

净零计算： 数字技术如何建立“保护地球的控制回路”

概要

数字技术可以通过在全球经济中实现减排并限制计算本身造成的排放，在向低碳世界的过渡中发挥重要作用*。特别是，现在有机会将政府、学术界、工业界和第三部门联合

起来，创建“行星数字孪生”或可操作的“保护地球的控制回路”。通过负责任地使用，这可以模拟、优化和转变经济活动，以最大限度地减少排放和最大限度地提高效率。

思路

- “净零计算”可以在全球、区域和国家净零战略中发挥重要作用。
- 数字技术部门的用电量和碳足迹，包括隐含排放，应与其获益成正比。
- 在数据标准、质量和监管方面加强全球协调将使相关数据能够被可靠地收集、共享和使用，为更好地量化温室气体排放以及减少温室气体排放的应用提供支持。
- 政府、学术界、工业界和第三部门之间的合作可以在城市、区域、国家以及最终的全球层面创建自然和经济系统的“数字孪生”，以最大限度地减少排放，为权衡提供信息并促进可持续发展。这种数字孪生还可以让政府探索“假设分析”情景和干预措施的影响。
- 全球协作对于为净零系统的计算和数据基础设施创建可信赖的治理框架至关重要。这包括检查此类系统的能力，获得排放报告透明度的支持；利益相关者参与到适用于所有人的应用中；以及关键数字基础设施的适应能力。
- 科技部门应以身作则，科技公司应公开报告其能源使用情况以及直接和间接排放量，并优化对可再生能源的使用。
- 使用由政府推动的免费或低成本技术组件的“数字共享”，这一过程可以得到经改进的全球研究和创新生态系统的支持。
- 广泛提供技术和数据将巩固全球覆盖，能力建设对于确保所有人步调一致至关重要。

*本简报基于皇家学会 (Royal Society) 的报告 *Digital technology and the planet: harnessing computing for net zero* (数字技术和地球：利用计算实现净零) (参见：<https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/digital-technology-and-the-planet/digital-technology-and-the-planet-report.pdf>，访问日期 2021 年 3 月 23 日)，以及来自国际专家的意见。

1. 背景

数字技术已彻底改变我们的生活和工作方式，如今，上网和使用手机人群超过世界人口的一半，预计到 2023 年这一比例将增长到三分之二¹。现代人工智能 (AI) 算法使计算机能够从大量数据中学习模式，帮助司机规划送货路线以及帮助医生诊断疾病。被称为“数字孪生”的实物资产模拟已经提高了工厂的生产力和效率。

在气候变化方面，数字技术部门一直是各种头条新闻的主题。随着互联网流量的快速增长，该行业的碳排放引起了人们的关注。从积极的方面来看，有一些支持减排的数字技术应用，例如 AI 整合物流路线以及避免空运货车。应对气候变化是一个需要系统方法的复杂问题。在超级计算机上运行的模拟地球自然系统的气候模型已经成为对气候变化不断加深理解的核心²。

人们越来越认识到数字技术在为应对气候变化的国际努力作出更大贡献方面的潜力。这要从“绿色计算”开始，即让该部门自身的足迹与其有用性成正比，然后是数字技术在支持和推动减排或“净零计算”方面可以做出更大的贡献。这将需要建立对系统的信心，即“可信赖的净零计算”；并支持所需的研究、开发和部署，即“净零计算创新”。

2. 绿色计算

数字技术部门的碳足迹应与其效益成正比。例如，截至 2021 年 3 月，加密货币比特币估计消耗约 80 - 100 太瓦时，这一数字相当于挪威整个国家的电量^{3,4}。世界各地的监管机构可以通过要求对数字活动进行环境影响分析来防止不成比例的能源使用，这是目前主要基础设施投资的常见做法。

构建新系统以优化排放将需要新的组件、传感器、网络、计算和存储设施，所有这些都会产生排放。然而，如果净影响是帮助将总排放量减少到净零，这将构成对数据和数字技术的成比例使用。行业主导的研究表明，雄心勃勃地在各个部门应用现有的数字技术⁵，可以帮助实现到 2030 年实现全球平均气温升幅远低于 2°C 所需的约三分之一的减排^{6,7}，这一预估值得进一步研究。

