ICNIRP GUIDELINES FOR
LIMITING EXPOSURE TO ELECTROMAGNETIC FIELDS (100KHz TO 300GHz)

国际非电离辐射防护委员会
限制电磁场曝露导则
(100kHz-300GHz)

国际非电离辐射防护委员会
限制电磁场曝露导则
(100kHz-300GHz)

编译委员会

主　任：周树勋

副主任：赵顺平　曹　勇

委　员：吴科庆　穆晨旸　林　远　叶垚栋　李　夏　朱　滢　吴　剑　郁丹炯　刘贵龙　李育敏

译审委员会

主　任：巫彤宁

副主任：陈光弟　周　峰　徐　辉　石　丹

前言

随着公众对电磁场中人体健康影响的关注，ICNIRP（国际非电离辐射防护委员会）于 1998 年起开始发布人类曝露于最高达 300 GHz 的时变电磁场的导则。基于此导则，众多科学机构展开了电磁场应用技术及电磁场与人体健康之间关系的研究。

本书为 ICNIRP 的限制电磁场曝露导则 2020 年修订版本，阐述了曝露在 100kHz-300GHz（以下简称“射频”）频段范围内人体曝露的机理、依据以及保护措施。

本书分为正文、附录、历年导则解读三部分内容。正文部分共五个章节，第一章节引言为全书的集中概括，第二章节指出了本导则的目的和范围，第三章节分析了限制射频曝露的原理，第四章节阐明了其科学依据，第五章节提出了射频电磁场接触限值导则，对 100kHz-300GHz 频段范围内电磁场人体防护提出了相应的措施和科学建议。

中文版国际非电离辐射防护委员会限制电磁场曝露导则（2020 版）由浙江省辐射环境监测站（生态环境部辐射环境监测技术中心）编译委员会编译完成，译审委员会巫彤宁（中国信息通信研究院）、陈光弟（浙江大学）、周峰（中国信息通信研究院）、徐辉(华信咨询设计研究院有限公司)、石丹(北京邮电大学)等行业内专家对中文译稿进行了最终审定。

本书在编译过程中得到了 ICNIRP 的大力支持与帮助，译者于 2020 年 8 月以电子邮件形式向 ICNIRP 发起了关于本导则的电子平台官方发布授权申请；2020 年 10 月，ICNIRP 秘书处 Karine Chabrel 女士向译者寄送了 ICNIRP 电子平台官方发布授权书。在此期间，国内多位电磁环境保护领域相关专家也对本译文的内容进行了审读并提出了宝贵意见，在此一并致以诚挚的谢意。

本书可供环保、卫生、建设、规划、法律等相关部门的监管人员；电磁环境保护、疾病控制与预防、生物电磁学等领域的研究人员；从事电力和电气规划、设计、建设、运行等相关的管理人员和技术人员阅读使用。也可供关心电磁环境与健康关系的高等院校师生和具有一定专业基础的公众参考。

限于译者水平，书中难免存在错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

本中文译稿在浙江省辐射环境监测站（生态环境部辐射环境监测技术中心）网站（www.rmtc.org.cn）上供各界人士阅读参考并可免费下载。郑重申明，本中文译稿不得以任何形式出版获利，如出版获利，则必须征得 ICNIRP 和英文出版者的授权并注明译者姓名。

译者

2021 年 6 月

目录

国际非电离辐射防护委员会限制电磁场曝露导则(100 kHz-300 GHz)....1
一、 引言....1
二、 目的和范围....1
三、 限制射频曝露的原理....1
四、 限制射频曝露的科学依据....3
五、 射频电磁场接触限值导则....9
参考文献....21
附录 A：剂量学背景....25
一、 简介....25
二、 量值和单位....25
三、 特定能量吸收率（SAR）和特定能量吸收（SA）....25
四、 吸收功率密度（S_{ab}）和吸收能量密度（U_{ab}）....26
五、 入射功率密度（S_{inc}）和入射能量密度（U_{inc}）....27
六、 相关生物物理机制....27
七、 参考水平的推导....34
参考文献....39
附录 B：健康风险评估文献....46
一、 简介....46
二、 脑生理学和功能....46
三、 听觉、前庭和视觉功能....48
四、 神经内分泌系统....49
五、 神经退行性疾病....49
六、 心血管系统、自主神经系统和温度调节....49
七、 免疫系统和血液学....50
八、 生育、生殖和儿童发育....50
九、 癌症....51
十、 总结....52
参考文献....53

国际非电离辐射防护委员会限制电磁场曝露导则 (100 kHz-300 GHz)

摘要：射频电磁场被用于许多现代设备，包括移动通信基础设施、电话、Wi-Fi 和蓝牙。由于高功率射频电磁波会对人体健康产生有害影响，ICNIRP 于 1998 年发布了人类曝露于最高达 300 GHz 的时变电磁波的导则，射频电磁场频谱也被包括在其中。此后，已经有相当多的科学机构进一步阐述了关于射频电磁场和有害健康影响之间的关系，以及射频电磁场应用技术的重大发展。因此，ICNIRP 更新了 1998 年版导则中的射频电磁场部分内容。本文将介绍本修订导则，这将为人体曝露在 100 kHz-300 GHz 频段范围内电磁场提供保护。

一、引言

本导则描述的是曝露在 100kHz-300GHz（以下简称“射频”）频段范围内电磁场中的人体保护措施。本文取代了 ICNIRP（1998）射频导则的 100 kHz 至 300 GHz 频段部分，以及 ICNIRP（2010）低频导则 100 kHz 至 10 MHz 频段部分。虽然这些导则是基于反映当前最好科研水平的成果，但它们仍有一定的局限性，并对制定暴露限值产生影响。因此，随着相关科学知识日新月异的进步，本导则将定期修订和更新。本文描述了导则及其基本原理，附录 A 提供了有关剂量学的进一步细节描述，附录 B 提供了对生物和健康效应的进一步细节描述。

二、目的和范围

本导则的主要目的是制定电磁场曝露的限制导则，为公众提供高水平的保护，使其免受由于短期和长期、连续和不连续的射频电磁场曝露造成对健康的不利影响。但是，有些曝露场景超出了这些导则的范围。医学诊疗过程会利用电磁场，金属植入物可改变或干扰人体内的电磁波，进而可直接（通过场与组织之间的直接相互作用）和间接（通过中间传导物体）影响人体。例如，射频消融术和热疗都被用作医疗手段，射频电磁场可能因为存在有源植入式医疗设备（请参阅 ISO 2012）或由于存在导电植入物而被无意干扰，间接造成伤害。由于医疗程序依靠医疗专业知识来权衡潜在危害与预期效益，ICNIRP 认为，由具备合格行医资质的医生管理的此类曝露（即对患者、看护者和抚慰人员，如有相关，包括胎儿的曝露管理），以及在医学诊疗流程中导电材料的应用，均超出了本导则的规范范畴（更多信息，请参阅 UNEP / WHO / IRPA 1993）。类似的，鉴于志愿者研究是在机构伦理委员会在考虑潜在的利害关系后获批进行的，这类研究的参加者也被排除在本导则所涉及范围之外。但是，临床和研究场景中的职业曝露个体被定义在本导则范围之内。美容疗程也可以利用射频电磁场。ICNIRP 认为，由于美容而曝露于射频电磁场的人群，如果没有受到合格的医学执业人员的管控，则应遵守这些准则；任何涉及潜在豁免的决定都属于国家监管机构的职责范畴。射频电磁场还可干扰电气设备（不仅是植入式医疗设备），导致设备故障，从而间接影响健康。这种现象被称为电磁兼容，这不在本导则涉及的范围内（有关更多信息，请参阅 IEC 2014）。

三、限制射频曝露的原理

导则特别量化了个人曝露的电磁场水平。遵守这些标准旨在保护人们免受已被证实的

射频电磁场曝露的有害影响。为了测定这些曝露水平，ICNIRP 首先对已发表的有关射频电磁场曝露对生物系统产生影响的科学文献进行了鉴别，并明确了其中哪些是既有有害人体健康又有科学依据的效应。特别是后面一条是重点，因为 ICNIRP 认为，一般而言，射频电磁场反映出来的对于有害健康效应需要被独立验证，具备充足的科学质量且符合当前的科学认知，以便用于作为制定曝露限值的“证据”。在本导则内，“证据”一词将在全文中使用，而“已证效应”则用于描述满足本证据定义的已知的效应。在判定对健康有害影响时，凭借诸如此类的证据可以确保曝露限制是基于真实可靠的结果，而不是毫无依据的判断。当然，如果有足够充分的其它知识（例如有助于理解相关生物相互作用机制的知识）可以合理解释有害健康效应的发生，那么可以适当的放宽以上这些要求。

对于每个已被证实的效应，ICNIRP 确定的“有害健康效应阈值”；也就是引起健康效应的最低曝露水平。对于典型的曝露场景和人群来说，这些导出的阈值是非常保守的。对于在射频健康文献中无法明确获得的阈值，或者与射频健康文献无关的证据已经（间接）表明，危害程度可能会低于“ 电磁场得出的阈值”，ICNIRP 设置了一个“干预阈值”。这种基于曝露的主要效应（例如，加热）和健康效应（例如，疼痛）关系的附加学科知识，可提供一个导出限制值的干预等级，从而达到相适应的保护水平。根据 ICNIRP 先前的导则，将降低因子应用于阈值(或干预阈值)，以提供曝露限值。降低因子考虑了人群中的生物差异性（如年龄、性别）、基线情况的差异性（如组织温度）、环境因素的差异性（如空气、温度、湿度、衣着）、与推导曝露值相关的剂量学不确定性、与健康科学相关的不确定性及更普遍的保守估计。

这些曝露限值被称为“基本限值”。这种限值与由射频引起的健康有害效应相关的物理量密切有关。其中一些是体内曝露的物理量，无法轻易测量，因此从基本限值中得出了更易于估算的量（称为“参考水平”），以提供更实用的方法来表征与导则的符合程度。参考说已被赋予与基本限值等效的保护等级。因此，如果曝露低于相关的基本限值或相关参考水平，则视为符合导则。值得注意的是，由基本限值引起曝露结果与参考水平之间的相对一致性可能因一系列因素而异。在相对保守的情况下，参考水平是在最坏曝露条件下导出的（在实际中极不可能发生），这将导致它产生与基本限值规定的相似曝露量。因此，绝大多数情况下，遵守参考水平将导致大大低于相应的基本限值所允许的曝露。请参阅“参考水平”一节，了解更多详细信息。

该导则区分了职业曝露和普通公众曝露人群。职业曝露个体被定义为与其职业相关的受控条件下曝露的、接受过潜在射频电磁场风险防护培训的并采取适当的减缓危害的措施以及对于此类伤害具备感知和行为能力的成年人。职业曝露工作人员还必须遵守涉及上述信息和保护相适应的健康和安全计划。普通公众的定义是指所有年龄段及不同的健康状况的个体，这其中包括易感人群，以及可能不了解或无法控制接触曝露电磁场的人群。这些差异表明，有必要对普通公众提出更严格的限值要求，因为它们很难接受适合的防护培训，或者没有足够的能力进行自身防护。当职业曝露人群可以对所有已知风险合理的筛查，且开展相适的防护培训时，其面临的风险不会比普通公众大。需要注意的是，无论在何种曝露情况下，普通公众都将遵守公众限值要求。

如上文所述，在制定 ICNIRP 导则方面涉及许多环节。ICNIRP 对每一个步骤都采取保守的方法，以确保即使大幅超标情况下，其限值也能具有保护作用。例如，有害健康效应的选择、假定的曝露场景、降低因子的应用和参考水平的推导都是保守的。因此，曝露水平的防护程度可能比仅考虑降低因子（仅代表导则中的一个保守因素）所建议的防护程度要大。目前为止，尚无证据表明，采取其它预防措施将有利于人民的健康。

四、限制射频曝露的科学依据

(一)100kHz 至 10MHz 电磁场频段范围：现行和其它 ICNIRP 导则之间的关系

尽管在 100 kHz 至 10 MHz 的频段范围，现行导则替代了 ICNIRP（2010）导则中的内容，但 ICNIRP（2010）导则中有关电磁场对神经刺激的直接效应和相关限值的研究在此文中不再作分析。取而代之的是，当前导则评估过程包括了除 100 kHz 至 10 MHz 的神经刺激的直接效应并包括了 10 MHz 至 300 GHz 的所有不利健康效应。2010 年导则中与神经刺激直接效应相关的限值内容已被直接加入到本导则中，形成最终的限值准则。因此，本文未提供与直接刺激神经有关的健康和剂量学方面的分析。【更多信息见 ICNIRP（2010）】。

(二)数量量值、单位和相互作用机制

本节简要概述电磁量值和单位，以及它们与人体相互作用的机理。与导则相关的剂量学方面的详细描述见附录 A“数量和单位”一节。

射频电磁场包含振荡电场和磁场；每秒的振荡次数被称为“频率”，用单位赫兹（Hz）表示。场从源传输能量，且随着远离源的方向传播，用单位瓦特（W），相当于单位时间（t）的焦耳量（J，能量的度量）。当场作用于材料时，它与材料中的原子和分子相互作用。当生物体曝露于射频电磁场时，一些能量会被身体反射回去，而一些能量则会被吸收。这导致了体内电磁场的复杂模式，这在很大程度上取决于电磁场的特性以及生物体的物理性质和外形。射频电磁场影响人体的主要因素是电场。人体内的电场被称为感应电场（E_{ind}，以伏特/米为单位；V m^{-1}），它们以不同的方式对人体健康产生潜在的影响。

首先，体内的感应电场对极性分子（主要是水分子）和自由移动的带电粒子（如电子和离子）都施加力。在这两种情况下，一部分电磁场能量转化为动能，迫使极性分子旋转，同时带电粒子以电流的形式运动。由于极性分子的旋转和带电粒子的运动，它们通常会与其它极性分子和带电粒子发生相互作用，导致动能转化为热能。这种热能在许多方面会对健康产生不利影响。其次，如果感应电场低于约 10MHz 频率且足够强，则它可以施加足以刺激神经的电场力；如果感应电场足够强且持续时间足够短（如脉冲低频电磁场），可以产生足以引起生物膜的介电击穿的电场力，类似于直流电（DC）电穿孔过程（Mir 2008）。

从健康风险的角度来看，我们通常对生物组织吸收多少电磁场功率感兴趣，因为这在很大程度上是造成上述热效应的原因。这通常被描述为相关剂量的函数。例如，6 GHz 以下的电磁场可以渗透到组织内部的（因此需要考虑深度），这通常用“比吸收率”（SAR）来描述，它是单位质量的吸收功率（W kg^{-1}）。相反，在 6GHz 以上的电磁场更多的被表浅地吸收（与深度相关性不大），这通常用“吸收功率密度”（S_{ab}）来描述，它是单位面积上的吸收功率（W m^{-2}）。

在导则中，SAR 被指定为基于不同质量，更好匹配特定的对健康不利影响的量；SAR_{10g} 表示在每 10g 立方体组织质量上吸收的功率（按每千克组织计算），而全身平均 SAR 表示在整个身体上吸收的功率（按每千克组织计算）。类似地，在不同区域的吸收功率密度被约定为电磁场频率的函数。在某些情况下，能量沉积率（功率）与总能量沉积的相关度不高。在热扩散时间不充足的情况下，可能会出现短暂曝露。在这种情况下，比系数能（SA，单位为 J kg^{-1}）和吸收能量密度（U_{ab}，单位为 J m^{-2}）分别适用于 6 GHz 以下和 6GHz 以上的电磁场。在导则中，SAR、S_{ab}、SA、U_{ab} 和 E_{ind} 是用于基本限值的特定物理量。

由于用于基本限值的量值可能难以测量，因此还指定了更易于评估的量值作为参考水平。与本导则相关的参考水平量值为入射电场强度（E_{inc}）和入射磁场强度（H_{inc}）、入射功率密度（S_{inc}）、平面波等效入射功率密度（S_{eq}）、入射能量密度（U_{inc}）和平面波等效

入射能量密度（U_{eq}）。上述所有量值测量均在可体外进行，同时体内电流 I 以安培（A）为单位。基本限值和参考水平的单位如表 1 所示，所有相关术语的定义在附录 A“数量值和单位”章节有具体描述。

表 1.本导则中使用的物理量和相应的国际单位制单位

物理量	符号	单位
吸收能量密度	U_{ab}	焦耳/平方米（J m^{-2}）
入射能量密度	U_{inc}	焦耳/平方米（J m^{-2}）
平面波等效入射能量密度	U_{eq}	焦耳/平方米（J m^{-2}）
吸收功率密度	S_{ab}	瓦特/平方米（W m^{-2}）
入射功率密度	S_{inc}	瓦特/平方米（W m^{-2}）
平面波等效入射功率密度	S_{eq}	瓦特/平方米（W m^{-2}）
感应电场强度	E_{ind}	每米电压（V m^{-1}）
入射电场强度	E_{inc}	每米电压（V m^{-1}）
入射电场强度	E_{ind}	每米电压（V m^{-1}）
入射磁场强度	H_{inc}	每米安培数（A m^{-1}）
比吸收能	SA	焦耳/千克（J kg^{-1}）
比吸收率	SAR	瓦特/千克（W kg^{-1}）
电流	I	安培（A）
频率	*f*	赫兹 (Hz)
时间	*t*	秒 (s)

斜体符号表示变量；量值以标量形式描述，因为方向不参与基本限值或参考水平的导出运算。

(三)射频电磁场的健康研究

为了设定安全的曝露水平，ICNIRP 首先要确定射频电磁场是否有损害健康的证据。同时，对于每种已明确的对健康的不利影响，都应确定相互作用机理和引起伤害所需的最低曝露量（如有）。这些信息主要来源于涉及射频电磁场和健康相关的主流国际文献综述。这包括世界卫生组织（WHO）发布的关于射频辐射曝露的深入综述，该综述已以健康技术草案文件（WHO 2014）的形式发布。欧盟新兴消费及健康风险评估科学委员会（SCENIHR 2015）以及瑞典辐射安全局（SSM 2015、2016、2018）的报告。这些报告涵盖了大量文献的回顾和研究，从实验研究到流行病学，包括对儿童健康和对射频电磁场敏感人群的关注。作为这些报告的补充，ICNIRP 还关注了自这些综述发表以来的研究。附录 B 提供了这些文献的简单摘要，并提供了主要结论。

如附录 B 所述，除了神经刺激（详见 ICNIRP 2010），射频电磁场可通过两种主要生物效应影响人体：膜通透性变化和温度升高（温升）。热效应与健康之间关系的知识也很重要，即使是独立于射频电磁场的文献，也是十分重要的，因此也将他们记录在附录 B 中。ICNIRP 认为这很有必要，因为绝大多数的射频电磁场健康研究都是使用明显低于对不利健康影响的曝露进行的，而通过已知的相互作用机制本身对健康产生不利影响的阈值研究相对较少。因此，射频健康文献可能不够全面，因而无法精准判明阈值。相反，如果有更丰富的文献阐明健康与主要生物效应之间的关系，这对导则的制定是大有帮助的。比如，如果有热生理学文献能证明，局部某强度的温度升高会造成伤害，但尚未发现已知会产生类似温度升高的射频曝露造成的危害，那么也有必要考虑此类热生理学文献。ICNIRP 指的是从其它文献中获取的阈值，如干预不利健康影响阈值。

值得注意的是，当干预阈值低于（更保守）在射频文献中被证明对健康有不利影响的阈值时，或者当射频文献没有提供足够的证据来推断有害健康影响阈值时，必须使用干预

阈值。为了确定阈值，所有射频电磁场曝露对健康的不利影响都需要考虑到，包括“低水平”和“非热效应”的影响，以及包括尚未阐明的机制。同样，由于没有证据表明连续的（如正弦）和不连续的（如脉冲）电磁场会导致不同的生物效应（Kowalczuketal.2010；Juutilainental.2011），这些曝露类型之间没有理论上的区别（所有对健康产生不利影响的曝露主要基于以往经验）。

(四)射频电磁场对健康影响的阈值

神经刺激。曝露在电磁场中，人体内会产生电场，在高于 10 MHz 频率，电磁场会刺激神经（Saunders 和 Jeffreys，2007）。这种刺激效应随着频率的变化而变化，通常在 100 kHz 左右频率下会有“刺痛”的感觉。随着频率的增加，热效应起到主导作用，神经刺激的可能性降低；在 10 MHz 时，电场的效应通常被描述为“温暖”效应。ICNIRP 低频导则（2010）一文详述了感应电场的神经刺激。

细胞膜通透性变化。当（低频）电磁场发射脉冲时，其能量分布于包括射频电磁场（Joshiand Schoenbach 2010）在内的一系列频率范围内。如果脉冲足够强烈且短暂，曝露于由此产生的电磁场可导致细胞膜通透性改变，进而导致其它细胞变化。然而，尚无证据表明，电磁场脉冲的射频频谱分量（不含低频成分）足以引起细胞膜的通透性变化。ICNIRP（2010）导则（此处使用）中有描述，神经刺激的限值足以确保不发生细胞膜通透性的变化，因此对于此类射频电磁场的曝露无需进行额外的防护。在 18 GHz 连续波曝露的情况下，膜通透性也显示出变化（例如 Nguyen 等，2015）。这一点仅在体外得到证实，而且其影响需要非常高的曝露水平（约 5 kW kg^{-1}，历经多分钟），远超造成热致伤害所需的水平（见“温升”一节）。因此，此处不特别针对这种效应的限值防护进行详细描述，因为“温升”一节中旨在防止较小的温度上升的限值进行详细的描述。

温升。射频电磁场可以在体内产生热量，同时要将这种热量保持在安全水平是很重要的。但是，从附录 B 中可以看出，目前还缺乏使用充足能量致热效应的射频曝露的相关研究。特别值得注意的是，尽管偶尔显示出曝露（以及由此引起的温度升高）会造成严重伤害，但文献中缺乏造成伤害所需最低曝露的伴随证据。有大量证据表明，对于非常低的曝露水平（如在 ICNIRP（1998）基本限值内），产生的热量不足以造成伤害。但对于高于 ICNIRP（1998）基本限值水平的曝露水平，目前研究有限。有充分的理由表明，低于引起上述温升限值的射频电磁场曝露不会引起健康损伤。因此，ICNIRP 将这些较低的温度作为其限值导则的依据（见“射频电磁场健康研究”一节）。

值得注意的是，这些导则通过限制射频电磁场曝露来控制温度升高的限值而不是设立绝对温度的限值，而健康影响主要与绝对温度有关。使用此策略是因为限制绝对温度是不可行的，这取决于许多超出这些导则范围的因素，如环境温度、衣服和工作效率。这意味着，如果曝露导致特定的温度升高，这可能会增加，而不是影响，或者说是损害健康取决于一个人的初始温度。例如，如果一个人很冷，温和的暖气可以使人感到愉快，但如果他们已经很热，则会令人不快。因此，设置这些限值是为了避免温度“显著”升高。“显著”是考虑到潜在危害和正常生理温度变化。这些导则区分了稳态温升（温度缓慢上升，从而使热量散发到较大质量的组织上，并允许热调节过程抵消温度上升）和短暂的温度上升（这种情况可能没有充足的时间进行热量消散，这可能导致在吸收相同的射频能量的情况下小区域内温度升高更大）。这种区别表明需要分别评估稳态和短暂曝露时间。

(五)稳态温升

身体核心温度。身体核心温度是指身体内部深层的温度，如腹部和脑部，以及由性别、年龄、当日时间、工作效率、环境条件和体温调节等多种因素作用引起的的温度显著变化范围。例如，虽然平均身体核心温度约为 37℃（在“常温”范围），但超过 24 小时生理周

期的变化幅度通常高达 1℃（Reilly 等，2007）。随着热负荷的增加，诸如血管舒张和出汗的体温调节功能可以限制身体核心温度的升高。这一点很重要，因为一旦身体核心温度升高超过大约 1℃（称为“体温过高”），就会产生各类的健康影响。例如，高温会增加事故风险（Ramsey 等，1983），在身体核心温度> 40℃的情况下可能导致致命性的中暑症状（Cheshire 2016）。

详细的导则内容适用于最大程度地减少职业环境中与高温相关的不利健康风险（ACGIH 2017）。这些措施旨在改善工作环境，以使身体核心温度保持在正常体温+1℃范围内，并且由于一系列可能影响核心温度的变量，需要对每种特定情况有充分的了解。如附录 B 所述，仅当温度上升超过 1℃时，才会出现由于射频电磁场导致人体核心温度升高引起的伤害，但没有对健康不利影响的特定阈值的明确证据。由于现有文献的局限性，ICNIRP 采用保守的温升值作为干预不利健康影响阈值（ACGIH 2017 的 1℃升高）。特别需要引起注意的是，身体核心温度升高 1℃，会引起生理学上的显著变化。这种变化是身体正常的热调节反应的一部分（如 Van den Heuveletal 等，2017），但这并不代表会对健康产生不利影响。

