

大脑的量子传感技术

(中国科学院合肥物质科学研究院 张欣 摘译自 Hannah Coleman, Matt Brookes.

Physics World, 2021, (2):23)

大多医学成像的目的是获取身体内部结构信息,从而使医生获得可用于治疗的关键信息。但对于许多疾病,我们不止要了解其结构,更重要的是要去探究器官的功能。这一点对于评估包括癫痫、痴呆或精神健康问题在内的大脑紊乱疾病尤为重要。

脑磁图(MEG)是脑功能成像的一种新方法,用来测量流经神经元的电流所产生的磁场,其数学模型可以生成显示神经电流瞬间波动的三维图像(图1(a))。脑磁图是一种安全非侵入式的成像方式,被广泛应用于研究以及理解健康和疾病状态下的大脑(图1(b))。然而,大脑产生的磁场只有大约100 fT,约为地球磁场的十亿分之一,这意味着我们需要高灵敏度的探测器对其进行检测。多年来唯一可行的选择是超导量子干涉仪(SQUID)。但为了保持其超导性,SQUIDs必须冷却到 -269°C ,这一点限制了脑磁图的设计和发展。

量子革命

近年来,我们通过开发新的量子技术来解决脑磁图的局限性。其中,光泵磁强计(OPMs)的开发一直是关键。它们是量子磁场传感器,与SQUID具有类似的灵敏度,但并不需要低温。

美国公司QuSpin最近使光泵磁强计变得坚固、易于使用和容易获得,而微型化使新一代光泵磁强计变得小巧轻便(类似于乐高积木)。基于这个新设计,我们已将光泵磁强计集成到一个脑磁图设备原型机中。因为尺寸小,不需低温处理,所以可以直接安装在人的头部表面,从而提高了灵敏度。同时,传感器可随头部移动,适应受试者的运动,也可以适应任何头部大小。没有复杂的低温系统还使其生产和运行成本都明显较低。因此,促进了脑磁图的发展,使其更实用、更强大、更便宜,因而更适合临床使用。

然而,光泵磁强计在投入实际

应用之前还必须克服许多障碍,其中最大的障碍之一就是背景磁场的控制。大脑产生的磁场比我们周围由实验室设备、计算机、来往的汽车甚至我们自己的身体所产生的时变磁场都要小得多。它们对测量大脑磁场产生的干扰,就类似于在摇滚音乐会上要去听一根针掉下来的声音。而且还有地磁场的干扰,因为我们希望病人在扫描过程中能自由移动,这意味着允许磁强计相对于地球磁场移动。移动的光泵磁强计将测量与大脑无关的磁场变化,有时这甚至可以阻碍光泵磁强计的运行。因此我们必须尽可能地消除时变环境磁场和地磁场的影响。

我们可以通过结合主动和被动磁屏蔽来实现这种高保真控制。被动屏蔽包括将脑磁图系统放置在磁屏蔽室内。然而,即使最先进的被动防护罩也不能充分去除残余的磁场,因此还需引入主动磁场补偿系统。先由复杂的电磁线圈系统连接到一个单独的磁强计阵列,测量病

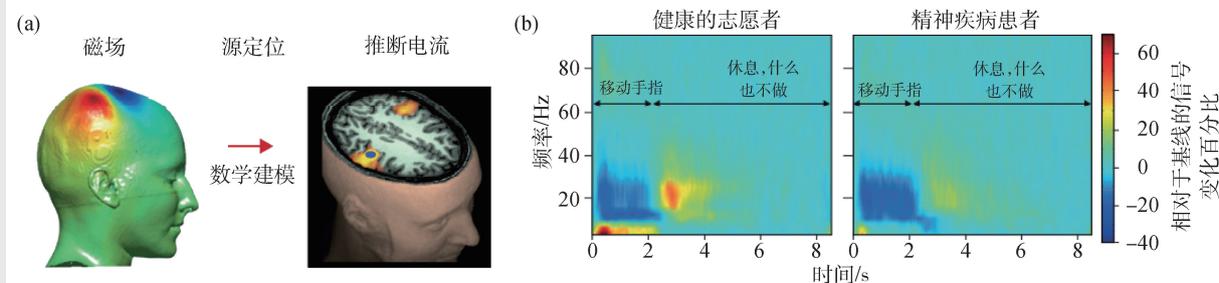


图1 脑磁图(MEG)的力量。(a)当有人移动手指时大脑初级运动皮层被激活,通过它们的电流所产生的磁场可以被脑磁图检测;(b)脑磁图可以从空间和时间上检测大脑活动,例如可用于检测精神分裂症患者中初级运动皮层与其他脑区之间的交流异常