科技部门的碳足迹难以量化。估计占全球每年温室气体 (GHG) 排放量的 1.5% 至 6.0% 不等，具体取决于部门边界的定义方式^{8,9,10,11}。设备、网络和数据中心的排放来自制造和电力使用 — 用户设备在两者之间的分配大致相等¹⁰。

近期分析表明，尽管全球互联网流量年均增长 30%，计算能力大幅提升，但数据中心的能源需求在过去十年几乎没有增长¹²。这在很大程度上是由于计算效率和数据中心管理实践的改进。将任务和存储迁移到“云”计算是一种潜在的减排措施。需要提高排放数据的透明度，以充分评估获益^{13,14}。

随着越来越多的全球人口将连接到互联网，这会导致对科技部门需求的增长。进一步提高能源效率将很重要，而且需要研究和创新，例如降低算法和新硬件形式的能源需求的方法。全球向绿色能源的过渡也至关重要。

大型科技公司是可再生能源的主要用户（见专栏 1），可再生能源的使用可降低其数据中心的碳足迹。有些公司甚至开始使用智能计算平台，使它们能够安排能源密集型任务在可再生能源发电高峰期运行，这一发展有望最大限度地利用清洁能源^{15,16}。为了实现进度监控并保持信任，所有公司都应提供有关其可再生能源使用的透明细节。

专栏 1

大型科技公司承诺小碳排放足迹

由于科技企业现在是最重要的企业组成之一，它们对碳中和的承诺意义重大，根据承诺监测其绩效的措施也同样重要。Microsoft 计划到 2030 年实现碳负排放，到 2050 年消除公司从环境中排放的所有碳¹⁷。Apple 报告称，其在设施中使用了 100% 可再生能源，并制定了一项计划，使其供应商向可再生电力过渡，并在 2030 年之前实现其整个足迹的碳中和¹⁸。Google 声称在 2007 年实现了碳中和，其使用 100% 的可再生能源，并计划到 2030 年实现无碳排放¹⁹。Amazon 承诺到 2040 年实现气候中和，到 2025 年使用可再生能源为所有运营提供动力²⁰。然而，评估该部门实现这些目标的进展，将需要透明地获取有关其排放和能源使用的优质、可靠数据。

评估该部门在脱碳方面的进展需要访问有关其排放和能源使用的数据。

3. 净零计算

数字技术提供了支持更好连接系统以及产生优于其各部分总和的整体解决方案的工具。

3.1 数据和数字技术越来越多地应用于应对气候变化

除技术部门自身外，计算机越来越多地被用于一系列有助于减少排放的应用。

例如，准确的天气预报、来自本地和远程传感器（包括卫星）的数据以及为精准农业提供了工具的移动电话上的连接和接口。如果能够使用这些工具，世界各地的农民就可以就作物选择、灌溉、施肥和收获时间做出决定。可持续发展数据全球伙伴关系 (Global Partnership for Sustainable Development Data) 正在探究数字工具如何更广泛地支持可持续发展目标 (SDG)。其工作的一个示例是非洲区域数据立方体 (Africa Regional Data Cube)，它使用 17 年有价值的卫星图像来监测水域范围、土地利用和土地退化情况¹⁷。

