



价格理论与实践
Price: Theory & Practice
ISSN 1003-3971, CN 11-1010/F

《价格理论与实践》网络首发论文

题目：数字经济下科技创新的激励新方式讨论：智能合约的运用
作者：李平，曹茜
DOI：10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2024.01.004
网络首发日期：2024-03-26
引用格式：李平，曹茜. 数字经济下科技创新的激励新方式讨论：智能合约的运用[J/OL]. 价格理论与实践.
<https://doi.org/10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2024.01.004>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

数字经济下科技创新的激励新方式讨论：智能合约的运用

内容提要：科技创新可以提高企业的竞争力和盈利能力。然而，企业中进行科技创新的主体大多数是企业内部科研人员，由于组织内部缺乏足够的激励和奖励，创新动力不足。本文从科技创新的具体细节出发，着眼于具体的创新活动中科研人员的激励研究。首先，分析组织内部科技创新存在激励不足的问题；然后，从机制设计的角度出发构建了一个动态机制，该机制可以有效减少科研投入不足的问题；最后，引入数字经济下区块链中的智能合约来具体实施本文构建的激励框架，并提出增强基础设施建设，推动企业数字化转型，建立健全相关法律法规，保护和鼓励科技创新等相关政策建议。

关键词：数字经济；科技创新；智能合约；机制设计

DOI: 10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2024.01.004

一、问题的提出

2022年10月16日，习近平总书记在党的二十大报告中强调：“我们从事的是前无古人的伟大事业，守正才能不迷失方向、不犯颠覆性错误，创新才能把握时代、引领时代”^①。2022年9月29日，世界知识产权组织(WIPO)发布《2022年全球创新指数报告》，其从创新投入和创新产出两个方面设置政策环境、人力资本与研究、基础设施、市场成熟度、商业成熟度、知识与技术产出、创意产出等7个大类81项细分指标，对全球132个经济体的创新生态系统表现进行综合评价排名。评价结果显示，中国企业创新主体地位不断强化，全社会研发(R&D)经费中企业资金占比在全球排名第3位，较上年提升1位。2021年，全社会研发投入2.79万亿元，其中企业投入占76%；3.7万亿元的技术合同交易额中，90%来自企业。在数字经济背景下，如何进一步激发企业创新活力？

本文的研究目标是构建一个激励机制，激励科研人员进行有效的专有性投资，进而提高企业创新水平。本文提出一种具体在组织内部激励科研人员的方式，即通过一个自动执行的合约激励创新投入，以保障科研人员的投入有相应回报。这一合约融合了博弈论与信息经济学中的机制设计与激励设计的方法、计算机科学中的区块链技术以及民法学中责任权利归属划分等工具，创造性地在理论上提供了一个能够鼓励企业科研人员积极投身科技创新，同时能够督促企业管理者给予科研人员合理薪酬奖励的智能合约，以期能够有效地解决企业内部科技创

新激励不足的问题。

二、相关研究文献评述

组织或企业内部的创新研发行为研究最早可以追溯到1932年科斯的研究，即如果市场是分配资源的有效方式，那么为什么很多交易发生在公司内部。关于公司边界的讨论引发了一系列关于不完全契约的研究，20世纪80年代初，Williamson(1986)提出经济学中的系统研究交易成本的范式，阐述专有性投资(firm-specific-investment)一旦完成有可能面临合作伙伴的不履约行为。因为预期到对方不履约，原本可以做有效投资的一方可能拒绝投资，于是会出现专有投资不足的现象。Alchian和Demsetz(1972)发现，交易成本会导致有效投资无法开展，于是公司的成立能够降低协调资源配置等交易成本。Grossman和Hart(1986)关于不完全合约的研究、Hart和Moore(1988)关于产权的研究，开创了用不完全合约理论进行研究的先河，这一系列文章的一个重要结论就是通过产权归属解决激励不足问题，产权理论(Property Right Theory)就此诞生。

与此同时，动态实施理论在20世纪末为不完全合约理论的分析提供了全新的博弈论视角和机制工具，并引发了对实施理论与不完全合约理论的深入探讨。近年来，学者们对于动态机制的鲁棒性提出了理论上和实验上的质疑，其中包括子博弈纳什均衡精炼在理性假设上过于严苛，纳什均衡的精炼解在应对少许不完全信息冲击上存在脆弱性，经典实施理论中对个体理性中利他主义的忽视等，详见

^①习近平：高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[R].2022-10-25.https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.

