
ICNIRP 导则

限制时变电场和磁场曝露的导则

(1Hz~100KHz)

国际非电离辐射防护委员会 (ICNIRP)

引 言

本文件为曝露在电磁谱中低频电场和磁场的人体提供防护指南。制定 ICNIRP 导则的一般原则已在其它出版物发表 (ICNIRP 2002)。本文件中低频的频率范围从 1Hz 延伸到 100KHz。超过 100KHz 就需要考虑诸如发热等效应，这些内容包含在其它 ICNIRP 导则中。但是在频率从 100KHz 至大约 10MHz，必须按照曝露的条件，同时考虑低频对神经系统的效应和高频效应的防护。因而本文件中的一些指南延伸到 10MHz，以覆盖该频率范围内的神经系统效应。关于静态磁场的导则已在另一份单独的文件 (ICNIRP 2009) 中给出。这些导则适用于由运动感应的电场或 1Hz 及以下的时变磁场，将单独出版。

本出版物替代 1998 年导则 (ICNIRP 1998) 中的低频部分相关内容。ICNIRP 目前正在修改超过 100KHz 频谱中高频部分的导则。

范围与目的

本出版物的主要目的是建立限制电场、磁场 (EMF) 曝露的导则，它将为防止所有已确定的有害健康的影响提供保护。

已经对 EMF 直接和间接影响的研究进行了评估：直接影响是源于场与人体的直接作用；非直接影响包括与导电物体 (该物体所具有

的电位与人体不同)的相互作用。对实验室及流行病学研究结果、基本暴露评估判据以及用于实际危害评估的参照水平等进行了讨论。所提出的导则既适用于职业也适用于公众暴露。

导则的限值是基于已确定的关于急性效应的证据；现有的可用的知识指出，遵循这些限值可保护职工和公众免受低频电磁场暴露的有害健康影响。非常小心地复核了流行病学和生物学数据，结论是：没有充分的证据表明它们与低频电磁场暴露有因果关系。

导则不涉及在规定的试验条件下限制特定装置电磁场排放的产品性能标准，也不是用来测量表征电场、磁场和电磁场的物理量的技术规定。准确确定这些物理量的计量和测试技术规范可依据其它标准（IEC 2004，2005a；IEEE1994，2008）。

符合本导则并不一定能防止 EMF 对医疗器械产生干扰或造成影响，这类医疗器械包括金属假肢、心脏起搏器和去纤颤器以及耳蜗植入体。在推荐的参照水平下可能出现对起搏器的干扰。避免此类问题的建议超出本导则的范围，但有其他标准规定（IEC2005b）。

随着与限制低频时变电场和磁场暴露有关科学知识的任何进展，本导则会周期性地修改和更新。

量和单位

电场只与电荷的存在相关，而磁场是电荷物理运动（电流）的结果。电场 E 对电荷施加作用力，单位以伏特每米（ Vm^{-1} ）表示。与此类似，在电荷运动和/或磁场随时间变化的情况下，磁场也可以对

电荷施加物理力。电场和磁场既有大小又有方向（也就是说，磁场和电场都是矢量）。磁场可以通过两种方式表示，一种是磁通密度 B ，单位为特拉斯（T）；另一种是磁场强度 H ，以安培每米（ Am^{-1} ）为单位。物理量 B 和 H 的关系表达式如下：

$$B = \mu H \quad (1)$$

式中， μ 是比例常数（磁导率）；在真空和空气以及非磁性（包括生物的）材料中， μ 的值为 $4\pi \times 10^{-7}$ ，单位是亨利每米（ Hm^{-1} ）。因此，出于防护目的而描述磁场时，只需用 B 或 H 中的一个物理量来说明。

曝露于时变 EMF 会引起内部电场及体内电流，并且会使组织吸收能量，具体与耦合机制和涉及的频率有关。内部电场 E_i 和电流密度 J 之间的关系可以由欧姆定律表示：

$$J = \sigma E_i \quad (2)$$

式中， σ 是表示介质的导电率。

导则中所用的剂量测定量如下：

-原位或内部电场 E_i

-电流 I

表 1 汇总了本导则使用的 EMF 和剂量测定量以及它们的单位

限制曝露的科学基础

限制曝露的导则是在全面审视了所有已经出版的科学文献后制定的。按照良好确立的判据，对所报导的各种发现的方法、结果及结论的科学有效性进行评估。因此，只有具有良好和可信科学证据的影响才能作为曝露限制的依据。

表 1：电场、磁场、电磁场和剂量测量量及相应的 SI 单位

物理量	符号	单位
导电率	σ	西门子每米 ($S m^{-1}$)
电流	I	安培 (A)
电流密度	J	安培每平方米 ($A m^{-2}$)
频率	f	赫兹 (Hz)
电场强度	E	伏特每米 ($V m^{-1}$)
磁场强度	H	安培每米 ($A m^{-1}$)
磁通密度	B	特斯拉 (T)
磁导率	μ	亨利每米 ($H m^{-1}$)
介电常数	ε	法拉第每米 ($F m^{-1}$)

低频电磁场曝露的生物效应已经由国际肿瘤研究机构 IARC, ICNIRP 和 WHO (IARC2002, ICNIRP2003, HPA-NRPB2004 , WHO2007a) 以及一些国家的专家组完成了复核。这些出版物也为本导则提供了科学依据。

如下所详述，导则的基础来自两个方面：一是低频电场曝露引起的已被很好识别的生物反应，这些反应是通过表面电荷作用，其程度从有感觉到烦恼。二是通过曝露在低频磁场的志愿者实验而确认的唯一影响，即中枢神经和周围神经组织刺激以及视网膜光幻视的感应，也即在视场周围的一种昏晕闪烁光感觉。视网膜是中枢神经系统的一

部分 ,虽然用于中枢神经系统神经元回路感应电场效应的模型略显保守 ,但总体还是合适的。

鉴于科学数据中仍存在的不确定性 ,本曝露导则已应用了降低因子 (reduction factors)。 详细可见 ICNIRP2002

场与身体之间的耦合机制

人和动物的身体会显著扰乱低频电场的空间分布 ,在低频率时 ,人体是良好的导体 ,身体外部被扰乱的电场线与身体表面几乎保持着垂直方向。 这样 ,在曝露于电场的身体表面感应交变电荷 ,上述交变电荷在体内产生电流。

人体低频电场曝露的关键剂量特征如下 :

- 在 50~60Hz ,身体内部感应的电场通常比外部电场小 5-6 个数量级 ;
- 对于给定的外部电场 ,当人体通过双脚与地面良好接触 (电气接地) 时 ,体内感应电场最强 ;而当人体与地面绝缘 (在“自由空间”) 时 ,感应电场最弱 ;
- 人体完全接地时 ,流过人体的总电流是由身体大小和体型 (包括姿势) 决定的 ,而非组织的导电率决定 ;
- 流过不同器官和组织的感应电流分布则是取决于这些组织的导电率 ;
- 此外 ,也存在间接效应 ,当身体与位于电场中的导电物体接触时 ,体内产生感应电流。

就磁场而言，由于体内组织的磁导率与空气中的磁导率相同，所以组织内的磁场也就和外部磁场一样。所以，人和动物的身体不会明显对磁场产生扰乱。磁场的主要作用是在导电组织中由法拉第感应产生的电场和相应电流。在静态磁场中移动也可能感应电场。人体低频磁场曝露的关键剂量特征包括以下方面：

- 对于给定的磁场强度和方向，越大的躯体感应的电场越强，这是因为可能的导电环增大之故；
- 感应产生的电场和电流取决于外部场相对于身体的方向。通常，当外部磁场沿从身体正面至后背的方向时，体内感应场最大。但就某些器官而言，最高值出现在不同的外部磁场方向时；
- 当磁场的方向沿着与身体垂直轴方向时，感应的体内电场最弱；
- 器官和组织不同的导电率会对感应电场的分布产生影响。

来自目前科学文献的结论

神经反应

低频电场曝露可以导致已为识别了的由表面电荷效应形成的生物响应，其程度从有感觉到烦恼 (Reilly 1998 , 1999)。对 50~60Hz , 最敏感的 10% 志愿者的直接感觉阈值在 2-5 kV m^{-1} ; 而 5% 志愿者在 15-20 kV m^{-1} 时感觉烦恼。在 5 kV m^{-1} 时 7 % 的志愿者在电气触地时感到痛感，而有 50 % 在 10 kV m^{-1} 电场中碰触地时感到痛感。从一个

充电物体通过接地的人产生的火花放电阈值取决于物体的尺寸，因而需要逐个评估。

电刺激（包括低频电磁场感应）对电气易激励神经和肌肉组织的反应在很多年以前就已经被良好确认（例如 Reilly 2002; Sauders and Jefferys 2007）。根据使用神经模型的理论计算，人体周围神经系统（PNS）有髓神经纤维最小的阈值大约为 6 V m^{-1} 峰值（Reilly 1998, 2002）。但是在志愿者曝露于磁共振（MR）切换的梯度磁场中，根据使用均质人体体素模型的计算，周围神经刺激显示的感觉阈值可能低到 2 V m^{-1} （Nyenhuis et al 2001）。根据以上磁共振研究数据，So et al.（2004）运用异质人体模型进行了组织中感应电场的更精确计算，这些作者估计周围神经刺激的最小阈值在 $4\text{-}6 \text{ V m}^{-1}$ （取决于设定刺激发生在皮肤或皮下脂肪）。在较强刺激下，不适和痛感相继而来；在超过感觉中值阈值约 20% 时出现不能忍耐刺激的最低相对值（ICNIRP 2004）。中枢神经系统中的有髓神经纤维可以被经颅磁刺激（TMS）感应的电场所激励，在 TMS 过程中，皮质组织中感应的脉冲场是相当高的（ $>100 \text{ V m}^{-1}$ 峰值），虽然理论计算提示，最小刺激阈值可能低到 $\sim 10 \text{ V m}^{-1}$ 峰值（Reilly 1998, 2002）。对任何一类神经，在超过约 $1\text{-}3 \text{ kHz}$ 时，由于神经细胞膜上可供电荷积累的时间逐渐变短，阈值开始上升。在约 10 Hz 以下，由于神经对缓慢去极化刺激因素的适应，阈值也会上升。

