

林晓明 执业证书编号：S0570516010001
研究员 0755-82080134
linxiaoming@htsc.com

黄晓彬 执业证书编号：S0570516070001
研究员 0755-23950493
huangxiaobin@htsc.com

刘志成 执业证书编号：S0570518080005
研究员 010-56793940
liuzhicheng@htsc.com

何康 021-28972039
联系人 hekang@htsc.com

源洁莹 0755-82366825
联系人 yuanjieying@htsc.com

相关研究

- 1 《金工：周期是不确定性条件下的稳态》
2020.03
- 2 《金工：确立研究对象：行业拆分与聚类》
2020.03
- 3 《金工：风险预算模型的预算分配方式研究》
2020.02

周期是矛盾双方稳定共存的结果

华泰周期起源系列研究报告之四

系统自适应地对内部的矛盾进行调和，呈现出周期波动的规律

本文以劳动分工理论为切入点，站在系统的视角上论述了复杂性与稳定性的对立统一关系，并借助生态系统中的相关模型对复杂系统进行直观的刻画。Lotka-Volterra 竞争模型的模拟表明，复杂性更低的系统大概率具备更高的稳定性。蚁群的动力学系统模型则揭示了周期是矛盾双方稳定共存的结果。投射到经济系统中，繁荣与萧条的更替同样是无法逃脱的轮回，系统自适应的调整方式是形成反馈机制与弹性连接，并在宏观层面表现出周期波动的现象。

复杂性与稳定性对立统一地推动系统发展

劳动分工实现了生产效率的最大化，提升了系统的复杂度，但同时也降低了系统的稳定性。复杂性与稳定性作为系统内部的一对矛盾，既统一又斗争地推动系统的运动、变化和发展。我们借助 Lotka-Volterra 竞争模型对生态系统中的多个种群进行刻画，研究复杂性与稳定性在种间竞争中的直观表现。模拟结果表明，如果系统需要维持相对稳定的运作，那么就无法支持复杂度的不断攀升，复杂性更低的系统大概率具备更高的稳定性。

蚁群模型揭示了矛盾双方稳定共存的表现形式是周期

在经济系统中，矛盾是普遍存在的，系统的运行过程是对矛盾的不断适应与调和。我们用动力学系统模型模拟了蚁群内部探险工蚁与搬运工蚁的数量变化，并以此来观察复杂系统的内在运行规律。结果表明，稳定存活的两个群体在数量上呈现的动态平衡状态就是周期。当群体的自然增长率或是相互作用强度发生变化时，系统的稳态会随之发生变化，且周期会相应地变长或变短，但周期规律却始终始终是矛盾双方稳定共存的表现形式。

系统内部的正负反馈与弹性连接保证其有序运行

正负反馈是对立统一的关系，两者的同时存在决定了系统的稳态是周期。对于一个持续运作的系统，只有负反馈会导致系统一成不变从而失去生命力，只有正反馈则会导致系统的崩溃，而正负反馈的有机结合正是矛盾双方的相互贯通。周期是系统内各个正负反馈共同作用的结果，也是系统为了维持稳定与活力的唯一选择。此外，系统在不断的发展与进化中所找到的对个体和整体都最合适的连接方式是弹性连接。弹性连接保证了系统在应对外部风险时具备缓冲地带，也为系统的自我调节争取了一定的时间，是系统中不可或缺的关键要素。

风险提示：自然科学领域的周期规律可能无法直接迁移到社会科学领域；动力学系统模型是对真实世界的简单刻画，存在过度简化的可能；周期规律基于历史数据总结，历史规律可能失效；周期规律对市场长期规律进行研究，无法判断短期的市场情绪与政策冲击带来的影响；市场在某些极端情形下可能出现规律以外的交易风险。

正文目录

| | |
|-----------------------------------|----|
| 研究导读 | 4 |
| 劳动分工理论经过长期实践检验，普遍存在于生产生活之中 | 5 |
| 系统内部复杂性与稳定性的对立统一 | 6 |
| 劳动分工在提高生产效率的同时降低了系统抵御风险的能力 | 6 |
| 种群竞争模型揭示了复杂性的提升大概率伴随着稳定性的降低 | 7 |
| 周期是矛盾双方稳定共存的必然表现形式 | 16 |
| 繁荣和萧条的交替出现推动经济系统的发展 | 16 |
| 蚁群模型的周期波动是复杂系统的缩影 | 16 |
| 系统的自我调节机制保证其有序运作 | 22 |
| 周期是系统内各个正负反馈共同作用的结果 | 22 |
| 弹性连接作为缓冲机制可以吸收部分的外部冲击 | 24 |
| 全文总结与未来展望 | 26 |
| 风险提示 | 26 |

图表目录

| | |
|---|----|
| 图表 1: 劳动分工的好处与代价 | 6 |
| 图表 2: 种群密度随时间变化特征 | 9 |
| 图表 3: 各种群初始时刻与结束时刻的种群密度 | 9 |
| 图表 4: 稳定存活种群数量与初始种群数量的关系 | 9 |
| 图表 5: 系统不同连接程度下稳定存活种群数量与初始种群数量的关系 | 10 |
| 图表 6: $t=100$ 时种群 9 灭亡，各种群密度随时间变化特征 | 10 |
| 图表 7: $t=100$ 时种群 9 灭亡，各种群初始时刻与结束时刻的种群密度 | 10 |
| 图表 8: $t=200$ 时种群 9 灭亡，各种群密度随时间变化特征 | 11 |
| 图表 9: $t=200$ 时种群 9 灭亡，各种群初始时刻与结束时刻的种群密度 | 11 |
| 图表 10: $t=300$ 时种群 9 灭亡，各种群密度随时间变化特征 | 11 |
| 图表 11: $t=300$ 时种群 9 灭亡，各种群初始时刻与结束时刻的种群密度 | 11 |
| 图表 12: $t=500$ 时种群 9 灭亡，各种群密度随时间变化特征 | 11 |
| 图表 13: $t=500$ 时种群 9 灭亡，各种群初始时刻与结束时刻的种群密度 | 11 |
| 图表 14: $t=800$ 时种群 9 灭亡，各种群密度随时间变化特征 | 12 |
| 图表 15: $t=800$ 时种群 9 灭亡，各种群初始时刻与结束时刻的种群密度 | 12 |
| 图表 16: 连接程度为 50% 的各种群密度随时间变化特征 | 12 |
| 图表 17: 连接程度为 50% 的各种群初始时刻与结束时刻的种群密度 | 12 |
| 图表 18: 种群 17 灭亡时各种群密度随时间变化特征 | 13 |
| 图表 19: 种群 17 灭亡时各种群初始时刻与结束时刻的种群密度 | 13 |
| 图表 20: 种群 16 灭亡时各种群密度随时间变化特征 | 13 |
| 图表 21: 种群 16 灭亡时各种群初始时刻与结束时刻的种群密度 | 13 |
| 图表 22: 不同情形下系统达到稳定状态时各种群密度 | 14 |

| | |
|---|----|
| 图表 23: 连接程度最高和最低种群灭亡对系统的影响差值分布图 | 15 |
| 图表 24: 探险工蚁数量为 0 时搬运工蚁的数量变化 | 17 |
| 图表 25: 搬运工蚁数量为 0 时探险工蚁的数量变化 | 17 |
| 图表 26: 随时间推移探险工蚁与搬运工蚁的数量变化 | 18 |
| 图表 27: 搬运工蚁与探险工蚁的数量关系 | 18 |
| 图表 28: $n_1 = 20, n_2 = 5$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化 | 18 |
| 图表 29: $n_1 = 20, n_2 = 5$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系 | 18 |
| 图表 30: $n_1 = 5, n_2 = 20$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化 | 19 |
| 图表 31: $n_1 = 5, n_2 = 20$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系 | 19 |
| 图表 32: $r_1 = 0.3, r_2 = 0.1$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化 | 19 |
| 图表 33: $r_1 = 0.3, r_2 = 0.1$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系 | 19 |
| 图表 34: $r_1 = 0.1, r_2 = 0.3$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化 | 20 |
| 图表 35: $r_1 = 0.1, r_2 = 0.3$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系 | 20 |
| 图表 36: $a_{12} = 0.01, a_{21} = 0.03$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化 | 20 |
| 图表 37: $a_{12} = 0.01, a_{21} = 0.03$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系 | 20 |
| 图表 38: $a_{12} = 0.03, a_{21} = 0.01$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化 | 21 |
| 图表 39: $a_{12} = 0.03, a_{21} = 0.01$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系 | 21 |
| 图表 40: 蚁群模型的正负反馈 | 22 |
| 图表 41: 探险工蚁对自身的正反馈作用增强 | 23 |
| 图表 42: 搬运工蚁对自身的负反馈作用增强 | 23 |
| 图表 43: 探险工蚁对搬运工蚁的正反馈作用增强 | 23 |
| 图表 44: 搬运工蚁对探险工蚁的负反馈作用增强 | 23 |
| 图表 45: 推力 F 作用在刚性连接的系统中 | 24 |
| 图表 46: 推力 F 作用在弹性连接的系统中 | 24 |
| 图表 47: 拉力 F 作用在刚性连接的系统中 | 24 |
| 图表 48: 拉力 F 作用在弹性连接的系统中 | 24 |

研究导读

华泰金工团队在量化周期领域已积累了近 40 万字的深度报告，能够成熟地利用数量化的方法对周期规律进行识别和运用。基于周期研究的成果，华泰金工团队立足于统一性的视角，准确刻画系统的运动状态并推断经济系统未来的运动方向，编制了周期进取策略指数。指数自 2010 年回测至今，业绩表现亮眼，样本外表现符合预期。华泰金工团队在周期研究上的相关成果已获得业内的一定认可，而对于经济周期背后的逻辑起源是我们当前深耕的方向之一，我们希望更本质地认识周期、更科学系统地理解周期，从周期起源的角度去探讨系统的周期现象。

在 2019 年 12 月 25 日发布的《从微观同步到宏观周期》研究报告中，我们从萤火虫同步闪烁、惠更斯钟摆同步等自然界的周期现象中获得启发，总结出四个从微观同步到宏观周期的可能条件：1. 微观个体在进行类周期运动；2. 不同个体之间会互相影响；3. 系统存在一定的随机性；4. 有能量的注入保持系统的运转。进一步地，在 2020 年 1 月 2 日发布的《周期趋同现象的动力学系统模型》研究报告中，我们借助心理学中著名的 Haken-Kelso-Bunz (HKB) 模型验证了当系统初始状态为亚稳定状态时，上述四个条件为周期趋同的必要条件。

在这篇报告中，我们将站在系统的视角，重点论述系统内部复杂性与稳定性的对立统一关系，并讨论对于客观存在的矛盾，系统自适应的调整方式是形成反馈机制与弹性连接，且在宏观层面表现出周期波动的现象。

劳动分工理论经过长期实践检验，普遍存在于生产生活之中

从系统运行的角度来看，当前人们的社会经济活动具备一定的秩序，不同的要素发挥不同的职能，个体的正常运作保证了系统整体的合理运行。每一个这样各人、各单位各司其职的场景，都是劳动分工理论的一次实践。不难发现，在广泛的社会经济活动中，劳动分工不仅适用于不同职业、不同工种之间，甚至还适用于不同国家之间，劳动分工已然普遍存在于生产生活之中。

1776 年 3 月，亚当斯密在《国富论》中提出了劳动分工的观点，并全面系统地阐述了劳动分工对提高劳动生产率和增进国民财富的作用。亚当斯密认为，“分工的起源是由人的才能具有自然差异，那是起因于人类独有的交换与易货倾向，交换及易货系属私利行为，其利益决定于分工”。也就是说，系统中每一个个体对于私利的追求使得从某种程度上而言，系统的最优运作方式是效率最大化，从而保证了每一个个体的效用最大化。那么随着生产力水平的不断发展，劳动分工必然产生，而为了进一步提高社会生产效率，劳动分工的程度也会越加精细。

亚当斯密认为，“人们在经济活动中追求个人利益，正因为每个人都有利己主义，所以，每个人的利己主义又必然被其他人的利己主义所限制，这就迫使每个人必须顾及他人的正当利益，由此而产生了社会利益，社会利益正是以个人利益为落脚点的。假定个人乐于专业化及提高生产力，经由剩余产品之交换行为，促使个人增加财富，此等过程将扩大社会生产，促进社会繁荣，并达私利与公益之调和”。通俗而言，个人追求私利的出发点会导致劳动分工的产生，而系统在劳动分工之下有序运作并扩大规模会促使个体之间进行利益的交换。利益的交换自然使得个人不能无条件追求自身的效用最大化，个体之间的私利互相约束最终会形成一种动态的平衡。在这一平衡下，个人能极大地满足私利的同时不损害他人的利益，也即达到社会利益的最优。

对于亚当斯密的劳动分工理论，我们可以简单梳理其内核：劳动分工起因于个体之间存在差异以及个人对私利的追求；随着生产力水平的不断提升，劳动分工更加精细；社会中个人私利的互相限制成就了社会的繁荣与社会公益的实现。举例而言，自由贸易使得商品可以在各个国家之间流通，各国基于不同的生产条件使自身的资源、劳动力、资本得到最有效的利用，完成生产从而形成国际分工。国际分工使得各国都能在其生产或贸易方面占据优势，能够提高劳动生产率及增加物质财富，实现国家自身利益与全社会利益的最优。