最近一系列用于不同对象的理论建模和实验研究显示，在热中性条件下（28℃，裸露，静息态），曝露于 100 kHz 至 6 GHz 范围内的全身平均 SAR 约为 6 Wkg^{-1} 的强度 1 小时以上，会引起成年人人体核心温度升高 1℃。由于儿童的散热效率更高，因此要达到这样的温度上升，需要更高的 SAR 值（Hirata 等，2013 年）。然而，鉴于有限的可用测量数据，ICNIRP 采用了相对保守的立场，使用每 30 分钟，4 W kg^{-1} 作为对应于 1℃的身体核心温度上升的射频电磁场曝露水平。30 分钟的平均时间用于计量达到稳态温度所需的时间（有关更多详细信息，请参见附录 A，“时间平均考虑”部分）。举一个例子作为比较，一个成年人在静息时消耗约为 1Wkg^{-1}（Weyandetal.2009），站立时约为 2 Wkg^{-1}，跑步时约为 12 Wkg^{-1}（Teunissental，2007 年）。

随着电磁场的频率增加，身体的曝露和由此产生的热量会变得更为表浅化，超过 6 GHz，这种发热主要在皮肤内。例如，在频率 6 和 300 GHz 时，86%的能量分别在距表面 8 和 0.2 毫米处被吸收（Sasaki 等.2017）。与深层组织中的热量相比，表层组织中的热量更容易从体内排出，因为热能更容易传递到环境中。这就是为什么传统上防止身体核心温度上升的基本限值仅限于 10 GHz 以下（例如，ICNIRP 1998）。然而，研究表明，高于 300 GHz 频率范围（例如红外辐射）的曝露会使人体核心温度升高到超过上述 1℃不良健康影响阈值（Brockow 等人。2007 年）。低频的红外辐射仍在本导则覆盖的范围之内，它会导对致真皮的加热，真皮内广泛分布的的血管网可以将这种热量输送到身体深处。因此，在 6 GHz 以上，有必要防止身体核心温度升高。

在 6-300 GHz 频段范围，ICNIRP 没有关于电磁场对身体核心温度产生影响的评估研究，也没有证明它有害的研究。然而，作为一种保守的测量方法，在最高至 6 GHz 频段范围，ICNIRP 使用 4 Wkg^{-1} 对应不利健康影响阈值，对于>6GHz-300GHz 的频率范围，阈值也是如此。作为这个保守值的支撑，已经证明，在身体一侧 1260 W m^{-2}（入射功率密度）红外辐射曝露会导致 1℃的身体核心温度升高（Brockow 等，2007）。如果我们将其与一个曝露面积在 1 m^{-2} 且无皮肤反射情况的 70 公斤成人关联起来，则将导致约 18 Wkg^{-1} 的全身曝露剂量；这远高于 6 GHz 以下的电磁场 4 Wkg^{-1} 的曝露水平，该水平代表 1℃的体核温升。另外一种保守的做法是，借鉴 Brockowetal 等研究，使用隔热毯减少散热，但该方法会低估典型场景下的曝露造成的核心温度上升。

局部温度。除了身体核心温度，过度的局部加热效应会导致疼痛感和热损伤。大量文献表明，皮肤长时间接触温度低于 42℃的环境不会导致皮肤细胞损伤（例如，Defrinal 等，2006）。如附录 B 所述，这与射频电磁场对皮肤热效应的限值数据一致[如，Walters 等（2000）

描述了在 43℃，94 GHz 的曝露情况下的疼痛感阈值],对于渗透到保护性表皮之下以及达到热敏感性表皮/真皮表面的热源的研究，可获取的数据较少。但是，有大量关于组织损伤阈值的研究表明，损伤一般发生在组织温度>41℃–43℃时。在此温度下，损伤的可能性和严重性随着时间的推移而增加（例如,Dewhirst 等,2003;Yarmolenko 等,2011;Van Rhoon 等.2013）。

本导则将可引起局部温度至 41℃或更高温升的射频电磁场曝露视为潜在危害。因为体温随身体部位的变化而不同，ICNIRP 分别对身体不同区域的曝露进行分析研究。针对这些区域，本导则定义了两种组织类型，根据其在常温条件下的温度，给予不同的不利健康影响干预阈值；即“1 型”组织（包括上臂、前臂、手、大腿、腿、脚、耳廓和角膜、前房和眼虹膜、表皮、真皮、脂肪、肌肉和骨组织中的所有组织），以及“2 型”组织（包括头部、眼睛、腹部、背部、胸部和骨盆的所有组织，不包括被定义为 1 型组织的组织）。1 型组织的正常体温通常在<33℃–36℃，2 型组织的正常体温在<38.5℃（DuBois 1941；Aschoff 和 Wever 1958；Arens 和 Zhang 2006；Shafahi 和 Vafai 2011）。这些值被用于定义局部热诱发健康影响的干预阈值；本导则采取保守方法，采用 41℃作为潜在危害，分别处理在射频电磁场内 1 型和 2 型组织内 5℃和 2℃的温升，作为局部曝露的不利健康影响的干预阈值。

根据上述组织类型分类，很难设置曝露限制。因此，ICNIRP 定义了两个区域，并在相关的情况下为这些区域设置了单独的曝露限值：“头部和躯干”，包括头部、眼睛、耳廓、腹部、背部、胸部和骨盆，这其中包括 1 型和 2 型组织。以及“四肢”，包括上臂、前臂、手、大腿、腿和脚，其中只包括 1 型组织。对于每个区域，限制其曝露水平，以确保它们不会导致 1 型和 2 型组织中的温升分别超过 5℃和 2℃。根据定义，由于四肢不包含任何 2 型组织，因此四肢的不利健康影响干预阈值始终为 5℃。

睾丸可被视为一种特殊的情况，在正常生理范围内的温升即使保持较长时间，也可能会发生可逆的、分级的、功能性的变化。例如，坐着（相对于站立；Mieusset 和 Bujan 1995）等正常活动引起的高达 2℃的体温升高，精子会发生可逆性地减少。因此，2 型组织的不利健康影响干预阈值可能导致精子功能的可逆性改变。然而，目前没有证据表明这种影响足以损害健康。因此，ICNIRP 认为 2 型组织的不利健康影响干预阈值 2℃，也在睾丸的正常生理范围内。因此，对其也适用。需要注意的是，包括腹部和胚胎在内的 2 型组织的不利健康影响干预阈值，也符合防止对动物致畸作用中胚胎温升 2℃的阈值（Edwards 等，2003 年；Ziskin 和 Morrissey，2011）。

在 100 kHz 至 6 GHz 的电磁场频段内，在 10g 组织内平均 SAR 可作为射频电磁场引起的组织内稳态温升度量值。使用 10g 质量是因为，尽管在该质量块内最初可能存在由电磁场引起的温度不均匀性，但热扩散会将热能迅速分配到更大的体积，这个过程采用 10g 立方的组织质量能很好的体现（Hirata 和 Fujiwara 2009）。因此，在规定与不利健康影响干预阈值相对应的曝露剂量时，ICNIRP 指定为每 10g 立方质量的平均曝露剂量。在该情况下，曝露引起的 1 型和 2 型组织温升分别维持在 5℃和 2℃以下。此外，ICNIRP 考虑真实场景的曝露（人们在日常生活中可能遇到的曝露场景，包括职业曝露），例如来自无线电通信源的电磁场。与头部和躯干相比，该方法可提供更大的肢体曝露。在足以产生稳态温度的时间间隔内（从几分钟到 30 分钟），头部和躯干的 SAR_{10g} 值至少 20 W kg^{-1}，肢体的 SAR_{10g} 值至少 40 W kg^{-1} 才会超过不利健康影响干预阈值。该曝露时间间隔的平均干预时长为 6 分钟，这与局部曝露的热时间常数非常匹配。

在 ＞6 - 300 GHz 范围内，电磁场能量主要沉积在表层组织；这使得包括较深组织的 SAR_{10g}，与此频率范围无关。相反，吸收功率密度（S_{ab}）提供了一种测量组织吸收功率的方法，该测量值与表面温升非常接近（Funahashi 等人，2018 年）。在 6-10 GHz 频率范围，

皮下组织可能仍有明显的吸收。然而，从 6-300 GHz 的最大和最坏情况下的温升接近皮肤表面，曝露会将温升限制在 1 型组织的不利健康影响干预阈值（5℃）以下，将温升限制在 2 型组织的不利健康影响干预阈值（2℃）以下。需要注意的是，从 SAR 到吸收功率密度的准确频率区分点存在不确定性。之所以选择 6 GHz，是因为在这个频率下，大部分的吸收能量都在表层皮肤组织中，而它位于 10g SAR 立方体的上半部分（这通过 2.15cm x2.15cm 的立方体表面展现）。近期的热模型和分析解决方案表明，对于 6 - 30 GHz 之间的电磁场频率，在平均面积为 4cm^2 的正方形区域上的曝露可以很好估算出局部最大温升 (Hashimotoetal，2017; Foster 等 2017)。随着频率的增加，需要减小平均面积以解决更小的波束照射问题，也就是 1 cm^2 平均面积用于 30 GHz-300 GHz。尽管与温度相对应的平均面积在频率从 6-300 GHz 时逐渐从 4cm^2 变为 1cm^2，但 ICNIRP 在>6-300 GHz 的频段范围，使用 4cm^2 的平均面积作为实际的保护规范。此外，在>30-300GHz 的频段范围（可能出现波束聚焦曝露），空间平均面积为 1 cm^2 被用于确保在较小的区域内不会引起超过不利健康影响的干预阈值。

由于 6 分钟是一个适当的平均间隔（Morimoto 等人 2017），并且要在>6-300 GHz 频段范围产生 5℃局部温升的 1 型组织的不利健康影响干预阈值，大约需要 200 W m^{-2} 的吸收功率密度（Sasaki 等，2017 年），ICNIRP 将曝露时长平均 6 分钟，曝露面积为 4 cm^2 的局部加热的吸收功率密度值设置为 200 W/m^2；这还将 2 型组织中的温升限制在 2℃的不利健康影响干预阈值以下。对于频率大于 30 GHz，1 cm^2 空间平均正方形区域内，吸收功率密度值已在附加规范中被设定为 400 Wm^{-2}。

(六)快速温升

对于某些类型的曝露，快速升温会导致“热点”，即组织块上的不均匀温度分布（Foster 等.2016；Morimoto 等.2017；Laakso 人.2017；Kodera 等.2018）。这种情况需要考虑在较小的时间区间内对某些类型的曝露量取平均值。由于没有足够的时间让热量在组织上散失（或平均散失），在短时间的曝露下可能会出现热点。由于穿透深度较小，随着频率的增加，这种影响更加明显。

为了解释这种不均匀的温度分布，需要对稳态曝露水平进行调整。这可以通过指定允许的最大曝露水平（作为时间的函数）来实现，以便将温升限制在低于不利健康影响干预阈值的范围内。

在 400 MHz-6 GHz 频段范围，ICNIRP 采用 10 g 立方质量的组织的比吸收能（SA）限制作为限值，其中头部和躯干的 SA 限制为 7.2[0.05+0.95（t/360）0.5]kJ kg^{-1}，四肢的 SA 限制为 14.4[0.025+0.975（t/360）0.5]kJ kg^{-1}，其中 t 是以秒为单位的曝露区间（Kodera 等，2018）。注意，对于本导则，任何脉冲、脉冲组或系列中子脉冲的曝露，以及以秒为单位的时间的曝露总量（包括非脉冲电磁场）不得超过以下的公式（以确保不超过温度阈值）。

在 400 MHz 以下，没有规定短暂间隔曝露水平，由于穿透深度大，由 6 分钟局部 SAR 平均值得出的总 SA 不能使温度升高超过干预不利健康影响阈值（无论是脉冲还是短时曝露的特定形式）。

在 6 GHz 以上，ICNIRP 规定了头部、躯干和四肢在 4 cm^2 任何正方形平均面积上的吸收能量密度（U_{ab}）的曝露水平，因此 U_{ab} 被指定为 72[0.05+0.95（t/360）0.5]kJ m^2，其中 t 是以秒为单位的曝露间隔（Kodera 等，2018 年）。

1 cm^2 平均面积的曝露水平适用于频率 ＞30-300 GHz 的电磁场，用于波束聚焦曝露，可通过 44[0.025+0.975（t/360）0.5]kJ m^2 计算求得。

SA 和 U_{ab} 保守性能够保障 1 型或 2 型组织升温不会超过 5℃或 2℃。

五、射频电磁场接触限值导则

在“限制射频曝露的科学依据”部分已经说明，射频电磁场的曝露水平与健康危害效应存在关联。根据此得到基本限值，并在“基本限值”章节中进行阐述。ICNIRP（2010）中 100 kHz - 10 MHz 电磁场的神经刺激基本限值也被添加至当前的基本限值中，详见表 2 -表 4。根据这些最终基本限值我们推导出参考水平，并在“参考水平”部分中进行阐述，包括如何处理多个频率电磁场同时曝露的情况，在“多个频率场的同时曝露”一节中阐述。电流接触限值导则在“接触电流导则”章节，职业曝露健康注意事项见“职业曝露的风险缓解注意事项”一节。为了满足本导则的制定标准，对于每个曝露剂量（如 E 场、H 场、SAR），包括时间和空间上的平均情况，必须遵守基本限值或相应的参考水平其中之一。需要注意的是，如果限值规定了特定的平均间隔，“所有”这样的平均间隔必须符合限值规则。

(一)基本限值

在表 2 -表 4 中是电磁场的基本限值，其推导在下文有详细阐述。如前面所述，这里并未对 ICNIRP（2010）中 100 kHz -10 MHz 的基本限值进行重新评估，在表 4 中有相关描述。关于基本限值更详细的说明请参见附录 A 的“相关生物物理机制”部分。需要注意的是，孕妇应属于公众曝露。因为最近的建模表明，无论是全身还是局部曝露，母亲在职业基本限值条件下的曝露可引起胎儿的曝露超过一般公众曝露的基本限值。

表 2. 100kHz 至 300GHz 电磁场曝露基本限值，平均间隔≥6 分钟

曝露场景	频率范围	全身平均 SAR (W kg^{-1})	局部头部/躯干 SAR (W kg^{-1})	局部四肢 SAR (W kg^{-1})	局部 S_{ab} (W m^{-2})
职业曝露	100 kHz — 6 GHz	0.4	10	20	NA
	>6 — 300 GHz	0.4	NA	NA	100
公众曝露	100 kHz — 6 GHz	0.08	2	4	NA
	>6 — 300 GHz	0.08	NA	NA	20

注：

1.“NA”表示“不适用”，不需要考虑是否符合。

2.全身平均 SAR 值：时间大于 30 分钟的平均值。

3.局部 SAR 值和 S_{ab} 的平均曝露剂量，时间大于 6 分钟的平均值。

4.局部 SAR 值，10g 立方质量的平均值。

5.局部 S_{ab} 是质在身体表面 4 cm^2 面积的平均值。对于 30 GHz 以上电磁场，需要满足附加条件，即在 1 cm^2 的体表面积上的平均曝露限值为 4 cm^2 的两倍。

表 3. 100 kHz 至 300 GHz 电磁场曝露基本限值，间隔>0 - <6 分钟

曝露场景	频率范围	局部头部/躯干 SA (kJ kg^{-1})	局部四肢 SA (kJ kg^{-1})	局部 U_{ab} (kJ m^{-2})

职业曝露	100 kHz - 400 MHz	NA	NA	NA
	>400 MHz - 6 GHz	3.6[0.05+0.95(t/360)$^{0.5}$]	7.2[0.025+0.975(t/360)$^{0.5}$]	NA
	>6 - 300 GHz	NA	NA	36[0.05+0.95(t/360)$^{0.5}$]
公众曝露	100 kHz - 400 MHz	NA	NA	NA
	>400 MHz - 6 GHz	0.72[0.05+0.95(t/360)$^{0.5}$]	1.44[0.025+0.975(t/360)$^{0.5}$]	NA
	>6 - 300 GHz	NA	NA	7.2[0.05+0.95(t/360)$^{0.5}$]

注：

1.“NA”表示“不适用”，不需要考虑该情况下是否符合限值要求。

2.t 是时间（秒），所有 t 值在>0 到<360 s 之间的值必须满足限值要求，且无论曝露本身的时间特性如何，均适用。

3.局部 SA 应，10 g 立方质量的平均值。

4.局部 U_{ab} 是在 4 cm^2 的物体表面积上获得的平均值。对于 30 GHz 以上的电磁场，需要增加附加限制条件，即在 1cm^2 的身体表面积上的平均值限制在 72[0.025+0.975（t/360）0.5]的职业曝露和 14.4[0.025+0.975（t/360）0.5]的公众曝露。任何脉冲、脉冲组或序列中子脉冲的曝露，以及规定时间内的曝露总和（包括非脉冲电磁场）不得超过这些限值。

表 4.100 kHZ-10 MHz 电磁场曝露的基本限制，空间峰值.

曝露场景	频率范围	感应电场 E_{ind} (V m^{-1})
职业曝露	100 kHz - 10 MHz	2.70 x $10^{-4}f$
公众曝露	100 kHz - 10 MHz	1.35 x $10^{-4}f$

注：

1.f 是频率，单位为 Hz。

2.限值不限定于身体哪个部位，取 2 mm*2 mm*2 mm 相邻组织的均方根值。

（如 ICNIRP 2010 中规定）。

全身平均 SAR（100 kHz - 300 GHz）。如“身体核心温度”一节所述，基于全身曝露剂量 SAR = 4 W kg^{-1}（曝露时间间隔 30 分钟）可导致身体核心温度上升 1℃，本导则采用 4 W kg^{-1} 作为相对应的健康危害效应阈值。鉴于科学不确定性，不同人群热生理学的差异，环境和机体活动水平的差异，职业曝露阈值还要除以降低系数 10。同行为和环境类似，个体调节身体核心温度的能力在这其中起着非常重要的作用，取决于很多因素，本导则无法涵盖这些因素。包括中枢和外周介导引起的血液灌注和出汗率的差异（同时这些又受到一系列其他因素的影响，包括年龄和特定医疗状况）。

因此，在曝露时长>30 分钟情况下，职业曝露的基本限值全身平均 SAR 为 0.4 W kg^{-1}。短时间内 SAR 值可能会超过 0.4 W kg^{-1}，但这不会导致身体核心温度显著升高，因为在 30 分钟时间区间内，身体内的温度将“达到最终平衡”，该时均温升是适合于本场景的。此外，鉴于需要同时符合全身曝露和局部限值，高剂量的局部有害曝露将通过局部限值加以防护，具体描述如下。

由于普通公众无法意识到曝露风险，因而为了降低风险，在平均曝露时长 30 分钟以上，对普通公众采用健康危害阈值除以降低系数 50，得到公众曝露的全身平均 SAR 限值为 0.08 W kg^{-1}。

值得注意的是，虽然自 ICNIRP（1998）导则发布以来，剂量因素和涉及全身射频曝露的潜在健康后果有关的科学不确定性已大大降低，也证明了降低系数的使用可以不用过于保守，但 ICNIRP 认为，维持稳定的基本限值的益处大于对其进行细微改变所带来的益处，因此 ICNIRP 保留了与之前的全身平均基本限值降低系数。同样，在 6 GHz 频段以上，尽管随着频率的增加，温度升高更趋于浅表（因此，产生的热量更容易流失到周围环境中），全身平均 SAR 限值依然被保守地设定为与≤6 GHz 的频段相同。

(二)局部 SAR（100 kHz 至 6 GHz）

1.头部和躯干

如“局部温度”一节所述，在 100 kHz - 6 GHz 频段范围，在 10 g 立方质量和 6 分钟平均曝露时长情况下，导则采用 20 W kg^{-1} 的 SAR 作为头部和躯干的健康危害效应局部曝露阈值（1 型组织为 2℃和 2 型组织为 5℃）。考虑到科学上的不确定性，以及不同人群的热生理学差异、环境条件和机体活动水平的变化，职业曝露限值采用 2 的降低系数。局部曝露的降低系数小于全身曝露，是因为相关的健康危害阈值以及对环境条件和高度可变中枢介导的热调节过程的依赖性较小，在医学上对健康的影响不那么严重。因此，职业曝露的基本限值为 10 W kg^{-1} 的 SAR_{10g}，平均曝露时长 6 分钟。由于普通公众不可能意识到是否处在曝露环境中。同时考虑到人群生理上的差异，为了降低风险，对公众曝露采用了 10 的降低系数，将公众曝露基本限值 SAR_{10g} 降低到 2 W kg^{-1}，平均曝露时长 6 分钟。

2.四肢

如“局部温度”一节所述，在 100 kHz - 6 GHz 的频段范围，将能够导致四肢的局部温升 5℃，10 g 立方质量组织和 6 分钟平均曝露时长的 SAR 40 W kg^{-1} 作为局部曝露的健康危害阈值。与头部和躯干的限值一样，职业曝露限值采用 2 的降低系数，以应对科学上的不确定性，不同人群的热生理学差异、环境条件和机体活动水平的变化。因此，职业曝露的基本限值 SAR_{10g} 为 20 W kg^{-1}。由于普通公众不会意识到是否处于曝露环境中，同时考虑到人群生理上的差异，为了降低风险，对公众曝露采用了 10 的降低系数，公众曝露限值降低到 4 W kg^{-1}，平均曝露时长 6 分钟。

(三)局部 SA（400 MHz - 6 GHz）

如“快速温升”一节所述，在>400 MHz - 6GHz 的频段范围，需要额外的限制，以确保 6 分钟内允许的累积能量平均 SAR_{10g} 基本限值不会被组织过快吸收。因此，对于少于 6 分钟的曝露间隔，ICNIRP 设置了基于时间函数形式的 SA 水平，以便将温度上升限制在健康危害阈值以下。在平均每 10 g 立方质量上的 SA 水平，头部和躯干设为 $7.2[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$kJ kg^{-1}，四肢设为 $14.4[0.025+0.975(t/360)^{0.5}]$kJ kg^{-1}，其中 t 是以秒为单位的曝露时间。

与上述 10g 基础测量一样，在这些职业曝露水平上采用 2 的降低系数，以应对不同人群的热生理学差异、环境条件和机体活动水平的变化。因此，头部和躯干的基本限值为 $3.6[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$kJ kg^{-1}，四肢为 $7.2[0.025+0.975$（$(t/360)^{0.5}]$kJ kg^{-1}。对公众曝露限值采用了 10 的降低系数，头部和躯干部分为 $0.72[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$kJ kg^{-1}，四肢部分为 $1.44[0.025+0.975(t/360)^{0.5}]$kJ kg^{-1}。

需要注意的是，对于短暂曝露的基本限值，任何脉冲、脉冲组或者序列中子脉冲，以及所有曝露的总和（包括非脉冲电磁场），在 t 秒时间区间内，不得超过相应局部 SA 值。

(四)局部吸收功率密度（>6GHz - 300GHz）

如“局部温度”一节所述，在>6 - 300 GHz 范围内，本导则采用 200 W/ m^2 的吸收功率密度（平均曝露时长 6 分钟和体表面积 4 cm^2 测量值），作为与头部、躯干和四肢区域的局部曝露健康危害效应阈值。（1 型和 2 型组织的局部温升分别为 5℃和 2℃）。同上，职业曝露限值采用的降低系数 2，为 100 W/ m^2。

同上，公众曝露限值采用 10 的降低系数，为 20 W m^2。

此外，对于 ＞30 - 300GHz 的聚焦曝露，在每 1 cm^2 的体表面积吸收功率密度不得超过 4 cm^2 体表面积职业或公众曝露限值的 2 倍。

(五)局部吸收能量密度（>6GHz - 300GHz）

如“局部温度”一节所述，在>6 - 300 GHz 范围内，需要额外的限制，以确保 6 分钟平均吸收功率密度基本限值所允许的累积能量不会被组织过快吸收。因此，对于头部、躯干和四肢，ICNIRP 将曝露时间间隔小于 6 分钟的最大吸收能量密度水平设置为一个随时间变化的函数，使 1 型和 2 型组织的升温限制在不产生健康危害效应的范围内。这个吸收能量密度水平（4cm^2 的体表面积），由公式 $72[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$kJ cm^2 得出，其中 t 是曝露持续时间（秒）。为了解释从 ＞30 - 300GHz 的焦束曝露，在平均 1cm^2 体表面积上相对应不产生健康危害效应的阈值，由 $144[0.025+0.975(t/360)^{0.5}]$kJ cm^2 得出。请注意，对于短时曝露的基本限值，以 t 秒为单位，任何脉冲、脉冲群或连续脉冲群的曝露及其和量（包括非脉冲电磁场），必须满足该公式。

与吸收功率密度基本限制一样，该职业曝露限值降低系数为 2，在平均 4 cm^2 的体表面积上为 $36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$kJ cm^2。对于>30 – 300 GHz，在平均 1/cm^2 体表面积上，职业曝露的基本限值为 $72[0.025+0.975(t/360)^{0.5}]$kJ cm^2。同理，公众曝露限值采用 10 的降低系数，在任何 4cm^2 平均体表面积上，为 $7.2[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$kJ cm^2，对于>30 - 300 GHz，在任何 1 cm^2 平均锑、体表面积上，公众曝露的基本限值为 $14.4[0.025+0.975(t/360)^{0.5}]$kJ/ cm^2。

基本限制表。为符合基本限制要求，电磁场曝露不得超过表 2、3 或 4 中规定的电磁场频率限制。即对于任何给定的射频电磁场频率，必须同时满足相关的全身 SAR、局部 SAR、S_{ab}、SA、U_{ab} 和感应电场限值。