图2 新一代的脑磁图仪。传统的脑磁图扫描仪笨重且大小不可调，需要病人保持静止。而利用光泵磁强计(OPMs)的新一代脑磁图仪作为一种可穿戴设备，适用于任何人，并且受试者可以自由活动，从而可以获得更好的高质量数据

人头部附近的磁场。然后，反馈回路利用这些磁场测量通过控制线圈阵列中的电流来产生一个反向磁场。如此结合起来几乎可以完全抵消病人头部区域的残余磁场。与Magnetic Shields公司合作，我们建立了一套独特的混合主动和被动屏蔽系统，可以把患者周围的地磁场从 $50\ \mu\text{T}$ 降低到 $\sim 200\ \text{pT}$ ，屏蔽系数约为250000。这项技术产生了一个大约 $0.5\ \text{m}^3$ 的空间区域，病人在扫描过程中可以自由移动。

为了实现光泵磁强计—脑磁图(OPM—MEG)系统，还必须解决一些其他问题。通过解析分析和计算机仿真相结合的方法对传感器在头部的精确布置进行优化。这使得光泵磁强计阵列能够有效对大脑磁场进行采样，同时也能减少“串扰”。同时，先进的3D打印技术可以将光泵磁强计传感器阵列固定在头部。电子控制和数据采集系统的开发实现了多达50个光泵磁强计的同步测量，同时需要单独的控制系统将光泵磁强计输出与线圈系统和患者刺激控制相结合。最后，重新开发的数学建模软件包允许基于光泵磁强计头皮水平场测量的大脑电流密度

成像。这些促生了世界首个可穿戴的光泵磁强计—脑磁图系统，可覆盖整个大脑(图2)。

可穿戴成像

这一量子技术和电磁理论的独特结合，使人们能够进行以前难以想象的神经成像研究，例如从测量打乒乓球时的大脑活动，到受试者探索虚拟世界时的脑磁图记录。而这仅仅是开始。最近成立的Cerca Magnetics公司正在将一个集成的光泵磁强计—脑磁图系统引入研究市场。许多正在进行的技术开发都集中在儿童大脑成像上，为神经发育的新研究开辟了可能性，例如，试想能够看到一个孩子在会走路或说话前后大脑功能的变化。这开启了无数的机会，促使神经科学家以一种全新的方式来构思实验。

除了神经科学之外，光泵磁强计—脑磁图成功的最终标志可能在于其临床应用。传统脑磁图可以通过识别特定类型的“棘波”活动来诊断癫痫。当需要进行切除手术来治疗药物无法控制的癫痫时，也可以用脑磁图进行定位，显著地增加手术成功几率。脑磁图还可以用来绘制癫痫病灶周围功能正常的运动

性语言中枢，这可以让外科医生避开这些区域，防止患者瘫痪。如今光泵磁强计—脑磁图的灵活性使患有癫痫的幼儿也能受益，其在运动过程中的稳健性显然也能让我们记录癫痫发作时的大脑活动，这对癫痫患者来说尤为重要。同时它也可以应用于其他疾病。例如，同样也为评估帕金森病患者提供了一个更好的方法，因为这些患者很难在传统系统中保持足够的静止状态。此外，光泵磁强计—脑磁图还可以测量大脑中被认为在严重的心理健康障碍中会出现的损伤。同时，老年人的“皮质减慢”(神经振荡频率改变的一种效应)的特征可能产生痴呆症发病的新的早期标志物。而这些只是一些可能受益于光泵磁强计—脑磁图新设备的大脑疾病。

归根结底，了解和管理人类大脑健康是21世纪的主要科学挑战之一，而应对这一挑战所需的步骤还远未明确。庆幸的是，从X光到核磁共振，从超声波到核医学，物理学一直能够提供改变生活的技术。展望未来，英国量子技术计划的这一早期成功案例有可能会成为下一代医疗技术的基石。