总结而言，在社会运作的过程中，劳动分工可以有不同类型和不同层次的实践方式：最基本的是基于自身条件差异而形成的分工；进而产生物质生产的分工，如工业、农业等不同行业的协作；更进一步则有精神生产劳动上的分工，如政治领域、文化教育领域等；此外，国内社会的分工和国际社会的分工也是劳动分工的一个重要实现模式。各种分工在内容和形式上都有所差异，它们同时存在于复杂系统中，相互交错又相互制约，共同保证了社会生产的有序进行。本文探讨的劳动分工主要是生产过程中最基本的自然分工，也就是不同的个体担负不同形式的物质劳动的分工现象。

系统内部复杂性与稳定性的对立统一

劳动分工在提高生产效率的同时降低了系统抵御风险的能力

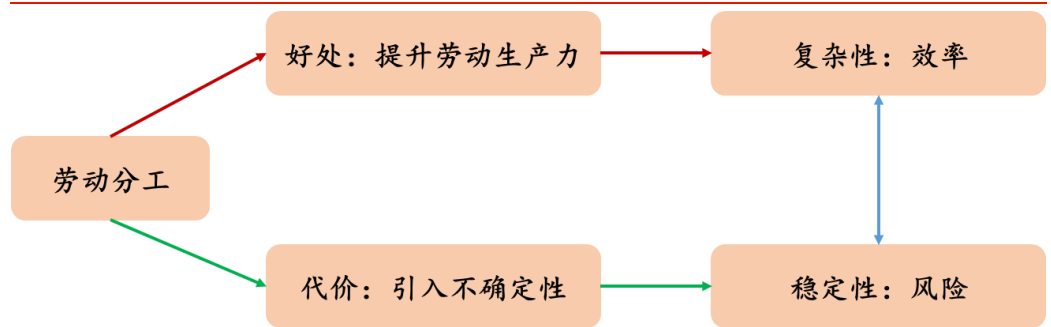
劳动分工的合作模式普遍存在于生产生活之中，随着生产力水平的提升，系统对于生产效率的要求会越来越高，促使劳动分工变得更加精细。由此可见，劳动分工的深化实践是社会生产过程的必然要求，而其带来的效率提升又能进一步推动生产的发展与进步。

以从古至今的制衣流程为例：在原始社会中，人们以树皮、兽皮蔽体，每个人可以完成自己的制衣流程，不需要分工合作。在古代社会中，人们将蚕丝、棉花等原料制作成绸缎、布匹等，养蚕、缫丝、织造、染整一系列过程通常在小作坊内完成，作坊内的工人会在一定程度上有所分工，更多时候可能是身兼多职，劳动分工的模式得到初步的实践。在现代社会中，随着工业的发展，人们会将羊毛等制成毛呢产品；随着化工产业的兴起和加工工艺发展，又增加了化纤、混纺等制品。在机器化生产的不断深化、技术的不断革新下，生产流程的步骤增多、每个环节的难度加大，工人难以身兼多职，但会被要求在其负责的环节中做到效率的最大化。

因而，劳动分工的精细实现必然带来系统效率的大幅提升，但各个环节的高度独立运作又会在某种程度上为系统引入风险。从系统的角度来看，精细化的劳动分工带来整体效率提升的同时，更本质的是提升了系统的复杂度。对于系统复杂度的定义可以多种多样，在这篇报告中，我们认为系统内部个体数量、种类的增多，以及个体之间依赖性的增强都会使系统变得更复杂。由此可见，我们对于系统复杂度的理解核心在于系统的构成元素和系统的内部连接结构。基于上述对复杂度的认知，我们可以定性判断一个系统复杂度的变化或者在一定程度上比较两个不同系统的复杂度大小，但一般难以定量刻画一个系统的复杂度大小。报告中关于系统复杂度的论述，我们会尽可能简单直观地比较一个系统复杂度的变化情况，探讨系统内部的元素和层次结构，避免陷入模棱两可的定量描述中。

仍以前文的制衣流程为例，引入染织、绣花等工艺后会导致生产的流水线变长，相应的技术门槛要求工人只需深耕其负责的步骤和领域；生产规模的不断扩大大会引入越来越多的工人，每个工人最大化自己所负责环节的生产效率就是对制衣全过程所做出的最大贡献。由此可见，随着生产力水平的提升和技术的引入，劳动分工使得生产系统的个体增多、工种增多，生产流水线上的各个环节联系紧密，每一个工种都不可或缺又难以互相替代，从而提升了系统的复杂度。

图表1：劳动分工的好处与代价



资料来源：华泰证券研究所

另一方面，劳动分工会为系统带来一定的风险，本质上是因为系统的稳定性有所降低。对于稳定性这一概念同样可以有很多不同的定义。在这篇报告里，我们认为稳定的关键在于系统具备维持有序运行状态的能力，也就是说系统能够在一定程度上容忍外部的冲击，在受到干扰后可以做出自适应的调整并恢复原来的运行状态，或是到达另一个可以有序运行的状态。基于对稳定性的理解，我们同样可以定性判断系统的稳定性变高或者变低，但难以对其进行定量的刻画。因此，对于系统稳定性的讨论，我们会客观且直观地考察系统对于风险的承受能力，清晰论述系统如何应对外界冲击并比较系统稳定性的变化。

回到前文的制衣流程，劳动分工提升了生产效率，使生产流水线上的环节较多、各环节依赖性较强。高度专业化的分工使流水线上的工人都只精于某一项技能，但对于各生产环节之间的关系了解程度较低，不同环节之间难以相互替代。因此，当某一个生产步骤受到意料之外的外部冲击时，如染织机器的突发故障或绣花图案的临时增多导致染织或绣花环节需要更多的工人去完成，这将对生产线的应变和协调能力产生巨大的考验。而由于复杂度较高的流水线上不同环节之间无法互相替代且相互依存度高，生产链条的上下游就可能无法正常运作。可以看出，劳动分工在提升系统复杂度的同时，不可避免地使得系统的脆弱性增加，抗风险能力减弱，也即稳定性降低。

基于对复杂性和稳定性的论述可以发现，对于系统而言，复杂性和稳定性是一对难以调和的矛盾。这一结论可能与很多人的直觉相悖，人们的直观感受可能是复杂系统承受风险的能力更强，因为特定部分遭到毁坏不一定影响其他部分的运作。然而根据前文的论述，我们所探讨的复杂度高的系统，其内部连接结构相互依存度高，以特定的连接方式保证其有序运行。因此，当外部风险对连接要素产生冲击时，系统可能不具备持续运作的能力，这体现了系统稳定性较弱的特点。相反地，对于复杂度较低的系统，个体之间的连接关系较弱，个体甚至可以依附于其他要素而独立完成生产生活，此时系统抵御外部冲击的能力会相对较强，稳定性较高。

进一步地，我们可以用辩证唯物主义的角度来看，系统的复杂性和稳定性本质上是对立统一的关系，两者既统一又斗争地推动系统的运动、变化和发展。根据唯物辩证法，对立统一规律包含以下四项基本内容：

1. 对立面的统一和斗争；
2. 矛盾的统一性和斗争性是相互联结的；
3. 矛盾的统一性是相对的，矛盾的斗争性是绝对的；
4. 矛盾双方既统一又斗争推动事物发展。

具体对于一个系统而言：

1. 复杂性和稳定性之间具备统一性和斗争性，斗争性体现在系统复杂度的提升会使得系统对抗外部冲击的能力减弱，稳定性降低；而统一性则体现在系统的正常运作是系统自身实现了对于复杂性与稳定性的调和。
2. 统一是系统平衡与调节的结果，是以复杂性和稳定性之间存在对立关系为前提的；而斗争性又是在统一内部的斗争，复杂性与稳定性此消彼长，相互制约却也相互依存，斗争的结果导致两者相互转化，形成统一。
3. 复杂性与稳定性之间的斗争是无条件的，系统的复杂性提升必然带来稳定性的减弱；而两者之间的统一性是有条件的，系统在运作过程中对两者的调和保证了其统一共存。
4. 系统的运作过程体现了复杂性与稳定性的斗争统一，两者的动态平衡是系统持续调和的结果。而在调节的过程中，系统会不断寻求更优的运作模式，从而实现进化与升级。

在本节中，我们借助劳动分工理论论述了系统运作中的复杂性与稳定性。对系统复杂性的判断可以基于系统中个体的数量、种类以及系统内部的连接方式；而对系统稳定性的判断则应通过系统内个体之间的相互依存度、可替代性等考察系统应对外部冲击的能力。总结而言，我们应当辩证地看待系统中的复杂性与稳定性，承认两者的客观存在，并以两者的对立统一关系作为切入视角，研究系统在运作过程中的平衡与调节机制。

种群竞争模型揭示了复杂性的提升大概率伴随着稳定性的降低

前文对于“系统”的讨论，都是较为广泛地探讨生产生活中的部分总体，可以是经济系统、社会系统、生产系统等，因此对于系统中的复杂性和稳定性也只进行了普适性的描述。在 *Stability and Complexity in Model Ecosystems* 一书中，作者 Robert M. May 主要通过数学模型分析生态系统中复杂性与稳定性的关系。作者用种群的共存来定义稳定性，且这一稳定性的概念主要指平衡点附近的局部稳定。结论表明，在群落中，稳定性随着物种数量的增加而降低。另外，作者还通过随机相互作用矩阵的特征值分析，证明了一个生态系统的稳定性随着物种间相互作用比例和相互作用强度的增加而

降低。因此，作者认为复杂性和多样性不会使得系统具备更高的稳定性，恰恰相反的是，复杂度的提高会导致稳定性的减弱，也就是说，一个正常运转的系统无法支持复杂度的无限制提升。

在现实的生态系统中，不同种群之间可以有各种不同形式的相互作用，比如捕食、寄生、竞争等，同一种群内部的个体也会相互影响，出生率和死亡率在一定程度上受到种群密度的制约。在本节中，我们也试图聚焦于具体的生态系统，通过相关的数值模拟，对复杂性和稳定性做出更科学直观的刻画。

我们尝试以动力学系统中经典的 Lotka-Volterra 竞争模型来描述生态系统中不同种群之间的相互影响。Lotka-Volterra 竞争模型是 logistic 模型的延伸，仅聚焦于生态系统中的种间竞争关系。需要指出的是，我们以 Lotka-Volterra 竞争模型来研究系统的复杂性和稳定性，是对生态系统进行了高度的抽象与简化，但也不失为一个合理可行的切入视角。一方面，竞争关系是种群之间为了争夺空间和资源而产生出直接或间接的相互抑制现象，能够代表生态系统中局部群体的真实生存状态，模型的结果具备重要的参考价值。另一方面，在华泰金工 2020 年 3 月 5 日发布的深度报告《周期是不确定性条件下的稳态》中，我们指出二维动力学系统的稳定性有 10 种可能的情况；对于更高维的动力学系统，大多数情况下会走向混沌。如果综合考虑竞争、捕食、互利共生等多种复杂的情形，我们将难以对系统进行模拟与求解，因此我们仅借助竞争系统来进行研究与分析。

首先简单介绍二维的 Lotka-Volterra 竞争模型，形式上可以由以下两个式子表出：

$$dn_1/dt = r_1[1 - (n_1 + \gamma_{12}n_2)/K_1]n_1$$

$$dn_2/dt = r_2[1 - (n_2 + \gamma_{21}n_1)/K_2]n_2$$

模型中的 n_1 和 n_2 为种群 1 和种群 2 的密度， r_1 和 r_2 是种群 1 和种群 2 的增长率， K_1 和 K_2 代表两个种群自身的最大容量， γ_{12} 和 γ_{21} 描述了两个种群之间的相互作用。如果 $\gamma_{12} > 1$ 说明种群 2 对种群 1 增长的抑制作用大于种群 1 对自身的生长的影响。在这种情况下，对于种群 1 而言，种内竞争弱于种间竞争。相反地，如果 $\gamma_{12} < 1$ 则意味着对于种群 1 而言，种内竞争强于种间竞争。

对于存在多个种群的系统，可以用高维的 Lotka-Volterra 模型进行刻画：

$$dn_i/dt = (r_i - \sum_{j=1}^N a_{ij}n_j)n_i$$

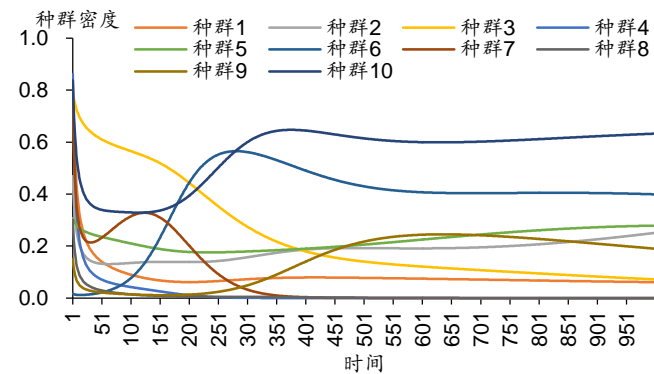
不失一般性，设所有种群的最大容量均为 1，即 $K_i = 1$ 。这等价于考虑单位容量下种群的密度，并相应地重新调整竞争效应参数和增长率参数。方程中的 r_i 代表经调整后的增长率， N 是种群数量， a_{ij} 刻画了种群间的相互作用，代表种群 j 对种群 i 的影响。各个种群对于自身的影响设为 1，即 $a_{ii} = 1$ 。如果 $a_{ij} > 0$ ，说明种群 j 抑制种群 i 的增长。进一步地，如果 $a_{ij} > 1$ 则说明种群 j 对种群 i 增长的抑制作用大于种群 i 对自身的生长的影响。若所有的 a_{ij} 都大于 0，意味着这个高维的 Lotka-Volterra 模型描述的是一个只有竞争关系的群落。