(六)参考水平

参考水平是通过计算和实际测量综合得出的，它提供一种比基本限值更容易评估，并且通过量化来证明合规性的方法。它能够在最坏的情况下提供等同于基本限值的防护水平。由于相关推导基于保守假设，因此在大多数曝露情况下，参考水平将比相应的基本限值更保守。更多详情见附录 A“参考水平的推导”一节。

参考水平 见表 5-表 9。图 1 和图 2 为延长曝露时间（≥6 分钟）的职业和公众曝露参考水平。表 5 参考水平的平均曝露时间为 30 分钟，与全身平均基本限值相对应。表 6（6 分钟的平均曝露时长）、表 7（包含> 0 和 ＜6 分钟的曝露时长）和表 8（峰值瞬时场强测量）分别对应较小身体局部区域平均的基本限值。为合理应对接地对近人体的共振频率的影响（Dimbylow 2001），设定额外肢体电流参考水平，以防在某些电磁频段，组织内曝露水平被低估（平均超过 6 分钟；表 9）。肢体电流参考水平仅与未被电绝缘的人的曝露场景相关。

表 5-表 9 规定了相关曝露量的平均和累计时间，用以确定个人曝露水平是否符合导则。该平均时间不必与估算场强或其他曝露指标所需测量时间相同。根据技术标准机构提供信

息，实际测量时间（用于提供适当的曝露量的估值）可能短于这些表中指定的间隔。

之所以应用参考水平的一个重要的原因是，参考水平（如 E_{inc}、、H_{inc}、、S_{inc}、、U_{inc}、、E_{eq}、、U_{eq}、、I）的量化程度能在最大限度上反应是否满足基本限值的要求。在参考水平与较大不确定性同时存在情况下，必须更保守地采用参考水平。就本导则而言，适用性很大程度上取决于外部电磁场是否可以被视为远场、辐射近场或反应近场。因此，大多数情况下，对是否属于远场、辐射或反应近场的电磁场设置了不同的参考水平评估规则。

这种方法的困难在于会受到其他因素的干扰。这其中包括电磁场的频率、源的物理尺寸以及外部电磁场的干扰，比如电磁场在人体占据的空间发生变化的程度。为了应对这种不确定性，导则对反应性和辐射性近场的曝露有比远场更为保守的规则。但远场区、辐射区和感应近场区并没有简单的划分，不能保证参考水平与基本限值充分对应。因此，尽管这些区域的定义在附录 A“参考水平的一般注意事项”一节中有规定，但本节仅作为导则以及技术标准机构所提供的信息用于指定每种电磁场源类型的外部曝露，改进参考水平评估流程以更充分地匹配基本限值。

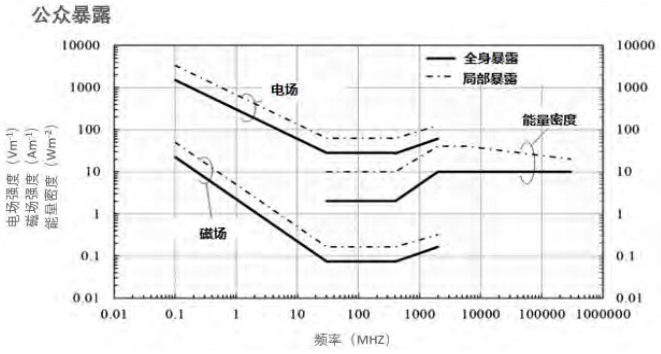

图 1. 100 kHz – 300 GHz 电磁场，平均曝露时间≥6 分钟的职业曝露参考水平（未受干扰情况下的均方根值；完整规范见表 5 和表 6）

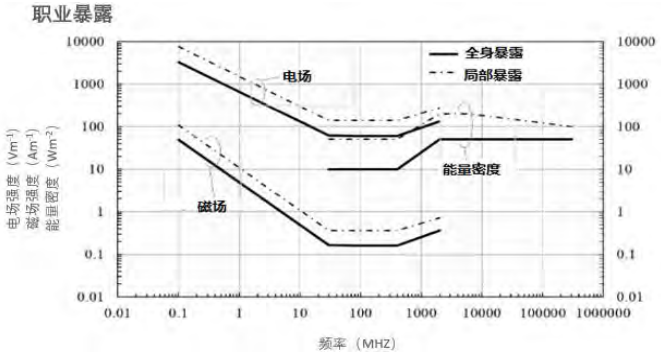

图 2. 在 100 kHz–300 GHz 的电磁场中，平均曝露时间≥6 分钟的公众曝露参考水平（未受干扰情况下的均方根值；完整规范见表 5 和表 6)

表 5.100 kHz - 300GHz 的电磁场的,平均曝露时长 30 分钟的全身曝露参考水平（未受干扰的均方根值）

曝露场景	频率范围	入射电场强度;E_{inc} (V m^{-1})	入射磁场强度; H_{inc} (A m^{-1})	入射功率密度; S_{inc} (W m^{-2})
职业曝露	0.1 – 30 MHz	$660/f_M^{0.7}$	$4.9/f_M$	NA
	>300 – 40 MHz	61	0.16	10
	>400 – 2000 MHz	$3f_M^{0.5}$	$0.008f_M^{0.5}$	$f_M/40$
	>2 – 300 GHz	NA	NA	50

公众曝露	0.1 – 30 MHz	$300/f_M^{0.7}$	$2.2/f_M$	NA
	>30 – 400 MHz	27.7	0.073	2
	>400 – 2000 MHz	$1.375f_M^{0.5}$	$0.0037f_M^{0.5}$	$f_M/200$
	>2 – 300 GHz	NA	NA	10

注：

1.“NA”表示“不适用”，在确定合规性时不需要考虑。

2.f_M：以兆赫为单位的频率。

3.S_{inc}、E_{inc} 和 H_{inc} 在整个身体空间的平均时间超过 30 分钟。每个 E_{inc} 和 H_{inc} 的时间和空间平均必须通过对相关平方值进行平均来进行（详见附录 A 中的方程 8）。

4.对于 100 kHz 至 30 MHz 的频率，无论远场/近场区域的区别如何，如果 E_{inc} 或 H_{inc} 均不超过上述参考电平值，则证明符合性。

5.对于大于 30 MHz 至 2 GHz 的频率：（a）在远场区内：如果 S_{inc}、E_{inc} 或 H_{inc} 不超过上述参考电平值（仅需要一个），则证明符合性；S_{eq} 可代替 S_{inc}；（b）在辐射近场区内，如果 S_{inc} 或 E_{inc} 和 H_{inc} 都不符合，则证明符合性超过上述参考水平；和（c）在感应近场区内：如果 E_{inc} 和 H_{inc} 均未超过上述参考水平，则证明符合性；S_{inc} 不能用于证明符合性，因此必须评估基本限制。

6.对于大于 2 GHz 至 300 GHz 的频率：（a）在远场区内：如果 S_{inc} 不超过上述参考电平值，则证明符合性；S_{eq} 可代替 S_{inc}；（b）在辐射近场区内，如果 S_{inc} 不超过上述参考电平值，则证明符合性；（c）在反应性近场区内，不能使用参考水平来确定合规性，因此必须评估基本限制。

表 6.100 kHz - 300 GHz 电磁场，平均曝露时间（在 6 分钟内）局部曝露的参考水平（均方根值）

曝露场景	频率范围	入射电场强度;E_{inc} (V m^{-1})	入射磁场强度; H_{inc} (A m^{-1})	入射功率强度; S_{inc} (W m^{-2})
职业曝露	0.1 – 30 MHz	$1504/f_M^{0.7}$	$10.8/f_M$	NA
	>30 – 400 MHz	139	0.36	50
	>400 – 2000 MHz	$10.58f_M^{0.43}$	$0.0274f_M^{0.43}$	$0.29f_M^{0.86}$
	>2 – 6 GHz	NA	NA	200
	>6 – <300 GHz	NA	NA	$275/f_G^{0.177}$
	300 GHz	NA	NA	100
公众曝露	0.1 – 30 MHz	$671/f_M^{0.7}$	$4.9/f_M$	NA
	>30 – 400 MHz	62	0.163	10
	>400 – 2000 MHz	$4.72f_M^{0.43}$	$0.0123f_M^{0.43}$	$0.058f_M^{0.86}$
	>2 – 6 GHz	NA	NA	40
	>6 – <300 GHz	NA	NA	$55/f_G^{0.177}$
	300 GHz	NA	NA	20

注：

1.“ NA”表示“不适用”，确定合规性时无需考虑。

2.f_M 是以 MHz 为单位的频率; f_G 是以 GHz 为单位的频率。

3.S_{inc}，E_{inc} 和 H_{inc} 应在 6 分钟内取平均值，并且在注释 6–7 中指定了在相关的全身身体空间上的空间平均。每个 E_{inc} 和 H_{inc} 的时间和空间平均必须通过对相关平方值求平均（有关详细信息，请参见附录 A 中的方程 8）。

4．对于 100 kHz 到 30 MHz 的频率，无论远场/近场区域的区别如何，如果在全身空间上的峰值空间 E_{inc} 或峰值空间 H_{inc} 均未超过上述参考水平，则表明符合标准价值观。

5．对于> 30 MHz 至 6 GHz 的频率：（a）在远场区内，如果预计全身空间上的峰值空间 S_{inc}，E_{inc} 或 H_{inc} 之一不超过上述参考，则表明符合要求级别值（只需要一个）； S_{eq} 可以代替 S_{inc}； （b）在辐射近场区内，如果在预计的整个人体空间上的峰值空间 S_{inc} 或峰值空间 E_{inc} 和 H_{inc} 均不超过上述参考水平，则表明符合要求； （c）在反应性近场区域内：如果 E_{inc} 和 H_{inc} 均不超过上述参考水平，则表明符合要求；S_{inc} 不能用于证明合规性；对于> 2 GHz 的频率，参考电平不能用于确定符合性，因此必须评估基本限制。

6．对于> 6 GHz 至 300 GHz 的频率：（a）在远场区内，如果 S_{inc} 在 4 平方厘米的投影人体表面空间上求平均值，但未超过上述参考水平，则表明符合要求； S_{eq} 可以代替 S_{inc}； （b）在辐射近场区域内，如果 S_{inc} 在 4 平方厘米的投影人体表面积上求平均值，则不超过上述参考水平，则表明符合规定； （c）在反应性近场区域内的参考水平不能用于确定符合性，因此必须评估基本限制。

7．对于> 30 GHz 至 300 GHz 的频率，在 1cm^2 的方形投影身体表面空间上平均曝露不得超过 4cm^2 方形限制的两倍。

考虑到近场和远场的差异，在某些曝露条件下，可以分别使用简化的平面波等效入射功率密度（S_{eq}）和平面波等效入射能量密度（U_{eq}）来分别代替 S_{inc} 和 U_{inc}，具体规定见下文。在这种情况下，平面波等效入射能量密度的平均值计算方法与表 5-表 7 中所述相应入射功率密度的计算方法相同。

远场区的电磁场适用以下规则。对于频率>30 MHz – 2 GHz 的电磁场，ICNIRP 要求仅对其中一个 E-场、H-场或 S_{inc} 量进行符合性证明，以便与特定参考水平相符合。此外，S_{eq} 可以代替 S_{inc}。类似地，对频段>400 MHz 的电磁场，限值规定中的 U_{inc} 可被 U_{eq} 替换。频率从 100 kHz - 30 MHz 的电磁场被视为在近场区内，详见下一段。

近场区的电磁场适用以下规则。由于目前在 100 kHz – 30 MHz 频段射频电磁场源的相关个体曝露通常在近场区内，本导则将此频率范围内的所有曝露视为近场，并要求同时符合 E 场和 H 场参考水平，以便符合参考水平要求。对于>30 MHz - 2 GHz 频段范围内电磁场，如果 E 场和 H 场强度均低于表中所述的参考水平，则辐射或感应近场区域内的个人曝露被视为符合要求。对于频段范围>30 MHz – 300 GHz 的电磁场，如果 S_{inc}（或相关的 U_{inc}）低于参考水平，在辐射近场区内的个人曝露被视为符合要求。然而，对于>2-300 GHz 频率范围内的电磁场，在反应近场范围内，相应的参考水平被认为不足以确保曝露符合基本限值规定，这时必须满足基本限值要求。

ICNIRP 注意到，对于某些曝露场景，下面的射频电磁场参考水平可能会超出基本限值。一旦找到了这些场景，ICNIRP 根据由此产生的组织曝露和相应的基本限值之间的差异程度（包括与相关剂量学不确定度的比较）来确定是否需要降低参考水平，以及超出限值（包括相关基本限值的保守水平）后是否可能会对健康产生不利影响。当差异很小且不会对健康造成不利影响时，则保留该参考水平，虽然该参考水平可能会导致曝露超过基本限值。

全身平均 SAR 参考水平和相对应的基本限值也存在这种情况，在体共振频率范围（最高至 100 MHz）以及 1 - 4 GHz 范围内电磁场曝露，可导致全身平均 SAR 的多个度量超过基本限值（ICNIRP 2009）。但发生这种情况的曝露场景是非常特殊的，要求身材矮小（如 3 岁的儿童）静止直立且上肢高过头顶曝露时长至少 30 分钟，同时受到上述频率范围内的平面波照射，如从前往后照射儿童。此时推算出来的 SAR 上升小于基本限值（15 - 40%），可能小于或者能与全身平均 SAR 测量的不确定性（Flintoft 等.2014；Nagaoka and Watanabe 2019）相似。基本限值推导中之所以存在多层级的保守考虑，其目的是保证设定的限值足以让健康不会受到影响。这一点很重要，如基本限值是为了防止人体核心温度升高超过

1℃，但在这种曝露条件下，身材体型较小个体的“表面积/质量比”会增加，相较于体型大的人更容易将热量散发到环境中（Hirata 等.2013）。因此，在身材较小的人中，即使受到更高全身平均 SAR 曝露，但由于散热加快，其核心温度升温依然比身材较大接受未超过基本限值曝露的人的温升要小，并且在这两种情况下，温升都将大大小于 1℃。即便如此，ICNIRP 并未修改参考水平来应对这种情况。

表 7.100 kHz-300 GHz 的电磁场局部曝露（>0 - <6 分钟的曝露时长）的参考水平（未受干扰情况下的均方根值）

曝露场景	频率范围	入射能量强度; U_{inc} (kJ m^{-2})
职业曝露	100 kHz – 400 MHz	NA
	>400 – 2000 MHz	$0.29f_M^{0.86}$ x $0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
	>2 – 6 GHz	200 x $0.36[0.05+0.95((t/360)^{0.5}]$
	>6 – <300 GHz	$275/f_G^{0.177}$ x $0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
	300 GHz	100 x $0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
公众曝露	100 kHz – 400 MHz	NA
	>400 – 2000 MHZ	$0.058f_M^{0.86}$ x $0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}$
	>2 – 6 GHz	40 x $0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}$
	>6 – <300 GHz	$55/f_G^{0.177}$ x $0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}$
	300 GHz	20 x $0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}$

表 8.100 kHz-10 MHz 电磁场局部曝露的峰值参考水平（均方根值）

曝露场景	频率范围	入射电场强度 E_{inc} (V m^{-1})	入射磁场强度 H_{inc} (Am^{-1})
职业曝露	100 kHz – 10 MHz	170	80
公众曝露	100 kHz – 10 MHz	83	21

注：

1.无论远场/近场区域的区别如何，如果在整个人体空间上的预测峰值空间 E_{inc} 或峰值空间 H_{inc} 均未超过上述参考水平，则表明符合标准。

表 9.100 kHz - 110 MHz 电磁场在任何肢体中 6 分钟内平均感应电流的参考水平

曝露场景	频率范围	电流 I (mA）
职业曝露	100 kHz – 110 MHz	100
公众曝露	100 kHz – 110 MHz	45

注：

1.电流强度值必须通过对相关平方值求平均值来确定（有关详细信息，请参见附录 A 中的公式 8）。

2.必须分别评估每个肢体的肢体电流强度。

3.没有提供其他频率范围肢体感应电流参考水平。

4.仅当人体与接地层且未电气隔离的情况下才适用肢体感应电流参考限水平。

1.多个频率场的同时曝露

存在多个频率场同时曝露时，首先要确定不同频率场是否有叠加效应。叠加效应可以分别通过热刺激和电刺激效应来检查并考虑这种情况下与限值的符合程度。以下公式适用于实际曝露情况下的相关频率电磁场水平的推算。由于以下参考限值求和公式的假定是基于多源场产生叠加效应最极端的情况，这会导致实际曝露情况下曝露水平可能低于公式推算出的参考水平。

以下几点需要注意。在采用参考水平时，应评估与相应参考水平相关的 E-场强度、H-场强度和功率密度的最大比率，证明是否符合限值要求。参考水平是根据外部物理量而定并且存在一定的过渡范围，取决于特定的频率。例如，场强通常应用于频率低于 30 MHz 的电磁场曝露，而在 30 MHz - 2 GHz 频段范围，场强和入射功率密度都适用。当频率组成包括这些过渡范围时，可利用相加性原则应对。同样的原则也适用于基本限值。在计算中使用的场值必须使用与基本限值和参考水平表中相应的且在相同空间和时间在导出的数值。基本限值和参考水平的叠加共识分别在下面列出。在实际中，可以将基本限值和参考水平相结合。例如，在 6 GHz 以上的频率分量，方程（2）中的第二项可以被方程（4）中的第四项替换。若要符合导则，则方程（1）到（7）的总和值必须小于 1。

曝露时长>=6 分钟的基本限值。实际应用中全身平均基本限值 SAR 应用公式：

$$\sum_{i=100\mathrm{kHz}}^{300\mathrm{GHz}} \frac{\mathrm{SAR}_i}{\mathrm{SAR}_{\mathrm{BR}}} \leq 1$$

(1)

其中，SAR_i 和 $\mathrm{SAR}_{\mathrm{BR}}$ 分别是表 2 中给出的，在频率 i 处的全身平均 SAR 水平和全身平均 SAR 水平的基本限值。

实际应用中局部 SAR 和局部吸收功率密度基本限值计算公式：

$$\sum_{i=100\mathrm{kHz}}^{6\mathrm{GHz}} \frac{\mathrm{SAR}_i}{\mathrm{SAR}_{\mathrm{BR}}} + \sum_{i>6\mathrm{GHz}}^{30\mathrm{GHz}} \frac{S_{\mathrm{ab},4\mathrm{cm},i}}{S_{\mathrm{ab},4\mathrm{cm},\mathrm{BR}}} + \sum_{i>30\mathrm{GHz}}^{300\mathrm{GHz}} \mathrm{MAX}\{(\frac{S_{\mathrm{ab},4\mathrm{cm},i}}{S_{\mathrm{ab},4\mathrm{cm},\mathrm{BR}}}),(\frac{S_{\mathrm{ab},1\mathrm{cm},i}}{S_{\mathrm{ab},1\mathrm{cm},\mathrm{BR}}})\} \leq 1$$

(2)

其中，SAR_i 和 $\mathrm{SAR}_{\mathrm{BR}}$ 分别是表 2 中给出的，在频率 i 时的局部 SAR 和局部 SAR 基本限值；$S_{\mathrm{ab、4cm、i}}$ 和 $S_{\mathrm{ab、4cm、BR}}$ 分别是表 2 中给出的在频率 i 时，每 4 cm^2 的吸收功率密度以及每 4cm^2 的吸收功率密度基本限值；$S_{\mathrm{ab、1cm、i}}$ 和 $S_{\mathrm{ab、1cm, BR}}$ 是分别在表 2 中给出的，在频率 i 时，每 1 cm^2 的吸收功率密度以及每 1 cm^2 的吸收功率密度基本限值；在体内，S_{ab} 项被视为零；当评估体表上的 SAR 和 S_{ab} 的加和时，SAR 平均空间的中心被定义为 x，y，z，使 x，y 平面平行于体表（z=0）和 z=-1.08 cm（大约是 10 g 立方体长度的一半），S_{ab} 平均区域的中心被定义为 x，y，0；方程（2）必须满足人体的每个部位。

曝露时长>= 6 分钟的参考水平。在实际应用时，全身平均参考水平、入射电场强度、入射磁场强度和入射功率密度值应用公式:

$$\sum_{i=100\mathrm{kHz}}^{30\mathrm{MHz}} \{(\frac{\mathrm{E}_{\mathrm{inc},i}}{\mathrm{E}_{\mathrm{inc,RL},i}})^2 + (\frac{\mathrm{H}_{\mathrm{inc},i}}{\mathrm{H}_{\mathrm{inc,RL},i}})^2\} + \sum_{i>2\mathrm{GHz}}^{300\mathrm{GHz}} (\frac{S_{\mathrm{inc},i}}{S_{\mathrm{inc,RL}}}) \leq 1$$

(3)

其中，$\mathrm{E}_{\mathrm{inc,\ i}}$ 和 $\mathrm{E}_{\mathrm{inc,\ RL,\ i}}$ 分别是表 5 中给出的频率 i 时的全身平均入射电场强度和全身平均入射电场强度参考水平；$\mathrm{H}_{\mathrm{inc,\ i}}$ 和 $\mathrm{H}_{\mathrm{inc,\ RL,\ i}}$ 分别为表 5 在频率 i 时给出的全身平均入射磁场强度和全身平均入射磁场强度参考水平；$S_{\mathrm{inc,\ i}}$ 和 $S_{\mathrm{inc,\ RL,\ i}}$ 分别为表 5 在频率 i 下给出的全身平均入射功率密度和全身平均入射功率密度参考水平。注意，第二项不适用于感应

近场区，因此不能用于方程（3）。

实际应用中局部参考水平、入射电场强度、入射磁场强度和入射功率密度值的应用公式:

$$\sum_{i=100\mathrm{kHz}}^{30\mathrm{MHz}} \mathrm{MAX}\{(\frac{E_{inc,i}}{E_{inc,RL,i}})^2,(\frac{H_{inc,i}}{H_{inc,RL,i}})^2\}+\sum_{i>30\mathrm{MHz}}^{2\mathrm{GHz}} \mathrm{MAX}\{(\frac{E_{inc,i}}{E_{inc,RL,i}})^2,(\frac{H_{inc,i}}{H_{inc,RL,i}})^2,(\frac{S_{inc,i}}{S_{inc,RL,i}})\}$$

$$+\sum_{i>2\mathrm{GHz}}^{6\mathrm{GHz}}(\frac{S_{inc,i}}{S_{inc,RL,i}})+\sum_{i>6\mathrm{GHz}}^{30\mathrm{GHz}}(\frac{S_{inc,4cm,i}}{S_{inc,4cm,RL,i}})+\sum_{i>30\mathrm{GHz}}^{300\mathrm{GHz}} \mathrm{MAX}\{(\frac{S_{inc,4cm,i}}{S_{inc,4cm,RL,i}}),(\frac{S_{inc,1cm,i}}{S_{inc,1cm,RL,i}})\}\leq 1$$

(4)

其中，$E_{inc,i}$ 和 $E_{inc,RL,i}$ 分别是表 6 给出的，在频率 i 时，局部入射场强和局部入射场强参考水平；$H_{inc,\ i}$ 和 $H_{inc,\ RL,\ i}$ 是表 6 给出的，在频率 i 时，局部入射场强和局部入射场强参考水平，分别为：$S_{inc,\ i}$ 和 $S_{inc,\ RL,\ i}$ 分别为表 6 给出的，在频率 i 时，局部入射功率密度和局部入射功率密度参考水平；6 GHz 以上的人体内部，S_{inc} 项应视为零；人体内的每个位置都必须满足方程（4）。

实际应用中肢体电流参考水平应用公式:

$$\sum_{i=100\mathrm{kHz}}^{110\mathrm{MHz}} (\frac{I_i}{I_{RL}})^2 \leq 1$$

(5)

其中 I_i 是频率 i 时的肢体电流分量；I_{RL} 是表 9 中肢体电流参考水平。在 110 MHz 以上频段，如果肢体周围的局部 SAR 不可忽略，则需要结合方程（2）或（4）中的对应项来考虑。

时间间隔<6 分钟的基本限值。时间间隔（t）<6 分钟的局部基本限值的实际应用，

SAR、SA 和吸收能量密度取值应用公式：

$$\sum_{i=100\mathrm{kHz}}^{400\mathrm{MHz}} \int_t \frac{SAR_i(t)}{360\times SAR_{BR}}dt+\sum_{i>400\mathrm{MHz}}^{6\mathrm{GHz}} \frac{SA_i(t)}{SA_{BR}(t)}+\sum_{i>6\mathrm{GHz}}^{30\mathrm{GHz}} \frac{U_{ab,4cm,i}(t)}{U_{ab,4cm,BR}(t)}$$

$$+\sum_{i>30\mathrm{GHz}}^{300\mathrm{GHz}} \mathrm{MAX}\{(\frac{U_{ab,4cm,i}(t)}{U_{ab,4cm,BR}(t)}),(\frac{U_{ab,1cm,i}(t)}{U_{ab,1cm,BR}(t)})\}\leq 1$$

(6)

