

羊的物理学——从相变到集体运动

(中国科学院国家天文台 苟利军 编译自 Philip Ball. *Physics World*, 2024, (11): 27)

你可能听过这样一个老笑话：一位物理学家在被要求用科学帮助奶农时，他开始用真空中的球形奶牛(spherical cow)来进行近似模拟。不过，也许是时候重新审视这种讽刺了，因为基于物理的模型往往过于荒诞地简化了像家畜一样复杂的系统。当然，如果你想了解一头奶牛或一只羊如何生活，近似成球体可能并不是一个好主意。但是，如果你想了解一群动物的集体行为，将单个动物简化成粒子——即使不是球体，至少是椭球体(或“牛椭体”，英文是 bovoids；你明白我的意思了吗？)——却能学到很多东西。

过去几年中，通过这种方法，研究人员不仅对羊群的行为有了新的认识，还开始解释牧羊人如何进行羊群控制——甚至可能为他们提供新的控制技巧。欢迎来到正在兴起的“羊群物理学”领域。

同类相聚的“鸟体”

基于物理的生物集体动态模型有着悠久的历史。1987年，美国加利福尼亚计算机公司的软件工程师雷诺兹(Craig Reynolds)编写了一种算法，试图模拟鸟群的聚集。通过观察当地墓地里的黑鸟聚集行为，雷诺兹直觉地认为，每只鸟都会根据一些简单规则对其邻近的鸟的运动作出反应。

他称其模拟的鸟为“鸟体”(boids，是“鸟”和“机器人”两个词的结合)，这些“鸟体”会调整自己的速度和方向以配合邻近的个

体，并避免碰撞，就好像彼此之间存在排斥力一样。这些简单规则就足以生成类似现实中黑鸟或椋鸟那种惊人的集体飞行和“飞舞”的场景，它们仿佛完美地同步在一起飞行。雷诺兹的算法被用于电影动画中，比如《狮子王》中的牛羚群。

在之后的二三十年里，这些模型被其他研究人员修改和扩展，其中包括之后的诺贝尔物理学奖获得者乔治·帕里西(Giorgio Parisi)，以研究从鸟类到成群的鱼类再到群聚的细菌等生物的集体运动。这些研究推动了活性物质科学的兴起，其中的粒子(可以是简单的胶体)通过自身的推动力而运动。20世纪90年代末，匈牙利罗兰大学的物理学家Tamás Vicsek及其学生Andras Czirók揭示了这些自驱粒子的集体运动与规则阵列中磁自旋的重新定向之间的类比，这些磁自旋同样“感知”并响应邻居的行为。

特别是，群体运动可以经历突然的相变——行为模式的整体转变，这类类似于物质在改变个体运动因素(如平均速度和相互作用强度)时转变为整体磁化状态。通过这种方式，可以用相图来概括集体运动，就像描述气态、液态和固态物质在温度和密度等变量变化时的相图一样。

类似的模型现在已被用于探索不仅是动物和细菌的动力学，也包括道路交通和人类行人的动力学。它们可以预测现实世界中看到的各种复杂行为，例如交通拥堵中的停

走波动或人群的恐慌状态转换。然而，这些模型对个体代理的表示方式对于人类来说几乎是侮辱性地简单，好像我们只是被盲目力量驱动的无特征粒子。

跟随领导者

如果这些模型对人类有效，那么你可能会认为对羊群也同样适用——毕竟，面对现实，羊在行为和心理上似乎比我们简单得多。但如果你真这么看待羊，那你可能从未牧养过它们。羊无疑是带有明显特性的“粒子”。

“为什么鸟、鱼或羊要像磁自旋一样行动呢？”法国塞尔吉-巴黎大学的Fernando Peruani问道，“作为物理学家，我们可能希望如此，但动物们可能有不同的看法。”为了理解羊群的真实行为，Peruani及其同事首先查看了现有的数据，并尝试找出描述和解释这些行为的方法。

Peruani表示，首先，“真实的群体并不是一直在移动，动物们需要进食、休息、寻找新的觅食区等”。现有的集体动物运动模型无法容纳这种在静止和移动阶段之间的间歇性切换。而且，鸟类的“飞舞”似乎并没有特定个体引导其集体行为，但某些动物群体确实表现出角色层次。