接下来，我们借助高维的 Lotka-Volterra 模型对生态系统的复杂性和稳定性进行相关的模拟。

模拟一：生态系统的稳定性与种群数量的关系

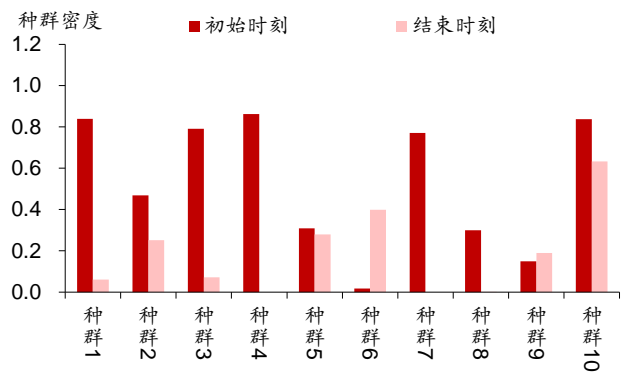
假设一个生态系统的初始状态包含 10 个种群，随机生成各个种群的增长率 r_i 以及各种群的相互作用参数 a_{ij} ，考察各个种群的个体数量随时间变化的特征。从以下两个图表可以看出，在生态系统运作的初期，种群之间的相互作用使得各种群密度随时间发生明显变化。经过足够长的时间后，有的种群密度已经接近 0，可以理解为该种群在系统中已经灭绝。最后稳定存活在系统中的共有 7 个种群，有的种群密度比初始时刻的种群密度更大，而有的更小，但统一的规律是一定时间后种群密度不再随时间发生明显变化，基本维持稳定。

图表2：种群密度随时间变化特征



资料来源：华泰证券研究所

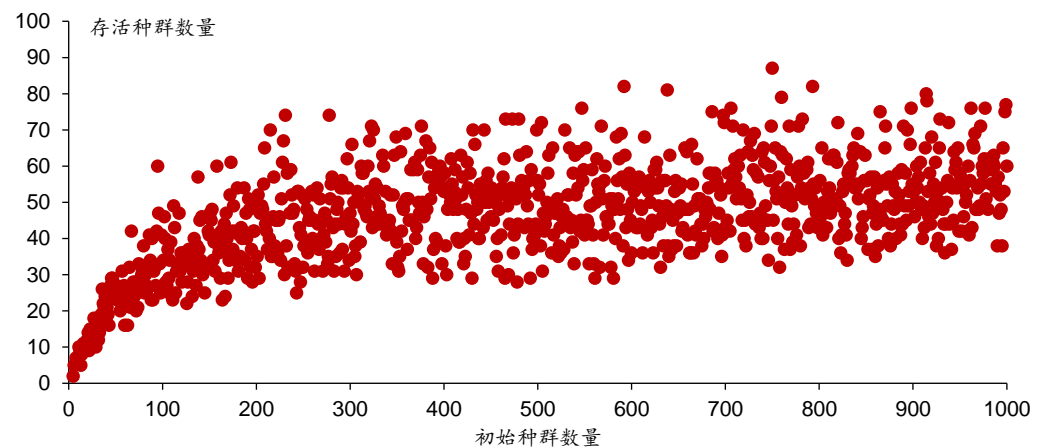
图表3：各种群初始时刻与结束时刻的种群密度



资料来源：华泰证券研究所

进一步地，改变生态系统中初始时刻的种群数量，记录足够长时间后稳定存活的种群数量，可以得到如下图表。图中横轴为初始种群数量，模拟范围为 5 到 1000，纵轴为最后稳定存活的种群数量。可以看出，经过足够长时间后系统中能稳定存活的种群数量大概率集中在 30 到 80 个之间，说明系统本身的容量会对种群的增长产生一定的限制。这里的“容量”可能是土地、河流等种群增长所依赖的资源，也可能是信息等影响种群之间相互作用的条件。也就是说，在一定程度上系统的复杂性需要有稳定性的支撑，在稳定性不足以支持系统持续运转的时候，复杂性的继续提升只会导致更多种群的灭亡。

图表4：稳定存活种群数量与初始种群数量的关系



资料来源：华泰证券研究所

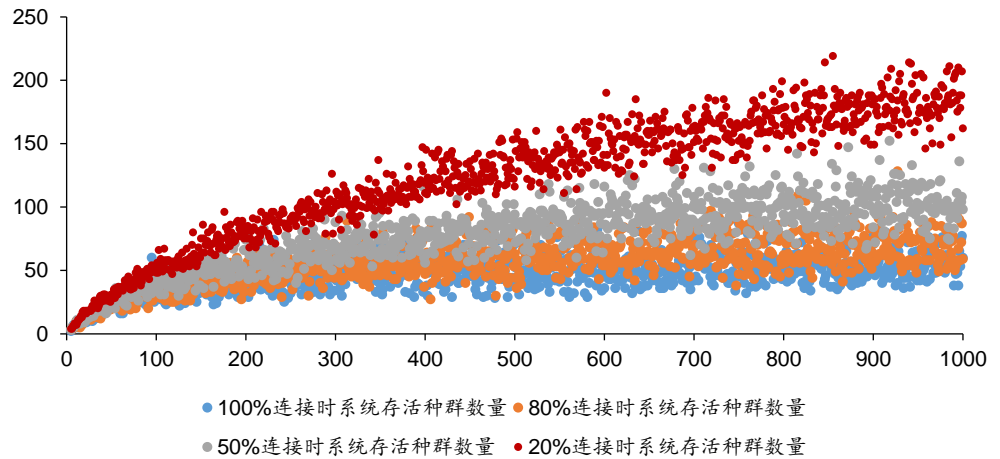
需要指出的是，在初始种群数量较少时，随着初始种群数量的增加，系统最后稳定存活的种群数量也增加。这一规律不应理解为系统的稳定性随着复杂度的增加而提升。这是因为在种群数量较少时，系统内部各种资源相对充足，种群之间不需要为了争夺食物或是空间而发生激烈的竞争，因此灭绝的种群也相对较少。

模拟二：生态系统的稳定性与种群之间相互作用的关系

在模拟一中，我们设定了各个种群之间都存在相互作用，而实际的系统中，可能某些种群之间联系不紧密，相互作用的强度基本为 0。这样的系统可以被认为是连接方式更稀疏、种群之间相互作用更弱的系统，也就是复杂度更低。在具体的模拟中，随机生成各种群的相互作用参数 a_{ij} 后，我们随机将一定比例的 a_{ij} 设为 0，其余做法同模拟一。

生态系统中若有 80%、50%、20% 的连接强度设为 0 时，稳定存活数量与初始种群数量的关系如下图所示。可以看出，对于同一连接比例的系统而言，随着初始种群数量的不断提升，最终稳定存活的种群数量不会越来越多，而是会大致稳定在一个相对固定的范围内，结论与模拟一的结果一致。至此，我们进一步印证了复杂性与稳定性相互依存关系，如果系统需要维持稳定的运作，那么将无法容忍复杂性的无限制提升。

图表5：系统不同连接程度下稳定存活种群数量与初始种群数量的关系



资料来源：华泰证券研究所

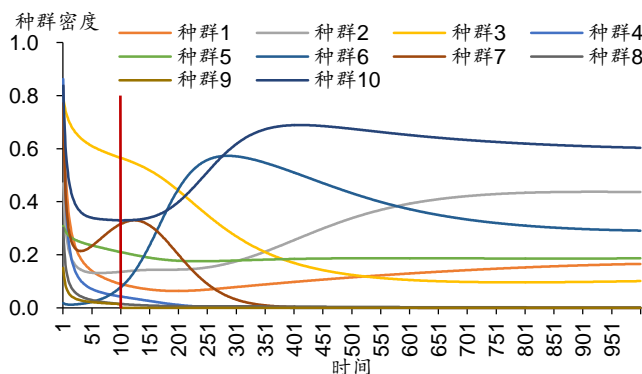
值得注意的是，在初始种群数量相同的情况下，表征系统中各个种群相互作用的连接矩阵变稀疏时，最后稳定存活的种群数量大概率更大。这一结论说明生态系统的稳定性与种群之间的相互作用相关。在初始条件相同的情况下，当种群之间的相互作用变弱时，系统的复杂度降低，足够长时间后系统存活的种群数量更大，说明此时系统抵御风险的能力增强，导致灭亡的种群减少，存活的种群更多。因此我们可以认为，在同等条件下，复杂性更低的系统稳定性会相对更高。

模拟三：极端风险事件对生态系统的影响

在模拟一和模拟二中，我们都假定系统可以独立运作，不存在极端的风险事件使得某个种群突然灭亡。在模拟三中，我们将探讨如果系统在运作过程中，种群的突然灭亡会对系统产生什么影响，灭亡的时间点、灭亡的种群不同对系统的影响是否也不同。

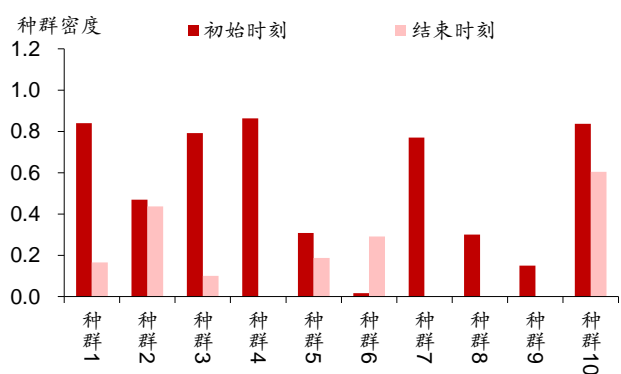
基于模拟一的情景，保证系统中所有随机选取的参数取值与模拟一一致。不妨假设种群 9 分别在 $t = 100, 200, 300, 500, 800$ 时灭亡，观察系统中其他种群的变化情况。

