

ICNIRP 導則 ( 中文繁體版 )

## 限制時變電場和磁場曝露的導則

( 1Hz~100KHz )

國際非電離輻射防護委員會 ( ICNIRP )

### 引 言

本文件為曝露在電磁譜中低頻電場和磁場的人體提供防護指南。制定 ICNIRP 導則的一般原則已在其它出版物發表 ( ICNIRP 2002 )。本文件中低頻的頻率範圍從 1Hz 延伸到 100KHz。超過 100KHz 就需要考慮諸如發熱等效應，這些內容包含在其它 ICNIRP 導則中。但是在頻率從 100KHz 至大約 10MHz，必須按照曝露的條件，同時考慮低頻對神經系統的效應和高頻效應的防護。因而本文件中的一些指南延伸到 10MHz，以覆蓋該頻率範圍內的神經系統效應。關於靜態磁場的導則已在另一份單獨的文件 ( ICNIRP 2009 ) 中給出。這些導則適用於由運動感應的電場或 1Hz 及以下的時變磁場，將單獨出版。

本出版物替代 1998 年導則 ( ICNIRP 1998 ) 中的低頻部分相關內容。ICNIRP 目前正在修改超過 100KHz 的頻譜中高频部分的導則。

### 範圍與目的

本出版物的主要目的是建立限制電場、磁場 ( EMF ) 曝露的導則，它將為防止所有已確定的有害健康的影響提供保護。

已經對 EMF 直接和間接影響的研究進行了評估：直接影響是源於場與人體的直接作用；非直接影響包括與導電物體 ( 該物體所具有

的電位與人體不同)的相互作用。對實驗室及流行病學研究結果、基本曝露評估判據以及用於實際危害評估的參照水平等進行了討論。所提出的導則既適用於職業也適用於公眾曝露。

導則的限值是基於已確定的關於急性效應的證據；現有的可用的知識指出，遵循這些限值可保護職工和公眾免受低頻電磁場曝露的有害健康影響。非常小心地複核了流行病學和生物學數據，結論是：沒有充分的證據表明它們與低頻電磁場曝露有因果關係。

導則不涉及在規定的試驗條件下限制特定裝置電磁場排放的產品性能標準，也不是用來測量表征電場、磁場和電磁場的物理量的技術規定。準確確定這些物理量的計量和測試技術規範可依據其它標準(IEC 2004, 2005a; IEEE1994, 2008)。

符合本導則並不一定就能防止EMF對醫療器械產生干擾或造成影響，這類醫療器械包括金屬假肢、心臟起搏器和去纖顫器以及耳蝸植入體。在推薦的參照水平下可能出現對起搏器的幹擾。避免此類問題的建議超出本導則的範圍，但有其他標準規定(IEC2005b)。

隨著與限制低頻時變電場和磁場曝露有關科學知識的任何進展，本導則會周期性地修改和更新。

## 量和單位

電場只與電荷的存在相關，而磁場是電荷物理運動(電流)的結果。電場 $E$ 對電荷施加作用力，單位以伏特每米( $Vm^{-1}$ )表示。與此類似，在電荷運動和/或磁場隨時間變化的情況下，磁場也可以對

電荷施加物理力。電場和磁場既有大小又有方向（也就是說，磁場和電場都是向量）。磁場可以通過兩種方式表示，一種是磁通密度  $B$ ，單位為特拉斯（T）；另一種是磁場強度  $H$ ，以安培每米（ $\text{Am}^{-1}$ ）為單位。物理量  $B$  和  $H$  的關係表達式如下：

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

式中， $\mu$  是比例常數（磁導率）；在真空和空氣以及非磁性（包括生物的）材料中， $\mu$  的值為  $4\pi \times 10^{-7}$ ，單位是亨利每米（ $\text{Hm}^{-1}$ ）。因此，出於防護目的而描述磁場時，只需用  $B$  或  $H$  中的一個物理量來說明。

曝露於時變 EMF 會引起內部電場及體內電流，並且會使組織吸收能量，具體與耦合機制和涉及的頻率有關。內部電場  $E_i$  和電流密度  $J$  之間的關係可以由歐姆定律表示：

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

式中， $\sigma$  是表示介質的導電率。

導則中所用的劑量測量如下：

-原位或內部電場  $E_i$

-電流  $I$

表 1 匯總了本導則使用的 EMF 和劑量測量以及它們的單位

### 限制曝露的科學基礎

限制曝露的導則是在全面審視了所有已經出版的科學文獻後制定的。按照良好確立的判據，對所報導的各種發現的方法、結果及結論的科學有效性進行評估。因此，只有具有良好和可信科學證據的影響才能作為曝露限制的依據。

表 1：電場、磁場、電磁場和劑量測量及相應的 SI 單位

物理量	符號	單位
導電率	$\sigma$	西門子每米 ( $S m^{-1}$ )
電流	$I$	安培 ( A )
電流密度	$J$	安培每平方米 ( $A m^{-2}$ )
頻率	$f$	赫茲 ( Hz )
電場強度	$E$	伏特每米 ( $V m^{-1}$ )
磁場強度	$H$	安培每米 ( $A m^{-1}$ )
磁通密度	$B$	特斯拉 ( T )
磁導率	$\mu$	亨利每米 ( $H m^{-1}$ )
介電常數	$\varepsilon$	法拉第每米 ( $F m^{-1}$ )

低頻電磁場曝露的生物效應已經由國際腫瘤研究機構 IARC, ICNIRP 和 WHO ( IARC2002, ICNIRP2003, HPA-NRPB2004 , WHO2007a ) 以及一些國家的專家組完成了複核。這些出版物也為本導則提供了科學依據。

如下所詳述，導則的基礎來自兩個方面：一是低頻電場曝露引起的已被很好識別的生物反應，這些反應是通過表面電荷作用，其程度從有感覺到煩惱。二是通過曝露在低頻磁場的志願者實驗而確認的唯一影響，即中樞神經和周圍神經組織刺激以及視網膜光幻視的感應，也即在視場周圍的一種昏暈閃爍光感覺。視網膜是中樞神經系統的一

部分，雖然用於中樞神經系統神經元回路感應電場效應的模型略顯保守，但總體還是合適的。

鑒於科學數據中仍存在的 uncertainty，本曝露導則已應用了降低因子 ( reduction factors )。詳細可見 ICNIRP2002

## 場與身體之間的耦合機制

人和動物的身體會顯著擾亂低頻電場的空間分布，在低頻率時，人體是良好的導體，身體外部被擾亂的電場線與身體表面幾乎保持著垂直方向。這樣，在曝露於電場的身體表面感應交變電荷，上述交變電荷在體內產生電流。

人體低頻電場曝露的關鍵劑量特征如下：

- 在 50~60Hz，身體內部感應的電場通常比外部電場小 5-6 個數量級；
- 對於給定的外部電場，當人體通過雙腳與地面良好接觸（電氣接地）時，體內感應電場最強；而當人體與地面絕緣（在“自由空間”）時，感應電場最弱；
- 人體完全接地時，流過人體的總電流是由身體大小和體型（包括姿勢）決定的，而非組織的導電率決定；
- 流過不同器官和組織的感應電流分布則是取決於這些組織的導電率；
- 此外也存在間接效應，當身體與位於電場中的導電物體接觸時，體內產生電流。

就磁場而言，由於體內組織的磁導率與空氣中的磁導率相同，所以組織內的磁場也就和外部磁場一樣。人和動物的身體不會明顯對磁場產生擾亂。磁場的主要作用是在導電組織中由法拉第感應產生的電場和相應電流。在靜態磁場中移動也可能感應電場。人體低頻磁場曝露的關鍵劑量特征包括以下方面：

- 對於給定的磁場強度和方向，越大的軀體感應的電場越強，這是因為可能的導電環增大之故；
- 感應產生的電場和電流取決於外部場相對於身體的方向。通常，當外部磁場沿從身體正面至後背的方向時，體內感應場最大。但就某些器官而言，最高值出現在不同的外部磁場方向時；
- 當磁場的方向沿著與身體垂直軸方向時，感應的體內電場最弱；
- 器官和組織不同的導電率會對感應電場的分布產生影響。

## 來自目前科學文獻的結論

### 神經反應

低頻電場曝露可以導致已為識別的由表面電荷效應形成的生物響應，其程度從有感覺到煩惱 ( Reilly 1998 , 1999 )。對 50~60Hz，最敏感的 10%志願者的直接感覺閾值在 2-5 kV m<sup>-1</sup>；而 5%志願者在 15-20 kV m<sup>-1</sup> 時感覺煩惱。在 5 kV m<sup>-1</sup> 時 7%的志願者在電氣觸地時感到痛感，而有 50%在 10 kV m<sup>-1</sup> 電場中碰觸地時感到痛感。從一個充

電物體通過接地的人產生的火花放電閾值取決於物體的尺寸，因而需要逐個評估。

電刺激（包括低頻電磁場感應）對電氣易激勵神經和肌肉組織的反應在很多年以前就已經被良好確認（例如 Reilly 2002; Sauders and Jefferys 2007）。根據使用神經模型的理論計算，人體周圍神經系統（PNS）有髓神經纖維最小的閾值大約為  $6 \text{ V m}^{-1}$ （峰值）（Reilly 1998, 2002）。但是在志願者曝露於磁共振（MR）切換的梯度磁場中，根據使用均質人體體素模型的計算，周圍神經刺激顯示的感覺閾值可能低到  $2 \text{ V m}^{-1}$ （Nyenhuis et al 2001）。根據以上磁共振研究數據，So et al.（2004）運用異質人體模型進行了組織中感應電場的更精確計算。這些作者估計周圍神經刺激的最小閾值在  $4\text{-}6 \text{ V m}^{-1}$ （取決於設定刺激發生在皮膚或皮下脂肪）。在較強刺激下，不適和痛感相繼而來；在超過感覺中值閾值約 20% 時出現不能忍耐刺激的最低相對值（ICNIRP 2004）。中樞神經系統中的有髓神經纖維可以被經顱磁刺激（TMS）感應的電場所激勵，在 TMS 過程中，皮質組織中感應的脈沖場是相當高的（ $>100 \text{ V m}^{-1}$  峰值），雖然理論計算提示，最小刺激閾值可能低到  $\sim 10 \text{ V m}^{-1}$  峰值（Reilly 1998, 2002）。對任何一類神經，在超過約 1~3 kHz 時，由於神經細胞膜上可供電荷積累的時間逐漸變短，閾值開始上升。在約 10 Hz 以下，由於神經對緩慢去極化刺激因素的適應，閾值也會上升。

