



英国科学与技术理事会

工程生物学：英国经济和国家目标的机遇

中国科学院上海营养与健康研究所
上海生命科学信息中心
上海市生物工程学会
2023年9月

英国科学与技术理事会

工程生物学：英国经济和国家目标的机遇

编者按：工程生物学将严格的工程原理应用于生物学，因而能够构建新的或重新设计的生物系统，这一变革性平台技术将为整个经济体提供创新解决方案，为现有产品提供了更可持续的途径，以及全新的生物产品和工艺，这些产品和工艺具有新的质量和能力，将颠覆整个行业。英国是工程生物学研究的全球领导者之一，但自 2016 年以来，英国工程生物学研发产出有所放缓，拨款规模也有所下降。因此，英国科学与技术理事会（Council for Science and Technology, CST）通过对学术界和工业界 40 多位专家的访谈，同时基于具体的案例研究（见附录），于 2023 年 5 月发布报告《工程生物学：英国经济和国家目标的机遇》（Engineering biology: opportunities for the UK economy and national goals），总结了英国工程生物学能力建设的机遇与挑战，重点关注将研究转化为经济和社会影响所需的条件和方向，并提出英国未来发展的相关建议。

1. 工程生物学的变革性影响

工程生物学可以为多个行业部门提供一系列复杂问题的突破性解决方案，例如，为应对食品、化学品、材料、水、能源、人类和动物健康，以及环境保护领域的社会挑战提供更具可持续性和资源效率的解决方案，包括无塑料的包装、改良的纤维、新的绿色燃料和拯救生命的新疗法等。其中，许多应用可以制造副产品、可再生资源，或与传统制造工艺相比产生更少的 CO₂。

工程生物学应用迭代的“设计-构建-测试-学习”循环原理（图 1），通过系统分析的学习，可以为后续几轮的设计提供重要信息。这个循环建立在一系列学科能力基础之上，例如，自动化分析和计量、人工智能（AI）、机器学习（ML）和建模等。重要的是，英国的企业可以随时获得这些基础能力的技能、设备和设施，使其能够利用工程生物学的潜力实现自身价值。

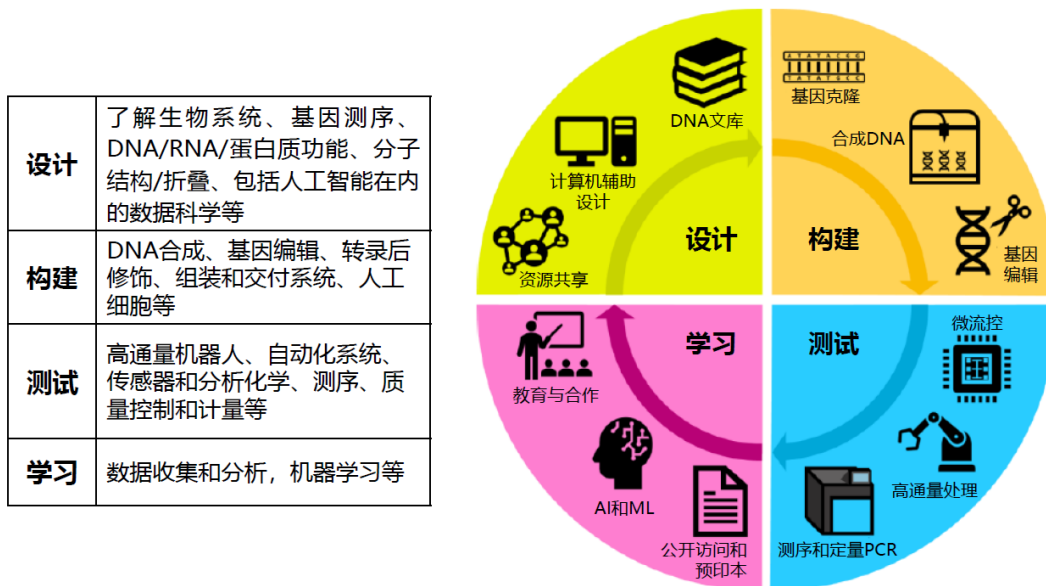


图 1 支撑工程生物学的关键能力（示例）

2. 工程生物学具有巨大的经济潜力

据麦肯锡全球研究院的报告估计，到 2030-2040 年，生物应用每年将对全球经济产生 2-4 万亿美元的直接影响，工程生物学的几个终端应用可能在未来 10-20 年实现商业化，并可能带来高达 4 万亿美元的综合影响。尽管工程生物学在医药健康领域的潜力得到广泛认可（例如在个性化医疗中），但其他各种应用可能会对对社会产生类似甚至更大的影响。据估计，全球经济多达 60%的实物投入可能来自生物系统和活体工厂。无论谁在这一领域发挥领导作用，都将站在整个社会转型变革的最前沿，并在安全、卫生和供应链方面拥有战略优势。

合成生物学商业化的主要领域之一是现代工业生物技术（即非医药健康与生命科学方面，包括化学品、添加剂和材料等的生物制造）。在英国，有 1,800 多家企业从事现代工业生物技术相关活动。这些企业已经雇用了 14,000 名员工，创造了 37 亿英镑的收入，贡献了 12 亿英镑的总附加值。

跨部门采用工程生物学是实现净零目标的绿色途径。通过对微生物和植物代谢途径的工程学改造，可以利用废弃物或大气中的碳生产可再生产品和新型生物材料。这可能对生物燃料行业产生巨大影响。工程生物学为化石燃料提供了一种可行的替代品，并可以补充或改进传统的可再生燃料生产方式。新型材料有望通过减少与制造及生命周期相关的废弃物和 CO₂ 排放，改善产品功能，从而支持各

