



PAPER

硅制的棋盘——博弈论视角下的中国芯片产业

崔博涵^{1,*}

¹ 南京大学计算机科学与技术系

*ID: 221220089 Email: bohan.cui@outlook.com Homepage: <https://jackcuii.github.io/>

摘要

芯片产业是当下最为热门的产业之一，其产业链长，分工细，涉及到多个领域。2022年以来人工智能领域的发展，使得芯片产业再次成为了热点。本文将从博弈论的角度，分析国内芯片产业的面对的来自内部和外部的乱局，同时给出可能的解决方案。在内部，我们将从产学研之间的博弈进行分析，同时还将讨论新的商业模式：开源上的博弈以及带来的新机会。我们给出了可能的解决方案，包括增加三方之间的对话，宏观调控，增大学校教育的话语权等。在外部，我们将从国际关系的角度，分析我国在海外人才引进上的博弈以及美国政府强迫跨国公司退出中国市场的博弈。最后，本文提出了一点提醒，即应该不止将目光局限于芯片产业，而应该预测未来其他产业的增长点并加以布局。

Key words: 芯片产业，博弈论，产学研，国际关系

概论和问题背景

2022年11月30日，由非盈利性公司 OpenAI 研制的语言人工智能模型 ChatGPT 发布，瞬间就吸引了各界大量的关注。随后早期缺少布局的公司纷纷跟风入场，大量学术界人士下海创业。这个新赛道很快就进入了饱和竞争的态势。

随后，随着目前的人工智能加速器的巨头 NVIDIA 的产能趋于极限，工业界的需求远远得不到满足。半导体产业逐渐被推到台前。同时，随着近年来中美关系的恶化，加之 AI 逐步成为了两国科技竞争寸土不让的高地，美国很快出台了针对华高性能计算卡的出口的限制法案，力图扼杀中国的 AI 产业。但随后有若干中国企业 all-in 投入到芯片研究，且本来中国各企业牢牢控制国内市场的基本盘，同

时在人工智能方向就缺乏原初创新，加之 NVIDIA 在中美之间的暧昧态度，制裁效果并不明显。

几个月以来，有几件半导体界的事件引人关注。其一是美国时间 12 月 2 日，美国商务部工业与安全局发布了最新一轮的对华半导体制裁名单 [1]，其制裁范围除了人工智能加速器本身，还蔓延到其上下游产业，包括从光电原材料，代工，封测等领域。其中就有国内光电材料的龙头企业之一南大光电，希望通过硅材原材料控制中国的半导体产业。其二是 11 月，国产 GPU 厂家摩尔线程接受 IPO 辅导，可以认为是国产 GPU 走出的关键一步。其三是 12 月 9 日，市场监管总局对 NVIDIA 启动反垄断调查。可以说，目前中国的半导体市场面对的是一个“乱局”。

其实，当今在国内和国际形式下，中国半导体产业面对的乱局都有博弈论内涵在其中。下面我们

将从国内和国际两个视角，分别梳理和分析这个乱局的博弈论背景。

分析基础：芯片产业综述

首先，我将利用自己的专业知识对芯片产业进行一个简单的总述，方便后面的分析。

芯片产业是一个综合的产业，其本身包括，设计，制造，封装，测试等环节，各环节高度分工。首先是设计¹，即设计芯片的架构，这一步骤主要有 Intel (CPU), AMD (CPU, GPU), ARM (CPU), NVIDIA (GPU, GPGPU), 华为海思 (GPGPU), 龙芯中科 (CPU), 寒武纪, Qualcomm (移动 CPU, 通信芯片) 等公司²。制造阶段，即制造自身设计的芯片或代工，就是将设计好的芯片生产出来，代表就是掌握着世界最高工艺的台积电 TSMC，另外还有三星，英飞凌，中芯国际等公司，这一产业的上游之一就是仪器设备，尤其是光刻机产业，代表就是荷兰 ASML，另一方面是光刻机封装测试阶段，即将制造好的芯片进行测试和封装成成品，这一产业的代表就是台湾的日月光，美国的 Amkor，中国的长电科技等公司。芯片产业的主要下游的则是如用户设备的制造产业，如手机等各种日常电子设备，车机，工控机等等，以及计算产业，如云计算服务厂商（云存储，云计算，MLaaS 等）。

所谓的“芯片”其实是各种芯片的通称。首先是用户级别的芯片如手机和个人 PC 的 CPU, GPU 等。其次是数据中心级别的芯片，如最为敏感的人工智能加速器（又称 GPGPU，通用图形处理器）以及高性能计算处理器（如神威·太湖之光等超级计算机使用的 CPU）。第一类中的芯片和第二类芯片通常要求性能和功耗的都达到尽可能优，因而往往使用最先进的工艺和制程。另外还有嵌入式芯片如 MCU 等以及传感器芯片 CMOS³ 等。这些芯片的制造工艺和制程要求相对较低，需求量巨大，往往要求的是低功耗和低成本。另外还有需求相对较小的可重构芯片产业，如 AMD Xilinx (FPGA), Intel Altera (FPGA), 清微智能 (CGRA) 等。