图表6：t=100 时种群 9 灭亡，各种群密度随时间变化特征



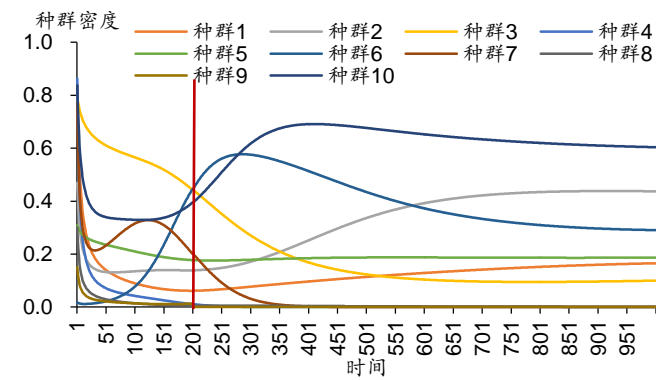
资料来源：华泰证券研究所

图表7：t=100 时种群 9 灭亡，各种群初始时刻与结束时刻的种群密度



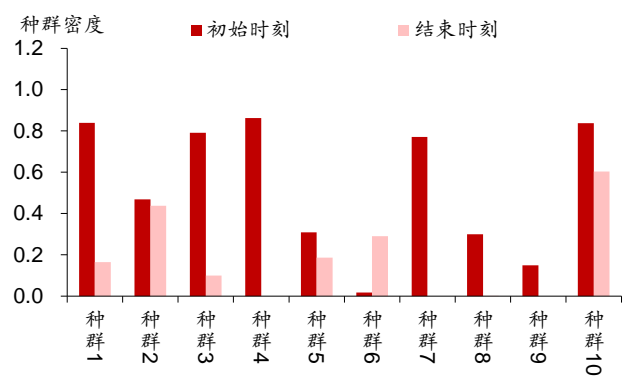
资料来源：华泰证券研究所

图表8: t=200 时种群9 灭亡, 各种群密度随时间变化特征



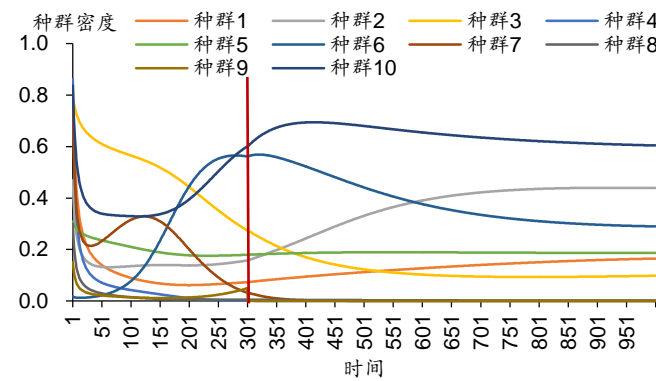
资料来源: 华泰证券研究所

图表9: t=200 时种群9 灭亡, 各种群初始时刻与结束时刻的种群密度



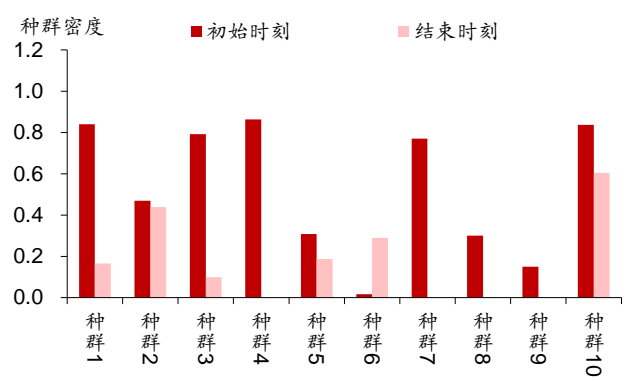
资料来源: 华泰证券研究所

图表10: t=300 时种群9 灭亡, 各种群密度随时间变化特征



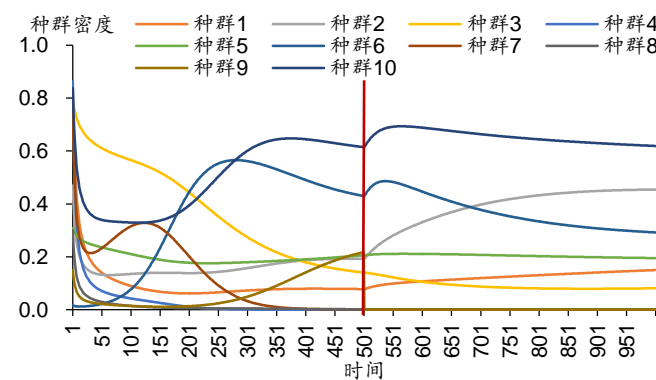
资料来源: 华泰证券研究所

图表11: t=300 时种群9 灭亡, 各种群初始时刻与结束时刻的种群密度



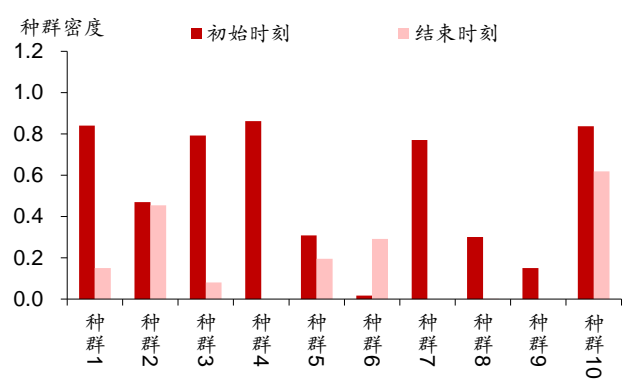
资料来源: 华泰证券研究所

图表12: t=500 时种群9 灭亡, 各种群密度随时间变化特征



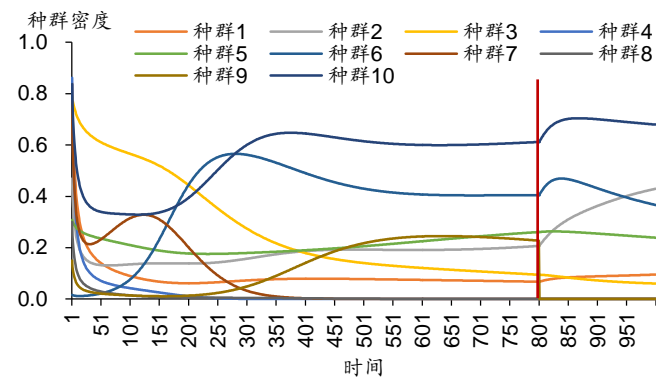
资料来源: 华泰证券研究所

图表13: t=500 时种群9 灭亡, 各种群初始时刻与结束时刻的种群密度



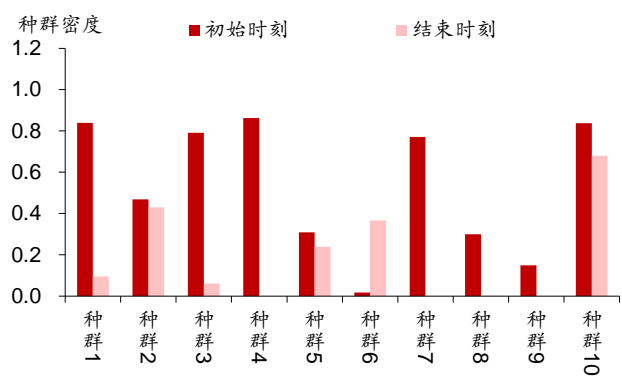
资料来源: 华泰证券研究所

图表14: t=800 时种群 9 灭亡, 各种群密度随时间变化特征



资料来源: 华泰证券研究所

图表15: t=800 时种群 9 灭亡, 各种群初始时刻与结束时刻的种群密度

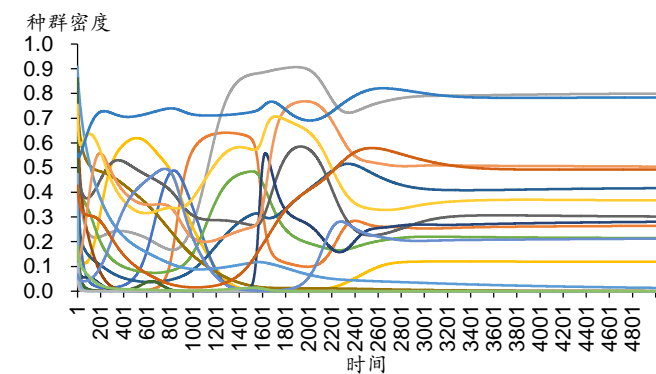


资料来源: 华泰证券研究所

从上述一系列图表可以看出, 在系统没有发生极端风险时, 最终稳定存活的是种群 1、2、3、5、6、9、10。若种群 9 在系统运行过程中突然灭亡, 系统仍会持续运作且到达平衡状态时种群 1、2、3、5、6、10 依然稳定存活。细致观察可以发现, 发生种群 9 灭亡的极端风险事件后, 各存活种群的密度与种群 9 没有灭亡时存在一定差别。但种群 9 灭亡的时间则对各存活种群的密度影响不大, 种群 9 灭亡后经过足够长的时间, 系统会运行至同一个稳定状态。

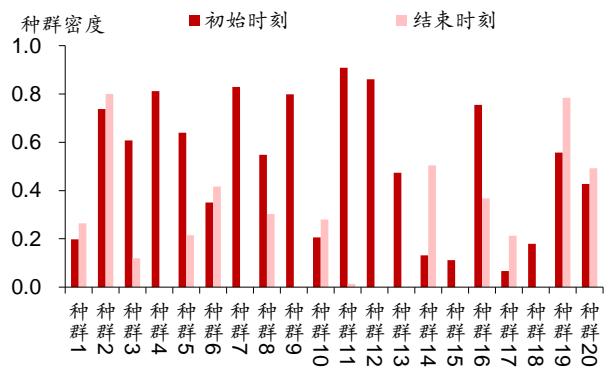
进一步, 我们希望研究不同种群的灭亡对系统所产生的不同影响。更具体地, 我们关心对其他种群作用更大的种群灭亡时, 系统受到的冲击是否会比一个对其他种群作用较小的种群灭亡时更大。考虑一个初始状态包含 20 个种群的生态系统, 不妨假设其连接程度为 50%, 即有 50% 的 a_{ij} 为 0。为衡量某个种群对系统内其他种群的作用大小, 我们计算该种群对其他种群的作用总和, 该指标最大的种群即为系统中对其他种群影响最大的种群。注意此处不考虑其他种群对该种群的影响。

图表16: 连接程度为 50% 的各种群密度随时间变化特征



资料来源: 华泰证券研究所

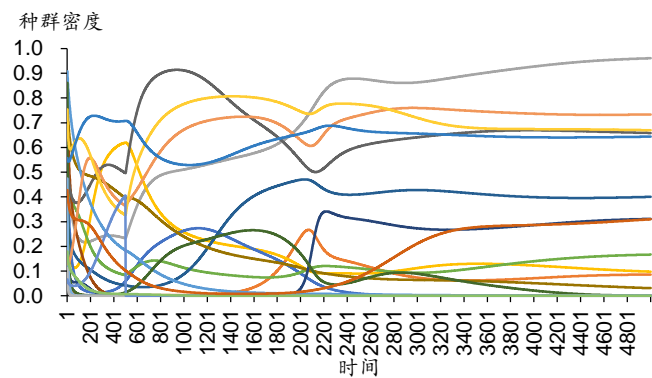
图表17: 连接程度为 50% 的各种群初始时刻与结束时刻的种群密度



资料来源: 华泰证券研究所

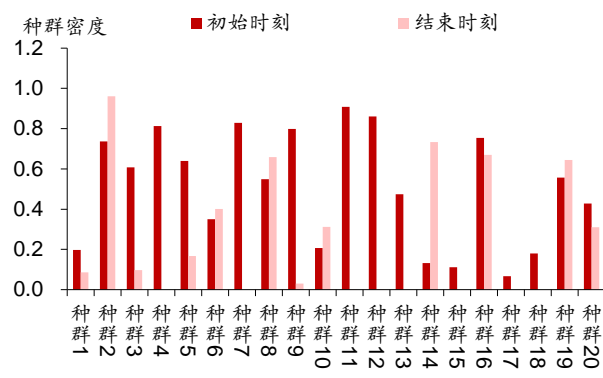
以上两个图表为系统正常运作的情况, 足够长时间后共有 14 个种群存活。在这一系统中, 根据前文的定义, 种群 17 对其他种群作用最强, 种群 16 则最弱。下面考虑在 $t=500$ 时种群 17 或种群 16 发生极端风险事件导致突然灭亡后, 系统内其余种群的变化情况。

图表18： 种群 17 灭亡时各种群密度随时间变化特征



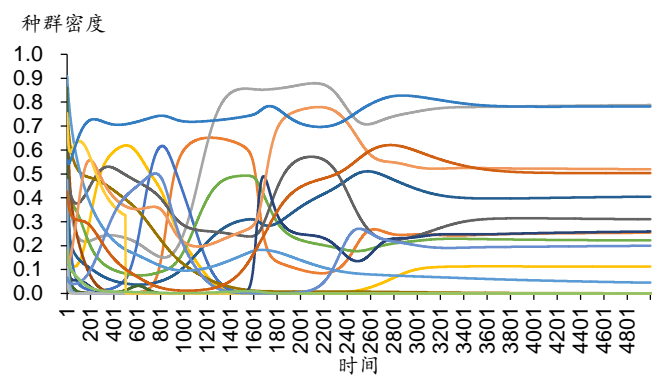
资料来源：华泰证券研究所

图表19： 种群 17 灭亡时各种群初始时刻与结束时刻的种群密度



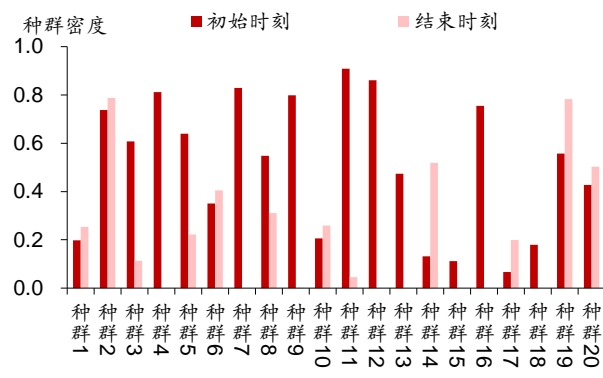
资料来源：华泰证券研究所

图表20： 种群 16 灭亡时各种群密度随时间变化特征



资料来源：华泰证券研究所

图表21： 种群 16 灭亡时各种群初始时刻与结束时刻的种群密度



资料来源：华泰证券研究所

从上述图表可以看出，当种群 16 或种群 17 突然灭亡时，其余种群的密度会立刻发生较大的变化，而经历足够长的时间后，各种群的密度会维持相对稳定。我们以极端风险发生后系统种群密度的差值来衡量系统发生极端风险前后的稳定状态差异，其中系统种群密度的差值定义为：不同情形下系统到达稳定状态时，各个种群密度之差的绝对值之和。在这一模拟中，种群 17 灭亡前后系统种群密度相差 1.92，种群 16 灭亡前后系统种群密度相差 0.52，即种群 17 的灭亡对系统产生的冲击更大。

