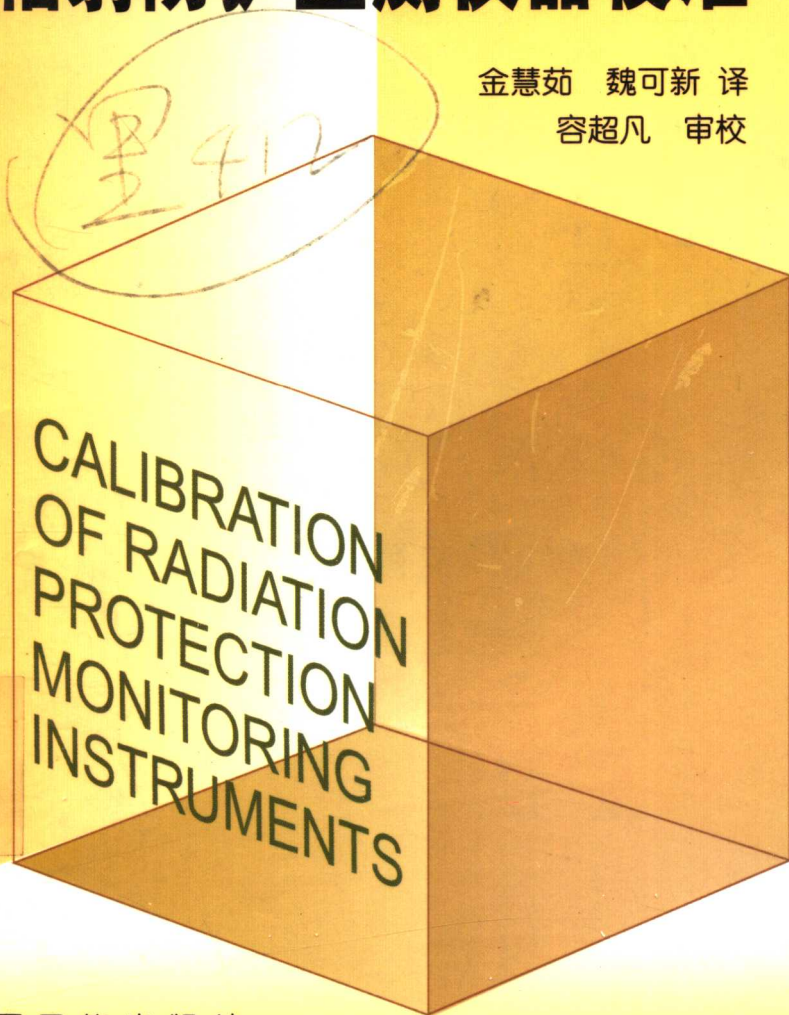




安全报告丛书 No.16

辐射防护监测仪器校准

金慧茹 魏可新 译
容超凡 审校



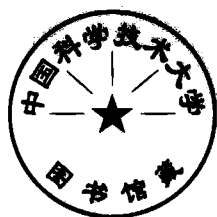
原子能出版社

国际原子能机构安全报告丛书 No.16

辐射防护监测仪器校准

金慧茹 魏可新 译

容超凡 审校



原子能出版社

图字:01-2002-4207号

图书在版编目(CIP)数据

辐射防护监测仪器校准/国际原子能机构编;金慧茹,魏可新译. -北京:原子能出版社,2002.8

(国际原子能机构安全报告丛书第16号)

ISBN 7-5022-2676-1

I. 辐… II. ①国… ②金… ③…魏 III. 辐射防护-辐射监测器-校准 IV. TL8

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第062088号

Safety Reports Series No. 16

Calibration of Radiation Protection Monitoring

Instruments ©IAEA, 2002

(中译本的出版得到国际原子能机构的许可,但
国际原子能机构声明不对该中译本承担责任)

原子能出版社出版 发行

责任编辑:郭文元

社址:北京市海淀区阜成路43号 邮政编码:100037

保定市印刷厂印刷 新华书店经销

开本:850×1168 mm 1/32 印张:5 字数:133千字

2002年8月北京第1版 2002年8月北京第1次印刷

印数:1—500

定价:19.50元

前 言

职业辐射防护是国际原子能机构(IAEA)为其成员国的辐射安全提供支持的主要组成部分。IAEA 职业防护计划的目标是通过开发、使用现行职业辐射防护技术和应用在工作场所辐照限制导则,促进国际间协作,以达到职业辐射防护最佳化。