肌肉细胞通常对直接刺激比神经组织较不敏感（Reilly 1998）。心脏肌肉组织应得到特别关注，这是因为它的功能异常是潜在的生命威

胁；然而，心室纤颤阈值要比心脏肌肉激励高 50 倍或以上 (Reilly 2002)，虽然假如在心脏循环的易损期内心脏受到重复激励时这个倍数将显著下降。在高过约 120Hz 时，由于肌肉纤维与有髓神经相比时间常数要长得多，阈值会增加。

低于直接神经或肌肉激励阈值的电场已确定的最显著影响是磁光幻视感应，即一种曝露在低频磁场中的志愿者视网膜视场周围的虚晕闪烁光感觉。磁通密度最小阈值在 20 Hz 时约为 5 mT，频率较高和较低时阈值上升。在这些研究中，磁光幻视是感应电场与视网膜中电气可激励细胞相互作用的结果。视网膜形成前脑的旁枝，因此总体上可作为出现在中央神经系统组织内过程的良好但又保守的模型 (Attwell 2003)。在视网膜中感应磁光幻的阈值在 20Hz 频率下约为 $50 \sim 100 \text{ mV m}^{-1}$ 。频率较高和较低时阈值上升 (Saunders and Jefferys 2007)，虽然这些值还有很大的不确定性。

中央神经系统神经组织的一体性会使诸如认知过程 (如记忆、对这些生理弱电场的敏感性) 等功能产生变化。Saunders 和 Jefferys (2002) 提出，由这些弱电场引起中央神经系统神经的电极化会增强神经元活性组的同步，并影响邻近非活性神经元的参入，进而影响整体神经细胞的可激励性和活性。使用脑切片的体外研究证据显示，这些效应的最小阈值在频率为 100 Hz 以下，并低至 100 mV m^{-1} (Saunders and Jefferys 2007)。

两个研究组将电极直接对头部施加强弱电场，调查了它对人体脑电活动和功能的影响。一个组 (Kanai et al.2008) 报道了在刺激频率与视觉皮层特性一致时，不论在黑暗条件 (约为 10Hz) 还是在光照条件 (约 20Hz) 下，对视觉皮层的刺激产生了皮层光幻视感觉 (类似于在视神经中出现的光幻视)，但在更高或更低频率下都不会出现。另一个组 (Pogosyan et.2009) 加在正在完成视觉—活动任务的志愿者

的运动皮层，发现在完成任务时，手的移动有很小但具有统计显著性的迟缓，这与 20Hz 时运动皮层作用同步性增加是一致的，在较低的刺激频率下没有发现该效应。总之，这两组作者都发现，在 10~20Hz 的电场超过视网膜光幻视阈值时，可与活动中的视觉和运动皮层节奏性的电特性相互作用，并轻微地影响视觉过程和运动协调性。这表明施加 10~20Hz 电磁场感应的电场足够大时，也可能产生类似的效应。

但是，志愿者暴露于低频电磁场对脑电活动、识别能力、睡眠和情绪等其它神经反应影响的证据则远不明显（Cook 等人 2002,2006；Crasson 2003；ICNIRP 2003a；Barth 等人 2010）。总体而言，这些研究都是在暴露水平为（或）低于 1~2mT 下进行的，也即低于产生上述影响所需要的水平，并且已经产生的证据至多都只是细微和短暂的影响。对得出这些响应的条件目前还不能很好确定。

有人声称对电磁场存在过敏，然而，双盲激发研究的结果却表明，这些报导的症状与电磁场暴露并无关联（Rubin et al 2005；WHO 2007a）。

在低频电场和磁场暴露导致抑郁症状或自杀方面只有不一致、非结论性的证据（WHO 2007a）。

以动物为对象，已从不同的角度，采用一系列暴露条件，针对低频场暴露对神经反应功能影响的可能性展开研究。但几乎没有已确定的影响。有令人信服的证据表明低频电场能够被动物感知，这极有可能是表面电荷效应的结果，并可能导致短暂觉醒或者轻微的紧张。其他可能由电磁场引起的变化都不能很好确定（WHO 2007a）。

因此，表面电荷的感觉、神经和肌肉组织的直接刺激以及视网膜

光幻视是已确定了的 (影响) , 可以作为导则的基础。另外还有间接的科学证据表明诸如视觉过程和运动协调性等脑功能可能受感应电场短暂地影响。但是 , 来自曝露于低频电场和磁场的志愿者神经反应研究的证据还不足以作为制定人类曝露限值的可靠依据。

神经内分泌系统

志愿者研究以及居民和职业的流行病学研究结果显示 50~60Hz 电场或磁场不会对神经内分泌系统产生不利的影晌。尤其是对特定激素 (包括人体松果腺释放的褪黑素在内) 的循环水平和涉及人体代谢和生理学控制的激素量 (由垂体腺释放的) 也是如此。在注意控制可能存在混淆因素的情况下 , 大多数关于 50~60Hz 曝露对晚间志愿者褪黑素水平影响的实验研究没有发现影响 (WHO 2007a)。

大量动物研究调查了 50~60Hz 电场和磁场对老鼠的松果腺和血清褪黑素水平的影响。一些报导称 , 曝露导致夜间褪黑素的抑制 , 但其他一些研究是否定的。在季节性繁殖动物中 , 50~60Hz 场曝露对褪黑素水平以及与褪黑素相关的繁殖状况影响的证据基本上是阴性的 (ICNIRP2003a;WHO2007a;)。在非人类的灵长类动物的研究中 , 长期曝露于 50~60Hz 场对褪黑素水平并没有观察到令人信服的影响。

在多种哺乳动物样本垂体肾上腺轴的与应激相关的激素中 , 也没有观察到一致性的影响。可能的例外是 , 在低频电场曝露开始时高到足以被感知的场应力下 , 可能会出现短暂的应激反应 (ICNIRP2003a;WHO2007a)。类似地 , 在已完成研究很少的情况下 , 在生长激素水平和控制代谢活动或控制繁殖与性发育的激素水平方面 , 已观察到的影响大多数是阴性的或缺乏一致性的。

总而言之，以上数据不能得出低频电场和/或磁场会以给人体健康造成有害影响的方式对内分泌系统产生作用。

神经退行性障碍

有一种低频场曝露与某些神经退行性疾病有关的假设。就帕金森病 (Parkinson's disease) 及多样硬化症而言，研究的数量很少，也没有低频曝露与这些疾病存在关联的证据。然而，关于阿尔茨海默症 (Alzheimer's disease) 和肌萎缩侧索硬化症 (ALS) 却已发表了较多研究。一些报导提示，电业职业人员的 ALS 风险可能有所增加 (Kheifets et al.2009)。虽然这种风险上升可能由电力职业有关的混淆因素 (如电击) 所致，但迄今为止，没有任何已经确立的生物机制能够解释这种关联。此外，使用更复杂的曝露评估方法 (例如工作—曝露矩阵)，通常就观察不到风险增加 (Kheifets et al.2009)。对阿尔茨海默症，研究结果是不一致的。在以临床为基础的研究中，已发现了最强的关联但也带有大的潜在选择性偏倚；但是在一些 (而非全部) 以人群为基础的调研中也观察到了风险增加。研究中的亚组分析进一步增强了数据不一致的印象 (Kheifets et al.2009)。各项研究结果统计的不一致性本身表明，把可提供的所有结果汇总统计是不可行的，虽然已经试图这样做了 (Garcia et al 2008)。另外，还存在一些“发布偏倚”的证据。由其它职业曝露因素引起的潜在混淆也通常没有得到控制。至今只有一项可用的居室研究显示了长期曝露之后阿尔茨海默症的风险增加，但是它依据的病例数量非常少 (Huss et al.2009)。

调查低频曝露和阿尔茨海默症之间关联的研究结果是不一致的。

总体说来，关于低频曝露和阿尔茨海默症以及肌萎缩侧索硬化症（ALS）之间关联的证据是非结论性的。

心血管紊乱

短期和长期曝露的实验研究都表明，除了电击是一种明显的健康危害外，在通常可遇的环境或者职业曝露水平下，不会发生与低频场相关的其他有害的心血管影响（WHO2007a）。尽管一些文献报道了各种各样的心血管变化，但是大多数影响都很小，并且研究中和研究报告之间的结果也不一致（McNamee et al.2009）。大多数针对心血管疾病发病率和死亡率的研究没有显示出与曝露的关联（Kheifets et al.2007）。在曝露与心脏自律调节改变之间是否存在特别关联的问题仍是推测性的。总的看来，证据提示低频曝露与心血管疾病之间不存在关联。

生殖和发育

总体而言，流行病学研究没有显示人类不良妊娠后果与母亲或父亲的低频场曝露存在关联。在母亲磁场曝露与流产风险增加之间存在一些有限的证据，但是，所报道的这种关联在其他研究中并没有发现，总体而言，这样一种关联的证据是相当缺乏的。

对多种哺乳动物样本（包括大样本群以及连续几代的曝露），已进行了高达 150kV m^{-1} 的低频电场曝露评价。结果一致显示不存在有害的发育影响（ICNIRP2003a;WHO2007a）。

使用高达 20mT 低频磁场的哺乳动物曝露，没有导致体表，内脏或者骨骼畸形（Juutilainen 2003,2005;WHO2007a）。总之，低频曝露

与发育和生殖影响之间关联的证据是非常弱的。

癌症

大量的流行病学研究报告，尤其是二十世纪八十年代和九十年代提出的报告显示，低于 1998 年 ICNIRP 曝露导则限值的 50-60Hz 磁场长期曝露可能与癌症有关。最初的研究集中在儿童癌症与磁场的关联，此后的研究也涉及不同的成人癌症。总体来讲，在专门设计用来为检验最初的发现是否能复现的研究中，最初观察到的 50-60Hz 磁场与不同癌症之间的关联并没有得到确认。不过，对于儿童期白血病来说，情况是不同的。继最初研究之后的研究提示，在居室 50-60Hz 磁场与儿童期白血病风险之间可能存在弱的关联，虽然并不清楚这是否是一种因果关系：也许可以用其中含有选择性偏倚、某种程度的混淆以及偶然性等来解释这些结果 (WHO2007a)。两项集合分析 (pooled analyses) (Ahlbom 等人，2000; Greenland 等人，2000) 显示平均曝露超过 0.3-0.4 μ T 时，风险的增加可能会存在，虽然该两项分析的作者强烈地提请注意，他们的研究结果不能解释为磁场和儿童期白血病之间显示了因果关系。