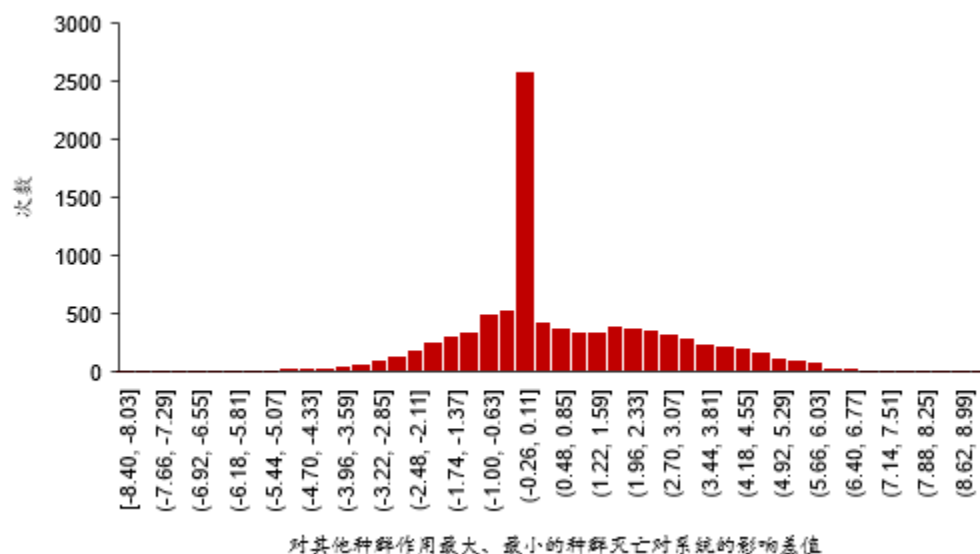
图表22：不同情形下系统达到稳定状态时各种群密度

| | 无极端风险事件 | 连接程度最高的种群灭亡 | 连接程度最低的种群灭亡 |
|-------|---------|-------------|-------------|
| 种群 1 | 0.26 | 0.09 | 0.25 |
| 种群 2 | 0.80 | 0.96 | 0.79 |
| 种群 3 | 0.12 | 0.10 | 0.11 |
| 种群 4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 种群 5 | 0.21 | 0.17 | 0.22 |
| 种群 6 | 0.42 | 0.40 | 0.40 |
| 种群 7 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 种群 8 | 0.30 | 0.66 | 0.31 |
| 种群 9 | 0.00 | 0.03 | 0.00 |
| 种群 10 | 0.28 | 0.31 | 0.26 |
| 种群 11 | 0.01 | 0.00 | 0.04 |
| 种群 12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 种群 13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 种群 14 | 0.50 | 0.73 | 0.52 |
| 种群 15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 种群 16 | 0.37 | 0.67 | 0.00 |
| 种群 17 | 0.21 | 0.00 | 0.20 |
| 种群 18 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 种群 19 | 0.78 | 0.64 | 0.78 |
| 种群 20 | 0.49 | 0.31 | 0.50 |

资料来源：华泰证券研究所

不失一般性，重复上述模拟 10000 次，每次计算对其他种群作用最大以及最小的种群灭亡前后系统种群密度的差值，两者相减若大于 0 则意味着对其他种群作用更大的种群灭亡时，系统受到的冲击更大。做出直方图如下，可以发现大于 0 的差值占比约为 58%，大多数模拟得到的差值集中在 0 附近。因此我们不能认为对其他种群作用更大的种群在系统中占据更重要的地位，也就是说，连接程度低的种群也可能对系统的运作产生关键影响。

图表23： 连接程度最高和最低种群灭亡对系统的影响差值分布图



资料来源：华泰证券研究所

基于上述模拟结果，我们认为系统中对其他种群作用较小的种群在特定的情境下可能会发挥重要作用。虽然整体而言，该种群对其他种群的直接影响不大，但这种影响可以通过系统内部的网络连接进行传递甚至放大，最终直接影响系统的运作状态。这启发我们更加审慎看待系统中的不同个体以及连接方式，争取更深刻理解复杂系统的长期运作。

在本节中，我们主要借助动力学系统中经典的 Lotka-Volterra 竞争模型对生态系统进行相关的模拟，进一步探讨复杂性与稳定性之间的关系。结论表明，系统的复杂性依赖稳定性的支撑，一个正常运转的系统无法支持复杂度的无限制提升。而且在同等条件下，复杂性更低的系统大概率具备更高的稳定性。此外，极端风险事件的发生通常会影响系统的稳态，不同时间点出现同样的风险事件对系统的影响可能是类似的。而对于系统中连接程度不同的个体，不能简单认为连接程度高的个体在系统中更重要，连接程度低的个体也可能对系统产生冲击。

周期是矛盾双方稳定共存的必然表现形式

繁荣和萧条的交替出现推动经济系统的发展

在上一章里，我们指出系统中的复杂性与稳定性是一对矛盾，矛盾双方相互依存并推动系统的运行与发展。在本章中，我们将引述著名经济学家对相关经济现象的阐释，结合我们对于经济运行的理解，站在系统的全局视角上探究经济系统中的对立统一规律。

克莱门特·朱格拉对经济系统内在的不稳定性有独特的理解，他的核心观点是“萧条是对此前的繁荣所造成的经济状态的适应性调整”。朱格拉认为“萧条的唯一原因就是繁荣”，没有发生萧条正是由于某些方面出错了，而萧条的到来则说明经济处于正常的运行轨道。基于朱格拉的观点，萧条和繁荣可以说是经济系统中的一对矛盾，两者相互限制又相互依存，在某种程度上还能够相互转化。本质上而言，“福兮祸之所伏，祸兮福之所倚”说的也是同一个道理。福祸本就是相对的，二者是事物中共存的一对不可调和的矛盾，两者的交替出现必然推动事物的发展进步。

在经济系统的视角下，繁荣和萧条作为一对不可调和的矛盾，两者的更替是经济运行的必然现象。也就是说，萧条不需要由特殊的事件触发，也并非来源于外部的冲击，只是系统在运行过程中的自然规律。当经济进入萧条时，生产资料和劳动力变得冗余，也就更多地被释放出来；资源的充裕会造成生产成本的降低，从而为更多的发明创造提供了条件。在创新创造的刺激下通常会诞生更有效率的生产方式，进而使得原有的产品、厂商、甚至是生产结构逐步被替代。这就是熊彼特所说的“创造性毁灭”：为了向更有效率的新生产结构释放资源，必须摧毁老的生产结构。

结合朱格拉和熊彼特的观点，我们可以认为，繁荣和萧条的交替出现导致资源分配方式的调整是经济系统运行的一般规律。具体而言，经济繁荣时，资源倾向于集中到效率最高的生产方式中；当资源的集中度较高，繁荣发展到一定程度，系统会做出适应性调整而呈现萧条的形式。此时资源会被释放进而刺激发明创造，新的效率更高的生产方式会取代原有的生产结构，促进新一轮经济繁荣的诞生。这样萧条与繁荣的循环往复不断推动生产方式和生产结构的变更，并进一步推动经济系统的发展。

蚁群模型的周期波动是复杂系统的缩影

与上一章类似，我们仍然以生态系统中的一些自然现象对上文的论述加以形象的说明，本节我们将重点分析蚁群的劳动分工。蚂蚁是最常见的昆虫之一，一只蚂蚁未必能有规划、有条理地完成任务，但作为典型的社会型群体，蚁群具备群体智慧。2018 年 8 月 22 日发布于 *Nature* 的论文 *Fitness benefits and emergent division of labour at the onset of group living* 中的研究表明：从 6 只蚂蚁开始，蚁群会自发形成有益的分工，且随着群体规模的扩大，蚁群的分工会更加细化并表现出明显的行为多样性。在蚁群中，常见的基本分工方式是蚁后负责繁殖后代，雄蚁负责与蚁后交配，工蚁负责建造巢穴、采集食物、饲喂幼虫及蚁后等，兵蚁负责保护蚁群。

事实上，工蚁是数量最多也是灵活度最高的，必要时可以分化成兵蚁防御外敌，甚至可以在生殖蚁缺位后恢复生殖能力接替繁殖。在日常最基本的觅食过程中，工蚁内部就至少会区分探险和搬运两种职能。外出探险的工蚁会探查周围的环境并带回食物源的信息，搬运的工蚁会根据信息把食物搬运回巢，信息的传递通过分泌信息素来完成。更具体地，当探险工蚁找到食物源时，搬运工蚁会依据信息素的方向找寻食物，找到食物时进一步在路径上提供信息素，让原本在巢中的工蚁沿着已经被证明可以找到食物的道路去走并协助搬运。当食物相对充足时，部分探险工蚁会加入搬运工蚁的队伍或是承担蚁群中的其他工作。当食物搬运完成，蚁群缺少食物时，探险工蚁的队伍会重新壮大以寻找新的食物源。

我们发现，蚂蚁觅食这一群体行为其实就是复杂系统运作过程的简单投射。当探险工蚁发现食物源并让搬运工蚁进行搬运时，系统的生产效率得到了提升。一方面是因为搬运工蚁的数量会大幅增多，另一方面是搬运工蚁会沿着确定的路径去搬运而无需进行额外的探索。当系统内的资源都集中于搬运食物时，搬运的食物变多使得系统能够养活更多的蚂蚁，蚁

群得以完成扩张并呈现繁荣景象。而由于系统内部蚂蚁数量变多，分工会更加精细化，系统的复杂度提升。同时，系统的稳定性大概率降低，这是因为探险工蚁数量变少，当食物逐渐被消耗时，蚁群会面临无法承载大量蚂蚁的风险，进而呈现萧条的现象。为了应对食物短缺，蚁群内部会调整分工，让更多的工蚁去探险和寻找食物源，实现资源的重新分配。

更具体地，我们尝试利用二维动力学系统来刻画蚁群中探险工蚁和搬运工蚁的数量变化特征。与上一章中仅描述竞争关系的种群模型不同，探险工蚁和搬运工蚁的关系更类似于种群之间的猎物与捕食者的关系。假定 n_1 是探险工蚁数量， n_2 为搬运工蚁数量，其余参数的含义与上一章相同。特别地，方程组中 a_{12} 的符号为负值意味着搬运工蚁数量的增多会对探险工蚁起到一定的抑制作用，这是因为食物充足时更多的蚂蚁投入搬运工作而探险的需求降低； a_{21} 的符号为正值意味着探险工蚁的数量增多会使搬运工蚁数量增多，这是因为更多的探险工蚁大概率会找到更充足的食物源，同时需要更多的搬运工蚁进行搬运。

$$dn_1/dt = (r_1 - a_{12}n_2)n_1$$

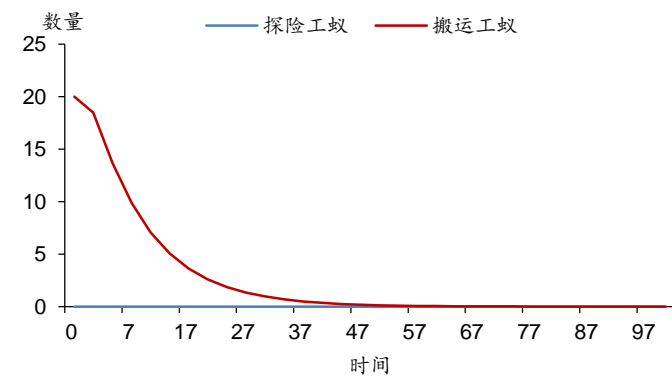
$$dn_2/dt = (-r_2 + a_{21}n_1)n_2$$

另一方面，探险工蚁的增长率 r_1 的符号为正值说明了如果没有搬运工蚁的群体，探险工蚁数量会维持增长，因为群体中食物源缺乏时，暂时不需要搬运工蚁但更多的工蚁会承担寻找食物的工作；搬运工蚁的增长率 r_2 的符号为负值说明了如果没有探险工蚁去寻找食物，没有食物源的情况下搬运工蚁的数量会呈现负增长。

模拟一：探险工蚁或搬运工蚁数量为 0 时，另一群体的数量变化

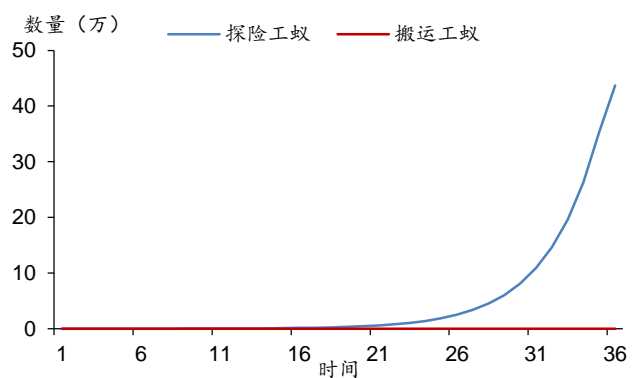
假定模型中 $r_1 = r_2 = 0.1$ ， $a_{12} = a_{21} = 0.01$ 。若初始状态时搬运工蚁数量为 20，探险工蚁数量为 0，则蚁群将永远缺乏食物源的信息，搬运工蚁无需承担搬运食物的职责从而数量越来越少。同时，由于食物的匮乏，蚁群中能够继续存活的蚂蚁数量将迅速衰减。伴随着搬运工蚁数量减为 0，可以推断蚁群中所有蚂蚁都无法存活。

图表24： 探险工蚁数量为 0 时搬运工蚁的数量变化



资料来源：华泰证券研究所

图表25： 搬运工蚁数量为 0 时探险工蚁的数量变化



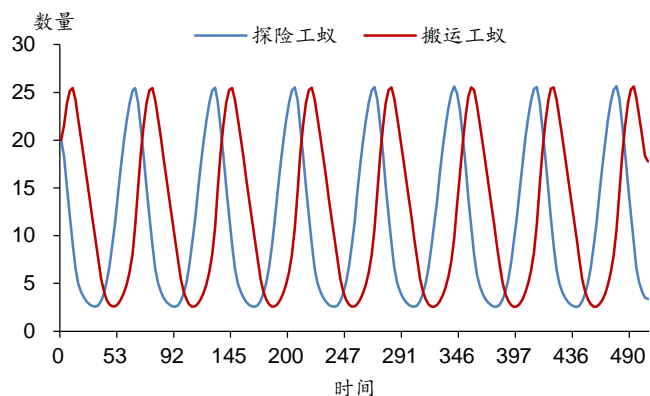
资料来源：华泰证券研究所

对应地，若初始状态时探险工蚁数量为 20，搬运工蚁数量为 0，意味着探险工蚁并未找到任何的食物源，此时将会有更多的蚂蚁转化为探险工蚁承担寻找食物的职责，而且探险工蚁的数量将以指数级别增长。可以推断，蚁群将无法负荷探险工蚁数量的无限制增长，因此最终蚁群同样无法稳定存活。