Aghion 等(2012)、Chung 和 Ely(2003)以及 Fehr 等(2021)的研究。Frydlienger 和 Hart(2023)研究了如何将不完全合约的效率提高,并提出用指导性原则来引导合约缔造方的不可描述或不可约束行为。不完全合约的理论和现实意义在中国特色的经济发展中尤为凸显。早在 20 世纪末对国有企业改革的分析中,周其仁(1996,1997)就以具体案例为依托,分析合约设计和制定对于企业产权、经营权以及企业发展的重要性。

本文研究的科技创新问题不仅包括技术创新,也包括组织形式、管理方法等创新。通过数字经济下的区块链技术,本文试图提供一个解决经典的不完全契约问题的新思路。

经典的道德风险模型是研究企业内部经理行为的基础,与经理行为相比,科研人员的创新行为有所不同。科研人员薪酬制度大部分由管理层制定,而管理层是具有公司控制权的,科研人员与管理层可能存在信息不对称。在我们的模型中,科研人员的行为是管理层可以观测到的。尽管不能以努力程度作为订立合约的基础,但通过科研成果和努力程度的一一对应,也可以反映科研人员的创新行为。所以,在我们的模型中不存在道德风险问题。

关于创新主体的分析,欧阳耀福(2023)研究互联网平台化组织模式对企业创新的影响,从企业外部分析创新环境的营造。而从企业内部创新主体角度进行理论分析的较少,实证分析中,孔东民等(2017)分析了企业内部薪酬与企业创新的关系,发现薪酬差距和人力资本结构之间存在显著的因果关系。本文着重分析企业内部的创新激励构建,结合数字经济发展提供的新智能工具,构建了一个可以自动执行的、合理的激励智能合约,让企业内部科研人员可以不用担心自己的科研努力被套牢,以期从微观角度提高科研人员的科研动力,从而充分发挥创新主体的作用。

在不完全契约领域,激励不足问题一直以来是学者研究的重点。聂辉华(2008)研究声誉对解决双边交易模型中专用性人力资本投资不足的作用,其关注的是带有不对称信息的重复博弈,首次引入了声誉作为影响人力资本投入的因素,并提出随着声誉的提高,人力资本的投入水平也会提高。Chen 等(2023)从机制设计与实施理论的角度分析如何构建一个动态机制解决双边激励不足问题,并从实验室角度验证机制的可实施性,在完全信息中假设不存在讨价还价的机会,实现了双边人力资本的有效投入。Gans 和 Holden(2022)构建了一个可以预防和制止前段挤兑的以太坊中的智能合约,提出将机制设计用于区块链中智能合约构建的实践框架。

关于区块链和智能合约的研究大多集中在法学和计算机科学,而有关经济学的研究多集中于区

块链在金融领域的应用,并且集中于加密货币。自从区块链上升为国家战略并纳入“新基建”,我国区块链技术和应用都取得了阶段性成果,其主要集中于数字供应链金融,如龚强等(2021)研究了区块链率先在供应链金融领域取得成功的原因,为我国数字供应链金融实践提供了理论基础。方明月(2023)研究发现,企业数字化转型有助于应对政策的不确定性问题。孙国强和谢雨菲(2024)为应用区块链技术解决供应链上下游的数据共享问题提出了新的视角和路径。本文从区块链中的一个重要应用——智能合约出发,综合执行理论中的机制构建,重新审视关于不完全契约与机制设计之间的争论,构建了一个智能合约框架下的机制,以实现社会最优的结果。

智能合约理论的首倡者萨博指出,智能合约是一套以数字形式定义的承诺,包括合约参与方在执行这些承诺时的协议。在萨博看来,智能合约以数字化形式存在,合约条款可编码,基于预设条件及触发机制自动履行,一旦履行,不可撤销。郭少飞(2019)指出,区块链智能合约如果蕴含当事人一致的意思或要约承诺,在符合传统民法合同标准的情况下,这种智能合约应纳入合同法框架。

工信部印发的《2018 年中国区块链产业白皮书》认为,智能合约是由事件驱动的、具有状态的、获得多方承认的、运行在区块链之上的,且能够根据预设条件自动处理资产的程序。智能合约最大的优势是利用程序算法替代人为仲裁和执行合同。本质上讲,智能合约是一段程序,其具有数据透明、不可篡改、永久运行等特性。Gans 和 Holden(2022)研究了智能合约框架下经典的所罗门问题,着重分析了抢先交易(Front Running)的问题。具体来说,抢先交易是指如果从非公开信息中预先知道会影响到资产价格的大型交易,就可以抢先买卖以获得利润。本文重点分析智能合约框架下传统机制设计是否能得到改进,而忽略智能合约构建的技术层面,包括密码学、计算机科学等学科的技术细节。

本文研究的积极意义有以下三个方面:从宏观角度看,本文研究为企业数字化转型提供了思路,即通过信息技术实现合约签订的创新,解决管理层与科研工作者在利益上的激励相容问题;从微观视角看,把数字经济对科技创新的推进作用具象化,把科技创新的成果运用到了生产更多高质量创新成果的实践中;从政策上看,公共部门可以加强基础知识的普及,在推动数字经济发展和科技创新进程中,以服务补充监管,为企业创新环境提供可行的技术支撑。

