保护工具：工程学与生物学合作的下一代

AndrewK. Schulz[1, 2, +, *], Cassie Shriver[3, +], Suzanne Stathatos[4, +], Benjamin Seleb[3], Emily Weigel[3], YoungHui Chang[3],M.Saad Bhamla[5],DavidHu[1,3], Joseph R.MendelsonIII[3,6]机械工程学院[1],生物科学[3], 以及化学与生物分子工程[5]佐治亚理工学院，美国佐治亚州亚特兰大，邮编30332 马克斯·普朗克智能系统研究所[2], 德国斯图加特 计算与数学科学学院[4] 加州理工学院，美国加利福尼亚州帕萨迪纳，邮编91125[6],亚特兰大动物园，美国佐治亚州亚特兰大，邮编30315

arXiv:2301.01103v1 [q-bio.QM] 3 Jan 2023

2023年1月4日

+表示共同第一作者**通讯作者：**Andrew Schulz 海森堡街3号，德国斯图加特，邮编 70569 (405)780-0542 andrew.schulz1994@gmail.com

关键词：
保护技术、以人为中心的设计、AI4Good、Tech4Wildlife

摘要

近年来，公众和学术界对保护生物多样性的兴趣日益浓厚，推动了保护技术领域的发展。该领域致力于设计和构建利用技术助力野生动物保护的工具。本文将通过案例研究，说明设计保护工具时考虑人类—野生动物互动的重要性，并提出创建成功工具的框架。这些案例研究涵盖了复杂程度各异的内容，从简单的猫项圈到机器学习和博弈论方法。我们的目标是向当前及未来从事保护技术领域的研究人员介绍并阐释这一领域，同时为培养新一代保护技术专家提供参考。保护技术不仅有望造福生物多样性，也会对可持续性和环境保护等领域产生更广泛的影响。通过运用创新技术应对保护挑战，我们能够找到更有效、更高效的解决方案，以保护和留存地球资源。

背景与动机

“保护技术”一词最早由 Berger-Tal 于 2018[1] 提出，用于广义描述运用技术管理和保护野生动物。常被提及的例子是无人驾驶飞行器（UAVs，也称为无人机），但还有许多其他保护技术，包括红外相机、移动应用程序、空间制图和环境DNA。现有技术大多采用现代硬件和软件设计流程，以改进

正在进行的保护工作，并启动此前关注不足的工作[1]。保护技术的主要目标包括更快地迭代以改进过时设备、提高工具的可及性，以及运用现代技术以全新的方式应对保护问题。保护技术正在为自然环境和圈养环境中的动物开发（例如，分别为城市环境中的狐狸和动物园里的大象）[2]；此类技术的应用还可涉及动物、植物、栖息地、火山等地质现象、气候和大气等方面的保护挑战与监测需求。

为什么近几年保护领域在应用这些新旧工具方面出现了一场变革？近期，人们日益广泛地认识到生物多样性面临的重大威胁，这推动了对保护技术的需求。自 1970 年以来，野生动物种群数量骤降了 69%[3]。随着过去千年间技术革命不断推进，许多科学家、工程师和其他保护领域利益相关者都将保护工具视为应对持续存在的严峻保护挑战的有效方法。

历史上，保护技术领域一直采取机会主义的方式：利益相关者投资开发技术，以满足特定的非保护需求，随后再将其应用于野生动物管理[1,]，军方开发无人机便是一个典型例子。机会主义技术无疑有助于野生动物管理工作，但它们往往价格昂贵，保护界较难获得，而且鲜少是解决特定野生动物管理问题的理想方案。鉴于当前大灭绝背景下生物多样性丧失的速度令人震惊[4]，人们愈发倡导开发目标导向型技术，并在设计过程中征询保护界成员的意见[1]。重要的是，只有在新技术被证明确实有助于野生动物管理与保护且成效显著后，才会被视为真正的保护技术。

开发专用技术需要多种技能，而这些技能通常超出单个人的能力范围，因此建立成功的跨学科合作至关重要。为了恰当地综合这些不同视角，保护技术必须在保护界、技术专家和政策制定者之间建立必要的桥梁[1,5]。然而，这些跨学科合作依赖于跨领域的有效沟通；鉴于各方在目标和宗旨上的差异，这种沟通可能颇具难度。技术开发及其成果通常源于工程设计思维，而生物保护则更多由假设驱动，并以科学方法为基础。

尽管已有资助、培训以及其他旨在推动这些合作的努力，保护界仍遇到许多声称具有普适性、却缺乏必要跨学科知识以及各相关领域合作伙伴的解决方案。领域之间沟通不足，最初导致野生动物保护界对新技术持不信任态度，因为许多工程解决方案在应用时不够妥善，无法满足保护工作者的需求，尤其是在自然户外环境中。然而，第六次大灭绝和气候变化的紧迫性，使跨学科解决方案的必要性变得显而易见；尽管沟通存在困难，这些方案仍值得继续探索。随着跨学科合作的拓展，人们也逐渐认识到，对保护技术的新颖贡献可以通过多种方式设计出来。

“保护技术”一词因暗示需要先进技术而受到保护领域人士的诸多批评。然而，这种说法具有误导性，因为许多现代创新都是利用简单的非硬件／软件设备来应对新型保护问题。保护技术既可以复杂到运用机器学习识别和追踪物种，也可以简单到用辣椒围栏阻止非洲象破坏农田[6,7]。因此，在本文余下部分，我们将使用**保护工具**（CT）一词，而非保护技术。工具通常被定义为一种用于

执行特定功能的器具；我们认为，使用“保护工具”一词更能涵盖这一领域的多样性。重新表述这一术语，也有意将全球传统保护实践中采用的原住民解决方案纳入其中，因为这些方案未必能准确归入保护技术的范畴。

在本文中，我们将介绍一系列已在全球各地实施的**保护工具**案例研究。我们还强调，项目应与受影响的社区携手合作，并将社区视为利益相关方，以尽量减少传统降落伞科学的做法，同时最大限度地促进社区合作伙伴关系、获取机会和保护成效。降落伞科学指科学家为了研究或保护目的“空降”到某地，却在离开时不留下任何共同署名，也不署名感谢促成这项工作的社区成员；这是一种令人遗憾的常见现象[8]。我们介绍的工具有的侧重硬件，有的侧重软件，但都可以轻松使用、构建和改造，以满足其他保护需求。本文旨在为没有相关经验的人提供一份入门指南，介绍保护工具的开发领域。我们希望这份术语表也能帮助当前的保护工具（CT）从业者更好地了解这一领域的多样性。本文希望帮助读者理解，生物多样性不仅在野外至关重要，在用于提升保护工具成效的技术中也同样重要。

保护工具词汇

随着保护技术领域的发展，该领域采用了许多其他领域的术语，以准确描述保护工具。遗憾的是，其中许多技术术语仅适用于特定领域，可能会疏远利益相关者。我们列出并定义了许多常用于描述保护工具的术语，并提供了介绍这些具体术语更多细节的相关出版物（表 1）。我们在案例研究和引言中对每个术语进行了详细说明。本文中，我们将这些术语以粗体显示，以便读者知道可查阅此表了解更多信息。

讨论

我们提议将“保护技术”改称为保护工具，因为传统的保护技术创建流程依赖于所谓的机会性技术[1]。专用技术在硬件和软件行业十分常见，这些领域统称为**以人为中心的设计**（HCD）。HCD 运用一种设计思维，着眼于理念的使用情境。一个常见的例子是不同环境下结账界面的差异。在酒吧和超市购买饮料看似相似，但用金钱交换商品的使用情境截然不同。在每种情境中，个体数量m和每个个体拥有的物品数量n都是确定的。在酒吧，m 很大而n很小；超市的情况则恰恰相反。因此，支持商品购买的技术与流程，其设计所处的使用情境截然不同。我们将运用同样的逻辑，采用**以人类与野生动物为中心的设计**（HWCD）方法来设计保护工具。

保护工具的 HWCD 方法不仅需要考虑人类与设备之间的互动，还需要考虑人类与野生动物之间的互动。“人类—野生动物冲突”[9] 用于描述发生在城市、农耕区或野外环境中、可能严重损害人类利益的互动[10]，；而“人类—野生动物互动”则广义地用于描述

积极和消极的互动。HWCD 并非新概念，原住民数千年来一直在陆地上生活、与陆地互动并迁徙，早已实践这一理念。对于非原住民背景的设计师而言，必须明白：除非技术解决方案的主要设计者来自这些方案将要实施的原住民土地，否则你永远无法实现真正的原住民设计[11]。忽视原住民或其他社区知识，就意味着提出的解决方案对问题的专业认知或了解并不全面。因此，我们恳请读者认识到，工具的有效性取决于社区、科学家和工程师的积极协作。在本手稿的后续内容中，作者务必理解，最好的工具是由原住民研究人员、科学家和工程师协作开发的，因为对于社区以外的非原住民成员所带来的保护挑战，他们是世界上最了解情况的人。

