极低频电磁场的生物学效应

宋　涛

随着电工技术的发展，用电设施日益增多，相关的极低频电磁场对环境和人类健康的影响问题也越来越受到重视。所谓“极低频”，一般是指 300 Hz 及以下的频率。我们日常使用的交流电的频率是 50 Hz，也被称为工业频率（简称工频），是最典型的极低频。目前高压输电线路和轨道交通所产生的极低频电磁场对健康影响的问题受到广泛关注，甚至引起一些民事纠纷，严重干扰了一些关系到国计民生的重大项目的顺利实施。导致这种局面的根本原因是，虽然极低频电磁场对健康的影响问题已研究多年，但现有研究成果还无法给出明确清晰的答案。另外，随着特高压直流输电技术的发展和应用以及磁悬浮轨道交通技术的发展，交直流混合的电磁场环境会逐渐增多，也使得极低频电磁场对健康影响的问题更加复杂。

1. 问题的根源

大量研究认为较高强度的极低频电磁场对生物体的影响是明确的，因而可能对健康产生危害（相应的，也可能有一些治疗效应），但是较低强度（包括环境中）的极低频电磁场对健康的危害尚无法确定。

物理学家通常把人体看成是一个由不同导电特性的组织所构成的系统。根据物理学的计算分析以及对电磁场生物学效应实验结果的评估，国际非电离防护委员会于 1998 年制定了 0 ～ 300 GHz 的电磁曝露限制导则来规范职业人群和一般公众在电磁环境下的安全性问题，2010 年又对低频段（1 ～ 100 kHz）的电磁曝露限制导则进行了修订。按照 2010 年修订的电磁曝露限制导则，极低频电磁场产生生物学效应的关键是其在人体内产生的感应电场。对于公众曝露（即一般公众所处的）相关的极低频电磁场而言，一般组织的感应电场的基本限值是 0.4 V/m，但是对于头部的中枢神经刺激有更严格的要求，即感应电场的基本限值（单位 V/m）是：

$$\begin{cases} 0.5/f & 1\sim10\ \text{Hz时} \\ 0.05 & 10\sim25\ \text{Hz时} \\ 0.002f & 25\sim300\ \text{Hz时} \end{cases}$$

其中 f 是电磁场的频率。

由此可以通过电磁场的分析计算确定极低频电磁场中电场和磁场的限值。对 50 Hz 的工频电磁场，公众曝露的电场参考限值是 5 kV/m，磁场参考限值是 200 μT（1998 年版本的限值是 100 μT，我们国家通行的标准也是 100 μT）。

可以发现公众曝露的电场参考限值与人体内感应电场的基本限值有上万倍的差异，这是因为人体组织具有相对较高的电导率，对外界的电场有明显的屏蔽作用。

在输变电工程中非常关注电场的控制，但由于降低电场的工程措施较多，相关的争议并不是很大。与之相反，虽然环境中的极低频磁场强度并不高，但是其对健康影响的争议却较大。例如，日常居室环境中的平均工频磁场一般都在 0.1 μT 以下，远低于国际非电离防护委员会确定的磁场限值，似乎不必关注。但多项流行病学调查认为 0.4 μT 以上的工频磁场与儿童白血病的发病率呈正相关，而且世界卫生组织下属的国际癌症研究组织也将极低频磁场定为“可疑致癌物”。另一方面，不少物理学家根据简化的模型分析后认为环境中微弱的磁场在生物组织中的影响低于热噪声，因此不支持较弱的环境电磁场能对健康产生影响的结论。世界卫生组织 1996 年开始启动的“国际电磁场计划”对电磁场生物学效应进行了全面评估，2007 年发布了《极低频场环境健康准则（EHC No.238）》，一方面基本认可了国际非电离防护委员会 1998 年制定的电磁暴露限制导则，另一方面又提出了包括剂量学、生物物理机制、生物学效应实验和流行病学等多方面需要进一步开展研究的方向，目的

是减少极低频电磁场对健康影响的科学证据的不确定性。从该报告中可以看出，目前关于极低频电磁场的研究结果还是充满着各种矛盾，也有众多基础问题尚未解决。

总体来说，目前极低频电磁场生物学效应的研究面临两个问题：一是不同学者提供的实验结果往往难以一致或比较，有些实验得不到重复；二是没有可以被广泛接受的理论来解释较弱的极低频电磁场可能产生生物学效应的机理，以致在对健康的危险度的评价上往往难以得出明确的结论。