肌肉細胞通常對直接刺激比神經組織較不敏感（Reilly 1998）。心臟肌肉組織應得到特別關注，這是因為它的功能異常是潛在的生命威

脅；然而，心室纖顫閾值要比心臟肌肉激勵高 50 倍或以上 ( Reilly 2002 )，雖然假如在心臟循環的易損期內心臟受到重複激勵時這個倍數將顯著下降。在高過約 120 Hz 時，由於肌肉纖維與有髓神經相比時間常數要長得多，閾值會增加。

低於直接神經或肌肉激勵閾值的電場已確定的最顯著影響是磁光幻視感應，即一種曝露在低頻磁場中的志願者視網膜視場周圍的虛暈閃爍光感覺。磁通密度最小閾值在 20 Hz 時約為 5 mT，頻率較高和較低時閾值上升。在這些研究中，磁光幻視是感應電場與視網膜中電氣可激勵細胞相互作用的結果。視網膜形成前腦的旁枝，因此總體上可作為出現在中央神經系統組織內過程的良好但又保守的模型 ( Attwell 2003 )。在視網膜中感應磁光幻的閾值在 20Hz 頻率下約為  $50 \sim 100 \text{ mV m}^{-1}$ 。頻率較高和較低時閾值上升 ( Saunders and Jefferys 2007 )，雖然這些值還有很大的不確定性。

中央神經系統神經組織的一體性會使諸如認知過程 ( 如記憶、對這些生理弱電場的敏感性 ) 等功能產生變化。Saunders 和 Jefferys ( 2002 ) 提出，由這些弱電場引起中央神經系統神經的電極化會增強神經元活性組的同步，並影響鄰近非活性神經元的參入，進而影響整體神經細胞的可激勵性和活性。使用腦切片的體外研究證據顯示，這些效應的最小閾值在頻率為 100Hz 以下，並可低至  $100 \text{ mV m}^{-1}$  ( Saunders and Jefferys 2007 )。

兩個研究組將電極直接對頭部施加強弱電場，調查了它對人體腦電活動和功能的影響。一個組 ( Kanai et al.2008 ) 報道了在刺激頻率與視覺皮層特性一致時，不論在黑暗條件 ( 約為 10Hz ) 還是在光照條件 ( 約 20Hz ) 下，對視覺皮層的刺激產生了皮層光幻視感覺 ( 類似於在視神經中出現的光幻視 )，但在更高或更低頻率下都不會出現。另一個組 ( Pogosyan et.2009 ) 加在正在完成視覺—活動任務的志願者

的運動皮層，發現在完成任務時，手的移動有很小但具有統計顯著性的遲緩，這與 20Hz 時運動皮層作用同步性增加是一致的，在較低的刺激頻率下沒有發現該效應。總之，這兩組作者都發現，在 10~20Hz 的電場超過視網膜光幻視閾值時，可與活動中的視覺和運動皮層節奏性的電特性相互作用，並輕微地影響視覺過程和運動協調性。這表示施加 10~20Hz 電磁場感應的電場足夠大時，也可能產生類似的效應。

但是，志願者曝露於低頻電磁場對腦電活動、識別能力、睡眠和情緒等其它神經反應影響的證據則遠不明顯 ( Cook 等人 2002,2006 ; Crasson 2003 ; ICNIRP 2003a ; Barth 等人 2010 )。總體而言，這些研究都是在曝露水平為 ( 或 ) 低於 1~2mT 下進行的，也即低於產生上述影響所需要的水平，並且已經產生的證據至多都只是細微和短暫的影響。對得出這些響應的條件目前還不能很好確定。

有些人聲稱對電磁場存在過敏，然而，雙盲激發研究的結果卻表明，這些報導的症狀與電磁場曝露並無關聯 ( Rubin et al 2005 ; WHO 2007a )。

在低頻電場和磁場曝露導致抑鬱症狀或自殺方面只有不一致、非結論性的證據 ( WHO 2007a )。

以動物為對象，已從不同的角度，采用一系列曝露條件，針對低頻場曝露對神經反應功能影響的可能性展開研究。但幾乎沒有已確定的影響。有令人信服的證據表明低頻電場能夠被動物感知，這極有可能是表面電荷效應的結果，並可能導致短暫覺醒或者輕微的緊張。其他可能由電磁場引起的變化都不能很好確定 ( WHO 2007a )。

因此，表面電荷的感覺、神經和肌肉組織的直接刺激以及視網膜

光幻視是已確定了的 ( 影響 ) , 可以作為導則的基礎。另外還有間接的科學證據表明諸如視覺過程和運動協調性等腦功能可能受感應電場短暫地影響。但是 , 來自曝露於低頻電場和磁場的志願者神經反應研究的證據還不足以作為制定人類曝露限值的可靠依據。

## 神經內分泌系統

志願者研究以及居民和職業的流行病學研究結果顯示 50~60Hz 電場或磁場不會對神經內分泌系統產生不利的影響。尤其是對特定激素 ( 包括人體松果腺釋放的褪黑素在內 ) 的循環水平和涉及人體代謝和生理學控制的激素量 ( 由垂體腺釋放的 ) 也是如此。在注意控制可能存在混淆因素的情況下 , 大多數關於 50~60 Hz 曝露對晚間志願者褪黑素水平影響的實驗研究沒有發現影響 ( WHO 2007a )。

大量動物研究調查了 50~60 Hz 電場和磁場對老鼠的松果腺和血清褪黑素水平的影響。一些報導稱 , 曝露導致夜間褪黑素的抑制 , 但其他一些研究是否定的。在季節性繁殖動物中 , 50~60Hz 場曝露對褪黑素水平以及與褪黑素相關的繁殖狀況影響的證據基本上是陰性的 ( ICNIRP2003a;WHO2007a; )。在非人類的靈長類動物的研究中 , 長期曝露於 50~60Hz 場對褪黑素水平並沒有觀察到令人信服的影響。

在多種哺乳動物樣本垂體腎上腺軸的與應激相關的激素中 , 也沒有觀察到一致性的影響。可能的例外是 , 在低頻電場曝露開始時高到足以被感知的場應力下 , 可能會出現短暫的應激反應 ( ICNIRP2003a;WHO2007a )。類似地 , 在已完成研究很少的情況下 , 在生長激素水平和控制代謝活動或控制繁殖與性發育的激素水平方面 , 已觀察到的影響大多數是陰性的或缺乏一致性的。

總而言之，以上數據不能得出低頻電場和/或磁場會以給人體健康造成有害影響的方式對神經內分泌系統產生作用。

### 神經退行性障礙

有一種低頻場曝露與某些神經退行性疾病有關的假設。就帕金森病 ( Parkinson's disease ) 及多樣硬化症而言，研究的數量很少，也沒有低頻曝露與這些疾病存在關聯的證據。然而，關於阿爾茨海默症 ( Alzheimer's disease ) 和肌萎縮側索硬化症 ( ALS ) 卻已發表了較多研究。一些報導提示，電業職業人員的 ALS 風險可能有所增加 ( Kheifets et al.2009 )。雖然這種風險上升可能由電力職業有關的混淆因素 ( 如電擊 ) 所致，但迄今為止，沒有任何已經確立的生物機制能夠解釋這種關聯。此外，使用更複雜的曝露評估方法 ( 例如工作—曝露矩陣 )，通常就觀察不到風險增加 ( Kheifets et al.2009 )。對阿爾茨海默症，研究結果是不一致的。在以臨床為基礎的研究中，已發現了最強的關聯但也帶有大的潛在選擇性偏倚；但是在一些 ( 而非全部 ) 以人群為基礎的調研中也觀察到了風險增加。研究中的亞組分析進一步增強了數據不一致的印象 ( Kheifets et al.2009 )。各項研究結果統計的不一致性本身表明，把可提供的所有結果匯總統計是不可行的，雖然已經試圖這樣做了 ( Garcia et al 2008 )。另外，還存在一些“發布偏倚”的證據。由其它職業曝露因素引起的潛在混淆也通常沒有得到控制。至今只有一項可用的居室研究顯示了長期曝露之後阿爾茨海默症的風險增加，但是它依據的病例數量非常少 ( Huss et al.2009 )。

調查低頻曝露和阿爾茨海默症之間關聯的研究結果是不一致的。

總體說來，關於低頻曝露和阿爾茨海默症以及肌萎縮側索硬化症（ALS）之間關聯的證據是非結論性的。

## 心血管紊亂

短期和長期曝露的實驗研究都表明，除了電擊是一種明顯的健康危害外，在通常可遇的環境或者職業曝露水平下，不會發生與低頻場相關的其他有害的心血管影響（WHO2007a）。儘管一些文獻報道了各種各樣的心血管變化，但是大多數影響都很小，並且研究中和研究報告之間的結果也不一致（McNamee et al.2009）。大多數針對心血管疾病發病率和死亡率的研究沒有顯示出與曝露的關聯（Kheifets et al.2007）。在曝露與心臟自律調節改變之間是否存在特別關聯的問題仍是推測性的。總的看來，證據提示低頻曝露與心血管疾病之間不存在關聯。

## 生殖和發育

總體而言，流行病學研究沒有顯示人類不良妊娠後果與母親或父親的低頻場曝露存在關聯。在母親磁場曝露與流產風險增加之間存在一些有限的證據，但是，所報道的這種關聯在其他研究中並沒有發現，總體而言，這樣一種關聯的證據是相當缺乏的。

對多種哺乳動物樣本（包括大樣本群以及連續幾代的曝露），已進行了高達  $150\text{kV m}^{-1}$  的低頻電場曝露評價。結果一致顯示不存在有害的發育影響（ICNIRP2003a;WHO2007a）。