接下来，我们将讨论五个案例研究，以介绍我们在**图1**中强调的核心原则。我们认为，保护技术解决方案应按照这些原则实施。各节开头列出了相关主题。

- 是什么——它有什么用途?
- 如何——它是如何使用的?
- 何处——有哪些用例／它能提供哪些帮助?
- 为何——未来方向／尚待解答的问题等。

以下案例研究介绍了运用新旧技术开发的特定保护工具。这些解决方案都在一定程度上运用了 HWCD，不过，有些采用低成本材料，设计简单；另一些则利用了近年来变得更易获取的先进硬件和软件。这些案例研究的主题与受访保护工作者认为最有助于推动保护工作的工具有关，这些观点来自最新的保护技术报告[12]。接下来，我们将讨论一个关于技术可及性的案例研究。

案例研究 1：AudioMoth

原则：　　解决方案应当开源，并且在成本和功能方面都应易于获取　　n
开源软件通常指能够访问代码，并根据需要对其进行定制和编辑。本科生物学家通常会学习 R，这是一种面向统计建模的开源编程语言；相比之下，工程师和计算机科学家则经常学习 Python，这是一种通用的开源编程语言。无论使用哪种编程语言，协作社群都可以受益于开源代码，而成员之间的既有知识差异仅在于各自课程中使用的开源软件不同。研讨会[13]和在线论坛[14] 已开始弥合这两个群体之间的差距；例如，在 CV4Ecology研讨会上，工程师会向研究生和博士后阶段的保护生物学家讲授 Python 中的特定工具。AudioMoth 就是开源软件和硬件用于保护工作的一个例子。

它有什么用途? 有效的野生动物管理决策需要大量有关生物体的数据。声学监测已成为在声音相关的野外环境中记录信息最普遍的方法之一[15,16]。早期的做法要求人们主动记录自己听到的声音，而被动监测设备则可以部署在感兴趣的区域，记录一定范围内动物的信息[15–17]。

如何使用？ AudioMoth 的价格仅为商业产品的十分之一，能效高，既能录制人耳可听声音，也能录制超声频率，体积与信用卡相当。它由两名博士生设计，旨在提升科学可及性（**图 2**A）[18] 。此外，这款设备是开源的，也就是说，其代码和运行功能均向公众开放，可供分发，并可根据个别项目的需求进行修改[19]。它一经推出便广受欢迎，已被用于监测动物种群[20], 追踪迁徙[21], 识别偷猎活动[19],探测水下声音[22]„ 甚至发现新物种[19]。

什么是用例？ AudioMoth 展示了设计开源且易于使用的技术，如何大幅增加科学研究的参与度，并对制定未来的野生动物管理政策和实践产生深远影响。对于 AudioMoth 这类设备而言，“开源解决方案”一词可以有多种含义，我们将分为以下几类进行讨论：开源硬件、开源软件和开源代码。

这些设备能够显著扩大监测覆盖范围，无论是陆地面积还是记录时长方面[15–17]。这种多功能设备在生物学领域有广泛应用；随着联合国可持续发展目标（SDG）的发布，它近期的应用有所增加，尤其用于研究水下生物（SDG 14）和陆地生物（SDG 15）。然而，在 AudioMoth 问世之前，早期产品的成本和复杂程度都过高，无法在科学界大规模推广。

开源硬件的一项核心特点是，项目所需的机械零件都易于获取。这意味着多种可能性，例如易于购买，或易于使用 3D打印、激光切割等先进制造技术制作。具体而言，3D打印有时也称为增材制造，能够以低成本制作硬件模型中的特定零件[23]。真正的开源硬件不仅会说明所采用的技术，还会提供所需的确切零件、文件、模型等。新的期刊出版类型正通过发表论文，充分发挥开源硬件的未来潜力。目前，这类期刊包括开放硬件期刊、开放工程期刊和 *HardwareX*。这些期刊要求所有投稿都提供设备中包含的全部硬件和软件的完整信息[24]。不过，需要指出的是，这些出版商中有些是营利性出版商，包括爱思唯尔。

潜力何在？ 开源硬件不仅指螺母、螺栓等机械设备，也包括电路板和电路图等电子设备（**图 2**B）。通过提供这些原理图，用户可以根据其在 HardwareX 上发表的论文中提供的规格说明书，组装完整的 AudioMoth 系统。在硬件和软件之间，开源理念的落实程度可能存在很大差异。许多设备允许用户完全获取硬件的采购信息和原理图，却要求用户向相关机构购买专用软件。

在此语境下，常用的两种接口是前端界面和后端界面。前端界面是主要用户在屏幕上看到的内容，也就是用户界面（UI）[25] 。后端界面则是内部设备，实际承担了大量编码工作[25]。许多设备没有可定制的前端，因为前端会直接反映可定制的后端，即应用程序编程接口（API）。API 是一种主要方式，既能让人访问开源代码，也能对其进行更新并更改输出。这对研究人员来说很有必要，因为获取 API 后，研究人员便能定制数据收集，例如提取位置信息，或温度、速度等测量值；这些功能都使开源工具的输入和输出均可定制。AudioMoth 的制造商 OpenAcoustics（https://www.openacousticdevices.info/audiomoth）不仅向研究人员提供 API，还为每种设备提供全部运行代码和用户手册，从而允许定制设备的任何方面（**图 2**C-D）。最后，其易用性

对于最终用户而言，是一项至关重要的设计要素。在设计这款设备时，工程开发人员建立了反馈机制，让实地使用者能够帮助持续改进设备的使用体验。工程师和科学家开发这款工具，供原住民研究人员和当地居民使用；他们可以将设备放置在任何认为合适的地方，以开始接收数据。长期生活在原住民土地上的人，最了解将这些设备放在哪里效果最佳。

设计兼顾 HWCD 的工具时，考虑其使用情境至关重要。AudioMoth 面向生态学家，帮助他们通过开源传感器获取生物声学数据。生物学家与计算机科学家和工程研究人员有显著差异；生物学是一个假设驱动型领域，而工程学则是设计驱动的。AudioMoth 由生物学家设计，供生物学家使用，可在各种应用场景和环境中快速部署并轻松维修。AudioMoth 在软件和硬件方面都采用了先进技术，同时也考虑了使用情境，以便了解人们将如何使用它。

案例研究二：环境DNA（环境DNA）

原则：　　解决方案应利用日益发展的硬件技术　　s

DNA 已成为一项成熟的科学工具，应用范围不断扩展，涵盖越来越多的生物学研究及其他领域[26]。将 DNA 用于保护工作的一大挑战在于，传统的 DNA 采集方法需要尿液、毛发、皮肤或其他组织等生物样本[27]。传统的生物学方法历来需要约束或捕获生物，或迅速采集新鲜DNA样本；但在实际操作中，这些做法可能难以实现，甚至会直接妨碍对野生生物的观察。许多保护项目关注的目标生物往往极为稀有或行踪隐秘，因此可能无法采集到它们的样本，或在实际操作中难以做到。Thomsen 和 Willerslev（2015年）回顾了环境DNA作为保护领域新兴工具的应用[28]。他们指出，保护工作面临的一项主要挑战是在研究的侵入性与数据收集之间权衡。环境DNA的应用减少了对侵入性研究的需求，使研究人员能够定位并监测那些过于稀有或隐秘、难以通过传统调查方法发现的生物。

它有什么用途？ 环境DNA可用于分析食性、地理分布范围、种群规模、人口统计特征和遗传学，也可评估特定地点是否存在某些物种。我们可以利用粪便等环境样本进行定量分析，并从中获取不同的遗传信息。环境DNA领域为保护工作带来了益处，因为DNA提取是一种整体上非侵入性的方法，而且可重复性很高。环境DNA采集技术仍需采集生物样本，但所需样本量可以少得多，也可以利用真空设备处理，以获得所需的浓度。

如何使用？ 这是一种早已开发的工具，近来更多地被野生动物保护工作者使用。它利用在环境中发现的DNA样本，仅凭这些样本来了解濒危物种在其自然环境中的情况。这项工具的新颖之处在于，它不仅能检测有关动物的DNA信息，还适用于多种环境，包括陆地、海洋和极地冰样本[28]。环境DNA作为一种工具，在各种保护和生态学领域都很有用，但这种解决方案有着长期的殖民式伞降科学历史[29]。需要注意的是，虽然可以借助这类解决方案和技术，但必须将其置于HWCD框架下加以考量。环境DNA并非唯一的解决方案，因此，与当地社区和原住民社区合作，并开展必要的实地保护工作，对野生动物的长期保护至关重要[30]。