2. 自然界生物的启示

虽然一些物理分析表明环境中微弱的电磁场在生物组织中的影响明显低于热噪声，但一些特殊的生物体却具有感知如此低的电磁场的能力。有研究表明鲨鱼可以感受 0.5 μV/m 量级的电场。更加有趣的是不少长途迁徙的动物具有利用地磁场进行导航或辅助导航的能力，例如家鸽、鲑鱼，甚至包括蜜蜂、蝙蝠等。地磁场的大小一般在 50 μT 左右，要感知其变化，生物必须具有感知更弱磁场信息的能力。当然，地磁场基本上是一个恒定磁场（略有波动），与极低频磁场不同，但生物体受极低频弱磁场影响的机制可能与其感知地磁场的机制有密切的关系，不少学者推测外加的极低频弱磁场可能会影响对地磁场变化敏感的生物。目前，生物体感应微弱电场和微弱磁场的机制还不清楚，是当前研究的热点，特别在生物体感受地磁场的机制方面目前已经取得不少结果。

趋磁细菌是一类能沿着磁力线运动的特殊细菌，其体内含有由脂膜包被的单磁畴磁颗粒——磁小体。磁小体一般呈链状（单链或多链）排列，形成一个“生物指南针”，以感应磁场。在北半球发现的趋磁细菌向北运动；存在于南半球的趋磁细菌则向南运动；而在赤道附近的趋磁细菌则两种情况都有。趋磁细菌这种沿地磁场方向排列的趋磁运动有利于细菌寻找适合的生长环境。

与趋磁细菌类似，目前在很多具有感知地磁场能力的生物体内都发现有磁性颗粒。例如在家鸽和知更鸟的上喙部发现有磁性物质，在鲑鱼的骨窦也有磁颗粒，在工蜂腹部的滋养细胞内含有数个磁性颗粒，而每个颗粒内又含有八千多个密集的超顺磁粒子（直径均为 7.5 nm）。人们不禁要问，这些磁性颗粒在生物磁导航中起着怎样的作用呢？

更加另人惊奇的是人脑中也存在着磁性颗粒，其形态与趋磁细菌中的磁小体非常类似，但未发现其呈链状排列。进一步的研究确认人脑的海马组织就存在着 Fe_3O_4 颗粒。这些颗粒是如何产生的？有什么功能？是否可能成为外加磁场的作用靶点呢？一系列的问题引起了人们的广泛关注。