三、基本模型

(一)一个简单的模型

假设科研人员与公司在日期 0 签订一个契约,约定在日期 2 时,科研成果研发结束,科研人员向公

司提交科研成果,由于缔约的时候很难描述在交付日期科研成果契合公司需求的程度,双方只能等自然状态在日期1后,再讨论协商。在日期0和1之间,科研人员要做出专用性投资。这种专用性投资会消耗精力、体力和时间,可以用一个成本函数来刻画,这种专用性投资或是发生在降低公司生产成本的生产管理领域,或是发生在提高公司盈利能力的产品设计优化等销售领域,投入越多就越增加科研成果对于公司的价值。专用性科研投入程度和成本及科研成果对于公司的价值都是对称的完全信息,然而在实际的商业运营中,这些信息往往不能被第三方所证实,或双方在保密协议约束下不能公开。为了聚焦关键问题,假设双方都没有外部选择权(outside option),没有谈判成本,没有贴现,并且在谈判时采用纳什谈判的解决方案,一比一分谈判时的待分配剩余(剩余可以理解为双方净收益的总和)。

为不失一般性,我们假设科研人员(标记为S)对于科研成果基础版本的生产成本为0,只有专用性投资提升其科技含量时会带来成本。为了简洁起见,我们假设科研人员付出成本C可以将物品对于公司(标记为B)的价值从 $\theta_l=10$ 提升到 $\theta_H=14$ ^①。假设科研成果转化后物品交付时,价格为P,并且这里转化成本简化为0。那么,对于公司来说,收益为 $V_B=\theta-P$ 。

同时,科研人员的最终收益为 $V_S=P$ 。物品的价值可能是高的或者低的,而价值是在日期2之后才能实现,并成为买卖双方的共同认知(common knowledge)。为了分析方便,假设物品对于公司价值高的时候,价值为14元,标记为 $\theta_H=14$,而买方认为物品价值低的时候,价值为10元,标记为 $\theta_l=10$ 。假设卖方的专用性投资成本为3元。

从社会最优的角度来看,科研人员的3元投资使得公司最终从产品中获得的价值增加4元。因此,社会最优资源配置应该是科研人员通过总价值3元的投资提高产品的最终价值。如果社会计划者可以规定物品价格在低价值时为5元,在高价值时为9元,那么卖方就会有动机去做专用性投资。然而,价值是不能被第三方(包括社会计划者)所观测到并作为立约基础的,那么,资源就很难做到优化配置。

在不完全契约的情况下,如果没有强有力的担保或者背书来保障价格的有效执行,那么在卖方做出专用性投资后,纳什谈判会使交易双方平分谈判时标的物品价值,即在上文列举的例子中价值高的物品成交价格7,而在价值低的时候纳什谈判价格为5。此时,科研人员发现做专用性投资是不划算的。因为得到价值的增加为2,但自己的科研投入成本为3。

这个简单的例子体现了不完全契约带来的激励不足问题会破坏社会最优的投资水平,导致效率

的降低。

(二)解析执行理论中一个简单的动态机制

[日期0]公司和科研人员双方签约合作,如有一方不签或者下文中合约终止的条件被触发,则合作终止。

[日期1]科研人员选择一个专用性投资(研发投入的总和)水平,0或者3。

[日期2]科研人员的专用性投资水平(同时也是其成本)和物品对于公司的价值,用一个状态来代表 θ ,成为双方对称信息,进入一个新的子合约,此子合约如下所示:

[日期2.1]公司B和科研人员S同时报告一个价值评估,分别记为 v_B^1 和 v_S^1 ,如果二者相等,记为V,那么在 $V=10$ 元时,双方以10元成交; $V=14$ 时,双方以14元成交;如果不同,则进入下一个阶段。

[日期2.2]公司账户中的20元被冻结,同时系统为公司提供一个可选集,10或者14,公司在其中选择某一个状态,标记为 v_B^2 ,如果是10则不交易,合同终止;如果是14,则以12元的价格进行交易。

[日期2.3]如果科研人员在日期2.1中的选择和公司在日期2.2中的选择一致,那么科研人员收到系统中冻结的金额为20元的补偿,合同终结;如果科研人员在日期2.1中的选择和公司在日期2.2中的选择不一致,那么公司账户中被冻结的20元和科研人员账户中的20元自动销毁,合同终止。

通过这个机制,我们发现执行理论中的动态机制可以解决不完全契约带来的效率损失。这是因为科研人员做出专用性投资的时候,通过逆向归纳法计算得知,进入日期2的动态规则的结果就是高价值的物品最终会以14元成交。

具体来看,在日期2.2时,公司对产品的不同估价决定了公司会做出不同的选择,即在估价14元的情况下会选择交易,而在估价10元的情况下不会交易。并且,这一结论不依赖于是否对科研人员进行理性假设,即只要公司选择是理性的,公司就会诚实地报告出产品的价值,这一结论就会成立。因此,在日期2.1时,为了获得奖励或者躲避惩罚,科研人员会选择报出公司物品的真实价值,进而公司也会报出公司物品的真实价值。这部分的详细分析可以参阅Chen等(2023)的研究。

