 i_b 的影响， i_c 上升意味着央行数字货币相对更有吸引力，从而对债券的需求下降，债券价格下降，最终债券的利率 i_b 上升。类似地，上述作用机制在上行和下行利率区间下都是一样的。

调节利率走廊的上限 i_ρ 而不改变其他利率，是利率走廊下的非对称调整方式。 i_ρ 上升时，给定抵押品 B ，其能够担保的贷款额度 ℓ 下降； ℓ 的减少促使银行增加央行数字货币持有量以弥补流动性的不足，因此 \hat{z}_c 上升；一般均衡的结果显示，央行数字货币的上升无法完全弥补 ℓ 的减少，最终总支付 p 下降；既然抵押约束收紧时，贷款的本息等于可用于抵押的债券价值，而 i_ρ 上升导致 ℓ 下降，这也意味着对债券的需求下降，于是价格下降，利率 i_b 上升。

调节利率走廊的下限 i_d ，是利率走廊下的另一种非对称调整方式，其仅在上行利率区间有效。上行利率意味着 $i_d \geq i_c$ ，而 i_d 上升意味着存入央行借贷便利的款项获得更高的回报，因此会激励银行持有更多的 \hat{z}_c ，也因此能够支持更多的 q 交易量。而至于 i_d 上升对 i_b 的影响：从(25)可以看出，当 q 上升时，债券的流动性溢价下降，这也意味着等式左边的 i_b 必须上升；另一方面，更高的 i_d 意味着将款项存放在存款便利更加有利可图，从而银行愿意持有更多的央行数字货币（以在有冗余资金情况下存入央行），从而减少了对债券的需求，债券价格进一步下降，利率 i_b 上升。因此，一般均衡的结果显示， i_d 上升导致 i_b 上升。至于对 \hat{z}_c 的影响，一方面，如前所述， i_d 上升意味着存入存款便利的款项获得更高的回报，激励银行持有更多的 \hat{z}_c ；另一方面，仅调升走廊的下限利率但不改变上限利率，间接起到鼓励银行存放资金到央行而收缩银行间市场交易的作用，因此银行的 \hat{z}_c 持有又会下降。因此，最终 i_d 上升对 \hat{z}_c 的影响不确定；既然总支付 p 里包含 \hat{z}_c ， i_d 上升对 p 的影响也是不确定的。不过，附录D的数值分析显示 i_d 上升对 \hat{z}_c 和 p 的效应都是上升的。在下行利率区间， $i_d < i_c$ ，零型银行不会存入任何款项到央行借贷便利，也因此 i_d 对于经济没有任何作用。

如果比较调节 i_c 和 i_d 的政策效果，似乎定理2和初步的数值分析结果显示，二者对内生变量 $\{q, p, \hat{z}_c, i_b, \ell\}$ 的影响从定性的角度来看是一致的。当然，如果我们仔细分析附录C中的解析解，改变 i_c 和 i_d 带来的效应其实存在定量上的差别。为了清楚地显示该差别，我们

定义了一个利率弹性，即利率的百分比增长对 q 产生的百分比影响（利率弹性的公式见附录D），通过数值模拟来进一步比较改变 i_c 和 i_d 的效应。作为分析的基础，我们在附录F的第（一）部分加入了一个“没有央行数字货币的基准模型”，让模型经济体退回到一般性的银行准备金不付息的现实世界^⑨。依然基于附录D的函数形式和参数值，如图3所示，在没有央行数字货币的情况下， i_d 的弹性在5左右（图3a）。在央行数字货币存在的情况下，上行利率区间下， i_c 的弹性在3左右（图3b）。这意味着，调整 i_d 和 i_c 这两种政策，利率弹性较为接近，并且其在调节利率时也保持在相对稳定的水平。但是，在下行利率区间， i_c 展现出了更强的弹性，约为8.5（图3c），且弹性同样稳定。特别要说明的是，在上行利率区间， i_c 不作为下限利率发挥作用，即便如此，改变 i_c 依然是有作用的，而且其利率弹性与没有央行数字货币时 i_d 的弹性比较接近；在下行利率区间， i_c 成为实际的下限利率，此时其展现出更强的弹性，高于没有央行数字货币时的 i_d 的弹性。下行利率区间的 i_c 和没有央行数字货币时的 i_d 更具可比性，因为都是作为下限利率，但显然前者的调节效果更灵敏。总之，上述数值分析是定理2的重要补充，充分显示了央行数字货币利率完全可以成为一种全新的、稳健而有效的货币政策工具，在上行和下行利率区间都有效，且在下行利率区间的表现更为突出。

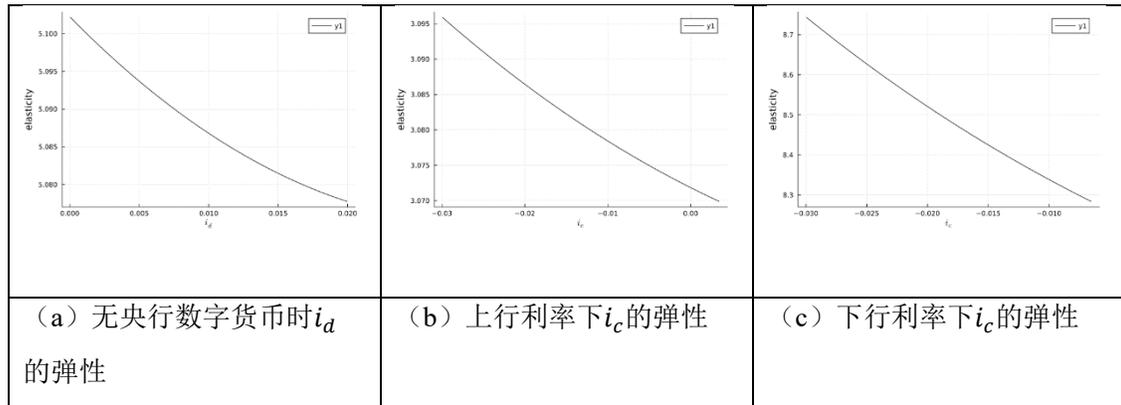


图 3 利率弹性的数值模拟

最后，当 i 上升时，即通胀率 π 上升，这将增加持有央行数字货币的成本，从而 z_c 下降，也因此银行间市场交易量 q 和总支付额度 p 均下降；对债券利率 i_b 的影响不确定，是因为费雪效应和蒙代尔效应带来一正一反的影响^⑩。

定理3 基准模型中改变政策利率 i_p 和利率走廊宽度 δ 的影响如下（括号中补充说明数值模拟的结果）：

1. 调节政策利率 i_p 的效果为：上行利率时， i_p 上升使得银行间市场交易量 q 上升，便利贷款 l 下降，债券利率 i_b 上升，而对央行数字货币持有量 z_c 和总支付 p 的影响不

确定（数值模拟结果为上升）；下行利率时， i_p 上升对银行间市场交易量 q 没有影响，使得便利贷款 ℓ 下降，债券利率 i_b 上升，央行数字货币持有量 \hat{z}_c 上升，而总支付 p 下降。

2. 调节利率走廊宽度 δ 的效果为：上行利率时， δ 增大使得银行间市场交易量 q 下降，便利贷款 ℓ 下降，而对债券利率 i_b 、央行数字货币持有量 \hat{z}_c 和总支付 p 的影响不确定（数值模拟结果为下降）；下行利率时， δ 增大对银行间市场交易量 q 没有影响，使得便利贷款 ℓ 下降，债券利率 i_b 上升，央行数字货币持有量 \hat{z}_c 上升，而总支付 p 下降。

证明和数值模拟结果均在附录E。

定理3是传统的利率走廊下改变走廊中点和宽度的政策分析。简要的理解是，我们的模型推导出，既可以通过提高走廊的政策利率 i_p 或增大走廊宽度 δ ，实施紧缩的货币政策，也可以反过来，通过降低政策利率 i_p 或收窄走廊宽度 δ ，实施宽松的货币政策。具体而言，在上行利率区间，调节利率走廊的中点与宽度均有效。政策利率 i_p 是利率走廊的中点，给定走廊宽度 δ 不变， i_p 上升意味着利率走廊的下限 i_d 和上限 i_ℓ 同时上调。在上行利率区间， $i_d > i_c$ ， i_ℓ 对于交易量 q 没有影响，而 i_d 的传导机制与定理2中分析的 i_d 上升的效果完全一致，因此交易量 q 上升。至于对 \hat{z}_c 和 p 的影响，也和定理2中 i_d 上升带来的效应如出一辙。由于我们聚焦于抵押约束收紧的情形，此时 i_ℓ 和 ℓ 只取决于抵押品价值 $\chi\hat{b}$ 的多少，且二者的方向变化是相反的。因此， i_p 上升带来的 i_ℓ 上升，最终导致 ℓ 下降。最后， i_p 上升对于债券利率 i_b 的影响是双重的：交易量 q 上升，从而债券带来的流动性溢价下降，债券价格下降，利率 i_b 上升；同时，随着贷款利率 i_ℓ 上升，贷款量 ℓ 下降，贷款成本上升，从而债券的持有量下降，债券价格下降，债券利率 i_b 进一步上升。但是，附录E的数值模拟结果显示，在上行利率区间， i_p 上升对 \hat{z}_c 和 p 的效应均为正向。