种行业实现更可持续的未来。工程生物学在食品领域也很重要。真菌和细菌等微生物的代谢重组将实现精确发酵，生产新型食品添加剂和其他替代蛋白质。类似的方法也可能在培育肉类行业发挥关键作用。此外，工程生物学是一种平台技术，有潜力扩展到当前生物经济边界之外的新领域。例如，DNA 数据存储或将应对全球存储需求的增长。

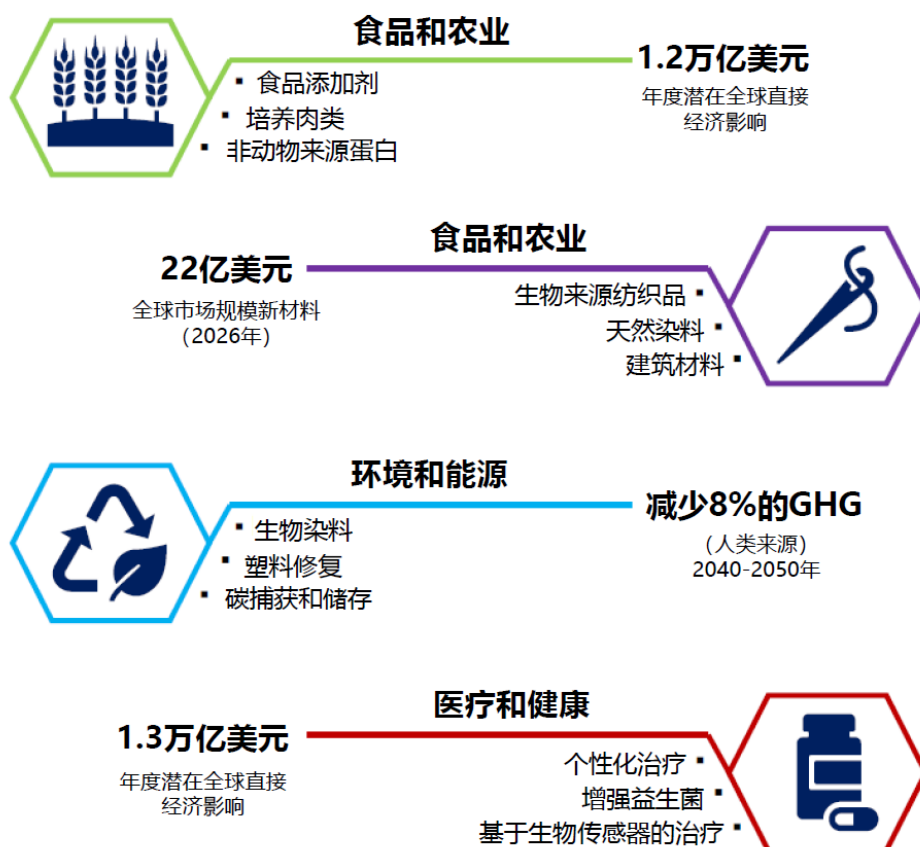


图 2 工程生物学的终端用途及其潜在全球经济和环境影响的示例

3. 英国工程生物学的研究与产业基础

3.1 工程生物学的研究基地

英国的合成生物学成长计划 (Synthetic Biology for Growth programme, SBfG) 作为合成生物学领导理事会 (现为工程生物学领导理事会) 建议的一部分，投资了 1.02 亿英镑，用于在英国各地创建 6 个多学科研究中心、铸造厂和培训项目。2010-2021 年，英国研究基地支持发表和产出了 9,000 多份工程生物学研究论文及 23,000 多项工程生物学相关专利¹。

¹ GO-Science TSI Science Power Index. 2022.11

英国政府在 2023 年科学与技术框架中，将工程生物学列为英国应重点关注的五项关键技术之一，以建立战略优势。出来，用于在现有基础上推动英国工程生物学的发展。

3.2 全球行业发展

英国在工程生物学研究的数量、能力和质量方面都处于全球领先地位，在全球有记录的拨款研究投资方面仅次于美国。除国家合成生物学产业转化中心（SynbiCITE）外，英国还有 6 个研究中心，在工程生物学基础能力方面有巨大优势。

国际的工程生物学企业主要位于美国、中国和欧洲，涉及核酸合成到生物来源纺织染料的开发等多个领域（图 3）。以色列和新加坡等国家的工程生物学也在得到各自政府的大力支持和投资后迅速发展起来。

作为工程生物学研究的全球领导者之一，英国的基础研究能力以及政府对行业的额外关注、指导和承诺，都可能是将英国的研究优势转化为成熟和成功的工业应用的关键，并在未来几年创造经济效益。