(三)潜在再谈判和合谋问题

20多年来,关于不完全契约的解决方案,理论界争论不休。尽管子博弈纳什均衡精炼得到广泛的认可,但这个动态机制并未被不完全契约领域所接受。其主要原因有以下几点:

第一,不完全契约文献中对执行理论的批评在于再谈判(renegotiation)的问题。在传统文献中,

^①这里的赋值是为了阐述和计算的简单,本文的模型在一般化赋值(有限的赋值可能性)的情况下都可以推出同样的结论。

如果没有智能合约，也就是在任何时点缔约双方都可以撕毁合约，再谈判随之发生。假设日期 1 之后的真实状态的公司物品价值为 10 元。而在日期 2.1 的时候科研人员谎报其价值为 14 元。这时根据理性假设，在日期 2.2 时，公司会报出真实价值 14 元，那么双方会同时被惩罚。如果合同可以在日期 2.1 时经双方同意中止，那么机制的约束力就会消失。即在双方进入一个存在明显的帕累托改进的互损之前，他们可以选择撕毁契约，重新签订一个新的契约。对于双方来说，新的契约都是明显的帕累托改进。任意没有惩罚的交易或者不交易都会是一个对潜在互损结果的改进。那么，撕毁合约的可能性就会直接破坏上述机制在状态为 10 时的运行。

第二，由于传统机制中第三方存在的问题，合谋也会导致第三方惩罚机制的失败。合谋问题常见于买卖双方中某一方可能会跟第三方仲裁机构合谋，侵害另外一方的权益。在经典机制设计和执行理论中，第三方一直是一个模糊的概念。在具体实践中，可能是缔约双方共同信任的朋友或者律师。然而，在经济学上，第三方也会有自己的成本收益考量。这就带来潜在的合谋问题。

举例说明：假设现在真实的状态是 14 元，在日期 2.1 结束至日期 2.2 开始前，一方选择撕毁契约，惩罚会付给仲裁的第三方。这里存在一个合谋的机会。那么，在公司支付的惩罚金足够大的情况下，第三方可能串谋公司让其不同意交易，这样科研人员也会被惩罚，第三方再把一部分钱返还给公司。这会导致经典机制的失败。

四、运用智能合约促进科技创新激励的理论分析

上文我们分析以传统机制解决激励不足问题，得出事后再谈判问题和与第三方合谋问题会机制失败的两个重要原因。这导致不完全契约的产生。那么，禁止谈判（事前或者事后的谈判）在法律上或理论上都是不合理的，而传统合约一般都会有第三方存在，甚至是由法院监管，这些都会带来潜在的风险。

为了解决这一系列问题，Maskin 和 Tirole (1999) 将风险偏好引入模型中，证明如果有一方是风险厌恶型的，那么，存在一个改进的机制，使得谈判以及第三方合谋都不会破坏机制的成功。而本文不对交易双方进行风险偏好的假设，以一个简单的智能合约框架避免再谈判和合谋对契约执行的影响，借助智能合约去中心化和自动执行的性质实现卖方能够做最有效的投资，实现社会价值最大化。为了方便计算和理解，在模型中我们假设只做单方面的投资，而模型本身可以推广到多人都可以进行专用性投资。与他们的模型相比，也不需要假设双方任何人为风险厌恶类型，因此模型的适用性得到增强。

我们将（一）中的机制嵌入一个智能合约，利用

智能合约去中心化的优势，结合 MR 机制一起解决潜在的合谋问题，且智能合约不可被篡改的特性也可以解决动态机制中的再谈判问题。为了减少技术上的壁垒，以伪代码的形式进行呈现和讨论。该合约包括合同的签署、设置投资水平和物品价值、评估价值、完成交易和终止合同等功能。

合约中定义了公司地址、科研人员地址、投资水平、物品价值、合同价值、冻结金额和终止状态等。构造函数用于初始化合约，并设置初始状态为未终止。

合约中设定了关于签署合同、设置投资水平、设置物品价值、评估价值、完成交易和终止合同等的函数。这些函数有不同的访问权限要求，只有公司或科研人员才能执行相应的操作。

评估价值函数根据公司确定的物品价值和科研人员确定的物品价值进行判断，如果两者相等，确定合同中物品的价值，并根据合同价值执行不同的交易操作。如果两者不相等，冻结一定金额，并根据调用者是公司还是科研人员进行不同的处理。

完成交易函数用于完成交易操作，接收选择的状态作为参数。如果选择的状态与合同价值相等，科研人员将获得冻结金额作为补偿；否则，公司和科研人员账户中的冻结金额将被销毁。