什么是用例？： 有记录以来，最早使用环境DNA的案例之一发生于1992年，当时 Amos 利用鲸类哺乳动物物种脱落的皮肤来进行种群分析[31]。尽管当时这并未被视为保护技术，但这是最早应用

非侵入式环境DNA进行生物保护和种群评估的案例之一。如今，环境DNA不仅用于监测种群，还用于编目当地鱼类的生物多样性[32]，管理爬行动物种群[33]，以及森林保护[34]，这些工作利用了遥感与环境DNA之间的协同作用。

潜力何在？ 这一解决方案似乎是一种通用（或包治百病）的工具。通用设计的解决方案通常只能适用于特定用例。环境DNA的非通用性在于，它利用成熟的DNA科学工具，将其应用于保护数据和管理领域的新颖创新用途。尽管环境DNA具有广泛的潜在应用，但它仍不是适用于所有情境的通用解决方案，尤其是因为其方法在采样和数据获取方面较为复杂。作为一种湿实验室技术，它容易出现与其他基于实验室的风险相同的人为错误，包括污染、结果和解读偏差，甚至可能只是因为没有足够的参考数据库，无法识别所有地区或应用场景中的DNA序列。

这些陷阱并不能否定环境DNA作为利用硬件和科学进步来推动保护实践的例子。这类工具一直在不断改进和创新。近年来，该领域不断发展，DNA 条形码的建立日益增多，使人们能够利用在线DNA数据库识别物种[35]。

案例研究3：计算机视觉

原则：解决方案应利用不断发展的软件技术

机器学习 是开发计算机算法，使其能够从数据和经验中自动学习的科学与艺术[36]。**计算机视觉** 是机器学习的一个子领域，在这一领域中，计算机和系统经过训练，能够从图像、视频及其他输入中提取有意义的信息（即“看见”）。计算机视觉使计算机能够理解视觉输入[37]。

它有什么用途？ 人类在一生中经过“训练”，能够识别物体、理解其深度并观察它们之间的互动，而计算机模型则需要成千上万张图像来教会机器“看见”新的场景。近年来，计算机视觉也得到了发展：它已从只能在超级计算机上运行，发展到如今能够在现实环境中的手机和笔记本电脑等边缘设备上运行[38–40]。随着硬件不断进步，以及为资源较少的设备而设计的算法问世，计算机视觉的成本已降低，也更易于许多希望使用它的组织采用。如今，计算机视觉应用的用户包括但不限于：(1) 使用面部解锁 iPhone 的用户；(2) 自动驾驶汽车的驾驶员；以及 (3) 使用闯红灯监控摄像头的交通执法人员。

如何使用？ 保护工作者使用相机陷阱拍摄野生动物的图像。计算机视觉技术应用于这些相机陷阱图像，帮助科学家检测、追踪、分类和重新识别（辨认）个体动物等[41,42]。典型的相机陷阱装置如**图3**A所示。相机被放置在感兴趣区域内，被动收集经过该区域的事物信息。相机陷阱会在指定时间段内收集数据，并将数据写入外置硬盘或上传至云托管框架。相机陷阱通常配有红外传感器和／或运动传感器，可识别温血物体或移动物体。当动物触发传感器时，相机便会进行记录（将图像写入存储器），如**图3**B所示。随后，数据会被输入机器学习模型，以学习和识别数据中的模式，如**图3**C所示。

传统上，计算机视觉使用经典监督机器学习算法（需要人工标注数据的算法）。这些算法让模型能够理解感兴趣区域内动物的识别特征（例如，颜色直方图、纹理差异、运动步态等。**图3**C)[6]。根据这些特征，模型可以学习

在图像中检测并分类野生动物物种。这类技术的两个关键用例包括对动物物种进行分类（**分类**），以及识别并辨认个体动物（**再识别或再识别**）。在这些任务中，提取图像前景是一项重要的预处理步骤，可让模型专注于目标动物。例如，对城市野生动物进行分类时，第一步通常是裁剪图像，使画面聚焦于动物，而不关注汽车、树叶、树木等。[43]。随后，模型可以处理这些裁剪后的图像，并将其分类为不同物种（即松鼠、狗、郊狼等）。或者，[43] 也可用于识别应忽略哪些照片。例如，一些城市野生动物监测项目会用它从图像中裁掉人类，并忽略没有动物的图像。[44]。

什么是用例？硬件的最新进展使计算机视觉得以扩展到水下环境。加州理工学院鱼类计数任务利用放置在河流中的声呐摄像机，在鲑鱼逆流而上时对其进行检测、追踪和计数[45]。**图4**展示了这类摄像机在河流中的布设方式。它们无法依赖红外传感器，因此会在指定时段内连续采集图像。渔业管理人员会查看视频，并手动统计鲑鱼数量。加州理工学院的研究人员正致力于利用计算机视觉实现这一过程的自动化[45]。

有何潜力？计算机视觉催生了一系列技术，可在陆地、水域和实验室环境中助力野生动物保护。将计算机视觉用作工具，有助于解决人工数据分析的局限，既节省时间，也能减少外部偏见。快速处理大量数据后，生态学家便能识别其研究领域中的生态模式、趋势等，并更快开展野外观察。进而，他们的科学研究为生态行动和目标提供依据。计算机视觉融入野生动物保护，正借助数据驱动模型，推动动物生态学和保护研究实现动态自动化。[6]

案例研究 4：博弈论与优化

原则：在应对保护挑战时，应运用经济学和人工智能来优化决策

人工智能正被积极用于应对野生动物威胁。在设计保护工具（如传感器）时，一项关键挑战是确定应将传感器放置在动物生态系统中的什么位置，以便收集相关数据。研究人员正在探索如何运用人工智能方法来优化保护工作、资源规划和政策制定。计算机科学中有一个不同于计算机视觉的领域，即运用博弈论进行更有效的数据收集。**博弈论** 是一套分析工具，可用于在互动和决策问题中做出最优选择。博弈论在保护领域的应用直到最近才成为一个研究领域。

它有什么用途？：通俗来说，优化研究的是如何在给定一组约束条件的情况下，做出最佳或最高效的决策。在概率论和机器学习中，多臂老虎机问题是一种优化问题：必须在相互竞争的选项之间分配有限资源，以最大化期望收益。这个问题属于一类更广泛的问题，称为随机调度问题。在这类问题中，每台机器都会按照一个事先未知的概率分布随机提供奖励。用户的目标是使奖励总和最大化。这些技术通常用于物流（路径规划）协调和金融投资组合设计，不过也已被用于建模恶意行为者，并以最优方式对其进行反制。在野生动物研究中，生物学家往往必须在广阔的环境中使用少量工具收集数据，涉及的区域通常达数百平方公里。近年来，优化策略已开始帮助

生态学家和生物学家确定合适的地点，以有效收集能够描述大型生态栖息地的数据。

如何使用？巡逻规划。野生动物偷猎和贸易威胁着各个生态系统中的关键物种。非法野生动物贸易会助长入侵物种的引入、土地退化和生物多样性丧失[46]。过去，公园护林员会记录偷猎者出没的地点。然而，在大多数国家公园中，公园护林员数量有限。他们通常只能驾车、步行或骑自行车在园区内巡逻。一些公园保存着历史数据档案，详细记录了过去发现的偷猎地点。这些数据可用于预测未来可能发生偷猎威胁的地点。博弈论和优化领域已有相关研究，利用历史数据进行机器学习，并优化多模式（即驾车和步行）巡逻规划。最终，公园和野生动物保护组织希望找到以下问题的最佳答案：“我该如何安排巡逻？”以及“对手会如何应对？”[47]。这种优化技术为他们提供了直接解答这些问题的方法。

经济建模。 此外，包括 Keskin 和 Nuwer 在内的研究人员正致力于了解这些野生动物威胁背后的**经济学** 。偷猎是农村社区居民的一项额外收入来源，而他们的收入可能主要依赖旅游业。如果这些社区无法依靠旅游业，就可能转而从事野生动物贩运，因为附近常有这些物种[48]。一项聚焦运营和供应链管理的野生动物追踪[49] 综述指出了限制预防措施的四项挑战：

1. 根据现有数据，难以了解非法野生动物贸易（IWT）的真实规模；2. 问题涉及面广——被贩运的动物被用于食用、彰显身份、传统药物、饲养异宠等（因此，政策补救措施必须是多方面的）；此外，非法野生动物贸易（IWT）有时发生在政府腐败的国家，或执法和监测基础设施有限的国家；3. 非法野生动物贸易（IWT）团伙擅长开展难以察觉的活动，尤其是躲避金融机构的监测；