在目前的芯片产业，整体上是学界远落后于工

业界，由于其巨大的成本和较高的专利壁垒，学术界很难在没有企业的背景下开展研究，所以该产业主要由业界引领风向。另外从工业界的角度来看，出于类似的原因，其市场主要由几家大公司把持，鲜有小公司和创业公司能够在这个领域能够持续生存。

下面我们将用博弈论的方法详细分析国内芯片产业的乱局，同时给出可能的解决方案。

波澜不惊：国内视角下的中国芯片产业

面对当下这个芯片产业乱局，为何此处使用“波澜不惊”的标题？因为在整个乱局中，除了大众情绪和股市情绪有一定的程度的波动，整个芯片产业的基本盘并没有发生根本性的变化。

而来自外部的制裁，对于国内芯片产业也是“太阳底下没有新鲜事”。2019 年 5 月 15 日，美国将华为公司列入制裁实体清单，开始全面限制华为产品的进口贸易，以及与华为有关的上游原材料企业。其中最为核心的就是生产高端手机芯片的 Qualcomm(高通)，其旗下的产品骁龙手机芯片套件为高端智能手机的必备原件。对该芯片实现禁运之后，国产芯片问题第一次引发大量的关注，自 2003 年“汉芯”事件之后的长期低迷之后，多家国内企业再次开始加大力度投入到芯片产业，如华为海思、中芯国际、龙芯中科、紫光国微、复旦微电子等。经过数年的发展，各个芯片厂商基本充分分割了国内市场，同时占据了差异化的生态位。因此，当关于 AI 加速器芯片的制裁到来时，对国内市场的内部格局并没有造成巨大的冲击，所以说是“波澜不惊”。但这并不证明我国芯片产业没有问题，下面就将加以分析。

不平衡的鼎之三足：产学研

现阶段，国内的芯片产业在高端芯片方面陷入某种瓶颈，我们来分析一下这个瓶颈的原因之一，即产学研之间的不平衡。

下面我们假设有产业界（产），学术界（研），学校教育（学）三个主体，下述图片上讨论得益按照（产，研，学）的顺序，即产业界为红色，学术界为绿色，学校教育为蓝色。对于某一个细分领域，每个博弈方有三个选择，不投入，投入，大量（过度）投入。他们之间的关系如图 1。由于选择和博弈方

1 此处用括号标注出其核心业务领域

2 注意这些公司一般不具备自己制造芯片的能力。另外这一领域有一附带的产业：EDA（电子设计自动化）软件产业。

3 除了民用以外，CMOS 在军事工业上是非常敏感领域。

较多，容易出现错漏，此处采用 **Gambit[2]**，一个开源的博弈论分析工具，对这个博弈进行分析。下面的截图均为该软件的用户界面。该博弈的文件可以在此处下载<https://jackcui.notion.site/silicon-chessboard> 其中的 **Ind-Sch-Aca.gbt** 即为这个博弈的文件。

		不投入			投入			大量投入		
不投入	不投入	-10	-10	-10	-10	-10	-15	-10	-10	-20
	投入	1	3	0	1	5	5	1	10	-10
	大量投入	1	5	0	1	10	10	1	13	-5
投入	不投入	3	1	0	5	1	5	10	1	-8
	投入	2	2	0	10	10	15	12	12	10
	大量投入	2	4	0	3	8	12	5	13	-2
大量投入	不投入	5	1	0	10	1	10	15	0	-4
	投入	4	2	0	8	3	12	14	5	-2
	大量投入	3	3	0	7	7	10	-5	-5	5

图 1. 产学研博弈整体

我们对上述的得益设置给出解释：

		不投入			投入			大量投入		
不投入	不投入	-10	-10	-10	-10	-10	-15	-10	-10	-20
	投入	1	3	0	1	5	5	1	10	-10
	大量投入	1	5	0	1	10	10	1	8	-5

图 2. 产学研博弈

如图 2，首先考虑产、研不投入的情况下，如果产研同时不投入，学生在学校教育中的重视就沒有人承接，就会造成大量难以就业的相关细分领域的学生。同时没有产业界和学术界的指导，仅凭学校教育是难以解决现实中的问题的，这就导致这一领域可能会受到严重的外部打击。因此产研得益都为负，而学校教育投入越多，学生的得益越低（如在模拟芯片领域，仍有不少学校培养相关的研究生，但是却沒有太多相关的产业从事相关的研发，导致学生就业困难）。

		不投入			投入			大量投入		
不投入	不投入	-10	-10	-10	0	0	0	0	0	0
	投入	1	3	0	1	5	5	1	10	-10
	大量投入	1	5	0	1	10	10	1	8	-5

图 3. 产学研博弈

如图 3，再考虑产业界不投入的情况下，此时面对外界压力，产业界只能从高校等科研机构购买现成的解决方案，因此只有“搭便车”得益 1，而如果学校教育也不投入（第一列），那么学术界缺乏后补人才的支撑，得益不高，在投入和大量投入时分别得益 3 和 6，而因此该细分领域就与学生无关，学生

