arXiv:2603.04457v1 [cs.AI] 3 Mar 2026

能力阈值与制造拓扑：具身智能如何触发经济地理学中的相变

Xinmin Fang LeTau
Robotics 科罗拉多大学丹佛分校
xinmin.fang@ucdenver.edu

Lingfeng Tao LeTau
Robotics 肯尼索州立大学
ltao2@kennesaw.edu

Zhengxiong Li*LeTau
Robotics 科罗拉多大学丹佛分校
zhengxiong.li@ucdenver.edu

摘要

制造业的基本拓扑——工厂建在哪里、生产如何组织、何种规模才具备可行性——自亨利·福特于1913年推出移动式装配线以来，尚未经历范式层面的变革。过去一个世纪的所有重大创新，从丰田生产方式到工业4.0，都只是在福特主义范式之内进行优化，并未改变其结构逻辑：在劳动力群体附近建设集中式大型工厂，并进行大规模生产。我们认为，具身智能即将打破这种持续了一个世纪的停滞——它并非让现有工厂变得更高效，而是将引发制造业经济地理学本身的相变。当具身人工智能能力在灵巧性、任务泛化、运行可靠性和触觉视觉融合方面跨越临界阈值时，其影响将远不止于降低成本：它们会重塑工厂的选址、供应链的组织方式，以及经济上可行的生产规模。我们通过定义一个多维能力空间 $\mathcal{C} = (\delta,\ \gamma,\ \rho,\ \tau)$，并说明当能力向量跨越特定临界曲面时，传统制造业选址目标函数会发生拓扑重组，从而将这一论点形式化。通过三条传导路径——选址权重反转、最小经济批量崩塌和人-基础设施解耦——我们证明，具身智能能够实现需求邻近型微型制造，消除“制造业荒漠”这一概念，并有可能逆转数十年来由劳动力套利驱动的地理集中趋势。我们还提出机器气候优势这一概念：一旦不再将人类工人纳入考量，最优工厂选址便取决于最适合机器的环境条件（低湿度、高太阳辐照度、热稳定性）。这些因素与传统制造业选址逻辑正交，由此创造出一种史无前例的生产地理格局。本文从第一性原理出发，构建了一个交汇于机器人能力分析与经济地理学的框架，并提出我们称之为具身智能经济学的研究领域——探讨物理人工智能的能力阈值如何重塑生产的空间与结构逻辑。

*免责声明：本工作论文仅供学术讨论与探索性分析之用，不构成投资建议，也不得作为任何财务决策的依据。文中引用的所有数据和示例均来源于公开媒体资料及行业报告。本研究部分获得英伟达学术资助计划奖项以及美国国家科学基金会奖项 #2426469、#2426470、#2436428 和 #2602731 的支持。

1 引言：超越效率叙事

当前制造业领域关于具身智能的讨论，主要受效率叙事主导：机器人取代人类工人，生产成本下降，吞吐量提高 [14, 32]。这种叙事虽然并非错误，但从根本上说并不完整。它将具身人工智能视为现有生产系统中的即插即用替代品——在同一条装配线上、同一家工厂里、同一座基于一贯相同理由选定的城市中，换上一双更快、更便宜的“手”。

我们认为，这种框架忽视了更深层的结构性变革。制造业选址、供应链拓扑和生产规模经济并非工业景观中不可改变的常数，而是执行体力劳动的生产主体（人类或机器人）所受能力约束的涌现属性 [33, 20]。当这些能力发生质的提升时，随之涌现的经济结构也必须进行相应重组。

考虑一个具体例子。孟加拉国的一家服装厂之所以位于孟加拉国，主要是因为服装组装需要对可变形材料进行灵巧操作——直到最近，这项任务还只能由人手完成 [39]。全球服装产业的整个地理逻辑——年产值达$2.5万亿美元——都源于这一单一能力约束 [28]。如果具身人工智能系统能够对可变形物体实现足够的灵巧性，这一约束便会消失，随之消失的还有将服装生产集中在低工资地区的经济依据。

本文作出三项贡献：

1. 我们定义了一个具有四个可测量维度的正式能力空间 $\mathcal{C} = (\delta、\ \gamma、\ \rho、\ \tau)$——灵巧性、泛化能力、可靠性和触觉视觉融合——并论证制造业经济地理学是该空间中位置的函数。2. 我们确定了能力提升传导至结构性经济变革的三条传导路径：选址权重反转、最小经济批量崩塌，以及人-基础设施解耦。3. 我们引入能力触发相变这一概念：在$\mathcal{C}$ 之外存在临界曲面，越过这些曲面后，制造拓扑将发生不连续重组，其过程类似于热力学相变。4. 我们确定了一种新颖的选址逻辑——机器气候优势——表明在实现完全自主之后，最佳工厂位置将由机器最优环境条件（低湿度、高辐照度、热稳定性）决定；这些条件与传统制造业选址因素正交，从而开启一种没有历史先例的生产地理格局。

据我们所知，这是首项通过相变框架，正式将具身人工智能能力分析与制造业经济地理联系起来的研究。我们将这一交叉领域称为具身智能经济学。我们首先指出（第2节），要理解这一潜在的范式转变，就必须将其置于一个引人注目的历史背景之下：自亨利·福特于1913年推出装配线以来，制造业的基础拓扑从未改变——范式冻结已逾一个世纪。

2 拓扑冻结的百年：从高地公园到工业4.0

在正式阐述我们的框架之前，值得先停下来审视我们所面对的这一历史反常现象。一个多世纪以来，制造业的基础拓扑——工厂建在哪里、生产如何组织，以及什么因素决定最优规模的空间逻辑——始终没有发生范式层面的变革。自亨利·福特于1913年创办高地公园工厂以来，每一项重大发展都只是福特主义范式内的优化，而非对它的背离。

2.1 福特主义范式：最后一次真实相变

1913年，福特为T型车引入移动式装配线时，并非只是改进了现有流程，而是重构了生产本身的拓扑 [26, 18]。在福特之前，制造业围绕手工艺作坊组织——熟练工匠在各自的工位完成整套

装配，并通过增加更多工匠来扩大生产规模。福特的洞见是，将复杂的装配工作拆解为简单、连续的操作，由低技能工人在移动生产线上的固定工位完成。

其影响具有范式层面的意义，而非渐进式变化：

> • **规模经济：** 装配线带来了巨额固定成本（工装、生产线设计、设施布局），只有通过大规模生产批次才能摊销，由此奠定了集中式大型工厂的经济逻辑。
>
> • **劳动去技能化：** 通过将任务分解为基本组成部分，福特使生产摆脱了对熟练劳动力地理分布的依赖，从而能够在任何存在非熟练劳动力群体的地方建厂 [6]。
>
> • **地理集中：** 规模经济、交通网络以及庞大劳动力群体的结合，造就了至今仍定义着制造业分布图的产业集聚区——底特律、鲁尔河谷、珠江三角洲 [33]。

这是制造拓扑的一次真正相变：生产的空间与结构逻辑发生了非连续性重组。

2.2 范式内一个世纪的优化

值得注意的是，自1913年起的每一项重大制造业创新，都在*within*福特确立的拓扑框架内发挥作用，改进其参数，却未改变其基本结构。表1总结了这一演进历程。

表1：一个世纪的制造业创新：范式优化，而非范式变革 nge

创新	Era	发生了什么变化	拓扑是否改变?
移动式装配线	1913	大规模顺序任务分解	**Yes**
统计质量控制	20世纪40年代	通过测量实现缺陷减少	No
丰田生产方式	20世纪60年代	消除浪费、准时化流动	No
数控加工	20世纪70年代	可编程精密切割	No
工业机器人技术	20世纪80年代	自动化点焊，喷漆	No
精益制造	20世纪90年代	价值流图，拉动系统	No
ERP/MES系统	21世纪初	生产的数字化协同	No
工业4.0 / 物联网	2010年代	传感器网络、数字孪生	No
协作机器人	2020年代	灵活的人机协作	No

具体来看。丰田生产方式（TPS）被广泛视为自福特 [41, 50], 以来最重大的制造业创新，它改变了工作在工厂中的流动方式（拉动与推动、看板、均衡化），但工厂本身仍是集中式厂房，位于劳动力群体和交通枢纽附近，并进行规模化生产。精益制造压缩了库存、减少了浪费，却没有改变根本格局：大型厂房、人类工人，以及邻近劳动力的选址。