使用高達 20mT 低頻磁場的哺乳動物曝露，沒有導致體表，內臟或者骨骼畸形（Juutilainen 2003,2005;WHO2007a）。總之，低頻曝露

與發育和生殖影響之間關聯的證據是非常弱的。

## 癌症

大量的流行病學研究報告，尤其是二十世紀八十年代和九十年代提出的報告顯示，低於 1998 年 ICNIRP 曝露導則限值的 50-60Hz 磁場長期曝露可能與癌症有關。最初的研究集中在兒童癌症與磁場的關聯，此後的研究也涉及不同的成人癌症。總體來講，在專門設計用來為檢驗最初的發現是否能複現的研究中，最初觀察到的 50-60Hz 磁場與不同癌症之間的關聯並沒有得到確認。不過，對於兒童期白血病來說，情況是不同的。繼最初研究之後的研究提示，在居室 50-60Hz 磁場與兒童期白血病風險之間可能存在弱的關聯，雖然並不清楚這是否是一種因果關係：也許可以用其中含有選擇性偏倚、某種程度的混淆以及偶然性等來解釋這些結果 ( WHO2007a )。兩項集合分析 ( pooled analyses ) ( Ahlbom 等人，2000; Greenland 等人，2000 ) 顯示平均曝露超過 0.3-0.4  $\mu\text{T}$  時，風險的增加可能會存在，雖然該兩項分析的作者強烈地提請注意，他們的研究結果不能解釋為磁場和兒童期白血病之間顯示了因果關係。

同時，沒有生物學機制可以驗證，動物與細胞實驗室研究結果也不支持 50-60 Hz 磁場曝露是兒童期白血病誘因的觀點。

值得一提的是，目前在兒童白血病最常見的類型——急性淋巴細胞性白血病方面，還沒有合乎要求的動物模型。大多數研究報告，在齧齒動物模型中，50-60 Hz 磁場對白血病或者淋巴瘤沒有影響 ( ICNIRP2003a;WHO2007a )。一些大規模的齧齒動物長期研究沒有

顯示任何類型的癌症（包括血癌、乳腺癌、腦瘤以及皮膚癌）有任何一致性的增加。

已有大量 50-60Hz 磁場對化學誘發的乳腺癌影響的鼠類實驗研究（ICNIRP2003a;WHO2007a），但是得到的結果是不一致的，原因可能在於整個或部分實驗方案的差異，例如使用了特定的亞族。大多數關於 50-60Hz 磁場曝露對於化學誘發或輻射誘發的白血病或淋巴瘤樣式影響的研究都是陰性的。腫瘤發生前的肝損傷和化學誘發的皮膚癌和腦瘤研究，得出的主要是陰性結果。

通常，在磁場低於 50mT 時，低頻場曝露對細胞影響的研究並未顯示會產生遺傳毒性（Crumpton and Collins 2004；WHO2007a）。總體而言，相對於流行病學在兒童白血病與長期電力頻率磁場曝露之間關聯方面的證據，動物癌症數據，尤其是大規模終身實驗數據，幾乎全是陰性的。細胞研究的數據盡管更為含糊，但總體也支持動物研究的結果。

### **推薦的低頻導則的原理**

在本導則中，ICNIRP 闡述了急性和慢性的健康影響，並考慮了近年來的劑量學發展。

### **急性影響**

低頻電磁場曝露對神經系統有一些已被確認的急性影響：對神經和肌肉組織的直接刺激以及引發視網膜光幻視。也有間接科學證據顯示，諸如視覺過程和運動協調性等腦功能可能受感應電場短暫地影響。所有這些影響都有閾值，低於閾值就不會發生，只要符合體內感

應電場的基本限值，這些影響就可以避免。

按照關於限制靜態磁場曝露的導則 ( ICNIRP 2009 ) 的推薦，ICNIRP 考慮存在一些職業環境，在接受適當的指示與培訓的條件下，工人自願地並已知地經歷暫時的影響( 諸如視網膜光幻視和某些腦功能可能的細微變化 ) 是合理的，因為他們不相信會導致長期或病理學的健康影響。在這種情況下，為了避免周圍和中央有髓神經刺激，應限制整個軀體的曝露。ICNIRP 注意到，在周圍神經感覺閾值和痛感閾值之間存在相對很小的間距 ( 如上所述 )；對上述任何一類神經，在頻率高於 1~3kHz 時，由於髓鞘形成導致的神經膜時間常數非常短，在頻率低於 10Hz 時，由於神經對緩慢去極化刺激因素的適應，閾值都開始上升。

避免視網膜光幻視應該可以保護對腦功能的任何可能的影響。光幻視閾值在頻率為 20 Hz 時最小，在較高和較低頻率快速上升，與周圍和中央神經刺激的閾值相交，在交點上，應適用周圍神經刺激限值。對未經培訓和可能不注意和曝露狀態不受控的工人，基本限值設置在光幻視閾值，以避免曝露暫時但潛在的干擾影響。對公眾，針對光幻視閾值賦予了 5 倍降低因子。

低頻電場曝露通過表面電荷效應會引起已被確定的生物反應。防止人體因這種曝露感應的表面電荷產生的痛感效應是用參照水平來表達的。

## **慢性影響**

關於低頻場慢性影響的文獻已經由多個科學家以及科學專門小

組詳細評價過了。世界衛生組織的癌症研究機構 IARC ( 國際癌症研究機構 ) 於 2002 年對低頻磁場進行了評價並且將其分類為 2B 類，解釋為“對人類有致癌可能性的”。這種分類的依據是兒童期白血病的流行病學結果。

ICNIRP 的觀點是，現有關於低頻磁場長期曝露與兒童期白血病風險增加有因果性關聯的科學證據太弱，不能成為制定曝露導則的基礎。特別是，假如上述關係不是因果性的，降低曝露就不具有任何健康利益。

### **劑量學**

以前，磁場模型都假設人體擁有均質的各向同性的導電率，並採用簡單的導電回路環模型來估計不同器官和身體區域內的感應電流。由時變電場和磁場感應的電場則利用簡單的均質長橢球體模型進行計算。近年來，基於解剖學和電學改良的非均質模型 ( Xi and Stuchly 1994, Dimbylow 2005 and 2006, Bahr et al 2007 ) 可使人們對曝露在電場和磁場中的體內原位電場有更好的認識，實施與事實更加相符的計算。

修訂本導則的最有用的劑量學結果，是通過體素小於 4mm 的感應電場的高分辨率數值模擬得出的 ( Dimbylow 2005 , Bahr et al 2007 ; Hirata et al 2009 ; Nagaoka et al 2004 )。體內最大感應電場出現在外部場均勻且其朝向與體軸平行 ( E 場 ) 或者垂直 ( H 場 ) 時。根據這些計算結果，隨場的方向和人體模型不同，由每 mT 50Hz 磁場在腦中感應的最高局部峰值電場的值約為 23~33 mV m<sup>-1</sup>。對周圍神經組織，

目前還沒有可用的轉換系數，因而選擇包含周圍神經末梢的皮膚作為最壞情況下的目標組織。由每 mT 上述場在皮膚感應的電場約為 20~60 mV m<sup>-1</sup>。每 kV m<sup>-1</sup> 的 50Hz 電場在腦中引起的最大局部電場約為 1.7~2.6mV m<sup>-1</sup>。而每 kV m<sup>-1</sup> 的 50Hz 電場在皮膚引起的最大局部電場約為 12~33 mV m<sup>-1</sup>。

從現有計量學數據的不確定性以及從導出參照水平時人體參數的影響出發，ICNIRP 在由基本限值導出參照水平時採取了保守的處理。

## 限制電磁場曝露的導則

對職業曝露和公眾曝露分別給出指南。本導則推薦的職業曝露限值適用於在他們的工作場所曝露於 1Hz 到 10MHz 時變電場和磁場的成人，通常是在已知情況下完成他們常規或指定的職業行為；而“公眾”則是指所有年齡和不同健康狀況、在個體敏感性方面可能具有較高可變性的個體。在很多情況下，公眾成員不知道曝露於電磁場。這種考慮突出了對公眾比對在職業曝露下的工作人員採取了更嚴格的曝露限制。

## 科學不確定性的處理

所有科學數據及其解釋都會存在一定程度的不確定性。例如研究方法差異以及個體間、樣本間及種族間的差異。這些知識上的不確定性都採用“降低因子”來補償。

但是針對所有的不確定源要給出嚴格的依據，來對全頻段和對所有的控制類型給出降低因子，所需要的信息還是不充分的。因此，在解釋可用的數據庫中數據以及確定降低因子時採取多大的謹慎程度，在很大程度上取決於專家判斷。

## 基本限值和參照水平

根據軀體內物理量或與已確定的健康影響直接有關的量制定的曝露限值稱之為“基本限值”。在本導則中，用來規定電磁場曝露基本限值的物理量是體內電場強度  $E_i$ ，這是由於是電場對神經細胞和其它電氣敏感細胞產生影響。

由於體內電場強度難以實測評價，因此從實際曝露評估出發，提供了曝露的參照水平。來確定是否符合或者超過基本限值。大多數參照水平是從相關的基本限值，採用測量和/或計算技術導出，但也有一些參照水平是用電磁場曝露的感覺（電場）和有害的非直接影響表達的。導出的量是電場（ $E$ ）、磁場強度（ $H$ ）、磁通密度（ $B$ ）和流過肢體的電流（ $I_L$ ）。表達非直接影響的量是接觸電流（ $I_C$ ）。在任何特定曝露情況下，任何測量或計算得到的值可以與適當的參照水平相比較。符合參照水平就能確保符合相應的基本限值。假如測量或計算值超過參照水平，不一定就等於基本限值已超過。但是，在超過參照水平時，有必要檢驗與相應的基本限值的相符性，並確定是否有必要採取附加的防護措施。

## 基本限值

本出版物的主要目的是建立防止有害健康影響的限制電磁場曝露的導則。如上所述，風險來自短暫的神經系統響應，包括對周圍神經（PNS）和中央神經（CNS）的刺激、視網膜光幻視和對腦功能一些方面的可能影響。

根據以上考慮，對頻率範圍從 10Hz 到 25Hz，職業曝露應限制頭部中央神經系統組織（即腦和視網膜）中感應電場強度不超過  $50 \text{ mV m}^{-1}$ ，以避免視網膜光幻視。該限值也應能防止任何對腦功能可能的暫時影響，這些影響並不認為是有害的健康影響；但是，ICNIRP 認為它們可能在某些職業情況下形成干擾，應該予以避免，但是不對此附加專門的降低因子。在較高和較低頻率，光幻視閾值迅速提高，在 400 Hz 頻率，光幻視閾值與對周圍和中央有髓神經刺激的閾值曲線相交。在頻率 400 Hz 以上，周圍神經刺激的閾值適用於身體的所有部位。