其中，SAR_i（t）和 SAR_{BR}（t）分别为 t 时刻，频率 i 处的局部 SAR 水平和表 2 中的局部 SAR 基本限值；SA_i（t）和 SAR_{BR}（t）分别为 t 时刻，频率 i 处的局部 SAR 水平和表 3 中的局部 SAR 基本限值；$U_{ab,\ 4cm,\ i}$（t）和 $U_{ab,\ 4cm,\ BR}$（t）分别为为 t 时刻的，频率 i 时，4 cm^2 面积的吸收功率密度水平，以及在表 3 中给出的 4cm^2 吸收功率密度基本限值；$U_{ab,1cm,i}$（t）和 $U_{ab,1cm,BR}$（t）分别为 t 时刻,频率 i 时,1cm^2 面积吸收功率密度水平，以及在表 3 中给出的 1cm^2 吸收功率密度基本限值；在体内，U_{ab} 项一般被视为零；在评估体表的 SAR 和/或 SA 以及 U_{ab} 积和效应时，SAR 和/或 SA 平均空间的中心被定义为 x，y，z，使 x，y 平面平行于体表（z=0）和 z=-1.08 cm（大约是 10-g 立方体长度的一半），U_{ab} 平均区域的中心被定义为 x，y，0；方程（6）必须满足人体中的每个位置；对于短时间和长时间的同时曝露，SAR、SA 和 U_{ab} 都必须参照此方程。

曝露时长<6 分钟的参考水平。时间间隔（t）<6min 的局部参考水平的实际应用，入射电场强度、入射磁场强度、入射功率密度和入射能量密度取值，应用公式：

$$\sum_{i>100\mathrm{kHz}}^{30\mathrm{MHz}} \mathrm{MAX}\{(\int_t \frac{E_{inc,i}^2(t)}{360^* E_{inc,RL,i}^2} dt), (\int_t \frac{H_{inc,j}^2(t)}{360^* H_{inc,RL,i}^2} dt)\}$$

$$+\sum_{i>30\mathrm{MHz}}^{400\mathrm{MHz}} \mathrm{MAX}\{(\int_t \frac{E_{inc,i}^2(t)}{360^* E_{inc,RL,i}^2} dt), (\int_t \frac{H_{inc,j}^2(t)}{360^* H_{inc,R,i}^2} dt), (\int_t \frac{S_{inc,i}(t)}{360^* S_{inc,RL,i}} dt)\} + \sum_{i>400\mathrm{MHz}}^{6} \frac{U_{inc,i}(t)}{U_{inc,RL,i}(t)}$$

$$+\sum_{i=6\mathrm{GHz}}^{30\mathrm{GHz}} \frac{U_{inc,4cm,i}(t)}{U_{inc,4am,RL,i}(t)} + \sum_{i>30\mathrm{GHz}}^{300\mathrm{GHz}} \mathrm{MAX}\{(\frac{U_{inc,4cm,i}(t)}{U_{nc,4cm,RL,j}(t)}), (\frac{U_{inc,1cm,i}(t)}{U_{in,Icm,RL,i}(t)})\} \leq 1$$

(7)

其中，$E_{inc,i}$（t）和 $E_{inc,RL,i}$ 分别是在给出的频率 i 处，t 时刻，局部 E_{inc} 参考水平和表 6 中给出的局部 E_{inc} 参考水平；$H_{inc,i}$（t）和 $H_{inc,RL,i}$ 分别是在给出的频率 i 处，t 时刻，局部 H_{inc} 参考水平和表 6 中给出的局部 H_{inc} 参考水平；$S_{inc,\ i}$（t）和 $S_{inc,RL,i}$ 分别为在给出的频率 i 处，t 时刻，局部 S_{inc} 参考水平和表 6 中给出的局部 S_{inc} 参考水平；$U_{inc,i}$（t）和 $U_{inc,RL}$（t）分别是表 7 中给出的频率 i 处随时间 t 的入射能量密度水平和入射能量密度参考水平；$U_{inc,4cm,i}$（t）和 $U_{inc,4cm,RL}$（t）分别是表 7 中给出的频率 i 时为 t 时刻的 4cm^2 入射能量密度水平和 4cm^2 入射能量密度参考水平；$U_{inc,1cm,i}$（t）和 $U_{inc,1cm,RL}$（t）分别是表 7 中给出的频率 i 处，t 时刻，1cm^2 面积，入射能量密度水平和 1cm^2 面积，入射能量密度参考水平；在体内，U_{inc} 项一般被视为零；公式（7）必须满足于人体的每个位置。

2.接触电流导则

在大约 100 kHz-110 MHz 的频段范围，当人接触到一个在电场或磁场中的导体时，就会在物体和人之间产生电流。高电流可导致神经刺激或疼痛（以及潜在的组织损伤），这取决于电磁场的频率（Kavet 等.2014；Tell and Tell 2018.）。一个特别值得关注的问题是，对于大型射频发射器而言，例如在 30 MHz 以下和 87.5-108 MHz 频率范围，广播用途的高功率天线附近，曾有零星伤害和烧伤相关事故的报告。接触电流发生在接触区，较小的接触区会产生较大的生物效应（给定相同的电流），这是由于电流密度（Am^{-2}）较大，导致体内的局部 SAR 较高。

由于接触电流引起的曝露是间接的，在这种情况下，它需要一个中间导电体来转换电场。由于行为因素（例如，抓握与接触）和环境条件（例如，导电物体的配置）使得接触电流曝露不可预测，使得 ICNIRP 对其防护能力降低。

另外，尤为重要的是，电流密度不均匀地传递且被人吸收，这不仅与曝露面积相关，还与电流通过组织的导电性、密度和热容，最重要的是导电物体和接触组织之间的阻抗相关（Tell and Tell 2018）。

因此，导则没有规定对接触电流的限制，而是提供相关的“引导”信息，帮助那些负责高功率射频场传输的工作人员了解接触电流、潜在危险以及如何减轻此类危险的方法。出于规范的目的，ICNIRP 在此定义了高功率射频电磁场，即在其发射源 100 kHz-100 MHz 的频率范围，发射场强大于 100 Vm^{-1} 的电磁场。

目前对接触电流与健康关系的研究还很有限。在疼痛伤害方面，最低接触电流水平对人体健康的影响，主要数据来源于 Chatterjee 等.（1986）。在这项涉及一个大量成人群体的研究中，感觉和疼痛被作为接触电流频率和接触类型（抓握和接触）的函数进行评估。相反的，有报告记录显示，热疼痛感会发生在 100 kHz-10 MHz 范围内，平均（接触）感应电流阈值为 46 mA，出现疼痛感需要至少 10 秒的曝露时间。在该范围内阈值与频率无关，抓握接触的阈值明显高于触摸接触的阈值。

然而，给定阈值是参与者的平均值，同时考虑了给定阈值的标准偏差。ICNIRP 认为人群队列的最低阈值大约为 20 mA。此外，根据数据建模显示，儿童的阈值会更低；根据 Chatterjee 等.（1986）和 Chan 等的推断.（2013 年），儿童的最低阈值预计在 10 mA 范围内。引起伤害的接触电流的频率上限也是未知的。虽然 ICNIRP（1998）导则规定了 100 kHz-110 MHz 的接触电流参考水平，Chatterjee 等.（1986）最高只测试了至 10MHz，而 Tell 和 Tell（2018）描述了从约 1 MHz-28 MHz 频段范围内，接触电流灵敏度大大降低的情况（无更高频率相关评估结果）。因此，尚不清楚在整个 100 kHz-110 MHz 范围内，接触电流是否仍会对健康造成危害。

由于存在潜在的接触电流场景，在确定可能或自然的风险时，ICNIRP 认为在 100 kHz-110 MHz 频率范围，上述信息对于有关负责人管理接触电流相关风险非常重要。这也有助于进行风险效益分析，因为允许人进入射频电磁场环境，可能导致接触电流。上述信息表明，通过培训工人避免接触导电物体，可将接触电流危害的风险降至最低，但在涉及到接触的情况，考虑以下因素很重要。大型金属物体应接地（接地）；工人应通过绝缘材料（例如，射频保护手套）进行接触；工人应具备危险意识，包括防范“意外”发生的可能性。这些危险可能以电流对组织直接影响以外的方式影响安全（例如，造成事故）。应使工人具备风险意识，包括对“意外”发生可能性的警觉，除了电流对组织的直接影响外，还可能以其他方式影响安全。

3.职业曝露的风险缓解注意事项

为了证明职业水平的射频电磁场曝露是合理的，需要提供一个合适的健康和安全计划。作为该计划的一部分，人们需要了解射频电磁场曝露的潜在影响，包括分析曝露产生的生物效应是否会增加与射频电磁场无关的其它生物效应。比如说，由于与电磁场无关的因素（如剧烈活动）而导致身体核心温度升高，则需要将射频电磁场引起的温度升高与其他热源一起考虑。同样，考虑是否存在影响人体温调节能力的疾病或状况，或者是否存在散热的环境障碍，这些也是很重要的。

全身 SAR 限值所保护的相关健康影响是心血管负荷增加（心血管系统本身的作用是严格限制身体核心温度上升），当温度上升不受安全水平限制，则可能对组织（包括大脑、心脏和肾脏）造成可逆和不可逆影响等连锁功能变化。这些影响通常要求身体核心温度高于 40℃（或比正常温度增加约 3℃）。因此，使用了大的降低系数，使得射频引起的温升很难超过 1℃（在常温条件下，职业限值是指，导致身体核心温度升高<0.1℃），但当其他因素可能影响到身体核心温度时，必须小心分析。这些其他原因包括高环境温度、高体力活动和温度调节（如利用隔热服或某些医疗条件等）。如果有其它产生大量热量的原因，建议从业人员用适当的方法来验证他们的身体核心温度（更多指导建议，见 ACGIH 2017）。

局部基本限值所保护的相关健康影响是疼痛和热介导的组织损伤。在 1 型组织内，如皮肤和四肢，造成疼痛（由于伤害感受器的刺激）和组织损伤（由于蛋白质的变性）通常需要达到 41℃左右的温度。四肢的职业曝露不太可能造成局部温度升高超过 2.5℃以上，已知的肢体温度通常低于 31-36℃，肢体组织的射频电磁场曝露本身不太可能导致疼痛或组织损伤。在 2 型组织内，如头部和躯干（不包括表浅组织）区域内，在温度 41℃以下不太可能发生损伤。头部和躯干作为职业性损伤曝露的组织不太可能造成温度升高 1℃，并且考虑到身体核心温度通常在 37-38℃左右，射频电磁场曝露不太可能导致足以损害 2 型组织或组织功能的温度升高。

然而，当工人受到其它可能增加射频电磁场曝露的热源影响时，例如上述与身体核心温度有关的热源等，必须格外小心。对于表面曝露场景，局部热不适和疼痛，可能是潜在的组织热损伤的重要指标。因此，重要的是，特别在存在其它热应力影响的情况下，工人应了解射频电磁场曝露会对其热负荷产生的影响，并能够采取适当减轻潜在危害的措施。

参考文献

1.American Conference of Governmental Industrial Hygienists.TLVs and BEIs: based on the documentation of the thresholdlimit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH: ACGIH; 2017.

2.Arens E, Zhang H. Skin's role in human thermoregulation and comfort.In: Pann N, Gibson P, eds. Thermal and moisture transport in fibrous materials. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd; 2006: 560–602.

3.Aschoff J, Wever R. Kern und Schale im Wärmehaushalt des Menschen. Naturwissenschaften 20:477–487; 1958 (in German).

4.Brockow T, Wagner A, Franke A, Offenbacher M, Resch KL. A randomized controlled trial on the effectiveness of mild waterfiltered near infrared whole-body hyperthermia as an adjunct to a standard multimodal rehabilitation in the treatment of fibromyalgia.Clinical J Pain 23:67–75; 2007.

5.Chan KH, Hattori J, Laakso I, Hirata A, Taki M. Computational dosimetry for grounded and ungrounded human models due to contact current. Phys Med Biol 58:5153–5172; 2013.

6.Chatterjee I,Wu D, Gandhi OP. Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazards analysis in the VLF-MF band. IEEE Trans Biomed Engineer 33:486–494; 1986.

7.Cheshire WP Jr. Thermoregulatory disorders and illness related to heat and cold stress. Autonomic Neurosci: Basic and Clinical 196:91–104; 2016.

8.Defrin R, Shachal-Shiffer M, Hadgadg M, Peretz C. Quantitative somatosensory testing of warm and heat-pain thresholds: the effect of body region and testing method. Clinical J Pain 22:130–136; 2006.

9.DewhirstMW, Viglianti BL, Lora-Michiels M, Hanson M, Hopes PJ. Basic principles of thermal dosimetry and thermal thresholds for tissue damage from hyperthermia. Internat J Hyperthermia 19:267–294; 2003.

10.Dimbylow P. The relationship between localised SAR in the arm and wrist current. Radiat Protect Dosim 95:177–179; 2001.

11.DuBois EF. The temperature of the human body in health and disease.In: Temperature: its measurement and control in science and industry. New York: American Institute of Physics, Reinhold Publishing Corporation; 1941: 24–40.

12.Edwards MJ, Saunders RD, Shiota K. Effects of heat on embryos and fetuses. Internat J Hyperthermia 19:295–324; 2003.

13.Flintoft M, Robinson MP, Melia GCR, Marvin AC, Dawson JF.Average absorption cross-section of the human body measured at 1–12 GHz in a reverberant chamber: results of a human volunteer study. Phys Med Biol 59:3297–3317; 2014.

14.Foster KR, ZiskinMC, Balzano Q. Thermal modeling for the next generation of radiofrequency exposure limits: commentary. Health Phys 113:41–53; 2017.

15.Foster KR, ZiskinMC, Balzano Q. Thermal response of human skin to microwave energy: a

critical review. Health Phys 111:528–541; 2016.

16.Funahashi D, Hirata A, Kodera S, Foster KR. Area-averaged transmitted power density at skin surface as metric to estimate surface emperature elevation. IEEE Access 6:77665–77674; 2018.

17.Hashimoto Y, Hirata A,Morimoto R, Aonuma S, Laakso I, Jokela K, Foster KR. On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz. Phys Med Biol 62:3124–3138; 2017.

18.Hirata A, Fujiwara O. The correlation between mass-averaged SAR and temperature elevation in the human head model exposed to RF near-fields from 1 to 6GHz. PhysMed Biol 54:7171–7182; 2009.

19.Hirata A, Laakso I, Oizumi T, Hanatani R, Chan KH,Wiart J. The relationship between specific absorption rate and temperature elevation in anatomically based human body models for plane wave exposure from 30 MHz to 6 GHz. Phys Med Biol 58:903–921; 2013.

20.International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys 74:494–522; 1998.

21.International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.ICNIRP Statement on the "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)". Health Phys 97:257–58; 2009.

22.International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Phys 99:818–836; 2010.

23.IEC. Medical electrical equipment—part 1–2: general requirements for basic safety and essential performance—collateral standard: electromagnetic disturbances—requirements and tests. Geneva: IEC; 60601-1-2:2014; 2014.

24.ISO. Active implantable medical devices—electromagnetic compatibility—EMC test protocols for implantable cardiac pacemakers, implantable cardioverter defibrillators and cardiac resynchronization devices. Geneva: ISO; 14117:2012; 2012.

25.Joshi RP, Schoenbach KH. Bioelectric effects of intense ultrashort pulses. Critical Rev Biomed Engineer 38:255–304; 2010.

26.Juutilainen J, Höytö, Kumlin T, Naarala J. Review of possible modulation-dependent biological effects of radiofrequency fields, Bioelectromagnetics 32(7):511–34; 2011.

27.Kavet R, Tell RA, Olsen RG. Radiofrequency contact currents: sensory responses and dosimetry. Radiat Protect Dosim 162:268–279; 2014.

28.Kodera S, Hirata A, Funahashi D,Watanabe S, Jokela K, Croft RJ. Temperature rise for brief radio-frequency exposure below6GHz. IEEE Access 6:65737–65746; 2018.

29.Kowalczuk C, Yarwood G, Blackwell R, Priestner M, Sienkiewicz Z, Bouffler S, Ahmed I, Abd-Alhameed R, Excell P, Hodzic V, Davis C, Gammon R, Balzano Q. Absence of nonlinear responses in cells and tissues exposed to RFenergy at mobile phone frequencies using a doubly resonant cavity.Bioelectromagnetics 31(7):556–565; 2010.

30.Laakso I, Morimoto R, Heinonen J, Jokela K, Hirata A. Human exposure to pulsed fields in the frequency range from 6 to 100 GHz. Phys Med Biol 62:6980–6992; 2017.

31.Mir LM. Application of electroporation gene therapy: past, current,and future. Meth Molecular Biol 423:3–17; 2008.

32.Mieusset R, Bujan L. Review: testicular heating and its possible contributionsto male infertility. Internat J Androl 18:169–184; 1995.

33.Morimoto R, Hirata A, Laakso I, Ziskin M, Foster R. Time constants for elevation in humanmodels exposed to dipole antenna and beams in the frequency range from1 to 30 GHz. Phys Med Biol 62:1676–1699; 2017.

34.Nagaoka T, Watanabe S. Development of voxel models adjusted to ICRP reference children and their whole-body averaged SARs for whole-body exposure to electromagnetic fields from 10 MHz to 6 GHz. IEEE Access, in press.

35.Nguyen THP, Shamis Y, Croft RJ, Wood A, McIntosh RL,Crawford RJ, Ivanova EP. 18 GHz electromagnetic field induces permeability of Gram-positive cocci. Nature: Scientific Reports 16:10980; 2015.

36.Ramsey JD, Buford C, Beshir M, Jensen RC. Effects of workplace thermal conditions on safe work behavior. J Safety Res14:105–114; 1983.

37.Reilly T, Atkinson G, Edwards B, Waterhouse J, Farrelly K, Fairhurst E. Diurnal variation in temperature, mental and physical performance, and tasks specifically related to football (soccer).Chronobiol Internat 24:507–519; 2007.

38.Sasaki K, Mizuno M,Wake K,Watanabe S. Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz. Phys Med Biol 62:6993–7010; 2017.

39.Saunders RD, Jefferys JG. A neurobiological basis for ELF guidelines.Health Phys 92:596–603; 2007.

40.Scientific Committee on Emerging and Newly IdentifiedHealth Risks.Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). Luxembourg: European Commission; 2015.

41.ShafahiM, Vafai K. Human eye response to thermal disturbances.J Heat Transfer 133:011009–011009-7; 2011.

42.SSM. Recent research on EMF and health risk. Tenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Stockholm:Strålsäkerhetsmyndigheten; SSM Report 19; 2015.

43.SSM. Recent research on EMF and health risk. Eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten; SSM Report 15; 2016.

44.SSM. Recent research on EMF and health risk. Twelfth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten; SSM Report 09; 2018.

45.Tell RA, Tell CA. Perspectives on setting limits for RF contact currents:a commentary. Biomed Engineer Online 17:2; 2018.

46.Teunissen LP, Grabowski A, Kram R. Effects of independently altering body weight and body

mass on the metabolic cost of running. J Experimental Biol 210:4418–4427; 2007.

47.United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz). Geneva: World Health Organization; Environmental Health Criteria 137; 1993.

48.Van den Heuvel AMJ, Haberley BJ, Hoyle DJR, Taylor NAS, Croft RJ. The independent influences of heat strain and dehydration upon cognition. Euro J Appl Physiol 117:1025–1037; 2017.

49.Van Rhoon GC, Samaras T, Yarmolenko PS, Dewhirst MW, Neufeld E, Kuster N. CEM43°C thermal dose thresholds: a potential guide for magnetic resonance radiofrequency exposure levels? Euro Radiol 23:2215–2227; 2013.

50.Walters TJ,BlickDW, Johnson LR,Adair ER, FosterKR. Heating and pain sensation produced in human skin by millimetrewaves: comparison to a simple thermalmodel. Health Phys 78:259–267; 2000.

51.Weyand PG, Smith BR, Sandell RF. Assessing the metabolic cost of walking: the influence of baseline subtractions. In: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Minneapolis,MN: IEEE; 2009: 6878–6881.

52.World Health Organization. Constitution of the World Health Organization[online]. 1948. Available at https://www.who.int/governance/eb/who_constitution_en.pdf. Accessed 1 April 2019.

53.World Health Organization. Radiofrequency fields. Geneva:WHO; Public Consultation Document; 2014.

54.Yarmolenko PS, Moon EJ, Landon C, Manzoor A, Hochman DW, Viglianti BL, DewhirstMW. Thresholds for thermal damage to normal tissues: an update. International J Hyperthermia 27:320–343; 2011.

55.Ziskin MC,Morrissey J.Thermal thresholds for teratogenicity,Reproduction，and development. International J Hyperthermia 27:373–387; 2011.

附录 A：剂量学背景

一、简介

本附录补充阐述了的剂量学方面的知识内容。这些内容与形成本导则基础的射频曝露限制直接相关。如正文所述，在最低射频下曝露导致的不利健康的影响是由于加热造成的（神经刺激在低频导则内有相关讨论；ICNIRP 2010）。因此，本附录将详细说明如何对温升限制进行量值选择，满足符合正文中所描述的干预不利健康影响阈值。该方法被用来推导限制准则。（包括相关的不确定性），时空平均法时用来表示温度升高值，以及基本限值和参考水平本身的推导（包括相关的不确定性）。干预不利健康影响阈值为:在“1 型”和“2 型”人体组织曝露，平均全身核心温度升高 1℃，局部温度分别升高 5℃和 2℃。

二、量值和单位

基本量值的详细说明，例如参数 E、H、I、T 和 t（见 ICNIRP 1985 2009A、2009、2010）。在本节中，将详细介绍导则中使用的其他物理量（即 SAR、SA、S_{inc}、S_{ab}、S_{eq}、U_{inc}、U_{ab} 和 U_{eq}）。矢量以粗体表示。

值得注意的是，射频基本限值和参考水平是以引起不利健康影响的最低射频曝露水平为参考的。由于对健康的影响与曝露引起的温度上升有关。这是由射频曝露的能量或功率决定的。因此，E、H 和 I 的平方值被作为空间积分或多个频率之和。下面的方程是 E 基于体积 V 的空间平均值的一个例子：

$$E_{spatial_average} = \sqrt{\frac{1}{V}\int_v |E|^2 dv}$$

(8)

其中 V 是整体的体积（V=∫vdv）。

三、特定能量吸收率（SAR）和特定能量吸收（SA）

SAR 被定义为因热产生的增量能量（δW），被增量质量（δm）消散或者吸收的时间导数，增量质量又可以表示为增加体积（δV）乘以密度（ρ， kgm^{-3}），以瓦特/千克（$W\ kg^{-1}$）来表示：

$$SAR = \frac{\delta}{\delta t}\left(\frac{\delta W}{\delta m}\right) = \frac{\delta}{\delta t}\left(\frac{\delta W}{\rho \delta V}\right)$$

(9)

生物组织或器官的介电性能通常被认为是介电损耗材料和磁透明材料，因为其相对磁导率（μr）为 1。因此，SAR 通常可由下列方程推导：

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho}$$

(10)

其中σ是电导率（Sm^{-1}）、E 是内部电场（均方根（rms）值）。

温度与 SAR 密切相关。热传导导致的热能流失可忽略不计，SAR 和温度的直接关系如下所示；

$$SAR = C\frac{dT}{dt}$$

(11)

其中，C 代表组织比热容（$Jkg^{-1}℃^{-1}$），T 代表温度（℃），t 代表曝露时间（s）。在大多数情况下，热能在曝露过程中迅速扩散。因此，方程（11）不能用于人类曝露场景。但是，方程式（11）对于热损失不显著的曝露场景是适用。

本导则将 SAR 作为本导则的一项基本限值。SAR 基本限值被定义为空间平均值，即全身平均 SAR 和 SAR_{10g}。全身平均 SAR 是全身吸收的总能量除以身体质量：

在本导则中，SAR 被用于定义基本限制标准。SAR 基本限值被定义为空间平均值，即全身平均 SAR 和 SAR_{10g}。全身平均 SAR 是全身吸收的总功率除以身体质量：

$$\text{Whole-body average SAR}=\frac{(\text{Total power})_{WB}}{(\text{Total mass})_{WB}}=\frac{[\int_{WB}\ \sigma|\mathbf{E}|^2dv]_{WB}}{\int_{WB}\ \rho dv} \tag{12}$$

SAR_{10g} 定义为 10-g 立方体吸收的总能量除以 10 g（见“空间平均考量”一节）：

$$\mathrm{SAR}_{10\mathrm{g}}=\frac{(\text{Total power})_{V_{10g}}}{(\text{Total mass})_{V_{10g}}}=\frac{\left[\int_{V_{10g}}\ \sigma\left|\mathrm{E}\right|^2dv\right]_{V_{10g}}}{\int_{V_{10g}}\ \rho dv} \tag{13}$$

假设组织具有与水相同的密度或者密度为 1,000 kg m^{-3}. ，那么 10 -g 体积（10g）近似为 2.15 cm * 2.15 cm * 2.15 cm 立方体的质量。