同时，没有生物学机制可以验证，动物与细胞实验室研究结果也不支持 50-60Hz 磁场曝露是儿童期白血病诱因的观点。

值得一提的是，目前在儿童白血病最常见的类型——急性淋巴细胞性白血病方面，还没有合乎要求的动物模型。大多数研究报告，在啮齿动物模型中，50-60Hz 磁场对白血病或者淋巴瘤没有影响 (ICNIRP2003a;WHO2007a)。一些大规模的啮齿动物长期研究没有

显示任何类型的癌症（包括血癌、乳腺癌、脑瘤以及皮肤癌）有任何一致性的增加。

已有大量 50-60Hz 磁场对化学诱发的乳腺癌影响的鼠类实验研究（ICNIRP2003a;WHO2007a），但是得到的结果是不一致的，原因可能在于整个或部分实验方案的差异，例如使用了特定的亚族。大多数关于 50-60Hz 磁场曝露对于化学诱发或辐射诱发的白血病或淋巴瘤样式影响的研究都是阴性的。肿瘤发生前的肝损伤和化学诱发的皮肤癌和脑瘤研究，得出的主要是阴性结果。

通常，在磁场低于 50mT 时，低频场曝露对细胞影响的研究并未显示会产生遗传毒性（Crumpton and Collins 2004；WHO2007a）。总体而言，相对于流行病学在儿童白血病与长期电力频率磁场曝露之间关联方面的证据，动物癌症数据，尤其是大规模终身实验数据，几乎全是阴性的。细胞研究的数据尽管更为含糊，但总体也支持动物研究的结果。

推荐的低频导则的原理

在本导则中，ICNIRP 阐述了急性和慢性的健康影响，并考虑了近年来的剂量学发展。

急性影响

低频电磁场曝露对神经系统有一些已被确认的急性影响：对神经和肌肉组织的直接刺激以及引发视网膜光幻视。也有间接科学证据显示，诸如视觉过程和运动协调性等脑功能可能受感应电场短暂地影响。所有这些影响都有阈值，低于阈值就不会发生，只要符合体内感

应电场的基本限值，这些影响就可以避免。

按照关于限制静态磁场暴露的导则（ICNIRP 2009）的推荐，ICNIRP 考虑存在一些职业环境，在接受适当的指示与培训的情况下，工人自愿地并已知地经历暂时的影响（诸如视网膜光幻视和某些脑功能可能的细微变化）是合理的，因为他们不相信会导致长期或病理学的健康影响。在这种情况下，为了避免周围和中央有髓神经刺激，应限制整个躯体的暴露。ICNIRP 注意到，在周围神经感觉阈值和痛感阈值之间存在相对很小的间距（如上所述）；对上述任何一类神经，在频率高于 1~3kHz 时，由于髓鞘形成导致的神经膜时间常数非常短，在频率低于 10Hz 时，由于神经对缓慢去极化刺激因素的适应，阈值都开始上升。

避免视网膜光幻视应该可以保护对脑功能的任何可能的影响。光幻视阈值在频率为 20 Hz 时最小，在较高和较低频率快速上升，与周围和中央神经刺激的阈值相交，在交点上，应适用周围神经刺激限值。对未经培训和可能不注意和暴露状态不受控的工人，基本限值设置在光幻视阈值，以避免暴露暂时但潜在的干扰影响。对公众，针对光幻视阈值赋予了 5 倍降低因子。

低频电场暴露通过表面电荷效应会引起已被确定的生物反应。防止人体因这种暴露感应的表面电荷产生的痛感效应是用参照水平来表达的。

慢性影响

关于低频场慢性影响的文献已经由多个科学家以及科学专门小

组详细评价过了。世界卫生组织的癌症研究机构 IARC (国际癌症研究机构) 于 2002 年对极低频磁场进行了评价并且将其分类为 2B 类 , 解释为“对人类有致癌可能性的”。这种分类的依据是儿童期白血病的流行病学结果。

ICNIRP 的观点是 , 现有关于低频磁场长期曝露与儿童期白血病风险增加有因果性关联的科学证据太弱 , 不能成为制定曝露导则的基础。特别是 , 假如上述关系不是因果性的 , 降低曝露就不具有任何健康利益。

剂量学

以前 , 磁场模型都假设人体拥有均质的各向同性的导电率 , 并采用简单的导电回路环模型来估计不同器官和身体区域内的感应电流。由时变电场和磁场感应的电场则利用简单的均质长椭球体模型进行计算。近年来 , 基于解剖学和电学改良的非均质模型 (Xi and Stuchly 1994, Dimbylow 2005 and 2006, Bahr et al 2007) 可使人们对曝露在电场和磁场中的体内原位电场有更好的认识 , 实施与事实更加相符的计算。

修订本导则的最有用的剂量学结果 , 是通过体素小于 4mm 的感应电场的高分辨率数值模拟得出的 (Dimbylow 2005 , Bahr et al 2007 ; Hirata et al 2009 ; Nagaoka et al 2004)。体内最大感应电场出现在外部场均匀且其朝向与体轴平行 (E 场) 或者垂直 (H 场) 时。根据这些计算结果 , 随场的方向和人体模型不同 , 由每 mT 50Hz 磁场在脑中感应的最高局部峰值电场的值约为 23~33 mV m⁻¹。对周围神经组织 ,

目前还没有可用的转换系数,因而选择包含周围神经末梢的皮肤作为最坏情况下的目标组织。由每 mT 上述场在皮肤感应的电场约为 20~60 mV m⁻¹。每 kV m⁻¹ 的 50Hz 电场在脑中引起的最大局部电场约为 1.7~2.6 mV m⁻¹。而每 kV m⁻¹ 的 50Hz 电场在皮肤引起的最大局部电场约为 12~33 mV m⁻¹。

从现有的计量学数据的不确定性以及在导出参照水平时人体参数的影响出发, ICNIRP 在由基本限值导出参照水平时采取了保守的处理。

限制电磁场曝露的导则

对职业曝露和公众曝露分别给出指南。本导则推荐的职业曝露限值适用于在他们的工作场所曝露于 1Hz 到 10MHz 时变电场和磁场的成人,通常是在已知情况下完成他们常规或指定的职业行为;而术语“公众”则是指所有年龄和不同健康状况、在个体敏感性方面可能具有较高可变性的个体。在很多情况下,公众成员不知道曝露于电磁场。这种考虑突出了对公众比对在职业曝露下的工作人员采取了更严格的曝露限制。

科学不确定性的处理

所有科学数据及其解释都会存在一定程度的不确定性。例如研究方法差异以及个体间、样本间及种族间的差异。这些知识上的不确定性都采用“降低因子”来补偿。

但是针对所有的不确定源要给出严格的依据，来对全频段和对所有的控制类型给出降低因子，所需要的信息还是不充分的。因此，在解释可用的数据库中数据以及确定降低因子时采取多大的谨慎程度，在很大程度上取决于专家判断。

基本限值和参照水平

根据躯体中的量或与已确定的健康影响直接有关的量制定的暴露限值称之为“基本限值”。在本导则中，用来规定电磁场暴露基本限值的物理量是体内电场强度 E_i ，这是由于正是电场对神经细胞和其它电气敏感细胞产生影响。

由于体内电场强度难以实测评价，因此从实际暴露评估出发，提供了暴露的参照水平。来确定是否符合或者超过基本限值。大多数参照水平是从相关的基本限值，采用测量和/或计算技术导出，但也有些参照水平是用电磁场暴露的感觉(电场)和有害的非直接影响表达的。导出的量是电场(E)、磁场强度(H)、磁通密度(B)和流过肢体的电流(I_L)。表达非直接影响的量是接触电流(I_C)。在任何特定暴露情况下,任何测量或计算得到的值可以与适当的参照水平相比较。符合参照水平就能确保符合相应的基本限值。假如测量或计算值超过参照水平，不一定就等于基本限值已超过。但是，在超过参照水平时，有必要检验与相应的基本限值的相符性，并确定是否有必要采取附加的防护措施。

基本限值

本出版物的主要目的是建立防止有害健康影响的限制电磁场曝

露的导则。如上所述，风险来自短暂的神经系统响应，包括对周围神经（PNS）和中央神经（CNS）的刺激、视网膜光幻视和对脑功能一些方面的可能影响。

根据以上考虑，对频率范围从 10Hz 到 25Hz，职业曝露应限制头部中央神经系统组织（即脑和视网膜）中感应电场强度不超过 50 mV m^{-1} ，以避免视网膜光幻视。该限值也应能防止任何对脑功能可能的暂时影响，这些影响并不认为是有害的健康影响；但是，ICNIRP 认为它们可能在某些职业情况下形成干扰，应该予以避免，但是不对此附加专门的降低因子。在较高和较低频率，光幻视阈值迅速提高，在 400Hz 频率，光幻视阈值与对周围和中央有髓神经刺激的阈值曲线相交。在频率 400Hz 以上，周围神经刺激的阈值适用于身体的所有部位。

在受控环境中的曝露，工人被告知这样的曝露可能有暂时效应，为了避免周围和中央有髓神经刺激，应限制头部和躯体内感应电场不超过 800 mV m^{-1} 。该值是考虑了以上所述的不确定性，对于周围神经刺激阈值 4 V m^{-1} 而言，赋予了 5 倍降低因子。该限值在频率超过 3KHz 时上升。

对公众而言，针对头部的中央神经组织应用了 5 倍的降低因子，得出曝露基本限值在 10 到 25Hz 为 10 mV m^{-1} 。高于或低于上述频率，基本限值提高。在 1000 Hz 频率，曲线与防止周围和中央有髓神经刺激的基本限值曲线相交。在此点，与基本限值 400 mV m^{-1} 相比，有 10 倍的降低因子，它适用于身体所有部位的组织。