在受控環境中的曝露，工人被告知這樣的曝露可能有暫時效應，為了避免周圍和中央有髓神經刺激，應限制頭部和軀體內感應電場不超過  $800 \text{ mV m}^{-1}$ 。該值是考慮了以上所述的不確定性，對於周圍神經刺激閾值  $4 \text{ V m}^{-1}$  而言，賦予了 5 倍降低因子。該限值在頻率超過 3KHz 時上升。

對公眾而言，針對頭部的中央神經組織應用了 5 倍的降低因子，得出曝露基本限值在 10 到 25Hz 為  $10 \text{ mV m}^{-1}$ 。高於或低於上述頻率，基本限值提高。在 1000Hz 頻率，曲線與防止周圍和中央有髓神經刺激的基本限值曲線相交。在此點，與基本限值  $400 \text{ mV m}^{-1}$  相比，有 10 倍的降低因子，它適用於身體所有部位的組織。

基本限值列於表 2 和圖 1 中。

## 時間平均

對包括暫態或非常短期峰值的電場或磁場，ICNIRP 推薦的體內電場限值應看作瞬時值而不應是時間平均值（參見非正弦曝露節）。

表 2 人體曝露於時變電場和磁場的基本限值

曝露特性		頻率範圍	體內電場 ( $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ )
職業曝露	頭部中央神經系統組織	1-10Hz	$0.5/f$
		10Hz-25Hz	0.05
		25Hz-400Hz	$2\cdot 10^{-3}f$
		400Hz-3kHz	0.8
		3kHz-10MHz	$2.7\cdot 10^{-4}f$
	頭部和軀體的所有組織	1Hz-3kHz	0.8
		3kHz-10MHz	$2.7\cdot 10^{-4}f$
公眾曝露	頭部中央神經系統組織	1-10Hz	$0.1/f$
		10Hz-25Hz	0.01
		25Hz-1000Hz	$4\cdot 10^{-4}f$
		1000Hz-3kHz	0.4
		3kHz-10MHz	$1.35\cdot 10^{-4}f$
	頭部和軀體的所有組織	1Hz-3kHz	0.4
		3kHz-10MHz	$1.35\cdot 10^{-4}f$

注：( 1 )  $f$  是頻率 ( Hz )

( 2 ) 所有的值為有效值 ( rms )

( 3 ) 頻率範圍在 100 kHz 以上，需要另外考慮無線電頻率特殊的基本限值

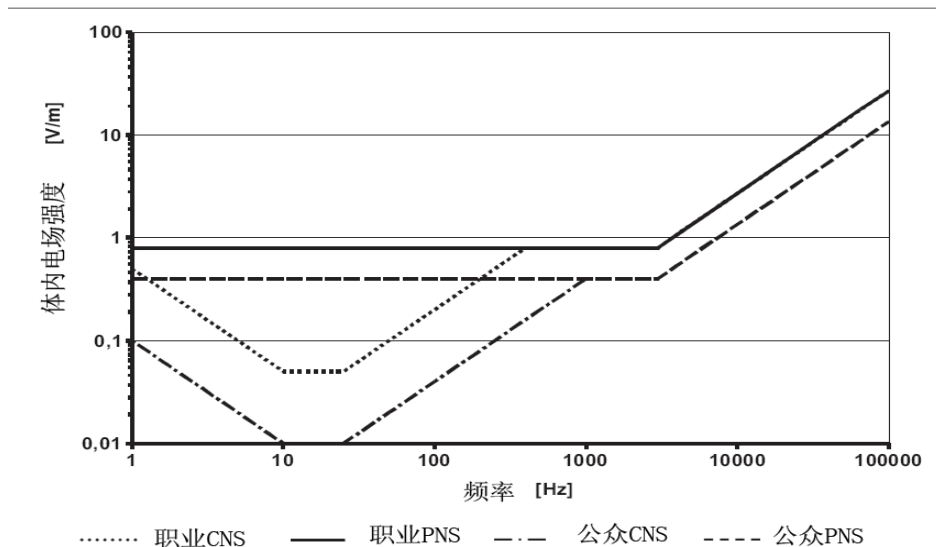


圖 1 以 CNS 和 PNS 組織內電場強度確定的公眾曝露和職業曝露基本限值

### 感應電場的空間平均

在限制感應電場對神經細胞和神經網絡有害的影響時，重要的是界定一個距離或尺寸，在該範圍內局部感應電場必須取平均。作為一種實際的折中，為滿足合理的生物學基礎和計算約束的要求，ICNIRP 推薦取相鄰的  $2 \times 2 \times 2 \text{mm}^3$  的組織小體積內的電場來確定感應電場的矢量平均。對一特定的組織，第 99 個百分位電場值是與基本限值相比較的值。

基本上，電場對神經和其它電氣可激勵細胞的影響是局部效應，但存在限制最小尺寸或距離的電生理學和實際劑量因素。擾亂神經和神經網絡功能的主要物理因素是由跨越細胞膜的感應電場所產生的電壓。沿電場方向(最大耦合)的單獨神經纖維，對無脊椎動物神經，由電場集中的電壓跨越的電緊張距離約 2-7 毫米 (Reilly 1998 ; Reilly and Diamant 2003)。對有髓(鞘)的神經細胞，集中距離的最佳估計約為 2mm，它是朗飛結 (nodes of Ranvier) 間的最大結間距。在考慮

孤立神經細胞的刺激閾值時，這些距離是貼切的。在閾值以下弱電場效應例如視網膜光幻視的情況中，大量相互作用的神經細胞的集合“網絡”效應是必須予以考慮的。效應的閾值將顯著地低於單獨神經細胞的刺激閾值，這是由於突觸中小的感應電場的疊加和集中。建議感應電場的平均量應根據至少 1000 個相關的細胞，而對大多數神經組織細胞而言，約為  $1\text{mm}^3$  ( Jefferys 1994 )。這樣，生物學合理的平均距離就可能擴展到  $1\sim 7\text{mm}$ 。從實用觀點出發，在感應電場的毫米級分辨率的計算中，很難達到滿意的精度，而更困難的是如何測量它。某特定組織內一個體素的最大值容易產生與立方體素尖角相關的梯段誤差 ( stair-casing errors )。一種獲得更穩定的峰值近似值的解決方案是基於選擇在特定組織內代表感應電場第 99 百分位的峰值。但是，從生物學觀點，由於峰值取決於分辨率，這是一個有些爭議的選擇。空間平均的另一種方案是把局部電場規定為一個小體積或沿一線段的平均 ( Reilly and Diamant 2003 )。

作為一般規則，除了類似視網膜和皮膚以外 ( 它們對整個平均立方體而言太薄了 )，平均體積應該不超過組織的界限。對皮膚可設定  $2\times 2\times 2\text{mm}^3$  的體積，而且它可擴展到皮下組織。對視網膜，平均體積可延展到其前、後的組織。

## 參照水平

參照水平是通過數學模型、使用已發布的數據，由基本限值獲得 ( Dimbylow 2005 , 2006 )。它們是按照場對人體曝露最大耦合條件計算得到的，因而可提供最大保護。考慮了頻率相關性和劑量不確定性。

所提出的參照水平考慮了兩種不同的效應和腦中感應電場的近似綜合性。既有與中樞神經系統效應（以及在體內非中樞神經系統組織內的感應電場）的關係，又有與周圍神經系統的關係（即：在 50Hz，用於把對中樞神經系統影響的基本限值轉換到外磁場曝露的系數為每 T 相當於  $33 \text{ V m}^{-1}$ ，而對周圍神經系統影響的系數為每 T 相當於  $60 \text{ V m}^{-1}$ 。考慮劑量的不確定性，對這些計算值賦予了 3 倍的附加降低因子）。

另外，25 Hz 及以下職業曝露的電場參照水平包含了足夠的安全裕度來預防所有可能情況下的接觸電流刺激效應。在 25 Hz 和 10 MHz 範圍內，參照水平根據感應電場的基本限值制定，這樣，在該頻段內就有可能沒有提供足夠的安全裕度來防止所有可能條件下接觸電流的刺激效應。

對 10 MHz 及以下的公眾曝露電場參照水平可使 90% 以上的受曝露個體免受有害的非直接影響（電擊和灼痛）。另外，50 Hz 及以下公眾曝露參照水平包含足夠的裕度避免表面電荷效應（比如大多數人的感覺）。

表 3 和表 4 分別匯總了職業和公眾曝露的參照水平，上述參照水平分別在圖 2 及圖 3 中畫出。參照水平是假設在人體所在空間範圍內，受曝露的場是均勻的。

表 3 時變電場和磁場職業曝露的參照水平（未畸變有效值）

頻率範圍	電場強度 $E$ ( $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ )	磁場強度 $H$	磁通密度 $B$ (T)
------	--	----------	--------------

		( A·m <sup>-1</sup> )	
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	$5 \times 10^2 / f$	$8 \times 10^2$	$1 \times 10^{-3}$
300Hz-3kHz	$5 \times 10^2 / f$	$2.4 \times 10^5 / f$	$0.3 / f$
3kHz-10MHz	$1.7 \times 10^{-1}$	80	$1 \times 10^{-4}$

注：1)  $f$  的單位是 Hz；

2) 對非正弦和多頻率曝露的建議見以下專門章節；

3) 非直接影響（特別對高電場中）的防護見“保護措施”章；

4) 頻率範圍在 100 kHz 以上，需要另外考慮無線電頻率特殊的參照水平。

表 4 時變電場和磁場公眾曝露的參照水平（未畸變有效值）

頻率範圍	電場強度 $E$ ( kV·m <sup>-1</sup> )	磁場強度 $H$ ( A·m <sup>-1</sup> )	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	$1.6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
50Hz-400Hz	$2.5 \times 10^2 / f$	$1.6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
400Hz -3kHz	$2.5 \times 10^2 / f$	$6.4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
3kHz-10MHz	$8.3 \times 10^{-2}$	21	$2.7 \times 10^{-5}$