终止合同函数用于终止合同，只有公司或科研人员才能执行该操作，并将终止状态设置为 true。需要注意的是：我们提供了一个简化的示例，实际的智能合约需要根据具体需求进行更详细地设计和实现，包括对安全性和其他功能的考虑。

```
构造函数(地址_公司, 地址_科研人员) {
    公司 = _公司;
    科研人员 = _科研人员;
    终止 = false;}
函数 签署合同() {
    要求(调用者 == 公司 || 调用者 == 科研人员, "只有公司或科研人员可以签署合同。");
    终止 = false;}
函数 设置投资水平(数字_投资水平) {
    要求(调用者 == 科研人员, "只有科研人员可以设置投资水平。");
    要求(_投资水平 == 0 || _投资水平 == 3, "无效的投资水平。");
    投资水平 = _投资水平;}
函数 设置物品价值(数字_物品价值) {
    要求(调用者 == 科研人员, "只有科研人员可以设置物品价值。");
    物品价值 = _物品价值;}
函数 终止合同() {
    要求(调用者 == 公司 || 调用者 == 科研人员, "只有公司或科研人员可以终止合同。");
    终止 = true;}
```

本文构建了一个传统机制与计算机算法结合的、只要在双方同意的情况下签订,就会自动执行到最后的智能合约,这个合约不需要第三方监管,同时双方也没办法撕毁合同进行再谈判^①。其与传统合约的关键区别在于区块链自动冻结了交易双方的一部分资金,这里为 20 元。而在代码中我们看到,甚至双方的信息都可以是匿名的,只要双方提供一个网址即可进行签约。这也使得本文构建的机制除了在解决公司内部科技创新方面可以提出新的思路,对其他更一般的环境也提供了一种新的可能。

五、运用智能合约促进科技创新激励一般模型及案例分析

上文用一个简单的模型展示了智能合约的引入可以帮助科研人员和公司在进行科技创新时消除后顾之忧,实现社会最优的科研投入,一方面,保障了科研人员的权益;另一方面,也促进了公司的科技创新,提升了产品的科技含量。现在将模型从两个状态拓展到有限个状态,提供一个一般化的框架分析可见不可测问题中的效率最大化问题。

(一)一般模型的构建

假设风险中性的科研人员和公司日期 0 签订一个完全契约,约定在日期 2 由科研人员向公司交付一个包含科技成果转化的物品 W。在缔约的时刻日期 0,双方很难描述在交付的时刻物品 W 达到的状态,以及这一状态给公司带来的价值和这一状态给科研人员带来的成本,双方只能等自然状态在日期 1 之后再讨论协商。在日期 0 和 1 之间,科研人员要做出专用性科研投入。这种专用性投资针对公司的某一种研发产品,其在给科研人员带来成本的同时,公司从该产品上获得的价值会增加。专用性投资的量、为公司带来的价值增加量以及科研人员的成本增加量在日期 1 之后对双方来说都是对称的信息,但这是第三方不可证实的。为不失一般性,也为了方便计算,假设在科研人员不做任何专用性投资的情况下物品对于公司的价值为 0,而科研人员除了专用性投资之外,物品的生产成本为 0。假设双方都没有外部选择权(outside option),物品 W 对于科研人员没有价值,而公司也没办法在市场上找到物品 W 的替代品。

其中, E_ω 表示以 ω 为条件的条件期望算子。无论在日期 2 双方以什么价格成交,社会总福利是固定的,而最大化的社会福利取决于科研人员的投资水平,表示为:

$$SO = \max_\sigma E_\omega [V(\omega, \sigma) - C(\omega, \sigma)]$$

对投入水平 σ 求导,一阶条件为: $V_\sigma(\omega, \sigma) = C_\sigma(\omega, \sigma)$ 。

为了不致引起混淆,本文用下标代表函数对下标变量求一阶偏导数,即 $C_\sigma(\omega, \sigma)$ 代表成本对投入水平 σ 求导的一阶导数。

在日期 2,如果双方进入纳什谈判,那么在日期 0 到 1 的时候由科研人员支付的成本已经沉没,纳什谈判的结果是 1:1 平分谈判开始时的总价值,即 $V(\omega, \sigma)$ 。所以,对于科研人员来说,专用性投资决策由下面的最优化问题决定,

$$U_s = \max_\sigma \left[\frac{V(\omega, \sigma)}{2} - C(\omega, \sigma) \right]$$

而该式对投入水平 σ 求导后的一阶条件为:

$$\frac{V_\sigma(\omega, \sigma)}{2} = C_\sigma(\omega, \sigma)$$

通过对两个一阶条件的比较,可以发现,在纳什谈判的预期下,卖方会选择的最有利的专用性投资水平和社会最优的专用性投资水平不同。也就是说,不完全契约会导致社会最优的专用性投资无法实现。