例如，大象、斑马和森林小马倾向于排成行列移动，这样前排的动物具有特殊的地位。这样的层次结构的优势在于群体可以快速响应领导者的决策，而不需要在整个群体中达成一致。不过，这也意味着

群体依据的信息量比汇聚所有成员信息的情况要少。

为了建立羊群行为的模型，Peruani 及其同事采取了很简单的方法，观察了仅由两到四只羊组成的小群体，这些羊可以在大草场中自由移动。他们发现，这些群体大部分时间在觅食，但偶尔会成群的排成一行，跟随最前方的羊离开。

他们还观察到，在每次这样的外出活动中，群体中的任何成员都有可能随机带头。换句话说，正如 George Orwell 著名的形容某些猪的话，所有的羊都是平等的，但有些羊(暂时)更平等。Peruani 及其同事猜测，这种领导者的轮换使得信息可以部分整合，而无需群体不断进行决策协商。

研究人员接着设计了一个简单的模型来模拟该过程，其中每只个体都有一定的概率从觅食状态切换到移动状态，反之亦然——这有点

像激发原子发射光子的跃迁概率。经验数据表明，这种概率取决于群体规模，群体越大，这种可能性越小。一旦一只羊触发了“行走阶段”，其他羊便会跟随以保持群体的凝聚力。

在他们的模型中，每个个体都感受到一种对其他成员的吸引力和凝聚力，在移动时倾向于与邻近个体的方向和速度保持一致。Peruani 及其同事展示了该模型如何在集群“觅食模式”和排队的集体运动之间发生间歇性转换(图1)。他们还能够量化模拟羊之间的信息交换，并发现随机更换领导角色确实能够使每个个体所获得的信息在群体间有效整合。

虽然此处的群体规模较小，但该团队拥有大规模羊群采用相同“跟随领头羊”阵型的视频资料，尽管在视频中羊群在多条线路上同时进行。他们目前正在进行一系列实

验，以更好地理解行为规则——例如，使用警报器观察羊对外部刺激的反应，研究由不同年龄(及其相应行为倾向)的羊组成的群体，以探讨变异性的影响。

该团队还在研究训练过的个体羊是否可以在整个羊群中“播种”(seed)这种行为。然而，Peruani 表示，这类实验并不容易，因为招募牧羊人很难。在欧洲，他们往往生活孤立，收入微薄，因此不太愿意参与科学合作。

优秀的牧羊人

当然，传统上牧羊人并不依赖训练有素的羊来驱动物羊群，而是使用经过数月训练的牧羊犬来执行任务。如果你曾观察过牧羊犬的工作，就会发现它们的工作极其复杂——当然这可能不是物理学能够轻易解释的。然而，美国哈佛大学的机械工程师 Lakshminarayanan Mahadevan 认为，牧羊犬的任务基本上是控制理论的实践：寻找一种轨迹，以高效且精确的方法引导羊群到达特定地点。

Mahadevan 及其同事发现，即使是这种现象也可以通过一个相对简单的模型来描述。通过观看牧羊犬在 YouTube 上的活动视频，他得出了两种影响羊群反应的关键因素。羊喜欢待在一起——羊群具有凝聚力；其次，羊不喜欢牧羊犬——羊和犬之间存在排斥力。“这就足够了吗？凝聚力加上排斥力？”Mahadevan 问道。

研究人员写下了描述动物轨迹的微分方程，然后应用标准优化技术来最小化描述目标结果的量：将羊群移动到特定位置而不丢失任何羊。尽管这个动力学问题看似复杂，但他们发现最终可以归结为一个简单的图景。事实证明，决定最