联合国粮农组织(FAO)、IAEA、国际劳工组织(ILO)、经济合作和发展组织的核能机构(OECD/NEA)、泛美健康组织(PAHO)和世界卫生组织(WHO)共同制订的辐射源安全(BSS)和电离辐射防护国际基本安全标准的职业辐射防护要求,列于附录 I。

在工业、医疗机构、研究机构和大学中,以及核燃料循环的工厂中,均可能存在电离辐射的职业照射。对于容许和安全利用辐射、放射性物质和核能,对工作人员应有足够的辐射防护是基本要求。在三个相互关联的安全导则——职业辐射防护(RS-G-1.1);外辐射源产生的职业照射的评价(RS-G-1.3)和吸入放射性核素产生的职业照射的评价(RS-G-1.2)中给出了 BSS 应用在职业防护中的要求。

本安全报告为建立和使用辐射监测仪器校准设备提供了导则。它考虑了过去十年出现的主要变化和发展,反映了国际上现行可接受的原则,给出了推荐的实际校准方法。

本书是多位专家努力的结果,他们为其提供了素材、草案和评论文本。IAEA 对所有这些提供者的帮助表示衷心的感谢。负责本报告编制的官员是 R.Griffith 和 R.Ouvrard。

目 录

1. 引 言	(1)
1.1 背 景	(1)
1.2 范 围	(2)
1.3 校准的目的	(2)
2. 术语、量和单位	(3)
2.1 术 语	(3)
2.2 用于表面污染监测仪校准的量和实用量	(7)
2.3 对剂量计及剂量率计的实用量和体模	(8)
2.4 其他量	(16)
3. 校准基础	(19)
3.1 校准和测试	(19)
3.2 参考条件和标准试验条件	(23)
3.3 可溯源性	(25)
3.4 用参考仪器确定校准因子和响应	(25)
3.5 在已知辐射场中确定校准因子和响应(校准方法 4)	(35)
3.6 对校准的附加考虑	(36)
3.7 比对计划	(37)
3.8 记录和证书	(40)
4. 光子测量仪器的校准	(41)
4.1 概 述	(41)
4.2 ISO 光子参考辐射的转换系数	(45)
4.3 参考仪器	(58)
4.4 辐射场特性的测量和校准	(61)
4.5 设 备	(73)
5. β 测量仪器的校准	(78)

5.1	校准量和转换系数	(78)
5.2	参考 β 辐射	(79)
5.3	参考标准和辐射场校准	(83)
5.4	设 备	(87)
6.	中子测量仪器的校准	(88)
6.1	校准量和转换系数	(88)
6.2	参考中子辐射	(90)
6.3	设 备	(94)
6.4	参考仪器	(96)
6.5	辐射场校准	(98)
6.6	对校准测量仪的附加建议	(104)
7.	表面污染监测仪的校准	(105)
7.1	概 述	(105)
7.2	参考标准源	(106)
7.3	仪器校准方法	(109)
8.	测量不确定度	(111)
8.1	引 言	(111)
8.2	关于误差和不确定度的一般考虑	(112)
8.3	A 类标准不确定度	(113)
8.4	B 类标准不确定度	(114)
8.5	合成不确定度和扩展不确定度	(116)
8.6	不确定度的传递	(117)
8.7	定 义	(118)
附录 I	确定仪器校准总不确定度的实例	(120)
附录 II	确定一个周围剂量当量率仪校准因子 N_1 的实例——在无 监测器条件下使用参考仪器校准(校准方法 I)	(124)
附录 III	用监测器确定光子测量仪器校准因子的实例(校准方法 II)	(127)
参考文献		(137)
书目		(147)

1. 引言

1.1 背景

自从 1971 年发表技术系列报告 No.133^[1]之后,由国际标准化组织(ISO)制订的标准参考辐射场和校准方法有了重大的变化。同时,国际电工委员会(IEC)已制订了很多关于辐射防护监测仪器型式试验和技术性能要求的检验标准。

WHO/IAEA 在很多国家已经建立了次级校准实验室网。虽然这些实验室主要关心治疗的标准,但他们对校准辐射防护仪器也日益重视。

国际辐射单位与测量委员会(ICRU)在第 39, 43, 47 和 51 号报告中引入新的实用量^[2~5]以及辐射监测中 SI 单位的改变,修订技术系列报告 No.133 反映所有的这些变化就显得格外重要。