注：1)  $f$  的單位是 Hz；

2) 對非正弦和多頻率曝露的建議見以下專門章節；

3) 頻率範圍在 100 kHz 以上，需要另外考慮無線電頻率特殊的參照水平。

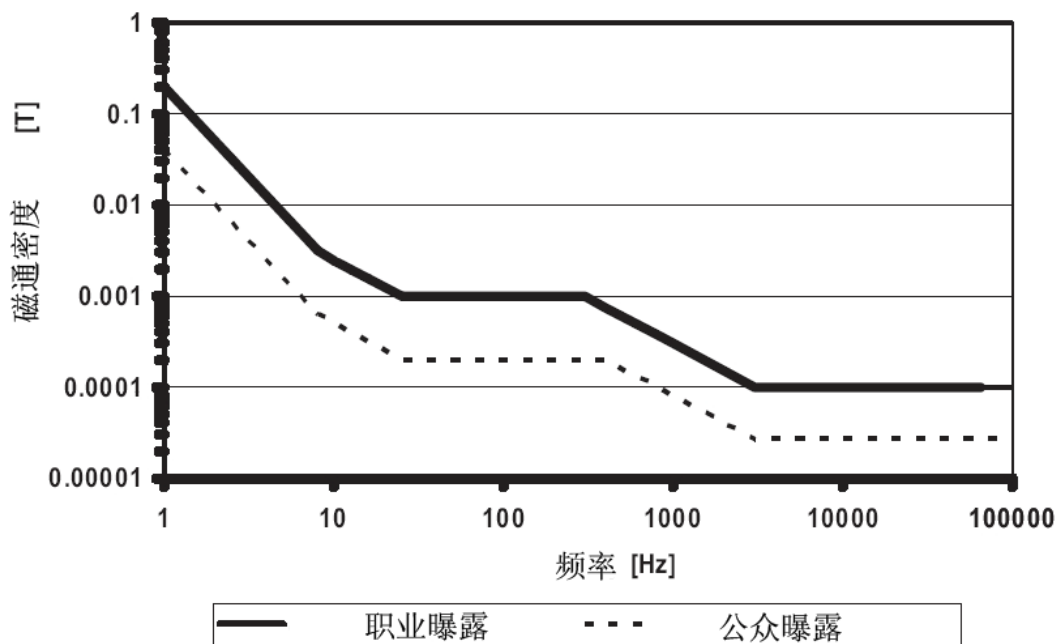


圖 2 時變磁場曝露的參照水平 (配合表 3、表 4)

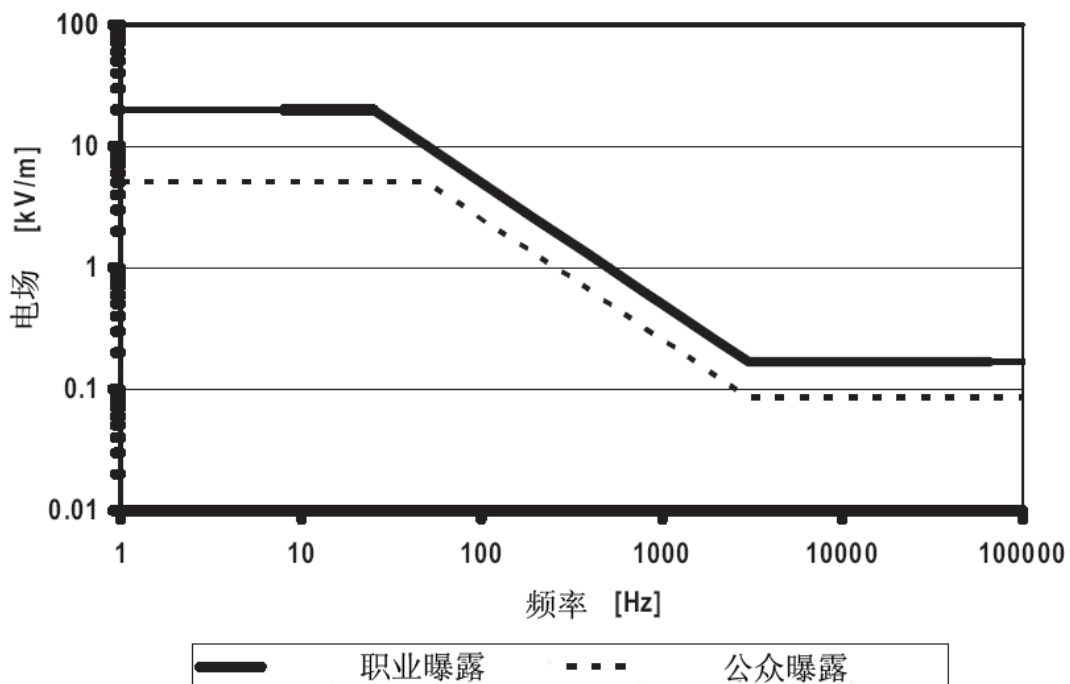


圖 3 時變電場曝露的參照水平 (配合表 3、表 4)

## 外部電場和磁場的空間平均

確定參照水平時的曝露條件是在人體所占有的空間內電場與磁場的不均勻程度是相當小的。但是，在大多數情況下離場源的距離是很近的，以致場的分布是不均勻的或者局限於軀體的很小部分。在此情況下，即使從非常保守的曝露評估出發，人體占有空間位置最大場強的測量總會導致偏於安全的結果。

對於離人體數厘米的非常局限的源，曝露評估唯一可靠的方法是針對具體案例逐個確定感應電場的劑量。當距離超過 20 厘米時，場的分布就變得不那麼局限，但仍是不均勻的，在這種情況下，沿軀體或軀體的一部分確定空間平均是可行的（ Stuchly and dawson 2002 ； Jokela 2007 ）。空間平均不應超過參照水平。局部曝露可以超過參照水平，但有一個重要的前提，即基本限值不應被超過。對運用空間平均的特殊曝露情況給出進一步的指南是標準化組織的任務。本導則是依據良好確定的劑量學結果。標準化組織也可針對特定類型的非均勻曝露給出新的參照水平。

## 電場與磁場曝露的迭加

每一外部電場和磁場都在體內感應電場分量，它們在組織內矢量相加。就基於外部電場與磁場的曝露分析而言，一種保守的方法是假設不論電感應的與磁感應的體內感應場分量，在同樣的臨界點以同相位達到最大值。這就意味著外部電場與磁場曝露是相迭加的（ Cech et al ， 2008 ）。但是，考慮到電感應的與磁感應的體內感應電場的分布有很大差異，這種情況被認為是罕見的。

## 接觸電流的參照水平

給出了 10MHz 及以下接觸電流的參照水平，必須對此採取謹慎措施以避免電擊和灼傷的危險。點接觸的參照水平列於表 5。由於兒童誘發生物學響應的接觸電流閾值約是成年男子的 1/2，因此對公眾的接觸電流參照水平設定得比職業曝露限值低 1 倍。應指出，參照水平的目的並非是防止感覺（perception），而是為了避免痛感的電擊（painful shocks）。接觸電流的感覺本身不是一種危險，但可考慮為一種煩惱。防止超過接觸電流可以通過技術手段來實現。

表 5 接觸導電物體的時變接觸電流參照水平

曝露特性	頻率範圍	最大接觸電流 ( mA )
職業曝露	2.5kHz 及以下	1.0
	2.5-100kHz	$0.4f$
	100kHz-10MHz	40
公眾曝露	2.5kHz 及以下	0.5
	2.5-100kHz	$0.2f$
	100kHz-10MHz	20

注： $f$ 是頻率，單位為 kHz。

## 多頻率場同時曝露

在多個不同頻率場同時曝露的場合下，確定這些曝露的效應是否相加是重要的。以下公式可用於實際曝露情況下的相關頻率。對 10MHz 及以下頻率的電氣刺激，體內電場應按以下公式相加：

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

其中： $E_{i,j}$ ——頻率  $j$  感應的體內電場強度；

$E_{L,j}$ ——表 2 中給出的頻率  $j$  所對應的感應電場強度限值。

作為基本限值的實際應用，可應用以下的場強度參照水平判據：

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

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

其中： $E_j$ ——頻率為  $j$  的電場強度；

$E_{R,j}$ ——表 3 和表 4 給出的頻率為  $j$  的電場強度參照水平；

$H_j$ ——頻率為  $j$  的磁場強度；

$H_{R,j}$ ——表 3 和表 4 給出的頻率為  $j$  的磁場強度參照水平。

對肢體電流和接觸電流，分別按以下要求計算：

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

其中： $I_j$ ——頻率為  $j$  的接觸電流分量；

$I_{L,j}$ ——表 5 給出的頻率為  $j$  的接觸電流參照水平。

## 非正弦曝露

在低於 100kHz 的低頻段，電場、特別是磁場，在大多數情況下在很大的頻段範圍內為諧波分量所畸變。因而，場的波形顯示出複雜、通常帶脈沖的類型。一貫可能的做法是使用諸如富裏哀變換技術 (FT) 把這種場分解為離散的頻譜分量，然後應用以上描述的多頻率法則。這一做法基於這樣一種假設，即頻譜分量是同相位相加的，即所有的最大值在同一時間同時發生並導致出現尖峰。這在頻譜分量

數量有限，並且彼此的相位不相幹(即它們是隨機變化的)的情況下，是一種現實的假設。對於有固定相關性相位的情況下，這種假設可能是不必要地保守的。另外，FT 頻譜分析中的採樣及開窗可能產生出虛假(寄生)頻率，從而可能人為增加線性相加的曝露率。

一種替代頻譜法的方案是采用一個與基本限值和參照水平相關的濾波功能元件來對外部電場、磁場以及感應電場或電流進行權重處理( ICNIRP 2003b ; Jokela 2000 )。對由諧波分量組成的寬頻段的場，經過濾波處理的限值可以用以下數學式表示：

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

其中， $t$ ——時間；

$EL_i$ ——在第  $i$  次諧波頻率  $f_i$  下的曝露限值；

$A_i$ 、 $\theta_i$ 、 $\varphi_i$ ——場的幅值和相位角以及濾波元件在諧波頻率  $f_i$  下的相位角。

除了相位角外，等式(7)類似於等式(3)、(4)和(5)。實際用於加權(加權峰值曝露的確定)的進一步指南在資料性附錄(附錄)中給出。

## 防護措施

ICNIRP 指出，人類曝露於電場和磁場的防護可以通過全面遵循本導則來確保。

保護工人的措施包括工程與管理控制以及個人防護程序。在曝露於工作場所導致基本限值被超過時，必須採取適當的防護措施。作為

第一步，應該採取盡可能把裝置的排放降低到可接受水平的工程控制措施。這些控制措施包括良好的安全設計及在必要時使用聯鎖或類似的健康防護機制。

管理控制，諸如限制進入和使用聲覺、視覺警告，應該與工程控制結合使用。個人防護措施，如防護服，雖然在某些情況下是有用的，應該看作是確保工人安全的最後手段，只要有可能，還是應優先採取工程與管理控制。進一步地，在使用絕緣手套等來防護個人受電擊時，基本限值不應被超過，這是因為絕緣防護只是防止了場的非直接效應。