即便是工业4.0——通过物联网传感器、数字孪生和信息物理系统实现制造业数字化 [29]——也只是为福特主义的躯体升级了神经系统，而非创造一个全新的躯体。工厂变得更智能、配备了更多仪器，也更灵敏，但它仍然是一座大型、集中式、由人类工人操作的设施，其选址仍取决于与福特选择高地公园时相同的因素。

工业机器人于1961年首次在通用汽车投入使用（Unimate），如今全球数量已超过400万台 [27], ，可自动化装配线上的特定工位，但并未消除人类劳动力及其所需的基础设施。一家现代汽车工厂即使拥有1,000台机器人，仍会雇用3,000至5,000名人类工人 [44]。拓扑并未改变：机器人只是福特装配线上速度更快、表现更稳定的工人，并非装配线本身的替代品。

2.3 为什么是现在？具身智能的质变

具身智能与过去一个世纪的优化有何不同？我们认为，三种能力的汇聚使其能够同时冲击福特主义范式的基础性假设：

1. **基础模型消除了任务特异性**。传统工业机器人经过编程，只能执行单一任务；更换任务则需要重新编程、更换工装并重新校准。用于机器人操作的基础模型 [7, 5] 能够通过少样本或零样本适配新任务，打破了自动化必须为每项任务投入巨额固定成本的假设——正是这一假设推动了规模经济和集中化。

2. **灵巧操作填补了最后一公里的缺口**。一个世纪以来，制造业任务中"最后的30%"——即需要灵巧处理柔软、易碎或几何形状复杂物体的任务——始终难以摆脱对人类的依赖。灵巧手设计、触觉感知和仿真到现实迁移方面的最新进展 [54, 10] 正在填补这一缺口。一旦缺口弥合，对人类工人乃至人类基础设施的需求便会消失。

3. **达到99.9%的可靠性+ 水平即可实现自主运行**。以往的自动化在特定、重复性任务上可靠性很高，但处理异常情况时仍需要人工监督。基础模型的泛化能力与稳健的感知能力相结合，使具身系统能够自主处理异常情况，从而消除人在回路中的要求，也消除了工厂与劳动力池之间的空间耦合。

正是这三种能力的融合——而非任何单一能力——对福特主义拓扑构成了范式性挑战。特定任务自动化（即使具备高度灵巧性）也只是在优化现有生产线。通用化 AI（缺乏实体 embodiment）无法执行制造业任务。只有将泛化能力、灵巧性与自主可靠性结合起来，才能为制造拓扑中的新一轮相变创造条件。

本文其余部分将对这一论点进行形式化阐述。我们定义一个多维能力空间，用于捕捉这些趋于融合的能力；确定它们触发结构性变革的关键阈值；并刻画跨越这些阈值后涌现的新制造拓扑。如果我们的判断正确，那么未来十年将见证自亨利·福特的高地公园工厂于1913年开门以来，制造业空间组织首次真正发生范式转变。

3 多维能力空间

现有关于自动化经济影响的分析，通常将机器人能力简化为单一标量——"自动化水平"或"机器人密度" [2, 23]。这种做法在分析上较为便利，却掩盖了这样一个事实：能力的不同维度会产生性质迥异的经济后果。一台可靠性达到99%但无法处理可变形物体的机器人，与一台能够处理可变形物体但有10%的时间会失败的机器人，其经济影响存在根本差异。

我们提出一个四维的**能力空间** $\mathcal{C}$：

定义 1（能力空间）。 具身智能能力空间是乘积空间$\mathcal{C} = \mathcal{D} \times \mathcal{G} \times \mathcal{R} \times \mathcal{T}$，其中：

- $\delta \in \mathcal{D} = [0, 1]$：灵巧度指数——目标行业中可由具身系统完成的操作任务所占比例，并按经济价值加权。
- $\gamma \in \mathcal{G} = [0, 1]$：泛化指数——系统通过 $\leq k$ 次演示成功执行新任务变体的概率（少样本适应）。
- $\rho \in \mathcal{R} = [0, 1]$：可靠性指数——在无需人工干预的情况下，系统在标准班次时长内持续成功运行的概率。
- $\tau \in \mathcal{T} = [0, 1]$：触觉-视觉融合指数——通过集成触觉和视觉感知可完成的质量关键型检测及操作任务所占比例。

能力状态是一个向量 $\mathbf{c} = (\delta, \gamma, \rho, \tau) \in \mathcal{C}$。对于大多数制造领域而言，具身人工智能的当前状态位于这一空间的左下区域。本文的核心论点

是，存在这样的临界曲面 $\Sigma_i \subset \mathcal{C}$，跨越 Σ_i 会触发制造业经济结构的质变式重组。

3.1 维度1：灵巧性（δ）

灵巧性是最直观的能力维度，也是机器人学文献中研究最为广泛的维度 [32, 54]。就我们的目的而言，重要的并非绝对的操作能力，而是经济覆盖范围——系统能够完成给定行业中多大比例的创造价值的操作任务？

以电子产品组装为例。当前的工业机器人能够以较高的成功率完成刚性元件的拾取与放置（$\delta_{\text{rigid}} \approx 0.95$） [27]。然而，涉及柔性线缆、具有亚毫米级公差的连接器，或包含力敏插入的多步骤装配序列的任务仍然具有挑战性（$\delta_{\text{flex}} \approx 0.3$–$0.5$） [54]。这些后一类任务在电子产品制造的人工劳动中占了不成比例的份额。

δ 的经济意义是非线性的。一家能够自动化70%任务的工厂，仍需要完整的人力基础设施（休息室、停车场、用于舒适性的暖通空调、轮班安排、安全规程）来支撑剩余的30%。只有当 δ 接近临界值 δ^*——我们估计该值因行业而异，通常处于 $[0.90, 0.98]$的范围内——人工劳动的“最后一公里”才变得可以消除，随之消除的还有对以人为中心的基础设施的需求。

3.2 维度2：泛化能力（γ）

泛化能力体现了具身人工智能系统无需进行大量重新编程或重新训练，就能适应新任务的能力 [7, 5]。得益于机器人基础模型，这一维度近期取得了最显著的进步。

γ 的经济影响主要体现在生产灵活性上。传统工业自动化能够针对固定任务实现高吞吐量，但转换成本高昂：重新配置工装、重新编程和重新校准可能需要数天至数周 [30]。这造就了强大的规模经济——大批量生产能够摊薄转换成本，进而要求采用集中式的大型设施。

如果 γ 较高——也就是说，具身系统能在几分钟而非几天内适应新的产品变体——那么转换成本就会趋近于零。这会对最优生产规模产生连锁影响：

$$\text{Minimum Economic Batch Size} = \frac{C_{\text{fixed}} + C_{\text{switch}}(\gamma)}{p - c_{\text{marginal}}} \tag{1}$$

其中，C_{switch}（γ）是 γ的单调递减函数，当 $\gamma \to 1$时趋近于零。当最低经济批量低于某个临界阈值时，集中式大规模生产相较于分布式、近需求地制造便不再具有结构性优势。

3.3 维度3：可靠性(ρ)

可靠性决定了具身系统能否自主运行，还是需要人工监督。这一区别在经济层面至关重要，因为监督要求维持着制造业与劳动力资源池之间的空间耦合 [42]。

ρ 与所需人工监督之间的关系具有显著的非线性。在 $\rho = 0.99$ （每100次操作发生一次故障）时，一条拥有50个工位的生产线平均每2次操作就会发生一次故障，因此需要近乎持续的人工监控。在 $\rho = 0.999$时，同一条生产线每20个周期发生一次故障，可以采用间歇性监督。在 $\rho = 0.9999$时，故障已足够罕见，可通过远程异常管理处理，而不必依赖现场人员。对于一条有 n 个工位、单工位可靠性为 ρ的生产线，其产线良率（完整周期内不发生故障的概率）为：

$$Y_{\text{line}} = \rho^n \tag{2}$$

对于 $n = 50$： $Y_{\text{line}}(0.99) = 0.605$； $Y_{\text{line}}(0.999) = 0.951$； $Y_{\text{line}}(0.9999) = 0.995$。从“需要现场人力”到“可远程管理”的转变发生在 ρ 的狭窄区间内，从而在人员配置要求以及随之而来的选址约束方面形成自然的相变。

3.4 维度四：触觉视觉融合（τ）

最后一个维度体现了触觉感知与视觉感知的融合（ [36, 35]）。许多对人类而言轻而易举的制造任务——通过触觉评估材料质量、借助力反馈检测装配错误、处理具有可变柔顺性的物体——对纯视觉机器人系统而言仍然颇具挑战。