4. 与人口贩运、毒品和武器贩运等其他贩运活动相比，非法野生动物贸易（IWT）被认为危害较轻。

有几种建议的方法，可将供应链运营研究应用于打击IWT[49]。这些方法包括：利用卫星数据、声学监测和新闻抓取等方式补充数据，并寻找线上市场；通过网络分析和了解数据偏差来加强数据检测与预测；将问题建模为网络阻断问题，以了解如何扰乱供应链网络；更有效地进行资源管理并减少腐败。Keskin等人通过分析IWT背后复杂的供应链和运营，分别清晰呈现了各个地点或情境的情况，从而有助于制定知情且有针对性的应对措施，防止非法野生动物贩运[50]。

有哪些用例？乌干达公园的证据表明，护林员巡逻能够震慑偷猎者，这凸显了制定稳健序贯规划的迫切性[47]。计算机科学领域的经济学家运用对抗建模，展示偷猎者如何因巡逻而受到震慑，并分析了其他偷猎者行为模式[47]。**图5**展示了巡逻增加时的偷猎模式。

在中国吉林黄泥河国家级自然保护区工作的研究人员，首先利用机器学习预测偷猎威胁，随后使用算法优化巡逻路线。2019年12月，巡护员出动后成功发现了42个套索陷阱，数量显著多于前几个月及此前巡逻时发现的数量[51]。将机器学习与

优化技术相结合，因此已证明能够提高巡逻规划的效率，并可进一步拓展至更多保护管理应用领域。

潜力何在？在各类保护相关任务中应用优化技术，将为长期资源不足的应用和项目提供洞见，并帮助更有效地利用资源。此外，这些优化技术和以经济效益为重点的视角，能够促使组织和政府更高效地发现并解决问题。各项目可以充分利用有限的资源，并以高效、数据驱动的方式开展工作。理论上，这种做法也可以推广到任何资源有限的情境。例如，使用红外相机的人可以研究最佳布设位置，以拍摄信息最丰富的图像。同样，AudioMoths 数量有限的人可以研究如何布设设备，以确保获得最佳且最具代表性的声音记录。

案例研究 5：猫项圈

原则：解决方案可以很简单，不应过度设计本案例旨在举例说明，有些方案并不符合已然盛行的、对保护技术的狭隘定义，也不符合由此常常形成的过度以技术为中心的愿景。设计保护工具时，必须考虑的一项重大挑战是可行性。设备或解决方案仅仅具备功能可能还不够；零部件供应情况和成本也必须能够满足使用者的需求。任何保护工具的目标用户群体都可能相当有限。尽管功能强大的工具可能带来显著的功能和／或机会，但通过传统渠道，消费者需求和购买能力可能不足以支撑其开发和推广。当消费者无法充分使用或理解某项保护解决方案时，它就可能失败，例如，开发出的工具在当地几乎无人采用，甚至完全未被采用[52]。虽然节俭科学在生物工程领域被定义为降低设备成本，但其核心原则特别适用于保护领域的创新。节俭科学与自己动手（DIY）和自由开源硬件（FOSH）略有不同，因为它着重于利用最节俭的材料来制作工具。并非所有设备都能以节俭方式设计，但许多设备的成本都能大幅降低，因为保护领域中的许多设备并非专门为保护工作设计；例如，红外相机原本是为猎人设计的，却也被世界各地的生态学家和保护工作者使用。

它有什么用途？这种项圈旨在帮助应对仅在美国，每年就有近13亿至40亿只鸟类遭家猫捕杀的情况[53]。因此，家猫成为美国野生动物面临的最严重人为威胁之一，但人们采取的应对措施却寥寥无几。人们普遍喜爱猫，这使得对猫实施限制很困难，也让采取同等程度的入侵物种根除措施极不受欢迎，即使对象是野猫也一样[54]。尽管 Birdsbesafe® 项圈看起来有些滑稽，但研究发现，戴上项圈的猫捕杀的鸟类数量比未戴项圈的猫少19倍[55]。与其他措施相比，这种项圈成本低得多，也更少引发争议，而且猫仍可自由外出活动。乍看之下，没人会想到这种有损猫咪形象的配饰竟可能是防止猫导致的鸟类灭绝最切实有效的解决方案。

如何使用？Birdsbesafe®项圈是一种简单的编织布项圈，布料上绘有鲜艳的颜色。该装置的使用方法很简单，因为美国很大一部分人口都养着户外猫。这些项圈售价约为10美元，由两英寸宽的棉布管制成，并连接到一个快脱项圈上。项圈旨在供家猫和野猫佩戴，以减少鸟类死亡。与其他猫科动物相似，家猫（*Feliscatus*）具有隐蔽的潜行捕猎行为。项圈上鲜艳的颜色从远处就能被鸟类和猫可能捕食的小型哺乳动物看到。这种解决方案很简单，不需要任何技术；只需将装置扣在猫脖子上的项圈上，猫就无法将其扯掉。此外，这些项圈的设计考虑到了猫的需求，因为它

不会妨碍猫的任何基本需求，包括进食、饮水、睡觉、排尿或排便。从功能上说，这种保护工具是一种利用颜色来帮助减少鸟类死亡的可穿戴技术，使用起来十分简单，只需将它扣在宠物猫的项圈上即可。

什么是用例? 与此前讨论的许多案例研究不同，保护工具可以非常简单，比如一条颜色鲜艳的项圈。在生物力学领域，太空鞋的设计旨在减轻足部关节承受的压力。虽然这一点会通过科学数据和技术手段加以验证，但鞋子的重要因素不仅是生物力学支撑，还包括穿在脚上的外观。这正是以人为中心的设计中的人为因素，也是与驯化物种合作时需要考虑的重要事项。对于猫这类驯化物种，生物学家给出的解决方案非常简单：不要让猫出门。然而，这一方案中的人为因素在于，并非所有人都会遵从这些建议，因此需要采用其他方法。猫项圈这类较为简单的工具，凭借其简便性和低成本，便于更广泛地推广应用，能够在保护工作中发挥重要作用。这个方案并不能解决入侵猫捕杀鸟类和其他动物的问题，但能显著降低猫对那些为猫购买项圈的人所造成的影响。

潜力何在? 为保护工具的开发提供资金是一项重大挑战，能够为关键试点工具和原型提供资金的解决方案可能寥寥无几。贝索斯地球基金、Google Earth 或微软的 AI4Good 等在科技领域开展工作的慈善组织或科技组织提供支持，可以让小型初创企业获得资助，用于开发这些工具。但我们鼓励采取节俭科学方法[56]，而不是依赖此类支持。

结论

保护工具各不相同，但它们都有助力保护工作的潜力。保护工作面临诸多挑战，没有单一的解决方案能够一一应对。保护工具旨在成为社区工具箱的一部分，帮助保护野生动物；我们在**图6**中讨论了使这些工具取得成功的关键主题。正如这些案例研究所示，保护工具并非旨在解决所有问题，但在以往方法过于繁琐或成本过高的情况下，它们会发挥作用。保护工具的开发者必须认识到，设计应便于保护实践者使用，并应将其视为一种资源，而非解决生物多样性下降问题的完整方案。最有效的解决方案是切实可行、能够落实的方案，并且会在设计过程中考虑人类与野生动物互动的具体情境。本文回顾了五个具体保护工具的案例研究，这些工具正在推动野生动物保护工作。考察这些工具时，必须考虑其使用背景以及它们所针对的具体保护问题。

为了开发有效的保护工具，生物学家、计算机科学家和工程师必须携手合作，发挥各自的专业知识。这些跨学科团队还必须与深入了解保护挑战的社区成员合作。通过这些合作关系，各方带来的多元视角以及所应对的挑战，使保护工具得以呈现多种形式。我们重点介绍成功的保护工具的五项关键特征。像 AudioMoth 这样的开源且易于使用的解决方案，为众包和进一步改进带来了机遇，也能够将现有框架应用于类似问题。其他领域的硬件也可以通过创新方式改造利用，以造福保护工作，例如利用环境DNA降低数据采集技术的侵入性。计算机视觉等现有软件也可应用于保护领域，从而简化并拓展数据分析。成功的保护工具并不局限于生物学、工程学和计算机科学；数学等

非传统领域也能发挥作用，例如利用数学确定理想采集地点。最后，并非所有有效解决方案都需要高科技。简单的方案，例如为猫戴上带铃铛的猫项圈以保护鸟类，同样可以成为有效的保护工具。