无得益也无损失。如果学校教育投入，那么学术界的得益会提高，学生去向也得到保证，因此如上第二列第三行，在学术界大量投入，学校教育适量投入时达到最优。但在第三列，如果学校教育投入过多，超过了学术界的投入，那么学术界的得益会有有限的上升（接近“人海战术”带来的边际收益）（即右下角），但学生也会因为竞争压力过大且没有工业界的选择得益为负。如果学术界适量投入，而学校教育过多投入（第三列第二行），那么学生的生存环境会进一步恶化，因为僧多粥少，可以自由挑选学生，学术界得益达到最优 10。

		不投入		
不投入	不投入	-10	-10	-10
	投入	1	3	0
	大量投入	1	5	0
投入	不投入	3	1	0
	投入	2	2	0
	大量投入	2	4	0
大量投入	不投入	5	1	0
	投入	4	2	0
	大量投入	3	3	0

图 4. 产学研博弈

如图 4，我们继续解释这一部分的得益，在学校教育始终不投入的情况，此时学生无得益无损失为 0。产业界和学术界的人才补充需求得不到满足，投入产生的得益都比较有限。整体上二者在此处是对称的，也就是如果给定对方的投入不变，自身的得益会少量增加，如图比较绿色的第一二三行，四五六行和七八九行，以及红色的第一四七行，二五八行和三六九行。但是如果对方的投入增加，自身的得益就会相对减少，会瓜分有限的得益。如对比绿色的三六九行和红色的七八九行。

		不投入			投入			大量投入		
不投入	不投入	-10	-10	-10	-10	-10	-15	-10	-10	-20
	投入	1	3	0	1	5	5	1	10	-10
	大量投入	1	5	0	1	10	10	1	13	-5
投入	不投入	3	1	0	0	0	0	10	1	-8
	投入	2	2	0	0	0	15	12	12	10
	大量投入	2	4	0	0	0	0	5	13	-2
大量投入	不投入	5	1	0	0	0	0	15	0	-4
	投入	4	2	0	0	0	0	14	5	-2
	大量投入	3	3	0	0	0	0	-5	-5	5

图 5. 产学研博弈

如图 5，下面我们分析这一部分。这一部分反映的是当学校教育大量投入的情况。对比高亮部分的第二行和第四行，以及第三行和第七行，这里体

现了学术界和工业界的一个不同，也就是工业界对学生就业的承载力要好于学术界，当学校教育过量培养相关人才时，如果工业界有投入，学生还会有相对较好的生存环境。学术界和工业界的另一个不同是，对比第三行和第七行，当学术界完全主导该细分领域时，工业界还可以分一杯羹，但如果工业界完全主导了该领域，那么学术界就会被边缘化⁴。这样的细分领域一个代表就是芯片制造工艺（良率控制，工艺优化等）。对比五六八行，当一方产研过度投入时，产业界的得益更高，这也是因为产业界的规模效应更加明显，而对于学术界的评价标准和有限的位置，人力的增加只会带来人才质量的提高，并没有直接的规模效应。再观察第九行，也就是全部大量投入时，此时会造成严重的白热化竞争和内部消耗，出现大量的反复造轮子的情况造成严重地浪费，但由于产业界和学术界都 **all-in**，学生的就业去向得以落实，得益为正，但是相对与第五行的得益，这里的得益是下降的，因为激烈的竞争会使学生本身受到严重的压榨（比如现在热门的人工智能加速器的架构设计，企业界有比较成熟的方案。学校培养大量相关人才，但过去招聘中由专科生担任的岗位现在已经要求硕士生，在职员工更是加班熬夜严重）。

		不投入			投入		
不投入	不投入	-10	-10	-10	-10	-10	-15
	投入	1	3	0	1	5	5
	大量投入	1	5	0	1	10	10
投入	不投入	3	1	0	5	1	5
	投入	2	2	0	10	10	15
	大量投入	2	4	0	3	8	12
大量投入	不投入	5	1	0	10	1	10
	投入	4	2	0	8	3	12
	大量投入	3	3	0	7	7	10

图 6. 产学研博弈

如图 6，最后我们来分析中间部分的博弈。其中高亮的第五行的为最优，产业界和学术界的需求都得以满足，资源得益充分配置，学生和研究人员的工作环境得以保证。注意再非过度投入的情况下，对于产业界和学术界来说，对方的非过度进入反而会使整体的得益更高（对比第二四五行）。因为实际上学术界和产业界如果适量投入，在芯片产业中完全可以占据不同的生态位（企业可以将探索不成熟

4 这里存在一个额外的因素，开源，后文会详细讨论。

的技术和架构的工作交给学术界完成，学术界可以获得企业的流片⁵或者捐助等资源的支持，避免纸上谈兵）。但如果另一方过度进入，则会导致得益反而下降（对比第二行与第八行）。对于学生而言，如果只有一方投入（或大量投入）的话，学生的选择较少，就会使学生的得益降低，图中为 5（10）。如果有一方大量投入，一方投入的话，学生的得益可以更高，为 12。而如果双方都大量投入再次陷入激烈竞争，则学生的得益反而会下降为 10。

