

## 重力测量进入量子时代

(华中科技大学 杨玉坤、周敏康 编译自 Michael Allen. *Physics World*, 2021, (12): 44)

人们熟知的量子技术大多与计算相关，一台好的、功能强大的计算机在解决复杂问题上是非常有吸引力的。计算机作为数据处理工具，无论是量子的还是经典的，都是将数据转换成信息后，才被用于工业、医学等领域，但前提是要有用来采集这些关键数据所必需的高质量传感器。

实际上，新型传感器和新的信息收集方式已引发诸多技术上和经济上的革命，“如果我们回顾历史，就会发现诺贝尔奖总是与传感器的发明相关，比如1901年伦琴(Wilhelm Röntgen)因发现X射线而获诺贝尔奖”，来自英国伯明翰大学的量子物理学家 Kai Bongs 说道，“当时没有人知道那是什么，但如今几乎每一家医院、机场扫描仪以及很多工业上的质量控制机等都在使用X射线，它们能让我们看到物体内部的信息，这是之前看不到的。”

Bongs 是英国量子传感与计时技术中心的学术带头人，该中心作为英国国家量子技术项目之一，拥有超过110个子项目，总资金达1.2亿英镑，其目的是促进量子传感器如磁传感器和重力传感器等方面的创新和商业化。这些技术在很多方面都有应用，包括气候、通讯、能源、交通、医疗和城市发展等。

“当我们谈论量子传感器时，我们指的是利用量子效应，如叠加或可能的纠缠，” Bongs 说道。叠加指的是粒子能够同时处于两个量子态或同时沿两条路径传播。“当这两条

路径重新汇合时，波包在两条路径之间的差别将会在末端产生量子干涉现象，这使得我们能够以非常高的精度测量造成这种差别的物理场。” Bongs 解释道。

这种量子效应被 Bongs 和他的同事们用于制备基于原子干涉的量子重力梯度仪，在该仪器中，两团原子分别处于不同的高度，并沿两个不同的路径演化，意味着这两团原子会感受到不同高度处差别极小的重力场，其干涉条纹的相位将包含重力及梯度的信息。

大多数经典的重力仪可以等效为悬挂有质量的弹簧，通过测量弹簧的伸缩来反映重力的变化，其缺点是弹簧本身也会受地面振动的影响而拉伸，这意味着这种仪器需要不断地校准才能使用，并且每一次读数都需要等待足够长的时间以平均地面振动带来的背景噪声的影响，这些振动包括驶过的卡车、火车和低强度的地震活动以及其他的振动等。

虽然弹簧式重力仪非常灵敏，但量子重力仪仍有优势所在：不管地面如何振动，量子重力仪只有一个整体的运动模式，没有类似弹簧的弹性特征。量子重力仪的装置、原子团以及探测原子下落的激光会一起运动。“你可以消除不必要的敏感源，” Bongs 说，“同时你也可以抑制地面振动等噪声，提高灵敏度。”他补充道。

在土木工程方面，重力传感器被用来探测地下的质量分布的差异，以帮助找到被掩埋的基础设施如管道、隧道和旧矿井等。其他技术如探地雷达虽然也用于此项工作，但不同的是，它们是主动技术，必须向地下发射信号，其探测距离受限于信号的传播衰减。“重力的真正优势在于它是被动的，我们不必预先输入信号，我们只需要在地面上测量就行了。”来自伯明翰的土木工程师 Daniel Boddice 解释道。只要地下物质在地表产生足够大的引力信号，我们就能探测到。

Bongs 承认，尽管重力传感器具有很大的潜力，但它们甚至在地球物理中也不常用，主要原因是：为了消除振动噪声的影响，你必须在一个位置探测足够长的时间，积累大量的数据，因此代价昂贵。来自伯明翰的土木工程师 Nicole Metje 认为产生噪声信号的不只是地震振动，“当你身处像公共交通、人员走



图1 量子重力仪因其更快速、更准确的特性而具有很多潜在的工程上的应用

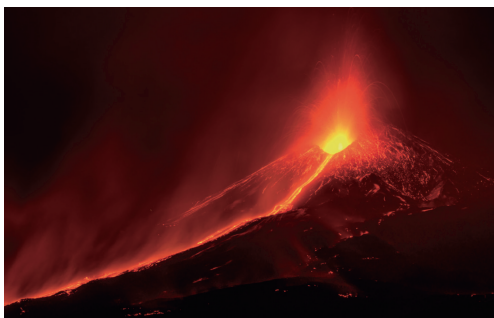


图2 量子绝对重力仪用于研究火山特性

动、钻井作业等环境中时，那些都会产生振动。”Boddice补充道，“量子传感器的真正优势在于我们能在更多的地方使用它，且能测得更快、更有效、更准确。”