本文旨在通过回顾成功保护工具的案例研究并强调其中的关键主题，为未来的保护工具开发者奠定基础。这些案例研究展现了保护技术可采用的多种方法，从简单的猫项圈到复杂的机器学习和博弈论方法。借助跨学科团队的专业知识——团队成员包括生物学家、计算机科学家、工程师和社区成员——我们能够开发有效的工具，以应对不同保护情境中的独特挑战。在努力保护野生动物的同时，我们必须牢记，保护工具只是更大工具体系的一部分，应与传统保护方法和原住民方法相结合。通过这篇综述，我们希望激发创新方案的开发，以满足生物多样性保护的迫切需求。归根结底，保护技术对于应对生物多样性保护面临的挑战，以及推动人类与野生动物互动领域的可持续解决方案至关重要。

致谢

感谢佐治亚理工学院 Tech4Wildlife 学生组织的所有成员给予支持。

参考文献

[1]Oded Berger-Tal 和 Jos´e J. Lahoz-Monfort。《保护技术：新一代》。《保护通讯》，11(6):e12458，2018年。电子版：https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/conl.12458。[2] Xareni P. Pacheco。《技术如何改变野生动物保护》。改善地球环境的绿色技术，2018年12月。[3] 世界自然基金会2022年年度报告。https://www.worldwildlife.org/。[4] Gerardo Ceballos、Paul R. Ehrlich、Anthony D. Barnosky、Andr´es Garc´ıa、Robert M. Pringle 和 Todd M. Palmer。《现代人类活动导致的物种丧失加速：步入第六次大灭绝》。《科学进展》，1(5):e1400253。[5] Nicole Sintov、Viviane Seyranian 和 Arnaud Lyet。《促进保护技术的采用：野生动物执法巡护员案例研究》。《羚羊》，53(3):479–483，2019年7月。[6] Devis Tuia、Benjamin Kellenberger、Sara Beery、Blair R. Costelloe、Silvia Zuffi、Benjamin Risse、Alexander Mathis、Mackenzie W. Mathis、Frank van Langevelde、Tilo Burghardt、Roland Kays、Holger Klinck、Martin Wikelski、Iain D. Couzin、Grant van Horn、Margaret C. Crofoot、Charles V. Stewart 和 Tanya Berger-Wolf。《野生动物保护中的机器学习展望》。《自然通讯》，13(1):792，2022年2月。[7] Alex Chang'a、Nick Souza de、John Muya、Julius Keyyu、Angela Mwakatobe、Lucas Malugu、Humphrey Peter Ndossi、Jonathan Konuche、Raphael Omondi、Aloyce Mpinge、Nathan Hahn、Suzanne Palminteri 和 David Olson。《推广辣椒围栏的使用，以减少坦桑尼亚不同景观中的人象冲突》。《热带保护科学》，9(2):921–930，2016年6月。出版方：SAGE 出版公司。

[8] Andrew K Schulz、Cassie Shriver、Catie Aubuchon、Emily G Weigel、Michelle Kolar、Joseph R Mendelson, III 和 David L Hu。《动物园与大学成功开展研究合作指南》。《整合与比较生物学》，第 icac096 页，2022年6月。

[9]Carl D. Soulsbury、Piran C. L. White、Carl D. Soulsbury 和 Piran C. L. White。《城市地区的人与野生动物互动：冲突、益处与机遇综述》。《野生动物研究》，42(7):541–553，2015年7月。出版商：CSIRO 出版社。

[10]Tyler D Jessen、Natalie C Ban、Nicholas Claxton 和 Chris T Darimont。《原住民知识对生态学和进化学理解的贡献》。《生态学与环境前沿》，20(2):93–101，2022年。电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/fee.2435.[11] 美国生态学会。《原住民的生态资源》。[12]Talia Speaker、Stephanie O'Donnell、George Wittemyer、Brett Bruyere、Colby Loucks、Anthony Dancer、Marianne Carter、Eric Fegraus、Jonathan Palmer、Ellie Warren 和 Jennifer Solomon。《基于全球社群贡献的保护技术现状评估》。《保护生物学》，36(3):e13871，2022年。电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/cobi.13871.[13] 生态学计算机视觉暑期研讨会。https://cv4ecology.caltech.edu/index.html.[14] Wildlabs 保护技术培训与教育。 - https://www.wildlabs.net/groups/conservation-tech-training-and-education.[15] M. K. Obrist 和 P. Duelli。《用于监测本地平均物种丰富度及相关生态系统服务的节肢动物生物多样性快速评估》。《生物多样性与保护》，19(8):2201–2220，2010年7月。[16] Daniel T. Blumstein、Daniel J. Mennill、Patrick Clemins、Lewis Girod、Kung Yao、Gail Patricelli、Jill L. Deppe、Alan H. Krakauer、Christopher Clark、Kathryn A. Cortopassi、Sean F. Hanser、Brenda McCowan、Andreas M. Ali 和 Alexander N. G. Kirschel。《利用麦克风阵列对陆地环境进行声学监测：应用、技术考量与展望：声学监测》。《应用生态学杂志》，48(3):758–767，2011年6月。[17]Larissa Sayuri Moreira Sugai、Thiago Sanna Freire Silva、Jos´e Wagner Ribeiro Jr 和 Diego Llusia。《陆地被动声学监测：综述与展望》。《生物科学》，69(1):15–25，2019年1月。[18] Andrew P. Hill、Peter Prince、Jake L. Snaddon、C. Patrick Doncaster 和 Alex Rogers。《AudioMoth：一种用于监测生物多样性和环境的低成本声学设备》。*Hard-wareX*，6:e00073，2019年10月。[19] Andrew P. Hill、Peter Prince、Evelyn Pi˜na Covarrubias、C. Patrick Doncaster、Jake L. Snaddon 和 Alex Rogers。《AudioMoth：用于监测生物多样性和环境的智能开放式声学设备评估》。《生态学与进化方法》，9(5):1199–1211，2018年。电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/2041-210X.12955.

-

[20] Natalia Revilla-Mart´ın、Ivana Budinski、Xavier Puig-Montserrat、Carles Flaquer 和 Adri`a L´opez-Baucells。《利用远程被动声学探测器监测穴居蝙蝠：洞穴监测的新方法》。生物声学，30(5):527–542，2021年9月。出版方：Taylor & Francis；电子版：https://doi.org/10.1080/09524622.2020.1816492。

[21] Ellie Roark 和 Willson Gaul。《偏远栖息地迁徙时间监测：评估长时音频记录的价值》。《鸟类保护与生态学》，16(1)，2021年6月。出版方：The Resilience Alliance。

[22] Timothy A. C. Lamont、Lucille Chapuis、Ben Williams、Sasha Dines、Tess Gridley、Guil- herme Frainer、Jack Fearey、Permas B. Maulana、Mochyudho E. Prasetya、Jamaluddin Jompa、David J. Smith 和 Stephen D. Simpson。《HydroMoth：测试一种用于水生环境的低成本声学记录仪原型》。《生态学与保护中的遥感》，8(3)：362–378，2022年。电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/rse2.249。

[23] Joshua M. Pearce。《使用免费开源硬件构建研究设备》。《科学》，337(6100)：1303–1304，2012年9月。出版方：美国科学促进会。

[24] Joshua M. Pearce. 科学免费开源技术的经济效益：综述。*HardwareX*，8:e00139，2020年10月。

[25] Peter G. Smith. 专业网站性能：优化前端与后端。John Wiley & Sons，2012年11月。Google-Books-ID：MHLJlUfXV4QC。

[26] Richard J. Fair、Ryan T. Walsh 和 Christopher D. Hupp。DNA编码化合物库的反应工具箱不断扩展。《生物有机与药物化学快报》，51:128339，2021年11月。

[27] Mariyam Dairawan 和 Preetha J. Shetty。DNA提取方法的演变。美国生物医学科学与研究杂志，8(1):39，2020年3月。出版商：biomedgrid。

[28] Philip Francis Thomsen 和 Eske Willerslev。环境DNA——一种用于保护领域监测过去与当前生物多样性的新兴工具。生物保护，183:4–18，2015年3月。

[29]Sophie von der Heyden。《非洲生物多样性的环境DNA调查：知识现状、挑战与机遇》。环境*DNA*，n/a（n/a）。电子预印本：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/edn3.363。

[30]Ana¨ıs Lacoursi`ere-Roussel 和 Kristy Deiner。环境DNA本身并不是保护工具。鱼类生物学杂志，98(2):383–386，2021年。电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jfb.14177。[31]W. Amos、H. Whitehead、M. J. Ferrari、D. A. Glockner-Ferrari、R. Payne 和 J. Gordon。脱落鲸类皮肤中可限制性DNA的提取及其在种群分析中的潜在用途。海洋哺乳动物科学，8(3):275–283，1992年。电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1748-7692.1992.tb00409.x。[32] 沈梅、肖能文、赵子毅、郭宁宁、罗尊兰、孙广和李俊生。与地笼相比，环境DNA宏条形码分析有望成为监测北京水系鱼类多样性的保护工具。《科学报告》，12(1):11113，2022年6月。编号：1，出版方：Nature Publishing Group。