某类辐射防护仪器有可靠的型式检验数据,对这类仪器是否满足预定用途和首次使用之前的评价都很重要。仪器制造商通常不具备全部型式检验的设备,甚至有时不能用参考辐射在整个剂量当量量程范围内校准。辐射防护监测仪器新用户存在产生过高估计制造商生产设备的倾向。每台仪器在首次使用之前都要校准,然后定期再校准,通常每 12~14 个月校一次。在一些国家,已在法律上作出型式检验和定期校准的规定。

在过去已有例子,说明使用不当的校准方法在一些剂量估计中引起了很大的误差。

1.2 范 围

本报告适用于辐射监测仪器校准设备的建立和使用。报告给出了建立校准实验室所需要的辐射源、相应的设备和校准技术。但是,并没有考虑那些仅专门适用于某些方法或仪器的规定。读者要注意扩充所列书目,其中也包括其他的校准技术。

因为辐射监测仪器的大量使用(如医疗、射线造影或农业),因此不可能在一个报告中全面介绍所有仪器的校准。但是,这里介绍的是校准辐射防护仪器的基础。

除了介绍校准设备和方法之外,本安全报告还包括测量不确定度的一些定义和评定方法。还提供一个校准记录的例子。

1.3 校准的目的

校准的主要目的是:

(1)保证仪器正常工作,从而能满足监测要求。

(2)在控制的一组标准条件下,确定仪器指示值与被测量(要测量的量)值之间的函数关系。这要在仪器指示值的全量程范围进行。

(3)如可能,调整仪器的校准值,使得整台仪器的测量准确度达到最佳。

本安全报告全面介绍了校准设备和校准技术。但是对特定设备完成的任务范围会与必须校准的仪器的类型有关,同时也与其所使用的条件有关。设备可分为完成常规校准或对非常高级的实验室用简单装置进行核查,这些实验室可以确定详细的能量响应特性。这些很完善的设备包括参考仪器和参考源,一般这些设备要和国家基准比对,而国家基准本身则要进行国际比对。

2. 术语、量和单位

2.1 术 语

参考仪器(Reference instruments)

参考仪器是由国家基准实验室或被确认拥有相应标准的参考实验室,用基准校准过的次级标准仪器。另外,如果次级标准是国家标准,就要由在巴黎的国际计量局 BIPM 校准。

如果参考仪器不是次级标准,它要用其他次级标准校准或用经过次级标准校准过的三级标准来校准。

参考源(Reference source)

参考源是由国家基准实验室或由被确认拥有相应标准的参考实验室用基准校准过的次级标准源。另外,如果次级标准源是国家标准源,就要由 BIPM 校准。

如果参考源不是次级标准源,就要用其他次级标准校准或用经过次级标准校准过的三级标准来校准。

基准(Primary standard)

在规定方面具有最高计量特性的标准。基准保存在国家实验室,该实验室(a)进行计量目的研究;(b)参加例如由 BIPM 协调的经确认的基准实验室的国际比对。

次级标准(Secondary standard)

其值直接和基准比较而确定,并附有可溯源性证书的标准。由 IAEA 次级标准剂量实验室(SSDL)联网的实验室保持的次级标准,是由国家官方确定作为对在该国内所涉及量的所有其他标准定值的基础。

三级标准(Tertiary standard)

其值通过和次级标准比较而确定的标准。

国家标准(National standard)

由国家行政部门确认作为在本国该量对其他标准定值基础的标准。

一般,一个国家的国家标准也就是基准。

测量仪器(Measuring instruments)

单独或与其他设备结合用于测量的仪器。

本报告中,测量仪器是剂量计,剂量率或剂量当量率仪和监测仪,表面污染仪和表面污染监测仪等。

校准因子(Calibration factor)

校准因子 N 定义为仪器测量量的约定真值 H 除以仪器的示值 M (经必要的修正)。即

$$N = \frac{H}{M}$$

通常,校准因子只引用一种参考辐射,对仪器的整个测量量程校准因子可能不是惟一值。这时,仪器响应就是非线性。

如果仪器示值和被测量同单位,则校准因子 N 就无量纲。理想准确的仪器其校准因子为 1。

校准因子的倒数,等于参考条件下的响应。与校准因子相联系的仅是相对于参考条件,而响应则是应用于普遍的条件。

响应(Response)