基本限值列于表 2 和图 1 中。

时间平均

对包括暂态或非常短期峰值的电场或磁场，ICNIRP 推荐的体内

电场限值应看作瞬时值而不应是时间平均值 (参见非正弦暴露节)。

表 2 人体暴露于时变电场和磁场的基本限值

暴露特性		频率范围	体内电场 ($V \cdot m^{-1}$)	
职业 暴露	头部中央神经系统组 织	1-10Hz	$0.5/f$	
		10Hz-25Hz	0.05	
		25Hz-400Hz	$2 \cdot 10^{-3}f$	
		400Hz-3kHz	0.8	
		3kHz-10MHz	$2.7 \cdot 10^{-4}f$	
	头部和躯体的所有组 织	1Hz-3kHz	0.8	
		3kHz-10MHz	$2.7 \cdot 10^{-4}f$	
	公众 暴露	头部中央神经系统组 织	1-10Hz	$0.1/f$
			10Hz-25Hz	0.01
			25Hz-1000Hz	$4 \cdot 10^{-4}f$
1000Hz-3kHz			0.4	
3kHz-10MHz			$1.35 \cdot 10^{-4}f$	
头部和躯体的所有组 织		1Hz-3kHz	0.4	
		3kHz-10MHz	$1.35 \cdot 10^{-4}f$	

注 : (1) f 是频率 (Hz)

(2) 所有的值为有效值 (rms)

(3) 频率范围在 100 kHz 以上 , 需要另外考虑无线电频率特殊的基本

限值

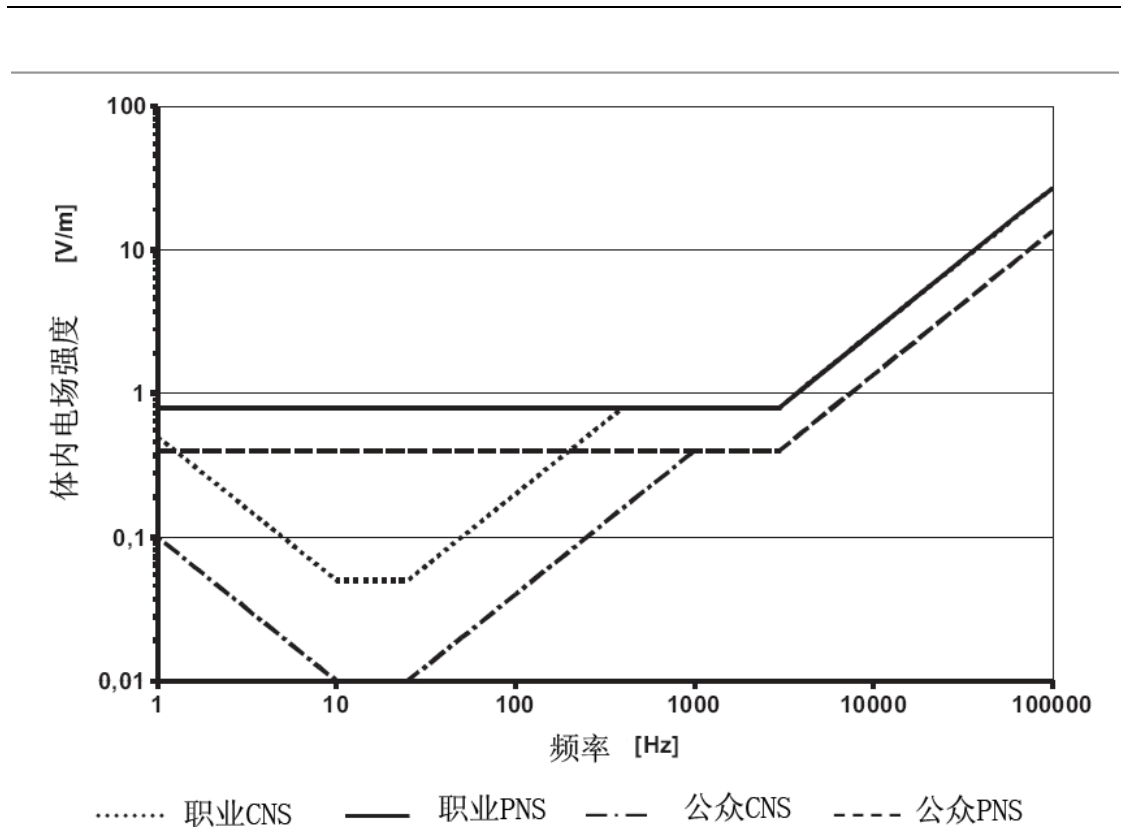


图 1 以 CNS 和 PNS 组织内电场强度确定的公众曝露和职业曝露基本限值

感应电场的空间平均

在限制感应电场对神经细胞和神经网络有害的影响时，重要的是界定一个距离或尺寸，在该范围内局部感应电场必须取平均。作为一种实际的折中，为满足合理的生物学基础和计算约束的要求，ICNIRP 推荐取相邻的 $2 \times 2 \times 2 \text{mm}^3$ 的组织小体积内的电场来确定感应电场的矢量平均。对一特定的组织，第 99 个百分位电场值是与基本限值相比较的值。

基本上，电场对神经和其它电气可激励细胞的影响是局部效应，但存在限制最小尺寸或距离的电生理学 and 实际剂量因素。扰乱神经和神经网络功能的主要物理因素是由跨越细胞膜的感应电场所产生的电压。沿电场方向(最大耦合)的单独神经纤维，对无脊椎动物神经，

由电场集中的电压跨越的电紧张距离约 2-7 毫米 (Reilly 1998 ; Reilly and Diamant 2003)。对有髓 (鞘) 的神经细胞 , 集中距离的最佳估计约为 2mm , 它是朗飞结 (nodes of Ranvier) 间的最大结间距。在考虑孤立神经细胞的刺激阈值时 , 这些距离是贴切的。在阈值以下弱电场效应例如视网膜光幻视的情况中 , 大量相互作用的神经细胞的集合“网络”效应是必须予以考虑的。效应的阈值将显著地低于单独神经细胞的刺激阈值 , 这是由于突触中小的感应电场的叠加和集中。建议感应电场的平均量应根据至少 1000 个相关的细胞 , 对大多数神经组织而言 , 约为 1 mm^3 (Jefferys 1994)。这样 , 生物学合理的平均距离就可能扩展到 1 ~ 7mm。从实用观点出发 , 在感应电场的毫米级分辨率的计算中 , 很难达到满意的精度 , 而更困难的是如何测量它。某特定组织一个体素的最大计算值容易产生与立方体素尖角相关的梯段误差 (stair-casing errors)。一种获得更稳定的峰值近似值的解决方案是基于选择在特定组织内代表感应电场第 99 百分位的峰值。但是 , 从生物学观点 , 由于峰值取决于分辨率 , 这是一个有些争议的选择。空间平均的另一种方案是把局部电场规定为一个小体积或沿一线段的平均 (Reilly and Diamant 2003)。

作为一般规则 , 除了类似视网膜和皮肤以外 (它们对整个平均立方体而言太薄了) , 平均体积应该不超过组织的界限。对皮肤可设定 $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ 的体积 , 而且它可扩展到皮下组织。对视网膜 , 平均体积可延展到其前、后的组织。

参照水平

参照水平是通过数学模型、使用已发布的数据，由基本限值获得 (Dimbylow2005 , 2006)。它们是按照场对人体曝露最大耦合条件计算得到的 ,因而可提供最大保护。考虑了频率相关性和剂量不确定性。所提出的参照水平考虑了两种不同的效应和脑中感应电场的近似综合性。既有与中枢神经系统效应 (以及在体内非中枢神经系统组织内的感应电场) 的关系 , 又有与周围神经系统的关系 (即 : 在 50Hz , 用于把对中枢神经系统影响的基本限值转换到外磁场曝露的系数为每 T 相当于 33 V m^{-1} , 而对周围神经系统影响的系数为每 T 相当于 60 V m^{-1} 。考虑剂量的不确定性 , 对这些计算值赋予了 3 倍的附加降低因子)。

另外 , 25 Hz 及以下职业曝露的电场参照水平包含了足够的安全裕度来预防所有可能情况下的接触电流刺激效应。在 25 Hz 和 10 MHz 范围内 , 参照水平根据感应电场的基本限值制定 , 这样 , 在该频段内就有可能没有提供足够的安全裕度来防止所有可能条件下接触电流的刺激效应。

对 10 MHz 及以下的公众曝露电场参照水平可使 90% 以上的受曝露个体免受有害的非直接影响 (电击和灼痛)。另外 , 50 Hz 及以下公众曝露参照水平包含足够的裕度避免表面电荷效应(比如大多数人的感觉)。

表 3 和表 4 分别汇总了职业和公众曝露的参照水平 , 上述参照水平分别在图 2 及图 3 中画出。参照水平是假设在人体所在空间范围内 , 受曝露的场是均匀的。

表 3 时变电场和磁场职业暴露的参照水平 (未畸变有效值)

频率范围	电场强度 E ($\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$)	磁场强度 H ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)	磁通密度 B (T)
1 Hz-8Hz	20	$1.63\times 10^5/f^2$	$0.2/f^2$
8Hz-25Hz	20	$2\times 10^4/f$	$2.5\times 10^{-2}/f$
25Hz-300Hz	$5\times 10^2/f$	8×10^2	1×10^{-3}
300Hz-3kHz	$5\times 10^2/f$	$2.4\times 10^5/f$	$0.3/f$
3kHz-10MHz	1.7×10^{-1}	80	1×10^{-4}

注：1) f 的单位是 Hz；

2) 对非正弦和多频率暴露的建议见以下专门章节；

3) 非直接影响 (特别对高电场中) 的防护见“保护措施”章；

4) 频率范围在 100 kHz 以上，需要另外考虑无线电频率特殊的参照水平。

表 4 时变电场和磁场公众暴露的参照水平 (未畸变有效值)

频率范围	电场强度 E ($\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$)	磁场强度 H ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)	磁通密度 B (T)
1Hz -8Hz	5	$3.2\times 10^4/f^2$	$4\times 10^{-2}/f^2$
8Hz -25Hz	5	$4\times 10^3/f$	$5\times 10^{-3}/f$
25Hz -50Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50Hz-400Hz	$2.5\times 10^2/f$	1.6×10^2	2×10^{-4}