我们对上述的博弈求纳什均衡，如下图 7：

		不投入			投入			大量投入		
不投入	不投入	-10	-10	-10	-10	-10	-15	-10	-10	-20
	投入	1	3	0	1	5	5	1	10	-10
	大量投入	1	5	0	1	10	10	1	13	-5
投入	不投入	3	1	0	5	1	5	10	1	-8
	投入	2	2	0	10	10	15	12	12	10
	大量投入	2	4	0	3	8	12	5	13	-2
大量投入	不投入	5	1	0	10	1	10	15	0	-4
	投入	4	2	0	8	3	12	14	5	-2
	大量投入	3	3	0	7	7	10	-5	-5	5

图 7. 产学研博弈纳什均衡

我们可以看到上述的博弈中，整体帕累托最优的资源配置近似认为有两个（如图 8,9）。（因为值比较多，很难完全平衡的设置这些参数，我们就取最大的两个）

		不投入			投入			大量投入		
不投入	不投入	-10	-10	-10	-10	-10	-15	-10	-10	-20
	投入	1	3	0	1	5	5	1	10	-10
	大量投入	1	5	0	1	10	10	1	13	-5
投入	不投入	3	1	0	5	1	5	10	1	-8
	投入	2	2	0	10	10	15	12	12	10
	大量投入	2	4	0	3	8	12	5	13	-2
大量投入	不投入	5	1	0	10	1	10	15	0	-4
	投入	4	2	0	8	3	12	14	5	-2
	大量投入	3	3	0	7	7	10	-5	-5	5

图 8. 近似帕累托最优

可以看到其中一个帕累托最优（投入，投入，投入）是纳什均衡，另有一个非帕累托最优的均衡是（大量投入，大量投入，投入）（产业界和学术界都过量投入这个产业，但是学校教育不能匹配这种过量的人才需求）。那么，市场不就应该成为这样的状态吗？但是实际上，我们的市场显然不是这样的，根据上面的解释中我们给出的例子就可以发现，绝

5 流片指将设计好的芯片制造出来，这样可以对其进行实地的测试，目前因为代工厂的产能饱和和成本高昂，学术界有大量的课题组新的技术和设计只能在模拟器上进行验证，这些创新就是除了发表论文以外没有实际意义的，因为物理上制造出的芯片一定会出现不可预期的问题。

#	1: 不投入	1: 投入	1: 大量投入	2: 不投入	2: 投入	2: 投入
1	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
2	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
3	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	
4	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
5	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
6	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
7	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
8	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
9	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
10	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
11	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
12	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
13	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	
14	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	

图9. 软件计算的结果，如果我们去掉其中的重复部分，可以发现就是上述划线法获得的两个均衡。

大多数的细分领域都分散在各种其他程度的不均衡上，下面我们就将分析其中的原因。

其一，是上述的均衡是在完美信息的条件下得到的。但实际上，三方的研究项目是不透明的。产业界的研究领域往往对学术界和学校教育不可见，而学术界内部派系林立，也会存在内部的不一致。这也导出了一个目前国内产学研的一个主要问题，缺乏协调和对话机制。我们将在下面详细讨论。

其二，上述的博弈有两个假设，

- 学校教育是作为一个独立的博弈方存在的。
- 学校的博弈是代表学生的利益。

但实际上，首先学校教育并没有这样的独立性。在中央拨款之外，学校的往往接受了大量来自地方政府，各种企业的资助、捐款和补贴甚至企业直接参与学校的决策。这样就需要满足企业的利益和要求，从而并不能达到自身的最优（企业自然希望学校尽可能扩大培养学生的量，即过量投入，从而在就业市场上形成买方市场，从而可以优中选优，淘汰大部分毕业生选取最佳人选）。

对于第二个假设，学校并不总代表学生的利益，因为对于学术界来说，学生的数量增多也是一种资源的增加。另外，对于学校领导层来说，追求新意和产业界需求而制造新的专业，新的实验班等新的项目，是一种政绩的体现，而毋需在意是否有相匹配的需求（如在国内量化投资企业相当有限，团队人员极其精简的背景下，依然开设每届数十人的“计算机金融实验班”）。而且这种市场需求和学校供给具有一定的滞后性。因此每当一个新的热点出现时，上至南京大学、清华大学、北京大学等高校，下至普通的一本二本院校，都争相开设相关的专业，最后就会导致学生得益不高（如博弈中所说）。但实际

得益对于学校的决策者是得益高的，因而决策者很难做出负责任（所谓“理性”）的选择，导致均衡难以达成。

可以说现阶段学校教育在校层面是作为学术界的附庸，而在未来层面是产业界的附庸。

基于上面两个原因，资源合理分配的纳什均衡很难实现。下面提出几个有可能有助于趋于上述均衡的解决方案。

其一，解决信息不对称，增加三方之间的对话。在这一方面中国科学院起到了一些积极的作用，如中国科学院计算所的包云岗研究院筹建的北京开源芯片研究院就是连接了产业界和学术界。⁶除了自发的联系，政府也可以发挥其权威作用，为双方的对话和信息共享背书。