SA（J m^{-3}）是从 t1 到 t2 间 SAR 的积分：

$$\mathrm{SA}=\int_{t_1}^{t_2}\mathrm{SAR}\,(t)dt \tag{14}$$

吸收功率密度（S_{ab}）和吸收能量密度（U_{ab}）

SAR10g 不再是衡量 6 GHz 以上频率的局部温度升高的指标，因此，在此频率下的体表的射频功率和能量吸收主要集中在体表。例如，在 6 GHz 和 300 GHz 时，穿透深度分别约为 8.1 mm 和 0.23 mm（见表 10）。体表的吸收功率密度（W m^{-2}）定义为：

$$\mathrm{S_{ab}}=\iint_A\ dxdy\int_0^{Z_{max}}\ \rho(x,y,z)\cdot\mathrm{SAR}\,(x,y,z)\mathrm{d}z/A \tag{15}$$

其中体表面积在 z=0 时，A 代表平均面积（m^2）,Z_{max} 代表相应区域的体表深度；Z_{max} 远大于穿透深度时，可用无穷大代替 Z_{max}。在考虑热扩散的情况，采用 2cm*2cm（6～300 GHz）作为吸收能量密度基本限值的平均面积。吸收功率密度更严谨的公式基于坡印廷矢量：

$$\mathrm{S_{ab}}=\iint_A\ \mathrm{Re}\,[\mathrm{S}]\cdot ds/A=\iint_A\ \mathrm{Re}[\mathrm{E}\times\mathrm{H}^*]\cdot ds/A \tag{16}$$

其中 Re[X]和 X*分别是实部和复共轭 “X”，ds 表示体表垂直区域 A 的向量。

与 SAR 和 SA 之间的关系类似，吸收能量密度和吸收功率密度（J m^{-2}）的关系如下：

$$\mathrm{U_{ab}}=\int_{t_1}^{t_2}\ \mathrm{S_{ab}}(t)dt \tag{17}$$

四、入射功率密度（S_{inc}）和入射能量密度（U_{inc}）

在导则中使用入射功率和能量密度作为参考水平。入射功率密度定义为复坡印廷矢量的模值：

$$S_{inc} = |E \times H^*|$$

(18)

在远场或横电磁（TEM）平面波的情况下，入射功率密度如下：

$$S_{inc} = \frac{|E|^2}{Z_0} = Z_0|H|^2）$$

(19)

其中 Z_0 是自由空间的特征阻抗，即 377Ω。上述方程也用于评估平面波等效入射功率密度（S_{eq}）。

S_{inc} 和 S_{ab} 的关系也可用反射系数Γ表示：

$$S_{ab} = (1 - |\Gamma|^2)S_{inc}$$

(20)

反射系数（Γ）由组织的电特性、体表形状、入射角和极化决定。

与 SAR 和 SA 之间的关系类似，入射能量密度可以通过对入射功率密度从 t1 到 t2 求积分获得：

$$U_{inc} = \int_{t_1}^{t_2} \quad S_{inc}(t)dt$$

(21)

在近场曝露情况下，波印廷矢量分量是矢量而不是实数。在这种情况下，可能需要对波印廷矢量分量进行详细分析，以计算与射频安全相关的入射功率密度。

五、相关生物物理机制

(一)全身平均曝露量说明

相关数值。全身曝露对人体健康的影响与体温升高有关。然而，当人体曝露于射频电磁场中，很难预测人体核心温度的升高。

人体核心温度取决于全身热能的平衡。身体吸收的射频能量通过血流传递到全身，这可以激活体温调节反应以维持身体核心温度（Adair 和 Black 2003）。这意味着能量平衡的时间对于身体核心温度维持是必不可少的。因此，全身平均 SAR 被用作与衡量身体核心温度的升高的物理量。

总体来说，总能量吸收和身体核心温度的关系与频率无关。然而，在高于几个 GHz 的频段，由于空气对流、表面辐射和血液中的热量传递，在相同的全身平均 SAR 下，身体核心温度不会像低频下那样升高那么多（Hirata 等.2013 年）。

表 10.6-300GHz,人类皮肤组织（真皮）的穿透深度与频率关系表

频率（GHZ）	相对介电常数	导电率（S/m）	穿透深度（mm）
6	36	4.0	8.1

10	33	7.9	3.9
30	18	27	0.92
60	10	40	0.49
100	7.3	46	0.35
300	5.0	55	0.23

这时，能量吸收主要局限于皮肤表面，局部温度升高比身体核心温度升高更为显著（Laakso 和 Hirata，2011）。然而，也有报道称，红外辐射（IR）曝露可导致显著的身体核心温度升高（Brockow 等.2007）。红外辐射是指频率介于射频电磁场和可见光之间的电磁波。这意味着，尽管与高 GHz 射频电磁场（或毫米波）相比，红外线辐射的穿透深度非常小，但红外线辐射曝露仍有可能显著提高身体核心温度。因此，出于保守的原因，ICNIRP 对高于或者低于 6GHz 的频段范围，设立相等的全身平均限值。这对于多频曝露的情况尤其重要。因此，在导则中定义了适用的频率范围。

时间平均的考虑。身体核心温度的时间常数的定义仍不明朗。但是，在简化条件下（例如，假设一阶滞后），温度变化可描述如下：

$$T(t) = T_0 + (T_\infty - T_0)(1 - e^{\frac{-t}{\tau}})$$

(22)

当温度 T 是时间 t 的函数时，T_0 和 T_∞分别是初始温度和稳态温度，τ是时间常数。在这种情况下，时间常数对应于从初始温度到稳态温度的 63%温度升高所需的时间。在本导则中，从初始温度达到平衡温度 80-90%的时间被作为标准值；这几乎是方程式（22）中时间常数的两倍。

此外，在这种情况下，达到稳定的核心温度所需的时间取决于热负荷水平，而这与全身平均 SAR 有关。Hirata 等人（2007）数值模拟了曝露在 65 MHz 到 2 MHz 平面波下的裸体的身体核心温升。报告指出，在这两种情况下，全身平均 SAR 为 6 到 8W/kg 的时候，身体的核心温度至少需要 60 分钟才能升高 1°C。这一时间也取决于出汗率，更高的出汗率将使得这个时间增长 40 到 100 分钟（Hiratetal.2008；Nelson 等，2013）。因此，全身曝露在 6GHz 以下的射频电磁场中而达到稳态温升的时间为 30 分钟或更长。

如上所述，在频率高于 6GHz 时，功率吸收主要体表组织内（见表 10）。因此体温调节反应是由皮肤温度升高而不是身体核心温度升高引起。然而，稳态温升所需的时间并没有受到功率吸收的明显的影响。因此，由于没有对 6GHz 以上的身体核心温升时间常数进行定量研究，在 6 GHz 以上平均时间仍使用 6 GHz 以下的平均时间。

体温升高 1℃所需的全身平均 SAR。如果人体曝露在显著的热负荷下，体温调节功能就会被激活，这通常会导致全身平均 SAR 和体温升高之间的非线性关系。

Adair 和他的同事们对全身曝露时的体温（通过食道温度测量）进行了实验研究。在 100MHz、220MHz 和 2450MHz 下，普通环境温度为 24℃到 28℃的条件下，全身平均 SAR 为 0.54 到 1W kg^{-1}，没有或只有轻微的食管温度升高（<0.1℃）（Adair 等.2001、2003、2005）。

另据其他报告称，在高环境温度（31℃），220MHz 条件下，全身平均 SAR 为 0.675 W kg^{-1} 引起较高的身体核心温升（0.35℃）。虽然目前只在一个人身上发现身体核心温度的明显升高，但是人体核心温度升高的平均值（6 人）体现的并不明显。在 6 GHz 以上的频段，没有关于全身曝露的人体核心温度升高的数据。唯一可用的数据是关于红外辐射（布罗克沃特等.2007）。正文讨论了在高频下，人体曝露的限制因素。

射频照射引起的身体核心温度升高的两个主要因素是：出汗和质量与体表面积的比值。

在估算由于 EMF 导致的身体核心温度身高时，需要考虑出汗引起的蒸发热损失会有效地降低人体核心温度。例如，Hirata 等.（2007）报告称，对于出汗率较低的人，如老年人，需要 4.5 W kg^{-1} 将身体核心温度提高 1℃，而对于出汗率正常的人，则需要 6 W kg^{-1} 。老年人出汗率下降的主要原因是热感知功能的退化（Dufour 和 Candas.2007）。

同样，在身体表面和外部空气之间的热交换也非常重要。Hirata 等.（2009）发现，全身由于电磁场曝露而导致的身体核心温度升高和身体表面面积与（全身）能量吸收的比值成正比。对于像儿童这样的小身体，质量与表面积之比较小，因此需要更大的 SAR 来提高他们的身体核心温度。

在相同的全身平均 SAR 下，较小的人有较低的身体核心温升。例如，Hirata 等.（2008）指出，在相同的全身平均 SAR 下，8 个月龄和 3 岁儿童模型的体核温升比成年女性小 35%。他们认为较高的表面面积与质量的比值是更高效的散热的原因。因此，在相同的全身平均 SAR 下，儿童的身体核心温升比成人的要小。

更广泛来说，从理论建模和一系列实验研究得出的结论表明，在 100 kHz 到 6 GHz 的范围内，在适度高温（28℃）下，曝露至少 1 小时，每提高核心温度 1℃，成人和小孩的全身平均 SAR 至少为 6W kg^{-1}，（Hirata 等.2013），对于出汗率较低的人，如老年人，至少为 4.5 W/kg（Hirata 等.2007）。

胎儿曝露的研究。胎儿的主要体温调节机制是通过脐带内血液流动与母亲进行的身体核心热量交换。因此，胎儿温度受到母体温度的严格控制，达到热平衡的时间比成人长（Gowland a 和 De Wilde 2008）。胎儿的体温比母亲高 0.5℃（Asakura 2004）。正如 Hirata 等人在报告提到的，在妊娠 26 周时母亲的电磁场曝露并没有显著改变这种关系。（Asakura.2014）。在 40 MHz 到 500 MHz 的频率范围内，考虑母婴之间的热交换，人们计算了稳态胎温。研究表明，即使能量吸收集中在胎儿周围，胎儿温升也仅比母亲的温升高 30%。在低频段，由于波长和穿透深度的延长，SAR 分布变得均匀，这使得母婴全身的温升更加均匀。在较高频段，由于较浅的穿透深度，SAR 的分布更加趋于表面。这通常导致月龄较小胎儿或胚胎的 SAR 较小，因为它通常位于母亲腹部的深处，并导致较大的胎儿的全身 SAR 较小。因为胎儿的大小大于穿透深度，母体曝露在电磁场中导致的胎儿升温小于母体升温，这个结论在研究中的频率之外也成立。

由此可知，电磁场引起的母体内的体温升高会导致胎儿体内的体温升高，因此，在职业曝露中辐射曝露会导致母体和胎儿体内的体温升高。因此，为了将胎儿体温维持在一公众暴露所需的水平，孕妇也被认为应采用工作曝露的全身平均 SAR 限值。

ICNIRP，制定关于妊娠妇女职业性全身平均 SAR 值与产生胎儿致畸的温度限值（2℃:Edwards 等.2003；Ziskin 和 Morrissey，2011）相比更加保守。ICNIRP 指出，特别是在早期阶段或胚胎发育期间，胎儿的身体核心温度是没有被明确定义的，也没有直接证据表明孕妇的职业性全身曝露会伤害胎儿。因此，可以将怀孕工人视为公众一样对待。ICNIRP 还指出，可以考虑一些缓解技术，以便允许怀孕工人能够进入职业电磁场曝露水平的区域而不超过公众限值。例如，每 30 分钟平均间隔内，允许怀孕工人处于职业曝露限制水平下的区域 6 分钟。这时需要保证 30 分钟（包括这 6 分钟）平均的 SAR 不超过工作曝露限值。在考虑此类缓解技术时，怀孕工人的局部区域曝露限制也很重要，并在“局部区域（100 kHz 至 6 GHz）的曝露规范”和“局部区域（> 6 GHz 至 300 GHz）的曝露规范”的“胎儿曝露注意事项”部分中进行了介绍。

(二)局部区域曝露规范（100kHz 至 6GHz）

相关数值。在局部身体区域曝露于电磁场的情况下，身体的一部分温度会升高，而不会改变身体的核心温度。因此，局部的温升也应该受到限制。最大的温度升高一般出现在身体表面，这时候局部 SAR 可以替代局部辐射曝露引起的局部温度。另外，其他因素，如衣服、环境和身体本身状态对局部温度的影响比 SAR 本身还大。

局部 SAR 与面平均吸收功率密度的转换频率为 6GHz（Funahashi 等.2018）。这是一个实践的折衷方案，适用于以下小节中描述的与空间时间平均值相关的条件，因为这种转换不存在最佳的单一频率。对于低于转换频率的频段， SAR 是衡量保护内部组织（如大脑）和皮肤的度量指标，如“空间平均考虑”一节所述。在较高频段（特别是 10GHz 以上），吸收功率密度可以衡量皮肤最高温升。

空间平均考虑。根据预测局部温升的能力，对不同的平均方案（如立方体、球形、连续的单个组织）和质量进行了评估（Hirata 和 Fujiwara，2009；McIntosh 和 Anderson，2011）。这些结果表明，平均质量的大小比材料体积的形状更为重要，不同平均方案的 SAR 影响系数约为 2（Hirata 等.2006）。研究还表明，与多个组织相比，单个组织的平均 SAR 与局部温度的相关性较差，因为生物组织中产生的热量可以扩散到几厘米（即跨多个组织类型）。因此，平均质量为 10g 的立方体组织，被用作频率达 6 GHz 的标准单位。这一指标已被证明适用于平面波照射，头部、躯干和四肢的局部温升与使用这一平均质量时的 SAR 相关（Razmadze 等，2009 年；Bakker 等，2011 年；Hirata 等，2013 年）。

时间平均考虑。当射频功率沉积的速率与热扩散率和传导率之间达到平衡，达到稳态温度所需的时间就是温度上升的时间常数。时间常数主要取决于血流动和导热引起的热对流。Van Leeuwen 等.（1999 年），Wang 和 Fujiwara（1999 年）和 Bernardi 等（2000 年）报道称，800MHz 至 1.9GHz 频段，达到稳态温度，80-90%的情况下，所需的时间为 12-16 分钟。本导则采用 6 分钟为平均时间来评估 6 GHz 频率内局部曝露，是合适的和保守的。

1 型和 2 型组织温度分别升高 5°C和 2°C的局部 SAR。尽管早期的研究展示了有关兔眼的 2.45 GHz 曝露和局部温升之间关系的数据（例如，Guy 等.1975；Emery 等.1975），更高精确技术的研究表明，兔眼不适合人眼的模型（Oizumi 等.2013）。但是，考虑到潜在的对眼睛造成的射频伤害，现在有几项研究提供了关于人眼射频感应加热的更准确的信息。10 g 组织平均 SAR 的加热系数（单位质量，每瓦吸收功率的温度上升，°C为单位），人眼的加热系数相对一致[0.11–0.16°C kg W-1:Hirata（2005）；Buccella 等.（2007）；Flyckt 等.（2007）；Hirata 等.（2007）；Wainwright（2007）；Laakso.（2009）；Diaonetal.（2016 年）。在大多数研究中，加热因子是根据眼球（邻近组织）上的 SAR 平均值得出的。立方体积（包括其他组织）上的平均 SAR 值高于该值（Diao 等.2016），导致加热系数降低。

对于曝露在手机天线下的头部温度升高，也有相当多的研究（Van Leeuwen 等.1999；Wang 和 Fujiwara 1999；Bernardi 等.2000； Gandhi 等.2001；Hirata and Shiozawa2003；Ibrahim 等.2005；Samaras 等.2007）。Hirata 和 Shiozawa（2003）报告指出，在 10 克连续体积上，有和无耳廓的情况下的，局部 SAR 加热系数分别为 0.24 或 0.14°C kg W^{-1}。其它研究也探讨了 10-g 立方体积上（包括耳廓）的局部 SAR 平均值。研究显示头部加热系数在 0.11-0.27°C kg W^{-1} 范围（Van Leeuwen 等.1999；Bernardi 等.2000；Gandhi 等.2001）。Fujimoto 等.（2006）研究了曝露于偶极天线下的儿童头部的温升，发现当使用相同的热参数时，它的温升与成年人的温升相当。大脑中的加热因子（大脑温升与头部峰值 SAR 之比）为 0.1°C kg W^{-1} 或更小（Morimoto 等.2016）。只有一项研究讨论了身体佩戴的天线导致的躯干温升（Hirata 等，2006）。这项研究表明，皮肤中的加热系数在 0.18-0.26 °C kg W^{-1} 之间。与加热系数相关的不确定因素可归因于耳廓（用于移动电话）和其他周围结构吸收的能量（例，见 Foster 等.2018）以及 SAR 的空间平均算法。

研究表明，至少在 30 分钟的曝露时间内，在 100 kHz–6 GHz 频段，数值估算显示，

皮肤中的最大加热系数低于 0.25℃ kg W^{-1}，大脑中的最大加热系数低于 0.1℃ kg W^{-1}。基于这些加热系数，对于高达 20 W kg^{-1} 的局部 SAR，不会超过眼睛和大脑（1 型）以及皮肤（2 型）的有害阈值。

胎儿曝露的考虑。随不同妊娠期和胎儿姿态与位置变化的局部 SAR 加热因子已经考虑母亲和胎儿之间的热交换（Akimoto 等.2010；Tateno 等.2014；Takei 等.2018）。这些研究采用了 13 周、18 周和 26 周妊娠妇女的模型，在大多数情况下，胎儿的发热系数都比母亲低好几倍。然而，当胎儿体位非常接近腹部（即妊娠中后期）时，观察到出现最大的加热因，0.1℃ kg W^{-1} 为保守的加热因子。

基于以上发现，母亲在 10 W kg^{-1} 的职业基本限制条件下曝露会导致胎儿体温升高约 1℃，低于头部和躯干的不利健康影响阈值，但这会导致较小的降低系数（比如：2） 比一般公众系数低（比如：10）。因此，母亲局部的职业性电磁场曝露会导致胎儿的温度升高到高于一般公众认为可以接受的水平。因此，为了将胎儿温度保持在一般公众安全限值内，根据局部 SAR 的限制，孕妇被认为是普通公众的一员。

值得注意的是，上述案例仅出现在中期和晚期妊娠（18 至 26 周妊娠期），而妊娠早期（12 周妊娠期）的发热因素最多为 0.02℃ kg W^{-1}（Tateno 等.2014；Takei 等.2018）。12 周的胎儿体温升高比动物致畸的阈值(2℃)低 100 倍（Edwards 等.2003；Ziskin 和 Morrissey.2011）。

(三)局部曝露规范（>6GHz 至 300GHz）

相关量值。对曝露于电磁场的人体而言，电磁波从表面呈指数衰减到更深的区域。根据穿透深度，关系如下表示：

$$S_{ab} = PD_0 \int_0^{Z_{max}} e^{-\frac{2z}{\delta}} dz \tag{23}$$

其中 S_{ab} 为吸收功率密度，体表是位于 z=0，δ为从体表到 z 方向的穿透深度（定义为从体表到吸收了 86%射频功率的距离），以及在相应区域的体表深度 Z_{max}；其中 Z_{max} 远大于穿透深度，Z_{max} 可以被无穷大代替。PD_0 是在 z=0 时，面积 A 上平均的比吸收功率，如下表示：

$$PD_0 = \iint_A \rho(x,y,0) \cdot \mathrm{SAR}\,(x,y,0)dxdy/A \tag{24}$$

穿透深度取决于介质的介电特性以及频率。随着频率的增加，穿透深度减小，在高于 6 GHz 时，能量主要集中在表面组织中。依据 Sasaki 等. (2017) 和 Sasaki 等.(2014)的研究成果，表 10 列出了基于皮肤组织(真皮)介电特性测量的穿透深度。

因此，边长 2.15cm 的 10g 立方体局部 SAR，不足以代表局部温升；因为，功率沉积仅限于表面几毫米的组织范围内。相反的，在 6 GHz 到 300 GHz 频段范围，皮肤的吸收功率密度更接近表面温度上升（Fosteretal 等.2016；Funahashi 等 2018）。

空间平均考虑。根据热力学的模型（Hashimoto 等.2017)和解析法研究（Foster 等.2016），对 6 GHz 以上的射频加热，平均 4cm^2 或更小的面积产生接近局部最大温升的近似值。这是由真实场景的计算得到的（He 等.2018）。4-cm^2 平均面积的一个重要优点是,在 6GHz 时，局部 SAR 与吸收功率密度是一致的；平均 10-g 的 SAR 立方体的表面约为 4 cm^2。

由于波束区域通常只能聚焦于波长大小的尺寸，而与温升相关的吸收功率密度的平均面积取决于频率；随着频率的增加，平均面积越小。因此，对于频率较高的极端聚焦的波

束，有时需要较小的平均面积。因此，一个附加标准是，在大于 30GHz 的情况下，空间峰值(最大)吸收功率密度均与分布在 1 cm^2 面积，不得超过 4cm^2 的的 2 倍（Foster 等.2016）。

时间平均考虑。在频率低于 6GHz 的局部曝露下，由于局部曝露于 6 GHz 以上的频率而导致的温升也会在特定时间常数下达到平衡状态。Morimoto 等人.（2017）证明，在 6 GHz 至 300 GHz 的局部曝露中，常采用 6min 的平均时间是适当的。稳态局部温升所需的时间随着频率的增加而逐渐减少，但在高于 15GHz 的频率下没有观察到明显的变化（Morimoto 等人。2017 年）。达到最高温度的 80–90%所需的时间，在在 6 GHz 下，是 5–10 分钟，在 30GHz 是 3–6 分钟。但是，需要注意的是，如果考虑到短暂或不规则的曝露，时间常数会变短，这在“局部（>6 GHz 到 300 GHz）的短暂曝露规范”一节中讨论。在本导则中，选择 6 分钟作为平均时间，另外作为一项限制措施，对较短或不规则曝露的限制受到额外限制。

使局部 1 型组织温度增加 5℃所需的吸收功率密度。在 6GHz 以上，功率吸收主要局限于浅表组织，要保证组织温度不会超过 2 型组织的不利健康影响阈值，也不会超过更浅表的 1 型组织（例如，Morimoto 等.2016）。因此，必须先选择曝露限值，以确保更浅的 1 型组织中的温度不超过 5℃的干预阈值。

超过 6 GHz 情况下，随着吸收功率密度的变化而变化，和低频情况类似，组织发热也取决于各种因素。本文对平面波入射多层平板模型作为极端均匀曝露条件时吸收功率密度的加热因素进行了全面的研究。[以单位面积(m^2)上的温升(℃)计算每 W 吸收功率]。在这项研究中，对加热系数进行了蒙特卡罗统计估算，结果表明，吸收功率密度的最大加热系数为 0.025℃ m^2 W^{-1}。这个值比其他关于皮肤（Alekseev 等.2005；Foster 等.2016；Hashimoto 等 2017）以及眼睛（Bernardi 等.1998；Karampatzakis 和 Samaras，2013）温升的研究结果更保守（更大）。因此，得出的结论是，温度升高 5℃需要 200 W m^{-2} 的吸收功率密度。

胎儿曝露的考虑。如“局部区域（100 kHz 至 6 GHz）曝露规范”一节中“胎儿曝露注意事项”有关 SAR 频率特性的所述，6 GHz 以上的射频曝露引起的体表加热对胎儿体温升高的作用可能非常小（小于 6 GHz）。这表明，胎儿在 6 GHz 以上局部曝露不会受到明显的温度升高影响。然而，目前还没有研究对此进行评估。因此，ICNIRP 对 6GHz 以上的曝露采取比较保守的方法，并要求将怀孕工人视为普通公众的一员，以确保胎儿不会曝露在普通公众基本限值之上。

(四)短时局部曝露规范（100 kHz 至 6 GHz）

如果曝露时间短于平均时间，6 分钟局部曝露允许更大的局部 SAR 强度。然而，如果曝露时间显著缩短，则热扩散机制不足以限值温升。这意味着，如果曝露时间短于 6 分钟，6 分钟平均基本限值可暂时导致温度升高超过不利健康影响阈值。

利用多层模型和头部解剖模型对 100 MHz-6 GHz 的电磁场短时曝露的数值模拟研究发现，许可的温升对应的 SA 是根据一系列因素而变化的（Kodera 等.2018）。根据该研究和与皮肤干预不利健康效应阈值（5℃）对应的 SA 经验方程式，与此温升相关的曝露参看以下头部和躯干方程：

$$\mathrm{SA}(t) = 7.2(0.05 + 0.95\sqrt{t/360})(\mathrm{kJkg^{-1}})$$
(25)

（其中，t 是以秒为单位的时间，适用于 t<360, SAR 是基于连续性 6 分钟的曝露，SA (t)在任何 10-g 立方组织上的空间平均。在公式（13）中，计算 SA 的平均与 SAR 流程方法相同。对于四肢计算，应满足以下方程：

$$\mathrm{SA}(t) = 14.4(0.025 + 0.975\sqrt{t/360})(\mathrm{kJkg^{-1}})$$

(26)

需要注意的是，依据上述逻辑，对于 6 GHz 以下和 6 GHz 以上的短暂曝露会产生的时间函数略微不同；由此产生的 6GHz 以下的时间函数比 6GHz 以上的时间函数更趋保守（即公式 27 和 28）。