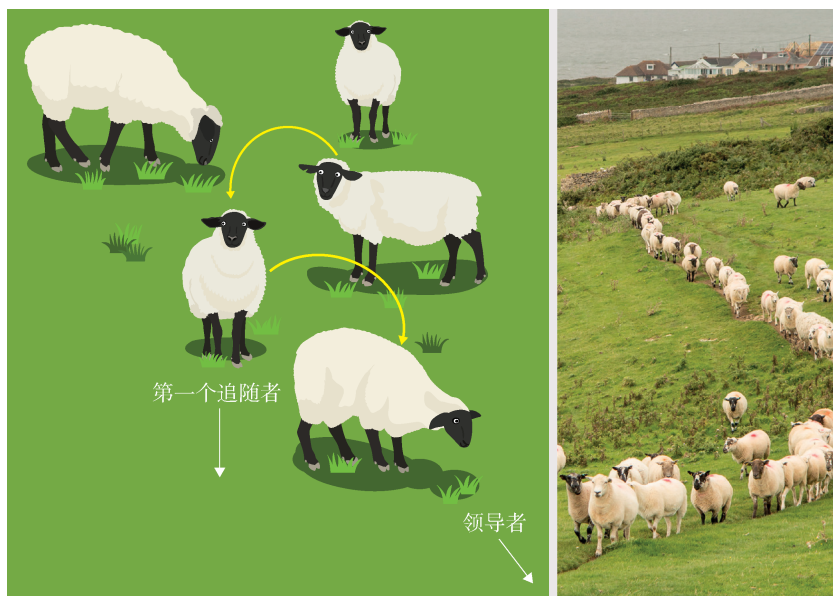


图1 羊是否像磁自旋一样？在磁性材料中，磁自旋之间的相互作用可以促使它们相互对齐(或反对齐，取决于材料的性质)。在 Peruani 及其同事设计的羊群集体运动模型中，假设每只羊的运动方向都由与其他羊的距离和相对方向角度的相互作用所决定。该模型预测羊群会松散地对齐，成行移动，跟随一个领头羊，沿着地形走出或多或少的曲折路径

佳牧羊策略的两个关键参数是羊群的规模和它在初始和最终位置之间移动的速度。

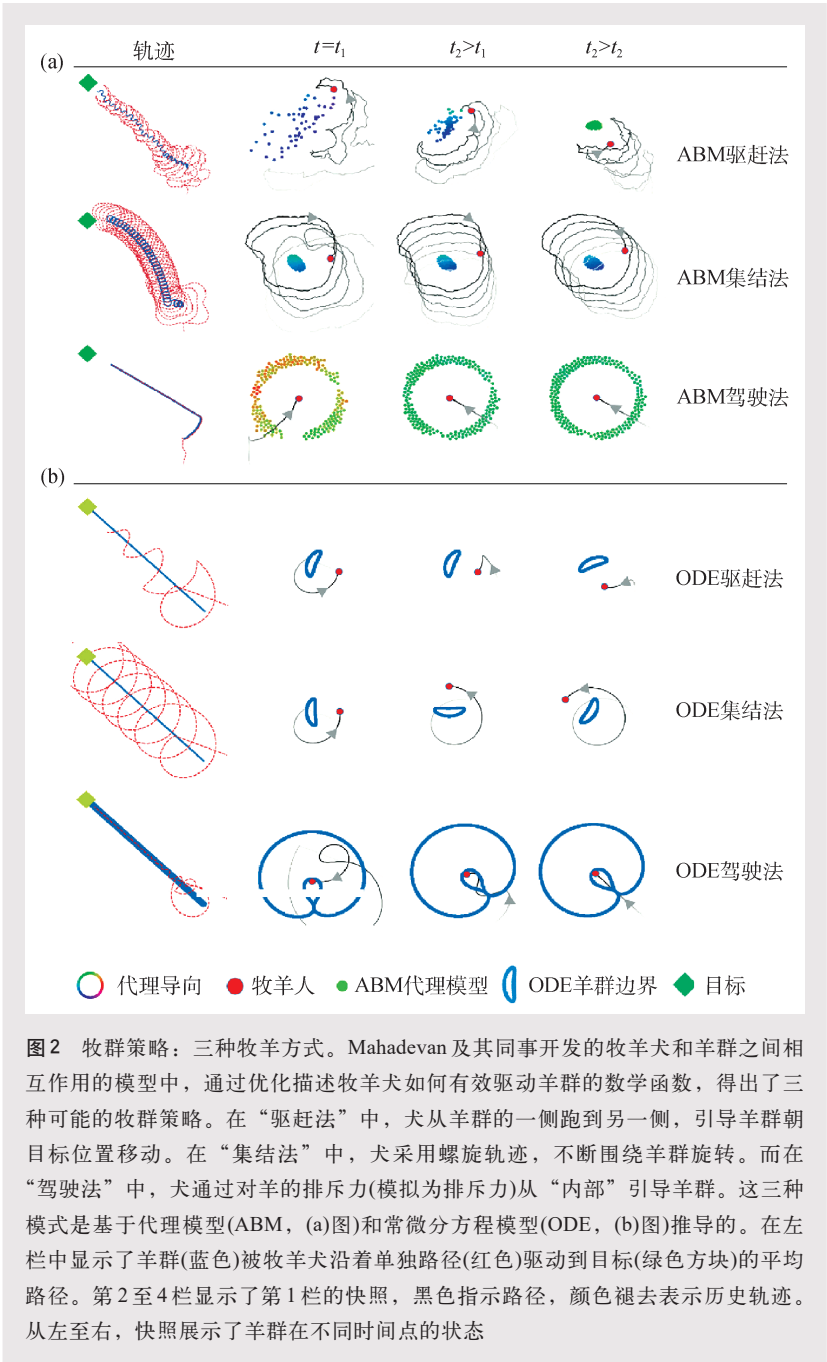
他们的模型自然产生了四种可能的结果。一个是牧羊失败：犬无法将羊群从A点一致性地带到B点。例如，如果羊群太大或犬速度太慢，可能就是这种情况。不过，还有三种有效的牧羊策略。