其二是宏观调控，杜绝纯市场调节下带来的企业或学术界的盲目过量投入。政府应该发挥相应的调控作用。对于技术领域⁷，应该有组织有计划地调控各方投入，发挥制度的作用，避免市场的盲目性。

其三是增大学校教育的话语权。学校教育应该有自己的利益代表，而不是作为产业界和学术界的附庸。应该有相关的制度保障学校教育可以独立的、客观的关注或预测就业市场和学术界的需求，而不是听从二者的指挥。一方面减少和隔离“企业献金”带来的控制。同时可以成立校级或者跨校级的教学委员会，确定学校教育的方向，而不应该将其与少数决策者的利益挂钩。

反商业直觉的新实践：开源

在上述的讨论中，频繁的提及了一个现象，在博弈中非常容易倒向学校培养人才的过剩。解决这个问题的一种办法就是扶持小企业和初创企业的发展，这些企业一方面可以提供层次化的就业机会、缓解就业压力，另一方面可以避免大企业的垄断问题。

在我国芯片产业，小企业和初创企业是欠发展的。我国芯片领域的小企业主要是生产低成本、低技术含量、低附加值的成熟芯片产品。在西方，有一批独角兽初创企业如 **Tenstorrent**, **Groq**, **Cerebras** 等，他们的产品是高端芯片和加速器，这类企业才可以真正挑战巨头的垄断格局。

⁶ 遗憾的是，事实上，由于中国科学院环境的特殊性，学生依然是受到严重压榨的。同样是因为学术界可以独享合作的成果而没有动机为学校教育一方做利益代表。

⁷ 注意此处是技术领域也只能是技术领域

小企业和初创企业的一个生存困境是由专利和知识产权打造的商业壁垒。这导致小企业如果想要进入市场开发兼容产品，必须要付出巨额的版权费（如所有 ARM 指令集的公司生产每一枚芯片都需要向 ARM 公司支付 1% 至 2% 的许可费 [3]）。同时巨头背靠知识产权，利用自身体量低价抢占市场，发展独占生态，再通过专利诉讼来打击竞争对手，就可以实现对市场的垄断。如果小企业开发自己的架构，即使优于巨头的设计，也会因为生态不兼容，多数应用无法在其上运行而无法进入市场⁸。

而我国从西方学习了一种不同于传统的商业模式：开源。即开发允许免费商用的产品。这种商业模式的优势在于，可以降低市场进入门槛，使得小企业和初创企业可以更容易地进入市场，同时由于该生态可以共同维护，众多小企业可以形成联盟，提高产品的适用性。由于不存在商业机密的问题，也可以交由学界甚至开发者社区来维护。参考下面的博弈（左侧是大厂，上侧是小厂）：

表 1. 开源商业模式博弈

	开源	闭源
开源	8, 6	7, -8
闭源	10, 3	12, -5

可以看到如果选择（开源，开源）这是帕累托最优的，即整体共建一个大的生态，大厂和小厂都各得其所，整体的创新氛围是良好的，但这并不是一个纳什均衡。

如果选择（开源，闭源），此时大厂独自开源，相当于向外界单项输出技术，得益最低为 7，小厂选择闭源因为没有生态而得益也最低，为-8。

如果选择（闭源，闭源），此时大厂得益最高，因为前面讨论的垄断机制，小厂很难生存，得益为-5。

如果选择（闭源，开源），此时大厂闭源，小厂走开源道路，大厂的得益为 10，而小厂由于上文所述的模式也有生存的空间，得益为 3。

我们可以看到，选择开源对于小厂是一个严格上策，而选择闭源对于大厂来说也是一个严格上策，

均衡（闭源，开源）是一个子博弈完美纳什均衡。

事实上，现实中产业界情况就是如上述均衡所示，行业巨头对于开源生态兴趣寥寥，反而是乐于进行知识产权斗争，而由大量小企业组成的开源生态产业联盟正在形成，由学界和产业界合作的项目也有一些成果，比如由加州大学伯克利分校开发的 RISC-V 极其衍生出的 RocketChip, Chisel 等项目，这些项目目前在国内很受欢迎，同时国内也孵化出了如香山高性能处理器核项目等。不过，目前呈现的态势是“十八路诸侯讨董”，因此如果政府能够加以引导和支持，将会有更好的发展。