测量仪器的响应 R 是仪器指示值 M 和被测量约定真值的商。

注:要说明响应的类型,如“注量响应”(对注量 Φ 的响应):

$$R_{\Phi} = \frac{M}{\Phi}$$

或“剂量当量响应”(对剂量当量的响应):

$$R_H = \frac{M}{H}$$

注:通常,响应 R (对注量或剂量当量)随入射辐射的谱和方向分布而变化。因此,往往要考虑响应和入射辐射的能量 E 和入射单方向辐射的方向 Ω 的函数关系 $R(E, \Omega)$ 。 $R(E)$ 描述响应的“能量关系”和 $R(\Omega)$ 考虑响应的“角度关系”;对后者, Ω 有时用仪器参考取向与入射单向场的轴线之间的夹角 α 来表示。

(量的)约定真值[Conventional true value (of a quantity)]

量的约定真值是由基准或次级标准或由基准或次级标准校准过的参考仪器确定的最佳估计值。

注:一般认为对确定目标约定真值与真值足够接近,没有明显差别。

转换系数(Conversion coefficient)

对本报告,有两类转换系数很重要,光子辐射空气比释动能(Kerma) K_a 对剂量当量的转换系数,和对中子辐射的注量对剂量当量的转换系数。

Kerma 对剂量当量转换系数 h_K ,是在辐射场中一点的剂量当量 H 和比释动能 K_a 的商。

$$h_K = \frac{H}{K_a}$$

中子注量对剂量当量转换系数 h_Φ 是在辐射场中一点的剂量当量 H 和注量 Φ 的商。即

$$h_\Phi = \frac{H}{\Phi}$$

这些转换系数要说明剂量当量的类型,即周围剂量当量、定向剂量当量或个人剂量当量。转换系数与入射辐射的谱有关[如 $H_p(10)$, $H_p(0.07)$ 和 $H'(0.07)$],还与入射辐射的方向分布有关。因此,考虑单能光子在几个入射角度中转换系数与能量 E 的函数关系很有用。这一组基本数据常常叫做转换函数。

相对固有误差(Relative intrinsic error) $I(\%)$

当仪器在规定的参考条件下,在规定的参考辐射中,其相对固

有误差定义为被测量约定真值 H 与仪器示值 M 的误差 $(H - M)$ 与被测量约定真值 H 的商,以百分数表示,有

$$I(\%) = \frac{H - M}{H} \times 100$$

响应时间(Response time)

仪器被辐射源照射瞬间和仪器响应达到它的稳态值的 90% 那瞬间之间的时间间隔。

仪器过载(Instrument overload)

仪器置于具有剂量当量率超过其设计使用上限值的辐射场中照射。

测量仪器的参考点(Reference point of a measuring instrument)

测量仪器的参考点是将仪器定位在试验点的那一点。制造商应将参考点标在仪器上。如果不可能,参考点应在仪器所带的文件中说明^①。

试验点(Point of test)

试验点是将仪器的参考点放在该点进行校准或型式检验,该点被测量的约定真值已知。

在气体中形成一对离子所需平均能量 W (Mean energy expended in a gas per ion pair formed)

在气体中形成一对离子所需平均能量 W 是带电粒子完全消耗在气体中的初始动能和产生的离子对平均数目的商。单位为 Joule(J), W 也可用 eV 表示($1 \text{ eV} \approx 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$)。

(空气 $Kerma$)半值层, HVL(Half-value layer (air $Kerma$))

(空气 $Kerma$)半值层, (HVL)是规定物质的厚度,它使光子束的空气 $Kerma$ 率减小到原有的一半。在本定义中,不包括光子束中可能存在的所有散射光子的贡献。在本报告中,本定义只适

^① 在个人剂量仪校准和型式试验时,剂量计和推荐的标准试验体模被作为一个整体。这个整体的参考点习惯上是剂量计的参考点,应将其放在试验点处。

用于窄束条件下规定的光子辐射质。在某些辐射防护应用中也使用与宽束减弱相联系的半值层术语,但在本报告中不用。

有效能量(Effective energy, E_{eff})