除防護服和其它個人防護以外，在有可能超過公眾參照水平的情況下，相同的一些措施可以應用於公眾。同樣重要的是建立和應用預防以下情況的規則：

- 對醫療電子設備及裝置（包括心臟起搏器）的幹擾；
- 電子爆炸裝置的起爆物（雷管）；
- 由感應電場、接觸電流或火花放電引起火花，點燃易燃物而導致起火或爆炸。

### **關於長期影響可能性的考慮**

如上所述，流行病學研究已一致性地發現每天長期低強度（超過  $0.3 \sim 0.4 \mu\text{T}$ ）的工頻磁場曝露與兒童期白血病風險增加相關聯。國際腫瘤機構（IARC）已把工頻磁場分類為可疑的致癌物。但是，在磁場與兒童期白血病之間的因果關係尚未確定，也沒有其它長期影響已被確定。缺乏已確定的因果關係意味著這種影響不能列入基本限

值。但是，風險管理建議（包括預防性措施的考慮）已經由 WHO（2007a，2007b）和其它組織提出。

致謝—國際非電離輻射防護委員會（ICNIRP）受到國際輻射防護協會，世界衛生組織，國際勞工局理事會，歐盟委員會和德國聯邦環境、自然保護和核安全部的支持，特致感謝。ICNIRP 同時也非常感謝 ICNIRP 諮詢專家和所有其他通過公開在線諮詢做出過貢獻的評論者。

在制定這些導則期間，國際非電離輻射防護委員會（ICNIRP）和 ICNIRP 極低頻任務組的成員如下：

國際非電離輻射防護委員會（ICNIRP）

P. Vecchia, 主席 (意大利)

M. Hietanen, 2008年之前的副主席 (芬蘭)

R. Matthes, 2008年之後的副主席 (德國)

A. Ahlbom 2008年之前(瑞典)

E. Breitbart 2008年之前(德國)

F. R. de Gruijl 2008年之前 (荷蘭)

M. Feychting (瑞典)

A. Green (澳大利亞)

K. Jokela (芬蘭)

J. Lin (美國)

R. Saunders (英國)

K. Schulmeister (奧地利)

P. Söderberg (瑞典)

B. Stuck (美國)

A. Swerdlow (英國)

M. Taki 2008年之前(日本)

B. Veyret (法國)

G. Ziegelberger, 科學部秘書(奧地利)

M. H. Repacholi, 前任主席(澳大利亞)

ICNIRP極低頻任務組織

R. Matthes (德國), 極低頻任務組織主席

A. Ahlbom (瑞典)

K. Jokela (芬蘭)

C. Roy (澳大利亞)

R. Saunders (英國)

## 參考文獻

Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen JH, Tynes T, Verkasalo PK. 磁場和兒童白血病的集合分析. Br J Cancer 83:692–698; 2000.

Attwell D. 低頻電場和神經系統間的作用: 以視網膜作為模型系統. Radiat Protect Dosim 106:341–348; 2003

Bahr A, Bolz T, Hennes C. 極低頻數值劑量: 方法的準確性, 模型和參數的變異以及對量化導則的影響. Health Phys 92:521–530; 2007.

Barth A, Ponocny I, Ponocny-Seliger E, Vana N, Winker R. 極低頻磁場曝露對認知功能的影響: 薈萃分析的結果. Bioelectromagnetics 31:173–179; 2010.

- Cech R, Leitgeb N, Padiaditis M. 極低頻電場和磁場曝露同時感應在孕婦模型產生的電流密度. *Phys Med Biol* 153:177–186; 2008.
- Cook CM, Thomas AW, Prato FS. 極低頻磁場曝露和極低頻調制射頻( RF )以及微波場曝露對人體電生理學和認知的影響: 近年來研究的評論. *Bioelectromagnetics* 23:144 –157; 2002.
- Cook CM, Saucier DM, Thomas AW, Prato FS. 極低頻磁場曝露和極低頻調制射頻場曝露:最近研究中觀察到的人的生理和認知在時間效應上的影響(2001–2005). *Bioelectromagnetics* 27:613– 627; 2006.
- Crasson M. 50–60赫茲電場和磁場對人類認知功能的影響 : 綜述.*Radiat Protect Dosim* 106:333–340; 2003.
- Crumpton MJ, Collins AR. 電磁場環境有基因毒性嗎 ? *DNA Repair (Amst)* 3:1385–1387; 2004.
- Dimbylow PJ. 女性體素模型的發展,NAOMI及其在低頻磁場和電場感應電流密度和電場計算中的應用. *Phys Med Biol* 50:1047–1070; 2005.
- Dimbylow PJ. 懷孕女性混合體素數學模型的發展及其在50赫茲磁場和電場劑量學中的應用.*Phys Med Biol* 51:2383–2394; 2006.
- Garcia AM, Sisternas A, Hoyos SP. 極低頻電場和磁場職業曝露和阿爾茨海默病: 薈萃分析. *Int J Epidemiol* 137:329 –340; 2008.
- Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA. 磁場、路線代碼和兒童期白血病的集合分析, *Epidemiol* 11:624–634; 2000.
- Hirata A, Wake K, Watanabe S, Taki M. 均勻磁場曝露中日本男性和女性人體的原位電場和電流密度. *Radiat Protect Dosim* 35:272–275; 2009.
- Huss A, Spoerri A, Egger M, Röösli M. 電力線附近的居民和神經退行性疾病的死亡率 : 瑞士人口長期研究.*Am J Epidemiol* 169:167–175; 2009.

國際癌症研究機構.靜態和極低頻電場和磁場.Lyon,法國: 國際癌症研究機構 ;  
IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans 80卷;  
2002

國際非電離輻射防護委員會.限制時變電場 ,磁場和電磁場 ( 300 千兆赫及以下 )  
曝露的導則.Health Phys 74:494 –522; 1998.

國際非電離輻射防護委員會.防止非電離輻射的一般方法.Health Phys 82:540  
–548; 2002.

國際非電離輻射防護委員會.靜止和低頻電磁場 ( 0 -100kHz 時 ) 曝露 , 生物效應  
和健康後果.In: Bernhardt JH, Matthes R, McKinlay A, Vecchia P,Veyret B 等。  
科學證據和健康後果的複核.慕尼黑 : 國際非電離輻射防護委員會 ; 2003a.

國際非電離輻射防護委員會。關於確定頻率低於100kHz的脈沖和複雜非正弦波  
形曝露與ICNIRP導則相符性的指南.Health Phys 84:383–387;2003b.

國際非電離輻射防護委員會.醫用磁共振 ( MR ) 程序 : 病人保護..Health Phys  
87:197–216; 2004.

國際非電離輻射防護委員會.關於限制靜止磁場曝露的導則。Health Phys 96:504  
–514; 2009.

國際電工委員會.曝露在低頻和中頻範圍的電場和磁場——計算人體內感應電流  
密度和體內電場方法。日內瓦 : IEC 62226; 2004.

國際電工委員會.與人體曝露有關的家用電器和類似電器的電磁場測量方法.IEC  
62233; 2005a.

國際電工委員會.醫用電氣設備——第一部分 : 安全通用要求 ; 2 : 附屬標準 : 電  
磁兼容性——要求和試驗.日內瓦 : IEC 60601-1-2; 2005b.

電氣電子工程師協會.電氣電子工程師協會 1308 推薦儀表實踐 :磁感應強度和電  
場強度計規格 -10 赫茲到 3 千赫,IEEE , Piscataway ; 1994.

電氣電子工程師協會.電氣電子工程師協會 644-1994 (Reaff 2008).交流電力線工

- 頻電場和磁場測量程序的 IEEE 標準 ; IEEE , Piscataway ; 2008
- Jefferys JG. 實驗癲癇神經生物學. *Curr Opin neurol* 7:113–122; 1994.
- Jokela K. 脈沖和寬帶磁場的曝露限制. *Health Phys* 79:373–388; 2000.
- Jokela K. 包括不均勻場分布的複雜電磁場曝露狀況評估. *Health Phys* 92:531–540; 2007.
- Juutilainen J. 極低頻電場和磁場發展中的影響. *Radiat Protect Dosim* 106:385–390; 2003.
- Juutilainen J. 電磁場發展中的影響. 7:107–115; *Bioelectromagnetics* 2005.
- Kanai R, Chaieb L, Antal A, Walsh V, Paulus W. 視覺皮層電刺激的頻率依賴性. *Curr Biol* 18:1839–1843; 2008.
- Kheifets L, Ahlbom A, Johansen C, Feychting M, Sahl J, Savitz D. 極低頻磁場和心臟疾病. *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. 極低頻電場和磁場職業流行病學的未來需求：評論和建議. *Occup Environ Med* 66:72–80; 2009.
- McNamee DA, Legros AG, Krewski DR, Wisenberg G, Prato FS, Thomas AW. 文獻綜述：極低頻電磁場曝露對心血管的影響. *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體重逼真的高分辨率全身體素模型，以及模型對無線電頻率電磁場劑量的應用的發展. *Phys Med Biol* 49:1–15; 2004.
- Nyenhuis JA, Bourland JD, Kildishev AV, Schaefer DJ. 健康影響和強烈梯度場的安全。見：Shellock F, ed. *磁共振程序：健康影響和安全*. Boca Raton, FL: CRC Press ; 2001: 31–54.
- Pogosyan A, Gaynor LD, Eusebio A, Brown P. 在β波段頻率推進皮質活動致緩人

- 體活動。Curr Biol 19:1–5; 2009.
- Reilly J. 應用生物電：從電刺激到電療。紐約：Springer-Verlag；1998.
- Reilly JP. 關於“限制時變電場，磁場和電磁場（300GHz 及以下）曝露導則”的評論。Health Phys 76:314-315;1999
- Reilly JP. 適用於低頻電場和磁場曝露導則的神經電學機制——第一部分：正弦波形。Health Phys 83:341–355; 2002.
- Reilly J, Diamant A. 在電刺激方面的空間關係：應用於電磁場標準。IEEE Trans on Biomed Eng 50:783–785; 2003.
- Rubin GJ, Das Munshi J, Wessely S. 電磁超敏性：激發研究的系統回顧。Psychosom Med 67:224–232; 2005.
- Saunders RD, Jefferys JG. 弱電場在中樞神經系統中的相互作用。Health Phys 83:366–375; 2002.
- Saunders RD, Jefferys JG. 極低頻導則的神經生物學基礎。Health Phys 92:596–603; 2007.
- So PPM, Stuchly MA, Nyenhuis JA. 磁共振成像中的梯度切換場產生的周圍神經刺激。IEEE Trans on Biomed Eng 51:1907–1914; 2004.
- Stuchly MA, Dawson TW. 人體曝露於電力線：外部磁場的誘導量關係。Health Phys 83:333–340; 2002.
- 世界衛生組織·環境健康准則 EHC238. 極低頻（ELF）場。日內瓦：WHO；2007a
- 世界衛生組織·電磁場和公眾健康：極低頻場曝露。Fact Sheet 322 號。日內瓦：WHO；2007b
- Xi W, Stuchly MA. 男人在極低頻磁場中感應電流高空間分辨率析。Appl Comput Electromagn Soc J 9:127–134; 1994.