Kodera 等（2018）的数值模拟研究表明，根据公式（25）中定义的 SA 限制，2 型组织（如大脑）的温升也保持在 1℃以下。文中还称，与许可温升相对应的 SA，随着频率的降低而增加。在 400 MHz 或低于 400 MHz 的频段，由局部 6 分钟 SAR 基本限值[10（W kg^{-1} ）x360（s）=3.6（kJ kg^{-1} ）]得出的 SA，不会超过与头部和躯干的干预不良健康影响阈值。因此，该 SA 限值仅在 400 MHz 以上的曝露情况下才有必要。

应注意的是，无论特定脉冲或非脉冲连续波模式如何，在 6 分钟内的所有间隔内都必须满足公式（25）和（26）。也就是说，来自任何脉冲、脉冲组或脉冲序列组的曝露，以及来自曝露总量（包括非脉冲电磁场）的曝露，以 t 秒为单位，不得超过公式（25）到（26）中的规定，因为曝露于部分曝露模式比曝露于单个脉冲或 t 时间内的平均曝露更为重要。例如，如果两个 1s 脉冲间隔 1s 发射，由公式（25）和（26）提供的限值必须满足 1s 脉冲和所有 3s 间隔的要求。

上述关于脑温升的讨论表明，胎儿的温升也低于稳态（6 分钟）曝露的假设值。也就是说，当应用公式（25）时，2 型组织的温度升高将低于影响健康的温度。当然，这也可能是由于短暂的曝露，导致了胎儿温度升高。然而，目前还没有一项研究表明孕妇在职业限度内短暂曝露会对胎儿健康造成影响。因此，ICNIRP 对于小于 6 分钟的曝露与大于 6 分钟的曝露秉持相同的保守政策（见“局部区域（100 kHz 至 6 GHz）曝露规范的胎儿曝露考虑因素”一节），并要求怀孕工人遵守一般公共限制保护。

(五)局部曝露规范（>6GHz 至 300GHz）

与频率高达 6 GHz 的情况类似，相对于相同吸收功率密度，平均曝露时长 6 分钟的连续曝露，6GHz 以上的短脉冲或不连续曝露可以强化温升效果。在高于 3 0GHz 频段，以上效果变得更为显著（Foster 等.2016）。鉴于简单多层模型的稳健性和一致性，人们基于使用简单模型进行的研究，导出了短暂曝露的基本限值（Foster 等.2016；Morimoto 等.2017）。与连续波曝露不同的是，从身体突出部分反射回皮肤或干扰效果，可能因脉冲而越发明显。尽管反射对吸收功率密度的影响尚待完全确定，但是，在 6 分钟的曝露间隔内，脉冲比相同的均匀分布但吸收功率密度产生的温升 3 倍。（Laakso 等.2017）。

考虑到这些因素，吸收能量密度基本限值(Uab)被设定为时间间隔的平方根的函数，用以解释温度的不均匀性（Foster. 2016）。这些值与 1 型组织的干预不利健康影响阈值相匹配，并与 6 分钟的吸收功率密度基本限值得出的吸收能量密度相匹配。在最高 6GHz 频段，基于瞬时曝露限值，由此产生的生物体表的温升不会引起超过 2 型组织干预不利健康影响温度阈值，因此这里只需要考虑 5℃的 1 型组织阈值。

因此，人们对 Kodera 等(2018)关于 6 GHz 以下频率的相关公式进行了扩展，规定了 5℃温升时短暂曝露的最大吸收能量密度限值如下:

$$U_{ab}(t) = 72(0.05 + 0.95\sqrt{t/360})(\mathrm{kJm^{-2}})$$
$$\text{averaged over } 2\mathrm{cm}\times 2\mathrm{cm}$$

(27)

其中 t 是以秒为单位的时间间隔，适用于 t<360s。在 30GHz 以上，对于 1* 1cm 的平均面积有一个额外的标准，吸收的能量密度不超过公式（28）中规定的值：

$$U_{ab}(t) = 144(0.025 + 0.975\sqrt{t/360})(\mathrm{kJm^{-2}})$$
$$\text{averaged over } 1\mathrm{cm}\times1\mathrm{cm}$$
(28)

无论特定的脉冲或非脉冲连续波模式如何，应在 6 分钟内满足公式（27）和（28）的要求。也就是说，来自任何脉冲、脉冲组或脉冲序列组的曝露，以及来自曝露总量（包括非脉冲电磁场）的曝露，以 t 秒为单位，不得超过公式（27）和（28）中规定的曝露。因为曝露于部分曝露模式比曝露于单个脉冲或 t 时间内的平均曝露更为重要。如果两个 1s 脉冲间隔 1s 发射，1s 脉冲和所有 3s 间隔的要求，必须满足公式（27）和（28）的限值要求。

综上所述，根据 SAR 分布的频率特性，由 6 GHz 以上射频辐射引起的体表发热对胎儿温升的影响可能小于 6 GHz 以下。短时曝露的情况也是如此。然而，当研究发现孕妇曝露于 6GHz 以上的射频电磁场时，ICNIRP 采取保守的方法，将孕妇视为普通公众的一员，以确保胎儿曝露不会超过普通公众的限值。

六、参考水平的推导

(一)参考水平一般考虑

如导则正文所述，参考水平是评估否符合现行准则的一种实用的方法。假设全身曝露在均匀的场分布下，通过剂量学研究，可以得出 E 场强度、H 场强度和入射功率密度的参考水平。由于在大多数曝露场景中，参考水平是高度保守的，所以经常出现超出参考水平而不超过相应的基本限值的情况。这一方面的问题，需要始终做出验证，以确定合规性。

不同的参考水平应用规则适用曝露于相应的远场、辐射近场和感应近场区。ICNIRP 对这些区域进行区分的目的是确保参考水平通常比基本限值更为保守。就区域之间的区别而言，其原理（但不仅如此）决定因素是接近于平面波条件的程度。这种方法的难点是，其他因素也会影响基本限制量对参考水平的估算。这些因素包括频率、物理尺寸、电磁场源、与所估算的外部电磁场的距离，以及电磁场在人所占空间内的变化程度。考虑到这些不确定性来源，导则对反应性和辐射性近场区域的曝露有比远场区域更保守的规定。在不考虑一系列不确定因素的情况下，很难确定是反应性近场、辐射性场或远场曝露。粗略地说，距离天线的距离>$2D^2/\lambda$（m）、在$\lambda/(2\pi)$和 $2D^2/\lambda$（m）之间以及<$\lambda/(2\pi)$（m）分别与远场、辐射近场和反应近场近似对应，其中 D 和λ分别指天线的最长尺寸和波长，单位为米。希望来自于技术标准机构的输入文献能更好地确定应采用哪一种远场/近场区域参考水平规则，以便在参考水平和基本限值之间做出适当的选择。

(二)最高至 30MHz 的 E-场和 H-场参考水平

在 ICNIRP（1998）导则中，该频率范围内的参考水平导出自全身曝露平面波的全身平均 SAR。然而，Taguchi 等（2018）中阐明，全身曝露于解耦的 H 场导致全身平均 SAR 显著低于全身曝露于具有相同 H 场强度的平面波的计算结果。计算了解耦合 E 场的全身曝露，发现与 E 场方向和强度相同的平面波的全身平均 SAR 几乎相同。因此，本导则是基于对全身曝露于解耦均匀 E 场和 H 场下的整体平均 SAR 的分别数值计算。Taguchi 等(2018)还推断，在满足全身 SAR 基本限值的情况下，也可以满足局部 SAR 基本限值，包括脚踝处的限制。这意味着，在这个频率范围内符合全身平均参考水平将导致不超过全身平均和局部 SAR 基本限值的曝露。

在低频导则（ICNIRP 2010）中，为了防止神经细胞受到刺激，参考水平被设定为 10MHz 以下的，使用了 3 的衰减系数来解释与外部电场和感应（内部）电场之间关系的数值模拟相关的不确定性。在低频导则中采用了边长为 2 mm 立方体内（含特定组织）的平均值，这些值受到计算误差的显著影响。

然而，在本导则中，数值模拟的不确定性并不显著，因为用于评估全身平均和局部 SAR 的空间平均过程显著降低了计算误差的不确定性。因此，在本导则中，由于计算不确定性而产生的附加衰减系数不需要再考虑与 30 MHz 以下的局部和全身平均 SAR 基本限值相关的参考水平。

(三)从>30MHz 到 6GHz 的 E 场、H-场和功率密度参考水平

ICNIRP（1998）指出，曝露场强等于参考限值的整体平均 SAR 接近于整体共振频率(30–200 MHz)和共振后频率(1,500–4,000 MHz)区域的基本限制。

共振频率出现，半波长接近自由空间中人体的高度（人的垂直尺寸）或自由空间中四分之一波长接近站在接地平面上人体的高度的频率（Durney 等.1986），会引起较高的全身平均 SAR 结果。全身共振仅适用只在垂直极化平面波入射的情况下。在其他极化场景，全身平均 SAR 明显低于（几个数量级）全身共振频率的垂直极化情况（Durney 等.1986）。全身共振已通过数值计算得到证实（Dimbylow 1997；Nagaoka 等.2004；Dimbylow 2005；Conil 等.2008；Kühn 等.2009；Hirata 等.2010）。

在全身共振频率以上，特别是在几 GHz 以上，因极化而导致全身平均 SAR 的差异与全身共振频率时的 SAR 结果相差甚远。Hirata 等.（2009）报告称，曝露于水平极化平面波入射下的 9 个月至 7 岁儿童模型的全身平均 SAR，仅比 2GHz 至 6GHz 频率的垂直极化平面波略高(最高至 20%)。其他研究也报告了类似的趋势（Vermeeren 等.2008；Kühn. 2009）。

ICNIRP 得出的结论是，在相同的外场作用下，儿童平均 SAR 可以比成人高 40%（ICNIRP 2009）。在 ICNIRP 声明之后，Bakker 等人(2010)报告了类似(但稍高)增强(45%)的儿童全身平均 SAR。除此以外，对组织和器官的介电特性随年龄变化的影响也有过相关研究，但未发现与全身平均 SAR 相关的显著影响（Lee 和 Choi 2012）。值得注意的是，SAR 整体平均水平的增加是通过使用非常瘦的儿童模型进行计算得出的，这些模型是从成人模型和非常小的(婴儿)模型中提取的。这些研究假设儿童或婴儿在相当长的时间间隔内保持固定姿势，以便与极端情况相匹配，从而使全身群冠军 SAR 超过基本限值。此外，最近一项使用国际辐射防护委员会（ICRP）规定的标准尺寸的儿童模型而不是成人的比例模型的研究表明，标准儿童模型中全身平均 SAR 数值的增加并不显著（最多 16%；Nagaoka 等.2019）。类似的，有研究探讨了全身平均 SAR 与全身质量之间的关系。研究发现，低体重指数(BMI)成年人的整体平均 SAR 值会以与儿童相似的方式增加（Hirata 等.2010、2012；Lee 和 Choi 2012）。

在“全身平均曝露规范”一章讨论的“胎儿曝露的考虑”一节中，胎儿的体温与母亲的体温相似。全身平均 SAR 被定义为全身吸收能量除以全身质量，用来限制身体核心温度的升高。因此，一般情况下，在该频率区域，孕妇的体重越大，其全身平均 SAR 等于或低于非孕妇的体重。Nagaoka 等.（2007）研究表明，26 周孕妇模型在 10 MHz～2 GHz 垂直极化平面波照射下的全身平均 SAR 与相同照射条件下的非孕妇模型几乎相同或低于非孕妇模型。

Dimbylow（2007）研究利用了一个简化的孕妇模型，在大约 70 MHz，胎儿和母亲在不接触地面的条件下，全身平均 SAR 均为最高。在中晚期妊娠条件下的解剖胎儿模型中也发现了类似的趋势，在 20 周、26 周和 29 周的胎儿全身平均 SAR，分别为母亲的 80%、70%和 60%（Nagaoka 等.2014）。胎儿全身平均 SARs 与母亲的全身平均 SARs 相当或低于母亲，这是因为胚胎位于母亲腹部深处（Kawai .2009）。因此，就参考水平而言，孕妇不会被视为与胎儿无关的独立体，并应受到普通公众限值的限制。

如上所述，在该频率区域中有许多与全身曝露的平均 SAR 值相关的数据库。其中包括自 ICNIRP（1998）导则以来的相当多的数据，这些数据通常与 ICNIRP（1998）导则的基

础数据库一致。ICNIRP 结合使用新、旧数据库来推导参考级别，下面将讨论一些矛盾的内容。

自 ICNIRP（1998）导则发表以来，已经表明，儿童或身材矮小的人在参考水平的曝露可超过全身平均 SAR 基本限值。如上所述，全身平均 SAR 可能超过基本限值 45%，但这仅限于非常特殊的儿童模型。而最新建模显示、利用国际标准化的儿童模型建模的全身平均 SAR 最多只略微增加了 16%（Nagaoka 等.2019）。该偏差与数值计算中预期的不确定性相当。例如，Dimbylow 等.（2008）报告称，用于全身平均的程序或算法的差异导致了 3GHz 时全身平均 SARs 的 15%的变化，而皮肤条件（干或湿）的介电特性的赋值也导致了 1.8 GHz 时全身平均 SARs 的 10%的变化（Gabriel 等.1996）。

根据“全身平均曝露量规范”中的“胎儿曝露考虑”一节，儿童的发热系数普遍低于成人。因此，SAR 的上升不会导致比成人更大的温度上升，也不会影响健康。考虑到不确定度的大小和降低参考水平以考虑保护身材矮小的人缺乏健康益处，这部分结论并没有导致在>30MHz 到 6GHz 的频率范围内对参考水平进行修改。

应注意的是，在其它条件下，全身平均参考水平可导致全身平均 SARs 超过基本限值的 35%。以上这些 SAR 的升高的情况，很难维持足够长的时间（Findlay 和 Dimbylow，2005）；然而，与相关的不确定性和基本限制本身的保守性质相比，SAR 的升高值很小，并不太可能经常遇到，而且没有引起任何不利健康影响的证据。

(四)>6GHz 到 300GHz 的全身曝露参考水平

6GHz 以上，射频电磁场一般遵循平面波或远场照射条件的特点，在此频率范围内以入射功率密度或等效功率密度作为参考水平。在这个频率范围内，反应近场非常接近射频源。反应近场和辐射近场的典型边界定义为λ/（2π）（如，在 6GHz 时为 8mm）。由于用于 6 GHz 以上参考水平的入射功率密度与在感应近场区域中用于基本限值的吸收功率密度不相关，因此不能使用参考水平来确定反应近场中的合规性；在这种情况下，需要采用基本限值进行评估。

人体吸收的射频功率沿表面到更深区域的方向呈指数衰减（参看公式 23），因此，在 6GHz 以上，功率吸收主要被限制在体表。其中，全身平均吸收比吸收率的总功率与体表曝露面积近似成比例（Hirata 等.2007；Gosselin 等.2009；Kühnetal.2009；Uusitupaetal.2010）。例如，一项利用混响室的实验研究发现，从 1GHz 到 12 GHz，全身平均 SAR 与人体表面积之间存在很强的相关性（Flintoft 等.2014）。

由于全身平均 SAR 与入射功率密度和体表面积近似成正比（且与电磁场频率无关），ICNIRP 将全身参考频率从 6GHz 以下扩展到 300GHz。在（最高 10 GHz）范围内，ICNIRP（1998）将全身参考水平设为 $50Wm^{-2}$ 和 $10Wm^{-2}$（分别适用于职业和普通公众曝露）。由于尚无证据显示，这些水平参考将超过 6GHz 以上的全身曝露限值，或造成伤害，因此这些导则保留了 ICNIRP（1998）全身曝露条件的参考水平。

针对相应的参考水平，采用了与全身平均 SAR 基本限值相同的时间和空间平均。因此，入射功率密度是基于 30 分钟内的时间平均值，以及基于人体所占空间(全身空间)的空间平均值。

(五)>6GHz-300GHz 局部曝露的参考水平

频率 6GHz 以上的入射功率密度（S_{inc}）参考水平可从基本限值（即，从吸收功率密度，S_{ab}）中导出：

$$S_{inc} = S_{ab}T^{-1}(Wm^{-2})$$

(29)

其中 T 是透射率，定义如下：

$$\text{Transmittance} = 1 - |\Gamma|^2$$

(30)

反射系数Γ由组织的介电特性、体表形状、入射角和极化导出。对于横向电（TE）波入射，对应于最大透射比的角度是垂直于体表的角度，而对于横向磁（TM）波入射，则发生在布鲁斯特角（TM 波没有反射的入射角）。此外，对于射频电磁场波斜入射的情况，Li 等.（2019）已经阐明，在物体或边界表面上平均的 TE 波的入射功率和能量密度高于吸收功率和能量密度，而 TM 波在布鲁斯特角附近的吸收功率和能量密度接近入射功率和能量密度。研究人员还发现，垂直入射将导致温度上升的最坏情况（Li 等.2019）。

在本导则中，基本限值和参考水平研究一般采用多层人体模型。由于这代表了大多数情况下对最坏情况的建模，因此在这些导则中获得和使用的结果通常是保守的。

还有研究探讨了正常角度入射条件下透射比的变化和不确定度（Sasaki 等.2017）。随着频率从 10 GHz 增加到 300 GHz，透射比从 0.4 逐渐增加到 0.8。其他地方也报告了类似的趋势（Kanezaki 等.2009；Foster 等.2016；Hashimoto 等.2017）。

考虑到透射率的频率特性，局部曝露的参考水平是由 6GHz 时的 200w/m^2 到 300 GHz 时的 100w/m^2 的指数函数导出的。同样的方法也适用于普通公众参考水平的推导。基于“全身曝露参考水平从>6GHz 到 300GHz”一节中给出的相同原因，参考水平不能用于反应近场的合规性评估；同时需要评估此类情况下的基本限值。

在基本限制度量标准中，体表入射功率密度和吸收功率密度的时间和空间特性几乎相同，即 6 分钟，4 平方厘米或 1 平方厘米（30GHz 以上情况的附加标准）。因此，对于吸收功率密度使用的基本限值，对入射功率密度参考水平应采取相同的平均条件。

(六)肢体电流参考水平

肢体电流被定义为流经肢体的电流，例如流经脚踝或手腕的电流。因为他们的构成，局部高 SAR 可以出现在这些部位。踝关节和腕部高高导组织和低电导组织的体积比很小，导致电流集中到肌肉等高电导组织中，从而产生更大的 SAR。对于在全身共振状态下站在地平面上人体的情况，这种现象尤其明显。

肢体（脚踝和手腕）的局部 SAR 与流经肢体的电流密切相关。虽然局部 SAR 通常很难直接测量，但肢体 SAR 可以由肢体电流（I）导出，肢体电流相对容易测量，如下所示：

$$\text{SAR} = \frac{\sigma \text{E}^2}{\rho} = \frac{\text{J}^2}{\sigma\rho} = \frac{\text{I}^2}{\sigma\rho A^2} \quad (31)$$

其中 J 和 A 分别是电流密度和有效截面积。

设置肢体电流参考水平，是为了评估踝关节和腕关节的局部 SAR，尤其是在达到全身共振情况的接地人体踝关节周围的情况。在接地条件下，随着频率的增加高于全身共振频率，在肢体内的局部电流汇聚效率逐渐降低。因此，在更高的频率下，最大局部 SAR 通常不出现在四肢周围，因此，在这种情况下 SAR 与肢体位置不相关。

Dimbylow（2002）指出，在 10 MHz 至 80 MHz 的频段，成年男性接地模型体内 1A 的肢体电流，会引起脚踝部局部 10 组织平均 SAR 从 530 W kg^{-1} 增长至 970 W kg^{-1}。值得注意的是，10g 组织的平均区域的形状不是立体的，而是连续的，这导致比立方体产生更高的 SAR 值。基于这项研究，ICNIRP 将职业和普通公众曝露的肢体电流参考水平分别设置

为 100mA 和 45mA，以确保肢体符合局部 SAR 基本限值（例如，100mA 电流下四肢的最大局部 SAR 仅为 10 W kg^{-1}。） Taguchi 等（2018）证实了从 10MHz 到 100MHz，SAR 和踝关节的不同结构模型之间的关联。

类似地，Dimbylow（2001）计算了 10-g 局部 SAR 的 100 毫安腕部电流（包含邻近组织），结果在 100 kHz 时为 27 W kg^{-1} ，在 10 MHz 时降至 13 W kg^{-1} 。与连续组织内 SAR 相比，立方体内的 SAR 减少，上肢处理 100 mA 的电流也能确保腕部局部 SAR 的限值的保守性。在此基础上，ICNIRP 已将 ICNIRP（1998）中的低频范围从 10 MHz 修改为 100 kHz。

如公式（31）所示，局部 SAR 和肢体电流平方成正比。在公式（31），有效面积是一个常数，用于将肢体电流与 10g 局部平均 SAR 联系起来，它不仅取决于实际作用面积，还取决于组织分布/比率和电导率。由于电导率随着频率从 100 kHz 到 110 MHz 的增加而逐渐增加，因此在这个频率范围内，局部 SAR 和肢体电流之间的关系不是恒定的。例如，Dimbylow（2002）已经证明，当频率从 10MHz 增加到 80MHz 时，相同的肢体电流导致的局部 SAR 减半。这表明，相对于 ICNIRP（1998）的 10MHz 至 110MHz 范围的上限，肢体电流参考水平的上限可能会降低。然而，由于目前缺乏对这一问题的研究，ICNIRP 保持了与 ICNIRP（1998）相同的上限频率范围。

由于肢体电流参考水平与局部 SAR 基本限值相关，因此采用相同的时间平均值（即 6 分钟）。此外，由于肢体电流的平方值与局部 SAR 成比例，因此必须使用肢体电流的平方值进行时间平均（如“量值和单位”部分所述）。请注意，低于 6 分钟的曝露温升仅与频率高于 400 MHz 的情况有关，该频率高于肢体电流的频率上限。因此，小于 6 分钟的曝露不需要考虑肢体电流参考水平。

(七)短时曝露的参考水平（<6 分钟）

短时曝露的参考水平与短时曝露的基本限值相匹配，时短曝露的基本是根据限值 SA 和吸收能量密度设置的，分别高达和高于 6 GHz。

数值计算中需要考虑曝露在平面波中的多层人体模型，或靠近身体的典型源，如偶极子天线。

参考水平随时间间隔而变化，以匹配吸收能量密度基本（限值高于 6GHz），在 6GHz 以下使用类似功能以匹配 SA 基本限值。值得注意的是，吸收能量密度基本限值和相应的入射能量密度参考水平的时间函数比 SA 基本限制和相应的入射能量密度参考水平的时间函数更为保守，这意味着高于 6GHz 的参考水平要比低于 6GHz 的更保守。

由于参考水平是基于多层模型的，因此剂量测量中包含的不确定度并不显著。相反，对于真实的人体形状和结构来说，这种简化的技术过于保守。这一高估值随着频率的增加而降低，因为穿透深度相对于身体部位而言相对较小。形态上的变化并不显著。

参考文献

1.Adair ER, Blick DW, Allen SJ, Mylacraine KS, Ziriax JM, Scholl DM. Thermophysiological responses of human volunteers to whole body RF exposure at 220 MHz. Bioelectromagnetics 26:448–461; 2005.

2.Adair ER, Mylacraine KS, Allen SJ. Thermophysiological consequences of whole body resonant RF exposure (100 MHz) in human volunteers. Bioelectromagnetics 24:489–501; 2003.

3.Adair ER, Mylacraine KS, Cobb BL. Partial-body exposure of human volunteers to 2450 MHz pulsed or CW fields provokes similar thermoregulatory responses. Bioelectromagnetics 22:246–259; 2001.

4.Akimoto S, Kikuchi S, Nagaoka T, Saito K, Watanabe S,Takahashi M, Ito K. Evaluation of specific absorption rate for a fetus by portable radio terminal close to the abdomen of a pregnant woman. IEEE Trans Microwave Theory Tech 58:3859–3865; 2010.

5.Alekseev S, Radzievsky A, Szabo I, ZiskinM. Local heating of human skin by millimeter waves: effect of blood flow. Bioelectromagnetics 26:489–501; 2005.

6.Asakura H. Fetal and neonatal thermoregulation. J Nippon Med Sch 71:360–370; 2004.

7.Bakker J, Paulides M, Christ A, Kuster N, Van Rhoon G. Assessment of induced SAR in children exposed to electromagnetic plane waves between 10 MHz and 5.6 GHz. Phys Med Biol 55:3115; 2010.

8.Bakker JF, Paulides MM, Neufeld E, Christ A, Kuster N, Rhoon GCv. Children and adults exposed to electromagnetic fields at the ICNIRP reference levels: theoretical assessment of the induced peak temperature increase. Phys Med Biol 56: 4967; 2011.

9.Bernardi P, Cavagnaro M, Pisa S, Piuzzi E. SAR distribution and temperature increase in an anatomical model of the human eye exposed to the field radiated by the user antenna in a wireless LAN. IEEE Trans Microwave Theory Tech 46: 2074–2082; 1998.

10.Bernardi P, Cavagnaro M, Pisa S, Piuzzi E. Specific absorption rate and temperature increases in the head of a cellular-phone user. IEEE Trans Microwave Theory Tech 48:1118–1126; 2000.