400Hz -3kHz	$2.5 \times 10^2 / f$	$6.4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
3kHz-10MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

注：1) f 的单位是 Hz；

2) 对非正弦和多频率暴露的建议见以下专门章节；

3) 频率范围在 100 kHz 以上，需要另外考虑无线电频率特殊的参照水平。

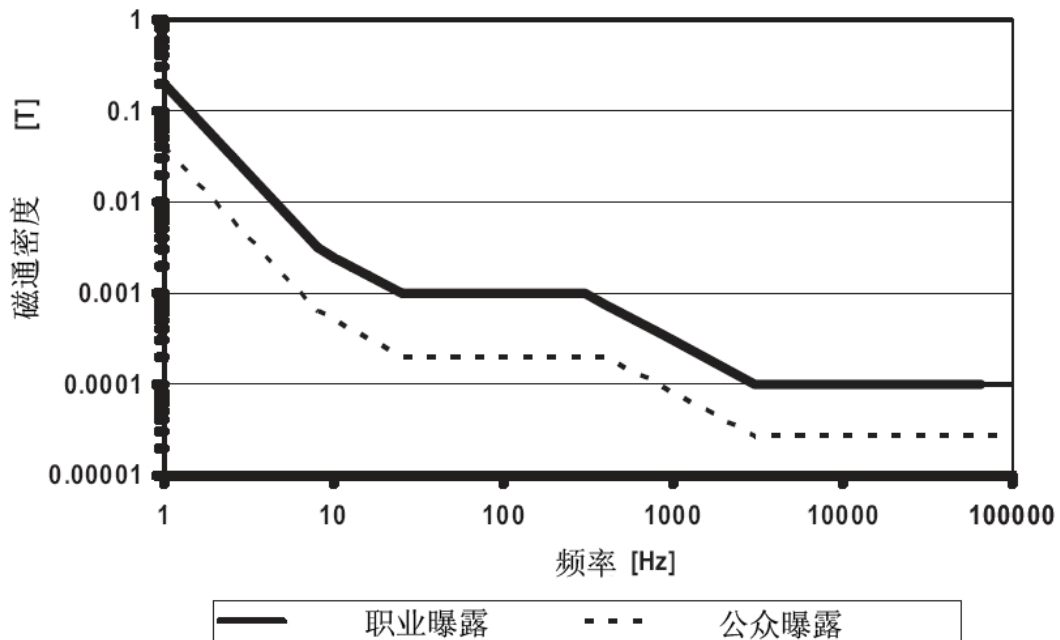


图 2 时变磁场暴露的参照水平（配合表 3、表 4）

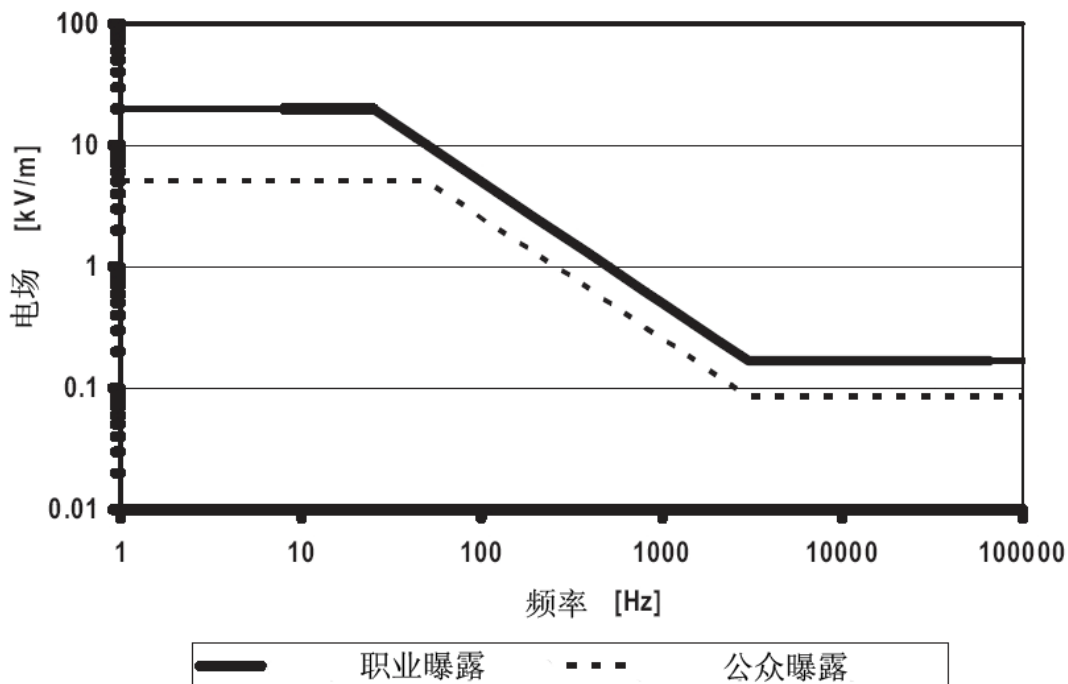


图3 时变电场暴露的参照水平（配合表3、表4）

外部电场和磁场的空间平均

确定参照水平时的暴露条件是在人体所占有的空间内电场与磁场的均匀程度是相当小的。但是，在大多数情况下离场源的距离是很近的，以致场的分布是不均匀的或者局限于躯体的很小部分。在此情况下，即使从非常保守的暴露评估出发，人体占有空间位置最大场强的测量总会导致偏于安全的结果。

对于离人体数厘米的非常局限的源，暴露评估唯一可靠的方法是针对具体案例逐个确定感应电场的剂量。当距离超过20厘米时，场的分布就变得不那么局限，但仍是不均匀的，在这种情况下，沿躯体或躯体的一部分确定空间平均是可行的（Stuchly and dawson 2002；Jokela 2007）。空间平均不应超过参照水平。局部暴露可以超过参照水平，但有一个重要的前提，即基本限值不应被超过。对运用空间平

均的特殊曝露情况给出进一步的指南是标准化组织的任务。本导则是依据良好确定的剂量学结果。标准化组织也可针对特定类型的非均匀曝露给出新的参照水平。

电场与磁场曝露的迭加

每一外部电场和磁场都在体内感应电场分量，它们在组织内矢量相加。就基于外部电场与磁场的曝露分析而言，一种保守的方法是假设不论电感应的与磁感应的体内感应场分量，在同样的临界点以同相位达到最大值。这就意味着外部电场与磁场曝露是相迭加的 (Cech et al ， 2008)。但是，考虑到电感应的与磁感应的体内感应电场的分布有很大差异，这种情况被认为是罕见的。

接触电流的参照水平

给出了 10MHz 及以下接触电流的参照水平，必须对此采取谨慎措施以避免电击和灼伤的危害。点接触的参照水平列于表 5。由于儿童诱发生物学响应的接触电流阈值约是成年男子的 1/2，因此对公众的接触电流参照水平设定得比职业曝露限值低 1 倍。应指出，参照水平的目的并非是防止感觉 (perception)，而是为了避免痛感的电击 (painful shocks)。接触电流的感觉本身不是一种危害，但可考虑为一种烦恼。防止超过接触电流可以通过技术手段来实现。

表 5 接触导电物体的时变接触电流参照水平

曝露特性	频率范围	最大接触电流 (mA)
职业曝露	2.5kHz 及以下	1.0
	2.5-100kHz	0.4 <i>f</i>

	100kHz-10MHz	40
公众暴露	2.5kHz 及以下	0.5
	2.5-100kHz	0.2 f
	100kHz-10MHz	20

注： f 是频率，单位为 kHz。

多频率场同时曝露

在多个不同频率场同时曝露的场合下，确定这些曝露的效应是否相加是重要的。以下公式可用于实际曝露情况下的相关频率。对 10MHz 及以下频率的电气刺激，体内电场应按以下公式相加：

$$\sum_{j=1\text{HZ}}^{10\text{MHz}} \frac{E_{i,j}}{E_{L,j}} \leq 1 \quad (3)$$

其中： $E_{i,j}$ ——频率 j 感应的体内电场强度；

$E_{L,j}$ ——表 2 中给出的频率 j 所对应的感应电场强度限值。

作为基本限值的实际应用，可应用以下的场强度参照水平判据：

$$\sum_{j=1\text{HZ}}^{10\text{MHz}} \frac{E_j}{E_{R,j}} \leq 1 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1\text{HZ}}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{H_{R,j}} \leq 1 \quad (5)$$

其中： E_j ——频率为 j 的电场强度；

$E_{R,j}$ ——表 3 和表 4 给出的频率为 j 的电场强度参照水平；

H_j ——频率为 j 的磁场强度；

$H_{R,j}$ ——表 3 和表 4 给出的频率为 j 的磁场强度参照水平。

对肢体电流和接触电流，分别按以下要求计算：

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{I_j}{I_{L,j}} \leq 1 \quad (6)$$

其中： I_j ——频率为 j 的接触电流分量；

$I_{L,j}$ ——表 5 给出的频率为 j 的接触电流参照水平。

非正弦曝露

在低于 100kHz 的低频段，电场、特别是磁场，在大多数情况下在很大的频段范围内为谐波分量所畸变。因而，场的波形显示出复杂、通常带脉冲的类型。一贯可能的做法是使用诸如富里哀变换技术（FT）把这种场分解为离散的频谱分量，然后应用以上描述的多频率法则。这一做法基于这样一种假设，即频谱分量是同相位相加的，即所有的最大值在同一时间同时发生并导致出现尖峰。这在频谱分量数量有限，并且彼此的相位不相干（即它们是随机变化的）的情况下，是一种现实的假设。对于有固定相关性相位的情况下，这种假设可能是不必要地保守的。另外，FT 频谱分析中的采样及开窗可能产生出虚假（寄生）频率，从而可能人为增加线性相加的曝露率。