在能源方面，现代 AI 方法可用于预测电力消耗需求的峰值，以及根据天气模式的准确预报来预测太阳能和风能发电的峰值¹⁸。

3.2 数字孪生可以支持地球的系统方法

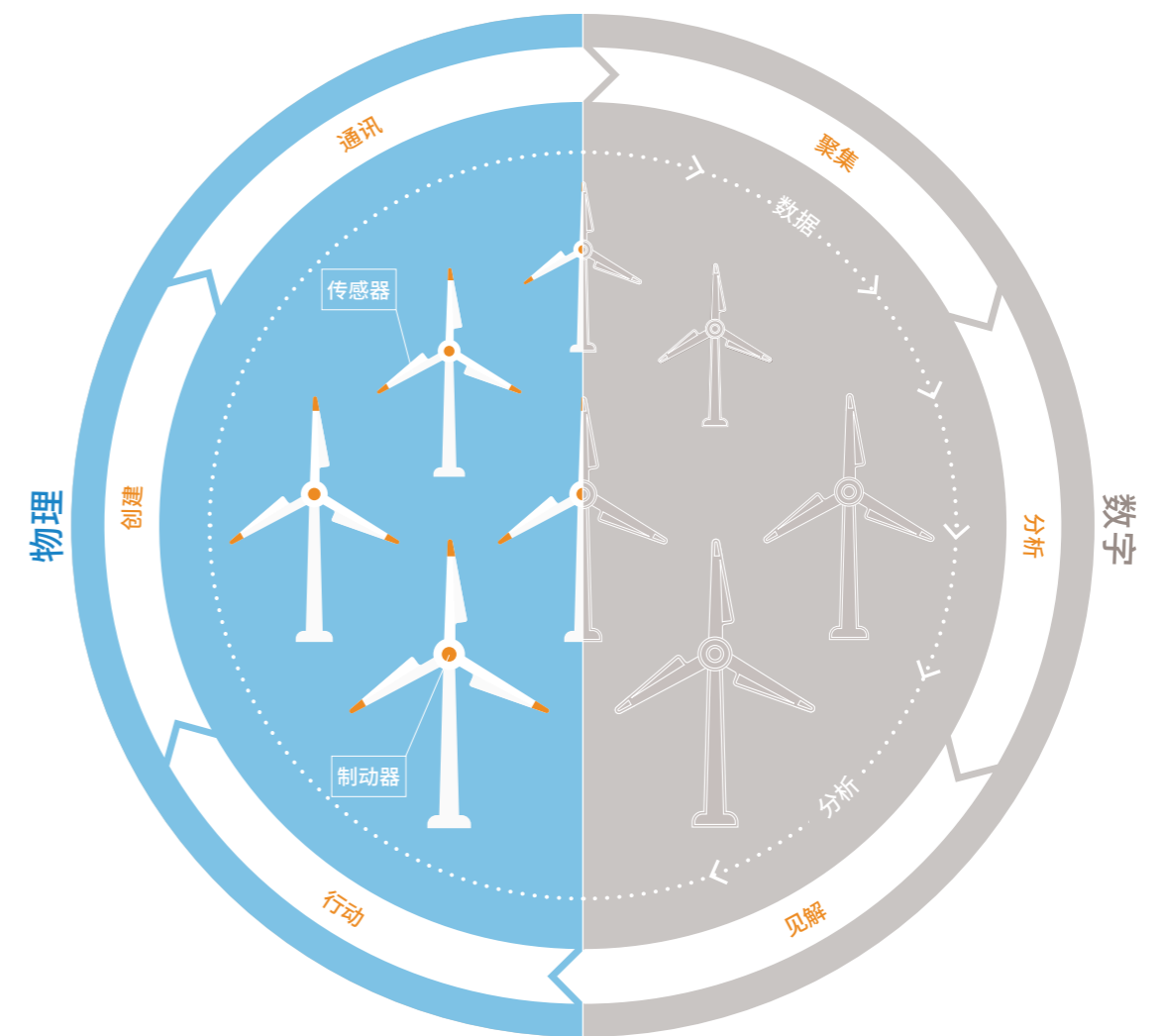
应对气候变化的主要挑战之一是地球系统之间存在相互依存关系，在追求不同的可持续发展目标方面存在协同效益和权衡取舍。数据和数字技术提供了支持更好连接系统以及产生优于其各部分总和的整体解决方案的工具。

提供自适应控制的系统已经在飞行中使用了几十年，其展示了为物理对象配备可以适应其行为的模型的优势。同样，“数字孪生”是对地球具有应用前景的数字能力之一¹⁹。在孪生中，会从一个过程的多个方面收集数据，通常来自传感器，并用于创建活动的计算机模拟。这种模拟可以帮助计算受限于给定目标和约束的最佳解决方案。然后可以使用该信息来控制实际操作。因此，创建一个可操作的“控制回路”，是将真实世界活动的数据馈送到模拟中，然后将模拟结果用于适应和改进现实世界的过程（见图 1）。