(二)引入价格制度的解析

解析一种价格制度:

$$P(\omega, \sigma) = V(\omega, \sigma)$$

即科研人员专用性投资带来的收益完全转化为员工的激励。很容易看出,这一价格如果能够在日期 2 的时候得以有效实施,则激励相容就可以实现,即科研人员投入的专用性投资的水平和社会最优的水平一致。而执行理论的关键在于如何在任意可能实现的 ω 和 σ 的情况下,实现交易以 $V(\omega, \sigma)$ 作为价格成交。

分析一般情况下如何在智能合约的框架下构建一个动态机制。在一般性的问题中,需要一个假设条件,即在不同的状态下买方的价值会有所不同。为了标记简单,把每一组 (ω, σ) 记为 v ,总的集合标记为 V 。然后,将这一假设正式表达为:假设对于任意两个不同的状态 $v \neq v'$,物品对于公司的价值不同。即在结果集中存在一个结果 a ,以下不等式成立:

$$u_B(a, v) \neq u_B(a, v')$$

对于任意两个不同的状态 $v \neq v'$,不等号两边代表着不同状态下的公司物品的价值。

在假设成立的情况下,我们可以构建一组可选集,使得在任意给定的状态 v 的情况下,公司都有动机去真实报告出真实世界的状态,即公司物品的价值。由此可以证明以下引理。

在假设成立时,存在一个可选集合 $\{y(v)\}_{v \in V}$ 在这个集合中,对于任意的两个不同的类型 $v \neq v'$,都有以下结论:

$$u_B(y(v), v) > u_B(y(v'), v)$$

也就是说,在类型为 v 时,公司 B 对于可选集中的选项会偏好 $y(v)$ 。

以公司的价值为基准,构建一组交易方案。给定一组 n 个有限的价值可能,将价值按升序排列标记为 v_1^1, \dots, v_n^1 。对于每一个 k ,定义一个 $v_i^{k-1} < \tilde{v}_i^k < v_i^k$,并且选择 $\{\tilde{v}_i^k\} \in (0, v_i^k)$,这样我们就可以构造一个 n 维的价格向量 $\{\tilde{v}_i^k\}_{k=1}^n$ 从而进一步构造一个 $n+1$ 维的交易向量 $\{\alpha_i^k\}_{k=0}^n$,公司支付 \tilde{v}_i^k 从而获得物品,标记为

^①一个基于传统机制与计算机算法结合的不需要第三方监管的智能合约完整函数详见《价格理论与实践》网站(<http://www.price-world.com.cn/>)附件。

$\alpha_i^k = \left(\frac{1}{2}, \frac{\bar{v}_i^k}{2}\right)$ 。当 $k=0$ 时, 标记 $\alpha_i^0 = (0, 0)$, 即没有交易。

可以看出, 对于不同的价值 $v_i, v_i' \in V_i$, 买方在这组 $n+1$ 个交易状态的偏好不同。具体来说, 对于每一个 v_i , 在 $\{\alpha_i^k\}_{k=0}^n$ 上的排序不同。于是, 可以在给定 v_i 的条件下, 排出一个从最好到最差的顺序。然后, 通过给予最好的结果最大的概率的方法, 构造一个分布如下:

$$y_i(v_i) = l_i$$

l_i 是一个在有限集合 A 上的分布, 每个结果 α 发生的概率为 $l_i(\alpha)$ 。具体来说, 给定每个 v_i 我们先在 $A = \{\alpha_i^k\}_{k=0}^n$ 以效用为依据做降序重排, 该分布把最高概率 $\frac{n-1}{1+\dots+n}$ 分配给最高排序 $l_i(\alpha_1) = \frac{n-1}{1+\dots+n}$, 以此类推, 第二高的概率 $l_i(\alpha_2) = \frac{n-2}{1+\dots+n}$ 分配给次高的结果, 直到最小概率给最差的结果。

从上文的讨论可以看出, 问题的关键在于构造一个去中心化的、杜绝合谋或者再协商问题的机制, 而这个机制在不受再协商限制的情况下能够实施给定状态下的价格, 那么科研人员就会在日期 1 做出社会最优的专用性投资水平。

(三) 智能合约框架下的机制构建

[日期 0] 公司和科研人员双方签约合作, 如有一方不签或者下文中合约终止的条件被触发, 则合作终止。

[日期 1] 科研人员选择一个专用性投资 (研发投入的总和) 的水平。

[日期 2] 科研人员的专用性投资水平 (同时也是其成本) 和物品对于公司的价值, 用一个状态来代表 θ , 成为双方的对称信息, 进入一个新的子合约, 这个子合约如下所示:

[日期 2.1] 公司 B 和科研人员 S 同时报告一个价值评估, 分别记为 v_B^1 和 v_S^1 , 如果二者相等, 记为 v , 那么双方按 $P(v)$ 达成交易; 如果不同, 则进入下一个阶段。

[日期 2.2] 公司账户中的 D 被冻结的同时, 系统为公司提供一个可选集 $\{y(v)\}_{v \in v}$, 公司在其中选择某一个状态, 标记为 v_B^2 , 获得对应的 $y(v_B^2)$ 。