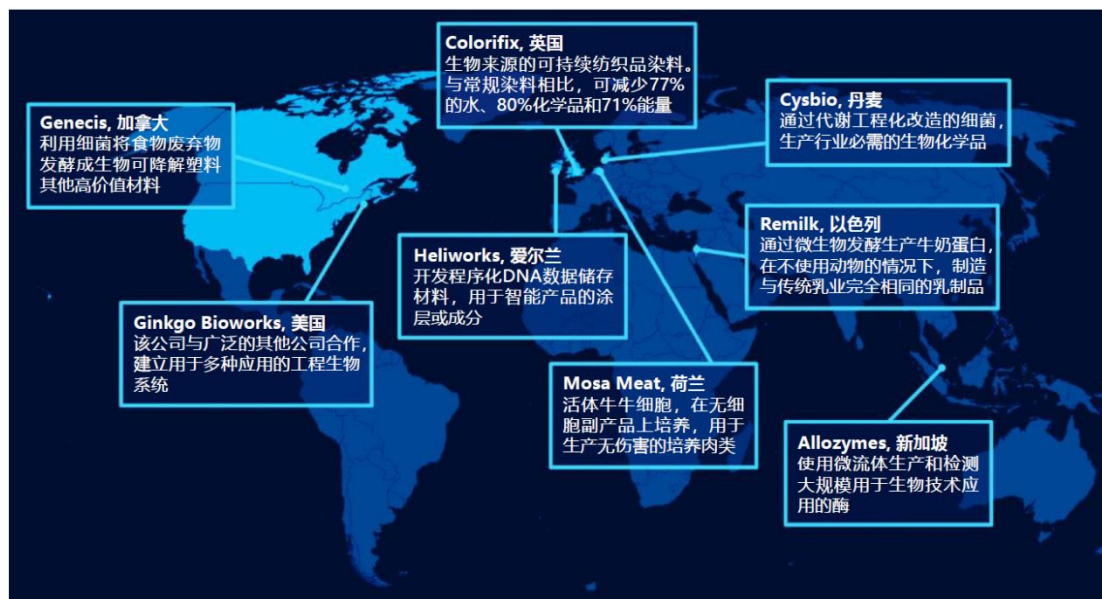


图 3 全球工程生物学领域企业的示例

4. 问题与建议

4.1 立即采取行动，巩固和扩大英国在基础能力方面的现有优势

英国国家工程生物学计划（NEBP）以及更广泛的公共部门对生命科学的投资，都有助于确保英国在工程生物学基础能力方面的广度和深度。英国许多有前

途的初创企业将工程生物学应用于健康以外的领域，包括材料和制造业、运输、农业食品、环境和废弃物处理等。为了保持竞争优势，英国需要持续投资开发，支撑产品设计的基本能力，并支持和部署商业流程的开发，建立获取互利能力的国际伙伴关系。此外，支持工程生物学应用的开发和实施不应以牺牲基础研究为代价，而应是基础研究的补充。

(1) 支持英国能力发展的阶跃式变革

工程生物学相关的基础能力在持续开发中，还有很多是未知的。例如，如何全面地编写 DNA 序列，以便在简单的细菌或酵母之外进行可预测的生物学工程改造；如何快速构建生物体 DNA，以及如何编写产生所需功能的 DNA 序列（可靠的可编程设计）。解决这些挑战将使生物学真正具有工程能力，从而推动工程生物学企业在不同行业和应用领域的创新和发展。

人类基因组计划完成 30 年后，英国将有机会成为下一场革命的核心，将 DNA 合成、DNA 组装和基因组合成的发展与人工智能相结合，以解决如何为生物体编写 DNA 序列，以及如何设计分子、组装和生物体，使其实现人们所需要和所期望它们完成的任务。这种技术的发展具有广泛的工业应用和经济增长潜力。

建议一：英国政府应与行业 and 公共部门资助者合作，建立编程生物学中心（centres for programming biology），同时成立跨学科的国家研究所，推进该领域研究及规模化应用。这些中心应形成具有以下功能的国家枢纽：

- 以英国的能力为基础，建立快速和具有成本效益的 DNA 合成能力
- 在微生物工厂、植物和动物中能够快速构建 DNA 基因组的可扩展的技术
- 基于知识和人工智能（AI）的预测和发现，包括哪些 DNA 序列使生物体具有所需的特性

该中心枢纽应与专注于技术转让、工业应用以及公司建立和发展等重点相联系。用户和技术开发中心之间的反馈将直接加速基础研究的进步和所需技能的集中开发。这些都应该建立在英国现有实验室的基础上。

(2) 建立复杂生物系统的标准化和测量能力

技术标准加速创新和产品商业化建立了一个共同的框架。标准化是生物技术成功整合产品和工艺开发的重要机制。

- 生物计量学和数据标准化的改进及其后续采用，有助于聚集创新群体，建立共同的语言并促进合作。这样不仅能支持基础领域的创新，还能将开发商业规模的工艺和产品的应用。
- 标准化的技术框架和测量复杂生物系统的能力，对于确保商业规模的工程生物输送系统和最终用途至关重要，能够将应用与现有解决方案进行比较，培养信任并吸引投资。
- 通过英国领导力实施计划，参与国际标准化可以保护英国消费者和企业的利益。

报告建议重点关注两个主要的使能领域：

①生物计量学：对生物过程和/或产品进行物理和数字表征的工具和方法。随着行业的扩大和多样化，制造商可以用共同的语言衡量、比较和改进工艺和产品。工程生物学中的计量标准是一项挑战，一部分原因在于生物工艺和终端产品的技术复杂性和多样性，其他还包括全新的生物/生物启发生产方法仍在开发中等原因。

②数据标准和共享：用于生物数据的格式化、语言和描述，包括这些数据的存储和管理。目前缺乏用于工程生物学应用的标准化数据格式。随着该行业开始更大规模地采用人工智能（AI）和机器学习（ML），最终可能会带来挑战。数据标准化对于新生物产品和工艺的设计及工程化、支持知识共享，以及在工艺和产品设计中使用基于数据的分析与设计工具（包括 AI 和 ML）都至关重要。通过支持产品数据标准和设计开发、实施、测试，适当部署相关实践，英国有机会在数字设计领域保持领先地位。

建议二：英国政府应致力于成为测量复杂生物系统的世界领导者。科学、创新和技术部（DSIT）应组织相关国家标准机构，成立生物领域测量标准和计量委员会。

英国应建立一个工程生物学标准化的国家联盟，成员包括英国标准协会（BSI）、国家物理实验室、LGC 和国家生物标准与控制研究所（NIBSC）。英国还应支持发展国际伙伴关系（例如与美国国家标准与技术研究院），制定主导国际行业的标准。目标是制定以英国为中心的生物制造标准和计量路线图，重点支持初创企业、中小企业和行业需求。这一能力将支持工程生物学应用的商业化，