图 1

涡轮孪生

风电场正在成为数字孪生的试验台，因为运营商正在研究如何在每年增长约 20% 的部门中最大限度地提高效率⁴¹。例如，GE Renewable Energy 已经建立了几个数字孪生项目来展示如何使用该技术。风电场开始是模拟当地风力条件的计算机模型，并使工程师能够配置最有效的极高度、转子直径和涡轮机输出。一旦涡轮机开始旋转，每个涡轮机内的传感器就会监测从机舱偏航到发电机扭矩和叶尖速度的参数。数字孪生使用内置于其软件中的物理模型来处理数据、模拟选项并提出改进建议^{42, 43}。改进的维护意味着基础设施可以持续更长时间。



在访问创建保护地球的全面控制回路所需的数据方面存在巨大挑战。

数字孪生使建立反馈回路成为可能，以监测、了解、优化和减少许多部门的温室气体排放：

- 在电网中，数字孪生可以通过管理众多分散的能源（见图 1）并在需要时打开备用电源从而支持日益由可再生能源主导的电网。
- 在规划和开发中，孪生可以帮助定位资产。例如，Google 的 Sunroof²⁰ 项目使用 Google Earth 和机器学习提供免费的太阳能测绘，帮助指导安装太阳能电池板。
- 在城市中，数字孪生正在展示其在追求净零方面的价值，并作为国家和超国家数字孪生的试点。伦敦建筑存量模型 (London Building Stock Model) 等数字孪生模型可用于确定改进需求，同时考虑从建筑形式到居住者社会经济背景的一系列数据²¹。同样，已在新加坡、上海、北京、阿马拉瓦蒂（印度）和迪拜创建数字孪生，帮助改善城市设计和城市生活。一些国家/地区正在发展其数字孪生能力。英国的国家数字孪生 (National Digital Twin) 计划旨在改善基础设施的建设、运营和报废方式。
- 在运输方面，运输网络的虚拟副本可以让公共机构和车队运营商优化流量¹⁸。
- 在气候监测方面，结合卫星和地面观测的数字孪生可以在提供关于实际温室气体 (GHG) 排放的更准确的动态信息方面发挥越来越大的作用，而不再是从能源生产或消费中推断出来的信息。

在全球范围内，提供足够的协调，这样本地、国家和部门数字孪生便可以逐步集成到“行星数字孪生”或“保护地球的控制回路”中（见图 2）。这将有助于监测、模拟、理解、优化和转变经济活动，并补充模拟气候响应的模型。

此类举措已经初具规模。在过去的二十年里，数字地球的概念，“地球的多分辨率、三维表示”激发了支持全球可持续发展的研究和合作^{22, 23}。欧盟最近宣布将在 2030 年之前实施高精度地球数字模型 DestinE，以模拟人类和自然活动²⁴。到 2025 年，该平台可以集成 4-5 个数字孪生，帮助公共部门用户制定、监测和评估拟议环境和气候政策的影响。

大规模创建这样的数字生态系统是一项技术挑战，需要有效的架构和系统来管理接口²⁵。在数据访问方面，例如，虽然卫星正在创建丰富的数据流，但在访问创建保护地球的全面控制回路所需的数据方面仍存在巨大挑战。构建一个多部门的行星数字孪生还需要责任分担安排，以确保全球南北的所有国家/地区都能参与并受益。

3.3 净零数据基础设施

行星级的数字孪生需要来自各个经济部门的空前规模的数据，以优化减少排放的活动。提供此类数据的路线图可能包括以下初始步骤：

- **支持现有数据的更有效使用。**
在公共和独立机构的带领下，可以重新利用现有数据集，并使其更易于访问。国家统计局可以发挥主要作用。例如，坦桑尼亚国家统计局 (National Bureau of Statistics) 制定了关于电子垃圾²⁶和气候变化统计²⁷的报告。还需要能够访问对应对气候紧急情况有价值的专有数据（见专栏 2）²⁸。
- **说明进一步数据的需求。**
需要确定数据差距并设计流程来填补这些差距。汇总数据或代理数据可能足矣，而且需要依据情况分析新数据收集的获益和成本。生成可靠的合成数据可能是另一种选择。