对 τ 要求较高的行业包括食品加工（成熟度评估、轻柔处理）、纺织制造（织物操作、缝线质量）、药品包装（泡罩包装验证、西林瓶完整性）以及精密装配（在力限制下插入连接器）（ [12]）。这些行业在全球共雇用数亿名工人，并且格外集中于低工资经济体，原因恰恰在于所需的触觉智能一直难以实现自动化。

τ 的经济意义因此高度集中于劳动密集型产业，而这些产业的地理套利动机最为强烈。 τ 的进步对那些区位逻辑最依赖廉价劳动力的行业影响尤为显著。

4 三种传导路径

在$\mathbf{c} = (\delta,\ \gamma,\ \rho,\ \tau)$方面的改进如何推动制造业经济地理发生变化？我们确定了三种不同的传导路径。

4.1 路径1：选址权重反转

Ma制造业选址通常被建模为一个多准则优化问题 [52, 49]:

$$\mathbf{x}^* = \arg\min_{\mathbf{x}\in\mathcal{X}} \sum_i w_i(\mathbf{c}) \cdot f_i(\mathbf{x}) \tag{3}$$

其中，$\mathbf{x}$ 是候选地点， $f_i(\mathbf{x})$ 是各项因素的成本函数，例如劳动力（f_L）、物流（f_T）、土地（f_G）、能源（f_E）、市场邻近性（f_M）和监管环境（f_R）； $w_i(\mathbf{c})$ 是取决于能力状态$\mathbf{c}$的权重。

关键洞见在于，这些权重 w_i 并非常数，而是具身人工智能能力的函数。具体而言：

$$w_L(\mathbf{c}) = w_L^{(0)} \cdot (1 - \delta \cdot \rho \cdot h(\gamma, \tau)) \tag{4}$$

其中， $w_L^{(0)}$ 是基准劳动力权重， $h(\gamma, \tau) \in [0, 1]$ 体现了泛化能力与触觉视觉能力的共同贡献。随着$\mathbf{c}$ 提升，w_L 会降低，而其他因素的重要性——尤其是 w_M （市场邻近性）和 w_E （能源成本）——则会上升。

命题1 (权重反转**)**。 存在一个临界能力曲面 $\Sigma_W \subset \mathcal{C}$ ，使得当$\mathbf{c}$ 低于 Σ_W时， $w_L(\mathbf{c}) > w_M(\mathbf{c})$ （劳动力成本高于市场邻近性），而当$\mathbf{c}$ 高于 Σ_W时，$w_M(\mathbf{c}) > w_L(\mathbf{c})$ （市场邻近性高于劳动力成本）。跨越 Σ_W 会触发帕累托最优位置集合 $\mathcal{X}^*$发生不连续变化。

其结果是最优制造业布局的拓扑重组。在劳动力主导的权重配置下从不具备竞争力的地点——高工资经济体的市中心、能源廉价但缺乏劳动力池的偏远地区，或靠近终端消费者但劳动力成本高昂的地区——突然进入帕累托最优集合。相反，主要优势在于廉价劳动力的地点则可能退出最优集合。

这并非渐进式转变。由于帕累托前沿由成本等值面的交集定义，权重排序的变化可能导致最优地点集合发生不连续跃迁——这在数学上类似于热力学中的一级相变 [22]。

4.2 路径二：最小经济批量坍缩

第二条路径通过生产规模经济发挥作用。最低经济批量（MEBS）是收入超过包括摊销固定成本在内的总成本的最小生产批次：

$$\text{MEBS}(\mathbf{c}) = \frac{C_{\text{facility}} + C_{\text{equip}} + C_{\text{switch}}(\gamma) + C_{\text{labor}}(\delta, \rho)}{p - c_{\text{var}}} \tag{5}$$

用于机器人操作的基础模型 [7, 5] 通过实现快速任务适应，无需物理换装，直接应对 $C_{\text{switch}}(\gamma)$。灵巧性和可靠性的提升通过消除对人类工人和主管的需求，降低 $C_{\text{labor}}(\delta,\ \rho)$。

随着这两个术语都缩小，MEBS也随之降低。当MEBS降至临界值 N^*以下时，最优生产拓扑会发生质变：

命题 2 (拓扑转变**)**。 将 N^* 定义为特定产品类别在单个都市市场中的需求量。当 $MEBS(\mathbf{c}) > N^*$时，成本最低的生产拓扑是集中式（由一座或少数几座大型设施服务全球市场）。当 $MEBS(\mathbf{c}) < N^*$时，成本最低的拓扑是分布式（由许多小型设施分别服务本地市场）。$MEBS = N^*$ 处的转变十分明显，因为它恰逢跨区域配送物流成本的消除。

这一转变对供应链具有深远影响。在集中式体制下，供应链很长，库存很大，交货周期以周计。在分布式体制下，供应链收缩为本地采购，库存趋近于零（按订单生产变得可行），交货周期以小时计。整个价值10万亿美元的全球物流业 [45] 是围绕集中式体制构建的；分布式体制将需要——并促成——一种根本不同的物流架构。

4.3 路径3：人-基础设施解耦

第三条路径或许最为激进。当前的制造业地点不仅受劳动力成本 制约，还受劳动力可得性制约——这需要一整套人类基础设施生态系统：住房、交通、医疗保健、教育、卫生设施、食品供应和社会服务 [21]。工厂无法建在工人无法生活的地方。

这一约束造就了我们所说的制造业荒漠——这些地区在地理或战略上有利于生产，但缺乏支撑制造业劳动力的人类基础设施基础。例如：

- 可再生能源（地热、风能）丰富但人口稀少的北极和亚北极地区
- 靠近矿产资源但缺乏水资源和居住基础设施的干旱地区
- 主要航运通道附近的海上平台和人工岛
- 用于原位资源利用的太空或月球制造业 [53]

当能力向量 $\mathbf{c}$ 跨越由以下条件定义的临界曲面 Σ_H 时：

$$\Sigma_H : \quad \delta \cdot \rho > \theta_H \quad \text{and} \quad \gamma > \theta_G \tag{6}$$

其中 θ_H 和 θ_G 是行业特定阈值，工厂便会实现完全自主运行——仅需能源、原材料、计算和定期远程维护。“制造业荒漠”的概念由此消解，可行制造地点的集合也会从适宜居住的地区集合不连续地扩展至可获取能源的地区集合。

命题3 （可行集扩张）。 令 $\mathcal{L}_{hab}$ 表示具备充足人类基础设施的地点集合，$\mathcal{L}_{energy}$ 表示能源获取充足的地点集合。目前，可行制造地点满足 $\mathcal{L}_{feasible} \subseteq \mathcal{L}_{hab} \cap \mathcal{L}_{energy}$。除了 Σ_H之外，还有 $\mathcal{L}_{feasible} = \mathcal{L}_{energy}$。由于$\mathcal{L}_{energy} \supsetneq \mathcal{L}_{hab}$，这意味着可行制造集严格扩张。

4.3.1 机器气候优势：一种新的选址逻辑

脱钩路径还会带来一个后果：据我们所知，既有文献尚未认识到这一点。一旦不再需要人类在场，最优工厂选址便不再由传统制造业选址因素（劳动力成本、劳动力供给、港口通达性）决定，而是取决于机器最优环境条件——我们将其称为**机器气候优势（MCA）**。

关键观察在于，机器人系统与人类工人具有根本不同的环境偏好——而且至关重要的是，对机器最为重要的因素在长达一个世纪的制造业选址理论中完全缺席。人类需要狭窄的温度范围（20–25°C）、适中的湿度（40–60%）、有益于心理健康的自然光、洁净空气，以及靠近医疗保健、教育和社会基础设施 [21]。这些因素一直主导着工业规划。相比之下，优化机器人系统的则是一套完全不同的环境参数：

- **低湿度**（<30% RH）：减少金属接头和执行器的腐蚀，防止光学传感器和摄像机出现冷凝，尽量减少电子元件的氧化，并消除储存材料的霉菌风险 [34]。
- **低且稳定的粉尘水平**：延长精密轴承、光学系统（激光雷达、立体摄像机）以及触觉传感器阵列的运行寿命。
- **温度稳定性优先于绝对范围**：机器人能够耐受宽广的温度范围（大多数工业系统为-20°C至$+50$°C），但对会引发机械应力和传感器漂移的快速热循环较为敏感。较低的昼夜湿度变化比绝对温度更为重要。
- **高太阳辐照度**：可为自主运行提供经济高效的太阳能发电；还能提供稳定、优质的自然照明，提升视觉系统性能并减少对人工照明的依赖。
- **低降水频率**：可减少设有室外或半室外物流、装载和物料搬运区域的设施发生运营中断的情况。
- **适中海拔**：海拔处空气密度较低，可减少高速机械臂所受的空气阻力，并提升电子产品的对流冷却效率，不过这一影响属于次要因素。