一种替代频谱法的方案是采用一个与基本限值和参照水平相关的滤波功能元件来对外部电场、磁场以及感应电场或电流进行权重处理（ICNIRP 2003b；Jokela 2000）。对由谐波分量组成的宽频段的场，经过滤波处理的限值可以用以下数学式表示：

$$\left| \sum_i \frac{A_i}{EL_i} \cos(2\pi f_i t + \theta_i + \varphi_i) \right| \leq 1 \quad (7)$$

其中， t ——时间；

EL_i ——在第 i 次谐波频率 f_i 下的曝露限值；

A_i 、 θ_i 、 φ_i ——场的幅值和相位角以及滤波元件在谐波频率 f_i 下的相位角。

除了相位角外，等式 (7) 类似于等式 (3)、(4) 和 (5)。实际用于加权(加权峰值曝露的确定)的进一步指南在资料性附录(附录) 中给出。

防护措施

ICNIRP 指出，人类曝露于电场和磁场的防护可以通过全面遵循本导则来确保。

保护工人的措施包括工程与管理控制以及个人防护程序。在曝露于工作场所导致基本限值被超过时，必须采取适当的防护措施。作为第一步，应该采取尽可能把装置的排放降低到可接受水平的工程控制措施。这些控制措施包括良好的安全设计及在必要时使用联锁或类似的健康防护机制。

管理控制，诸如限制进入和使用声觉、视觉警告，应该与工程控制结合使用。个人防护措施，如防护服，虽然在某些情况下是有用的，应该看作是确保工人安全的最后手段，只要有可能，还是应优先采取工程与管理控制。进一步地，在使用绝缘手套等来防护个人受电击时，基本限值不应被超过，这是因为绝缘防护只是防止了场的非直接效应。

除防护服和其它个人防护以外，在有可能超过公众参照水平的情况下，相同的一些措施可以应用于公众。同样重要的是建立和应用预防以下情况的规则：

-
- 对医疗电子设备及装置 (包括心脏起搏器) 的干扰 ;
 - 电子爆炸装置的起爆物 (雷管);
 - 由感应电场、接触电流或火花放电引起火花 , 点燃易燃物而导致起火或爆炸。

关于长期影响可能性的考虑

如上所述 , 流行病学研究已一致性地发现每天长期低强度 (超过 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{T}$) 的工频磁场曝露与儿童期白血病风险增加相关联。国际肿瘤机构 (IARC) 已把工频磁场分类为可疑的致癌物。但是 , 在磁场与儿童期白血病之间的因果关系尚未确定 , 也没有其它长期影响已被确定。缺乏已确定的因果关系意味着这种影响不能列入基本限值。但是 , 风险管理建议 (包括预防性措施的考虑) 已经由 WHO (2007a , 2007b) 和其它组织提出。

致谢—国际非电离辐射防护委员会 (ICNIRP) 受到国际辐射防护协会 , 世界卫生组织 , 国际劳工局理事会 , 欧盟委员会和德国联邦环境、自然保护和核安全部的支持 , 特致感谢。ICNIRP 同时也非常感谢 ICNIRP 咨询专家和所有其他通过公开在线咨询做出过贡献的评论者。

在制定这些导则期间 , 国际非电离辐射防护委员会 (ICNIRP) 和 ICNIRP 极低频任务组的成员如下 :

国际非电离辐射防护委员会 (ICNIRP)

P. Vecchia, 主席 (意大利)

M. Hietanen, 2008年之前的副主席 (芬兰)

R. Matthes, 2008年之后的副主席 (德国)

A. Ahlbom 2008年之前(瑞典)

E. Breitbart 2008年之前(德国)

F. R. de Gruijl 2008年之前 (荷兰)

M. Feychting (瑞典)

A. Green (澳大利亚)

K. Jokela (芬兰)

J. Lin (美国)

R. Saunders (英国)

K. Schulmeister (奥地利)

P. Söderberg (瑞典)

B. Stuck (美国)

A. Swerdlow (英国)

M. Taki 2008年之前(日本)

B. Veyret (法国)

G. Ziegelberger, 科学部秘书(奥地利)

M. H. Repacholi, 前任主席(澳大利亚)

ICNIRP极低频任务组织

R. Matthes (德国), 极低频任务组织主席

A. Ahlbom (瑞典)

K. Jokela (芬兰)

C. Roy (澳大利亚)

R. Saunders (英国)

参考文献

- Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen JH, Tynes T, Verkasalo PK. 磁场和儿童白血病的集合分析. *Br J Cancer* 83:692–698; 2000.
- Attwell D. 低频电场和神经系统间的作用: 以视网膜作为模型系统. *Radiat Protect Dosim* 106:341–348; 2003
- Bahr A, Bolz T, Hennes C. 极低频数值剂量: 方法的准确性, 模型和参数的变异以及对量化导则的影响. *Health Phys* 92:521–530; 2007.
- Barth A, Ponocny I, Ponocny-Seliger E, Vana N, Winker R. 极低频磁场曝露对认知功能的影响: 荟萃分析的结果. *Bioelectromagnetics* 31:173–179; 2010.
- Cech R, Leitgeb N, Pedititis M. 极低频电场和磁场曝露同时感应 在孕妇模型产生的电流密度. *Phys Med Biol* 53:177–186; 2008.
- Cook CM, Thomas AW, Prato FS. 极低频磁场曝露和极低频调制射频 (RF) 以及微波场曝露对人体电生理学和认知的影响: 近年来研究的评论. *Bioelectromagnetics* 23:144–157; 2002.
- Cook CM, Saucier DM, Thomas AW, Prato FS. 极低频磁场曝露和极低频调制射频场曝露: 最近研究中观察到的人的生理和认知在时间效应上的影响 (2001–2005). *Bioelectromagnetics* 27:613–627; 2006.
- Crasson M. 50–60赫兹电场和磁场对人类认知功能的影响: 综述. *Radiat Protect Dosim* 106:333–340; 2003.
- Crompton MJ, Collins AR. 电磁场环境有基因毒性吗? *DNA Repair (Amst)* 3:1385–1387; 2004.
- Dimbylow PJ. 女性体素模型的发展, NAOMI及其在低频磁场和电场感应电流密度和电场计算中的应用. *Phys Med Biol* 50:1047–1070; 2005.

-
- Dimbylow PJ. 怀孕女性混合体素数学模型的发展及其在50赫兹磁场和电场剂量学中的应用. *Phys Med Biol* 51:2383–2394; 2006.
- Garcia AM, Sisternas A, Hoyos SP. 极低频电场和磁场职业暴露和阿尔茨海默病: 荟萃分析. *Int J Epidemiol* 37:329–340; 2008.
- Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA. 磁场、路线代码和儿童期白血病的集合分析. *Epidemiol* 11:624–634; 2000.
- Hirata A, Wake K, Watanabe S, Taki M. 均匀磁场暴露中日本男性和女性人体的原位电场和电流密度. *Radiat Protect Dosim* 35:272–275; 2009.
- Huss A, Spoerri A, Egger M, Röösli M. 电力线附近的居民和神经退行性疾病的死亡率: 瑞士人口长期研究. *Am J Epidemiol* 169:167–175; 2009.
- 国际癌症研究机构. 静态和极低频电场和磁场. Lyon, 法国: 国际癌症研究机构; IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans 80卷; 2002
- 国际非电离辐射防护委员会. 限制时变电场, 磁场和电磁场 (300 千兆赫及以下) 暴露的导则. *Health Phys* 74:494–522; 1998.
- 国际非电离辐射防护委员会. 防止非电离辐射的一般方法. *Health Phys* 82:540–548; 2002.
- 国际非电离辐射防护委员会. 静止和低频电磁场 (0 -100kHz 时) 暴露, 生物效应和健康后果. In: Bernhardt JH, Matthes R, McKinlay A, Vecchia P, Veyret B 等。科学证据和健康后果的复核. 慕尼黑: 国际非电离辐射防护委员会; 2003a.
- 国际非电离辐射防护委员会. 关于确定频率低于100kHz的脉冲和复杂非正弦波形暴露与ICNIRP导则相符性的指南. *Health Phys* 84:383–387; 2003b.
- 国际非电离辐射防护委员会. 医用磁共振 (MR) 程序: 病人保护. *Health Phys*

-
- 87:197–216; 2004.
- 国际非电离辐射防护委员会.关于限制静止磁场暴露的导则。Health Phys 96:504–514; 2009.
- 国际电工委员会.暴露在低频和中频范围的电场和磁场——计算人体内感应电流密度和体内电场方法。日内瓦：IEC 62226; 2004.
- 国际电工委员会.与人体暴露有关的家用电器和类似电器的电磁场测量方法.IEC 62233; 2005a.
- 国际电工委员会.医用电气设备——第一部分：安全通用要求；2：附属标准：电磁兼容性——要求和试验.日内瓦：IEC 60601-1-2; 2005b.
- 电气电子工程师协会.电气电子工程师协会 1308 推荐仪表实践：磁感应强度和电场强度计规格 -10 赫兹到 3 千赫,IEEE , Piscataway ; 1994.
- 电气电子工程师协会.电气电子工程师协会 644-1994 (Reaff 2008).交流电力线工频电场和磁场测量程序的 IEEE 标准；IEEE , Piscataway ; 2008
- Jefferys JG. 实验癫痫神经生物学.Curr Opin neurol 7:113–122; 1994.
- Jokela K. 脉冲和宽带磁场的暴露限制.Health Phys 79:373–388; 2000.
- Jokela K. 包括不均匀场分布的复杂电磁场暴露状况评估.Health Phys 92:531–540; 2007.
- Juutilainen J. 极低频电场和磁场发展中的影响.Radiat Protect Dosim106:385–390; 2003.
- Juutilainen J. 电磁场发展中的影响.7:107–115; Bioelectromagnetics 2005.
- Kanai R, Chaieb L, Antal A, Walsh V, Paulus W.视觉皮层电刺激的频率依赖性。Curr Biol 18:1839–1843; 2008.
- Kheifets L, Ahlbom A, Johansen C, Feychting M, Sahl J,Savitz D. 极低频磁场和心脏疾病。Scand J Work Environ Health 33:5–12; 2007.
- Kheifets L, Bowman JD, Checkoway H, Feychting M, Harrington M, Kavet R, Marsh