支持英国在生命科学领域的商业创新，也将成为国际合作的重点。

4.2 展示领导力，确定目标并采取战略行动

英国政府的《生命科学愿景》概述了该行业为医疗健康领域提供的服务。需要制定工程生物学战略，鼓励应用型的研发，支持新业务的发展。从更清洁、更环保的行业和更可持续的燃料到全新的产品和服务，工程生物学应用与许多政府部门的政策目标相关。虽然政府也在开展相关工作，但缺乏明确的战略、支持和协调行动。

工程生物学正处于技术商业化和规模化的关键转折点。为了抓住工程生物学带来的机遇，政府需要一个明确、长期的战略以持续支持该领域的发展，为企业和投资者树立信心的同时积极参与国际合作。因此，英国需要大幅扩展现有的基础设施、技能和商业融资的可用性，重点是提高技术和制造水平。以往项目的经验表明，每投资 1 英镑用于制造业研究，英国经济就会获得 63 英镑的回报。

建议三：科学、创新和技术部应牵头制定跨政府的工程生物学战略，用于传达政府长期支持和提升英国能力的前景和决心，并利用工程生物学解决英国的国家目标和挑战。

这一战略可为支持研究、商业增长和激励私营部门的投资提供重点和方向，是迫切需要的。政府支持战略的关键要素应包括：

- 支持合作——工程生物学是高度跨学科领域。扩大应用程序的规模将涉及会聚广泛的学科、解决复杂问题的挑战。生物制造的创新需要工艺工程、新型工程技术、人工智能的同步发展，以及材料、原料和生物工艺中的创新研发应用。
- 基础设施——工程生物学相关测试、实验和规模化创新都需要基础设施，包括大规模科学设备、专业试验台以及相应的测量与测试能力。这些设施的使用成本是中小企业面临的主要障碍。应该创建一个由最先进、面向行业的创新中心组成的分布式网络，提供企业可以访问并负担得起的基础设施、工艺开发和技能，从而将有前景的应用推向市场。
- 资金——英国研究与创新部和国防科学技术实验室拨款 2060 万英镑，通过国家工程生物学计划资助创新工程生物学项目。国家工程生物学计划明确关注应用研发、创新和商业化。英国国家量子技术计划（National

Quantum Technologies Programme) 的模式可以为推动工程生物学领域的创新提供参考。

- 获得融资——用于早期开发和扩大商业活动。工程生物学所需的物理设施和数字基础设施都是资本密集型的。需要时间来开发有市场的产品。相关企业的报告称，在接触投资者方面存在挑战，这些投资者应该能够理解技术的潜力，并愿意给企业一些时间来发展商业形式。
- 创新和商业增长的技能发展——英国工程生物学领域缺乏技工和博士级别的技术熟练人才，而该领域的跨学科性质又需要人才具有跨学科、跨层次的专业知识。目前，英国很少有以技术支持为中心的职业课程。因此，应该有联合企业与高等教育机构和继续教育机构的战略，培养具有新学科知识和技能的人才，并吸引海外人才。
- 任务和采购——支持有利于国家和公共服务的工程生物学的应用。为了发展长期支持和支撑商业创新所需的战略能力，政府部门需要与英国皇家研究院、工业界和学术界合作，确定英国生物制造能力需要支持或加强的领域。需要与政策目标相关的新兴解决方案提供稳定、长期的支持，例如早期可行性研究、工业阶段研究和实验开发资助。

为了制定和实施该战略，科学、创新和技术部应汇聚从事工程生物学工作的跨政府的利益相关者，与 UKRI 等资助机构合作，并与工业界和学术界建立正式的行业领导协调中心。该中心可以代表行业的多样性和英国的优势，探索并提高对当前和未来应用的认识，使政府了解这些应用的政策影响，并确定即将投入商业使用的特定应用程序，这些程序将受益于有针对性的、持续的任务主导支持。

4.3 支持和扩大基于工程生物学的解决方案

(1) 基础设施和扩大规模方面的差距

工程生物学的创新基础设施需求取决于预期应用及技术与制造准备水平。基于实验室研究的优势，英国生物铸造厂网络为研究的早期工业转化提供了重要的设施和专业性知识，也是标准化和国际参与的渠道。目前，英国的生物铸造厂侧重于高通量和小容量（最多几升）。在技术和经济可行性测试阶段，企业在利用试点规模（300-1,000 L）设施时面临一定的挑战。英国需要从测试到商业化阶段的试点设施，支持企业扩大创新。在制造业创新的后期阶段，工艺创新中心可以为

制造工艺的设计、开发、优化和演示提供支持，现阶段，英国中小企业使用这些设施的成本可能很高。此外，特定应用设施（代表商业生产环境）对于支持创新走向终端应用至关重要。例如，寻求开发新型蛋白质商业规模发酵的企业与生物燃料企业有着不同的设施需求，英国的相关企业正在使用欧洲大陆的扩大设施，并在那里投资建立业务。

工程生物学以健康为中心的应用得到了现有孵化器项目和基础设施的支持，例如位于伦弗鲁郡的医药制造创新中心。这些设施除了为制药提供特定资源，还为其扩大规模提供基础设施，例如，符合良好生产规范的设施，以及有针对性的培训和支持。工程生物学在其他领域的应用也需要在发展过程中得到类似的关注和支撑，特别是开始融入现有关键市场（如燃料）的阶段。