我们通过一个**环境适应函数** $\phi(\mathbf{x})$将这一点形式化，该函数根据具身系统的运行地点$\mathbf{x}$调整其有效可靠性：

$$\rho_{\text{eff}}(\mathbf{x}) = \rho_{\text{base}} \cdot \phi(\mathbf{x}), \qquad \phi(\mathbf{x}) = \prod_j \phi_j(e_j(\mathbf{x})) \tag{7}$$

其中，$e_j(\mathbf{x})$表示地点$\mathbf{x}$ 的环境参数（湿度、粉尘、热稳定性、太阳辐照度、降水频率），$\phi_j : \mathbb{R} \to (0, 1]$ 表示每个参数的单调响应函数，并经过归一化，使得机器在最优值下 $\phi_j = 1$。乘积结构反映了多个环境应力因素造成的可靠性下降会以乘法方式叠加这一事实 [43]。

关键含义在于，$\phi(\mathbf{x})$与传统制造业选址吸引力 $S(\mathbf{x})$并非正相关——在许多情况下甚至相互正交。使ϕ最大化的环境因素（干旱、高辐照度、低降水、热稳定性）在整个工业史中对制造业选址一直无关紧要，因为它们并不能使人类工人受益。一个地点对人类居民而言可以完全宜居——甚至极具吸引力——同时具备出色的机器气候特征，却仍可能因缺乏传统前提条件而被制造业忽视：港口通达性、庞大的蓝领劳动力群体、重工业遗产，或低工资成本。这催生了一类新的区位优势，我们称之为**机器气候优势**：

定义 2（机器气候优势）。地点$\mathbf{x}$ 若 $\phi(\mathbf{x}) > \phi(\mathbf{x}')$ 对于当前典型制造业地点$\mathbf{x}'$成立，即使在传统（依赖劳动力的）选址标准下，$S(\mathbf{x}) < S(\mathbf{x}')$。也就是说，$\mathbf{x}$ 是自主

制造业的优越地点，正是因为它具备环境属性——干旱、高辐照度和热稳定性——而这些属性在传统选址演算中不可见。

这将选址目标函数（公式 3）重新定义为超越 Σ_H 的形式。劳动力权重 w_L降至零，并出现了一个新项：

$$\mathbf{x}^* = \arg\min_{\mathbf{x}} \Big[w_E \cdot f_E(\mathbf{x}) + w_M \cdot f_M(\mathbf{x}) + w_T \cdot f_T(\mathbf{x}) + w_\phi \cdot \big(1 - \phi(\mathbf{x})\big) \Big] \tag{8}$$

其中， $w_\phi \cdot (1 - \phi(\mathbf{x}))$会对机器环境欠佳的地点施加惩罚。随着自主运营规模扩大，权重 w_ϕ 也随之增加，因为在机器最优气候下运行所带来的平均故障间隔时间（MTBF）累计增益，会在数千个持续运行的机器人单元上不断叠加。

这代表了制造业选址的第三种逻辑，与邻近劳动力逻辑（第一阶段）和市场邻近逻辑（第二阶段）都有根本区别：

- **第一阶段：** 工厂设在劳动力成本低廉的地方。
- **第二阶段：** 工厂设在邻近客户的地方。
- **第三阶段：** 工厂设在最适合机器运行的地方。

5 相变框架

我们现在通过为制造业拓扑定义序参量，来形式化能力触发相变这一概念。

5.1 制造业集中指数

令 $\mathcal{M}(\mathbf{c})$ 表示制造活动作为能力状态 $\mathbf{c}$ 的函数的空间分布。我们将 **制造业集中指数** （MCI）定义为：

$$\mathrm{MCI}(\mathbf{c}) = \sum_{r \in \mathcal{R}} \left(\frac{m_r(\mathbf{c})}{M(\mathbf{c})} \right)^2 \tag{9}$$

其中 $m_r(\mathbf{c})$ 是区域 r 的制造产出， $M(\mathbf{c}) = \sum_r m_r(\mathbf{c})$ 是全球总产出。$\mathrm{MCI} = 1$ 对应于完全集中（所有制造业位于一个区域）；$\mathrm{MCI} = 1/|\mathcal{R}|$对应于均匀分布。

5.2 相图

我们推测，MCI 随$\mathbf{c}$变化呈现不连续行为，类似于一级相变：

$$\mathrm{MCI}(\mathbf{c}) = \begin{cases} \mathrm{MCI}_{\text{concentrated}} & \text{if } \mathbf{c} \in \mathcal{C}_{\text{below}} \\ \mathrm{MCI}_{\text{distributed}} & \text{if } \mathbf{c} \in \mathcal{C}_{\text{above}} \end{cases} \tag{10}$$

相变发生在临界曲面 $\Sigma = \Sigma_W \cap \Sigma_N \cap \Sigma_H$ （三个路径阈值的交点）。作为“序参量”的 MCI 在 Σ 处出现不连续下降，这是由三条传导路径同时激活所驱动的。

图1展示了 $\mathcal{C}$ 的二维投影中的概念相图。

6 行业案例研究：通往相变的三条路径

临界曲面 Σ_i 并非普遍适用——它们因行业而异，具体取决于各行业特有的操作挑战、当前自动化水平、供应链结构以及地理集中驱动因素。我们通过三个详细的案例研究，展示能力

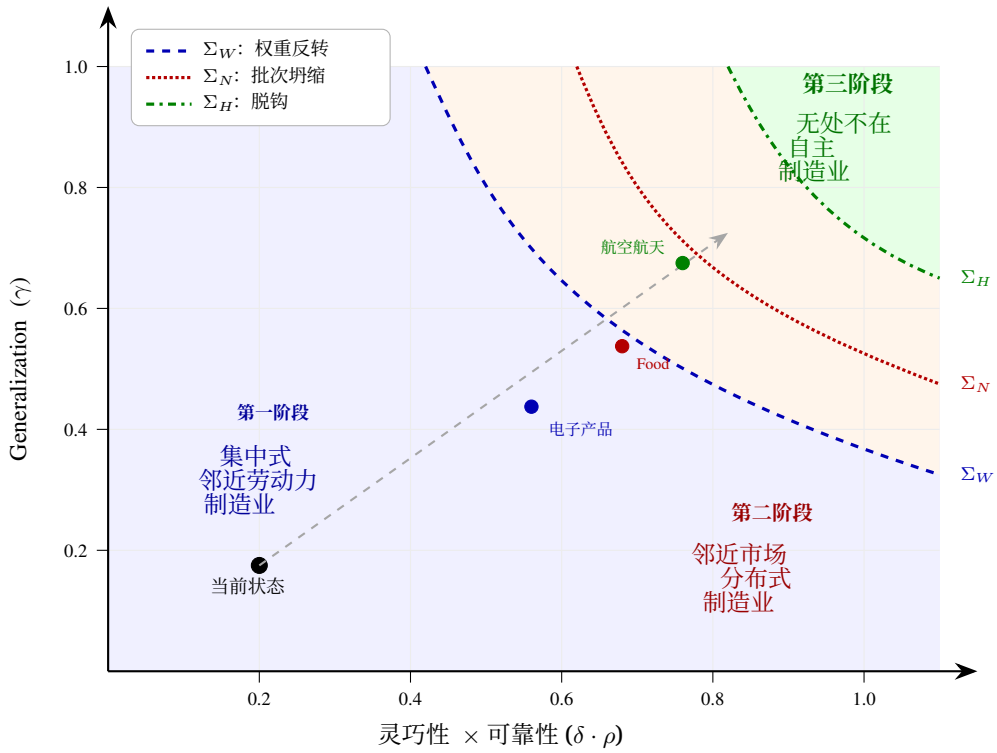


图1：能力空间 $\mathcal{C}$ 的（$\delta \cdot \rho$，γ）投影中的制造拓扑概念相图。三个临界曲面划分出不同的制造模式。**第一阶段**（当前）：劳动力成本主导选址，生产采用集中式布局，设施需要人类基础设施。**第二阶段**：跨越 Σ_W（权重反转）后，市场邻近性成为主导因素，分布式制造成为最优选择。**第三阶段**：超过 Σ_H（脱钩）后，只要有能源，无论是否适合人类居住，都可以进行制造。虚线箭头表示根据当前基础模型规模扩展趋势推测的技术轨迹。