[33] Bethany Nordstrom、Nicola Mitchell、Margaret Byrne 和 Simon Jarman。环境DNA在爬行动物保护与管理中的应用综述。《生态学与进化》，12(6):e8995，2022年。电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ece3.8995。[34] Marcelle Lock、Iris van Duren、Andrew K. Skidmore 和 Neil Saintilan。利用遥感和环境DNA技术，将森林保护政策与关键生物多样性变量相协调。《森林》，13(3):445，2022年3月。编号：3，出版方：多学科数字出版研究所。[35] Morgan R. Gostel 和 W. John Kress。DNA条形码不断扩大的作用：生态学、进化与保护不可或缺的工具。《多样性》，14(3):213，2022年3月。编号：3，出版方：多学科数字出版研究所。[36] Yisong Yu。加州理工学院 CS155：机器学习与数据挖掘，第1讲，2022年。[37] Richard Szeliski。计算机视觉：算法与应用。Springer Cham，第2版，2022年。https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-34372-9。[38] Daniel Reed、Dennis Gannon 和 Jack Dongarra。重新构想高性能计算：挑战与机遇，2022年3月。arXiv:2203.02544 [cs].[39] Seek by iNaturalist。

[40] Merlin Bird ID。

[41] Sara Beery、Elijah Cole 和 Arvi Gjoka。iWildCam 2020 竞赛数据集。*arXiv* 预印本 *arXiv:2004.10340*，2020年。[42] Sara Beery、Grant Van Horn 和 Pietro Perona。未知领域中的识别。载于欧洲计算机视觉会议（*ECCV*）论文集，第 456–473 页，2018年。[43] Sara Beery、Dan Morris 和 Siyu Yang。用于相机陷阱图像审查的高效流程。*arXiv* 预印本 *arXiv:1907.06772*，2019年。[44] Amanda J. Zellmer 和 Barbara S. Goto。城市野生动物廊道：为野生动物和人类搭建桥梁。《可持续城市前沿》，4，2022年。[45]Justin Kay、Peter Kulits、Suzanne Stathatos、Siqi Deng、Erik Young、Sara Beery、Grant Van Horn 和 Pietro Perona。加州理工学院鱼类计数数据集：多目标跟踪与计数的基准。载于欧洲计算机视觉会议（*ECCV*），2022年。[46] 联合国环境规划署。非法野生动物贸易的环境影响分析，2017年。https:// wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/17554。[47] Lily Xu、Andrew Perrault、Fei Fang、Haipeng Chen 和 Milind Tambe。绿色安全领域基于极小极大遗憾的稳健强化学习。载于第 *37* 届人工智能不确定性会议论文集（*UAI-21*），2021年。[48] Rachel Love Nuwer。《盗猎：野生动物贩运黑暗世界内部》。Hachette UK，2018年。[49] Burcu B. Keskin、Emily C. Griffin、Jonathan O. Prell、Bistra Dilkina、Aaron Ferber、John MacDonald、Rowan Hilend、Stanley Griffis 和 Meredith L. Gore。野生动物贩运供应链的定量调查：综述。《*Omega*》，第 102780 页，2022年。

[50] Alex Krizhevsky、Ilya Sutskever 和 Geoffrey E Hinton。基于深度卷积神经网络的 ImageNet 分类。25，2012年。[51] Zhang W. Liu D. Li W. Shi X. and Fang F. Chen, W. 数据驱动的多模态反盗猎巡逻规划。载于*AAAI*人工智能会议，2021年。[52] Tesfaw Melkamu Adugna 和 Dessie Almaw Cherie。埃塞俄比亚保护性农业实践的成功与失败综述。《国际环境化学杂志》，5(1):7，2021年 5 月。编号：1。出版商：Science Publishing Group。[53] Scott R. Loss、Tom Will 和 Peter P. Marra。自由放养的家猫对美国野生动物的影响。《自然通讯》，4(1):1396，2013年 1 月。编号：1。出版商：Nature Publishing Group。[54]Kerrie Anne T. Loyd 和 Sonia M. Hernandez。美国东南部公众对家猫的认知及对流浪猫管理的偏好。《*Anthrozo ̈os*》，25(3):337–351，2012年 9 月。出版商：Routledge，电子版：https://doi.org/10.2752/175303712X13403555186299。[55] S.K. Willson、I.A. Okunlola 和 J.A. Novak。鸟类安全：一种新型猫项圈能否减少家猫（家猫）造成的鸟类死亡率？《全球生态与保护》，3:359–366，2015年 1 月。[56] Gaurav Byagathvalli、Elio J. Challita 和 M. Saad Bhamla。由好奇心驱动的节俭科学。《工业与工程化学研究》，60(44):15874–15884，2021年 11 月。[57] 博茨瓦纳捕食者保护信托（2022年）。豹 csv 自定义导出。https: // lila.science/datasets/leopard-id-2022/。