风云诡谲：国际视角下的中国芯片产业

芯片产业作为一个人才密集型产业，由于其步骤多，技术复杂，而且有成熟的分工体系，因此需要相当数量的相关人才。其中包括高级人才架构师等指定宏观方向，同时还需要相当规模规模的中层技术人员来提供技术支撑。如 NVIDIA 有 26000 余名员工，其中亚裔占 55.9% [4]，华为海思部门目前则有超过 7000 名全职研发人员。而培养这些人才的高校体系则需要更多的学术人才（如南京大学的计算机学院，电子科学与工程学院，集成电路学院，现代工程学院，物理学院，材料化学专业等，从事相关领域的教授有百余人）。目前国内芯片产业的最大问题就是人才的流失，大量留学生选择留在国外从业。在华外企在裁员时则会永久居留权掳走一批高级技术人才。

芯片作为极高附加值的产品，使得人才和其所带的技术因素超过产能、资本、人力、原材料等因素，成为了国际博弈的核心。下面我们分析留学人才和海外国家政策之间的博弈。同时作为行业领头羊的高新技术跨国企业，在博弈中也起到举足轻重的地位，下文也将分析这些企业和国家政策之间的博弈。

技术竞争，也是人才竞争

考虑如下留学人才和海外国家政策之间的博弈：

表 2. 留学人才和所在国家政策之间的博弈

	提供优惠政策	不提供优惠政策
合作（留在海外）	2, 2	-1, 3
不合作（回国）	3, -1	1, 0

⁸ 在我国，芯片领域巨头垄断的格局还没有形成，这是因为目前主要都是依赖海外架构。目前国内自研生态还在发展中，但这一问题已见雏形，几乎是几家大公司跑马圈地的格局。此类情形亦可参考相近的操作系统领域。近年来，华为依托庞大的市场占有率和爱国主义宣传，强行推广其鸿蒙操作系统生态，这种行为对于国内的产业界打击是严重的，将会导致“创新的垄断”。

首先对表格内容给出解释：

如果留学人才选择合作，其他国家政府选择提供优惠政策，则人才留在海外获得薪资，外国政府获得人才，双方的得益为 (2,2)。

如果留学人才不选择合作（即回国），而其他国家政府选择提供优惠政策，由于我国政府为了挣回人才，人才引进会有相当的补贴，所以人才的得益为 3，外国政府由于人才流失，得益为 -1，双方的得益为 (3,-1)。

如果留学人才选择合作，但外国政府不提供优惠政策或者（更糟糕的情况）承诺但不兑现，那么人才的得益为 -1，外国政府获得人才还减少了政策开支，得益为 3，双方的得益为 (-1,3)。

如果留学人才选择不合作（回国），外国政府不提供优惠政策，那么竞争性的优惠条件就会下降，海外人才的得益为 1，外国政府没有获得人才也没有支出，得益为 0，双方的得益为 (1,0)。

我们可以发现，这类似于一个最经典的囚徒困境，但现实似乎并不是这个均衡所体现出的样子。那么问题出现在何处？

首先补充说明一些数值的设定：同时（不合作，不提供）还有另外一层意思。就是归国后的后续得益。目前来看，这个得益 1 是低于（合作，提供）的得益 2 的，这在多数留学人才眼中是正确的，因为海外有相对良好的科研环境，相对轻松的工作压力等等因素。另外，这个得益 1 也是低于（不合作，提供）的得益 3 的，这个 3 即上述所说的，为了争取海外人才我国政府及各地方政府提供的人才引进的一次性奖励。

问题的关键在于：现实中，这是一个重复博弈。我们可以假设这个博弈是以年为单位的重复博弈。以美国为例，由于现在中美关系的紧张，以及半导体领域的敏感程度，对于非最顶层留学人才来说⁹，一旦留学人才选择回国，那么他们将无法再次回到美国工作，甚至可能无法再拿到美国签证。也就是说美国政府声明采用冷酷策略（Grim Trigger），也就是说一旦人才选择不合作，后续美国政府都采用不提供。

我们考虑这个重复博弈，对于这些人才来讲，如

果一直留在海外，则其得益为：

$$V(\text{Coop, Grim}) = 2 + 2\delta + 2\delta^2 + 2\delta^3 + \dots = \frac{2}{1-\delta}$$

如果选择回国，其得益为：

$$V(\text{Defect, Grim}) = 3 + 1\delta + 1\delta^2 + 1\delta^3 + \dots = 3 + \frac{\delta}{1-\delta}$$

因此如果

$$\frac{2}{1-\delta} < 3 + \frac{\delta}{1-\delta}$$

$$\delta < \frac{1}{2}$$

则其有动力回国。

但是，这是一个单向信息不完全博弈。为什么人才会相信美国声明的策略？前提自然是一个相对稳定的国家的政府作为一个政治实体至少需要具有一定的政策连续性。首先是冷酷策略的后半段（即一不合，永不合）这在无数的实际例子中已经得到了验证。其次，对于前半段（即对方合则一直合）如果我们跳出单个人的视角，我们如果将政府与每个人的博弈都看作一次博弈的话。这就又是一个多次重复博弈。而对于华人技术人才群体来说，一旦有人拿到（合作，不提供）的结果，其他人都会受到其影响而人人自危，从而急剧降低其贴现率，这就导致后续很难达成（合作，提供）的结果¹⁰。这对于美国政府来说得益是降低的，其没有动机去这样做。因此从个人的视角上来说，美国声明的策略是可信的，也就是说，信息不完全博弈中个人对政府选择冷酷策略的预期 p 趋近于 1，因此我们就近似不需要考虑信息不完全的问题¹¹。