对应地，在上行利率区间，给定政策利率 i_p 不变，当走廊宽度 δ 增加时， i_d 下降，意味着冗余央行数字货币存入便利存款的回报下降，从而银行持有 \hat{z}_c 的激励减弱，进而支持的交易量 q 下降。另外，走廊宽度 δ 增加还意味着常备便利贷款利率 i_ℓ 上升，因此银行的便利贷款额度 ℓ 下降。而 i_ℓ 上升，从另一方面激励银行持有更多自有资金，即 \hat{z}_c 上升。结合前面的下降效应，最终 δ 上升对 \hat{z}_c 的效应是不确定的，并连带着，对 p 的效应也是不确定的。最后， δ 对于债券利率 i_b 的影响同样是双重的：一方面，交易量 q 下降意味着对应的债券流动性溢价上升，从而 i_b 下降；另一方面，贷款利率 i_ℓ 上升，对作为抵押品的债券需求下降，从而债券价格下降，利率 i_b 上升；因此，最终对 i_b 的影响是不确定的。不过，附录E

的数值模拟结果显示， δ 上升对 \hat{z}_c 、 p 和 i_b 的效应均为负向。

在下行利率区间， i_d 没有政策效果，因此调节走廊的中点或者走廊宽度都等价于调节走廊上限 i_ℓ ，相应的政策效果也和定理2中单独调节 i_ℓ 的效果一样。

（四）建模的稳健性检验与批发端央行数字货币的探讨

在附录F中，我们提供了两种特殊情形下的基准模型并做了政策分析，以方便与正文中的基准模型进行对比，类似一种建模的“稳健性检验”。前文已提及，附录F的第

（一）部分是“没有央行数字货币的基准模型”，通过让 $i_c = 0$ ，让模型经济体退回到一般性的银行准备金不付息的现实世界；第（二）部分是“央行数字货币利率充当下限的基准模型”，取消超额准备金 d 和利率 i_d ，直接让央行数字货币利率充当利率走廊下限，以对比央行数字货币与超额准备金的作用。将前者与正文基准模型对比，我们可以清晰地看到，引入批发端付息的央行数字货币不仅不会影响已有的货币政策的框架，而且提供了强有力的补充：定理2和3的政策分析已显示，无论在上行还是下行利率区间，央行数字货币利率都能作为独立的货币政策工具发挥作用。将后者与正文基准模型对比，可以看到，央行数字货币利率在必要时可以取代现有的下限利率，而且数值模拟的结果已显示，央行数字货币利率 i_c 直接作为下限时利率弹性，远高于没有央行数字货币时的下限 i_d 的弹性，更加灵敏¹¹。总之，央行数字货币利率既可以引入到现有的利率走廊体制，成为一种独立的货币政策工具，同时并不影响现有货币政策框架的运行，也可以在必要时直接充当走廊下限利率，使得央行对于货币政策的调整更加灵活精准。

接着，我们将目光拉回数字人民币已试点三年多且2022年12月起进入央行M0的统计，以及已建立利率走廊体制的中国现实。这一情形和正文中的基准模型比较相符，而附录F中第（二）部分的模型，则可以理解为面向未来的前瞻性理论设想。因此，接下来的政策探讨，包括对批发端央行数字货币的探讨与数字人民币推广的政策建议，将主要围绕着这两个模型的对比分析而展开。

在正文的基准模型中，我们通过在一个标准的利率走廊体制下引入付息的央行数字货币，探讨了央行数字货币利率与走廊上限 i_ℓ 和下限 i_d 之间的互动。特别地，我们区分了 $i_d \geq i_c$ （上行利率区间）与 $i_d < i_c$ （下行利率区间）两种情况，发现改变 i_c 在这两种区间下都有政策效果；尤其在下行利率区间，替代 i_d 成为实际下限的 i_c ，数值模拟结果显示其利率弹性更高，政策效果更加灵敏。这一机制看似直接，却引发新的思考：在正常情况下，是否也可能让 i_c 取代 i_d ，直接作为下限来发挥作用？考虑中国现实，作为利率走廊下限的超额准备金利率调整频率极低，如果对新型数字化法币付息，该利率也许能起到更灵活的走廊下限作用？进一步地，这些问题和另一更基本的问题密切相关：该如何理解模型经济体中银行持有的央行数字货币？很显然不是零售金融端央行数字货币，但是否就是批

发金融端的银行准备金？或者是一种新的批发金融端央行数字货币？以下逐一展开探讨。

在现实中，基础货币包括两大部分：一部分是流通中的现金，为普通公众所持有的具有物理形态的法币；另一部分是商业银行持有的准备金，即在央行开设的准备金账户，是电子化形态的存在，从宽泛意义上来说，该准备金也可解读为央行发行的数字化基础货币（Andolfatto, 2021）。因此，截止目前的建模中，我们需要非常小心地界定，商业银行持有的央行数字货币到底是什么。很明显，在模型经济体中，我们区分了 z_c 和 d ，前者可以理解为商业银行持有的批发金融端央行数字货币，后者是现实中已存在的商业银行持有的超额准备金。结合中国数字人民币的“双层架构”，数字人民币是央行的直接负债，但通过商业银行发放给大众；换个视角，商业银行持有的数字人民币，类似于必须缴纳100%准备金的狭义银行安排（narrow-banking），也就是我们模型经济体中的 z_c 。所以， i_c 可以理解为央行数字货币利率，即商业银行基于狭义银行安排所持有的那部分央行数字货币的利率，而 i_d 可以理解为商业银行在 $i_d > i_c$ 时，选择将一部分批发金融端央行数字货币转化为超额准备金、以此获取更高的央行支付的常备便利存款利息。

结合中国的实际情况，一方面，数字人民币的试点已超过三年，但处在第二层参与运营的商业银行，似乎尚未找到推广数字人民币的较清晰的商业模式，普通公众的数字人民币使用率依然偏低。因此，如果对商业银行基于狭义银行安排而持有的央行数字货币付息，可以补偿部分银行存款转化为央行数字货币的资金流失成本，从而调动商业银行推广央行数字货币的积极性。另一方面，我国自2014年构建利率走廊以来，下限利率调整的频率非常低，2008-2020年间，12年才调整一次。这让我们想到，结合快速试点推进的数字人民币，如果对其在批发金融端付息，应该可以成为一种更为有效、可以随时调整的政策工具。为此，我们提出如下政策建议：可以考虑对批发金融端的央行数字货币付息，其利率可以按需调整，必要时可以作为一种新型的走廊下限利率发挥作用，同时也起到激励商业银行推广数字人民币的作用。

接着，我们来回答之前提及的问题：是否可以直接让 i_c 取代 i_d 来发挥作用？为了回答这一问题，我们在附录F第（二）部分中探索了央行数字货币利率直接充当下限的建模，即取消 d ，让 z_c 直接以类似于100%银行准备金的角色来发挥作用；而且，无论是壹型银行还是零型银行，只要是以央行数字货币形态持有的资金，总会被央行支付 i_c 的利率。这就和我国现实中只有超额准备金才会被付息的情况不太一样，更类似于美国联邦储备银行自2021年起取消法定准备金要求并对存款性金融机构的所有准备金余额都付息的情况¹²。另外，该模型中去掉了 d ，即付息的超额准备金，所以 i_c 也可理解为新的利率走廊下限利率。正文中的基准模型，在下行利率区间即 $i_d < i_c$ 时，零型银行不会存入任何超额准备金 d ，也因此 i_d 不会产生任何作用，这其实可以理解为附录F中第（二）部分模型的特例。不