- **结合多种数据源。**
需要通用标准才能合并数据。例如，卫星数据与地面测量相结合可以帮助跟踪发电厂或城市地区的排放。
- **构建现有数据基础设施的能力。**
全世界都需要高质量的存储库来复制数据存储的作用，例如英国气象局信息学实验室 (UK Met Office Informatics Lab) 或日本的空间天气预报中心 (Space Weather Forecast Center)。这样便可以探索不同形式的机构²⁹。
- **确保数据“就绪”至关重要^{30, 31}。**
鼓励使用机器学习可操作数据的 GO FAIR 倡议³²称，数据应该：可供人类和社区查找；可通过身份验证和授权等方式进行访问；能够与其他数据集集成以进行互操作；并且可以重复使用，或者能够在不同的设置中组合。

专栏 2

隔离期数据揭示净零挑战

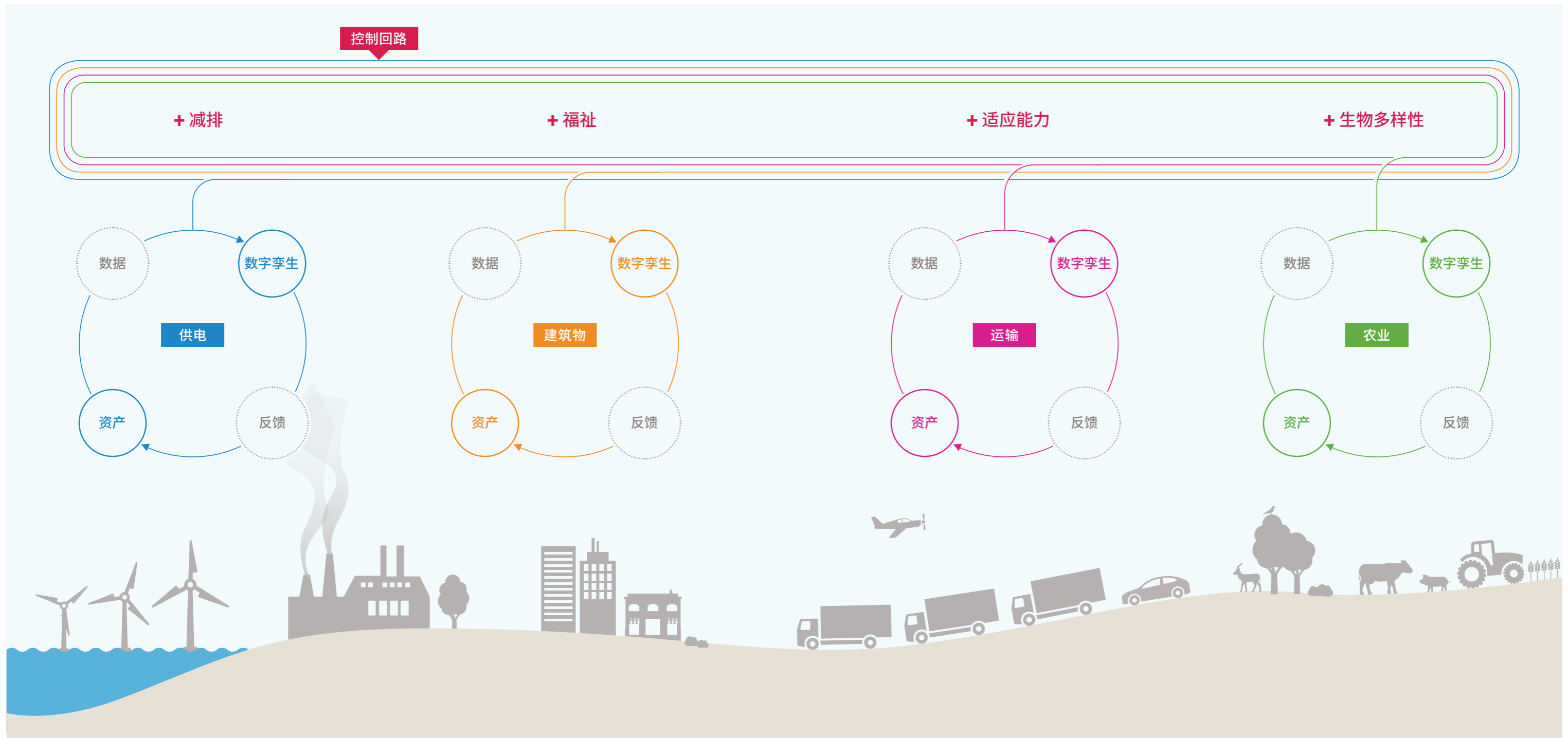
2020 年 COVID-19 大流行期间气候科学家提供了一个独特的机会，可以使用数据来证明实现净零所需努力的规模。结合与全球 97% 的碳排放相关的经济活动的实时数据，他们发现在施行大面积隔离的最初几周内，全国排放量平均减少了 26%。研究人员估计，全球排放量的总体年减少量可能为 4.2-7.5%，与未来三十年将全球平均气温上升限制在远