11.Brockow T, Wagner A, Franke A, Offenbächer M, Resch KL. A randomized controlled trial on the effectiveness of mild waterfiltered near infrared whole-body hyperthermia as an adjunct to a standard multimodal rehabilitation in the treatment of fibromyalgia.Clin J Pain 23:67–75; 2007.

12.Buccella C, De Santis V, FelizianiM. Prediction of temperature increase in human eyes due to RF sources. IEEE Trans Electromagnet Compat 49(4):825–833; 2007.

13.Conil E, Hadjem A, Lacroux F, Wong MF, Wiart J. Variability analysis of SAR from 20 MHz to 2.4 GHz for different adult and child models using finite-difference time-domain. Phys Med Biol 53:1511–1525; 2008.

14.Diao Y, Leung SW, He Y, SunW, Chan KH, Siu YM, Kong R. Detailedmodeling of palpebral fissure and its influence on SAR and temperature rise in human eye under GHz exposures. Bioelectromagnetics 37:256–263; 2016.

15.Dimbylow P. The relationship between localised SAR in the arm and wrist current. Radiat Protect Dosim 95:177–179; 2001.

16.Dimbylow P. Resonance behaviour of whole-body averaged specific energy absorption rate (SAR) in the female voxel model,Naomi. Phys Med Biol 50:4053–4063; 2005.

17.Dimbylow P. SAR in the mother and foetus for RF plane wave irradiation.Phys Med Biol 52:3791–3802; 2007.

18.Dimbylow PJ. FDTD calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz. PhysMed Biol 42:479–490; 1997.

19.Dimbylow PJ. Fine resolution calculations of SAR in the human body for frequencies up to 3 GHz. Phys Med Biol 47:2835–2846; 2002.

20.Dimbylow PJ, Hirata A, Nagaoka T. Intercomparison of wholebody averaged SAR in European and Japanese voxel phantoms.Phys Med Biol 53:5883–5897; 2008.

21.Dufour A and Candas V. Ageing and thermal responses during passive heat exposure: sweating and sensory aspects. Eur J Appl Physiol 100:19–26; 2007.

22.Durney CH, Massoudi H, Iskander MF. Radiofrequency radiation dosimetry handbook. Fourth ed. Brooks AFB, TX: USAF School of Aerospace Medicine (USAFSAM-TR-85-73).

23.Edwards MJ, Saunders RD, Shiota K. Effects of heat on embryos and foetuses. Int J Hypertherm 19:295–324; 2003. Emery A, Kramar P, Guy A, Lin J. Microwave induced temperature rises in rabbit eyes in cataract research. J Heat Transfer 97:123–128; 1975.

24.Findlay R, Dimbylow P. Effects of posture on FDTD calculations of specific absorption rate in a voxel model of the human body. Phys Med Biol 50:3825–3835; 2005.

25.Findlay R, Lee A-K, Dimbylow P. FDTD calculations of SAR for child voxel models in different postures between 10 MHz and 3 GHz. Radiat Protect Dosim 135:226–231; 2009.

26.Flintoft I, Robinson M, Melia G, Marvin A, Dawson J. Average absorption cross-section of the human body measured at 1–12 GHz in a reverberant chamber: results of a human volunteer study. Phys Med Biol 59:3297–3317; 2014.

27.Flyckt V, Raaymakers B, Kroeze H, Lagendijk J. Calculation of SAR and temperature rise in a high-resolution vascularized model of the human eye and orbit when exposed to a dipole antenna at 900, 1500 and 1800 MHz. Phys Med Biol 52:2691–2701; 2007.

28.Foster KR, Ziskin MC, Balzano Q. Thermal response of human skin to microwave energy: a critical review. Health Phys 111: 528–541; 2016.

29.Foster KR, Ziskin MC, Balzano Q, Bit-Babik G. Modeling tissue heating from exposure to radiofrequency energy and relevance of tissue heating to exposure limits: heating factor. Health Phys 115:295–307; 2018.

30.Fujimoto M, Hirata A, Wang J, Fujiwara O, Shiozawa T. FDTDderived correlation of maximum temperature increase and peak SAR in child and adult head models due to dipole antenna. IEEE Trans Electromagnet Compat 48:240–247; 2006.

31.Funahashi D, Hirata A, Kodera S, Foster KR. Area-averaged transmitted power density at skin surface as metric to estimate surface temperature elevation. IEEE Access 6:77665–77674; 2018.

32.Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Phys Med Biol 41:2271–2293; 1996.

33.Gandhi OP, LiQ-X,KangG. Temperature rise for the human head for cellular telephones and for peak SARs prescribed in safety guidelines. IEEE Trans Microwave Theory Tech 49:1607–1613; 2001.

34.Gosselin M-C, Christ A, Kühn S, Kuster N. Dependence of the occupational exposure to mobile phone base stations on the properties of the antenna and the human body. IEEE Trans Electromagnet Compat 51: 227–235; 2009.

35.Gowland P, De Wilde J. Temperature increase in the fetus due to radio frequency exposure during magnetic resonance scanning. Phys Med Biol 53:L15–L18; 2008.

36.Guy AW, Lin JC, Kramar PO, Emery AF. Effect of 2450-MHz radiation on the rabbit eye. IEEE TransMicrowave Theory Tech 23:492–498; 1975.

37.Hashimoto Y, Hirata A,Morimoto R, Aonuma S, Laakso I, Jokela K, Foster KR. On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz. Phys Med Biol 62:3124–3138; 2017.

38.HeW, Xu B, Gustafsson M,Ying Z, He S. RF compliance study of temperature elevation in human headmodel around 28GHz for 5G user equipment application: simulation analysis. IEEE Access 6:830–838; 2018.

39.Hirata A. Temperature increase in human eyes due to near-field and far-field exposures at 900MHz, 1.5 GHz, and 1.9 GHz. IEEE Trans Electromagnet Compat 47:68–76; 2005.

40.Hirata A, Asano T, Fujiwara O. FDTD analysis of human bodycore temperature elevation due to RF far-field energy prescribed in the ICNIRP guidelines. PhysMed Biol 52:5013–5023; 2007.

41.Hirata A, Asano T, Fujiwara O. FDTD analysis of body-core temperature elevation in children and adults for whole-body exposure. Phys Med Biol 53:5223–5238; 2008.

42.Hirata A, Fujimoto M, Asano T, Jianqing W, Fujiwara O, Shiozawa T. Correlation between maximum temperature increase and peak SAR with different average schemes and masses. IEEE Trans Electromagn Compat 48:569–578; 2006.

43.Hirata A, Fujiwara O. The correlation between mass-averaged SAR and temperature elevation in the human head model exposed to RFnear-fields from 1 to 6GHz. PhysMed Biol 54:7227–7238; 2009.

44.Hirata A, Fujiwara O, Nagaoka T, Watanabe S. Estimation of whole-body average SAR in human models due to plane-wave exposure at resonance frequency. IEEE Trans Electromagnet Compat 52:41–48; 2010.

45.Hirata A, Kodera S, Wang J, Fujiwara O. Dominant factors influencing whole-body average SAR due to far-field exposure in whole-body resonance frequency and GHz regions. Bioelectromagnetics 28:484–487; 2007.

46.Hirata A, Laakso I, Ishii Y, Nomura T, Chan KH. Computation of temperature elevation in a fetus exposed to ambient heat and radio frequency fields. Numerical Heat Transfer, Part A: Appl 65:1176–1186; 2014.

47.Hirata A, Laakso I, Oizumi T, Hanatani R, Chan KH,Wiart J. The relationship between specific absorption rate and temperature elevation in anatomically based human body models for plane wave exposure from 30 MHz to 6 GHz. Phys Med Biol 58: 903–921; 2013.

48.Hirata A, Nagaya Y, Ito N, Fujiwara O, Nagaoka T, Watanabe S. Conservative estimation of whole-body average SAR in infant model for 0.3-6 GHz far-field exposure. Phys Med Biol 129: 2102–2107; 2009.

49.Hirata A, Shiozawa T. Correlation of maximum temperature increase and peak SAR in the human head due to handset antennas. IEEE Trans Microw Theory Tech 51:1834–1841; 2003.

50.Hirata A, Sugiyama H, Fujiwara O. Estimation of core temperature elevation in humans and animals for whole-body averaged SAR. Prog Electromagnet Res 99:53–70; 2009.

51.Hirata A,Watanabe S, Fujiwara O, Kojima M, Sasaki K, Shiozawa T. Temperature elevation in the eye of anatomically based human head models for plane-wave exposures. Phys Med Biol 52:6389–6399; 2007.

52.Hirata A, Yanase K, Laakso I, Chan KH, Fujiwara O, Nagaoka T, Watanabe S, Conil E, Wiart J. Estimation of the whole-body averaged SAR of grounded human models for plane wave exposure at respective resonance frequencies. Phys Med Biol 57:8427–8442; 2012.

53.Ibrahim A, Dale C, Tabbara W, Wiart J. Analysis of the temperature increase linked to the power induced by RF source. Prog Electromagn Res 52:23–46; 2005.

54.International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Review of concepts, quantities, units, and terminology for non-ionizing radiation protection. Health Phys 49:1329–1362; 1985.

55.International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys 74:494–521; 1998.

56.International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Reviewof scientific evidence on dosimetry, biological effects, epidemiological observations, and health consequences concerning exposure to high frequency electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Munich: International Commission on Non-ionizing Radiation Protection; 2009.

57.International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.Statement on the “guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz).” Health Phys 97:257–258; 2009.

58.International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Phys 99:818–836; 2010.

59.Kühn S, JenningsW, Christ A, Kuster N. Assessment of induced radio-frequency

electromagnetic fields in various anatomical human body models. Phys Med Biol 54:875–90; 2009.

60.Kühn S, JenningsW, Christ A, Kuster N. Assessment of induced radio-frequency electromagnetic fields in various anatomical human body models. Phys Med Biol 54:875–890; 2009.

61.Kanezaki A, Hirata A, Watanabe S, Shirai H. Effects of dielectric permittivities on skin heating due to millimeter wave exposure. Biomed Eng Online 8:20; 2009.

62.KarampatzakisA, Samaras T. Numericalmodeling of heat andmass transfer in the human eye under millimeter wave exposure. Bioelectromagnetics 34:291–299; 2013.

63.Kawai H, Nagaoka T, Watanabe S, Saito K, Takahashi M, Ito K. Computational dosimetry in embryos exposed to electromagnetic plane waves over the frequency range of 10 MHz–1.5 GHz. Phys Med Biol 55:N1; 2009.

64.Kodera S, Hirata A, Funahashi D, Watanabe S, Jokela K, Croft RJ. Temperature rise for brief radio-frequency exposure below 6GHz. IEEE Access 6:65737–65746; 2018.

65.Laakso I. Assessment of the computational uncertainty of temperature rise and SAR in the eyes and brain under far-field exposure from 1 to 10 GHz. Phys Med Biol 54:3393–3404; 2009.

66.Laakso I, Hirata A. Dominant factors affecting temperature rise in simulations of human thermoregulation during RF exposure. Physics in Medicine and Biology 56:7449–7471; 2011.

67.Laakso I, Morimoto R, Heinonen J, Jokela K, Hirata A. Human exposure to pulsed fields in the frequency range from 6 to 100 GHz. Phys Med Biol 62:6980–6992; 2017.

68.Lee A-K, Choi H-D. Determining the influence of Korean population variation on whole-body average SAR. Phys Med Biol 57:2709–2725; 2012.

69.Li K, Sasaki K,Watanabe S, Shirai H. Relationship between power density and surface temperature elevation for human skin exposure to electromagnetic waves with oblique incidence angle from 6 GHz to 1 THz. Phys Med Biol 64:065016; 2019.

70.McIntosh RL, Anderson V. SAR versus VAR, and the size and shape that provide the most appropriate RF exposure metric in the range of 0.5–6 GHz. Bioelectromagnetics 32:312–321; 2011.

71.Morimoto R, Hirata A, Laakso I, Ziskin MC, Foster KR. Time constants for temperature elevation in human models exposed to dipole antennas and beams in the frequency range from 1 to 30 GHz. Phys Med Biol 62:1676–1699; 2017.

72.Morimoto R, Laakso I, De Santis V, Hirata A. Relationship between peak spatial-averaged specific absorption rate and peak temperature elevation in human head in frequency range of 1–30 GHz. Phys Med Biol 61:5406–5425; 2016.

73.Nagaoka T, Niwa T, Watanabe S. Specific absorption rate in mothers and fetuses in the second and third trimesters of pregnancy.Int J Microwave Opt Tech 9:34–38; 2014.

74.Nagaoka T, Togashi T, Saito K, Takahashi M, Ito K,Watanabe S.An anatomically realistic

whole-body pregnant-woman model and specific absorption rates for pregnant-woman exposure to electromagnetic planewaves from 10 MHz to 2 GHz. Phys Med Biol 52:6731–6745; 2007.

75.Nagaoka T,Watanabe S, Sakurai K, Kunieda E, TakiM, Yamanaka Y. Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry. Phys Med Biol 49:1–15; 2004.

76.Nagaoka T, Watanabe S. Development of voxel models adjusted to ICRP reference children and their whole-body averaged SARs for whole-body exposure to electromagnetic fields from 10 MHz to 6 GHz. IEEE Access 7:135909–135916; 2019.

77.Nelson DA, Curran AR, Nyberg HA, Marttila EA, Mason PA, Ziriax JM. High-resolution simulations of the thermophysiological effects of human exposure to 100 MHz RF energy. Phys Med Biol 58:1947–1968; 2013.

78.Oizumi T, Laakso I, Hirata A, Fujiwara O,Watanabe S, Taki M, Kojima M, Sasaki H, Sasaki K. FDTD analysis of temperature elevation in the lens of human and rabbit models due to near-field and far-field exposures at 2.45 GHz. Radiat Protect Dosim 155:284–291; 2013.

79.Razmadze A, Shoshiashvili L, Kakulia D, Zaridze R, Bit-Babik G, Faraone A. Influence of specific absorption rate averaging schemes on correlation between mass-averaged specific absorption rate and temperature rise. Electromagnetics 29:77–90; 2009.

80.Samaras T, Kalampaliki E, Sahalos JN. Influence of thermophysiological parameters on the calculations of temperaturerise in the head ofmobile phone users. IEEE Trans Electromag Compat 49:936–939; 2007.

81.Sasaki K, Mizuno M,Wake K,Watanabe S. Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz.Phys Med Biol 62:6993–7010; 2017.

82.Sasaki K, Wake K, Watanabe S. Measurement of the dielectric properties of the epidermis and dermis at frequencies from0.5 GHz to 110 GHz. Phys Med Biol 59:4739; 2014.

83.Taguchi K, Laakso I, Aga K, Hirata A, Diao Y, Chakarothai J,Kashiwa T. Relationship of external field strength with local and whole-body averaged specific absorption rates in anatomical human models. IEEE Access 6:70186–70196; 2018.

84.Takei R, Nagaoka T, Nishino K, Saito K, Watanabe S, Takahashi M. Specific absorption rate and temperature increase in pregnant women at 13, 18, and 26 weeks of gestation due to electromagnetic wave radiation from a smartphone. IEICE Comm Exp: 2018XBL0026; 7(6):212–217; 2018.

85.Tateno A, Akimoto S, Nagaoka T, Saito K,Watanabe S, Takahashi M, Ito K. Specific absorption rates and temperature elevations due to wireless radio terminals in proximity to a fetus at gestational ages of 13, 18, and 26weeks. IEICE Trans Comm97:2175–2183; 2014.

86.Uusitupa T, Laakso I, Ilvonen S, Nikoskinen K. SAR variation study from 300 to 5000 MHz for 15 voxel models including different postures. Phys Med Biol 55:1157–1176; 2010.

87.Van Leeuwen GM, Lagendijk JJ, Van Leersum BJ, Zwamborn AP, Hornsleth SN, Kotte AN. Calculation of change in brain temperatures due to exposure to a mobile phone. Phys Med

Biol 44:2367–2379; 1999.

88. Vermeeren G, Joseph W, Olivier C, Martens L. Statistical multipath exposure of a human in a realistic electromagnetic environment. Health Phys 94:345–354; 2008.

89. Wainwright P. Computational modeling of temperature rises in the eye in the near field of radiofrequency sources at 380, 900 and 1800 MHz. Phys Med Biol 52:3335–3350; 2007.

90. Wang J, Fujiwara O. FDTD computation of temperature rise in the human head for portable telephones. IEEE Trans Microwave Theory Tech 47:1528–1534; 1999.

91. Ziskin MC,Morrissey J. Thermal thresholds for teratogenicity, reproduction, and development. Int J Hypertherm 27:374–387; 2011.

附录 B：健康风险评估文献

一、简介

世界卫生组织（WHO）对关于射频电磁场（EMFs）和健康的文献进行了深入的研究，该文献于 2014 年作为公众咨询环境健康准则进行了发布。本文是关于射频电磁场对健康造成不利影响的最全面和的一份独立评估报告。此外，欧盟倡议组织-新出现和新发现健康风险科学委员会（SCENIHR）编制了一份关于电磁场曝露对健康潜在影响的报告（SCENIHR 2015），瑞典辐射安全局（SSM）也就这一问题编制了几份国际报告（SSM 2015, 2016, 2018）。基于此，本导则将上述文献论述作为与射频电磁场曝露有关的健康风险评估的基础，而不是对其它独立研究报告进行综合阐述。但是，基于全面性和完整性考虑，ICNIRP 也考虑了上述文件出版后发表的最新研究。ICNIRP 关于射频健康文献的描述会在下文中做简要概述，同时通过一定数量的举例来辅助解释，并阐述了 ICNIRP 得出的相关结论。

下文中关于射频电磁场对生物和健康影响的研究汇总报告关注于人体系统、过程和特殊疾病的影响。该项研究致力于确定对人类健康不利影响的阈值。研究领域包括对细胞、动物和人类的实验测试，以及评估射频电磁场与一系列潜在的，与健康相关结果之间关系的人体观察研究。实验研究的优点是能够控制大量的潜在干扰因子和控制射频电磁场曝露。然而，在与实际曝露环境进行比较时，实验研究是有局限性的。比较与真实曝露环境的结果，再用足够的曝露时间以便模拟疾病过程，将体外和动物研究结果与人体结果联系起来也可能是困难的。流行病学研究与社区之间的实际健康关系更为密切，但大部分是观察性的结果。因此，基于不同的研究类型，各种类型的错误和偏见都值得关注。这些包括干扰因子、选择偏倚、信息偏倚、反向因果关系和曝露的错误分类；一般而言，前瞻性研究受偏倚的影响最小，但对于罕见疾病而言，需要大量样本。因此，重要的是关注一系列研究类型的范畴，以便得出有关射频曝露与不利健康影响之间关系的有用结论。

值得注意的是，ICNIRP 是基于不利健康效应的导则，需要对生物效应和不利健康效应间的差异区别处理。也就是说，只有产生不利健康的影响才需要对人类进行保护限制。关于射频电磁场对健康影响的研究往往集中在一些受到特别关注的领域，而其它领域很少或根本没有受到关注。目前还没有足够的研究来探讨射频电磁场与骨骼、肌肉、呼吸、消化和排泄系统之间的潜在关系。因此，本文不过多赘述。本文关注的是不同类型的射频电磁场曝露对健康产生不利影响的可能性，包括正弦波（如连续波）和非正弦波（如脉冲）电磁场，以及急性和慢性曝露。

二、脑生理学和功能

(一)脑电活动和认知功能

面向于更高层面的认知功能的人类研究已在 ICNIRP（1998）基本限制值中有所阐述。这主要通过功能测量和对脑电图(EEG)和脑血流(CBF)测量结果分析来评估的(分别是对脑电活动和血流/代谢的敏感测量)。大多数关于认知表现、CBF 或事件相关电位(脑电图的衍生物)的双盲人体实验研究都测量了认知功能，但并没有涉及射频电磁场曝露有关的描述。这其中有一些零星的相关报告，但是这些报告并没有体现出一致性或形成有意义的模式。可能是因为，这一结果是来源于大量统计比较和突发情况的结果。因此，没有对功能、CBF 或事件相关的潜在测量认知功能产生不利影响的射频电磁场的实证报告。分析脑电图频率成分的研究已经明确地表明，清醒脑电图中的 8-13Hz α波和睡眠脑电图中的 10-14Hz“睡眠纺锤”频率范围，受到比能量吸收率（SAR）<2W kg^{-1} 的射频曝露的影响，但没有证据表明这些与不利健康影响有关（例如。，Loughran 等人。2012 年）。

啮齿动物和非人灵长类动物全身曝露于射频电磁场会导致食物强化记忆功能减退，暴露剂量对于大鼠为全身平均 SAR>5W kg^{-1}，非人灵长类动物全身平均 SAR>4W kg^{-1}，这与

身体核心温升约 1℃有关。然而尚无迹象表明，这些变化是由于认知能力下降，而不是因为正常温度诱导引起的主观能动性下降（如：饥饿）。这种主观能动性的改变被认为是正常且可逆的热调节反应，并且其本身不会对健康产生不利影响。类似的，非人灵长类动物的行为变化引起体温降低，虽然不被认为是有害健康的影响，在全身平均 SAR 为 1W kg^{-1} 也被观测到，其阈值与急性、反复曝露和长期曝露相同。

对于更高认知功能的流行病学研究目前非常有限。有报道称，射频电磁场对功能指标产生了细微的改变，但该发现又被证明是自相矛盾的。因为，目前没有证据表明，该报告中的变化与射频电磁场的曝露有关，对观察到的影响的其他解释是可能的。

总之，没有确凿的实验或流行病学证据表明，曝露于射频电磁场会影响与健康相关的更高的认知功能。

(二)症状和健康

有研究表明，射频电磁场可能影响情绪、行为特征和症状。许多人类实验研究测试了健康状况或症状的急性变化，这些都没有证实曝露的任何确凿的影响。一小部分人群将非特殊性症状归因于不同类型的射频电磁场曝露，这被称为由电磁场引起的特发性环境不耐收（IEI-EMF）。双盲实验研究一直未能确定射频电磁场曝露与 IEI-EMF 人群，以及健康人群样本中这类症状之间的关系。这些实验研究提供了一个证据，即“相信曝露”（例如，所谓的“安慰剂”效应）是相关症状的决定因素，而不是曝露本身，（例如，Eliti 等.2018；Verrender 等.2018）。

流行病学研究表明，来自固定位置的发射器和近身使用设备的射频电磁场曝露对症状和健康都有潜在且长期的影响。但是，除了少数例外，这些都是关于症状和曝露的自我申报信息的横断面研究结果。在这些研究中，需要聚焦和关注选择偏差、报告偏差、不良曝露评估和安慰剂效应造成的影响。在对发射机的研究中，进行客观的曝露测量或前瞻性地采集曝露信息时，人们没有观察到曝露与症状或愉悦程度之间的一致关联。在手机使用的相关研究中，人们观察到与症状和问题行为的关联。但是，这些研究通常无法分辨是射频电磁场曝露的潜在影响，还是手机使用过程中其它后果引起的影响。例如，当人们晚上使用手机， 往往造成睡眠不足的情况。总的来说，流行病学研究没有提供充分的证据，证明射频电磁场曝露与症状或健康存在因果关系。

然而，有证据表明，在足够高的射频电磁场曝露水平上，可以引起疼痛。Walters 等（2000）报告，在 94GHz 时，背部曝露 3 秒，疼痛阈值为 12.5kW/m^{-2}。与此同时，温度从 34℃升高至 43.9℃（以每秒 3.3℃的速率）。这个绝对温度阈值与 Torbjork 等. (1984)的结论一致。在 43℃时，他观察到疼痛的中位阈值。该值与同一时段的测量的，伤害感受器反应阈值相符（41℃和 43℃）。

另一例由射频电磁场引起的疼痛是由于接触电流间接曝露引起的。环境中的射频电磁场通过导电物体被定向传导到人体，以及由此产生与频率相关的电流，可刺激神经，引起疼痛和/或损伤组织。由接触电流引起的感应电流阈值很难确定，疼痛感是对健康影响的最适宜的阈值评估，其对应的儿童和成人的感应电流阈值分别约为 10 和 20mA（来自 Chatterjee 等的推断，1986）。

综上所述，除疼痛外，没有任何关于射频电磁场曝露对症状和健康的不良影响的说明。而疼痛与高曝露水平下的高温有关（直接和间接射频曝露）。在 94 GHz 时，曝露于背部的疼痛的直接影响阈值约为 12.5 kW/m^2 附近，这符合热生理学知识。对于 100 kHz 和 110 MHz 之间的电磁场对儿童和成人的间接影响（接触电流）的阈值分别在 10 和 20mA 之间。

(三)其他脑生理学和相关功能

目前，已经开展了大量关于射频电磁脉冲对生理功能的潜在不利影响可能对健康产生不利影响的研究，主要使用的是体外技术。这包括多种细胞系和评估技术，例如细胞内和细胞间信号传导，膜离子通道电流和输入阻抗，Ca^{2+}动力学，信号转导途径，细胞因子表达，神经退行性生物标志物，热休克蛋白和氧化应激过程的评估。有一些关于射频电磁场诱导白蛋白穿过大鼠血脑屏障渗漏的报告（例如 Nittby 等.2009），但是由于研究方法的局限性以及独立验证结果缺乏，目前还没有相关影响的证据。一些研究也测试了射频电磁脉冲与已知有害因素共同曝露的影响，但目前尚无会影响上述结论的证据。