3. 生物的磁感受机制

1992 年美国学者科什文克等人首次探测出在人脑中存在有磁性颗粒。不久，科什文克就提出了一个基

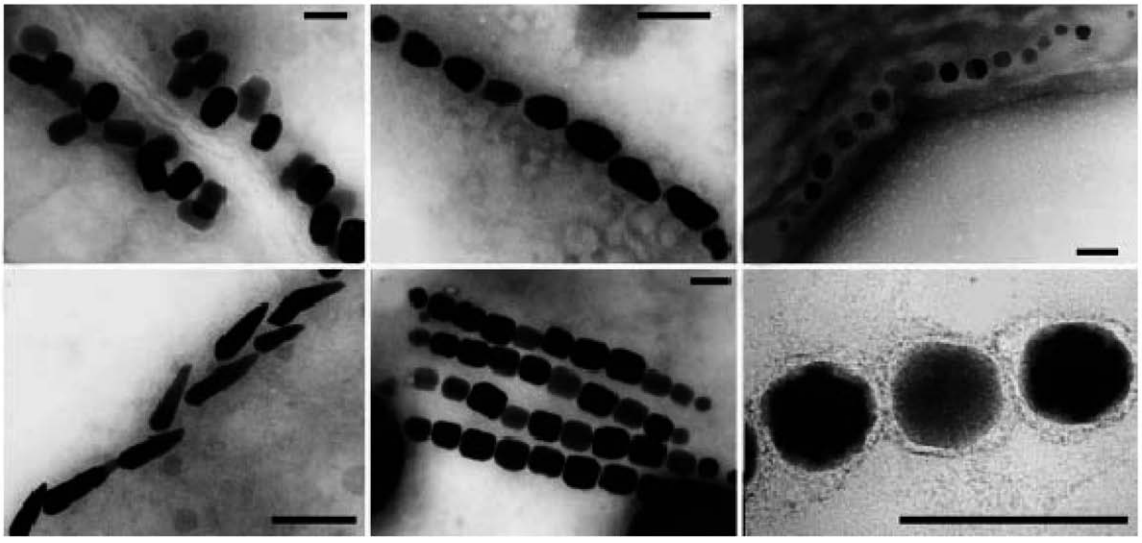


图 1　趋磁细菌中各种形态的磁小体（图片取自 Schüler 的文章）

于磁性颗粒的生物磁感受机制（图 2），基本模型是一个单磁畴的磁性颗粒与跨膜离子通道相连，外加磁场可使磁性颗粒偏转从而打开或关闭离子通道，进而产生生物学效应。

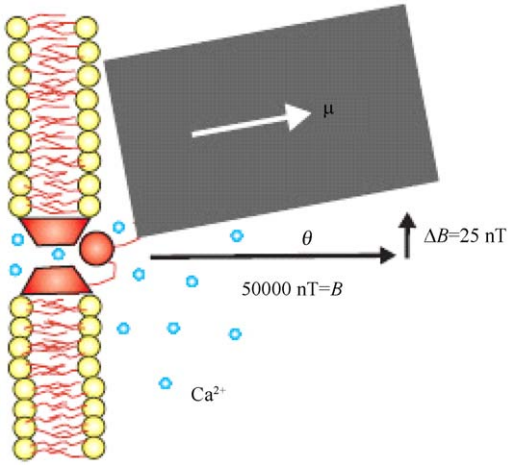


图 2　美国学者科什文克提出的基于单磁畴磁性颗粒的生物磁感受机制（图片取自 Kirschvink 的文章）

有学者注意到在家鸽喙部和蜜蜂腹部中的磁性颗粒大多是超顺磁颗粒，因而提出一个基于超顺磁颗粒的模型（图 3）：一串超顺磁的颗粒与神经细胞膜通过纤维相连，当外加磁场与颗粒串平行时，由于磁化了的颗粒之间吸力的作用，颗粒间距会变小；当外加磁场与颗粒串垂直时，磁力的作用会使颗粒间距变大；颗粒间距的变化会使细胞膜产生应力，从而导致离子通道的开启或关闭，进而导致生物学效应。

由此可见，基于不同结构和特性的生物内源磁性颗粒会有相应不同的磁感受模型。目前这些模型的研究主要还停留在理论分析阶段，相关的实验验证甚少。即使是研究较多的鸟类磁定向问题，也存在一些争议。

人们发现鸟类的地磁定向或导航行为受到光照条件的影响，例如在对绣眼鸟等雀形目鸟类的磁定向行为研究中发现，在 433 nm 的蓝光和 565 nm 的绿光下可以准确定向，但在 630 nm 的红光下失去了定向能力。特别是有实验发现，将知更鸟的三叉神经阻断后，知更鸟仍具有磁定向能力。因此现有的各种基于磁性颗粒的生物磁感受机制无法解释光照的影响，也很难解释鸟的喙部磁性颗粒与外磁场的作用信息是如何传

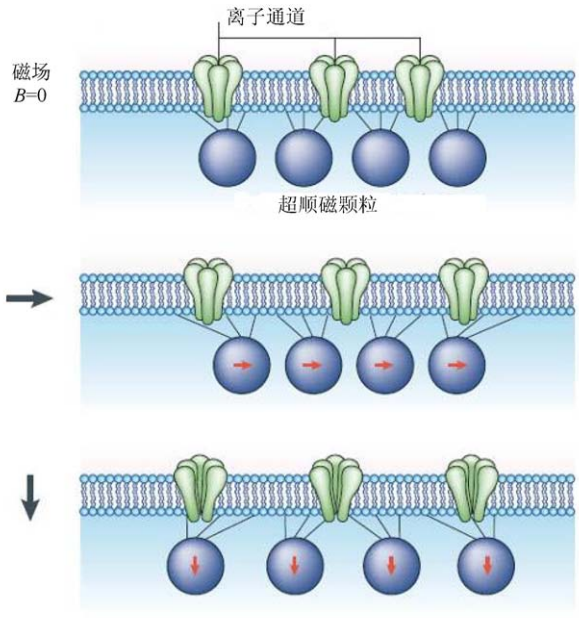


图 3　基于超顺磁颗粒的生物磁感受机制（图片取自 Johnsen 的文章）

导到大脑的。与基于磁性颗粒的生物磁感受机制竞争的是一种基于化学磁受体的磁感受机制——自由基对机制。这种机制依赖于光受体诱导形成的自由基对中间体，即生物体内化学反应过程中产生的电子自旋方向平行或反平行的成对原子或基团。

自由基对机制是被广泛接受的解释磁场影响生化反应的机制，其基本原理是外加磁场可以通过塞曼交互作用影响未配对电子的自旋状态，从而延长自由基对处于三重态的时间。美国学者里兹等人认为，鸟眼部组织中的光感自由基对中间体在地磁场的作用下产生的变化能够产生信号，并通过视神经传导到大脑，提供其导航所需的固定方位信息。这其中，蓝光受体是产生自由基对的关键。在自由基对机制中，也存在大量的理论假设，缺乏有力的实验证据。特别是自由基对机制要求光感自由基对的磁场响应必须是各向异性的，否则只能感受磁场幅值的变化，而无法感受磁场方向的改变。