-
- G, Mezei G, Renew DC, van Wijngaarden E.极低频电场和磁场职业流行病学的未来需求：评论和建议。Occup Environ Med 66:72–80; 2009.
- McNamee DA, Legros AG, Krewski DR, Wisenberg G, Prato FS, Thomas AW.文献综述：极低频电磁场曝露对心血管的影响。Int Arch Occup Environ Health 82:919–933;2009.
- Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, Kunieda E, Watanabe S, Taki M, Yamanaka Y.日本成年男性和女性的平均身高和体重逼真的高分辨率全身体素模型，以及模型对无线电频率电磁场剂量的应用的发展。Phys Med Biol 49:1–15; 2004.
- Nyenhuis JA, Bourland JD, Kildishev AV, Schaefer DJ.健康影响和强烈梯度场的安全。见：Shellock F, ed. 磁共振程序：健康影响和安全。Boca Raton, FL: CRC Press ; 2001: 31–54.
- Pogosyan A, Gaynor LD, Eusebio A, Brown P. 在β波段频率推进皮质活动致缓人体活动。Curr Biol 19:1–5; 2009.
- Reilly J. 应用生物电：从电刺激到电疗。纽约：Springer-Verlag；1998.
- Reilly JP. 关于“限制时变电场，磁场和电磁场（300GHz及以下）曝露导则”的评论。Health Phys 76:314-315;1999
- Reilly JP.适用于低频电场和磁场曝露导则的神经电学机制——第一部分：正弦波形。Health Phys 83:341–355; 2002.
- Reilly J, Diamant A. 在电刺激方面的空间关系：应用于电磁场标准。IEEE Trans on Biomed Eng 50:783–785; 2003.
- Rubin GJ, Das Munshi J, Wessely S. 电磁超敏性：激发研究的系统回顾。Psychosom Med 67:224–232; 2005.
- Saunders RD, Jefferys JG. 弱电场在中枢神经系统中的相互作用。Health Phys 83:366–375; 2002.
- Saunders RD, Jefferys JG. 极低频导则的神经生物学基础。Health Phys 92:596–603;

2007.

So PPM, Stuchly MA, Nyenhuis JA. 磁共振成像中的梯度切换场产生的周围神经刺激。IEEE Trans on Biomed Eng 51:1907–1914; 2004.

Stuchly MA, Dawson TW. 人体暴露于电力线：外部磁场的诱导量关系。Health Phys 83:333–340; 2002.

世界卫生组织.环境健康准则 EHC238. 极低频 (ELF)场。日内瓦 :WHO ;2007a

世界卫生组织.电磁场和公众健康：极低频场暴露.Fact Sheet 322 号.日内瓦 :WHO ; 2007b

Xi W, Stuchly MA. 男人在极低频磁场中感应电流高空间分辨率析.Appl Comput Electromagn Soc J 9:127–134; 1994.

附录

资料性附录

加权峰值曝露的确定

可以通过先计算波形的频谱，然后应用式 (7) 实现计权。然而，在许多应用中，尤其是时域中使用模拟或数字滤波器更为方便。该滤波器增益 (输出对输入信号的比例) 应是直接正比于曝露限值的频率函数 $G = EL(f_{\text{ref}})/EL(f)$ ，其中 EL 是频率 f 对应的限值，而 f_{ref} 是从 1 Hz 到 100 kHz 的任意参考频率。经滤波的波形峰值不应超过参考频率下转换为峰值 (波幅) 的曝露限值 (基本限值或参照水平)。表 6 显示了得出峰值限值的例子。除了幅值外，物理滤波器总是影响场的相位，从而改变经滤波的场峰值。在本导则正文的图 1、2 和 3 中，限值按

频率范围区分，限值分别与 $1/f^2$ 、 $1/f$ 、 f^0 (常数) 或 f 成正比。在 $1/f^2$ 、 $1/f$ 、 f^0 和 f 范围内，滤波器的相角 φ_i (见公式 7) 分别为 180, 90, 0 和 -90°。该加权滤波器可用电子或数字滤波器近似模拟，其中衰减不应偏离超过 3 分贝，相角与准确的分段线性的频率响应相比超过 90°。例如，图 A1 表示了用于感应电场加权的滤波器的衰减和相角频率函数。近似曲线是基于简单近似的 RC (电阻/电容) 类型的滤波函数。加权峰值方法在不论是相关场还是不相关场条件下都可使用。在后一种情况下，测量时间必须足够长，以便有一个合理的概率来检测最坏的情况下峰值。在包括几个频率的非相关场情况下，加权峰值方法与频谱总加方法结果相同。

表 6. 非正弦电场和磁场得出的峰值限值 参考频率为 50 赫兹。

	体内电场 E_{induced}		体外 E_{external}	体外磁场 B
	(mVm^{-1})		(Vm^{-1})	(μT)
	脑中	躯体组织		
职业的	$\sqrt{2} \times 100$	$\sqrt{2} \times 800$	$\sqrt{2} \times 10000$	$\sqrt{2} \times 1000$
公众的	$\sqrt{2} \times 20$	$\sqrt{2} \times 400$	$\sqrt{2} \times 5000$	$\sqrt{2} \times 200$

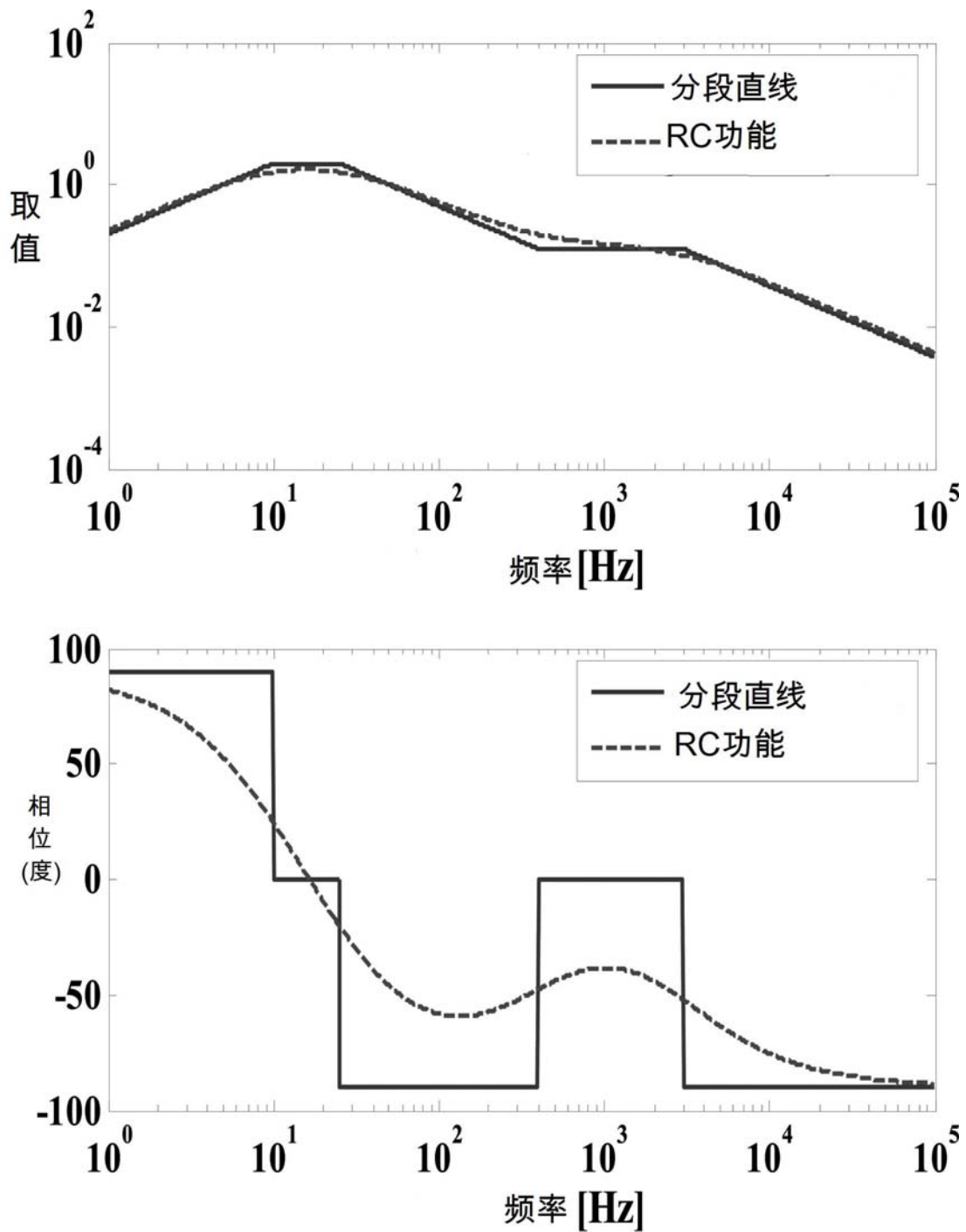


图 A1 用于对感应电场加权的幅值和相位响应

术语

有害影响 Adverse effect

由于电场、磁场或接触电流暴露，对人体健康的不利影响。

平均距离 Averaging distance

在确定与基本限值的相符性时，用来对体内电场取平均的距离。

基本限值 Basic restriction

与所有已知的、可能导致人体组织有害健康影响的生物作用机制密切相关的定量的、必须遵循的限值。

癌症 Cancer

以真核细胞不受控制和不正常分裂并使疾病扩散(迁徙)到机体内不同部位为特征的一类疾病。

中枢神经系统 Central nervous system (CNS)

脊椎动物神经系统的一部分，由脑和脊髓组成，但不包括周围神经。

特性 Characteristics

电场或磁场具体的物理特征，诸如量值、频谱、极化、调制等。

导电率 Conductivity

决定在材料上施加电场时，电流密度量值大小的一种材料性能，单位以西门子每米 ($S m^{-1}$) 表示;是电阻率的倒数。

接触电流 Contact current

在接触电极或其他电流源时流过生物介质的电流。

电流密度 Current density

一个矢量，该矢量在给定表面上的积分等于流过表面的电流；线性导体内的平均密度等于电流除以导体截面积。单位为安培每平方米 ($A m^{-2}$)。

DC

“直流电流”的缩写，但也用来表示场的恒定，请参阅“静态电场”。

去极化 (细胞) Depolarization (cellular)

