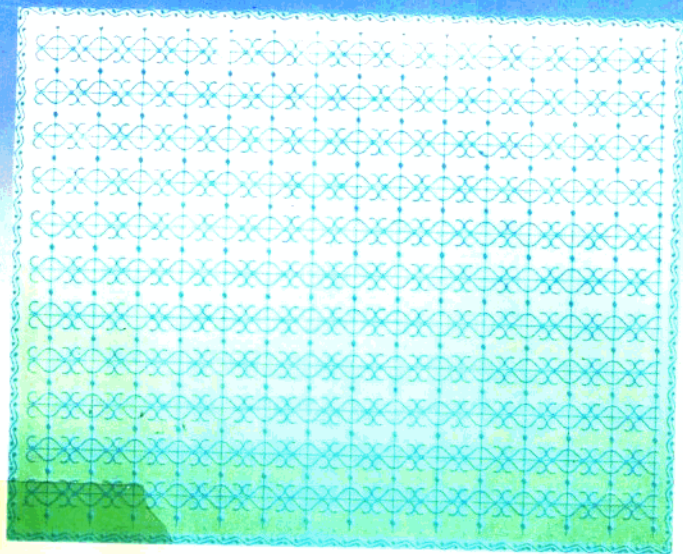


核子秤

周立业 苗齐田 编著



原子能出版社
北 京

核子秤

周立业 苗齐田 编著

原子能出版社
北 京

(京)新登字 077 号

图书在版编目(CIP)数据

核子秤/周立业,苗齐田 编著. —北京:原子能出版社,1994.9
ISBN 7-5022-1180-2

I. 核… II. ①周… ②苗… III. 核子秤—基本知识 IV. TH715.1
中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 04000 号

内容简介

本书介绍了核子秤的原理、组成,不同类型的核子秤特点,核子秤的安装、调试及标定技术,同时还介绍了核子秤的使用、维护和几个典型应用实例。内容由浅到深,既有理论分析,又有实际应用。针对非核物理专业的广大读者,书中还介绍了一些核辐射及其防护的基础知识。

本书适用于厂矿企业中的技术人员及管理人员,尤其适用于工作在具有散装物料输送现场的工程人员和计量管理人员;同时,对于从事核子秤研制开发及应用的技术人员也是一本很好的参考书。

©

原子能出版社出版发行

责任编辑: 袁祖伟

社址:北京市海港区阜成路 43 号 邮政编码:100037

北京地质印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/32 印张 4.625 字数 105 千字

1994 年 9 月北京第 1 版 1994 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000

定价:4.95 元

目录

引言	(1)
一、核辐射及其与物质的相互作用	(4)
(一)元素、原子核与放射性同位素	(4)
(二)核辐射的种类及性质	(5)
1. α 辐射	(6)
2. β 辐射	(6)
3. γ 辐射	(6)
4. 中子辐射	(7)
5. 放射性同位素的衰变规律	(7)
(三)射线与物质的相互作用	(9)
1. 光电效应——光电吸收	(11)
2. 康普顿效应——康普顿散射	(12)
3. 电子对效应——电子对的产生	(13)
4. γ 射线束的吸收	(14)
(四)典型工业核仪表及常用的放射源	(16)
1. 核辐射厚度计	(16)
2. 核辐射物位计	(17)
3. 核辐射密度计	(17)
4. 核子秤	(18)
5. 核辐射式成分分析仪	(18)
6. 核辐射式探伤仪	(18)
二、核子秤的工作原理及特点	(19)
(一)核子秤的原理	(19)
1. 核子秤的基本工作原理	(19)
2. 核子秤的物理模型及数学模型	(22)
(二)核子秤的组成及结构	(26)
1. 核子秤的组成	(26)