意外的是，该模型中改变 i_c 的政策效果，和定理2中下行利率的情况下相同；改变 i_ℓ 和 i 的结果，也和定理2相同。但是，涉及利率走廊的政策分析，则产生了变化，因为现在 i_c 是新的下限利率，所以政策利率 i_p 和走廊宽度 δ 的定义都发生了变化。改变这二者的效应的具体证明见附录F。总之，附录F第（二）部分模型的分析显示，如果需要，正常情况下 i_c 也能取代 i_d 发挥下限利率的作用；而且定理2和数值模拟结果也已经证明， i_c 哪怕在下行利率区间也有极高的利率弹性，政策灵敏度比 i_d 更高。附录F的新建模探索，其实也适应于下文的扩展模型，但因为可以与模型经济体中存在下行利率时的情形建立关联，因此第五部分中最后省略了相关建模探索。

五、扩展模型

基准模型基于简炼的建模构造出利率走廊的框架，并探索了央行数字货币利率可以起到的作用。但是，基准模型没有刻画银行间市场的市场利率，利率走廊的上限利率所起的作用也较为有限。为此，我们通过在银行间市场之后引入实物资本市场，对基准模型进行了拓展，也由此对银行的刻画从批发金融端的银行间市场延伸到包含实物资本的贷款和投资领域，以便更为全面的刻画引入央行数字货币对金融市场与实体经济的影响。

（一）模型设定

如图4所示，在基准模型的基础上，我们增加了一个完全竞争的实物资本市场。现在每期存在三个市场或者阶段，依次是去中心化的银行间市场（简称为S1）、完全竞争的实物资本市场（简称为S2）以及中心化的清算市场（简称为S3）。我们分别用 U 、 V 和 W 来代表这三个阶段的值函数。由于模型设定变化较多，我们后续基于三个市场分别进行叙述，但重点描述新增的设定。

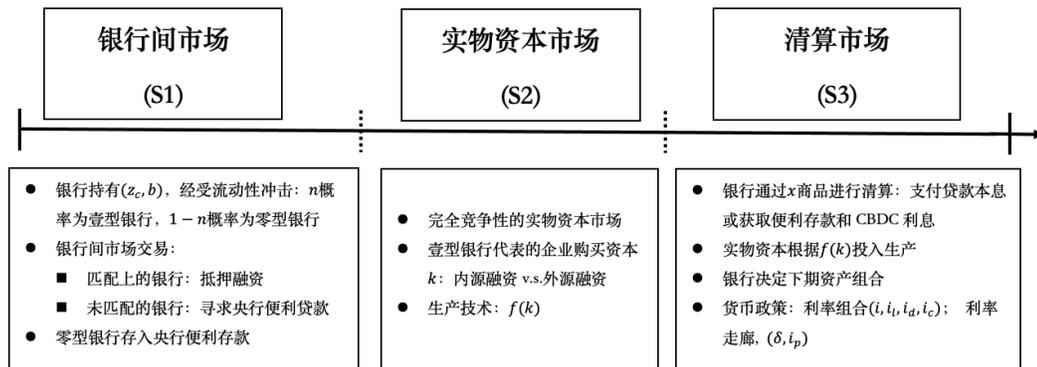


图 4 扩展模型时间线

S1事件 与基准模型类似，每期开始银行持有 (z_c, b) 的组合，并在经受流动性冲击后变

成壹型和零型银行。前者需要额外的资金，以便在实物资本市场进行投资；后者依然有冗余资金，考虑存放到央行的存款便利中。与基准模型不同的是，流动性冲击后，壹型和零型银行在去中心化的银行间市场随机地搜寻与匹配，以 α 概率匹配成功，之后二者可以议价的方式进行抵押融资：零型银行接受 b 作为抵押品，以 i_m 的利率给壹型银行提供 ℓ_m 的流动性；以 $1 - \alpha$ 概率，壹型银行无法匹配到交易对手，为满足投资的需求，转而寻求央行的便利贷款。我们依然假设央行的常备借贷便利在整个S1阶段都保持开放，未匹配到交易对手的壹型银行，以 i_ℓ 的利率获取 ℓ_u 的便利贷款；而零型银行无论匹配成功与否，都可以将冗余资金存入常备存款便利，获取 i_d 的利息。

S2事件 在S1交易结束之后，壹型银行所代表的企业进入实物资本市场购买资本 k ，之后在S3阶段以 $f(k)$ 的技术投入生产。为简便起见，我们考虑完全竞争的实物资本市场，因此可以标准化 k 的价格为1（以S3阶段的 x 商品衡量）。具体来说，壹型银行向资本提供者购买 k ，以自有的央行数字货币加上获取的贷款进行支付；而零型银行在该阶段中不活跃，直接进入到了S3的清算市场。

S3事件 与基准模型类似，S3是中心化的清算市场：通过 x 商品的生产与消费，银行可以偿还债务或者消耗多余的资金，重新进行资产配置，且之前阶段的所有借贷、存款以及央行数字货币利息也在该阶段得以清偿。不同的是，基于 $f(k)$ 技术的实物生产也在该阶段进行。政府的角色和预算约束，与基准模型的设定基本相同，不再赘述。

（二）值函数

在S3，壹型银行的价值函数分别为：

$$W_1(z_c, b, \ell_u, \ell_m, k) = \max_{x, \hat{z}_c, \hat{b}} \{x + \beta \mathbb{E}U(\hat{z}_c, \hat{b})\}$$

$$\text{st. } x + (1 + \mu)\hat{z}_c + \psi\hat{b} = f(k) + (1 + i_c)z_c + b - (1 + i_\ell)\ell_u - (1 + i_m)\ell_m + T. \quad (30)$$

其中 U 为下一个S1的值函数。这里 W 的定义与基准模型类似，同样是选择当前消费量 x 与资产配置 (\hat{z}_c, \hat{b}) 以最大化消费与贴现期望价值之和。而预算约束（30）中，右侧的净收入相比于基准模型，增加了资本回报 $f(k)$ ，并且其借贷分为了两种，其中 ℓ_m 是银行间市场的贷款， ℓ_u 为央行常备便利贷款。其中 W 的下标（1或0）代表了对应类型的银行，下同。消去预算约束条件有

$$\begin{aligned} W_1(z_c, b, \ell_u, \ell_m, k) &= f(k) + (1 + i_c)z_c + b - (1 + i_m)\ell_m - (1 + i_\ell)\ell_u + T \\ &+ \max_{\hat{z}_c, \hat{b}} \{-(1 + \mu)\hat{z}_c - \psi\hat{b} + \beta \mathbb{E}U(\hat{z}_c, \hat{b})\}. \end{aligned} \quad (31)$$

类似地，对于零型银行，我们有：

$$\begin{aligned} W_0(z_c, b, \ell_m, d) &= \max_{x, \hat{z}_c, \hat{b}} \{x + \beta \mathbb{E}U(\hat{z}_c, \hat{b})\} \\ \text{st. } x + (1 + \mu)\hat{z}_c + \psi\hat{b} &= (1 + i_c)z_c + b + (1 + i_d)d + (1 + i_m)\ell_m. \end{aligned} \quad (32)$$

从而有

$$W_0(z_c, b, \ell_m, d) = (1 + i_c)z_c + b + (1 + i_d)d + (1 + i_m)\ell_m + \max_{\hat{z}_c, \hat{b}} \{-(1 + \mu)\hat{z}_c - \psi\hat{b} + \beta \mathbb{E}U(\hat{z}_c, \hat{b})\}. \quad (33)$$

由一阶条件得到以下央行数字货币和债券的需求方程：

$$1 + \mu = \beta \frac{\partial \mathbb{E}U(\hat{z}_c, \hat{b})}{\partial \hat{z}_c} \quad (34)$$

$$\psi = \beta \frac{\partial \mathbb{E}U(\hat{z}_c, \hat{b})}{\partial \hat{b}}. \quad (35)$$

在下一期的S1，以 n 的概率银行成为壹型， $1 - n$ 的概率为零型，从而期望值函数如下，

$$\mathbb{E}U(\hat{z}_c, \hat{b}) = nU_1(\hat{z}_c, \hat{b}) + (1 - n)U_0(\hat{z}_c, \hat{b}), \quad (36)$$

其中：

$$U_1(\hat{z}_c, \hat{b}) = \alpha V_1\left(\hat{z}_c + \ell_m - \frac{k_m}{1 + i_c}, \hat{b}, \ell_m, 0, k_m\right) + (1 - \alpha)V_1\left(\hat{z}_c + \ell_u - \frac{k_u}{1 + i_c}, \hat{b}, 0, \ell_u, k_u\right) \quad (37)$$

$$U_0(\hat{z}_c, \hat{b}) = \alpha V_0(\hat{z}_c - \ell_m - d, \hat{b}, \ell_m, d) + (1 - \alpha)V_0(\hat{z}_c - \tilde{d}, \hat{b}, 0, \tilde{d}). \quad (38)$$