空间框架如何映射到具体的工业转型。每个案例都旨在突出不同的主要传导路径：电子产品组装（Σ_W：权重反转）、航空航天制造（Σ_N：批次坍缩）以及食品加工（Σ_H：人-基础设施解耦）。

6.1 案例1：消费电子产品组装——重量反转触发因素

6.1.1 当前格局

消费电子行业——包括智能手机、笔记本电脑和可穿戴设备——构成了一个规模达 1.1 万亿美元的年度市场，其中超过 80% 的最终装配集中在中国和东南亚 [27]。组装一部智能手机大约涉及 70–80 个独立操作步骤 [16]，其中约 50–55 个目前由人类工人完成。自动化步骤（表面贴装、焊料回流、光学检测）处理的是平面基板上的刚性元件；人工操作步骤包括：

- **柔性电缆布线与连接：**柔性印刷电路（FPC）电缆必须穿过狭窄通道，并以亚毫米级对准精度和受控插入力插入零插入力（ZIF）连接器 [25]。
- **电池插入与胶黏剂管理：**软包电池易变形、对受力敏感，且需要精确放置胶黏剂以进行热管理。
- **垫片和密封件放置：**防水需要在复杂的三维几何结构中精确放置可变形橡胶垫片。
- **最终装配和外观检查：**显示屏粘接、后盖安装和外观质量验证需要同时进行力控制和视觉评估。

这些工作使富士康的员工人数保持在100多万，并将该行业的重心锚定在深圳。这里庞大的劳动力群体、零部件供应商生态系统和物流基础设施相互结合，产生了强大的集聚效应 [33]。

6.1.2 能力分析

当前状态： $\mathbf{c}_{\text{elec}} \approx (0.70, 0.30, 0.99, 0.40)$.

灵巧度指数 $\delta = 0.70$ 表明，刚性零部件自动化已较为成熟，但可变形物体操作——这一核心瓶颈——仍处于早期阶段。泛化指数 γ =0.30反映了这样一个现实：每一种新产品型号（例如 iPhone 16 与 iPhone 17）目前都需要 4–8 周的生产线重构、编程和验证——这一过程使得人类的灵活性对于管理产品转换仍然至关重要。可靠性 $\rho = 0.99$ 在现有自动化单元中较高，但在尝试灵巧任务时会显著下降。触觉视觉融合$\tau = 0.40$ 反映出，面向连接器插入任务的力觉传感与视觉伺服融合正在兴起，但尚不成熟。

Σ_W **（权重反转）的临界阈值：** $\delta \approx 0.92, \gamma \approx 0.70, \rho \geq 0.995$.

当劳动力成本权重 w_L 低于市场邻近性 w_M 与零部件物流 w_T的综合权重时，就会发生权重反转。在 $\delta = 0.92$，剩余的人工作业（约 75 道工序中的 6 道）可由一支小型技术团队完成，而不再需要大规模生产劳动力，从而消除对大规模劳动力基础设施的需求。在 $\gamma = 0.70$，目前需要数周的产品型号转换可缩短至数小时，消除了有利于集中式基地进行长生产批次生产的“重新配置设备惩罚”。

6.1.3 转型后拓扑结构

在 Σ_W之后，最优选址方程将发生逆转。主导成本因素将转变为邻近（a）消费市场（降低生命周期为 12–18 个月的产品的物流成本和交货周期），以及（b）半导体晶圆厂（降低零部件运输成本，并实现更紧密的供应链整合）。这有利于形成分布式拓扑结构：在北美、欧洲和东亚设立区域组装枢纽，各自服务本地市场——这与当前以深圳为中心的模式截然不同。

苹果现有的将部分 iPhone 组装转移至印度（以满足国内销售需求），可以被视为这一转型的早期信号；目前这一转变由地缘政治考量驱动，但在结构上得益于不断提升的 δ 和 γ [16]。一旦能力阈值被完全跨越，分布式组装的经济合理性将无需地缘政治补贴即可自我维持。

预计时间表： 5至8年，依据是当前VLA模型的扩展趋势 [7, 5] 以及可变形物体操作的快速进展 [54, 10]。

6.2 案例2：航空航天制造——批次坍缩触发器

6.2.1 当前格局

航空航天制造占据着独特地位：单位价值极高、生产数量极低，同时对精度的要求极为严苛。波音每月生产约35至45架737飞机；空中客车每月交付约50至60架A320系列飞机 [46, 3]。每架飞机约包含300万至600万个独立零部件，最终装配涉及数万项钻孔、紧固、密封和检验作业 [9]。

当前的制造拓扑高度集中。波音的737总装在华盛顿州伦顿的单一厂房内进行；A320系列则在图卢兹、汉堡、天津和阿拉巴马州莫比尔进行装配。这种地理布局的逻辑，主要并非由劳动力成本驱动（航空航天从业人员技能高、薪酬优厚），而是由工装、夹具和工艺验证所需的巨额固定成本决定：

- 一条单通道飞机装配线需要在厂房和工装方面投入20亿至50亿美元 [9]。
- 新生产基地的工艺验证和认证（美国联邦航空管理局/欧洲航空安全局）需要 2–5 年，耗资数亿美元。

- 在同一条生产线上切换飞机变型（例如，从 737-800 切换至 737 MAX 10）需要数周时间重新配置。

这些固定成本使当前的批量生产模式得以延续：在承担切换惩罚之前，先将单一型号的吞吐量最大化。这是现存最纯粹的福特主义形态——伦顿的移动生产线是高地公园 [26]的直接传承。

6.2.2 能力分析

当前状态： $\mathbf{c}_{\text{aero}} \approx (0.45, 0.15, 0.997, 0.35)$。
相较于行业的技术复杂程度，航空航天自动化水平低得出人意料。灵巧性 $\delta = 0.45$ 反映出，大多数装配任务——尤其是涉及狭窄空间、高空作业、密封剂涂敷和柔性线束布线的任务——仍由人工完成。泛化指数 $\gamma = 0.15$ 极低：每个自动化单元都是为特定飞机型号上的特定作业专门设计的。凡是采用自动化的环节（例如自动钻孔系统），其可靠性 $\rho = 0.997$都很高，这得益于行业零容忍的安全文化。触觉视觉融合 $\tau = 0.35$体现了力控钻孔和自动化无损检测方面的新兴应用，但这些技术的整合程度仍有限。

Σ_N 的临界阈值（批次坍缩）： $\gamma \approx 0.75$， $\delta \approx 0.80$， $\rho \geq 0.999$。
批次坍缩是航空航天行业的主导性转型机制，因为该行业的核心经济约束不是劳动力成本，而是转换成本和工装摊销。目前，航空航天行业的最低经济批量（方程 5）以数百架飞机计——正是因为 C_{switch} 和 C_{facility} 都非常高。

如果操作基础模型达到 $\gamma = 0.75$——使机器人系统能够以极少的重新配置，从钻孔机身框架转而布设线束——那么 C_{switch}就会坍缩。如果达到 $\delta = 0.80$，目前大多数人工任务便可实现自动化，从而降低 C_{labor} 以及厂房成本中与劳动力基础设施相关的部分。

综合作用是：最低经济批量规模（MEBS）从数百架飞机降至数十架。此时，在靠近航空公司客户和维护、维修和大修（MRO）枢纽的地方运营规模更小、分布更广的总装设施，在经济上变得合理；这种拓扑也能降低目前集中于单一厂址生产的灾难性供应链风险。

6.2.3 转型后拓扑结构

超越 Σ_N，航空航天制造业分布图将从少数大型总装基地转变为由区域组装枢纽组成的网络。每个枢纽都能灵活生产多种飞机变型，以更少的交付物流服务区域航空公司，并与当地的维护、维修和大修业务实现更紧密的整合。当前的模式是将机翼从布劳顿运往图卢兹，将机身段从威奇托运往伦顿，并将发动机从辛辛那提运往埃弗里特——一架飞机的供应链绵延数万英里；这一模式将收缩为区域集群。
这一转型也具有战略防务层面的影响。军事飞机生产集中在少数设施（例如 Lockheed Martin 位于沃思堡的 F-35 生产线），会造成单点故障，而分布式、高度自动化制造能够缓解这一问题 [4]。