低于 2°C 所需的年增长率相当。该项目展示了通过使用多种公开数据来源可以实现的目标，从美国钢铁产量到中国煤炭产量和英国智能电表统计数据⁴⁴。然而，研究人员在识别和访问一些数据集方面同样面临挑战。未来这些数据类型可以更广泛地使用，为监测全球排放提供了新的机会。

图 2

保护地球的控制回路

可以创建物理资产的虚拟表示 — 数字孪生 — 来运行模拟并改进这些资产的规划和运营。通过互相关联以建立“保护地球的控制回路”，它们可以帮助找到应对气候变化、生物多样性丧失和其他 21 世纪挑战的全球解决方案。



4. 可信赖的净零计算

在收集数据用于净零计算时，必须考虑几个因素来建立信任：

- **适应能力和网络安全**

净零计算是关键基础设施的一部分，需要全面的网络安全以保持公信力。从一开始就需要构建互操作性、长使用期限和安全性。互联网已经证明了冗余对于适应能力的重要性，即有多种选择可以避免对单一路由或集线器的依赖。

- **参与**

在各种情况下，数字技术可能会引起公众对隐私的担忧。这是 AI 全球伙伴关系正在攻克的工作主题³³。由于数据的战略价值，它也可能具有敏感性，因此需要制定足够的技术和法律保障措施，以及行为准则³⁴等治理安排。让所有利益相关者参与净零系统计算以及相关政策的设计，将有助于建立所需的信任³⁵。

- **主张**

人们应该能够质疑数字系统的输出，例如通过查询数据日志。“可解释性”在多个层面都很重要，无论是在验证结果、满足监管标准还是防止偏见方面³⁶。

5. 净零计算的创新

创建行星数字孪生是一项雄心勃勃的全球研究和创新任务。要想获得快速进展，需要政府、学术界、工业界、公共部门和民间社会的共同努力 — 提供资金、数据、技能和计算设施。

政府可以利用其采购权委托技术人员创建组件的“逻辑基础设施”，以创建多个应用程序。该基础设施将包括一个“数字公地”，其中包含可供开发人员免费或以低成本使用的构建块。财务激励措施，例如用户使用费，可以鼓励创新者开发解决方案。可以试用实验方案，而之后成功的方案将逐步扩大。

可以通过政府、技术公司、更广泛的行业、小型创新企业以及学术界和研究所的研究人员之间的合作形成的社区利益实验室网络来促成这样一个平台。应该鼓励这样的社区发展自己的文化和使命，独立于支持它的国家/地区和公司确立自己的章程和法律地位。可以设定基于挑战的资金和宏伟的目标，以激励突破性创新并吸引人才进入公共部门研究计划。

现在有机会迈出第一步，建立这样一个国际研究和创新生态系统，作为更广泛计划的一部分，为保护地球创建一个可信赖的控制回路。

要想获得快速进展，需要政府、学术界、工业界、公共部门和民间社会的共同努力 — 提供资金、数据、技能和计算设施。

本简报只是探讨科学技术在全球实现净零排放和适应气候变化中作用的系列简报中的一篇。世界各国都在制定各自在 2050 年之前实现净零的路线图，该系列简报旨在就科学所能有助于理解和采取行动的 12 个方面，为各国决策者献计献策。

要观看完整系列内容，请访问 royalsociety.org/climate-science-solutions

要查看简报编著人，请访问 royalsociety.org/climate-solutions-contributors

本文中的文本根据《创作共用署名许可协议》(Creative Commons Attribution License) 条款授权使用，该协议允许在注明原作者和出处来源的前提下，进行无限制使用。许可协议访问网址：creativecommons.org/licenses/by/4.0