其中 V 为S2的值函数， k_m 和 k_u 分别是壹型银行在S2中进行投资购买的资产数量， d 和 \tilde{d} 分别是成功匹配的零型银行和匹配失败的零型银行在央行借贷便利的存款， i_m 和 i_ℓ 分别是银行间市场和央行便利窗口的贷款利率。因此（37）式的含义为：壹型银行在S2以 α 概率匹配上交易对手，可以进行 k_m 的投资并产生 ℓ_m 的负债，在交易及投资之后剩余 $\hat{z}_c + \ell_m - \frac{k_m}{1 + i_c}$ 的央行数字货币余额，因此最终得到 $V_1\left(\hat{z}_c + \ell_m - \frac{k_m}{1 + i_c}, \hat{b}, \ell_m, 0, k_m\right)$ 的S2价值； $1 - \alpha$ 概率无法成功匹配，最终类似地得到 $V_1\left(\hat{z}_c + \ell_u - \frac{k_u}{1 + i_c}, \hat{b}, 0, \ell_u, k_u\right)$ 的价值。（38）式描述了零型银行的期望值函数，若成功匹配，其贷出 ℓ_m 的央行数字货币并将 d 存入央行，CBCD余额为 $\hat{z}_c - \ell_m - d$ ，从而获得 $V_0(\hat{z}_c - \ell_m - d, \hat{b}, \ell_m, d)$ 的价值，否则，其获得 $V_0(\hat{z}_c - \tilde{d}, \hat{b}, 0, \tilde{d})$ 的价值。

区分起见，记 \check{z}_c 与 \check{b} 为银行进入S2时持有的央行数字货币与债券数量，从而S2的值函数如下：

$$V_1(\check{z}_c, \check{b}, \ell_m, \ell_u, k) = W_1\left(\check{z}_c - \frac{k}{1 + i_c}, \check{b}, \ell_m, \ell_u, k\right) \quad (39)$$

$$V_0(\check{z}_c, \check{b}, \ell_m, d) = W_0(\check{z}_c, \check{b}, \ell_m, d). \quad (40)$$

其中（39）为壹型银行的价值函数，其以 $\frac{k}{1 + i_c}$ 的成本购买 k 的实物资本，并在S3得到

$W_1\left(\check{z}_c - \frac{k}{1 + i_c}, \check{b}, \ell_m, \ell_u, k\right)$ 的价值，（40）则为零型银行的价值函数，由于其在S2不活跃，其值

函数恰为S3阶段的值函数。

记壹型与零型银行交易剩余分别为 SP_1 与 SP_0 ，定义为匹配与未匹配上时S2值函数之差，其表达分别如下：

$$\begin{aligned} SP_1 &= V_1(\hat{z}_c + \ell_m - \frac{k_m}{1+i_c}, \hat{b}, \ell_m, 0, k_m) - V_1(\hat{z}_c + \ell_u - \frac{k_u}{1+i_c}, \hat{b}, 0, \ell_u, k_u) \\ &= [f(k_m) - k_m - (i_m - i_c)\ell_m] - [f(k_u) - k_u - (i_\ell - i_c)\ell_u] \end{aligned} \quad (41)$$

$$SP_0 = (i_m - i_c)\ell_m + (i_d - i_c)(d - \tilde{d}). \quad (42)$$

(三) 局部均衡分析

由于经济体中的银行涉及多个阶段的决策，求解过程中我们采用倒推法，即先确定在S2的壹型银行投资与决策，再确定S1的零型银行利用常备存款便利的决策，最后再根据这些决策来求解S1的银行间市场议价问题。

(1) S2阶段壹型银行的投资决策。

在S2，已匹配的壹型银行的投资决策问题为：

$$\begin{aligned} D_m &= \max_{k_m} \{f(k_m) - k_m - (i_m - i_c)\ell_m\} \\ \text{st. } k_m &\leq (1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_m). \end{aligned} \quad (43)$$

D_m 为该银行投资产生的剩余，定义在满足购买资本的流动性约束（43）之下，最大化的投资净收益 $f(k_m) - k_m - (i_m - i_c)\ell_m$ 。定义 k^* 满足 $f'(k^*) = 1$ ，则其最优化解为

$$k_m = \begin{cases} k^*, & \text{if } k^* < (1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_m) \\ (1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_m), & \text{if } k^* \geq (1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_m) \end{cases} \quad (44)$$

对应的剩余 D_m 为

$$D_m = \begin{cases} f(k^*) - k^* - (i_m - i_c)\ell_m, & \text{if } k^* < (1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_m) \\ f[(1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_m)] - (1 + i_c)\hat{z}_c - (1 + i_m)\ell_m, & \text{if } k^* \geq (1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_m) \end{cases}. \quad (45)$$

由于通常情况下， $i_m > i_c$ ，从而在上一阶段借贷时，银行不会使自身的贷款落入 $k^* < (1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_m)$ 的区间，否则额外贷款量对其是负收益。从而资本市场中最终决定的 $k_m = (1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_m)$ 。

类似地，对于未匹配的壹型银行，我们可以确定 $k_u = (1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_u)$ ，进一步地，其决定 ℓ_u 的决策为

$$\begin{aligned} D_u^* &= \max_{\ell_u} \{f(k_u) - (1 + i_c)\hat{z}_c - (1 + i_\ell)\ell_u\} \\ \text{st. } (1 + i_\ell)\ell_u &\leq \chi_u \hat{b}. \end{aligned} \quad (46)$$

其中约束条件（46）为抵押约束，记 κ_2 为该约束对应的拉格朗日乘子，则一阶条件可以得出，

$$\ell_u^* = \begin{cases} \frac{1}{1+i_c} f'^{-1} \left(\frac{1+i_\ell}{1+i_c} \right) - \hat{z}_c, & \text{if } \kappa_2 = 0 \\ \frac{\chi_u \hat{b}}{1+i_\ell} & \text{if } \kappa_2 > 0 \end{cases}. \quad (47)$$

从而最终该类银行的投资剩余为,

$$D_u^* = f((1+i_c)(\hat{z}_c + \ell_u^*)) - (1+i_c)\hat{z}_c - (1+i_\ell)\ell_u^*. \quad (48)$$

(2) S1阶段零型银行的存款决策

在S1末尾, 零型银行决定存款便利量 \check{d} 的决策为:

$$\begin{aligned} & \max_{\check{d}} \{(i_d - i_c)\check{d}\} \\ & \text{st. } 0 \leq \check{d} \leq \check{z}_c. \end{aligned} \quad (49)$$

与基准模型类似, 可求得最优解为 $\check{d} = \check{z}_c$ (若 $i_d \geq i_c$), 否则 $\check{d} = 0$ 。从而 $(i_d - i_c)(d - \check{d}) = -i_\Delta \ell_u$ 。

(3) S1阶段银行议价

据以上结果, 可以重新整理两类银行的剩余为

$$SP_1 = f(k_m) - (1+i_c)\hat{z}_c - (1+i_m)\ell_m - D_u^* \quad (50)$$

$$SP_0 = (i_m - i_c - i_\Delta)\ell_m. \quad (51)$$

我们仍假设银行使用Kalai议价模式, 问题可重写为

$$\begin{aligned} & \max_{\ell_m, \ell_m} \{f(k_m) - (1+i_c)\hat{z}_c - (1+i_m)\ell_m - D_u^*\} \\ & \text{st. } \frac{f(k_m) - (1+i_c)\hat{z}_c - (1+i_m)\ell_m - D_u^*}{\{f(k_m) - (1+i_c)\hat{z}_c - (1+i_c+i_\Delta)\ell_m - D_u^*\}} = \theta \end{aligned} \quad (52)$$

$$(1+i_m)\ell_m \leq \chi_m \hat{b}. \quad (53)$$

类似地, 根据Kalai议价的界定, 目标函数为壹型银行的剩余, 受约束于(52)的Kalai议价条件与(53)的抵押约束条件。根据抵押约束对应拉格朗日乘子 κ_1 的符号, 议价有下列两种情形的解:

• 情形一: $\kappa_1 = 0$

$$(1+i_c)f'(k_m) = 1+i_c+i_\Delta \quad (54)$$

$$(i_m - i_c - i_\Delta)\ell_m = (1-\theta)\{f(k_m) - (1+i_c)\hat{z}_c - (1+i_c+i_\Delta)\ell_m - D_u^*\}. \quad (55)$$