预计时间表： 10–15 年，受航空航天行业保守的认证文化以及安全关键操作对极高可靠性的要求（$\rho \geq 0.999$）所制约。

6.3 案例三：生鲜食品加工——脱钩触发因素

6.3.1 当前格局

生鲜食品加工——包括果蔬分选、肉类加工、即食餐制备和烘焙产品生产——是一个规模达 4.1 万亿美元的全球行业，也是高收入经济体中劳动力密集程度最高的行业之一 [47]。与电子产品或航空航天不同，后两者的制造业出于战略选择集中在发展中经济体，而食品加工往往因现实需要而设在高工资国家：易腐性约束要求生产地点邻近农业产地和消费者，形成无法通过离岸外包化解的地理困境。

劳动力挑战十分严峻。仅在美国，食品加工行业就雇用了约 170 万名工人 [8], ，长期劳动力短缺导致肉类加工行业的年离职率超过 40%，农产品处理行业则超过 30%。欧洲生鲜食品行业也面临类似压力，对季节性劳动力的依赖造成了供应脆弱性，并在 COVID-19 [15] 疫情期间暴露无遗。

食品加工中的操纵挑战尤为严峻：

- **极端差异性：** 与制造组件不同，天然产品的尺寸、形状、重量、成熟度和表面特性会持续变化。一箱草莓中没有两个完全相同的个体。
- **易损性：** 新鲜农产品的瘀伤阈值通常低于 1 N 的局部作用力 [48], ，因此需要根据每件物品的特性校准抓取力。
- **多模态质量评估：** 成熟度、新鲜度和缺陷检测需要同时进行视觉（颜色、表面纹理）、触觉（硬度、柔顺性）以及有时还需嗅觉感知——这是一项高度依赖多种感官的任务。
- **卫生约束：** 食品接触表面必须可清洗、耐化学腐蚀，并适用于低温潮湿环境，这对执行器和传感器设计构成了极大限制。

6.3.2 能力分析

当前状态： $\mathbf{c}_{\text{food}} \approx (0.40, 0.25, 0.97, 0.20)$。

灵巧性指数 $\delta = 0.40$ 较低，因为对高度多变且易受损物体进行轻柔操作仍属于前沿研究。泛化能力 $\gamma = 0.25$ 反映了当前系统无法在不同产品类别之间迁移技能（例如从苹果分拣迁移到鱼类去骨），除非进行大量重新训练。可靠性 $\rho = 0.97$处于中等水平——对于许多自动化步骤而言尚可接受，但不足以支持在卫生关键环境中无人监督运行；在这类环境中，任何一次故障（例如掉落的产品污染生产线）都需要全面停机并进行消毒。触觉视觉融合 $\tau = 0.20$体现了触觉成熟度感知和柔顺抓取方面的早期研究。

Σ_H （脱钩）的临界阈值： $\delta \cdot \rho > 0.90, \quad \tau \geq 0.70, \quad \gamma \geq 0.60$。

脱钩路径与食品加工行业尤为相关，因为该行业存在独特的地理悖论：它必须位于农场和消费者附近，但这些地点往往缺乏食品加工所需的大规模、稳定的劳动力群体。农村农业地区面临人口流失；城市地区则面临高昂的劳动力成本和高人员流动率。该行业陷入了一种只有人-基础设施解耦才能解决的空间困境。

当 τ 达到 0.70——能够可靠地对不同类别的农产品进行触觉与视觉质量评估——且 $\delta \cdot \rho$ 超过 0.90 时，自主食品加工便可在目前无法提供所需劳动力的地点实现：

- **农场现场加工：** 在收获地点进行自主分拣、分级和包装，免去将未经加工的农产品冷链运输至远处加工中心的环节。仅此一项预计就能减少 15–25% 的食物浪费，因为采后运输中的损耗是全球 30–40% 食物遭到浪费的主要原因之一 [17]。
- **城市微型加工：** 在市中心设立小型自主设施，在消费前数小时生产鲜切食品、即食餐和烘焙产品。目前依赖人工劳动力的“暗厨房”模式，将演变为与城市需求共址的全自主食品制造业。
- **极端环境农业：** 随着垂直农业和受控环境农业拓展至干旱地区、北极及太空环境 [31], ，自主食品加工将成为自然的配套环节——无需在生产基地安排人类居住，即可打通从农场到餐桌的闭环。

6.3.3 转型后拓扑结构

超越 Σ_H，食品加工的版图将从由大型集中式工厂（每家雇用 500–2,000 名工人）组成的网络，转变为密集的自主微型设施网，直接嵌入农业与城市景观之中。“食品加工劳动力短缺”这一概念变得

毫无意义——这并非因为现有设施中的劳动力已被取代，而是因为设施本身经过重新设计，无需劳动力基础设施即可运行。

这会对食品供应链架构产生连锁影响。当前的冷链物流——旨在将原材料从农场运至集中式加工商，再运至配送中心和零售商——将压缩为超本地化循环。随着加工与消费之间的距离从数百英里缩短至个位数英里，价值 $200+ 0 亿美元的全球冷链物流市场 [24] 将面临结构性冲击。

预计时间表：高价值农产品（浆果、叶菜类）需要 8–12 年；复杂加工（肉类、预制餐食）需要 12–18 年，受卫生认证要求以及为高度多样化的天然产品实现 $\tau \geq 0.70$ 的难度所限。

6.4 跨案例综合

表 2 综合了三项案例研究，重点呈现了行业特定路径和阈值。

表 2：行业特定相变特征的跨案例比较

	电子产品	**航空航天**	**食品加工**
市场规模	1.1万亿美元	0.4万亿美元	4.1万亿美元
当前 $\mathbf{c}$	$(0.70, 0.30, 0.99, 0.40)$	$(0.45, 0.15, 0.997, 0.35)$	$(0.40, 0.25, 0.97, 0.20)$
主要路径	Σ_W (权重求逆)	Σ_N (批次坍缩)	Σ_H (脱钩)
绑定维度	δ, γ	γ, δ	γ, δ, ρ
关键操作挑战	可变形电缆	受限空间组装	可变自然物体
当前拓扑驱动因素	劳动力成本	工装摊销	劳动力供给
转型后拓扑结构	区域枢纽	分布式组装	超本地网格
预计时间表	5至8年	10–15年	8–18年

三个案例揭示了一个共同模式：在每个行业中，特定的能力瓶颈锚定着当前的制造拓扑，而特定的传导路径则将该瓶颈的消除传导为地理结构重组。瓶颈始终是多维的（单一能力并不足够），重组也始终是不连续的（集中式与分布式拓扑结构之间不存在“中间状态”）。这支持了相变解释：制造拓扑是由微观能力约束涌现而成的宏观秩序，当这些约束跨越临界阈值时，便会发生质的重组。

7 讨论

7.1 与既有文献的关系

回流文献已广泛记录了自动化在促进国内生产中的作用 [13, 19]。然而，这类文献将自动化能力视为外生的二元变量——“已自动化”或“未自动化”——而未考察能力的多维性质，也未考察能力提升转化为地理结构重组的非线性、阈值驱动机制。我们的框架提供了缺失的环节：从具身人工智能能力的连续空间到制造业地理格局的离散拓扑的形式化映射。

由克鲁格曼 [33] 和藤田等人 [20], 开创的经济地理学文献，为理解集聚力与分散力奠定了理论基础。我们通过引入具身人工智能能力这一内生变量来扩展这一框架，该变量会调节这些力量的相对强度。具体而言，我们表明，能力提升会削弱支撑地理集中的集聚力（劳动力共享、专业化供应商），同时增强有利于分布式生产的分散力（运输成本最小化、市场邻近性）。

具身人工智能文献 [14, 51] 主要聚焦于技术层面的能力发展，而未对经济地理意涵进行系统分析。相反，自动化经济学文献 [1, 2]聚焦于劳动力替代，却未考虑生产的空间重组。我们的工作衔接了这两支文献。

7.2 对产业政策的启示

相变框架对国家产业战略具有直接启示。当前受益于劳动力成本驱动的制造业集聚的国家，面临的前景并非渐进式侵蚀带来的结构性衰退，而是突然的相变。政策含义在于，适应策略必须在跨越临界曲面之前制定，因为转变后调整可能过于剧烈，难以有序管理。

反过来，拥有完善能源基础设施、先进计算能力且靠近消费市场的国家，可能会在制造业领域重新获得竞争力——并非因为它们降低了劳动力成本，而是因为劳动力成本已变得无关紧要。这表明，高工资经济体的最优产业政策不是补贴制造业劳动力，而是投资于能力基础设施（能源、计算、机器人研发），以加速跨越临界曲面。