发布日期：2021 年 6 月 DES7639_2 © The Royal Society

参考文献

1. Cisco. 2020 *Cisco Annual Internet Report (2018 – 2023)*. 参见: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf> (访问日期 2021年3月23日)。
2. 参见简报 1: *新一代气候模型*。
3. De Vries A. 2021 *Bitcoin boom: what rising prices mean for the network's energy consumption*. *Joule*, 5:509-13. (doi:10.1016/j.joule.2021.02.006)
4. Cambridge Centre for Alternative Finance. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index. 参见: <https://www.cbeci.org> (访问日期 2021年3月23日)
5. Falk J *et al.* 2020 Exponential Roadmap 1.5.1, Scaling 36 solutions to halve emissions by 2030. Future Earth. 参见 <https://exponentialroadmap.org> (访问日期 2021年3月23日)。
6. GeSI and Accenture. 2015 #SMARTer2030, ICT solutions for 21st Century Challenges. 参见: https://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf (访问日期 2021年3月23日)。
7. United Nations Environment Programme. 2020 *Emissions Gap Report 2020*. 参见 <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020> (访问日期 2021年3月23日)
8. Andrae ASG and Edler T. 2015 *On global electricity usage of communication technology: trends to 2030*. *Challenges*, 6:117-157. (doi:10.3390/challe6010117)
9. Andrae ASG. 2020 New perspectives on internet electricity use in 2030. *Eng. Appl. Sci. Lett.* 3:19-31. 参见: <https://pisrt.org/psrpress/j/easl/2020/2/3/new-perspectives-on-internet-electricity-use-in-2030.pdf> (访问日期 2021年3月23日)。
10. Malmodin J, Lunden D. 2018 The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10: 3027. (doi:10.3390/su10093027)
11. Freitag C *et al.* 2021 The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations. 参见: <https://export.arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2102/2102.02622.pdf> (访问日期 2021年5月11日)。
12. International Energy Agency. 2020 Data Centre and Data Transmission Networks. 参见: <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks#recommended-actions> (访问日期 2021年3月23日)。
13. Accenture. 2020 The green behind the cloud. 参见: https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-135/Accenture-Strategy-Green-Behind-Cloud-POV.pdf (访问日期 2021年3月23日)。
14. Mytton D. 2020. Hiding greenhouse gas emissions in the cloud. *Nat. Clim. Chang.*, 10:701.(doi:10.1038/s41558-020-0837-6)
15. Grange L *et al.* 2018 Green IT scheduling for data center powered with renewable energy. *Future Generation Computer Systems*, 86: 99-120. 参见: https://oatao.univ-toulouse.fr/22386/1/grange_22386.pdf (访问日期 2021年3月23日)。
16. Radovanovic A. 2020 Our data centers now work harder when the sun shines and wind blows. 参见: <https://blog.google/inside-google/infrastructure/data-centers-work-harder-sun-shines-wind-blows> (访问日期 2021年3月23日)。
17. Global Partnership for Sustainable Development Data. 参见: <https://www.data4sdgs.org/our-impact> (访问日期 2021年3月23日)。
18. Rolnick *et al.* 2019 Tackling climate change with machine learning. arXiv:1906.05433. 参见: <https://arxiv.org/pdf/1906.05433.pdf> (访问日期 2021年3月23日)。
19. Arup. 2019 Digital twin, towards a meaningful framework. 参见: <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/digital-twin-towards-a-meaningful-framework> (访问日期 2021年3月23日)。
20. Google. Project Sunroof. 参见: <https://www.google.com/get/sunroof> (访问日期 2021年3月23日)。
21. Steadman P *et al.* 2020 Building stock energy modelling in the UK: the 3DStock method and the London Building Stock Model. *Buildings and Cities*, 1:100–119. (doi:10.5334/bc.52)
22. International Society for Digital Earth. 参见: <http://www.digitalearth-isde.org> (访问日期 2021年3月23日)。
23. Guo H, Goodchild MF, and Annoni A. 2020 Manual of Digital Earth. 参见: <https://www.springer.com/gp/book/9789813299146> (访问日期 2021年3月23日)。