从长远来看，应该预见到英国工程生物学的愿景，对设施的需求可能会随着规模的连续性（即从台式到大型）大幅增加。

建议四：政府应与产业界和 UKRI 合作，建立多学科的生物制造创新中心，用于测试、扩大并实现工程生物学在材料和燃料等应用领域的商业化。

这样的中心应建在有相关产业基础的区域，并与具有相关能力、技术以及基础设施的高校建立联系。

生物制造创新中心需要专注支持工业主导的规模扩大，位于相关商业活动区域附近、连通性强的地区，并毗邻卓越的学术中心。这将有助于确保学术途径和行业之间的战略一致性。例如，苏格兰中部的蒂赛德、亨伯赛德、利物浦、曼彻斯特和格兰杰默斯等都有潜力建立这样的区域中心。

定期的行业需求分析将有助于确定何时是投资和建立中心的合适时机，尤其是当商业需求开始从英国现有基础设施中增长或多样化时。分析还应确定每个中心的规模、数量、位置和方向，以及适合特定工程生物学应用所需的任何潜在专业。这一过程将有助于为每个中心制定良好的长期商业计划，确保效率和生存力。

生物制造创新中心的未来职能应包括两个部分：

- ①为商业规模的活动提供负担得起且无障碍的专业设施：
 - 规模连续的可用基础设施，从试点（300-1,000 L）到工业（10,000-75,000 L）规模，支持中小企业的转型，并鼓励与更广泛的行业合作。
 - 一套互补的下游生物加工基础设施，包括过滤和离心系统等通用设备，

以及食品系统（如替代蛋白质）等专业设备，具体基础设施由用户需求分析结果确定。

- 除下游设施外，中心还应有生物铸造厂形式的上游设施，包括用于生物工程、原型设计和规模前研发的集成自动化和分析设施。
- 中心的重要职能是汇集和整合技术，可以成为同时制造材料、化学品和能源的载体。
- 中小企业入驻中心可获得相关补贴。

②支持相关业务所需实践技能的发展：

- 中心应鼓励建立与新兴工程生物学业务相关的技能和人才管道，重点培养生物加工、生物工程和工艺工程领域的技术技能，包括 AI 和 ML，补充英国现有的优势。
- 中心应与当地高校密切合作，支持以行业为重点从事工程生物学的资格培训。先进制造业研究中心（AMRC）设有学徒（apprenticeships）形式的培训，包括先进设施的专门培训中心，以及未来的行业雇主直接资助的学生培训等。类似的方法将有利于拟建的生物制造创新中心的运行。
- 中心应支持企业制定财务上可行的商业计划，使其能够发展、扩大规模并商业化。中心可以吸引投资，探索特定应用领域的投资机会。

（2）消除障碍以扩大规模

以系统的角度看待商业活动扩大的供应链问题。工程生物学应用有可能扰乱整个经济的供应链，产生需要解决的风险和可以利用的机遇。健全供应链的发展对于英国在这些领域的领先地位至关重要。对支持英国国内供应链的能力进行战略投资也可以防止未来供应链出现问题。例如：

- 核酸合成——工程生物学应用的大规模商业化将依赖英国发展其核酸合成能力，或确保国际合作伙伴能够大规模、低成本地进行核酸合成。如果供应链（设备和试剂）已经建立，但其总部不在英国，就容易受到供应链的影响，如运输延迟和资源短缺。增强大规模、更复杂 DNA 合成能力将是研究和技术进步的主要推动力。目前有一些企业正在寻求新的方法（主要是酶合成），但仅少数相关企业在英国有业务。
- 新制造工艺的原料——工业生物技术需要制造原料。其他行业的废弃物

可能是潜在资源，这将使这些废弃物成为生物制造工艺中的重要因素之一。政府需要确保这些废弃物的可用性和一致性。

建议五：科学、创新和技术部应与政府和工程生物学界的政策团队合作，评估未来工程生物学关键需求的不确定性，探索英国供应链未来变化的情景，并确定政策和监管的影响。例如，负担得起、快速、长序列核酸合成能力的可及性，可能是英国未来生物制造的关键推动力，是英国工程生物学长期战略的关键部分，因此，重点应该放在培育和支撑合成能力的技术上，而不是支持某个公司或产品。

调整工程生物学应用的监管体系。需要为新兴应用程序提供更清晰的框架，以及明确当前法规面临的挑战：

- 潜在应用的广度意味着一些生物产品或工艺可能跨越几个监管机构的职权范围。驾驭如此复杂的监管环境可能很困难，也增加了企业的时间和资源成本。
- 工程生物学是不断创新和数字化的过程。知识产权和所有权是研究设计阶段的重要因素。对广泛的国际框架（如关于遗传资源的名古屋议定书）的解释可能对研究人员和小企业的管理具有挑战性。
- 监管原则也存在一些不确定性。《遗传技术（精准育种）法案》（Genetic Technology (Precision Breeding) Bill）是一个值得参考的立法改革案例，该法案根据产品的最终特征和功能对产品进行监管，而不是根据生产工艺进行监管。监管还必须考虑消费者对产品透明度的权利，需要明确界定企业和终端消费者的责任。

监管机构需要能够获得、分享和发展新应用的技能和知识，从而预测其行业的影响。英国需要更明确的工程生物学应用框架和监管立场，从而促进负责任的研究，支持行业创新并激发公众对这些实践的信心。

建议六：科学、创新和技术部和科技战略办公室（OSTS）应与监管地平线委员会（RHC）合作，建立“监管观察站”，为各行业的监管机构汇集工程生物学应用的见解，并就支持行业发展、消费者参与提供改进建议。具体职能应包括：

- 关键监管机构积极主动地发展技能和知识，包括针对新兴应用搭建学术界和产业界之间的沟通桥梁。
- 协调监管机构之间的地平线扫描活动，以确定新出现的终端应用及其影

响，并与监管机构共同更新这些信息。随着商业应用的发展，监管沙盒方法（**sandbox approach**）可能有助于探索特定行业的创新解决方案。

- 与生物技术初创企业和中小企业进行对话，指导企业通过适当的监管程序和要求，重点是有前景的应用能付诸实践，并建立一种基于证据的有效性和安全性证明的实践。
- 设立监管协调中心与其他国家进行交流。