[日期 2.3] 如果科研人员在日期 2.1 中的选择和公司在日期 2.2 中的选择一致, 那么, 科研人员收到系统中冻结的金额为 D 的补偿, 合同终结; 如果科研人员在日期 2.1 中的选择和公司在日期 2.2 中的选择不一致, 那么, 公司账户中被冻结的 D 和科研人员账户中的 D 自动销毁, 合同终止。

(四) 智能合约的一个应用: 智慧治理

习近平总书记在 2020 年 1 月 1 日出版的第 1 期《求是》的重要文章《坚持和完善中国特色社会主义制度推进国家治理体系和治理能力现代化》中指出: “制度更加成熟更加定型是一个动态过程, 治理能力现代

化也是一个动态过程, 不可能一蹴而就, 也不可能一劳永逸”。纵观人类文明史, 我们历经了三次产业技术革命, 如今我们的世界正处于百年未有之大变局之中。大数据、人工智能、区块链等数字技术日新月异, 如何将这些先进的技术做到为我所用, 在国家治理领域进行拓展, 事关整个经济社会能否健康、高效率、高质量发展。如何在大数据视角下处理好政府和市场的关系, 是推进国家治理体系和治理能力现代化的关键。

在智能合约的框架下本文提出了一个融合区块链技术和经典机制设计理论的激励框架。在这一框架下可以解决传统不完全契约导致的无效率问题, 从而实现交易双方或者多方的有效投入, 进而实现社会价值最大化。这一结论也可以应用到智慧治理的领域。例如, 当政府进入数字经济监管领域时, 由于数字经济的无实物化、自动化和智能化等特点, 政府与市场的关系厘定往往非常困难。智能合约框架下的机制设计为此提供了一个思路, 即政府可以采用电子化政务系统, 实行透明、公开的监管方法, 从行政形式上模仿智能合约去中心化、不可修改以及不可停止的特征进行监管。而很多地方政府在试运行的电子政务公开中, 已经使用了类似的方法。这样可以降低交易成本、监管成本以及事后的仲裁成本, 原因在于公开信息在媒体和公众的监管下, 可以大幅度提升透明度。这一思路同样适用于企业在生产管理活动中的数据化治理和智慧治理。

六、结论与建议

对于不完全契约带来的投资无效率的争论一直在持续, 一方面不完全契约领域的经济学家将契约不完全的基础归结于或然状态的不可描述性, 或是当事人理性的局限性; 另一方面, 执行理论中的模型建立在完全理性的基础上将不可描述的状态转化为只跟可描述的收益相关的内容, 从而在一定程度上瓦解了不完全契约存在的基础。本文将智能合约的框架引入到执行理论中分析不完全契约问题, 并通过一个简单的双边交易模型分析了去中心化和不可撤销性这两个智能合约的优势, 解决了经典的执行理论中的再谈判问题。在对执行理论模型的批评中, 缺乏现实基础和现实支撑可能是最实质的问题, 这也是未来不完全契约理论中的一个重要挑战和研究方向。对此, 针对科技创新我们提出以下政策建议:

1. 增强基础设施建设。科技创新离不开基础设施建设, 其包括基本的网络建设和信息处理相关的服务器设备更新等。这一系列的基础设施建设具有极强的公共品属性, 如果由私人企业来搭建可能会带来重复建设, 导致浪费。因此, 由几个企业共同完成或者由地方产业园区来搭建, 可能是一个行之有

效的思路。此外,基础设施建设不仅包括硬件上的升级更新,还包括科技人员的团队建设和培养。一方面,可以推进数字经济领域中的区块链技术市场合理有序发展,这可能需法律研究、计算机技术以及经济学研究等多个学科融合交叉共同制定一套有序但不失活力的市场机制;另一方面,由于基础设施建设的公共品属性,政府在智能合约潜在的市场中要发挥保驾护航的作用,维持市场健康有效运行。

2. 推动企业数字化转型。理论研究的对象是公司内部的创新行为和激励问题,因此要推动企业数字化转型才有可能将理论研究的结论应用到具体的创新研发工作中。在推动企业数字化转型中,要让企业理解和接受数字化确实能够降低成本、增加收益,让企业自发地进行数字化平台搭建,采用甚至研发数字化技术。

在企业数字化转型的初期,可以由政府推动企业和科研院所或者高校进行探索式发展。由于在转型初期,企业对数字技术不了解,高校、科研院所的科研人员和实验室就可以成为企业探索这一领域的起点。在逐步发展中,政府可以从推动者的角色过渡到监管服务者,在合同纠纷或者创新环境维护上发挥作用,促进产学研自发融合发展。