我国现有的招揽海外人才的主要方法就是利用他们的贴现率 δ ，比如说现有一些海外人才是由于需要回国结婚成家而伴侣不同意出国，有些人是父母行动不便需要回国赡养父母，有些人更加适应国内或者家乡的饮食和生活环境，或者有人认为一次性的海外人才奖励即可满足自己的边际需求。以上面的事件为例，如果其伴侣下达最后通牒，不选择回国成婚就劳燕分飞，如果父母年事已高，如果继

⁹ 这个“非最顶层”指的是除了头部公司的 CEO, CTO, 全球知名的科学家, 技术领袖等（他们的回旋余地往往更大, “皇帝的女儿不愁嫁”）的相对普通的企业界和工业界研究人员, 如大学教授, 企业某团队中层团队负责人等

¹⁰ 即作为一个整体来看, 也是采用的冷酷策略

¹¹ 但实际上, 由于美国的政党政治的不稳定因素, 对华人科学家的政治迫害, 以及对近年来大量印度裔涌入美国等诸多因素带来的不确定性, 这个 p 已经不再趋近于 1, 我们此处做简化处理。

续停留则子欲养而亲不待，这显然使得他们贴现率极低（“火燎眉毛，先顾眼前”），从而更加容易地选择（不合作，提供）的结果。

另外一种策略就是增大（不合作，提供）的人才获得的收益，也就是说如果提供给他们超过了他们自己认为自身整个学术生涯可能获得的全部得益的资源 and 机会，那么他们将有动力选择（不合作，提供）而回国发展。

但这些都是短期的策略，因为主动权并不掌握在自己的手中。一旦美国放宽一定的技术移民政策或者为技术人才提供特别的医疗保障等。也就是上述的得益（合作，提供）根据我们的上述公式，可以发现其对这个得益的改善是存在一个杠杆的。上述两种短期策略很容易被反制。

上述的第二种策略还有一个问题就是是不可拓展的，因为总量有限，发展空间和高待遇不能无限制的提高，不然会相互挤压从而造成分配不均衡，进一步损害了一直在国内发展的研究人员的利益和积极性。

另外，这种策略容易导致类似于“59岁现象”的情况，即相关人才在海外长期工作研究后积累到自己满意后，在职业生涯接近尾声或者是自己在海外的生存空间十分狭窄时候，再选择回国拿一份一次性的补贴和奖励¹²，这就导致引进的都是是一些老年研究者或者所谓“被淘汰”研究者，而非中青年研究者，这并不是我们所希望的。

因此，长期来看，向从根本上解决这个问题改善国内的科研环境，增加科研人员的福利，扩宽科研人才的上升通道。即将上述的（不合作，不提供）的人才得益1提高，一旦其 > 2 ，则可以完全打破原来的均衡，从而在人才竞争中占据主动权。从半导体领域来看，这条路径需要政府政策、大型企业、小型企业、高校、科研机构等相互协作，可以说是任重道远。

夹缝中的小国和跨国企业

在我国与美国的芯片竞争中，有几家企业一直处于舆论的风口浪尖上，包括荷兰的光刻机生产企业 ASML，美国的图形计算卡与人工智能加速器企业 NVIDIA 和中国台湾的企业台积电 TSMC。这些企业一方面在中国占有相当大的市场份额，另一

方面又受到美国政府各种形式的制约（如美-日-荷半导体协议 [5]，要求 TSMC 限制对华出口等）。NVIDIA 过去四个季度在华市场总额为 135 亿美元 [6]，TSMC 在中国大陆的市场份额更是高达接近 70% [7]，对于 ASML 即使被限制向中国出口高端光刻机产品，依然还有 30% - 40% 的市场份额 [8] 为何这些公司不惜损失中国市场也要遵守美国政府的禁令？

我们来结合一个具体的序贯博弈进行说明。

下面依然使用 Gambit 软件进行绘制，此时红色代表上述的跨国企业，蓝色代表美国政府。企业先选择是否听从美国政府的要求，然后美国政府再选择是否制裁该企业（如图 10）。该博弈的文件可以在此处下载 <https://jackcui.notion.site/silicon-chessboard> 其中的 Enter-State.gbt 即为这个博弈的文件。



图 10. 企业与美国政府的博弈

可以看到如果企业选择听从，美国政府选择不制裁的话，那么双方得益为（10，10）因为企业由于退出中国市场或者限制对华出口而减少了收益，所以得益从 15 降至 10，而美国政府由于成功限制了中国半导体产业，得益为 10。