刘晓 张学博 编译自 CST

附录：案例研究

A：案例研究——新型可持续燃料

(1) 背景

液体燃料对包括运输、国防、农业和家庭供暖在内的一系列应用都至关重要。2020 年，运输部门在英国国内温室气体中所占份额最大（24%）。英国石油工业联盟估计，英国每年约使用 460 亿升道路运输燃料和 140 亿升航空燃料。

英国承诺到 2050 年实现净零排放。英国运输业正在进行脱碳工作，但由于化石燃料成本相对较低，对运输服务以及电气化的次级行业（包括航空和航运）的需求不断增加，使得脱碳工作具有挑战性。英国的运输业脱碳战略和零排放战略认识到更清洁的低碳燃料在减少排放方面的作用。在全球范围内，对可持续的碳氢化合物燃料的需求可能会持续相当长的时间，对于那些正在努力实现净零排放的国家，向电动化和氢气等替代品的过渡也可能比预期的时间更长。

(2) 机遇

与工程生物学的其他应用领域（如制药）相比，燃料历来是价值相对较低但产量较大的一类商品。可持续燃料有巨大的潜在市场，就可持续航空燃料而言，预计到 2030 年，全球市场将从 2021 年的 2.16 亿美元增至约 150 亿美元；另一项分析预测，到 2030 年，更广泛的可再生燃料市场将达到约 1.7 万亿美元。长远来看，正在探索一系列能源替代品，包括氢的使用，可能会影响总体市场份额，但还要取决于这些技术何时以及在多大程度上渗透到市场。

除了环境效益外，利用工程生物学生产可持续燃料的潜在优势还包括：

- 合成高度特异性的碳氢混合物，优化当前基础设施兼容的能量密度（减少燃料）
- 减少杂质，从而延长发动机寿命并降低维护成本
- 减少对精炼/加工的需求，提高制造业的生产力
- 减少废气中的颗粒物/污染物，改善空气质量
- 产生高效的副产品

如果能够达到关键价格点，可持续燃料（利用现有基础设施但实现净零碳排放）将比需要新基础设施的燃料更加具有经济和市场效益。

(3) 工作原理

生物质燃料。工程生物学为植物生物质提供了提高生产力的途径（例如，通过直接基因修饰或对土壤微生物群的工程化促进降解或生长，进而增加脂质/能量），以及通过工程化的藻类、细菌和酵母可以直接生产燃料或前体的全新途径。

废弃物转化为燃料。工业过程产生的废气以及固体和液体废弃物（如食物垃圾或食用油）可以通过微生物处理，产生有价值的化学品、氢气和液体燃料/前体。英国各地已经部署了仅通过热和化学反应将废弃物转化为燃料的路线。工程微生物可以将其他困难和多样化的废弃物流加工成液体燃料，并进行优化以产生有价值/特定的副产品。这项技术可以在废弃物产生地部署，从而增加废弃物回收利用并创造新的收入。

动力到燃料。可再生能源是通过电解（将水分解为氧气和氢气）产生氢气，随后与 CO₂ 反应产生液态碳氢化合物，并进一步加工成燃料（e-fuels）。微生物的精密工程可以优化 CO₂ 和氢气在燃料中的反应，最大限度地减少进一步加工。欧盟地平线 2020 资助了多个项目（例如 eForFue 和 Bactofuel），英国的企业（C3 Biotechnologies）和高校（兰卡斯特大学、帝国理工学院）都参与其中。

（4）挑战

① 经济可行性

每种燃料都必须在性能、便利性和价格上有竞争优势。脱碳战略可以提高可持续替代燃料的经济可行性（例如，通过提高原油生产的喷气燃料成本），但支持这些的确切技术、基础设施以及经济、环境和监管环境尚不清楚，可能是针对特定行业的。经济可行性的窗口也可能随着其他能源和燃料（例如氢气）的发展而受到限制。

② 技术准备

许多可持续燃料技术已经商业化。然而，工程生物学在新型燃料中的应用通常处于较低的技术准备水平（TRL），尚未得到大规模证明。这些技术需要时间和资源来开发，虽然可能有多种途径，但尚未得到充分探索（例如，通过土壤微生物组优化植物生物量生长）。

藻类生物燃料等低 TRL 路线还需要进一步了解最佳生物骨架（物种/菌株），如何通过基因编辑和工艺管理实现最佳生长/特性，如何有效设计副产品途径从而提高收入潜力，以及如何通过减少能源和淡水需求来提高可持续性。此外，还

需要开发具有更大能量密度、更高分子量产品的途径。

③ 大规模生产

燃料需要大规模生产。技术通常可以在实验室进行演示，但很难找到足够的资金或设施来进行更大规模的演示。已经有基础的路线可能更具可扩展性，例如已经建立的生产生物乙醇的路线，可以在短期内通过工程生物学得到加强。

④ 生物质的可用性和生物安全

在英国，获得生物质和废弃物的机会有限。温带地区的光合生物质（如植物、藻类）生长的环境条件可能更好。英国可以开发创新的农业或种植技术（如垂直农业、海水养殖、大型藻类海洋养殖），但成本、可持续性和效率应是优先考虑因素。任何利用土地种植作物或其他生物质生产燃料的做法都必须考虑粮食安全。

考虑到封闭式光生物反应器的成本和能源需求，藻类生物燃料生产可能仅限于在开放水域使用，但这种做法存在生物安全风险，更广泛地在开放系统中种植转基因生物用于燃料或其他应用也存在这种风险。