3. 建立健全相关法律法规,保护和鼓励科技创新。在理论研究中,我们发现,按照智能合约的设计,去中心化的特点可以有效解决企业对科研人员研发创新激励不足的问题。在双方自愿加入智能合约的情况下,责任权利清晰划分时,智能合约应纳入合同法的范畴(郭少飞,2019)。在具体实践中,还需要考虑公司和员工在组织架构上的关系。例如,在智能合约之外,很多问题还是通过公司这一架构进行组织内部的协调和处理的。这就造成了智能合约之外可能会有其他激励因素改变组织内部人员的行为逻辑。因此,在法律环境方面,可以探索在现有公司法、劳动法和合同法的框架内将智能合约纳入法律体系

中。为智能合约的建立和执行提供一个外部环境,避免公司或者科研人员在具体执行中产生动机的扭曲。这是一个系统化的工作,需要政府、企业以及科研机构共同去探索制定一套规范和促进企业内部科技创新的法律法规。

参考文献:

- [1]周其仁.市场里的企业:一个人力资本与非人力资本的特别合约[J].经济研究,1996(06):71-80.
- [2]周其仁.大型乡镇企业研究:横店个案笔记[J].经济研究,1997(05):31-42.
- [3]欧阳耀福.互联网平台化组织模式对企业创新的影响研究[J].经济研究,2023,58(04):190-208.
- [4]孔东民,徐若丽,孔高文.企业内部薪酬差距与创新[J].经济研究,2017,52(10):144-157.
- [5]聂辉华.契约不完全一定导致投资无效率吗?——一个带有不对称信息的敷衍扛模型[J].经济研究,2008(02):132-143.
- [6]姜强,班铭媛,张一林.区块链、企业数字化与供应链金融创新[J].管理世界,2021,37(02):22-34.
- [7]方明月,聂辉华,阮睿,沈昕毅.企业数字化转型与经济政策不确定性感知[J].金融研究,2023,512(2):21-39.
- [8]孙国强,谢雨菲.区块链技术、供应链网络与数据共享:基于演化博弈视角[J].中国管理科学,2024,31(12):149-162.
- [9]郭少飞.区块链智能合约的合同法分析[J].东方法学,2019(03):4-17.
- [10]Williamson O E. Economic organization: Firms, markets, and policy control [J]. Journal of Law and Economics, 1986, 29(02): 229-261.
- [11]Alchian A A, Demsetz H. Production, information costs, and economic organization [J]. The American economic review, 1972, 62(05): 777-795.
- [12]Grossman S J, Hart O D. The costs and benefits of ownership: A theory of vertical and lateral integration [J]. Journal of Political Economy, 1986, 94(04): 691-719.
- [13]Hart O D, Moore J. Incomplete contracts and renegotiation [J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1988, 56(04): 755-785.
- [14]Chen Y-C, Holden R T, Kunimoto Y Sun, Wilkening T. Getting Dynamic Implementation to Work [J]. Journal of Political Economy, 2023, 131: 285-387.
- [15]Gans J S, Holden R T. Mechanism Design Approaches to Blockchain Consensus. Tech. rep. [M]. National Bureau of Economic Research, 2022.
- [16]Maskin E, Tirole J. Unforeseen contingencies and incomplete contracts [J]. Review of Economic Studies, 1999, 66(1): 83-114.
- [17]Aghion P, Fudenberg D, Holden R, Kunimoto T, Tercieux O. Subgame-Perfect Implementation under Information Perturbations [J]. The Quarterly Journal of Economics, 2012, 127: 1843-1881.
- [18]Chung K-S, Ely J C. Implementation with Near-Complete Information [J]. Econometrica, 2003, 71: 857-871.
- [19]Fehr E, Powell M, Wilkening T. Behavioral constraints on the design of subgame-perfect implementation mechanisms [J]. American Economic Review, 2021, 111: 1055-1091.
- [20]Frydinger D, Hart O. Overcoming contractual incompleteness: the role of guiding principles [J/OL]. The Journal of Law, Economics, and Organization, 2023: ewac027.

(作者单位:中国社会科学院数量经济与技术经济研究所)

New Approaches to Incentivize Technological Innovation in the Digital Economy: A Discussion on the Application of Smart Contracts

Abstract: Technological innovation can enhance a company's competitiveness and profitability. However, most of the innovation activities within companies are carried out by internal researchers who often lack sufficient incentives and rewards, leading to a lack of innovation drive. This article focuses on the specific details of technological innovation and examines the incentives for researchers involved in innovation activities. Firstly, it analyzes the problem of inadequate incentives for internal research innovation within organizations. Then, it constructs a dynamic mechanism from the perspective of mechanism design to effectively address the issue of insufficient research input. Finally, it introduces the use of smart contracts in blockchain technology within the digital economy to implement the incentive framework proposed in this article. Additionally, it suggests enhancing infrastructure development, promoting digital transformation within companies, establishing comprehensive legal regulations, and proposing policies to protect and encourage technological innovation.

Keywords: digital economy; technological innovation; smart contracts; mechanism design