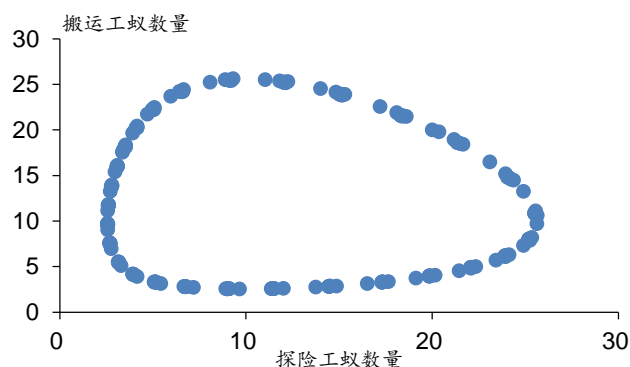
需要指出的是，虽然两个情景背后都是食物的匮乏，但两个情景对食物信息的掌握程度具有本质差别。探险工蚁数量持续为 0 时，蚁群无法获取食物源的任何信息，因此没有自适应地增加探险工蚁的数量，导致蚁群长期没有食物而走向灭亡。搬运工蚁数量持续为 0 时，蚁群会得到探险工蚁找不到食物源的信息反馈，从而派出更多的探险工蚁寻找食物，使得探险工蚁数量大幅增加。

模拟二：初始状态探险工蚁和搬运工蚁数量相等

假定模型中 $r_1 = r_2 = 0.1$, $a_{12} = a_{21} = 0.01$, 初始状态下 $n_1 = n_2 = 20$ 。在足够长时间后, 可以看出探险工蚁和搬运工蚁的数量呈现明显的周期波动特征, 而且两者的数量都不会为 0。因此我们可以认为, 探险工蚁和搬运工蚁能够在系统中稳定存活, 两个群体在数量上的相互限制共同维护了蚁群的动态平衡。

图表26： 随时间推移探险工蚁与搬运工蚁的数量变化

资料来源：华泰证券研究所

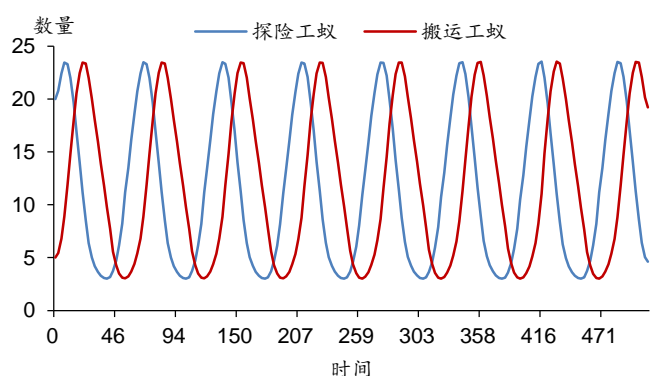
图表27： 搬运工蚁与探险工蚁的数量关系

资料来源：华泰证券研究所

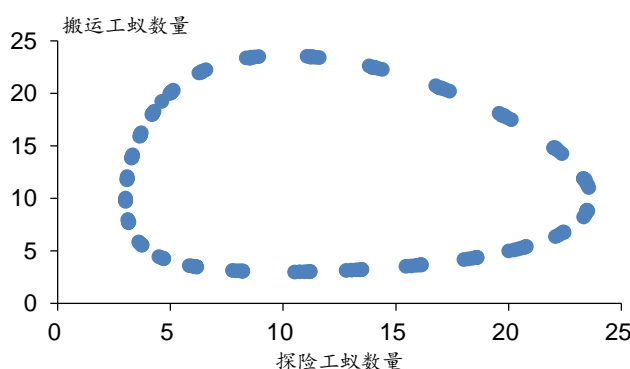
综合来看, 当探险工蚁和搬运工蚁两个群体能有效地相互制约时, 蚁群不会出现模拟一中某个群体数量指数衰减走向灭亡或是某个群体数量指数增加导致系统崩溃的情形。最终呈现的周期波动是各个群体共存的动态平衡, 也是系统维持稳定的方式。如果没有其他外部条件的干扰, 系统将持续依照周期规律进行有序运作。

模拟三：初始状态探险工蚁和搬运工蚁数量不等

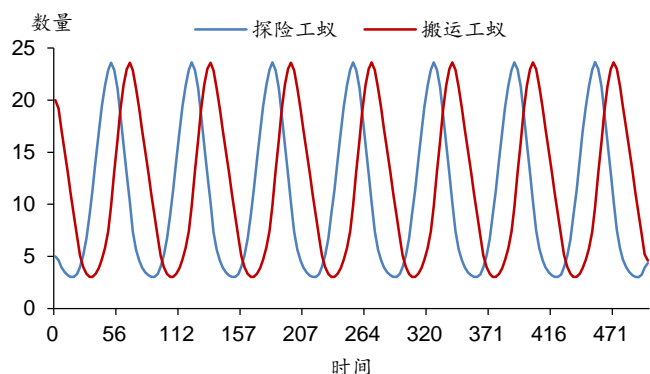
在模拟二中, 我们假定探险工蚁与搬运工蚁在初始状态时数量相等, 进一步地, 我们分别考察 $n_1 = 20, n_2 = 5$ 以及 $n_1 = 5, n_2 = 20$ 两种初始状态下探险工蚁与搬运工蚁的数量随时间变化的特征。

图表28： $n_1 = 20, n_2 = 5$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化

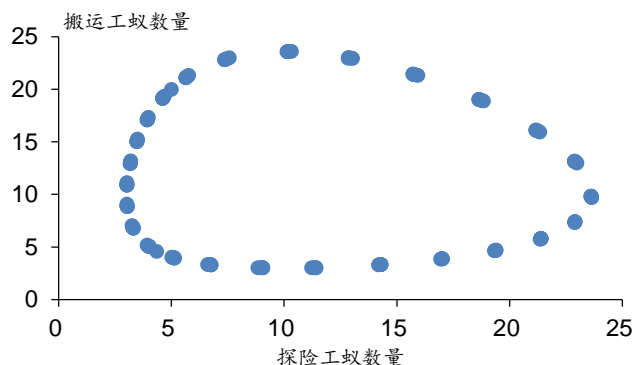
资料来源：华泰证券研究所

图表29： $n_1 = 20, n_2 = 5$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系

资料来源：华泰证券研究所

图表30: $n_1 = 5, n_2 = 20$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化

资料来源: 华泰证券研究所

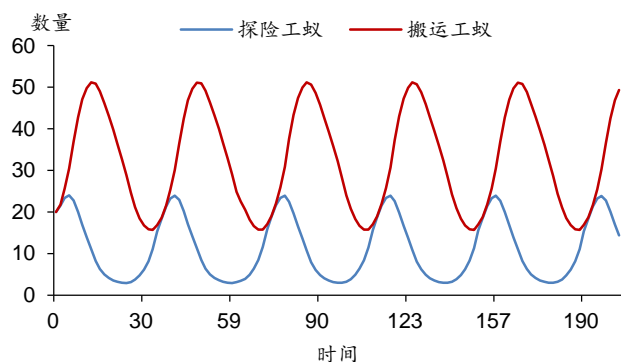
图表31: $n_1 = 5, n_2 = 20$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系

资料来源: 华泰证券研究所

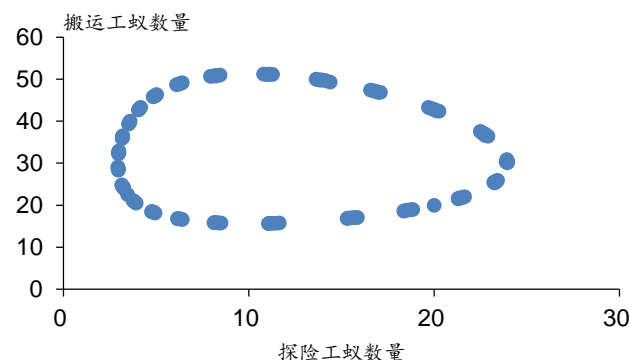
从上面的图表可以看出, 经过足够长的时间后, 探险工蚁和搬运工蚁的数量仍然呈现周期变化的特征, 且是围绕同一个中心点在波动。事实上, 这一现象并非偶然, 根据华泰金工在 2020 年 3 月 5 日发布的研究报告《周期是不确定性条件下的稳态》中的理论证明, 在我们所研究的这一动力学系统中, 存在两个平衡点 $(0,0)$ 和 $(10,10)$ 。其中 $(0,0)$ 为鞍点, 稳定性为半稳定, $(10,10)$ 则为中心, 其附近的轨迹为闭合圆环。因此, 当初值设定在一定范围内时, 最终系统会运行至同一个中心附近呈现类似的周期波动, 这也意味着系统具备一定程度的抗干扰能力, 初始状态发生轻微的扰动不影响最后的稳态。

模拟四: 探险工蚁和搬运工蚁的自然增长率不相等

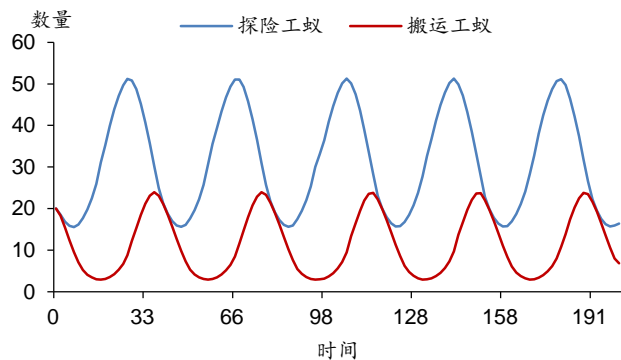
在上面的模拟中, 我们均假定 $r_1 = r_2 = 0.1$, 接下来我们希望考察 r_1 和 r_2 的不同取值对系统稳态的影响, 在模拟中分别假定 $r_1 = 0.3, r_2 = 0.1$ 以及 $r_1 = 0.1, r_2 = 0.3$ 。从下面的图表可以看出, 增长率的不同会导致系统到达的稳态不同。更本质的是, 参数 r_1 和 r_2 的变化导致二维动力学系统中的系数矩阵发生了变化, 从而影响了系统的稳定解。

图表32: $r_1 = 0.3, r_2 = 0.1$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化

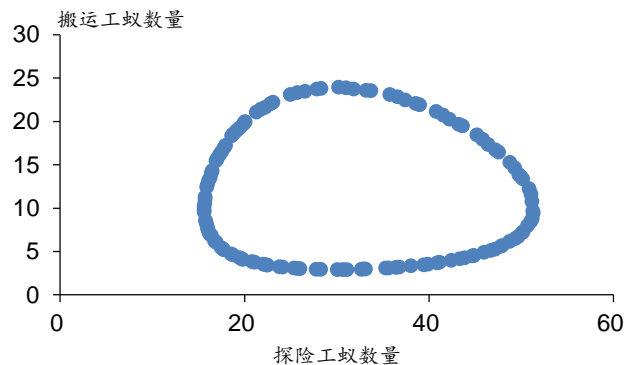
资料来源: 华泰证券研究所

图表33: $r_1 = 0.3, r_2 = 0.1$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系

资料来源: 华泰证券研究所

图表34: $r_1 = 0.1, r_2 = 0.3$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化

资料来源: 华泰证券研究所

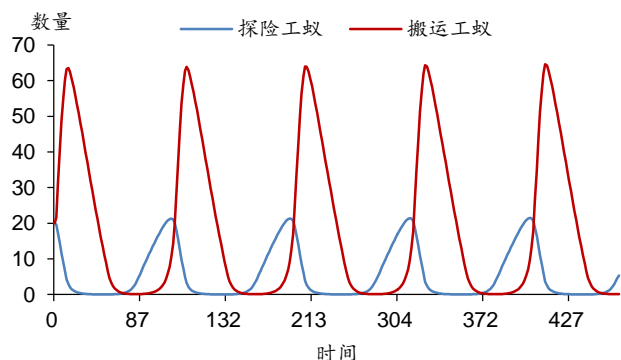
图表35: $r_1 = 0.1, r_2 = 0.3$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系