强脉冲低频电场（带有射频成分）可以使细胞膜变得通透，允许细胞内外的物质交换（Joshi 和 Schoenbach 2010）：这被称为电穿孔。据报道，曝露于未被调制的 18 GHz 电场也会产生类似的影响（Nguyen 等.2017）。这两种曝露都需要非常高的场强（例如，在低频电场的情况下，组织中为 10 kV m^{-1}（峰值），18 GHz 时为 5 kW kg^{-1}）。在实际曝露环境中，很难有这么高的能引起不利人类健康效应的曝露水平。同时，鉴于其极高的阈值，基于较低阈值的影响限制可以保护这些曝露水平不受影响。因此，电穿孔问题在此不做进一步讨论。

总之，没有证据表明射频电磁场对人体健康的生理过程造成损伤。

三、听觉、前庭和视觉功能

许多涉及动物和某些人体研究开展了射频电磁场对听觉、前庭、视觉功能和病理学的潜在影响测试。

亚毫秒射频电磁场脉冲可以产生可感知的声音。具体地说，在 200-3000MHz 的射频电磁场中，头部曝露于短射频脉冲（约 35-100 微秒）会引起微波听力。耳蜗中的感觉细胞通过与正常听力相同的过程检测到这种热弹性膨胀。这种现象被认为是一种短暂的低谁批评噪声，通常被描述为“咔嗒”或“嗡嗡”声。例如，Róschmann（1991）表明 2.45GHz 的 10 微秒和 20 微秒的脉冲产生了 4.5mJkg^{-1}/脉冲的比能量吸收（SA）。据估计每个脉冲的温升约为 0.00001℃。这些脉冲几乎听不见，这显示该声响恰巧位于听力阈值处。虽然较高强度的 SA 脉冲可能会导致更显著的声音效果，但在任何实际的曝露场景中，尚无证据显示，微波听力会影响健康。因此，本导则并未对微波听力做专门的限制说明。

此外，研究人员还开展了实验性和观察性研究，以测试移动电话曝露电磁场的有害影响。一些机构也对动物模型中听觉功能和细胞结构的影响进行了研究和调查。然而，并未形成一致性的实验结果。

除了上述行为和电生理指标外，许多研究还测试了射频电磁场曝露对人类听觉、前庭和眼部功能的急性影响。这些试验主要是在低于 ICNIRP（1998）基本曝露限制水平下，利用类手机信号开展的。尽管有一些涉及相关影响的报告，仍缺乏采用更大量被试且更严谨的研究方法，其实验结果存在很大差异。

现有的研究集中在移动电话的使用上，但尚无证据表明射频电磁场曝露与耳鸣，听力障碍，前庭或眼功能的风险增加有关。

动物研究报告描述了曝露在射频电磁场中，由热效应引起形成兔眼白内障症状的可能性。发生这种情况的条件是，在低频情况下（<6 GHz），局部极高的 SAR 水平（100–140 W kg^{-1}），并保持数小时曝露照射温度升高数℃度。然而，兔类的实验模型比灵长类动物更容易形成白内障（灵长类动物与人类健康关系更密切），而且曝露于射频电磁场中的灵长类动物中尚未发现有白内障的情况。也未发现对眼睛的其它深层结构（如视网膜或虹膜）有明显影响。然而，在较高频率下，作为眼睛损伤浅表结构的研究模型（例如角膜）而言，兔子是很好的建模模型。与眼睛的后部相比，角膜的基线温度相对较低，因此需要非常高

的曝露水平才能从表面造成伤害。比如，Kojima 等.（2018）报告称，在 40 至 95 GHz 的频段，入射功率密度高于 1.4 kW m^{-2} 时，会对角膜产生不利的健康影响。500 W m^{-2} 以下，没有发现任何影响。作者的结论是，人的眨眼频率将排除对人的这种影响。（人类每 3 到 10 秒一次，而兔子每 5 到 20 分钟一次）

综上所述，目前还未证实对听觉、前庭或眼部功能或与人类健康相关的病理学的影响。在至少 1.4kw m^{-2} 的曝露条件下，兔子的浅表眼损伤的证据已经得到证实，但是这与人类的相关性还没有得到证明。

四、神经内分泌系统

一小部分研究已经测试了人类内分泌系统功能指标是否受射频电磁场曝露影响。包括褪黑激素、生长激素、黄体生成激素、皮质醇、肾上腺素和去甲肾上腺素等一系列激素均已经被实验测试过，目前没有观察到与曝露有关影响的一致性证据。

在动物体的研究中，在全身曝露于 4W kg^{-1} 的情况下，只有急性曝露，才会产生实质性变化。曝露影响是心脏温度升高 1℃ 或者更高。然而，目前尚无证据表明这会对健康产生影响。尽管有一些研究记录了某些神经内分泌指标伴随电磁场有依附性变化，但这些也没有得到有力证明。全文通篇研究了，在各种条件下，接触手机信号不会影响血浆中褪黑激素的水平或褪黑激素的代谢，雌激素或睾丸激素的含量，也不会影响啮齿动物的皮质酮或肾上腺皮质激素的含量。

射频电磁场曝露对流行病学研究中褪黑素水平影响仍具争议性，而且受到现有的方法学研究的限制。目前尚无高科学质量的关于其它激素与射频电磁场关联性的流行病学研究成果。

总之，观察到射频电磁场对神经内分泌系统的最低影响水平是 4 W kg^{-1}（在啮齿动物和灵长类动物中），但是没有证据表明这会影响人体或与人类健康有关。目前尚无其他有实质性影响的报告。

五、神经退行性疾病

目前尚无对神经退行性疾病不利影响的人类实验研究。

尽管有报告称，曝露于脉冲射频电磁场会增加大鼠的神经元死亡，这可能有助于增加神经退行性疾病的风险，但没有其它研究成果能证实这些结论。有一些涉及曝露影响的报告（例如大脑皮层神经递质释放的变化，海马体蛋白质表达，以及神经元中无细胞凋亡的自噬），但是并没有有力的证据表明，这些变化会导致神经退行性疾病。由于方法学以及其它方面的不足，目前并没有更多关于神经退行性病变影响的其它研究。

一项丹麦的流行病学研究探讨了使用手机对神经退行性疾病的潜在影响，并描述了降低使用手机对阿尔茨海默氏病，血管性痴呆和帕金森氏病发病的风险评估方法（Schütz 等.2009）。因为疾病的初期症状可能会阻止有早期症状的人开始使用手机，所以这些发现很可能是因果互换关系得出的。关于多发性硬化症的研究结果并不一致，在男性中没有观察到影响，而在女性中有增加危险边际效应的可能性，但是没有一致的曝露-效应模式。

综上所述，射频电磁场曝露对神经退行性疾病产生有害影响没有得到证实。

六、心血管系统、自主神经系统和温度调节

（如上所述），射频电磁场可以促使体内产热。尽管人类拥有一套非常有效的体温调节系统，但产生过多的热量会使心血管系统处于压力之下，并可能导致不利健康的影响。

大量的人体研究已经对心血管、自主神经系统和体温调节功能进行了探讨，包括对心

率和心率变异性、血压、身体、皮肤和手指温度以及皮肤电导的测量。大多数研究表明，射频电磁曝露对自主神经系统调节的末梢没有影响。有少量的研究显示，曝露产生的影响小，且不会对人体健康产生影响。这些报告一般都缺乏一致性，可能是由于方法上的限制或偶然性。据报道，随着更高强度的曝露，最高全身 SAR 可达约 1 W kg^{-1}（Adair 等.2001）。这与流汗和心血管反应中观察到的情况相似。身体核心温升幅度通常低于 0.2℃。

不同的是，在对动物研究中，由于曝露在较高强度的水平，经常产生过度调节的程度，温度升高至死亡的发生。比如，Frei 等.（1995）将大鼠曝露在 35 GHz, 全身曝露为 13W kg^{-1} 的磁场中，使身体核心温度升高 8℃（至 45℃），导致死亡。类似地，Jauchem 和 Frei（1997）报道过将大鼠曝露在 13.2 W kg^{-1} 的 350 MHz 射频电磁场中，热分解（此时，体温调节系统无法再应付体温升高的情况）发生在大约 42℃。将涉及对动物的研究发现直接与人类联系起来非常困难。人类比啮齿动物具备更有效的调节功能。Taberski 等.（2014）Djungarian 仓鼠在全身曝露于全身平均为4 W kg^{-1} 的 900 MHz 射频电磁场后，没有发现核心温度升高，唯一可检测到的结果是食物摄入减少（这与人体核心温度升高时，人类饮食减少有关）。

关于心血管、自主神经系统或体温调节结果的流行病学研究很少。目前还没有射频电磁场曝露与心血管健康措施之间的具备关联的证据。

总之，对于全身平均 SAR 低于约 4 Wkg^{-1} 的曝露，是否对心血管系统，自主神经系统或温度调节等人体健康因素造成伤害没有任何有力的证明。只有曝露于全身平均 SAR 大大高于 4W kg^{-1} 时，射频电磁场曝露才会对动物造成损伤。

七、免疫系统和血液学

射频电磁场曝露中，免疫功能和血液的瞬时变化之间相关性的研究没有形成一致性的结论。尽管人们开展了一些涉及动物的相关性研究，但研究主要方向还是在体外。

已开展的极少数人类研究表明，尚无证据显示射频电磁场会通过免疫系统或血液影响人类健康。

八、生育、生殖和儿童发育

少量涉及人类的实验研究表明，射频电磁场曝露对生殖和发育的可能有影响。一般研究集中在与生殖和发育相关的激素方面。如神经内分泌系统部分所述，没有证据表明神经内分泌系统受到射频电磁场的影响。其它研究试图通过研究发育的不同阶段解决了这个问题（如认知和脑电活动），以此确定随着年龄的增长，人体对射频电磁场的敏感性增加与否。目前没有证据表明发育阶段与该问题有关。

许多动物研究表明，曝露于有显著温升有关的射频电磁场会导致生殖和发育受到影响。这包括胚胎流产的增加，胎儿畸形和异常情况增加，胎儿体重减轻。此类曝露也可能导致男性生育力下降。但是，大量经过良好操作的实验研究成果也未能确定在全身平均 SAR 曝露水平高达 4 W kg^{-1} 时，射频电磁场曝露对发育是否造成的影响。特别是，一项关于四代的小老鼠生育力和发育的大型研究发现，在全身 SAR 水平高达 2.34 W kg^{-1} 时，没有发现任何不利健康的影响（Sommer 等.2009）。有些研究已经描述了低于这个曝露水平值时，雄性精子活力受到影响。但是这些研究在方法论上有局限性，所以研究的影响没有得到证实。

流行病学研究已经探讨了男性和女性不孕和怀孕与射频电磁场曝露之间的关系。一些流行病学研究探讨了射频电磁场与精子质量或男性不育之间的关系。但是，现有的研究不能提供与射频电磁场曝露相关的证据，因为它们在研究设计或曝露评估方面都有局限性。关于孕期母亲使用手机和对儿童神经发育的潜在影响，有一些流行病学研究可供参考。目前没有证据表明，母亲由于使用手机，曝露在射频电磁场中，会影响儿童认知或心理发育，

或导致发育关键期延迟。

总之，射频电磁场曝露对生育、生殖或与人类健康相关的发育没有不利影响。

九、癌症

大量关于细胞和分子过程的文献都与癌症特别相关。这其中包括对细胞增殖、分化和凋亡相关过程、原癌基因表达、遗传毒性、氧化应激增加和 DNA 链断裂的研究。尽管有报告称射频电磁场对诸多这些方面都有影响，但没有确凿的与健康相关的有力证据（Vijayalaxmi 和 Prihoda，2019）。

一些关于射频电磁场曝露对致癌作用的动物研究报告了一些阳性效应，但是，总的来说，这些研究在方法学或剂量学方面存在缺陷，或者其结果没有在独立的研究成果中得到验证。事实上，绝大多数研究都阐述了，在各类动物模型中，射频曝露不会引起致癌效应。一项重复的研究表明，孕期曝露于致癌物 ENU（乙基亚硝基脲）和射频电磁场的动物模型中，会增加肝和肺肿瘤的发病率。该研究表明，射频电磁场曝露可能会助推肿瘤发病（Lerchl 等.2015；Tillmann 等.2010）。由于缺乏量效关系，以及使用未验证与人体关系的肝和肺肿瘤（Nesslany 等人，2015）的小鼠模型。因此，其对人体健康影响的关联性尚不明朗。所以，需要进一步研究才能更好地理解这些研究成果。

最近的两项动物科研工作,研究了长期曝露于移动电话和移动通信基站射频电磁场的动物的致癌潜在因素，其中一项由美国国家毒理学计划（NTP2018 a 和 b）提供，另一个研究来自于 Ramazzini 研究所（Falcioni 等）发布.2018）。尽管这两项研究都利用了大量的动物标本、利用了最佳实验室实践环境以及观察了动物的全生命周期中的曝露情况，但结果仍存在着矛盾性和很强的局限性，这些局限性会影响制定曝露准则结果的有效性。特别重要的是，研究采用的统计方法不足以分辨在不同的照射条件之下，射频电磁场相关和偶然性差异之间的区别；研究中，由于采用了很高的电磁曝露，从而导致了体温剧烈变化，因此，很难对相关数据进行分析。而且，在这两项研究中没有一致性的发现。

因此，不论是单独考虑（例如 ICNIRP 2019），还是考虑其它动物和人类的致癌相关性研究（HCN 2014，2016），没有发现射频电磁场具有致癌性的有力证据。

目前，已经开展了大量关于手机使用和癌症风险的流行病学研究。大多数研究都聚焦于脑肿瘤、听神经瘤和腮腺肿瘤，因为这些肿瘤常常发生于靠近手机典型曝露源的地方（Rósli 等.2019）。然而，也有一些关于其他类型肿瘤的研究，如白血病、淋巴瘤、葡萄膜黑色素瘤、垂体瘤、睾丸癌和恶性黑色素瘤。除了少数例外，这些研究大多采用了病例对照设计，该设计可以追溯收集的关于手机使用过往历史的自报告信息。目前，只有两项具有前瞻性电磁场曝露信息的系列研究。还有一些研究面临随访时间太短，无法评估长期曝露的潜在影响。而长期随访的病例与可控研究的结果并不一致。

一项由国际癌症研究协会协调开展的关于大型对讲机方面的研究，目前尚未具备有力证据表明，普通手机用户患脑瘤、听神经瘤或腮腺肿瘤的风险会增加。同时，自手机应用问世以来，没有关于使用的时间越长，而曝露风险越大的评估报告（Interphone 2010、2011）。值得注意的是，虽然在听神经瘤和神经胶质瘤的累积通话时间的最高水平上观察到了较高的发生率，但在所有低累积通话时间组中都没有观察到趋势异常，也就是最低风险出现在倒数第二强暴露组中，在最低风险估计中，在最低限度曝露类别中。这一点，再加上这些研究中固有的回溯偏差，并不意味着风险会增加。在瑞典的一个病例对照研究中也观察到了类似的结果 (2014 年）。与此相反，瑞典 Hardell 组的一组病例对照研究报告显示，自手机开始使用不到五年后，听神经瘤和恶性脑瘤的发病率显著增加，累积发病时间也增加了三倍。然而，它们与许多国家或地区脑癌发病率的趋势不同。这些国家或地区自手机问世以来，发病率一直没有增加。

此外，没有队列研究（与病例对照研究不同，这些研究不受记忆或选择偏差的影响）报道关于移动电话用户中恶性胶质瘤、脑膜瘤、耳鼻神经瘤的发生率影响，或者通过前瞻性收集问卷评估移动电话使用量的报告来进行相关研究。其它类型肿瘤的研究也没有涉及与手机使用导致肿瘤风险增加的证据。只有一项关于儿童使用手机和脑瘤风险的研究（Aydin等.2011）。该研究未观察到脑肿瘤的风险增加现象。

在关于曝露于环境射频电磁场的研究中，例如来自无线电和电视发射机的电磁场，涉及儿童或成人结果中，均未有癌症风险增加的证据。射频电磁场职业曝露与癌症关系的研究，受制于实质性的方法学限制。目前，评估射频电磁辐射的致癌性研究没有足够的研究成果。

总的来说，在流行病学研究中，没有有力证据表明，一般人群曝露在射频电磁场中会致癌。总体来说，射频电磁场对诱发或发展癌症没有影响。

十、总结

目前，仅有的被证实的由于曝露于射频电磁场导致的不利健康影响是神经刺激，细胞膜通透性变化以及温升引起的影响。目前，尚无证据表明在低于 ICNIRP（1998）导则中限制水平的曝露水平下会产生不利健康的影响，也没有证据显示，在射频电磁场曝露低于这些限制水平的情况下，有某种相互作用机制可以会造成不利健康的影响。

参考文献

1.Adair ER, Mylacraine KS, Cobb BL. Human exposure to 2450MHz CWenergy at levels outside the IEEE C95.1 standard does not increase core temperature. Bioelectromagnetics 22:429–439; 2001.

2.Aydin D, Feychting M, Schüz J, Tynes T, Andersen TV, Schmidt LS, Poulsen AH, Johansen C, Prochazka M, Lannering B, Klæboe L, Eggen T, Jenni D, Grotzer M, Von derWeid N, Kuehni CE, Röösli M. Mobile phone use and brain tumors in children and adolescents: a multicenter case-control study. J National Cancer Inst 103:1264–1276; 2011.

3.Chatterjee I, Wu D, Gandhi OP. Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazard analysis in the VLF-MF band. IEEE Trans Biomed Engineer 33:486–494; 1986.

4.Eltiti S, Wallace D, Russo R, Fox E. Symptom presentation in idiopathic environmental intolerance with attribution to electromagnetic fields: evidence for a nocebo effect based on data re-analyzed from two previous provocation studies. Frontiers Psychol 9:1563; 2018.

5.Falcioni L, Bua L, Tibaldi E, Lauriola M, De Angelis L, Gnudi F, Mandrioli D, Manservigi M, Manservisi F, Manzoli I,Menghetti I, Montella R, Panzacchi S, Sgargi D, Strollo V, Vornoli A, Belpoggi F. Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz GSM base station environmental emission. Environment Res 165:496–503; 2018.

6.Frei MR, Ryan KL, Berger RE, Jauchem JR. Sustained 35-GHz radiofrequency irradiation induces circulatory failure. Shock 4:289–293; 1995.

7.Health Council of the Netherlands. Mobile phones and cancer: part 2. Animal studies on carcinogenesis. The Hague: Health Council of the Netherlands; Publication 22; 2014.

8.Health Council of the Netherlands. Mobile phones and cancer: part 3. Update and overall conclusions from epidemiological and animal studies. The Hague: HealthCouncil of theNetherlands; Publication 06; 2016.

9.International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys 74:494–522;1998.

10.International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP note: critical evaluation of two radiofrequency electromagnetic field animal carcinogenicity studies published in 2018. Health Phys 118(5):525–532; 2020.

11.Interphone Study Group. Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international casecontrol study. International J Epidemiol 39:675–694; 2010.

12.Interphone Study Group. Acoustic neuroma risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case–control study. Cancer Epidemiol 35:453–464; 2011.

13.Jauchem JR, Frei MR. Body heating induced by sub-resonant (350 MHz) microwave irradiation: cardiovascular and respiratory responses in anesthetized rats.

Bioelectromagnetics 18: 335–338; 1997.

14.Joshi RP, Schoenbach KH. Bioelectric effects of intense ultrashort pulses. Critical Rev Biomed Engineer 38:255–304; 2010.

15.Kojima M, Susuki Y, Sasaki K, Taki M, Wake K, Watanabe S, Mizuno M, Tasaki T, Sasaki H. Ocular effects of exposure to 40, 75 and 95 GHz Millimeter Waves. J Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 39(9):912–925; 2018.

16.Lerchl A, Klose M, Grote K, Wilhelm AF, Spathmann O, Fiedler T, Streckert J, Hansen V, Clemens M. Tumor promotion by exposure to radiofrequency electromagnetic fields belowexposure limits for humans. Biochem Biophys Res Comm 459: 585–590; 2015.

17.Loughran SP, McKenzie RJ, Jackson ML, Howard ME, Croft RJ. Individual differences in the effects of mobile phone exposure on human sleep: rethinking the problem. Bioelectromagnetics 33:86–93; 2012.

18.Nagaoka T, Watanabe S. Development of voxel models adjusted to ICRP reference children and their whole-body SARs for whole-body exposure to electromagnetic fields from 10 MHz to 6 GHz. IEEE Access 7:135909–135916; 2019.

19.Nesslany F, Aurengo A, Bonnet-BelfaisM, Lambrozo J. Comment on Lerchl study: "Tumor promotion in mice by exposure to radiofrequency electromagnetic fields stillwaiting evidence." Biochem Biophys Res Comm 467:101–102; 2015.

20.Nguyen THP, Pham VTH, Baulin V, Croft RJ, Crawford RJ, Ivanova EP. The effect of a high frequency electromagnetic field in the microwave range on red blood cells. Sci Rep 7:1–10; 2017.

21.Nittby H, Brun A, Eberhardt J, Malmgren L, Persson BR, Salford LG. Increased blood-brain barrier permeability in mammalian brain 7 days after exposure to the radiation from a GSM-900 mobile phone. Pathophysiol 6:103–112; 2009.

22.National Toxicology Program. Technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in Hsd:Sprague Dawley SD rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones. National Toxicology Program. Research Triangle Park, NC: NTP TR 595; 2018a.

23.National Toxicology Program. Technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in B6C3F1/N mice exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (1900 MHz) andmodulations (GSM and CDMA) used by cell phones. National Toxicology Program; NTP TR 596; 2018b.

24.Pettersson D, Mathiesen T, Prochazka M, Bergenheim T, Florentzson R, Harder H, Feychting M. Long-term mobile phone use and acoustic neuroma risk. Epidemiol 25:233–241; 2014.

25.Röösli M, Lagorio S, Schoemaker MJ, Schüz J, Feychting M. Brain and salivary gland tumors and mobile phone use: evaluating the evidence from various epidemiological study designs. Annual Rev Public Health 40:221–238; 2019.

26.Röschmann P. Human auditory system response to pulsed radiofrequency energy in RF coils for magnetic resonance at 2.4 to 170 MHz. Magnetic Resonance Med 21:197–215; 1991.

27.Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks. Potential health effects

of exposure to electromagnetic fields (EMF). Luxembourg: SCENIHR; 2015.

28.Schüz J, Waldemar G, Olsen JH, Johansen C. Risks for central nervous system diseases among mobile phone subscribers: a Danish retrospective cohort study. PLoS One 4:e4389; 2009. DOI 10.1371/journal.pone.0004389.

29.Sommer AM, Grote K, Reinhardt T, Streckert J, Hansen V, Lerchl A. Effects of radiofrequency electromagnetic fields (UMTS) on reproduction and development of mice: a multi-generation study. Radiat Res 171:89–95; 2009.

30.SSM. SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Recent research on EMF and health risk—tenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Luxembourg: Publication 19; 2015.

31.SSM. SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Recent research on EMF and health risk—eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Stockholm: SSM; Publication 15; 2016.

32.SSM. SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Recent Research on EMF and health risk—twelfth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Publication 09; 2018.

33.Taberski K, KloseM, Grote K, El Ouardi A, Streckert J, Hansen VW, Lerchl A. Noninvasive assessment of metabolic effects of exposure to 900 MHz electromagnetic fields on Djungarian Hamsters (Phodopus sungorus). Radiat Res 181:617–622; 2014.

34.Tillmann T, Ernst H, Streckert J, Zhou Y, Taugner F, Hansen V, Dasenbrock C. Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure in an ethylnitrosourea mouse model. International J Radiat Biol 86:529–41; 2010.

35.Torebjork HE, LaMotte RH, Robinson CJ. Peripheral neural correlates ofmagnitude of cutaneous pain and hyperalgesia: simultaneous recordings in humans of sensory judgments of pain and evoked responses in nociceptors with C-fibers. J Neurophysiol 51:325–339; 1984.

36.Verrender A, Loughran SP, Dalecki A, Freudenstien F, Croft RJ. Can explicit suggestions about the harmfulness of EMF exposure exacerbate a nocebo response in healthy controls? Environ Res 166:409–417; 2018.

37.Vijayalaxmi, Prihoda TJ. Comprehensive reviewof quality of publications and meta-analysis of genetic damage in mammalian cells exposed to non-ionising radiofrequency fields. Radiat Res 191:20–30; 2019.

38.Walters TJ, Blick DW, Johnson LR, Adair ER, Foster KR. Heating and pain sensation produced in human skin by millimetre waves: comparison to a simple thermal model. Health Phys 78:259–267; 2000.

39.World Health Organization. Radiofrequency fields; Public Consultation Document, released October 2014. Geneva: WHO; 2014.

国际非电离辐射防护委员会限制电磁场曝露导则
（100kHz-300GHz）

ICNIRP GUIDELINES FOR
LIMITING EXPOSURE TO ELECTROMAGNETIC FIELDS (100KHz TO 300GHz)

国际非电离辐射防护委员会 著

浙江省辐射环境监测站
生态环境部辐射环境监测技术中心 译