以上两类生物磁感受机制从物理角度看都是合理的，也有一定的生物学基础，但还都有各自的局限。也有学者认为，可能在生物体内（特别是鸟），两种机制是并存的。

4. 人脑中的磁性颗粒与极低频磁场

目前人们还不清楚人脑中的磁性颗粒是如何形成的，也不清楚其功能（根据我们自身的经验，可以基本排除其磁定向的功能）。生物内源磁性颗粒的主要元素是铁，铁对脑内氧运输、电子传递链、神经递质合成具有重要意义。长期以来，人们发现铁运送与贮存的累积及失调与多种神经退行性疾病相关。早在1953 年，人们就发现铁浓度异常与阿尔茨海默症（亦即早发性老年痴呆症）有关。近年来，英国学者多布森等人的一系列研究发现老年痴呆症患者脑中磁性颗粒的总浓度较高（在某些样本中比对照组高出 15 倍），提示生物内源磁性颗粒在老年痴呆症的发病机理中扮演着重要角色。当然，阿尔茨海默症的特征性病理改变为 β 淀粉样蛋白沉积形成的细胞外老年斑和 tau 蛋白过度磷酸化形成的神经细胞内神经原纤维缠结等，其与磁性颗粒的关系目前还需要深入研究。

虽然人脑中的磁性颗粒功能不清楚，但它是外加磁场的一个可能的靶点。目前在生物磁定向机制中提出的一些模型，基本思路都是认为磁场对内源磁性颗粒的物理作用力可以影响离子通道从而影响神经系统。在世界卫生组织 2007 年发布的《极低频场环境健康准则（EHC No.238）》中，对相关的模型进行了评估。通过分析比较磁性颗粒的磁能与热噪声，可以确认低于 5μT 的工频磁场不可能通过与磁性颗粒的作用产生生物学效应，但是其结论取决于磁性颗粒的大小和可能绑定在一起的磁性颗粒的多少，也与磁性颗粒周围介质的粘滞度相关。由于人脑中磁性颗粒的详细分布和颗粒性质（结构、磁性）还不完全清楚，因此相关的分析评估还很不完善，需要进行更多的探索。

另外，自由基对机制中的关键蛋白——蓝光受体也存在于人脑中，其与外加磁场的关系也值得关注。

5. 结束语

极低频电磁场生物学效应问题非常复杂，核心原因是生物体的复杂性。目前的研究尚未发现在国际非电离防护委员会 1998 年制定的电磁暴露限制导则中限值以下的极低频电磁场对人体健康有明确的危害，但也有一些流行病学调查结果提醒人们对此问题还需要长期关注。从电磁场与生物相互作用机制角度看，还有一些问题值得深入探索，包括极低频磁场对内源磁性颗粒的影响及其生物学效应等。通过进一步的研究，可以为环境电磁场对健康影响的评估提供坚实的基础，为我国输变电工程和高速轨道交通等重要工程中电磁环境问题的解决提供一定的科学依据。

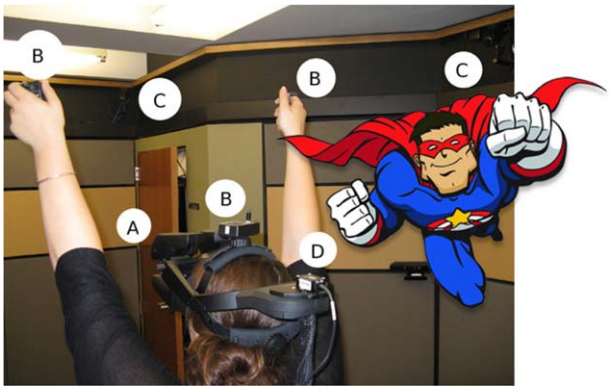
（北京中国科学院电工研究所　100190）

科苑快讯

虚拟现实中的超能力有助激发社会责任感

如果能有超人的能力，你可能很乐于扶危济困。受试者在一项研究中戴上虚拟现实头盔，半数人被赋予飞行于虚拟城市上空的能力，其他人则被动地坐在直升机里。一些人仅仅被允许在其空中优势位置探索这个城市，另有一些人则接到将急救胰岛素送给失踪糖尿病患儿的任务。无论执行什么任务，拥有飞行能力的受试者在实验结束后，似乎都更愿意帮助研究者捡起其佯装失手掉落的笔。该实验的论文已发表于《科学公共图书杂志》（PLOS ONE）。

实验结果令研究者质疑，我们的大脑是否认为虚拟实验的那段记忆曾经真实发生。如果真是那样，那么虚拟现实技术将有效治疗心理障碍，比如创伤后应激障碍（PTSD）。或许，拥有超能力，还能激发出强大的社会责任感。



受试者在虚拟现实中飞行

（高凌云编译自 2012 年 1 月 30 日 www.sciencemag.org）