具有一定能量范围的 X 射线组成的辐射的有效能量 E_{eff} 是具有相同 HVL 的单能 X 射线的能量。

最大剩余能量, E_{res} (Residual maximum energy)

最大剩余能量, E_{res} 是在校准距离处放射性核素所有 β 衰变分支中 β 能谱的最大能量。由于源物质本身、源支架、源包壳、源与校准位置之间其他介质的吸收和散射改变了源的能谱,因此 E_{res} 小于相应的 E_{max} 。

2.2 用于表面污染监测仪校准的量和实用量

2.2.1 活度(Activity)

某一时间处于特定能态一定量放射性核素的活度 A 是 dN 除以 dt 的商,这里 dN 是表示在时间间隔 dt 内原子核从该能态发生自发核跃迁数的期望值。

$$A = \frac{dN}{dt}$$

单位 s^{-1} , 活度专有名称是贝可(勒尔)(Bq) $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ 。

2.2.2 粒子通量(Particle flux)

粒子通量 N 是 dN 除以 dt 的商,这里 dN 是时间间隔 dt 内粒子数的增量。即

$$N = \frac{dN}{dt}$$

单位为 s^{-1} 。

对辐射防护, α 表面通量 B_α 和 β 表面通量 B_β 以秒的倒数(s^{-1})

表示,常常比以 B_q 表示的活度更重要。因为自吸收、散射和粒子发射概率等原因,通常源的粒子通量和它的活度在数值上不同。

虽然,通常表面污染是以单位面积活度表示,但大多数仪器只能指示表面发射出 α 或 β 粒子的通量——表面通量 B_α 或 B_β (即表面发射率)^[6], 它的单位是 s^{-1} 。

A_S , $B_\alpha^\text{①}$ 和 B_β 的数值有如下关系:

$$B_\alpha = A_S P_\alpha K_\alpha F^{-1}$$

$$B_\beta = A_S P_\beta K_\beta F^{-1}$$

式中, P_α 和 P_β 是 α 和 β 的发射概率 (如对 ^{40}K 为 0.893)。

K_α 和 K_β 考虑在源、源托盘的自吸收, 从源、托盘和底衬材料的背散射 (对可忽略托盘和底衬材料的薄源 K_α 和 K_β 近似 0.5), F 是源的面积。

2.3 对剂量计及剂量率计的实用量和体模

2.3.1 概述

1991 年, 国际辐射防护委员会 (ICRP) 推荐修订剂量限制体系, 包括辐射防护初级限制量的规范^[7]。IAEA 已经将 ICRP 的建议结合到它的基础安全标准之中^[8]。剂量限制体系是基于不同器官或组织的当量剂量 H_L , 它是在某些组织和器官中单个当量剂量或当量剂量的加权求和即有效剂量 E 。这些防护量基本是不可测的。它必须通过在工作条件下可测量的量来估计——这些可测量量称实用量。它们被定义在有受体的情况下, 即 (a) 对场所监测受体为 ICRU 球 (见 2.3.2 节) 或 (b) 对个人监测就是人体 (见 2.3.3 节)。

① 原文为 B_I , 从前后文看应为 B_α ——译者。

根据其剂量当量接近其限值的情况,辐射可以用“弱贯穿”和“强贯穿”来表征。对弱贯穿辐射主要与眼球晶状体或皮肤有关。对强贯穿辐射,有效剂量是恰当的。表 1 列出了按贯穿性来区分的实用量。

表 1 实用量一览表

外辐射	限量	实用量	
		场所监测	个人监测
强贯穿辐射	有效剂量	$H^*(10)$	$H_p(10)$
弱贯穿辐射	皮肤剂量	$H'(0.07, \alpha)$	$H_p(0.07)$
	对眼晶体	$H'(3, \alpha)$	$H_p(3)$