7.3 对供应链架构的启示

在 Σ_N 之后形成的分布式制造体制 [11]，意味着全球供应链将发生根本性重组——从以成本套利为优化目标的漫长线性链条，转向以响应能力和韧性为优化目标的短程网状结构。库存管理将从预测驱动的囤货转向需求感知型准时生产。物流将从洲际大宗运输转向最后一公里配送。经济价值将从实体运输转移至数字化协调和能力部署。

7.4 机器气候优势：案例分析

第 4.3.1 节提出的机器气候优势（MCA）框架，对第三阶段体制下哪些地理区域将崛起为新一代制造业枢纽，给出了具体且可检验的预测。我们分析了若干候选区域：尽管它们在历史上处于边缘地位，或未曾出现在全球制造业分布图上，但在 $\phi(\mathbf{x})$ 方面得分很高。

7.4.1 科罗拉多前山地带：案例研究

丹佛—科罗拉多斯普林斯走廊是机器气候优势的典型例证。该地区的气候特征对以人为中心的制造业而言是一项劣势（海拔高达 1,600–1,800 米、紫外线辐射极强、气候干燥、冬季寒冷），但对自主机器人作业而言，却近乎理想 [37]:

- **年日照时长：** 300+ 天，在美国本土各州中位居前列，可提供稳定的太阳能发电条件和适合视觉系统的稳定光学环境。
- **平均相对湿度：** 30–45%，远低于 60% 的腐蚀加速阈值 [34]。与墨西哥湾沿岸或东南亚等高湿度环境相比，精密执行器和电子系统的平均故障间隔时间预计可延长 1.5–2× 。
- **降水量低：** 年均降雨量约为400毫米（相比之下，上海为1,200毫米，胡志明市为2,500毫米），最大限度地减少了天气导致的运营中断。
- **热稳定性：** 尽管绝对温度范围较大（-15℃至 $+38$℃），但湿度较低意味着露点温度始终较低，几乎消除了冷启动设备上的凝露风险——这对光学传感器和触觉阵列的可靠性而言，是一项重要因素。
- **可再生能源潜力：** 弗兰特岭走廊拥有美国最高水平的太阳能与风能综合潜力之一 [38], ，有助于支持能源自主型工厂模式。
- **物流：** 位于大陆中心，距两岸距离相当，加上成熟的公路和铁路基础设施，使其天然成为分布式国内制造业的物流枢纽。

历史上，丹佛作为制造业枢纽所发挥的作用远不及其经济体量所应有的水平。尽管它是美国西部山地地区最大的都市经济体，但其制造业规模远逊于那些规模相近、拥有港口通达性或重工业传统的都市区（例如休斯敦、底特律或研究三角区）。该地区现有的制造业主要涉及航空航天零部件（Lockheed Martin Space、Ball Aerospace）、食品加工和医疗器械，虽属细分领域且附加值高，但前沿山脉地区从未吸引过传统制造业强市所依赖的大规模劳动密集型生产 [8]。按照第一阶段的逻辑，原因显而易见：没有深水港，缺乏重工业传统，劳动力市场也更偏向技术和服务业，而非流水线生产。按照第三阶段的逻辑，这些“劣势”全都变得无关紧要——该地区较高的 $\phi(\mathbf{x})$ 得分，使其成为自主制造集群的候选地，而传统的选址模型根本不会发现这一点。

7.4.2 全球 MCA 热点

将这一分析扩展到全球范围后，我们可以发现若干 MCA 指数较高、但目前在制造业中代表性不足的地区：

阿塔卡马—阿尔蒂普拉诺地区（智利/阿根廷）：地球上最干燥的非极地沙漠，相对湿度通常低于 15%，太阳辐照度极高（$>$2,500 kWh/m^2/年），且蕴藏着丰富的锂和铜矿床。这里已建有全球最先进的天文观测站（这些观测站同样需要低湿度、低尘埃和晴朗天空等机器运行的理想条件），该地区有望成为自主矿物加工和先进制造业的枢纽。

澳大利亚内陆：广阔地区普遍干旱、湿度低、辐照度高，且邻近铁矿石、稀土和铝土矿等矿产资源。目前，偏远的位置和恶劣的气候使由人工操作的制造业不具备经济可行性；而自主工厂则不受这些限制。

阿拉伯半岛内陆：远离潮湿海岸地带的地区极其干旱，几乎全年阳光充足，并可利用海湾国家充裕的资本和能源基础设施；这些国家已在大力投资后石油时代经济多元化。沙特阿拉伯的 NEOM 项目 [40],目前的规划以人类居住为核心，但也可能转向建设自主制造区，充分利用该地区的 MCA。

冰岛和格陵兰：地热和风能资源丰富，气温凉爽（有利于电子产品的热管理），内陆地区湿度较低，且位于北大西洋的战略要地，介于北美和欧洲市场之间。目前，由于人口极少，这些地区不适合制造业；由 MCA 驱动的选址则消除了这一限制。

7.4.3 正交性原理

这项分析揭示了一个显著的规律：机器气候优势最高的地区与当前制造业密度正交。这并非因为机器气候优势高的地区必然不适宜人类居住——丹佛就是美国最宜居的城市之一——而是因为有利于机器的环境因素（干旱、太阳辐照度、热稳定性）完全没有纳入传统的制造业选址演算。一个多世纪以来，工厂选址一直以劳动力成本、劳动力供给、港口通达性以及与供应链的邻近程度为优化依据 [49, 33]。湿度、太阳辐照度和尘埃水平根本没有出现在目标函数中，因为它们不会影响工厂雇用的人类工人的工作表现。

这种正交性意味着，高 MCA 地区的人类宜居性呈现出广阔的光谱。有些地区——例如科罗拉多前山地带、美国西南部沙漠地区或伊比利亚内陆——宜居，甚至拥有繁荣的城市区域，但相对于其经济规模，制造业一直不甚发达，因为传统的选址计算优先考虑了它们所欠缺的因素：深水港、密集的蓝领劳动力群体，或靠近传统工业集群。另一些地区——阿塔卡马高原、澳大利亚中部或高纬度冰岛——人口稀少，只有通过彻底实现人-基础设施解耦，才会进入可行制造集。让这些迥异地区具有共同点的，并非它们都不适宜人类生活，而是它们都拥有某些环境属性——干旱、太阳能资源丰富、大气稳定性——而一百年来的制造业选址理论对此始终视而不见。

因此，第三阶段转型并非只是在现有工业化地区之间重新分配制造业。它开辟了全新的生产地理版图，在制造业历史上前所未有 ——无论是福特主义时代、离岸外包时代，还是回流制造时代，都未曾出现过。它标志着一种制造业分布图的出现，其绘制逻辑不再遵循劳动力市场，而是遵循机器的逻辑。

7.5 局限性与未来工作

本文建立了一个概念和数学框架；实证验证仍有待未来开展。本文存在若干重要局限：（1）所提出的临界阈值是数量级估计，仍需系统的实验验证；（2）模型假设 $\mathcal{C}$ 中的能力提升是单调且不可逆的，但在实践中，监管、社会或地缘政治障碍可能阻碍采用，因此这一假设未必成立；（3）相变类比虽有启发性，却可能过度简化转型动态——现实经济系统具有滞后效应、路径依赖和多稳态均衡，这些特征未能在我们的框架中得到充分体现；（4）我们未对地理结构重组本身如何影响进一步能力发展的激励这一反馈循环进行建模。

未来工作应当：（a）开发衡量各行业能力指数（δ、γ、ρ、τ）的实证方法；（b）结合技术评估与经济建模，估算临界阈值；（c）针对特定行业和地区，分析转型动态，包括调整成本、搁浅资产和劳动力市场冲击；（d）探究具身人工智能能力阈值与其他重大趋势（脱碳、地缘政治碎片化、人口老龄化）之间的相互作用，这些趋势正同时重塑制造业地理格局。

8 结论

我们认为，具身智能在制造业中的变革潜力远不止于提升现有生产系统的效率。通过构建正式的能力空间，并识别出能力提升传导至结构性经济变革的三条传导路径，我们表明，具身人工智能有望触发制造业经济地理中的相变——即生产发生地点、方式和规模的非连续性重组。

具身智能经济学框架为回答机器人学界和经济学界任何一方都无法独自解答的问题提供了严谨依据：服装制造何时会离开孟加拉国？达到何种能力水平，北极地区制造业才具备可行性？在自主工厂遍布的世界里，丹佛或阿塔卡马沙漠为何可能成为制造业枢纽？操作基础模型将如何重塑价值 10 万亿美元的全球物流业？