如果企业选择反抗，美国政府却纵容的话，此时企业可以保持双方的市场，得益为 15，而美国政府由于没有成功制裁中国半导体产业，得益为 -10。

无论企业是否选择反抗，如果美国政府选择对其制裁，企业都将承担毁灭性的打击，得益为 -20，是不可承受的，我们分别加以说明。对于英伟达来说显而易见，因为其本身就为美国企业，受到美国政府的直接控制。对于台积电 TSMC 来说，其原材料严重依赖于美国进口（SUMCO 等公司），全年进口价值超过 7000 万美元的晶圆（具体见 TSMC2023 年年报第 55 页 [9]），一旦被制裁，其生产将受到严重影响。而对于 ASML 来说，其大量的技术和元件都进口自美国，并不具备自主知识产权，因此

12 无意冒犯，但是丘成桐，颜宁等都为类似情况。

一旦被制裁，甚至可能无法继续生产。美国政府制裁后，其与该企业的贸易肯定也会受到一定的影响，得益下降为5。

我们用逆向归纳法可以得出，最后的均衡就是（听从，不制裁）。从另外一个角度说就是，美国威胁“如果不听从对中国的制裁，就会制裁你”，这个威胁是一个可信的威胁，如下表。

表3. 企业与美国政府对华政策上的博弈

	(制裁, 制裁)	(制裁, 不制裁)	(不制裁, 制裁)	(不制裁, 不制裁)
听从	-20, 5	-20, 5	<u>10, 10</u>	<u>10, 10</u>
反抗	-20, 5	15, -10	-20, 5	15, -10

可以看到企业选择听从，美国政府（不制裁，制裁）是一个纳什均衡，这包含了一个可信的威胁，因为如果反抗之后不制裁的话，就会使美国政府得益为-10。

这样，我们就分析完了美国政府对于强迫跨国企业遵守其对华政策的博弈。

跳出芯片产业：如何局前落子？

综上所述，我国的芯片产业面对的是一个复杂的博弈。在国内，产业界和学术界、学校教育之间的博弈，以及国际上的人才政策之间的博弈，以及跨国企业和政府之间的博弈。我们可以看到，无论任何一个博弈，像达成帕累托最优的结果都是很难，尤其是在某一个博弈结果已经形成的情况下，要改变这个结果是非常困难的。

在19世纪80年代，日本的半导体技术一度达到了世界最先进水平，远超美国同类型的公司，但是由于美国强迫日本在1986年签署的《美日半导体协议》，使得日本半导体行业大幅度衰败，虽然今天仍有一席之地，但仍有很大差距。

我国由于在政治上、军事上、经济上都更加独立，因此在这场芯片的博弈中，我们有更多的主动权。但是我们依然感到处处掣肘，因为对方有明显的“先手优势”。目前的世界，芯片产业是一个增长点，博弈中的被动局面已经是一个既定事实。但是除了在芯片产业的困局中寻找出路，我们应该考虑，什么技术、产业是未来的增长点，如果我们能够提前布局，使得博弈按照自己制定的规则进行，我们将取得更大的优势。

局前落子，才能更加轻松。

Acknowledgements

感谢皮建才老师在本门课程中的指导和帮助！

注：由于全为英文文献，采用BibTex直接进行排版，故引用格式采用了BibTex英文格式。

References

1. U S Department of Commerce, Commerce Strengthens Export Controls to Restrict China's Capability to Produce Advanced Semiconductors for Military Applications; 2024. <https://www.bis.gov/press-release/commerce-strengthens-export-controls-restrict-china> accessed on 2024-12-14.
2. Project G, Gambit: The Package for Computation in Game Theory. GitHub; 2024. GitHub repository. <https://github.com/gambitproject/gambit>.
3. Strategyzer, ARM Business Model; 2023. <https://www.strategyzer.com/library/arm-business-model>, accessed: 2024-12-17.
4. Nvidia, Nvidia Share of Employees from 2020 to 2024, by Race/Ethnicity. Statista; 2024. <https://www.statista.com/statistics/1369578/nvidia-share-of-employees-by-race-ethnicity/>, accessed: December 16, 2024.
5. Allen GC, Benson E, Clues to the U.S.-Dutch-Japanese Semiconductor Export Controls Deal Are Hiding in Plain Sight; 2022. Accessed: 2024-12-17. <https://www.csis.org/analysis/clues-us-dutch-japanese-semiconductor-export-controls>.
6. Huang R, Lin L. Nvidia Probed in China Over Possible Antimonopoly

Violations. The Wall Street Journal 2024;<https://www.wsj.com/tech/china-nvidia-monopoly-probe-antitrust-da4f3d1f>, updated Dec. 9, 2024, 1:29 pm ET.

7. Chien-chung C, Huang F. TSMC market share up in Q3, leaves Samsung further behind: TrendForce. Focus Taiwan 2024 December;<https://focustaiwan.tw/business/202412070005>.
8. Despite U.S. Semiconductor Export Restrictions, ASML Reports Doubling of Revenue Share from China in 2023. TrendForce 2024 January;
9. Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited, TSMC 2023 Annual Report; 2023. https://investor.tsmc.com/sites/ir/annual-report/2023/2023%20Annual%20Report_E.pdf, page 55, Raw Material Suppliers.