• 情形二: $\kappa_1 > 0$

$$(1+i_m)\ell_m = \chi_m \hat{b} \quad (56)$$

$$(i_m - i_c - i_\Delta)\ell_m = (1-\theta)\{f(k_m) - (1+i_c)\hat{z}_c - (1+i_c+i_\Delta)\ell_m - D_u^*\}. \quad (57)$$

关于上述情形二解存在的条件, 我们有以下定理:

定理4 当 $\chi_u/\chi_m \in [1, \frac{1+i_\ell}{1+i_c+i_\Delta})$ 时, 情形二之下存在唯一均衡, 并且满足 $i_m \in (i_c + i_\Delta, i_\ell)$ 。

证明参见附录G。

(四) 一般均衡

我们定义扩展模型的一般均衡如下:

定义2 给定政策参数 G, T 和 (B, i, i_c, i_d, i_ℓ) , 一般均衡定义为向量 $\{\hat{z}_c, \ell_m, \ell_u, d, i_m, \phi_b\}$, 满足: (i) S1和S2阶段银行的最优化决策; (ii) 议价和解; (iii) 资产市场出清。

与基准模型类似, 基于经济学意义的考虑, 我们聚焦在两种借贷下, 抵押约束均收紧的情况(即 $\kappa_1 > 0, \kappa_2 > 0$), 再结合(34)和(35)的一阶条件, 整理出如下均衡条件:

$$\frac{i - i_c}{1 + i_c} = n\alpha\theta[f'(k_m) - f'(k_u)] + n[f'(k_u) - 1] + \frac{(1 - n)i_\Delta}{1 + i_c} \quad (58)$$

$$\frac{i - i_b}{1 + i_b} = n\alpha\theta \left[\chi_m \frac{(1 + i_c)f'(k_m)}{1 + i_m} - \chi_u \frac{1 + i_c}{1 + i_\ell} f'(k_u) \right] + n\chi_u \frac{1 + i_c}{1 + i_\ell} f'(k_u) + n\alpha\theta \left(1 - \chi_m \frac{1 + i_c + i_\Delta}{1 + i_m} \right) \quad (59)$$

$$(i_m - i_c - i_\Delta)\ell_m = (1 - \theta)\{f(k_m) - (1 + i_c)\hat{z}_c - (1 + i_c + i_\Delta)\ell_m - D_u^*\} \quad (60)$$

$$(1 + i_m)\ell_m = \chi_m \hat{b} \quad (61)$$

$$(1 + i_\ell)\ell_u = \chi_u \hat{b} \quad (62)$$

$$\hat{b} = B. \quad (63)$$

上述(58)和(59)分别是央行数字货币和债券的需求方程, 等式左侧都代表着每新增一单位的资产(央行数字货币或债券)所带来的边际成本, 而右侧都代表着新增一单位资产所带来的边际收益。例如, (58)右侧第一项和第二项分别代表央行数字货币为匹配上和未匹配的银行带来的边际收益, 第三项为零型银行利用常备存款便利获得的回报。除了两个都收紧的抵押约束(61)和(62), 其他均衡条件与基准模型类似。以下定理证明了上述一般均衡存在且唯一:

定理5 以上一般均衡存在而且有唯一解。

证明参见附录H。

(五) 政策分析

本部分我们聚焦于政策分析。一方面, 我们聚焦与改变不同的政策利率的效果, 包括调整央行数字货币利率 i_c 、非对称地调整利率走廊的上限和下限利率即 $\{i_\ell, i_d\}$ 的政策效果, 也讨论了改变名义利率 i 的影响。分析结果见定理6。另一方面, 我们也分析改变利率走廊宽度 δ 和政策利率 i_p 的政策效果, 分析结果见定理7。我们聚焦的变量, 包括银行间市场的抵押贷款利率和贷款额度、央行数字货币的持有量以及实体投资量 k_m, k_u , 即

$\{\ell_m, i_m, \hat{z}_c, k_m, k_u\}$ 。

定理6 扩展模型中改变 i_c, i_ℓ, i_d, i 的政策效果如下所示：

1. 改变央行数字货币利率 i_c 的政策效果：在上行利率区间： i_c 上升时，匹配银行代表的投资 k_m 上升，对未匹配银行代表的投资 k_u 、央行数字货币持有量 \hat{z}_c 、银行间市场融资量 ℓ_m 与利率 i_m 的影响不确定；在下行利率区间： i_c 上升时， k_m 与 k_u 均上升， \hat{z}_c 上升，对 ℓ_m 与 i_m 的影响不确定。
2. 改变利率走廊上限 i_ℓ 的效果是： i_ℓ 上升时，匹配银行代表的投资 k_m 上升，而未匹配银行代表的投资 k_u 下降， \hat{z}_c 上升， ℓ_m 下降， i_m 上升。
3. 改变利率走廊下限 i_d 仅在上行利率下有效果： i_d 上升时，未匹配银行代表的投资 k_u 上升， \hat{z}_c 上升，对 k_m 、 ℓ_m 与 i_m 的影响不确定。
4. 改变名义利率 i 的政策效果： i 上升时，匹配银行代表的投资 k_m 与未匹配银行代表的投资 k_u 均下降， \hat{z}_c 下降， ℓ_m 下降， i_m 上升。

证明参见附录I。

首先注意到，根据均衡条件（62），我们有 $\ell_u = \chi_u B / (1 + i_\ell)$ ，因此给定 $\chi_u B$ 后，仅有政策变量 i_ℓ 会负向地影响 ℓ_u 而其余政策变量的效应均为0。这一事实有助于后续的分析与理解。

在上行利率时，央行数字货币利率 i_c 上升，首先意味着持有央行数字货币的回报或者支付能力上升，因此银行有动机持有更多央行数字货币；但与此同时， i_c 上升也意味着贷款的实际成本 $i_\ell - i_c$ （或 $i_m - i_c$ ）的下降，从而一定程度上刺激壹型银行贷款量的增加，并减弱对央行数字货币的需求；最终，上述一正一反的效应，使得对央行数字货币持有的净效应不完全确定。类似地，对于 ℓ_m ，也存在如上的替代效应和成本效应，前者减少了 ℓ_m 的需求而后者增加了 ℓ_m 的需求，这两个方向的效应，最终使得 i_c 对 ℓ_m 的效应不确定。而通过条件 $(1 + i_m)\ell_m = \chi_m B$ 可知，在外生给定 $\chi_m B$ 后， i_m 与 ℓ_m 关于 i_c 是相反变化的。最后，对于投资，注意到均衡时的 (k_m, k_u) 分别为 $(1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_m)$ 和 $(1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_u)$ ，从而 i_c 的上升一方面会影响所持有的各种流动性总量 $(\hat{z}_c + \ell_j), j \in \{m, u\}$ ，其中对央行数字货币的效应不确定，对 ℓ_u 为零而对 ℓ_m 不确定，另一方面通过 $(1 + i_c)$ 提高这些流动性的支付效力，二者加总，最后对 k_m 呈现出正向效应而对 k_u 的效应无法确定。

在下行利率区间， i_c 的政策效果与上行利率的不同之处在于，下行利率下 i_c 对于 \hat{z}_c 和 k_u 的政策影响得以确定。在下行利率下， $i_c > i_d$ ，意味着央行数字货币利率较高，此时 i_c 不仅是央行数字货币的回报，同时也是经济体利率走廊的真实下限。因此，当 i_c 上升时，零型银

行由于抵押融资交易获得的回报($i_m - i_c$)减少（上行利率下回报是 $i_m - i_d$ ，与 i_c 无关，见（60）式左侧），从而一定程度减少了银行间市场的融资量，从而使得壹型银行在前一阶段有动机持有更多的央行数字货币。这一效应与之前的效应叠加，最终使得对 \hat{z}_c 的政策效应为正；自然地，由于 $k_u = (1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_u)$ ， ℓ_u 不受 i_c 影响，最终 i_c 上升对 k_u 的政策效应也为正。

i_ℓ 上升时，向央行借贷成本变高，为避免高额的借贷利息，银行会增加自有资金央行数字货币的持有，从而 \hat{z}_c 上升。同时，利率走廊上限 i_ℓ 向上调整时，货币政策收紧，市场的抵押贷款利率会自然地向上反应，从而 i_m 上升， ℓ_m 对应地下降。 i_ℓ 上升时，三种交易流动性受到的影响幅度从大到小依次为 ℓ_u （下降）， \hat{z}_c （上升）和 ℓ_m （下降），给定 (k_m, k_u) 的大小分别为 $(1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_m)$ 和 $(1 + i_c)(\hat{z}_c + \ell_u)$ ，在 k_m 中， \hat{z}_c 的变化占据主导，使得 k_m 上升；而在 k_u 中， ℓ_u 的变化占据主导，从而最终 k_u 下降。

i_d 上升时，零型银行会有更强的动机持有央行数字货币以转化为便利存款从而获取更多的常备存款便利利息，因此 \hat{z}_c 上升；此时 ℓ_u 不变， \hat{z}_c 上升最终使得 k_u 上升。对于 ℓ_m ，一方面， i_d 上升时，零型银行更倾向于贷出较少的 ℓ_m 而获得更多常备存款便利的利息；另一方面，由于Kalai议价的性质，零型银行也有动机贷出更多的 ℓ_m 使壹型银行进行更多的投资来获取更多的剩余，两方向的效应使得 i_d 对于 ℓ_m 的效应不确定，而对 i_m 的效应与之相反，也无法确定。 i_d 对于央行数字货币持有效应为正而对 ℓ_m 的效应不确定，最终使得其对 k_m 的效应无法确定。下行利率之下， i_d 不存在于一般均衡系统中，因而没有政策效果。