资料来源: 华泰证券研究所

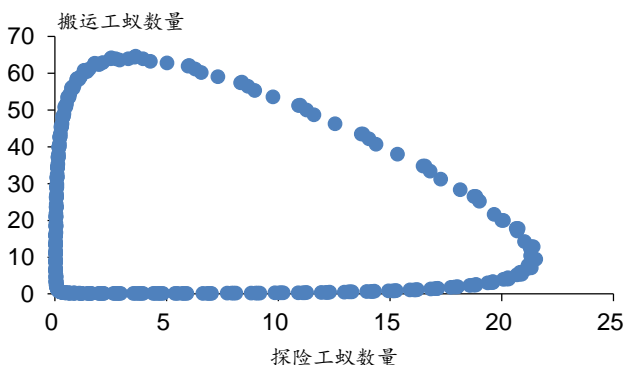
值得注意的是, 当 r_1 或者 r_2 变大时, 两个群体数量的波动周期变短。这是因为群体的自然增长率变大意味着系统的调节速率变快, 两个群体在相互作用之后能更有效率进行复原, 最终导致相互调节的周期缩短。另一方面, 当 r_1 变大时, 系统到达稳态后探险工蚁的数量与模拟二中的结果大致相当, 搬运工蚁的数量则明显变多。相应地, 当 r_2 变大时, 在系统稳态所呈现的周期波动中, 探险工蚁数量明显增多而搬运工蚁则维持原来的水平。这一结论说明系统中一个群体自然增长率的变化对另一群体影响可能大于对其本身的影响。这是因为一个群体自然增长率的变化必然导致另一群体需要自适应地进行调整, 这一调整的结果大概率使得在稳态中该群体的数量发生变化; 但对于自然增长率发生变化的群体而言, 系统中另一群体的调节会反作用于该群体, 这一反作用在一定程度上抵消了自然增长率的变化, 最终使得在稳态中该群体数量基本维持原来的水平。

模拟五: 探险工蚁和搬运工蚁的相互作用强度不相等

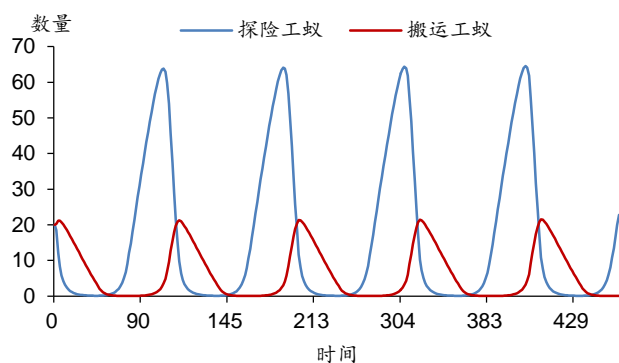
最后, 我们尝试探究群体之间相互作用强度对系统稳态的影响, 在模拟中分别假定 $a_{12} = 0.01$, $a_{21} = 0.03$ 以及 $a_{12} = 0.03$, $a_{21} = 0.01$ 。从下面的图表可以看出, 与模拟四的分析类似, 参数 a_{12} 和 a_{21} 的变化导致二维动力学系统中的系数矩阵发生了变化, 从而影响了系统的稳定解。同时, 当某一群体对另一群体的作用强度发生变化时, 系统到达稳态后, 两个群体的数量水平都会发生一定变化, 被影响而需要做出调整的群体数量波动更剧烈。

图表36: $a_{12} = 0.01, a_{21} = 0.03$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化

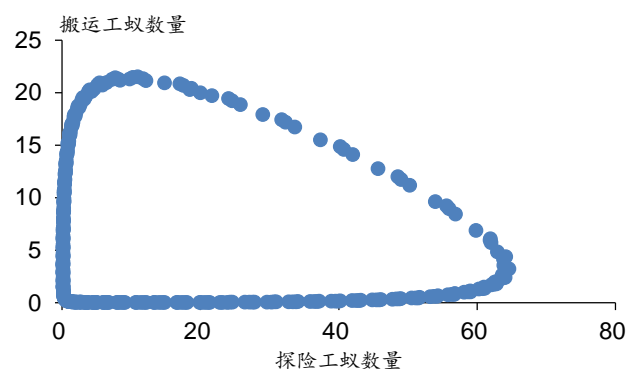
资料来源: 华泰证券研究所

图表37: $a_{12} = 0.01, a_{21} = 0.03$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系

资料来源: 华泰证券研究所

图表38: $a_{12} = 0.03, a_{21} = 0.01$ 时探险工蚁与搬运工蚁的数量变化

资料来源：华泰证券研究所

图表39: $a_{12} = 0.03, a_{21} = 0.01$ 时搬运工蚁与探险工蚁的数量关系

资料来源：华泰证券研究所

此外，当 a_{12} 或者 a_{21} 变大时，两个群体数量的波动周期变长。这是因为当两个群体之间的相互影响更大时，系统的变化程度更剧烈，要恢复成原来的状态所需要的时间会更长。这一结论与模拟四最大的区别在于，模拟四讨论的是系统发生变化后恢复的效率更高，因而波动周期变短；模拟五则是探讨系统发生更大变化后，恢复的时间变长，因而波动周期变长。

整体而言，借助蚁群的模拟分析，我们发现稳定存活的两个群体在数量上呈现的动态平衡状态就是周期。周而复始、循环往复的波动是系统的稳态。同时，系统具备一定的自我调节能力，当系统的初始状态在一定范围内时，最终会运行至同一个中心附近呈现类似的周期波动特征。当群体的自然增长率或是相互作用强度发生变化时，系统的稳态会随之发生变化，且周期会相应地变长或变短。蚁群的运作仅描述了开放系统中两个群体的相互制约与共同发展，是复杂系统的一个简单缩影。但蚁群在运作过程中所带来的复杂性与稳定性的此消彼长、蚁群本身繁荣与萧条的交替足以让我们认识到，周期是系统自我调节的结果，也是矛盾双方稳定共存的必然表现形式。

系统的自我调节机制保证其有序运作

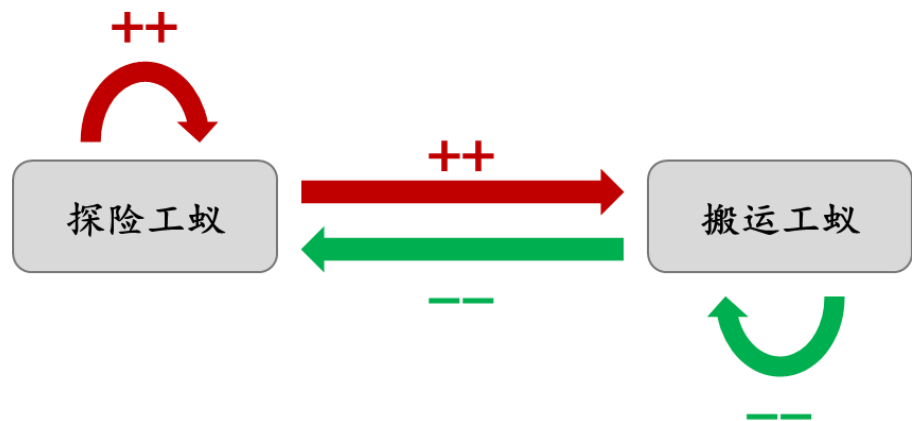
周期是系统内各个正负反馈共同作用的结果

在前文中，我们讨论了系统内部存在复杂性与稳定性的矛盾，矛盾双方对立统一并推动系统的发展，而系统在运作过程中对矛盾进行平衡与调节。在本章中，我们将重点分析系统内生的反馈机制与弹性连接。其中反馈机制包含了正反馈与负反馈，是矛盾双方稳定共存的前提条件；弹性连接则是系统为应对外部冲击而形成的缓冲地带，两者共同保证了系统的规律运行。

在华泰金工 2020 年 3 月 5 日发布的研究报告《周期是不确定性条件下的稳态》中，我们指出了当状态变量相互之间的正负反馈占据主导时，二维动力学系统趋于周期运动。仍然沿用上一章的蚁群二维动力学系统模型，我们更具体地探讨蚁群内部的正负反馈机制，也对上一章的一些结论加以补充说明。

下图以红色箭头和“+”代表正反馈，以绿色箭头和“-”代表负反馈，直观呈现了蚁群中探险工蚁和搬运工蚁的相互作用关系。这一机制与上一章的二维动力学系统的系数矩阵密切相关，系数为正代表了正反馈，系数为负则代表负反馈。

图表40： 蚁群模型的正负反馈



资料来源：华泰证券研究所

简化来看，对于蚁群中的单个群体，客观存在自身对自身的反馈以及他人对自身的反馈，且这两个反馈恰好为一正一负。正负反馈的共同作用保证了群体数量的相对稳定，不至于出现上一章模拟一中的走向寂灭或湮灭。对于蚁群整体，两个群体之间也恰好存在一正一负两个反馈，刻画了两两相互依存的复杂关系，既非相互促进的共生关系，也非相互替代的竞争关系。

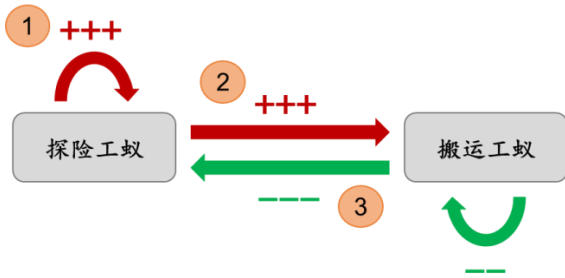
进一步地，借助蚁群中的各个反馈机制，我们对上一章的模拟四和模拟五中周期稳态的结果做出更直观的分析。仍然以红色箭头代表正反馈，以绿色箭头代表负反馈，以上文图表中的“++”和“--”代表基础模型的正负反馈强度。若正反馈强度变大，则用“+++”表示，同理若负反馈强度变小，则用“-”表示。

对于上一章的模拟四，改变 r_1 和 r_2 意味着改变群体对自身的反馈作用强度。如下左图描述了 r_1 增大，即探险工蚁对自身的正反馈变强时系统其他反馈机制的变化。探险工蚁对自身的正反馈作用变大意味着探险工蚁数量增多，从而对搬运工蚁的影响也变大，即图中探险工蚁对搬运工蚁的正反馈作用强度变大，使得搬运工蚁数量变多。进一步，搬运工蚁数量增多会使得其对探险工蚁的负反馈作用变大。整体来看，系统中存在“+++”和“---”作用于探险工蚁的群体，正负反馈的共同作用与基础模型中的“++”和“--”相差不大，因

此系统运行至稳态时，探险工蚁的数量与基础模型中基本一致。但对于搬运工蚁而言，当前受到“+++”和“-”两个反馈的作用，与基础模型相比正反馈作用明显增强，因此在稳态中搬运工蚁的数量相比基础模型更多。

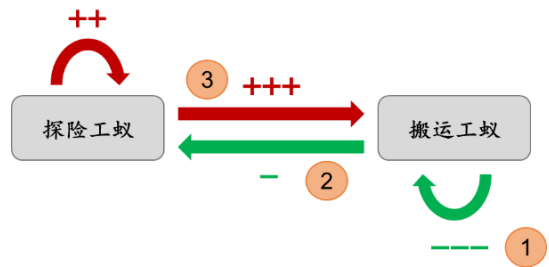
类似地，如下右图描述了 r_2 增大时系统各个反馈机制的变化。搬运工蚁对自身的负反馈作用增强时，搬运工蚁数量会变少，使得其对探险工蚁的反馈作用减弱。此时探险工蚁由于受到的抑制减少，数量会增多，从而探险工蚁对搬运工蚁的正反馈作用会增强。整体来看，搬运工蚁受到“+++”和“-”两个反馈的作用，与基础模型类似。而探险工蚁受到的正反馈明显强于负反馈，这会导致在稳态中探险工蚁的数量明显比基础模型多。

图表41： 探险工蚁对自身的正反馈作用增强



资料来源：华泰证券研究所

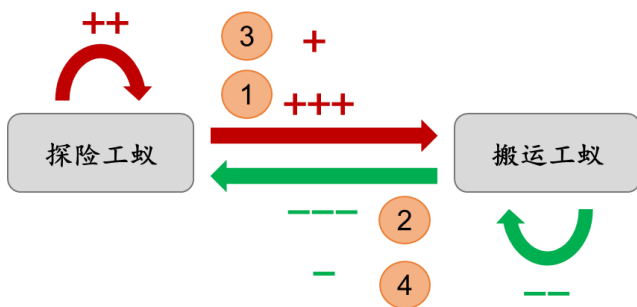
图表42： 搬运工蚁对自身的负反馈作用增强



资料来源：华泰证券研究所

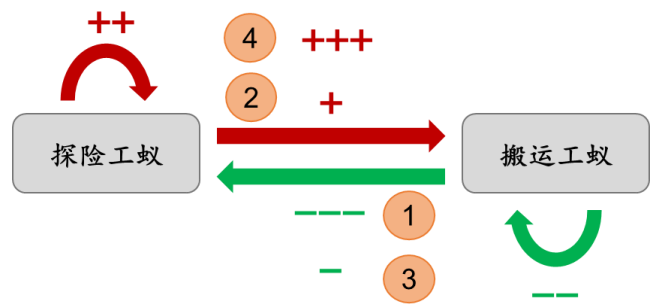
对于上一章的模拟五，改变 a_{12} 和 a_{21} 是在改变群体之间的反馈作用强度。如下左图所示， a_{21} 增大意味着探险工蚁对搬运工蚁的正反馈作用增强，搬运工蚁的数量增多进而导致其对探险工蚁的负反馈作用增强。探险工蚁受到的抑制增大使得对搬运工蚁的正反馈作用减弱，再进一步搬运工蚁对探险工蚁的负反馈减弱。系统到达稳态时，这样的循环往复仍在不断发生，探险工蚁和搬运工蚁各自都受到比基础模型更强和更弱的反馈作用，因此两个群体的数量波动水平比基础模型更大。 a_{12} 增大的情形如下右图所示，分析过程与左图类似。