## 附錄

### 資料性附錄

#### 加權峰值曝露的確定

可以通過先計算波形的頻譜，然後應用式 ( 7 ) 實現計權。然而，在許多應用中，尤其是時域中使用模擬或數字濾波器更為方便。該濾波器增益 ( 輸出對輸入信號的比例 ) 應是直接正比於曝露限值的頻率函數  $G = EL(f_{\text{ref}})/EL(f)$ ，其中  $EL$  是頻率  $f$  對應的限值，而  $f_{\text{ref}}$  是從 1 Hz 到 100 kHz 的任意參考頻率。經濾波的波形峰值不應超過參考頻率下轉換為峰值 ( 波幅 ) 的曝露限值 ( 基本限值或參照水平 )。表 6 顯示了得出峰值限值的例子。除了幅值外，物理濾波器總是影響場的相位，從而改變經濾波的場峰值。在本導則正文的圖 1、2 和 3 中，限值按頻率範圍區分，限值分別與  $1/f^2$ 、 $1/f$ 、 $f^0$  ( 常數 ) 或  $f$  成正比。在  $1/f^2$ 、 $1/f$ 、 $f^0$  和  $f$  範圍內，濾波器的相角  $\varphi_i$  ( 見公式 7 ) 分別為 180，90，0 和 -90 °。該加權濾波器可用電子或數字濾波器近似模擬，其中衰減不應偏離超過 3 分貝，相角與準確的分段線性的頻率響應相比超過 90 °。例如，圖 A1 表示了用於感應電場加權的濾波器的衰減和相角頻率函數。近似曲線是基於簡單近似的 RC ( 電阻/電容 ) 類型的濾波函數。加權峰值方法在不不論是相關場還是不相關場條件下都可使用。在後一種情況下，測量時間必須足夠長，以便有一個合理的概率來檢測最壞的情況下峰值。在包括幾個頻率的非相關場情況下，加權峰值方法與頻譜總加方法結果相同。

表 6. 非正弦電場和磁場得出的峰值限值 參考頻率為50赫茲。

	體內電場 $E_{\text{induced}}$		體外電場 $E_{\text{external}}$	體外磁場 $B$
	( $\text{mVm}^{-1}$ )		( $\text{Vm}^{-1}$ )	$\mu\text{T}$
	腦中	軀體組織		
職業的	$\sqrt{2} \times 100$	$\sqrt{2} \times 800$	$\sqrt{2} \times 10000$	$\sqrt{2} \times 1000$
公眾的	$\sqrt{2} \times 20$	$\sqrt{2} \times 400$	$\sqrt{2} \times 5000$	$\sqrt{2} \times 200$

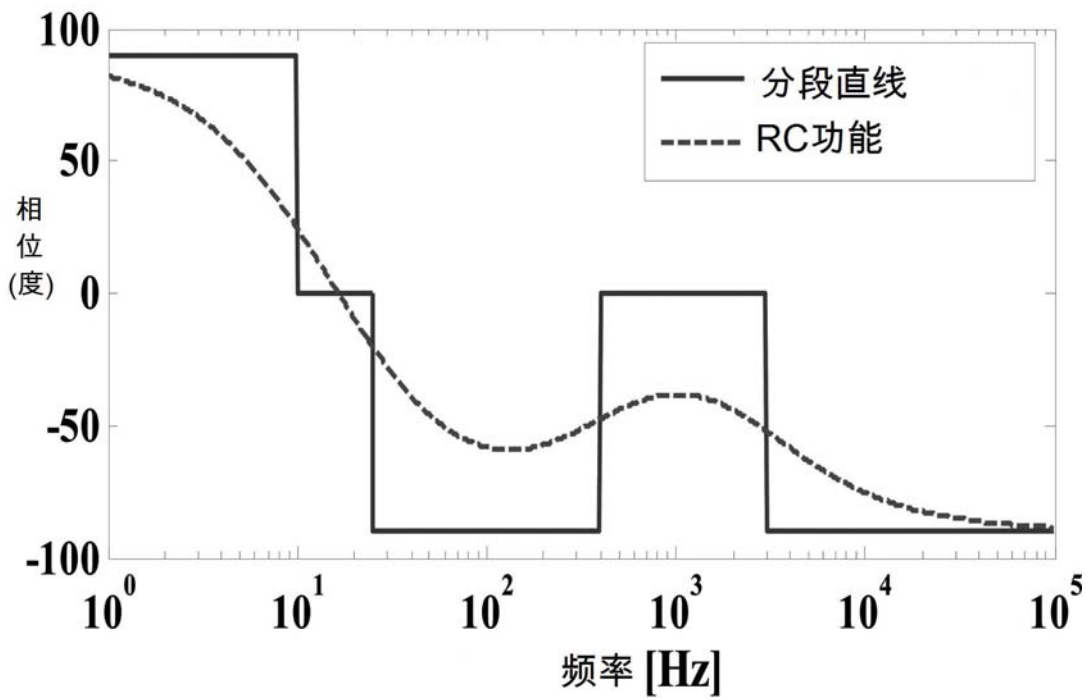
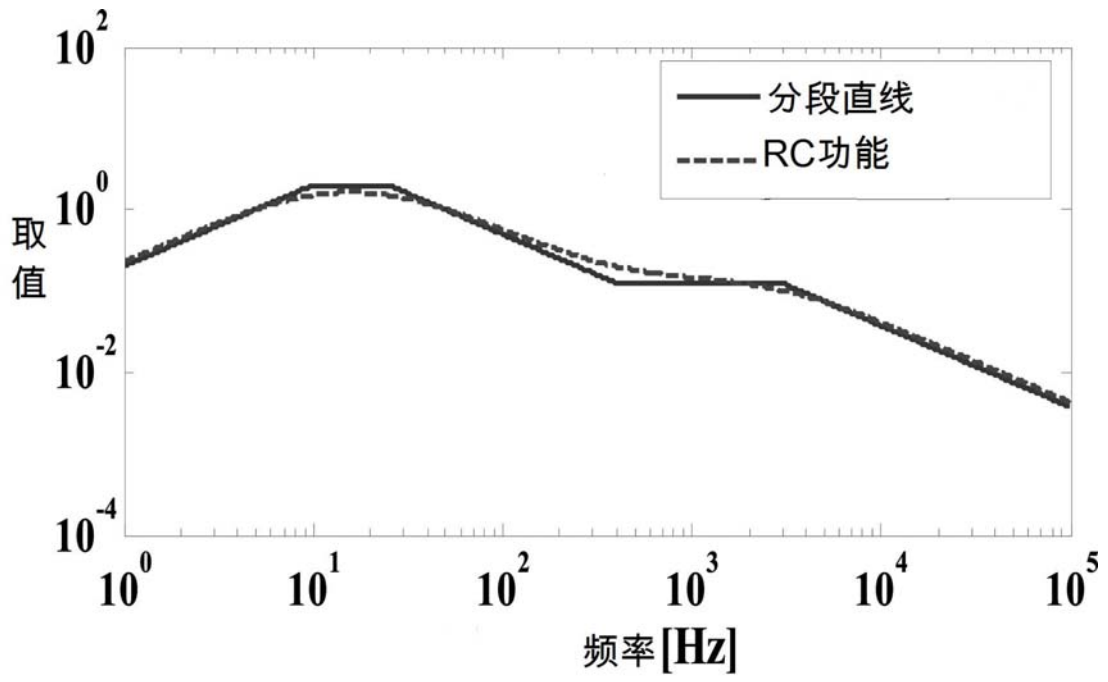


圖 A1 用於對感應電場加權的幅值和相位響應

## 術語

### **有害影響 Adverse effect**

由於電場、磁場或接觸電流曝露，對人體健康的不利影響。

### **平均距離 Averaging distance**

在確定與基本限值的相符性時，用來對體內電場取平均的距離。

### **基本限值 Basic restriction**

與所有已知的、可能導致人體組織有害健康影響的生物作用機制密切相關的定量的、必須遵循的限值。

### **癌症 Cancer**

以真核細胞不受控制和不正常分裂並使疾病擴散(遷徙)到機體內不同部位為特征的一類疾病。

### **中樞神經系統 Central nervous system ( CNS )**

脊椎動物神經系統的一部分，由腦和脊髓組成，但不包括周圍神經。

### **特性 Characteristics**

電場或磁場具體的物理特征，諸如量值、頻譜、極化、調制等。

### **導電率 Conductivity**

決定在材料上施加電場時，電流密度量值大小的一種材料性能，單位以西門子每米 (  $S m^{-1}$  ) 表示;是電阻率的倒數。

### **接觸電流 Contact current**

在接觸電極或其他電流源時流過生物介質的電流。

### **電流密度 Current density**

一個矢量，該矢量在給定表面上的的積分等於流過表面的電流；線性導體內的平均密度等於電流除以導體截面積。單位為安培每平方米（ $A m^{-2}$ ）。

### **DC**

“直流電流”的縮寫，但也用來表示場的恒定，請參閱“靜態電場”。

### **去極化（細胞）Depolarization（cellular）**

降低跨越細胞膜的靜息電位。

### **直接效應 Direct effect**

由電磁場與生物結構之間直接相互作用產生的生物效應。

### **直接電刺激 Direct electro stimulation**

由外部電場或磁場（而不是直接接觸其他導體或火花放電）在生物介質內感應電場所產生的刺激。

### **DNA（脫氧核糖核酸）deoxyribonucleic acid**

由脫氧核糖核酸（以雙鏈、雙螺旋的形式組成的模塊）構成的一種聚合物分子，是大多數生物組織的遺傳物質。

### **劑量學 Dosimetry**

針對曝露於電磁場的人體或動物，測量或通過計算確定體內電場強度或感應電流密度、比吸收（SA）、比吸收率（SAR）。

### **電場 Electric field**

向量場 E，以伏每米為單位。

### **電場強度（E）Electric field strength**

電場作用在點電荷上的力除以電荷。電場強度單位以牛頓每庫侖或伏每米表示 (  $N/C = V/m$  ) 。

### **電磁能 Electromagnetic energy**

電磁場中儲存的能量。單位為焦耳 ( J ) 。

### **電磁場 Electromagnetic fields**

環境中電場和磁場的總稱。這個術語經常和“電磁輻射”相混淆，並在使用于極低頻場時形成誤導，因為對極低頻而言很難檢測到輻射。

### **電刺激 Electro stimulation**

通過外施電刺激在可激勵組織中傳播動作電位的感應；突觸前過程的電極化導致突觸後細胞活性的變化。

### **EMF**

電場和磁場。

### **已確定的機制 Established mechanism**

具有以下特性的生物電機制：( a ) 能用於預測人體的生物效應；( b ) 通過方程或參數關係可以建立具體的模型；( c ) 已經在人體中得到證實或者動物數據能可信地外推到人體上；( d ) 有強證據支持；( e ) 被科學界專家廣泛接受。