一种方法是犬不断从羊群的一侧跑到另一侧，将羊群引导至目标方向。这是牧羊人所熟知的“驱赶法”。然而，如果羊群相对较小且犬速较快，团队提出另一种更好的技术，称之为“集结法”。在这种情况下，犬通过围绕羊群螺旋形跑动来推动羊群前进。此时，羊群的整体形状不断变化，如同一个不稳定的椭圆，先沿着两个正交轴拉长再收缩，仿佛在“呼吸”。这两种策略在现实中都可观察到(图2)。

然而，模型生成的最终策略“驾驶法”，并没有在牧羊犬视频中观察到。在这个模型中，羊群足够大，犬可以跑到羊群中间，羊会后退但不会四散。随后，犬可以从内部推动羊群前进，就像汽车中的司机一样。此方法仅在羊群具有极强凝聚力时有效，而现实中的羊群是否具有如此明显的“黏性”尚不确定。

这些牧羊情景可以在相图中绘制出来，类似于物质状态的温度—密度图，但这里的两个轴为羊群的规模和速度。那么，牧羊犬或其训练员是否对这种相图有一种隐含的认知，尽管他们可能并未以这种方式来理解？Mahadevan怀疑牧羊技术实际上是通过试错法发展起来的——如果一种策略不起作用，他们会尝试另一种。

Mahadevan 承认，他和同事忽



略了一些可能重要的问题，尤其是他们假设这些动物能够看到周围的所有方向。羊确实有宽广的视野，因为它们像大多数猎物一样，眼睛位于头的两侧。但狗则像大多数捕食者一样，眼睛位于前方，因此视野更为有限。Mahadevan认为，纳入这些视力特征可能会改变相边界，但不会从根本上改变相图

的性质。

另一个混杂因素是羊在不同环境下可能会改变行为。美国亚特兰大佐治亚理工学院的化学工程师 Tuhin Chakraborty 与生物分子工程师 Saad Bhamla 也使用基于物理的模型研究了牧羊问题。他们认为，羊的独立行为与群体中的行为有所不同。单独的羊会逃离犬，而在群

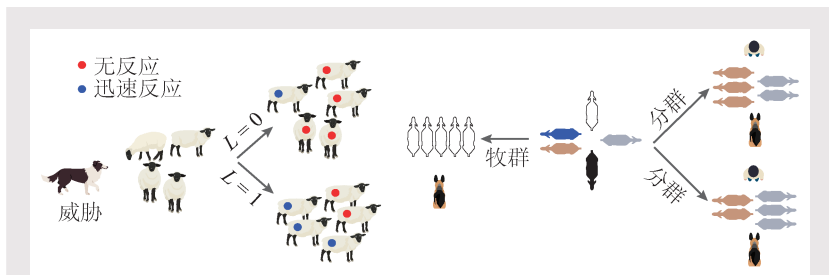


图3 重羊和轻羊：羊群与牧羊犬的互动方式。在 Chakraborty 和 Bhamla 设计的羊和牧羊犬相互作用的代理模型中，羊可能会通过调整自己的方向以背对或垂直面对附近的犬进行回应。不同的羊对此的反应倾向也不同——“重羊”会忽视犬，除非犬在正前方。牧羊犬的任务可能是让羊群背对它(牧群)或将羊群分成不同方向的子群(分群)