B: 案例研究——材料

(1) 背景

工程生物学可用于生产具有新特性的“生物材料”。通过减少与制造业相关的废弃物和 CO₂ 排放，以及改善产品功能，这些新材料有可能支持各种行业实现更可持续的未来。新材料的广泛采用需要对基础设施进行大量投资，使中小企业能够扩大规模并提高产品制造的经济可行性。

(2) 机遇

已有多种生物材料被开发并用于制造更具弹性、柔性和可生物降解的产品，多个产品在行业中取得了早期成功，并正在商业化进程中。然而，尽管英国在开发新材料方面有强大的研究基础，但大部分转化都发生在国外，例如，BoltThreads（美国）、Spiber（日本）和 AMSilk（德国）。

英国纺织业目前为英国经济创造了 200 亿英镑的收入；英国最大的创意产业时尚界价值 260 亿英镑，并提供了 80 多万个就业岗位。生物材料为经济增长提供了获得战略优势的机会，预计到 2026 年，生物纺织品市场价值将达到 22 亿美元。但英国纺织业污染严重，每年产生约 12 亿吨 CO₂ 当量（CO₂e）。利用工程

生物学可以开发新型合成材料和可持续染料，提高工业资源效率、减少碳排放和减少化学品使用。例如，Modern Synthesis 利用微生物纺织技术编织开发新型纺织品，用于制造高强度的、可生物降解的材料；Colorifix 通过基因工程细菌对织物进行染色，将传统棉花染色步骤的耗水量减少了 48%。

在建筑行业，生物材料可以减少相关开支、燃料需求、碳足迹并提高产品效率。HBBE 生产的菌丝体是一种自我生长的低成本生物材料，可以制造成廉价的绝缘替代品。《2021 年工业脱碳战略》概述了英国政府如何开展建筑业脱碳，以实现未来十年的排放目标。生物材料的使用将有助于支持这一目标。

利用细菌生产的新型肽基材料可以作为粘合剂用于医疗和国防工业。这项技术的先驱 Zentraxa 正在合成肽市场建立新的利基市场，预计到 2023 年，该市场的价值将超过 4.25 亿美元。

（3）挑战

① 基础设施

英国缺乏从小型扩展到中型以及确保大规模投资所需的基础设施，这也阻碍了企业扩大生产流程以及产品的商业化进程。

② 经济活力

将生物材料用于制造的挑战之一是与生物基产品绿色溢价相关的成本增加，这些高昂的成本使新兴生物材料越来越难以打入市场。对于技术准备水平较低的材料制造新领域，通常很难获得研究资金，需要制定法规来激励和降低销售产品的风险。

C：案例研究：替代蛋白质

（1）背景

优化新型替代蛋白质来源（如豌豆和大豆蛋白质）或创造额外来源的工程生物学技术可以从根本上改变食品系统，有助于满足蛋白质需求，并增加英国的食品供应的弹性。替代蛋白质领域目前主要是生物质发酵主导的肉类替代品，如源自真菌分枝杆菌蛋白的 Quorn。然而，基因工程生物（微生物、植物或动物）可以提供更多的创新，包括：

- 新的生物质发酵方法

- 精密发酵产品（例如，使用微生物生产高质量添加剂）
- 设计作为肉类的植物替代品的优化作物
- 优化养殖肉制品的牲畜细胞/组织来源

英国政府表示，希望“通过支持替代蛋白质研究和创新，保持在这个不断增长和创新行业的前沿”。尽管英国政府已承诺在食品系统创新方面投资超过 1.2 亿英镑，其中包括替代蛋白质来源，但一些专家认为，荷兰、新加坡和以色列已经领先英国。

（2）机遇

英国食品标准局预计：“到 2025 年，植物蛋白和微生物蛋白的价格可能与肉类持平；到 2035 年，养殖肉的价格将与动物肉持平”。

新型蛋白质研究领域具有高度的跨学科性，英国在几乎所有相关领域（包括微生物学、生物工程、再生医学、作物科学、发育生物学和食品制造）都具有核心优势，这也将有助于英国在替代蛋白质方面处于全球领先地位。然而，将这些专业知识融合是释放这种潜力的基础。

（3）工程生物学途径

英国近期批准的在食品来源中使用基因编辑的立法可能会促进发酵工艺的发展，这不仅可以腾出更多食物来源供人类直接食用（如糖、水），还可以对废弃材料（如 CO₂、食物垃圾）再利用从而减少食品工业对环境的影响。

工程生物学可以推动专门为新型蛋白质生产而设计的工程作物的发展。由于原始植物蛋白质来源的固有生物学特性，植物性肉类替代品通常难以摆脱异味，但这些特性可以通过对作物进行基因工程来减少或消除，进而创造更美味的终产品。

从长远来看，工程哺乳动物（或可能是昆虫）蛋白质来源或将开始进入市场。哺乳动物细胞系的基因编辑可能被用来精确地引导干细胞向传统肉类细胞类型的分化，创造非结构化（香肠、汉堡）和后结构化的（牛排、鱼片）培养肉类和海鲜产品。工程生物学还可以用于改变起始细胞群的特性，提高终产物的营养价值（例如，含有更高水平的 omega 3/6 或更低的胆固醇）。

（4）挑战

① 技术

英国目前在这一领域没有专门的培训计划、博士培训伙伴关系或科学家人才中心，这也带了巨大的技能与需求的差距，这导致该领域的许多专家出国寻找更好的机会，造成英国人才的流失。