### **曝露 Exposure**

在人體經受低頻場或接觸電流影響的情況下，它就存在。

### **長期曝露 Exposure , long-term**

該術語指的是在所涉及的生物系統壽命期大部分時間內的曝露；因此，持續期可能從幾星期到許多年。

### **曝露評估 Exposure assessment**

利用測量、建模、源信息或其他手段對人體曝露進行評價。

### **曝露計量 Exposure metric**

概括電場和/或磁場曝露的一個數值。計量通常綜合儀器測量信號處理和完成測量後的數據分析來確定。

### **頻率 Frequency**

1 秒中電磁波完整正弦周期的數目；單位通常以赫茲 ( Hz ) 表示。

### **公眾 General public**

術語“公眾”是指全部人口。包括所有年齡和不同健康狀況的人，也包括特定的脆弱群體或個人，如體弱者、老人、懷孕女工、嬰兒和幼童。

### **公眾曝露 General public exposure**

公眾成員受到的低頻場的所有曝露。此定義不包括職業曝露和醫療曝露。

### **諧波 ( 頻率 ) Harmonic ( frequency )**

頻率是電力頻率或其他參照頻率的整數倍。

### **心率 Heart rate**

每分鐘心跳次數的測量。

### **赫茲 Hertz ( Hz )**

頻率( f )的單位。一赫茲等於一周期每秒。1 kHz = 1,000 Hz, 1MHz = 1,000 kHz,

1 GHz = 1,000 MHz。

### **感應 Induction**

由外部 ( 環境 ) 時變電場或磁場所引起的導電介質中的電場或磁場。

### **瞬時的 Instantaneous**

用來描述某些特定參數的形容詞，這些參數的測量或評估必須在很短（通常為 100 微秒或更短）的時間間隔內。

### **擺脫電流 Let-go current**

在該閾值電流水平下不自主的肌肉收縮會阻止緊握帶電導體的手鬆開。

### **磁場 Magnetic field**

一個矢量， $H$ ，指空間中任意點的磁場，單位以安每米 ( $A\cdot m^{-1}$ ) 表示。另見磁通密度。

### **磁場強度 Magnetic field strength ( $H$ )**

磁場矢量的大小；單位是安每米 ( $A/m$ )。

### **磁通密度 Magnetic flux density ( $B$ )**

一個矢量，該矢量決定作用在運動電荷或電荷群（電流）上的力。磁通密度單位以特斯拉 ( $T$ ) 表示。1 高斯（不推薦單位）等於  $10^{-4}T$ 。

### **磁光幻視 Magnetophosphenes**

感應電流刺激視網膜引起的光閃爍的感覺。

### **平均 Mean**

一系列測量值或其他數據的算術平均。

### **中值閾值 Median threshold**

該閾值在統計分布中處於有 50% 數據具有更大閾值，而 50% 有更小閾值。

### **醫療曝露 Medical exposure**

病人在醫療診斷、認可的醫療治療或作為醫療研究的志願者受到的低頻場曝露。

### **誘變劑 Mutagen**

一種能引起基因突變的物質。

**基因突變 Mutation**

不是基因重組引起的遺傳物質的任何可檢測的和可遺傳的變化。

**神經 Nerve**

一束軸索。

**神經纖維 Nerve fiber**

一根神經軸索。

**神經元 Neuron**

一個單細胞單元，通常由一個軸索、細胞體和樹突樹組成。

**非電離輻射 Non-ionizing radiation ( NIR )**

包括電磁頻譜中通常不具有足夠能量來使物質電離的所有輻射和場 ;特點是每光子能量小於 12 電子伏特 ,相當於波長大於 100 納米 ,或者頻率低於 $3\times 10^{15}$  赫茲。

**不均勻場 No uniform field**

在所關心的人體或人體某部分所處空間範圍內 ,場的幅值、方向和相對相位不是常數。對電場而言 ,此定義適用於未被人體畸變的電場環境。

**職業曝露 Occupational exposure**

個人因從事定期或指定的職業活動而受到的所有電磁場曝露。

**周圍神經 Peripheral nerve**

存在於中樞神經系統之外 ,並接入或引出中樞神經系統的神經。

**磁導率 Permeability**

表示由磁場強度產生磁通密度的標量或張量。

注：對於各向同性介質，磁導率是標量；對於各向異性介質磁導率是矩陣。別名：絕對磁導率。如將材料或介質的磁導率除以真空磁導率 $\mu_0$ （磁性常數），其結果稱為相對磁導率（ $\mu$ ）。單位：亨利每米（ $\text{H m}^{-1}$ ）。

### 介電常數 Permittivity

定義帶電體之間各向同性介質對引力和斥力影響的常量，單位以法拉每米（ $\text{Fm}^{-1}$ ）表示；相對介電常數等於材料或介質的介電常數除以真空介電常數。

### 相持續時間 Phase duration ( $t_p$ )

平均值為零的波形相鄰兩個過零點之間的時間。對於頻率為  $f$  的正弦波， $t_p = 1/(2f)$ 。對於指數形波， $t_p$  定義為從波形峰值到其衰減到峰值的 0.37 倍（ $e^{-1}$ ）時的測量時間。

### 光幻視 Phosphene

非光刺激引起的視覺感受。電致光幻視是由電流引起的；磁致光幻視是由磁場引起的。

### 質膜（細胞膜） Plasma membrane

動物和植物細胞的胞質周圍的脂質雙層膜。

### （細胞的）極化 Polarization (cellular)

跨越細胞膜形成的電位。

### 電力頻率 Power frequency

產生交流電的頻率。對於用電設備，在北美、巴西和日本的一部分，電力頻率是 60 赫茲；在世界大部分其他地方是 50 赫茲。

### 蛋白質 Protein

一組高分子量、具有複雜形狀和成分的含氮有機化合物。

## **公眾曝露 Public exposure**

公眾成員經受的所有電磁場曝露，不包括職業曝露和醫療過程中的曝露。

## **無線電頻率 ( 射頻 ) Radiofrequency ( RF )**

頻率在 3kHz 到 300GHz 範圍內的電磁能。

## **降低因子 Reduction factor**

降低影響閾值以補償導則制定過程中各種不確定源的影響。一些曝露影響閾值水平不確定源的例子包括：將動物影響數據外推到對人的影響；不同人由於耐受性差異造成的生理學儲備的差異和劑量-反應關系統計上的不確定性 ( 置信區間 )。在 ICNIRP 看來，應用導則時的測量不確定性對負責提出相符性方法的機構而言是更現實的問題。ICNIRP 在設定降低因子中沒有考慮這一點。

## **參照水平 Reference levels**

人體可能曝露而無有害影響，並帶有可接受的安全因子的電場、磁場和接觸電流的有效值及峰值。如果能證明沒有超出基本限值，本導則中的電場和磁場曝露的參照水平可以超過。

因此，它是可以用來確定與基本限值相符性的適用或“替代”的參數。

## **相對磁導率 Relative permeability**

( 絕對 ) 磁導率 ( 參閱相關條款 ) 除以真空中的磁導率。接近 1 的值表示材料只能被外部場弱磁化。

## **相對相位 Relative phase**

正弦波的相角相對於導電介質內不同點測得的另一波形 ( 或相對於某一指定參考波形 ) 的相角。

## **相對危險度 Relative risk ( RR )**

研究組與對照組疾病率的比率，必要時對混淆因素（比如年齡）做些調整。對於罕見疾病，相對危險度實際上與“比數比（odds ratio）”相同。

### 均方根 Root mean square ( rms )

時變函數  $F(t)$  在指定的時間區間  $t_1$  到  $t_2$  內平方平均值的平方根。它是通過先求函數平方，再確定所獲得函數平方的平均值，最後求出該平均值的平方根，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

國際單位制的縮寫。

### 空間峰值 Spatial peak

此術語用來描述特定量在人體內小部分或小範圍內平均的最高水平。

### 火花放電 Spark discharge

電流通過空氣隙轉移，其條件是電壓高到足以使空氣電離，這與直接接觸電源不同。

### 靜態場 Static field

不隨時間變化的場。在大多數環境中，電場和磁場隨時間變化，但其頻譜中有 0Hz 分量。場的“准靜態”分量能通過採樣時間內振蕩信號的平均來測量。

### 特斯拉 Tesla ( T )

磁通密度的國際單位制單位。1 特斯拉 = 10,000 高斯（參閱相關條款）。

### 閾值 Threshold

劃分有反應和無反應之間界限的激勵水平。

### 心室纖顫 Ventricular fibrillation

以快速不協調收縮為特征的心室心律失常。

### **體素 Voxel**

一個三維的計算元素。本標準中用來代表劑量模型中的動物和人體組織。

### **波形 Waveform**

電幅值隨時間的變化。除非另有說明，此標準中術語“*波形*”指的是生物介質內所在點的值（或測量值）。

### **工人 Workers**

見術語“*職業曝露*”。

（本文件由中國華東電力試驗研究院 楊新村、辛亮、陳潔、陳磊譯校，譯文承蒙 ICNIRP 委員林治義教授精心審校，，謹致衷心感謝）