24. Bauer P, Stevens B, Hazeleger W. 2021 A digital twin of Earth for the green transition. *Nat. Clim. Chang.* 11:80–83. (doi:10.1038/s41558-021-00986-y)
25. De Meyer A and Williamson PJ. 2020 Ecosystem Edge. Stanford Business Press. 参见: <https://ecosystemedge.com/> (访问日期 2021年5月11日)。
26. Tanzania National Bureau of Statistics. 2019 National E-Waste Statistics Report. 参见: <https://www.nbs.go.tz/index.php/en/census-surveys/environmental-statistics/483-national-e-waste-statistics-report-2019-tanzania-mainland> (访问日期 2021年3月23日)。
27. Tanzania National Bureau of Statistics. 2019 *The National Climate Statistics Report*. 参见 <https://www.nbs.go.tz/index.php/en/census-surveys/environmental-statistics/593-the-national-climate-change-statistics-report-2019> (访问日期 2021年3月23日)
28. The Open Data Institute. 2021 *Accelerating progress on tackling the climate crisis through data collaboration*. 参见 <https://theodi.org/article/accelerating-progress-on-tackling-the-climate-crisis-through-data-collaboration/> (访问日期 2021年3月23日)。
29. The Open Data Institute. 2020 *Designing sustainable data institutions*. 参见 <https://theodi.org/article/designing-sustainable-data-institutions-paper/> (访问日期 2021年3月23日)
30. Lawrence ND. 2017 Data readiness levels. arXiv:1705.02245. 参见: <https://arxiv.org/abs/1705.02245> (访问日期 2021年3月23日)。
31. The Alan Turing Institute. 2019 *'The Turing Way' - A handbook for reproducible data science*. 参见 <https://www.turing.ac.uk/research/research-projects/turing-way-handbook-reproducible-data-science> (访问日期 2021年3月23日)
32. GO FAIR Principles. 参见: <https://www.go-fair.org/fair-principles/> (访问日期 2021年3月23日)。
33. The Global Partnership on Artificial Intelligence. Working group on data governance. 参见: <https://gpai.ai/projects/data-governance/> (访问日期 2021年3月23日)。
34. Global Open Data for Agriculture and Nutrition. Code of conduct toolkit. 参见: <https://www.godan.info/codes> (访问日期 2021年3月30日)。
35. Wilsdon J and Willis R. 2004 *See-through Science: Why public engagement needs to move upstream*. 参见 <https://www.demos.co.uk/files/Seethroughsciencefinal.pdf> (访问日期 2021年3月23日)
36. The Royal Society. 2019 *Explainable AI: the basics*. 参见 <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/explainable-ai/ai-and-interpretability-policy-briefing.pdf> (访问日期 2021年3月23日)。
37. Microsoft. 2020 Microsoft will be carbon negative by 2030. 参见: <https://blogs.microsoft.com/blog/2020/01/16/microsoft-will-be-carbon-negative-by-2030/> (访问日期 2021年3月23日)。
38. Apple. 2020 *Environmental progress report*. 参见 https://www.apple.com/tr/environment/pdf/Apple_Environmental_Progress_Report_2020.pdf (访问日期 2021年3月23日)
39. Google. Sustainability commitments. 参见: <https://sustainability.google/commitments/> (访问日期 2021年3月23日)。
40. Amazon. *Amazon Sustainability – All In: Staying the Course on Our Commitment to Sustainability*. 参见 <https://sustainability.aboutamazon.com/> (访问日期 2021年3月23日)
41. International Energy Agency. 2020 Renewables Information: Overview. 参见: <https://www.iea.org/reports/renewables-information-overview> (访问日期 2021年3月23日)。
42. Rook B. 2019 How digital twins are transforming wind operations. Windpower Engineering & Development. 参见: <https://www.windpowerengineering.com/how-digital-twins-are-transforming-wind-operations/> (访问日期 2021年3月23日)。
43. General Electric. 2015 Wind in the cloud? How the digital wind farm will make wind power 20 percent more efficient. 参见: <https://www.ge.com/news/reports/wind-in-the-cloud-how-the-digital-wind-farm-will-2> (访问日期 2021年3月23日)。
44. Le Quéré C *et al.* 2020 Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nat. Clim.Chang.*, 10:647–653. (doi:10.1038/s41558-020-0797-x)