当名义利率 i 上升时，也即整个经济体的通胀率上升，从而银行对于两种流动性 \hat{z}_c 与 ℓ_m 的需求均减少，从而投资量也对应减少，而抵押贷款利率 i_m 对应地增加。

定理 7 扩展模型中改变政策利率 i_p 和利率走廊宽度 δ 的影响如下¹³：

1. 改变政策利率 i_p 的效果，在上行利率下： i_p 上升时，匹配银行的投资 k_m 变化不确定，而未匹配银行投资 k_u 上升，央行数字货币持有 \hat{z}_c 上升，银行间市场融资量 ℓ_m 与融资利率 i_m 变化不确定；在下行利率下： i_p 上升时， k_m 上升，而 k_u 下降， \hat{z}_c 上升， ℓ_m 下降， i_m 上升。
2. 改变利率走廊宽度 δ 的政策效果，在上行利率下： δ 上升时，匹配银行的投资 k_m 变化不确定，而未匹配银行投资 k_u 下降， \hat{z}_c 变化不确定， ℓ_m 下降， i_m 上升；在下行利率下： δ 上升时，匹配银行的投资 k_m 上升，而未匹配银行投资 k_u 下降， \hat{z}_c 上升， ℓ_m 下降， i_m 上升。

证明参见附录J。

直觉上，在上行利率区间时，保持利率走廊宽度不变，当政策利率 i_p 上升时，必然意味着 i_ℓ 和 i_d 二者的同时上升，而由之前对上下限的分析，这二者无论哪一方上升，对货币持有 z_c 都是促进作用，从而货币持有受到的影响整体表现为正；尽管 i_p 的上升会减少银行可借贷的 l_u ，但由于其对 z_c 的促进作用，使得未在银行间市场匹配成功的银行最终持有的流动性整体受影响为正，从而使得其投资 k_u 受影响也为正；而匹配成功的银行受到 i_ℓ 和 i_d 同时上升的影响，由于 i_d 对其的影响具有不确定性，且上下限的影响相互制衡，最终叠加起来对 k_m 、 l_m 和 i_m 的总影响也无法确定。

而保持政策利率不变，增大走廊宽度 δ 意味着 i_ℓ 上升以及 i_d 下降，货币政策收紧。这一方面使得未匹配的壹型银行有更少的动机使用便利贷款，转而持有更多 z_c ，但另一方面 i_d 的下降会减少零型银行使用便利存款的动机，对应地，在前一阶段零型银行就有更少动机携带 z_c ，从而总体对 z_c 的影响无法确定； i_ℓ 上升会直接使 l_u 减少，加之其对 z_c 的影响，整体会使未匹配的壹型银行流动性减少，从而投资 k_u 下降；而在银行间市场中，与 i_ℓ 的分析类似，货币政策的收紧会使得抵押融资量减少，抵押贷款利率上升；结合对 z_c 的影响， δ 对于匹配上的壹型银行的流动性影响方向无法确定，从而对其最终的投资 k_m 的影响也无法确定。

而在下行利率区间，容易看出，两种政策的政策效果与 i_ℓ 的效果完全一致。直觉上理解，在下行利率区间， i_d 不出现在系统中，对经济体没有调节作用，因此利率走廊宽度与中点的效应只能通过利率走廊上限 i_ℓ 这一唯一渠道体现，从而两种政策的效果自然与 i_ℓ 的效果一致。

（六）讨论：与基准模型比较

现在我们对基准模型与扩展模型进行对比，以解释扩展模型的变化与新的政策含义。扩展模型的主要变化，一是在基准模型的基础上加入了一个实物资本市场，使得货币政策的影响延伸到实体经济，二是对银行代表的企业在银行间市场的融资选择进行了更丰富的刻画。因此，基准模型的主要目的是构建利率走廊的框架并探索在批发金融端央行数字货币利率能起到的作用，而扩展模型通过给银行间市场融资更丰富的刻画以及引入实物资本投资，将研究的视角延伸到实体经济。

比较这两个模型的分析结果，主要的区别有二。一方面，很自然地，扩展模型通过引入实物资本 k ，以及对银行间市场匹配和未匹配的两类银行所代表的投资的刻画，可以讨论利率组合 (i_c, i_d, i_ℓ, i) 以及利率走廊政策 i_p 和 δ 对两类实体投资 k_m, k_u 的影响。另一方面，在基准模型中，利率走廊上限 i_ℓ 主要通过常备便利贷款起作用，而后者在抵押约束收紧时只取决于银行的债券持有量，因此 i_ℓ 的政策效应较为有限；而扩展模型给予匹配和未匹配银

行以抵押融资或央行便利贷款这两种融资选择，使得 i_p 可以通过银行间市场融资与央行数字货币持有和央行便利贷款之间的替代关系等多种途径对金融市场实现政策传导，并最终对银行间市场贷款与央行常备便利贷款所支持的实物投资，产生了再分配效应：有利于前者，而不利后者，强化了市场化融资的资源配置作用。央行数字货币的利率传导效应在两个模型中都有充分的体现，在上行利率和下行利率区间都能发挥作用，只不过基准模型聚焦于批发金融端视角，而扩展模型进一步延伸到实体经济。

六、讨论与总结

央行数字货币在全球范围内渐成风潮，而我国的数字人民币更是走在研发和试点的前列。基于我国自2014年提出、目前已逐渐成型但尚需完善的利率走廊体制，本文主要研究引入批发金融端付息的央行数字货币对利率走廊体制的宏观调控能力的影响，并对完善我国利率走廊体制、促进数字人民币推广，进行了深入的政策探讨。

在基准模型中，我们基于新货币主义的框架，构建了包含付息的央行数字货币和政府债券的宏观模型，研究了央行数字货币利率与利率走廊下其他利率组合的互动，并全方位地分析了货币政策传导的效果。基准模型的主要意义，一是通过包含货币和债券的简洁模型构建出利率走廊的理论框架；二是探索付息的央行数字货币与走廊上限和下限利率的互动关系。研究的结果显示，央行数字货币利率 i_c 无论在上行利率还是下行利率区间，都能充分地发挥作用，而且 i_c 若取代 i_d 成为下限利率，数值模拟的结果显示 i_c 的政策效果更为灵敏。

在此基础上，我们通过引入实物资本市场并对银行间市场融资进行了更丰富的刻画，扩展了基准模型，对货币政策的分析也进一步从批发金融端延伸到实体经济。扩展模型对银行间市场的融资增加了匹配与未匹配银行的刻画，前者通过市场获取抵押融资，后者以更高的成本从央行贷款便利获取融资，这些都更符合现实。基于此，扩展模型进一步完善了基准模型里的货币政策传导机制，利率走廊的上限 i_p 能充分地发挥作用，尤其 i_p 上升时会抑制依靠央行便利贷款所支持的实体投资，但会增加市场抵押融资所支持的实体投资，起到了鼓励市场化融资的再分配效应。扩展模型的另一重要结果是，央行数字货币的利率传导除了依然在上行利率和下行利率区间都起作用之外， i_c 上升能在一定程度上增加实体投资，充分显示了央行数字货币利率对金融市场和实体经济都有很好的传导效果，非常有潜力成为一种新的政策工具。