降低跨越细胞膜的静息电位。

直接效应 Direct effect

由电磁场与生物结构之间的直接相互作用产生的生物效应。

直接电刺激 Direct electro stimulation

由外部电场或磁场 (而不是直接接触其他导体或火花放电) 在生物介质内感应电场所产生的刺激。

DNA (脱氧核糖核酸) deoxyribonucleic acid

由脱氧核糖核酸(以双链、双螺旋的形式组成的模块)构成的一种聚合物分子，是大多数生物组织的遗传物质。

剂量学 Dosimetry

针对曝露于电磁场的人体或动物，测量或通过计算确定体内电场强度或感应电流密度、比吸收 (SA)、比吸收率 (SAR)。

电场 Electric field

矢量场 E，以伏每米为单位。

电场强度 (E) Electric field strength

电场作用在点电荷上的力除以电荷。电场强度单位以牛顿每库仑或伏每米表示 ($N/C = V/m$) 。

电磁能 Electromagnetic energy

电磁场中储存的能量。单位为焦耳 (J) 。

电磁场 Electromagnetic fields

环境中电场和磁场的总称。这个术语经常和“电磁辐射”相混淆，并在使用于极低频场时形成误导，因为对极低频而言很难检测到辐射。

电刺激 Electro stimulation

通过外施电刺激在可激励组织中传播动作电位的感应 ; 突触前过程的电极化导致突触后细胞活性的变化。

EMF

电场和磁场。

已确定的机制 Established mechanism

具有以下特性的生物电机制：(a) 能用于预测人体的生物效应；(b) 通过方程或参数关系可以建立具体的模型；(c) 已经在人体中得到证实或者动物数据能可信地外推到人体上；(d) 有强证据支持；(e) 被科学界专家广泛接受。

曝露 Exposure

在人体经受低频场或接触电流影响的情况下，它就存在。

长期曝露 Exposure , long-term

该术语指的是在所涉及的生物系统寿命期大部分时间内的曝露；因此，持续期可能从几星期到许多年。

曝露评估 Exposure assessment

利用测量、建模、源信息或其他手段对人体曝露进行评价。

曝露计量 Exposure metric

概括电场和/或磁场曝露的一个数值。计量通常综合仪器测量信号处理和完成测量后的数据分析来确定。

频率 Frequency

1 秒中电磁波完整正弦周期的数目；单位通常以赫兹 (Hz) 表示。

公众 General public

术语“公众”是指全部人口。包括所有年龄和不同健康状况的人，也包括特定的脆弱群体或个人，如体弱者、老人、怀孕女工、婴儿和幼童。

公众曝露 General public exposure

公众成员受到的低频场的所有曝露。此定义不包括职业曝露和医疗曝露。

谐波 (频率) Harmonic (frequency)

频率是电力频率或其他参照频率的整数倍。

心率 Heart rate

每分钟心跳次数的测量。

赫兹 Hertz (Hz)

频率(f)的单位。一赫兹等于一周期每秒。1 kHz = 1,000 Hz, 1MHz = 1,000 kHz,

1 GHz = 1,000 MHz。

感应 Induction

由外部 (环境) 时变电场或磁场所引起的导电介质中的电场或磁场。

瞬时的 Instantaneous

用来描述某些特定参数的形容词，这些参数的测量或评估必须在很短（通常为 100 微秒或更短）的时间间隔内。

摆脱电流 Let-go current

在该阈值电流水平下不自主的肌肉收缩会阻止紧握带电导体的手松开。

磁场 Magnetic field

一个矢量， H ，指空间中任意点的磁场，单位以安每米 ($A\cdot m^{-1}$) 表示。另见磁通密度。

磁场强度 Magnetic field strength (H)

磁场矢量的大小；单位是安每米 (A/m)。

磁通密度 Magnetic flux density (B)

一个矢量，该矢量决定作用在运动电荷或电荷群（电流）上的力。磁通密度单位以特斯拉 (T) 表示。1 高斯（不推荐单位）等于 $10^{-4}T$ 。

磁光幻视 Magnetophosphenes

感应电流刺激视网膜引起的光闪烁的感觉。

平均 Mean

一系列测量值或其他数据的算术平均。

中值阈值 Median threshold

该阈值在统计分布中处于有 50% 数据具有更大阈值，而 50% 有更小阈值。

医疗曝露 Medical exposure

病人在医疗诊断、认可的医疗治疗或作为医疗研究的志愿者受到的低频场曝露。

诱变剂 Mutagen

一种能引起基因突变的物质。

基因突变 Mutation

不是基因重组引起的遗传物质的任何可检测的和可遗传的变化。

神经 Nerve

一束轴索。

神经纤维 Nerve fiber

一根神经轴索。

神经元 Neuron

一个单细胞单元，通常由一个轴索、细胞体和树突树组成。

非电离辐射 Non-ionizing radiation (NIR)

包括电磁频谱中通常不具有足够能量来使物质电离的所有辐射和场 ;特点是每光子能量小于 12 电子伏特 ,相当于波长大于 100 纳米 ,或者频率低于 3×10^{15} 赫兹。

不均匀场 No uniform field

在所关心的人体或人体某部分所处空间范围内 ,场的幅值、方向和相对相位不是常数。对电场而言 ,此定义适用于未被人体畸变的电场环境。

职业曝露 Occupational exposure

个人因从事定期或指定的职业活动而受到的所有电磁场曝露。

周围神经 Peripheral nerve

存在于中枢神经系统之外 ,并接入或引出中枢神经系统的神经。

磁导率 Permeability

表示由磁场强度产生磁通密度的标量或张量。

注：对于各向同性介质，磁导率是标量；对于各向异性介质磁导率是矩阵。别名：绝对磁导率。如将材料或介质的磁导率除以真空磁导率 μ_0 （磁性常数），其结果称为相对磁导率（ μ ）。单位：亨利每米（ H m^{-1} ）。

介电常数 Permittivity

定义带电体之间各向同性介质对引力和斥力影响的常量，单位以法拉每米（ Fm^{-1} ）表示；*相对介电常数* 等于材料或介质的介电常数除以真空介电常数。

相持续时间 Phase duration (t_p)

平均值为零的波形相邻两个过零点之间的时间。对于频率为 f 的正弦波， $t_p = 1/(2f)$ 。对于指数形波， t_p 定义为从波形峰值到其衰减到峰值的 0.37 倍（ e^{-1} ）时的测量时间。

光幻视 Phosphene

非光刺激引起的视觉感受。电致光幻视是由电流引起的；磁致光幻视是由磁场引起的。

质膜（细胞膜） Plasma membrane

动物和植物细胞的胞质周围的脂质双层膜。

（细胞的）极化 Polarization (cellular)

跨越细胞膜形成的电位。

电力频率 Power frequency

产生交流电的频率。对于用电设备，在北美、巴西和日本的一部分，电力频率是 60 赫兹；在世界大部分其他地方是 50 赫兹。

蛋白质 Protein

一组高分子量、具有复杂形状和成分的含氮有机化合物。

公众曝露 Public exposure

公众成员经受的所有电磁场曝露，不包括职业曝露和医疗过程中的曝露。

无线电频率（射频） Radiofrequency (RF)

频率在 3kHz 到 300GHz 范围内的电磁能。

降低因子 Reduction factor

降低影响阈值以补偿导则制定过程中各种不确定源的影响。一些曝露影响阈值水平不确定源的例子包括：将动物影响数据外推到对人的影响；不同人由于耐受性差异造成的生理学储备的差异和剂量-反应关系统计上的不确定性（置信区间）。在 ICNIRP 看来，应用导则时的测量不确定性对负责提出相符性方法的机构而言是更现实的问题。ICNIRP 在设定降低因子中没有考虑这一点。

参照水平 Reference levels

人体可能曝露而无有害影响，并带有可接受的安全因子的电场、磁场和接触电流的有效值及峰值。如果能证明没有超出基本限值，本导则中的电场和磁场曝露的参照水平可以超过。

因此，它是可以用来确定与基本限值相符性的适用或“替代”的参数。

相对磁导率 Relative permeability

（绝对）磁导率（参阅相关条款）除以真空中的磁导率。接近 1 的值表示材料只能被外部场弱磁化。

相对相位 Relative phase

正弦波的相角相对于导电介质内不同点测得的另一波形（或相对于某一指定参考波形）的相角。

相对危险度 Relative risk (RR)

研究组与对照组疾病率的比率，必要时对混淆因素（比如年龄）做些调整。对于罕见疾病，相对危险度实际上与“比数比（odds ratio）”相同。

均方根 Root mean square (rms)

时变函数 $F(t)$ 在指定的时间区间 t_1 到 t_2 内平方平均值的平方根。它是通过先求函数平方，再确定所获得函数平方的平均值，最后求出该平均值的平方根，即：

$$F_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [F(t)]^2 dt} \quad (\text{A1})$$

S.I

国际单位制的缩写。

空间峰值 Spatial peak

此术语用来描述特定量在人体内小部分或小范围内平均的最高水平。

火花放电 Spark discharge

电流通过空气隙转移，其条件是电压高到足以使空气电离，这与直接接触电源不同。

静态场 Static field

不随时间变化的场。在大多数环境中，电场和磁场随时间变化，但其频谱中有 0Hz 分量。场的“准静态”分量能通过采样时间内振荡信号的平均来测量。

特斯拉 Tesla (T)

磁通密度的国际单位制单位。1 特斯拉 = 10,000 高斯（参阅相关条款）。

阈值 Threshold

划分有反应和无反应之间界限的激励水平。

心室纤颤 Ventricular fibrillation

以快速不协调收缩为特征的心室心律失常。

体素 Voxel

一个三维的计算元素。本标准中用来代表剂量模型中的动物和人体组织。

波形 Waveform

电幅值随时间的变化。除非另有说明，此标准中术语“*波形*”指的是生物介质内所在点的值（或测量值）。

工人 Workers

见术语“*职业曝露*”。

（本文件由中国 华东电力试验研究院 杨新村、辛亮、陈洁、陈磊译校，译文承蒙 ICNIRP 委员林治义教授精心审校，，谨致衷心感谢）