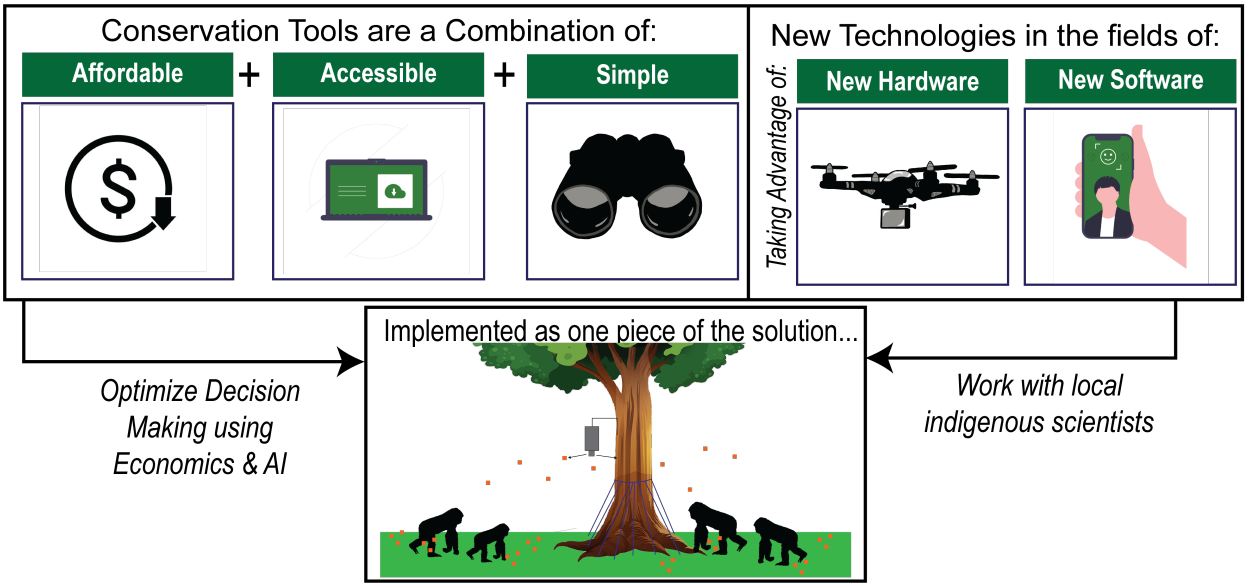


图1：视觉摘要，展示了本文讨论的保护工具框架。剪影由 Gabriela Palomo-Munoz 和 Undraw.co 创作。

Conservation Technology Terminology

Term	Defenition	Reference
Conservation Tools	Devices that are made and developed to be applied to conservation of wildlife	*This Study*
Conservation Technology	An interdisciplinary field that works to design technology to help prevent the sixth-mass extinction	*Bergertal 2018*
In-situ conservation	Conservation of a species at the original place, e.g. in the wild	*Braverman 2014*
Ex-situ conservation	Conservation of a species in a captive setting, e.g. at a zoo	*Braverman 2014*
Opportunistic technology	Devices that are built for a particular industry, such as camera traps designed for hunters, but utilized for a different purpose, such as biologits using camera traps for ecology studies	*Bergertal 2018*
Silver-bullet solutions	A one size fits all solution that can address and solve any issue	*Shaw 2017*
Human-Centered Design	A design thinking that takes the context-of-use of the exact device as the primary design component	*Jacobson 2000*
Context of Use	A design thinking that takes the context-of-use of the exact device as the primary design component	*Jacobson 2000*
Indigenous design	A design thinking that is designed by the indigenous populations that are the most familiar with the conservation initiatives	*Nawrotski 2010*
Colonization of conservation	The historical implication that is conservation is performed by those that colonized the states where the conservation is performed	*Loss 2011*
open-source solutions	Solutions that are open access and solutions are fully accessible by the public to re-create, re-design, and re-invent	*Lerner 2005*
Frugal technology	Technology that is built using frugal science techniques and	*Byagathvalli 2021*
Frugal science	The concept of re-purposing existing materials or products for uses other than that they were originally intended is not new	*Byagathvalli 2021*
Passive solutions	Technologies for species monitoring and conservation	*Lahoz-Monfort 2012*
Active Solutions	Technologies that are specifically for active solutions in the conservation tech field that directly interact with the species, such as invasive species eradication	*This Study*
Supervised Learning	A machine learning subset of problems where the available data has labeled examples	*Stuart 2010.*
Unsupervised Learning	A machine learning subset of problems that analyzes and clusters unlabeled data	*Schmarje 2021*
Self-supervised Learning	A machine learning subset in which a model trains itself to learn part of the input from another part of data, often leveraging the underlying structure of the data	*Hendrycks 2019*
Object Detection	The computer vision process of detecting instances of semantic objects of a particular class or set of classes	*Lin 2014*
Classification	The computer vision process of predicting a class of one object to an image	*Krizhevsky 2012*
Object Re- Identification (ReID)	Takes object detection one step further by matching a given object in a new environment to the same object in a different environment	*Stewart 2021*
Tracking	The computer vision task of taking a set of initial object detections, creating a unique identifier for each detection, and tracking each object over a series of time	*Yilmaz, 2009*
Fine-Tuning	The computer vision process of taking a model that has been trained on one task and tuning it to make it perform a different, similar task	*This Study*
Transfer- Learning	A machine learning method that uses a pre-trained model as the starting point for a model in a new task (i.e. it has already learned how to "see" one set of things, and will be trained again to get better focus on another set of things)	*Zhuang, 2019*

Created with Datawrapper

表 1： 采用先进和新技术开发保护工具的不同群体所使用的术语，以及了解各术语更多信息的参考资料。

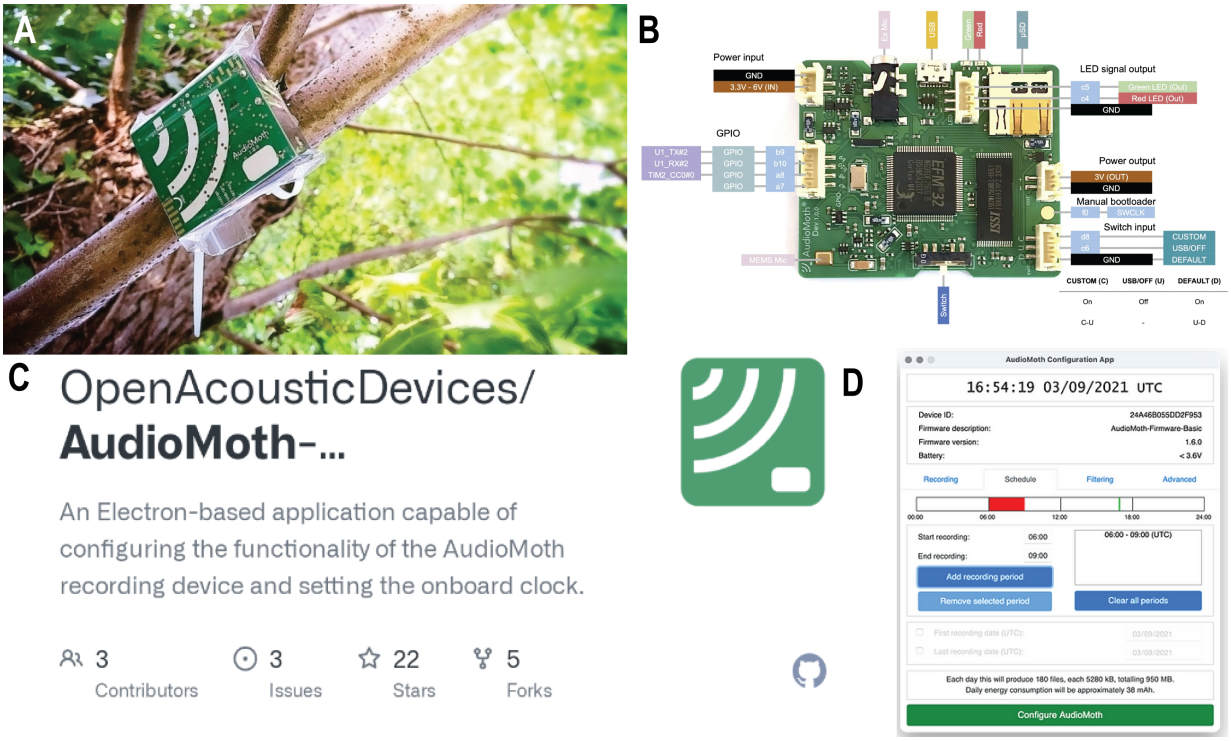


图 2： A）Audiomoth；B）Audiomoth 网站上提供的开源印刷电路板；C）通过 GitHub 控制 Audiomoth 并解读其数据的开源代码；D）面向 Audiomoth 用户的在线及基于应用程序的用户界面。经许可，图像取自 AudiomMoth 网站。

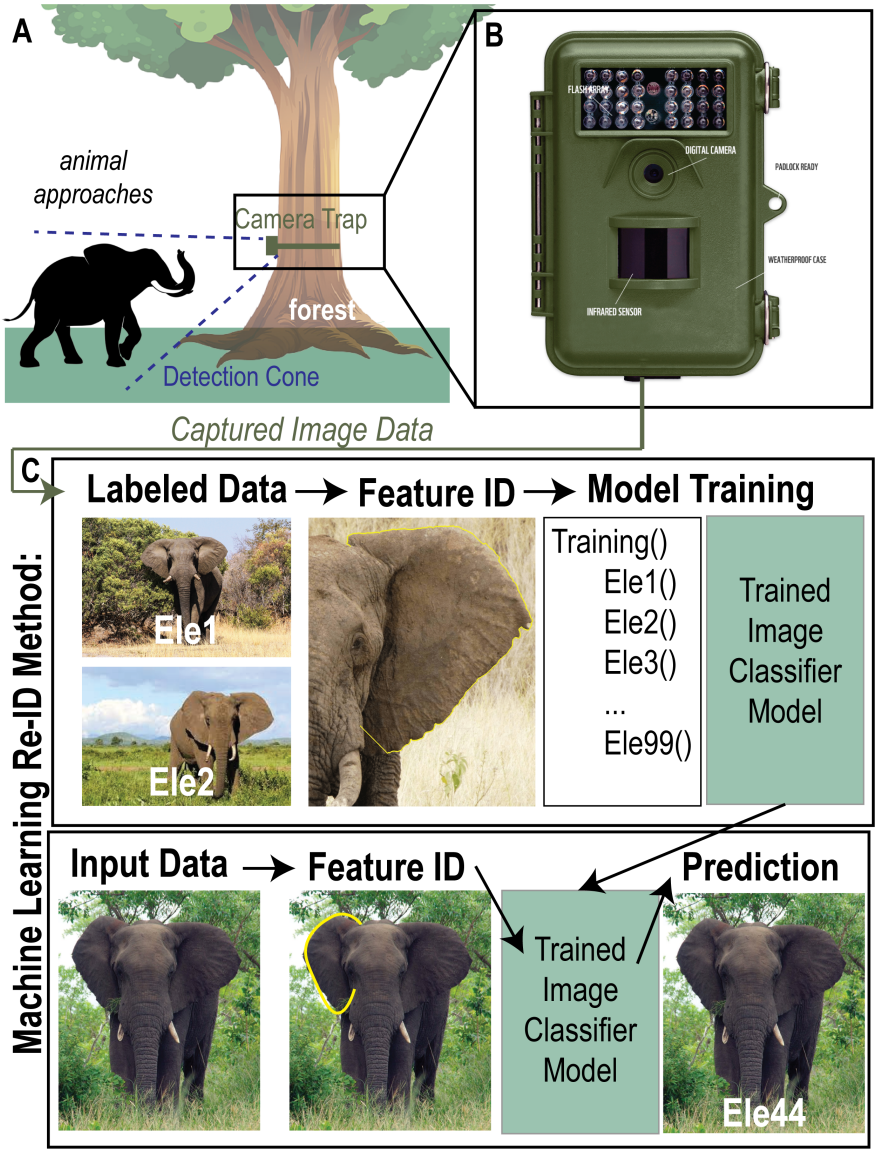


图3：基本相机陷阱设置。A）伪装的相机陷阱通常放置在树上或杆上。B）相机陷阱模型。它配备了运动触发传感器、数码相机和存储卡。当动物经过感兴趣区域时，相机会以指定的帧率捕捉该动物的照片/视频。C）该图使用来自 LilaBC[57] 的数据集和来自 Flickr 的图像制作。