最近Metje和Boddice利用量子重力仪在铁轨上探测涵洞(在铁轨下起排水作用的管道或结构)。如果被堵塞的话，道床就会被水浸透，产生所谓的“湿床”，这会影响轨道的稳定性，并产生类似倾角的结构问题，从而影响列车安全运行的速度，导致延误。这些涵洞可能被深埋在轨道之下，使得确定它们的位置和评估其状况变得困难。由于探地雷达的探测深度有时无法满足需求，而且工程师通常只有夜间几个小时的时间进行测量，因此在这种情况下，Metje认为重力传感器比其他任何方法都更有效。然而现有的基于弹簧的重力传感器测量速度很慢，但量子重力传感器由于没有振动产生的噪音，所以测量速度更快，而且也不需要是静止的。因此这种量子传感器可以安装在火车上，在火车行驶时扫描铁轨。伯明翰小组已在英国的部分铁轨上进行了测试。

来自RSK(一家英国环境与工程咨询公司)小组的George Tuckwell研究了如何将量子重力仪用于土木工程上的问题，RSK在早期通过评估

地面状况帮助客户降低建筑项目的风险，他们绘制出地面地图，以确定基岩和地下水的变化，以及地面上的其他自然和人工变化，如垃圾填埋场和采矿作业。这就避免了那些可能带来资金流失和延误的不可预见风险对项目的影响。

量子重力仪还可以被用于增强导航系统的有效性，近年来人们越来越重视GPS导航误差引起的载体位置偏离。特别是在海洋导航领域，当轮船收到错误的导航信号时，轮船就会错误估计其所处的真正位置，敌对势力或海盗很可能利用这种失误对轮船进行劫持和破坏，甚至引导轮船到敌对势力的海域范围——重现21世纪版本的Cornish沉船事故的导引灯笼。

如果我们能绘制出准确的重力网，轮船就能利用其携带的量子重力仪记录重力值并与重力网比较，以确定自身的位置。理论上，重力仪能够完全密封在盒子里，与外界隔离，这使得它不会被非法侵入。即使有人截断了轮船的通信、卫星和雷达导航系统甚至一切可以连接外界的工具，重力仍能进行导航。“唯一能够显著干预重力传感器的方式就是改变重力信号，而这意味着要搬动一座山那么大的质量。”Bongs解释道。

的确，重力仪能用来“探测看不见的信号”，法国 $\mu$ QUANS首席执行官Bruno Desruelle博士这么说道。该公司利用绝对量子重力仪研究意大利Etna火山山顶附近的地质活动已长达1年，研究者将很快就能得到并发布Etna火山的新信息。

测量火山附近的重力变化是很

重要的，因为它将给我们提供岩石、气体和岩浆等地下物质的密度变化。重力增加很可能意味着致密物质如岩浆的流入，而密度减小(重力减小)意味着存在渗坑。“这类研究的想法是，利用测量火山表面的重力来反演地下的地球物理过程，以获得火山内部运动更深入的理解。”Desruelle解释道。

量子重力仪已进入到实用阶段，Desruelle以他们的具体应用实例说道。“只要你想知道地下的质量分布，你就会在各种活动中用到量子重力传感器，这包括水文学、地震学，以及探测缝隙、渗坑、隧道和空腔的土木工程项目。很多人都对大地测量学的仪器感兴趣，”他补充说，“所以他们想要进一步了解地球圈层和重力分布图，很多研究机构被分配在不同区域进行重力网的绘制。”

对于工程上和地球物理方面的应用，原子下落的两个不同路径仅仅分开几毫米远，但只要增大仪器的尺寸就能极大地提高灵敏度，可以用来探测未知的不可见的物质，而这种物质(暗物质、暗能量)占了宇宙物质的85%以上。

截至今年1月，英国的研究与创新基金会资助了价值达3100万英镑的7个项目，希望利用量子技术解决基础物理中的重大难题。其中3个是发展量子增强干涉仪和传感器以寻找暗物质——探测轴子等候选物或检验时空的量子化理论等。通常科学中的颠覆性发现是在新技术和既有理论相融合的基础上完成的，我们或许还处在量子传感的黎明时期，但它已为我们指明一条更好的道路，并引导我们探索宇宙最深处的奥秘，这非常引人入胜和令人期待。