体中，羊采取更“自私”的策略，外围的羊会努力挤到内部以获得其他羊的庇护。

Chakraborty 补充道，与刻板印象相反，羊在对犬的反应上显示出相当大的个体差异。基本上，羊是有“性格”的。有些羊似乎对犬感到恐惧并很容易惊慌，而另一些羊则可能忽视甚至直面犬。牧羊人传统上将前一种羊称为“轻羊”(light)，而后一种称为“重羊”(heavy)。

在他们使用的基于代理的模型中(图3)，结果取决于群体主要是“轻”还是“重”。当模拟群体受到牧羊犬的“压力”时，可能会出现三种情况：无序地逃窜并散开的惊慌个体；形成一个凝聚的群体；或继续觅食，同时调整方向以正面面对牧羊犬，好像在远离威胁一样。

这些行为同样可以在二维相图中概括，两个轴分别表示羊群的规模以及所谓的“牧羊犬刺激的特异性”。该因素取决于控制刺激(羊—犬排斥力强度)与羊反应的随机噪声比率。他们表示，牧羊犬的试验通常在能够充分展示所有三种可能结果的群体规模下进行，从而对犬控制羊群的能力进行严格测试。

走进野外

羊的运动与鱼或鸟的运动之间的一个关键差异在于，羊的运动被限制在二维空间中。正如凝聚态物理学家们认识到的那样，问题的维度可以对相行为产生显著影响。Mahadevan 指出，海豚在试图引导鱼群以捕食时会利用维度性。为了便于捕猎，海豚通常先将鱼群赶入浅水区，将三维问题转化为二维问题。类似牧羊犬这样的牧者也可能利用空间约束效应来获得优势，例如使用围栏或地形特征帮助控制羊群，从而简化控制问题。研究人员尚未在模型中探讨这些问题。

正如海豚的例子所示，牧群是许多捕食者面临的挑战。Mahadevan 表示，他在野外观察到一群野狗试图围困牛羚时，亲眼见过这种行为。如果猎物本身能够采用群体策略来迷惑捕食者，问题就更加复杂了。例如，将群体分散以在攻击者中制造混乱或犹豫，这似乎是鱼类所采用的策略。这样一来，情况变成了博弈论中的情景，双方都在尝试预测并智胜对方。

羊似乎也能做出如此聪明且适应性强的反应。Bhamla 表示，有时羊似乎能识别牧民传达给犬的策略

信号，并在犬没有过多介入的情况下采取相应行为。而分割羊群有时也可以是牧羊计划的一部分：在某些牧羊犬比赛中，这实际上是一项任务，需要相当高的技巧。由于牧羊犬似乎本能地倾向于将羊群聚在一起，它们必须经过严格训练才能分割羊群。

德国马普动物行为研究所的 Iain Couzin 警告道，这些物理模型似乎能够再现现实生活中观察到的某些现象，但这也不意味着模型的规则就真实反映了动物行为的控制机制。他表示，人们容易“为统计物理的美丽所吸引”，从而忽视生物学。不过，他补充道，无论这些模型是否真实捕捉到了现场发生的情况，它们或许能为如何控制和引导类代理的实体群体提供有价值的借鉴。

尤其是，牧群研究可能会揭示可编程于人工牧群代理(如机器人或无人机)中的策略。Bhamla 与 Chakraborty 实际上已提出一种群体控制算法的实现方式。Chakraborty 说：“狗非常擅长推断和预测个别羊的特性以及羊群间的互动，这使它们能够实时调整策略。” Bhamla 则表示：“牧民们对无人机或机器人这一想法嗤之以鼻，他们认为技术还不够成熟，而狗已经有了数百年的定向进化与训练。”

或许这些发现对另一种“动物牧群”也有价值。Bhamla 开玩笑道：“也许这项工作可以应用于托儿所的孩子管理。我们中有一人有小孩，深知把一群小孩从一个房间带到另一个房间的挑战，尤其是在聚会时。或许这里也有一些借鉴之处。”正如任何试图组织小孩群体的人可能会说的话：祝你好运。