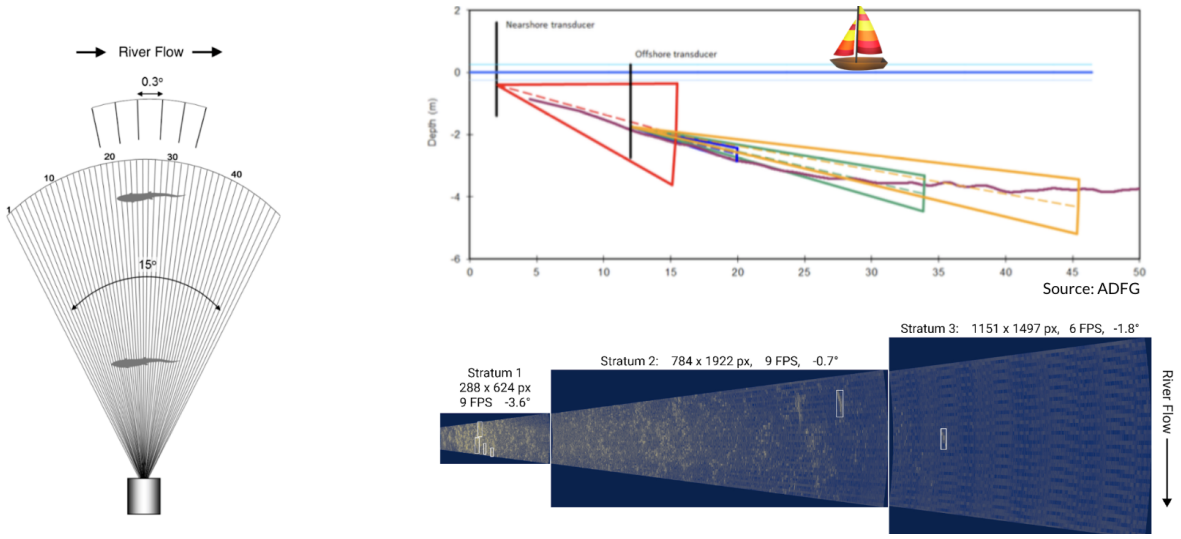


图4： 声呐摄像机布置：这里展示了一些摄像机部署示意图。左侧可以看到摄像机发射出多束声学声呐波束，用于以高分辨率探测鱼。鱼离摄像机越近，分辨率就越高。右上方展示了这些声呐摄像机的布置方式，以便“看到”鲑鱼可能游过的所有区域。共有两台声呐摄像机：带红色三角形的摄像机只能捕捉一个视场；带三个窄三角形的摄像机则在捕捉三个不同分层之间来回切换（在第一个分层拍摄20分钟，在第二个分层拍摄20分钟，在第三个分层拍摄20分钟）。右下方的图像展示了这三层图像合并后的效果。白色方框标出了游过溪流的鱼。图像由阿拉斯加州鱼类与狩猎部和加州理工学院提供[45]

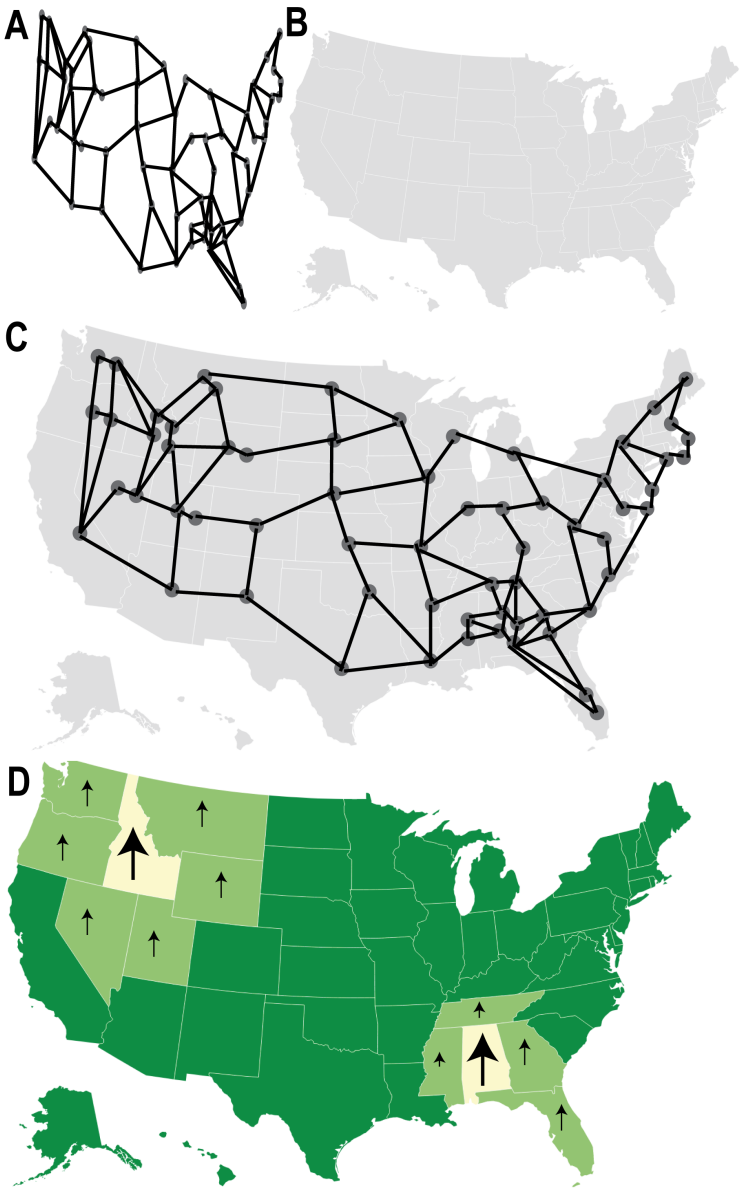


图5： 运用博弈论和优化来推进保护实践。A）将保护问题映射为数据，以确定哪些州的保护资金需求最为迫切。B）美国原始地图。C）将 A 中所示的聚类图像与美国原始地图叠加。D）数据解读地图：在最需要保护的州以较大的箭头标示，以较小的箭头（浅绿色）标示聚类开始形成的州。图像使用 DataWrapper 制作。

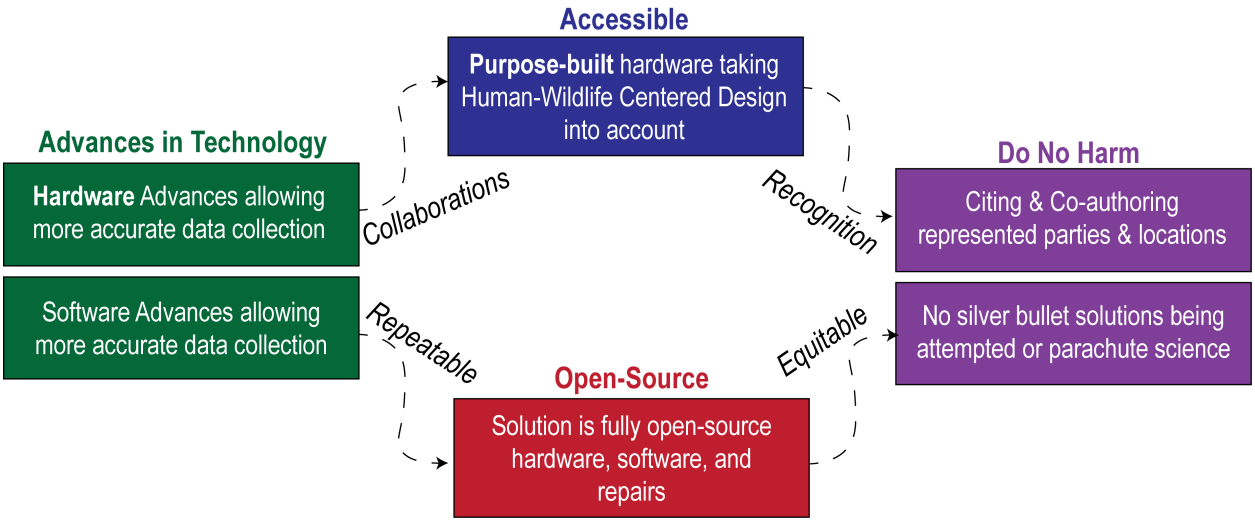


图6：设计并利用技术开发新型保护工具的过程。剪影由 Gabriela Palomo-Munoz 和 Undraw.co 制作。