② 基础设施

由于缺乏基础设施（如中试发酵设施），使得学术界如何与商业化道路联系起来成为了主要挑战，特别是在研究的早期阶段，同时也阻碍了技术从竞争前研究向初创企业的转化。

③ 公众认知

为了鼓励消费者接受工程蛋白质，必须解决公众对安全问题的担忧。这需要政府、资助者和学术界对产品安全、营养和标签开展公共教育，从而确保公共的接受度。

D: 案例研究：用于数据存储的工程生物学

(1) 背景

DNA 是编程生命的生物密码。最近 DNA 编码的数据包括莎士比亚全部作品和整个维基百科（总计 16 GB），这种合成 DNA 可以在低温下被封装并用于长期数据存储。

(2) 机遇

全球范围内生成的数据正在大幅增加（到 2025 年，预计每天将达到 463 EB），这也增加了对新的稳健存储方法的需求。归档存储占据了大部分新生成数据的存储需求。

目前，归档数据存储主要使用磁带，但磁带 10-15 年左右会降解，需要对数据进行定时的迁移。而 DNA 具有更高的数据密度，在低温下可以在更小的空间更少能量维持下存储数据。这使得 DNA 存储比传统方法更便宜，对环境的破坏更小。英国国家医疗服务体系（NHS）已经广泛应用传统的 DNA 测序设备，对新冠肺炎和人类基因组进行测序。尽管 DNA 测序相当便宜，但 DNA 合成技术（写入和编码 DNA 数据）的成本还是很高，这也是数据存储应用面临的挑战。

DNA 测序能力的创新（例如，Oxford Nanopore）将使 DNA 测序过程的通量更高、更便宜、更便携，从而提高技术采用的可及性和可负担性。英国初创企业

（如 Evonetix、Nuclera）也正在围绕新的可扩展 DNA 合成技术进行创新。

（3）挑战

① 读取反应时间

由于高“读取延迟”（read latency）（检索存储信息的延迟），DNA 存储目前仅被认为适用于档案存储。

② 并行技术

DNA 数据合成想要广泛应用，需要廉价、易于使用、高通量（可以快速存储和检索大量信息）并具有环境可持续性。这可能需要使用并行微流体系统，该系统仍在开发中，目前运行成本高昂。

DNA 数据存储的主要优点之一是其极高的数据密度。然而，许多数据存储场景并不需要这样做，因此，可以开发替代技术，如石英玻璃存储，与基于 DNA 的格式竞争档案存储。

③ 技能

采用生物技术方法对数据进行大规模编码，需要同时具备计算/数据科学和分子生物学技能的人才。这将涉及对现有劳动力的额外再培训，或新劳动力的培训/招聘。政府应制定更加全面的方式来培养具有 DNA 数据存储技能的人才。

E：英国现状：支撑工程生物学的能力

人们目前并不清楚如何用生物学的天然语言 DNA 进行更全面的编写。因此，需要学习如何快速构建生物体的 DNA，如何编写可产生任何所需功能的 DNA 序列。应对这些挑战将使生物学真正具有工程性，并支持跨行业的创新。

（1）设计

英国在 DNA 测序和基因组学方面拥有强大的研究基础，由威康桑格研究所和英国医学研究理事会（MRC）分子生物学实验室领导。英国还拥有欧洲生物信息学研究所，这是欧洲六大分子生物学实验室之一，也是世界基因组学科学和技术专业知识最集中的实验室之一。英国有提供高通量 DNA 测序技术的企业，例如 Oxford Nanopore。在全球范围内，英国在合成基因组学的出版物和投资活动领域排名第三，英国企业在全全球专利申请量排名第九。

英国还领导了许多重要的研究项目，用于提高对生物系统的理解，如达尔文

生命树项目，该项目探索生物学和进化，帮助保护并为医学和生物技术提供新的工具。由英国基因组学领导的十万基因组计划对大约 85,000 名受罕见病影响的患者的 100,000 个基因组进行测序，旨在了解基因在健康和疾病中的作用。

(2) 工程生物学的人工智能和机器学习

人工智能（AI）和机器学习（ML）方法可用于解决工程生物学系统的复杂性，提高问题解决的速度。AI 和 ML 技术可以通过自动化实验数据分析和优化计算机生物系统的设计来支持广泛的应用。DeepMind 于 2016 年推出了人工智能系统 AlphaFold，准确预测蛋白质的 3D 模型，利用人工智能加速该领域的研究。

2022 年 5 月，英国研究与创新署（UKRI）向帝国理工学院合成生物学中心提供了 150 万英镑的资金，并联合 7 家行业合作伙伴和 10 家学术机构，建立 AI-4-EB 联盟，旨在利用和结合人工智能和工程学的关键技术实现创新。

(3) 数据

使用 AI 和 ML 对计算机系统进行建模的核心挑战是数据的可用性、质量和一致性。FAIR（可查找、可访问、可互操作和可重复使用）和可追踪的数据是有效探索和利用机器学习所必需的。实验室内用于产生数据的硬件是多样化和分散的，这也是数据收集面临的挑战。此外，与其他学科相比，生命科学领域缺乏标准化的数据集。

(4) DNA 合成

DNA 合成是分子生物学中的一项必要技术，有着广泛的应用。DNA 合成中的一项创新是 DNA 折叠，折叠 DNA 在纳米尺度上产生 2D 和 3D 形状，可以用于构建纳米机器人，以及用于研究酶-底物相互作用和药物传送等。

英国在 DNA 合成方面处于世界领先水平，但 20 世纪 80 年代以来，这项工艺并没有显著进步。大多数 DNA 合成供应商不在英国，而是位于德国（Genart@Thermo Fisher）、美国（IDT integrated DNA technologies、TWIST Biosciences）和中国（赛百盛），并且这些供应链已经相对完善，英国应该致力于提升 DNA 合成能力，发展改进的 DNA 合成供应链，以防止出现供应短缺问题，同时还可以提高英国的研究能力。