图 1 说明参考辐射场,描述参考辐射场物理量和用于校准和型式试验的量之间的关系。

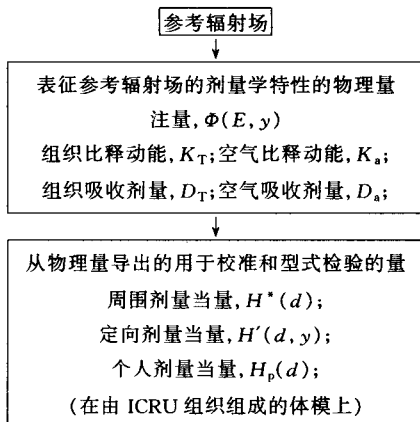


图 1 参考辐射场,表征参考辐射场剂量学特性的物理量与用于校准和检验的量

在校准实验室建立由 ISO 推荐的参考场。表征参考辐射场

的基本辐射量是用参考仪器测量的。与校准和型式检验有关的量则是通过适当的转换系数从基本辐射量导出的。个人剂量计设计成精确测量在板模、柱模或棒状体模上定义的量,可以假设很好地近似表示实用量, $H_p(d)$ 。

2.3.2 场所监测

日常辐射防护,希望以单个剂量当量的量来表示个人可能受到的照射,即近似人体的体模所受到的照射。所用的体模叫ICRU球。ICRU球是直径30 cm的组织等效球^[5],它是由密度为 $1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的材料组成,其质量组分是76.2%氧,11%的碳,10.1%的氢和2.6%的氮,这种材料称ICRU组织。

对场所监测,从实际的辐射场按一定条件导出一个辐射场使用更方便。用“扩展”和“齐向”来描述这些导出辐射场。在扩展场,在整个感兴趣的体积内,注量、方向和能量分布与实际场参考点处的值一样。在扩展齐向场,注量和能量分布和在扩展场中一样,但注量是单向的。图2给出了齐向和扩展辐射场的示意图^[9]。

了解扩展和齐向仅是量定义的需要,并不能实际用场所监测仪进行测量这一点很重要。设计用于测量 $H^*(10)$ 的仪器应有各向同性的响应。

场所剂量计应在自由空气中校准和做型式检验;它的目的在于用扩展齐向辐射场。

2.3.2.1 周围剂量当量, $H^*(d)$

在辐射场一点处的周围剂量当量, $H^*(d)$ 是相应于扩展齐向场在ICRU球逆齐向场方向的半径上深度 d 处产生的剂量当量。

剂量当量的单位为 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

周围剂量当量的专用名称是希沃特(Sv)。

周围剂量当量应说明其参考深度 d , 为简化符号, d 以毫米表示。

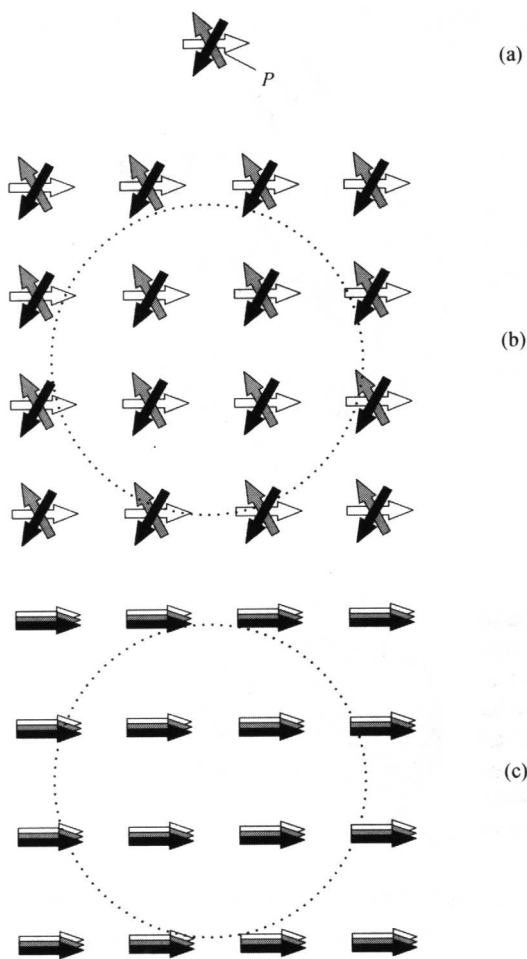


图 2 各种辐射场的示意图

(a) 实际辐射场; (b) 扩展辐射场; (c) 扩展和齐向辐射场^[9]。(a) 实际辐射场的某点 P , 它由三个不同方向的分量组成, 用三个不同方向的箭头表示; (b) P 点所在的扩展场, 点线所圈是对扩展场所要求的大小; (c) P 点位于扩展和齐向场, 点线所圈是对扩展齐向场所要求的大小。原则上, 每处的三个箭头是严格重合的, 只是为了描述方便而将其分开。