结合我国利率走廊存在的问题和数字人民币试点的现状，本文的研究可能具有重要的政策启示。我国的利率走廊已经成型但尚需完善，例如公开市场政策利率和超额准备金利

率作为下限利率调整频率极低，引导市场利率的作用有限。数字人民币作为一种新型数字化法币，依托“双层架构”进行运营，处于第二层参与运营的商业银行是推广数字人民币的真正主力。但是，截至目前商业银行似乎尚未确立清晰的商业化路径，来推广一种与银行存款可能是互补品也可能是替代品的新型支付方式（Dong and Xiao, 2023）。为此，本文提出如下政策建议：当前我国数字人民币应该考虑在批发端（面向金融机构）展开试点。在批发金融端，央行对商业银行持有的央行数字货币可以考虑参照超额准备金利率水平单独付息，以激励商业银行进一步推广数字人民币；央行数字货币利率可根据政策调控的需要进行调节，可以作为现有利率走廊的重要补充，必要时甚至可以作为走廊下限发挥作用，进一步优化货币政策的传导效果。我们建议为目前处于数字人民币2.0层的10家商业银行所持的央行数字货币建立单独的账户以计算利息。由于目前大众通过商业银行获取的数字人民币不付息，央行数字货币账户的利息能提升商业银行推广法定数字货币的积极性，而一旦有更多的银行和相关商户进行推广，基于网络效应，处于双边市场另一端的普通公众也会更愿意使用数字人民币进行支付，从而最终起到全面推广的作用。更为重要的是，央行数字货币利率可以在不改变目前超额准备金利率的前提下，作为常规性调节工具，引导市场利率，让利率走廊下限充分发挥作用，进一步推进我国利率市场化进程。当然，上述政策如果要具体落地实施，还面临一些技术和政策障碍。从技术角度来看，据我们有限的了解，目前央行数字人民币试点项目中，处在2.0层的10家商业银行之间的数字货币系统尚未完全打通，这可能是批发端数字货币面临的第一大技术障碍；此外，现有商业银行支付和清算的相关系统还需进一步数字化，才能真正实现数字人民币系统与现有银行结算系统之间的对接（interoperability）。在政策层面，我们提出的建议首先需要数字人民币试点项目能够从零售端扩展到批发端，我们认为这是推广数字人民币的关键步骤，但这需要政策制定者在考虑各方面因素后做出决策。

随着全球范围内央行数字货币研发和试点的深入，国际学术界对央行数字货币的研究不断涌现，而研发和试点走在世界前列的数字人民币的研究更应迎头赶上。本文是填补国内关于央行数字货币的严肃学术研究的尝试之一。当然，本项目的研究尚未完全结束，本文的研究以理论研究和分析为主，类似于前瞻性“理论试验”；未来的研究，包括但不限于探讨付息的央行数字货币可能对财政政策带来的变化，并引发对宏观经济学中货币政策与财政政策的边界这一经典问题的现实探讨；收集我国银行间市场和央行常备借贷便利操作的数据，进行相关的宏观校准和实证分析；也计划融入更多债券市场异质性的建模，以丰富对金融机构在银行间市场交易与获取央行常备借贷便利的选择之刻画；或者融入关于宏观审慎监管的建模和分析，以完备对我国货币政策和宏观审慎双支柱框架的研究，等。

注释:

^① 追溯源头，2009年加密数字货币比特币的诞生，以及随着时间推移众多基于区块链技术的私人加密数字货币涌现，乃至2019年美国社交媒体巨头Facebook联合众多合作伙伴推出新型加密数字货币——稳定币Libra（后改名Diem，2022年已出售给另一家公司），以纸币作为法币的各国金融体系不断受到私人加密数字货币的威胁和挑战，所有这些都成为各国央行推出数字化法币的重要催化剂。2020年初爆发的全球新冠疫情，则是助推数字化法币的另一无形力量：对现金传播病毒的恐惧，各国推出的保持社交距离甚至封城等抗疫政策，都进一步加快了全球范围内数字化法币的研发进程。连之前对央行数字货币不太热衷的美国，也在2022年3月通过总统拜登签署行政令，要求美联储和相关机构抓紧研发美国的央行数字货币，以确保美国在数字资产和央行数字货币领域的全球领导地位（The White House, 2022）。

^② 在传统货币模型中，无论是现金先行模型（Cash-in-Advance Model, CIA模型）还是内含货币效用模型（Money-in-Utility Model, MIU模型），引入的货币是不付息的；但在新货币主义的理论框架下，本质上货币只是一种资产（assets），通过构建具有微观基础的宏观货币模型，可以对其付息。Rocheteau et al. (2018)就基于新货币主义的理论框架，从流动性的不同维度（可接受性与可抵押性），对（付息）货币与付息债券之间的差别进行了深入探讨，也为本文的建模设定奠定了理论基石：货币（央行数字货币）是模型经济体中唯一的交易媒介，而债券主要作为银行间市场交易的抵押品。进一步来说，Lagos and Zhang (2022)也详细讨论了新货币主义理论框架与CIA/MIU模型的区别。特别地，当前央行数字货币的最新文献中，付息的央行数字货币是国际学术研究聚焦的重要维度，如Chiu et al. (2023)和Keister and Sanches (2023)。不过，这两篇论文都聚焦于零售端付息的央行数字货币，而本文则聚焦于批发金融端付息的央行数字货币。相较而言，在批发端付息，比零售端更可控，在现实中实施的可能性也更高。本文通过理论模型的构建与推演，对批发金融端付息的央行数字货币可能带来的效应，进行了前瞻性的理论研究。

^③ 我国的央行数字货币自2014年启动研发以来，2017年曾在数字票据交易平台进行过批发端的“沙箱试验”，而自2019年末以来的密集试点，则主要聚焦于零售端。

^④ 中国人民银行：《多边央行数字货币桥项目在京召开会议》，2023年6月29日，https://mp.weixin.qq.com/s/v41U8Njdp-6DgtY_kewrZg

^⑤ 现实世界中存在多种负利率的不同情形，既包括金融产品出现的负利率，例如瑞士的国债收益率曾经出现负利率（Rocheteau et al. 2018），北欧国家还曾出现负利率存款和贷款等，也包括利率走廊的下限利率为负的情况，例如欧元区和日本等利率走廊体制的国家和地区，下限利率都曾长期为负（欧元区自2014年至2022年6月推行负利率政策，日本截止2022年12月末，因为通胀走高也退出在即）。本文中下行利率区间的“负利率”，更贴近欧元区和日本出现的利率走廊的下限为负的情况。

^⑥ 需要特别强调的是，本文的CBDC有别于传统货币政策中的超额准备金。对于商业银行而言，传统的超额准备金与对企业发放贷款之间是相互替代的作用，当超额准备金利率上升时，商业银行会减少贷款，增加存放于央行的超额准备金。但在本文批发端CBDC的情形下，CBDC与对企业发放贷款是起互补作用的，CBDC是商业银行给企业发放贷款的资金来源之一，CBDC利率越高，意味着商业银行有更多

的资金向企业发放贷款。

^⑦ 肖筱林等（2023）对2009-2022年间数字货币（包括央行数字货币）领域的前沿文献和政策报告进行了全面述评。考虑到篇幅限制，这里重点述评一些学术性论文。姚前（2019）基于DSGE模型的参数校准估计，发现央行数字货币对我国银行系统和金融结构的冲击可控，长期看有助于提高经济产出。王鹏等（2022）使用了支付类资产配置模型，讨论了央行数字货币潜在的“金融脱媒”风险。肖筱林（2022）则基于新货币主义的框架，对央行数字货币发行对银行业和宏观经济的影响作了前瞻性理论研究。刘凯等（2023）构建了一个包含数字支付因素和货币创造过程的多部门动态宏观模型，结果显示，数字人民币发行与数字支付在一定程度上能够降低金融摩擦，改善金融监管。

^⑧ 为了分析的简便，我们假设银行向央行常备借贷便利窗口申请贷款，总能得到。

^⑨ 这个“没有央行数字货币的基准模型”比较接近现实中央行数字货币尚不存在，银行准备金不付息、只有超额准备金被付息的情况。在数值模拟部分，我们也是基于这个模型，计算了下限利率 i_d 的利率弹性。

^⑩ 一方面，费雪效应是指资产的名义利率和通胀率会同时发生变化，但投资者真正在乎的是实际收益，通胀率上升意味着资产的实际收益下降，因此对债券的需求下降，于是价格下降而利率上升；另一方面，蒙代尔效应是指，债券和货币在投资者的资产组合里是替代品，更高的通胀率使得持有债券变成更有吸引力的选择，从而需求上升、价格上升导致利率下降。最终，一正一反的效应使得对 i_b 的影响不确定。

¹¹ 我们想强调一点，作为实际下限的 i_c 具有更灵敏的政策效果，这一事实可以广泛地成立——无论是在央行数字货币已经流通的环境中，还是将央行数字货币从无到有地引入时。另外，通过建模的稳健性检验和相关分析，还可以看到，尽管我们定义的下行利率区间较之现实负利率更为宽泛，但是当我们下行利率锚定在现实负利率时，相关政策分析依然成立，这也显示了我们的模型具有强大的理论和政策解释力。