图表43： 探险工蚁对搬运工蚁的正反馈作用增强



资料来源：华泰证券研究所

图表44： 搬运工蚁对探险工蚁的负反馈作用增强



资料来源：华泰证券研究所

至此，我们简单梳理了各个正负反馈相互影响的变化机制，直观地呈现了系统经不同的反馈而实现内在调节的过程。本质上，正负反馈是对立统一的关系，负反馈使系统保持稳定，正反馈会打破这种稳定，两者的同时存在是系统正常运行的前提。对于一个持续运作的系统，只有负反馈会导致系统一成不变而失去生命力，正负反馈的有机结合正是矛盾双方的相互贯通。我们观察到，在正负反馈相互依存、相互渗透、相互转化的过程中，系统呈现有序的周期波动。这说明周期是系统内各个正负反馈共同作用的结果，也是系统为了维持稳定与活力的唯一选择。

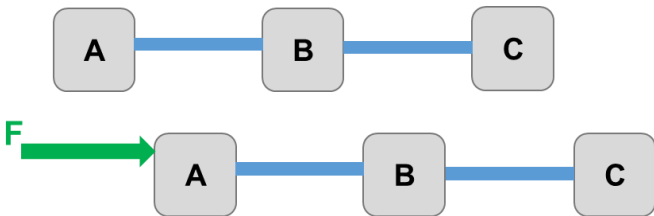
弹性连接作为缓冲机制可以吸收部分的外部冲击

上一节中，我们论述了系统内部的正负反馈保证了系统的有序运行。本节中，我们进一步探讨在面临外部冲击的时候，复杂系统除了利用反馈机制进行调节外，各个要素之间的弹性连接也发挥了重要作用。

所谓“弹性”，在物理学上是指物体在外力作用下发生形变，当外力撤消后能恢复原来大小和形状的性质。弹簧是最典型的利用弹性来工作的机械零件，它的压缩与拉伸能使连接的个体在一定程度上“吸收”部分的外部冲击。如下左图中，木块 A、B、C 之间均用木棍连接，当推力 F 作用在木块 A 上时，木块 B 和 C 的位移与木块 A 相同。这说明刚性连接的系统中，一旦有个体受到外部的冲击，其他个体会遭受同样级别的冲击，系统具有明显的“牵一发而动全身”的特征。

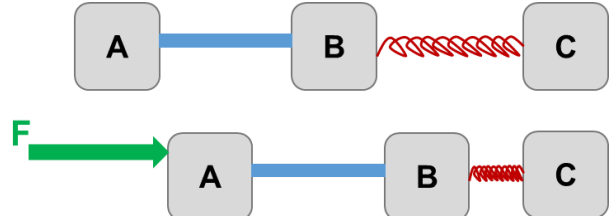
对于如下右图所示的系统，木块 A、B 之间用木棍连接，木块 B、C 之间用弹簧连接。当同样的推力 F 作用在木块 A 上时，木块 B 需要承受同样的冲击，但由于弹簧可以被压缩，木块 C 受到的冲击明显更小，甚至可以维持原来的状态。在物理学上，这是因为动能转化为了弹簧的弹性势能。

图表45： 推力 F 作用在刚性连接的系统中



资料来源：华泰证券研究所

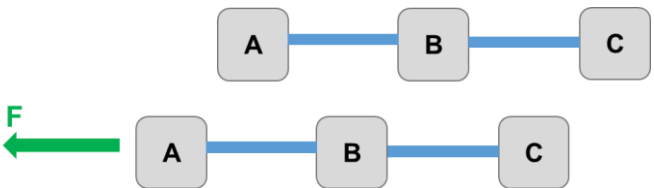
图表46： 推力 F 作用在弹性连接的系统中



资料来源：华泰证券研究所

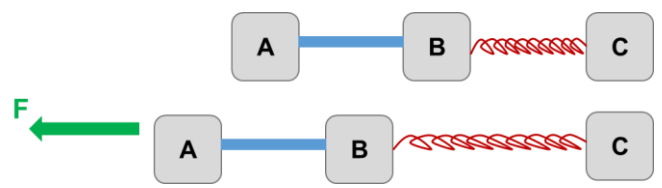
如果作用在木块 A 上的推力 F 变为拉力 F，情形也是类似的。木棍连接的系统依旧无法抵御冲击，而弹簧的拉伸同样可以维持系统的相对稳定。站在系统的角度来看，弹性的连接使得个体能够容忍一定程度的冲击，弱化了外部风险对系统的影响，提升了整体的稳定性。

图表47： 拉力 F 作用在刚性连接的系统中



资料来源：华泰证券研究所

图表48： 拉力 F 作用在弹性连接的系统中



资料来源：华泰证券研究所

物理学中木块与弹簧的例子让我们直观地感受到弹性连接的缓冲作用。事实上，经济系统中弹性连接的例子也有很多。对于生产者而言，库存就是对上下游的弹性连接，保持适当的库存水平能够在上游原材料供应不足，或是下游需求激增时从容应对；对于消费者而言，信用卡消费是一种弹性连接，延迟付款能够在短期资金紧张时满足消费的需求。另外，企业之间的应收和应付账款同样是弹性连接，在需要扩大经营与生产时应收账款有助于企业进行贷款融资，而应付账款则可以保证商品、设备等的交付时间与品质。金融市场的中介也是弹性连接的一种，基金通过专业投资者进行投资，使得散户不直接投资于股票，减少了直面股市所承担的风险；银行作为中介机构向企业贷款，使得存款人不需要直接面对企业破产的风险。

我们在讨论弹性连接的时候，都是针对系统面临外部冲击的情景展开的，所谓“外部冲击”实际上是在描述系统需要面对的不确定性。如果一切都是确定的，那么系统将会维持一个固定的运作模式不受干扰，个体之间的刚性连接会是效率最高的连接方式。然而事实上，不管是在生态系统还是金融经济系统中，不确定性都是大量存在的。以库存管理为例，如果供给和需求能够完全匹配，那么企业就不需要有库存；但供给可能受到生产、运输效率的限制，需求也可能随着时间发生变化。因此，库存作为商品的冗余，即便会带来仓储成本和管理成本的增加，仍然是企业管理中不可或缺的一个缓冲机制。

整体而言，弹性连接保证了系统在应对外部风险时具备缓冲地带，也为系统的自我调节争取了一定的时间，是系统中不可或缺的关键要素。值得关注的是，弹性连接从来都不是刻意的安排，而是系统在不断的发展与进化中所找到的对个体和整体都最合适的连接方式。在这篇报告中，我们仅指出弹性连接对系统的重要作用，但不对其进行深入的分析与建模，在周期起源系列后续的研究中，我们将统一对系统内部的缓冲机制进行剖析。

全文总结与未来展望

本文以亚当斯密的劳动分工理论作为切入点，探讨了在社会生产中，为了实现效率的最大化，劳动分工必然会产生，且随着生产力水平的不断提升，劳动分工会更加精细。随着生产规模的扩大、人员的增多、工种之间相互依赖度的增强，生产系统的复杂度得到了提高。但同时，由于各个环节的联系紧密、相互替代性差，劳动分工为系统引入了更多的不确定性，系统抵御风险的能力降低，稳定性减弱。

复杂性与稳定性作为系统内部的一对矛盾，既统一又斗争地推动系统的运动、变化和发展。我们借助 Lotka-Volterra 竞争模型对生态系统进行简化，研究复杂性与稳定性的相互渗透与相互转化。模拟结果表明，如果系统需要维持相对稳定的运作，那么就无法支持复杂度的不断攀升，复杂性更低的系统大概率具备更高的稳定性。

在经济系统中，矛盾是普遍存在的，系统的运行过程是对矛盾的不断适应与调和。我们用二维动力学系统模拟了蚁群内部探险工蚁与搬运工蚁的数量变化，并以此来观察复杂系统的内在运行规律。结果表明，周而复始、循环往复的波动就是系统的稳态，周期是矛盾双方所实现的动态平衡。不同的初始条件或者参数可能会造成周期稳态和周期长度的不同，但周期规律的波动特征却是最本质的存在。

对于一个只有竞争关系的系统而言，资源的争夺是核心问题；对于一个能有多个群体稳定共存的系统而言，资源的调配是关键主旨。在系统中，资源往往是有限的，且有限的资源总是倾向于集中到效率最高的生产方式中，从而导致了系统的复杂，催生了经济的繁荣。伴随着复杂度的提升与稳定性的降低，繁荣是脆弱的，为了更稳健的运行，经济系统需要调整为萧条状态迫使资源被释放而应用到不同的生产环境与发明创造中。新的更有效率的生产方式会再度集中资源，促进新一轮经济繁荣。就这样，繁荣与萧条不断推动经济的发展，资源则是中间不变的传送带。

达尔文的进化论告诉我们“物竞天择，适者生存”，也许，自然选择就是生物进化过程中“资源集中”的最高级表现形式。在特定的环境与充满竞争的恶劣生存条件下，能够适应环境的个体才能存活。因此，在生物的繁殖与世代的更替中，被保留下来的基因变异都是能适应环境、有利于生物更好地生存的变异。可以理解为，“资源”都集中在这些有利变异上。资源的高度集中造就了种群的繁荣，可能是存活的个体更多，也可能是存活的时间更长，但基因多样性的缺失却也成为了种群最大的不稳定性。当环境发生剧烈变化时，种群可能会因为无法适应新环境而灭绝。如果存在有幸存活的个体，它们仍然会在后续的繁衍与进化中不断发生变异，但资源只会一次又一次地集中在能够适应新环境的变异中。

人类的社会进化同样逃不出这个圈子，我们要求自己提升文化水平、提升社会适应能力，导致脑部越来越发达，思考的能力越来越强。但同时，我们的听觉、视觉、嗅觉甚至直觉，似乎都钝化了。优胜劣汰的规则保留了一种“优”，却淘汰了种种不同的“劣”。进化的效率就这样最大程度地保证了资源集中，实现社会整体的繁荣。

我们所关心的金融经济系统，当然不可避免地落入这样的轮回之中。繁荣与萧条都是必然，无限的波动才是常态。在后续的研究里，我们将从更多不同的视角去探求周期往复的奥秘，也更深刻地理解周期轮回带给我们的机遇与挑战。

风险提示

自然科学领域的周期规律可能无法直接迁移到社会科学领域；动力学系统模型是对真实世界的简单刻画，存在过度简化的可能；周期规律基于历史数据总结，历史规律可能失效；周期规律对市场长期规律进行研究，无法判断短期的市场情绪与政策冲击带来的影响；市场在某些极端情形下可能出现规律以外的交易风险。

免责声明

本报告仅供华泰证券股份有限公司（以下简称“本公司”）客户使用。本公司不因接收人收到本报告而视其为客户。

本报告基于本公司认为可靠的、已公开的信息编制，但本公司对该等信息的准确性及完整性不作任何保证。本报告所载的意见、评估及预测仅反映报告发布当日的观点和判断。在不同时期，本公司可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。同时，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动。本公司不保证本报告所含信息保持在最新状态。本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本公司力求报告内容客观、公正，但本报告所载的观点、结论和建议仅供参考，不构成所述证券的买卖出价或征价。该等观点、建议并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对客户私人投资建议。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及作者均不承担任何法律责任。任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

本公司及作者在自身所知情的范围内，与本报告所指的证券或投资标的不存在法律禁止的利害关系。在法律许可的情况下，本公司及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券头寸并进行交易，也可能为之提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务。本公司的资产管理部门、自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。

本报告版权仅为本公司所有。未经本公司书面许可，任何机构或个人不得以翻版、复制、发表、引用或再次分发他人等任何形式侵犯本公司版权。如征得本公司同意进行引用、刊发的，需在允许的范围内使用，并注明出处为“华泰证券研究所”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。本公司保留追究相关责任的权力。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

本公司具有中国证监会核准的“证券投资咨询”业务资格，经营许可证编号为：91320000704041011J。

全资子公司华泰金融控股（香港）有限公司具有香港证监会核准的“就证券提供意见”业务资格，经营许可证编号为：A0K809

©版权所有 2020 年华泰证券股份有限公司

评级说明

行业评级体系

一报告发布日后的 6 个月内的行业涨跌幅相对同期的沪深 300 指数的涨跌幅为基准；

一投资建议的评级标准

增持行业股票指数超越基准

中性行业股票指数基本与基准持平

减持行业股票指数明显弱于基准

公司评级体系

一报告发布日后的 6 个月内的公司涨跌幅相对同期的沪深 300 指数的涨跌幅为基准；

一投资建议的评级标准

买入股价超越基准 20%以上

增持股价超越基准 5%-20%

中性股价相对基准波动在-5%~5%之间

减持股价弱于基准 5%-20%

卖出股价弱于基准 20%以上

华泰证券研究

南京

南京市建邺区江东中路 228 号华泰证券广场 1 号楼/邮政编码：210019

电话：86 25 83389999/传真：86 25 83387521

电子邮件：ht-rd@htsc.com

深圳

深圳市福田区益田路 5999 号基金大厦 10 楼/邮政编码：518017

电话：86 755 82493932/传真：86 755 82492062

电子邮件：ht-rd@htsc.com

北京

北京市西城区太平桥大街丰盛胡同 28 号太平洋保险大厦 A 座 18 层

邮政编码：100032

电话：86 10 63211166/传真：86 10 63211275

电子邮件：ht-rd@htsc.com

上海

上海市浦东新区东方路 18 号保利广场 E 栋 23 楼/邮政编码：200120

电话：86 21 28972098/传真：86 21 28972068

电子邮件：ht-rd@htsc.com