这些并非关于效率的问题，而是关于全球经济体系拓扑的问题。要回答这些问题，需要开展跨学科分析，贯通机器人操作、基础模型、经济地理学和供应链理论；本文旨在开启这类分析。

对研究人员、政策制定者和行业战略家而言，信息十分明确：具身智能不仅仅是在提升工厂的生产速度，它即将改变工厂的存在地点——这是自亨利·福特在1913年改变这个问题的答案以来的首次。

参考文献

[1] Daron Acemoglu 和 Pascual Restrepo。《自动化与新任务：技术如何取代并重新雇用劳动力》。《经济展望杂志》，33(2):3–30，2019年。[2] Daron Acemoglu 和 Pascual Restrepo。《机器人与就业：来自美国劳动力市场的证据》。《政治经济学杂志》，128(6):2188–2244，2020年。[3] 空中客车公司。《订单与交付》。技术报告，空中客车商用飞机公司，2024年。[4] Norman R Augustine。《国防工业基础：应对变化世界的战略》。美国国家科学院出版社，2023年。

[5] Kevin Black、Noah Brown、Danny Driess、Adnan Esmail、Michael Equi、Chelsea Finn 等。 π_0：一种用于通用机器人控制的视觉-语言-动作流模型。*arXiv* 预印本 *arXiv:2410.24164*，2024年。[6] Harry Braverman。《劳动与垄断资本：二十世纪劳动的退化》。Monthly Review Press，1974年。[7] Anthony Brohan、Noah Brown、Justice Carbajal、Yevgen Chebotar、Xi Chen、Krzysztof Choro- manski 等。Rt-2：视觉-语言-动作模型将网络知识迁移至机器人控制。*arXiv* 预印本 *arXiv:2307.15818*，2023年。[8] 美国劳工统计局。职业就业与工资：食品加工工人。技术报告，美国劳工部，2024年。[9] Flake C Campbell。《航空航天结构材料制造技术》。爱思唯尔，2006年。[10] Hao Chen 等。面向现实场景透明物体操作的视觉触觉感知。*CoRL*，2023年。[11] Martin Christopher。《物流与供应链管理》。培生，第4版，2011年。[12] Ravinder S Dahiya、Giorgio Metta、Maurizio Valle 和 Giulio Sandini。触觉感知——从人类到人形机器人。*IEEE*机器人学汇刊，26(1):1–20，2010年。[13] 德勤。供应链回流的时机是否已到？技术报告，德勤洞察，2024年。[14] Jiafei Duan、Samson Yu、Hui Li Tan、Hongyuan Zhu 和 Cheston Tan。具身人工智能综述：从模拟器到研究任务。*IEEE*计算智能新兴主题汇刊，6(2):230–244，2022年。[15] 欧洲生活和工作条件改善基金会。COVID-19与食品饮料行业：对就业的影响。技术报告，欧洲生活和工作条件改善基金会，2021年。[16] Flexport Research。电子产品制造与供应链现状。技术报告，Flexport，2023年。[17] 联合国粮食及农业组织。《世界粮食与农业状况：推进粮食损失和浪费减量》。技术报告，联合国粮食及农业组织，2019年。[18] 亨利·福特和Samuel Crowther。《今天与明天》。Doubleday, Page & Company，1926年。[19] Luciano Fratocchi、Carmela Di Mauro、Paolo Barbieri、Guido Nassimbeni 和 Andrea Zanoni。制造业回迁：概念与问题。《采购与供应管理杂志》，20(1):54–59，2014年。[20] Masahisa Fujita、Paul R Krugman 和 Anthony J Venables。《空间经济：城市、区域与国际贸易》。麻省理工学院出版社，1999年。[21] Edward Glaeser。《城市的胜利：我们最伟大的发明如何让我们更富有、更聪明、更环保、更健康、更快乐》。企鹅出版社，2011年。[22] Nigel Goldenfeld。《相变与重整化群讲义》。Addison-Wesley，1992年。[23] Georg Graetz 和 Guy Michaels。工作中的机器人。《经济学与统计学评论》，100(5):753–768，2018年。[24] Grand View Research。冷链物流市场规模与份额报告。技术报告，Grand View Research，2024年。[25] 鸿海精密工业股份有限公司。2023年年度报告。技术报告，富士康科技集团，2023年。

[26] David A Hounshell。《从美国制造体系到大规模生产，*1800–1932*：美国制造技术的发展》。约翰斯·霍普金斯大学出版社，1984年。[27] 国际机器人联合会。《世界机器人报告2024》：工业机器人。技术报告，国际机器人联合会统计部，2024年。[28] 国际劳工组织。纺织品、服装、皮革和鞋类行业的工作未来。技术报告，国际劳工组织行业政策部，2019年。[29] Henning Kagermann、Wolfgang Wahlster 和 Johannes Helbig。实施工业4.0战略倡议的建议。技术报告，德国国家科学与工程院（acatech），2013年。[30] Yoram Koren。《全球制造业革命：产品—流程—业务集成与可重构系统》。约翰·威立父子出版公司，2010年。[31] Toyoki Kozai、Genhua Niu 和 Michiko Takagaki。《植物工厂：高效优质食品生产的室内垂直农业系统》。学术出版社，2015年。[32] Oliver Kroemer、Scott Niekum 和 George Konidaris。机器人操作学习综述：挑战、表征与算法。《机器学习研究杂志》，22(30)：1–82，2021年。[33] Paul Krugman。《地理与贸易》。麻省理工学院出版社，1991年。[34] Young-Hoon Lee 等。环境友好型微弧氧化涂层AZ31镁合金的长期耐腐蚀性能。《腐蚀科学》，165：108370，2020年。[35] Qiang Li、Oliver Kroemer、Zhe Su、Filipe F Veiga、Mohsen Kaboli 和 Helge J Ritter。触觉信息综述：通过触觉实现感知与动作。*IEEE*机器人学汇刊，36(6)：1619–1634，2020年。[36] Shan Luo、Joao Bimbo、Ravinder Dahiya 和 Hongbin Liu。物体属性的机器人触觉感知：综述。《机电一体化》，48：54–67，2017年。[37] 美国国家海洋和大气管理局。美国气候常值。技术报告，美国国家海洋和大气管理局国家环境信息中心，2024年。[38] 美国国家可再生能源实验室。美国可再生能源技术潜力：基于GIS的分析。技术报告，美国国家可再生能源实验室，2024年。[39] Rajkishore Nayak 和 Rajiv Padhye。服装制造中的自动化。服装制造技术，第1–26页，2015年。[40] NEOM公司。NEOM年度进展报告。技术报告，NEOM，2024年。[41] 大野耐一。《丰田生产方式：超越大规模生产》。生产力出版社，1988年。[42] Raja Parasuraman、Thomas B Sheridan 和 Christopher D Wickens。人机自动化交互类型与层级模型。《*IEEE*系统、人和控制论汇刊：*A*辑》，30(3)：286–297，2000年。[43] Michael G Pecht。《产品可靠性、可维护性与可支持性手册》。CRC出版社，第2版，2009年。[44] Vaclav Smil。《能源与文明：一部历史》。麻省理工学院出版社，2017年。[45] Statista研究部。全球物流市场规模。技术报告，Statista，2024年。[46] 波音公司。《订单与交付》。技术报告，波音民用飞机集团，2024年。[47] 美国农业部。食品加工与制造。技术报告，美国农业部经济研究局，2024年。

[48] Maarten Van Zeebroeck、Engelina Tijskens、Edward Dintwa、Javad Kafashan、J Loodts、Josse De Baerdemaeker 和 Herman Ramon。水果属性对番茄碰伤敏感性的影响。采后生物学与技术，45(2)：168–175，2007年。[49] Alfred Weber。《工业区位论》。芝加哥大学出版社，1929。[50] James P Womack、Daniel T Jones 和 Daniel Roos。《改变世界的机器：精益生产的故事》。自由出版社，1990。[51] Dan Xia、Pengpeng Xu、Guangjie Han 和 Jinfang Jiang。未来智能制造中具身智能的新兴视角。制造系统学报，2025。[52] Lixing Yang、Brandon F Jones 和 Shao-Hua Yang。设施选址模型综述。计算机与工业工程，53(1)：141–159，2007年。[53] Kazuya Yoshida。空间机器人领域的成就。*IEEE*机器人与自动化杂志，16(4)：20–28，2003。[54] Jingwen Zhang、Haibo Wang、Weidong Li 等。面向智能制造的灵巧手：技术、趋势与潜在应用综述。机器人与计算机集成制造，91：102754，2025。