¹² 除了欧元区和日本等实施利率走廊体制的国家，对超额准备金付息也是美国在2008年金融危机以后推出的非常规货币政策之一。随着金融危机后多轮量化宽松的推行，包括2020年新冠疫情爆发后美联储推出更大规模的量化宽松，美国金融机构持有的准备金数量不断攀升，也使得超额准备金利率这一政策工具变得更为重要。而且，2021年6月美联储正式取消了对金融机构的法定准备金要求（Regulation D，具体见美联储官网相关网页），并将超额准备金利率（interest rate on excess reserves）改名为准备金余额利率（interest rate on reserve balances, IORB）。对应着我们的研究，美联储对存款性金融机构所持有的准备金余额全方位付息，非常类似于模型经济体中对无论零型还是壹型银行持有的批发金融端央行数字货币都付息。

¹³ 这里需要满足的条件是 ℓ_u 的体量相对于 ℓ_m 较小。具体地，我们要求

$$\max\left\{\left(1 + \frac{\delta}{1+i_d}\right)\ell_u, \left(1 + \frac{1+i_p}{2(1+i_d)}\right)\ell_u\right\} < \ell_m$$

这一假设符合中国银行间市场交易现状（详见附录A），即金融机构通过银行间市场的融资量（ ℓ_m ）远高于通过央行便利贷款的融资量（ ℓ_u ）。

参考文献

- (1) 邓伟、宋敏、刘敏：《借贷便利创新工具有效影响了商业银行贷款利率吗?》，《金融研究》，2021年第11期
- (2) 侯成琪、黄彤彤：《流动性,银行间市场摩擦与借贷便利类货币政策工具》，《金融研究》，2020年第9期
- (3) 刘凯、郭明旭、李育：《数字人民币发行与数字支付发展的宏观经济影响研究》，《中国工业经济》，2023年第3期
- (4) 刘凯、李育、郭明旭：《主要经济体央行数字货币的研发进展及其对经济系统的影响研究：一个文献综述》，《国际金融研究》，2021年第6期
- (5) 刘明康、黄嘉、陆军：《银行利率决定与内部资金转移定价——来自中国利率市场化改革的经验》，《经济研究》，2018年第6期
- (6) 陆军、黄嘉：《利率市场化改革与货币政策银行利率传导》，《金融研究》，2021年第4期
- (7) 牛慕鸿、张黎娜、张翔、宋雪涛、马骏：《利率走廊,利率稳定性和调控成本》，中国人民银行工作论文，2015年
- (8) 王鹏、边文龙、纪洋：《“央行数字货币”的概念框架与国际进展》，《产业经济评论》，2020年第5期
- (9) 王鹏、边文龙、纪洋：《中国央行数字货币的微观需求与“金融脱媒”风险》，《经济学(季刊)》，2022年第6期
- (10) 肖筱林、黄益平、龚六堂：《数字货币研究综述：2009-2022》，工作论文，2023年
- (11) 肖筱林：《发达经济体货币政策演变述评：2008-2022》，《经济管理学刊》，2023年第1期
- (12) 肖筱林：《央行数字货币发行对商业银行的影响研究》，《经济学（季刊）》（已接受），2022年
- (13) 熊启跃、王书朦：《负利率对银行净息差影响机制研究——基于欧洲主要上市银行的经验证据》，《金融研究》，2020年第1期
- (14) 姚前：《法定数字货币的经济效应分析:理论与实证》，《国际金融研究》，2019年第1期
- (15) 姚前：《法定数字货币在互联网投资借贷的应用研究》，《中国科学:信息科学》，2018

年第9期

- (16) 姚前：《理解央行数字货币:一个系统性框架》，《中国科学:信息科学》，2017年第11期
- (17) 易纲：《中国的利率体系与利率市场化改革》，《金融研究》，2021年第9期
- (18) 张乐、王淑敏：《法定数字货币:重构跨境支付体系及中国因应》，《财经问题研究》，2021年第7期
- (19) 赵恒、周延：《央行数字货币对货币结构与经济增长的影响效应研究》，《国际金融研究》，2022年第6期
- (20) 中国人民银行：《中国数字人民币的研发进展白皮书》，2021b年
- (21) Afonso, G., Armenter, R. and Lester, B., 2019, “A Model of the Federal Funds Market: Yesterday, Today, and Tomorrow ”, *Review of Economic Dynamics*, vol. 33, pp.177~204.
- (22) Altavilla, C., Boucinha, M. and Peydró, J., 2018, “Monetary Policy and Bank Profitability in a Low Interest Rate Environment ”, *Economic Policy*, vol. 33(96), pp.531~586.
- (23) Amzallag, A., Calza, A., Georgarakos, D. and Sousa, J., 2019, “Monetary Policy Transmission to Mortgages in a Negative Interest Rate Environment ”, ECB Working Paper.
- (24) Andolfatto, D., 2021, “Assessing the Impact of Central Bank Digital Currency on Private Banks ”, *The Economic Journal*, vol. 131(634), pp.525~540.
- (25) Bech, M. and Monnet, C., 2016, “A Search-Based Model of the Interbank Money Market and Monetary Policy Implementation ”, *Journal of Economic Theory*, vol. 164, pp.32~67.
- (26) Berentsen, A. and Monnet, C., 2008, “Monetary Policy in a Channel System ”, *Journal of Monetary Economics*, vol. 55(6), pp.1067~1080.
- (27) Berentsen, A., Camera, G. and Waller, C., 2007, “Money, Credit and Banking ”, *Journal of Economic theory*, vol. 135(1), pp.171~195.
- (28) Berentsen, A., van Buggenum, H. and Ruprecht, R., 2020, “On the negatives of negative interest rates and the positives of exemption thresholds”, Working Paper, (372).
- (29) BIS (Innovation Hub), 2022, “Project mBridge: Connecting economies through CBDC”, BIS website.
- (30) Chiu, J., M. Davoodalhosseini, J. Jiang and Y. Zhu, 2023. “Bank Market Power and Central Bank Digital Currency: Theory and Quantitative Assessment” , *Journal of Political Economy*, vol.131(5), pp.1213~1248.
- (31) Demiralp, S., Eisenschmidt, J. and Vlassopoulos, T., 2017, “Negative Interest Rates, Excess

-
- Liquidity and Bank Business Models: Banks' Reaction to Unconventional Monetary Policy in the Euro Area ", Working Paper.
- (32) Dong, M. and Xiao, S. X., 2023, "Idle Liquidity, CBDC and Banking ", SSRN Working Paper.
- (33) Duffie, D., Gârleanu, N. and Pedersen, L. H., 2005, " Over-The-Counter Markets " , *Econometrica*, vol. 73(6), pp.1815~1847.
- (34) Eggertsson, G. B., Juelsrud, R. E. and Wold, E. G., 2017, "Are Negative Nominal Interest Rates Expansionary? ", NBER Working Paper, No. w24039.
- (35) Heider, F., Saidi, F. and Schepens, G., 2019, " Life Below Zero: Bank Lending under Negative Policy Rates " , *The Review of Financial Studies*, vol. 32(10), pp.3728~3761.
- (36) Keister T. and Sanches D., 2023, " Should central banks issue digital currency? " , *The Review of Economic Studies*, vol. 90(1), pp.404~431.
- (37) Kosse, A. and Mattei, I., 2022, "Gaining Momentum—Results of the 2021 Bis Survey on Central Bank Digital Currencies " , BIS Papers.
- (38) Lagos, R. and Wright, R., 2005, " A Unified Framework for Monetary Theory and Policy Analysis " , *Journal of Political Economy*, vol. 113(3), pp.463~484.
- (39) Lagos, R. and Zhang, S., 2019, "A Monetary Model of Bilateral Over-The-Counter Markets ", *Review of Economic Dynamics*, vol. 33, pp.205~227.
- (40) Martin, A. and Monnet, C., 2011, " Monetary Policy Implementation Frameworks: A Comparative Analysis " , *Macroeconomic Dynamics*, vol. 15(S1), pp.145~189.
- (41) Rocheteau, G., Wright, R. and Xiao, S. X., 2018, " Open Market Operations " , *Journal of Monetary Economics*, vol.98, pp. 114~128.
- (42) The White House, 2022, "Executive Order on Ensuring Responsible Development of Digital Assets", website of the White House, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/03/09/executive-order-on-ensuring-responsible-development-of-digital-assets/>