2. 核子秤的结构	(28)
(三) 核子秤的种类	(29)
1. 按几何形状分类	(29)
2. 按探测器分类	(30)
3. 按二次仪表功能分类	(31)
4. 按应用设备和场所分类	(32)
(四) 核子秤与电子秤的比较	(32)
三、核子秤的探测器件与前端线路	(35)
(一) 电离室、前端线路及其电源	(35)
1. 电离室	(35)
2. 前端线路	(40)
3. 电源	(44)
(二) 闪烁探测器、前端线路及其电源	(46)
(三) 正比计数管、前端线路及其电源	(51)
(四) 三种探头的比较	(55)
1. 探测器的性能	(55)
2. 探测器的制造技术和成本	(55)
3. 对放射源的要求	(56)
(五) 核子秤的测速系统	(56)
四、核子秤的信号处理系统	(59)
(一) 单秤二次仪表	(59)
1. 模拟线路型二次仪表	(60)
2. 智能型二次仪表	(62)
(二) 多秤二次仪表	(66)
五、核子秤的安装、调试、标定技术及技术指标	(72)
(一) 核子秤的安装	(72)
1. 电气安装	(72)
2. 机械安装	(73)

(二)核子秤的调试与标定	(76)
1. 核子秤的调试	(76)
2. 核子秤的静态标定	(77)
3. 核子秤的实物标定	(78)
4. 核子秤的模拟板	(80)
(三)核子秤的技术指标	(81)
1. 准确度等级	(81)
2. 有效称量范围	(82)
3. 最大允许误差	(82)
4. 零点	(82)
5. 重复性	(83)
6. 线性度	(83)
7. 实物计量误差	(83)
六、核子秤的使用及维护	(84)
(一)核子秤的使用	(84)
1. 计量功能	(85)
2. 管理功能	(86)
3. 调试功能	(86)
4. 系统功能	(87)
(二)核子秤的故障判断及维修	(116)
七、核子秤的典型应用实例	(118)
(一)核子秤在螺旋输送机上的应用	(118)
(二)核子秤计量管理系统	(120)
1. 核子秤计量监测装置	(122)
2. 设备运转监控装置	(124)
3. 软件编程特点	(125)
4. 系统运行效果	(126)
(三)核子秤配料系统	(127)

(四)装车自动化系统简介	(129)
八、核子秤的辐射防护	(131)
(一)基本知识	(131)
(二)核子秤的辐射防护要求与设计	(134)
1. 辐射防护的原则	(134)
2. 辐射工作人员的剂量限值	(135)
3. 公众中个人的剂量限值	(136)
4. 切实加强管理,严格执行国家标准	(136)
(三)核子秤的放射性安全评价	(139)
参考文献	(142)

引言

随着核技术应用研究的进一步发展,越来越多的工业核仪表更加广泛地参与了工业生产过程的监测与控制。工业核仪表具有投资少、见效快、效益高等优点,而且对于传统工业现代化,在加速技术改造方面具有重要作用。核子秤就是众多工业核仪表家族中的一个年轻而重要的成员。

核子秤是一种非接触式、新型的动态连续计量与控制装置。它是根据射线与物料相互作用其强度被减弱的原理来测量输送机上通过的物料重量的。

核子秤的研制工作从 60 年代初就开始了。1968 年波兰研制成功了世界上第一台工业用核子秤——WIT-2 型核子秤^[1]。从此以后,世界上相继报道了许多不同类型的核子秤及其应用。1973 年英国原子能委员会和英国钢铁公司在国际原子能机构报告了他们应用核子秤测量矿石重量的实验结果。用¹³⁷Cs 源和闪烁探测器制成的核子秤,其测量精度为 1%^[2,3];1977 年美国 Ohmart 公司用¹³⁷Cs 源和专门的探测器测量传送带上干燥固体物料,精度达到±0.5%;在同一年,丹麦同位素中心报告了他们研制的 Convey 核子秤系统;1979 年到 1981 年德国相继报告了他们的研究成果,并用微机处理数据用于粮食的装载量测量^[4];美国 KAY-RAY 公司生产的核子秤产品,其应用遍及全世界,最近十多年销售量超过 3 万台;我国也有一些工厂引进了该公司的产品。此后,美国的 RAMSEY(拉姆斯)公司的 WS 型、德国 Berthold(波索尔)公

司的 B300 型及英国 AVCRY(爱弗里)公司的 9000 型等核子秤产品也先后在市场上大量销售。

随着计算机与自动化技术的发展,自动测量与控制在工业传输中得到了广泛的应用。从最原始的定量翻斗到机械式和半机械式的电子秤,自动化程度有了很大提高。核子秤的出现克服了许多电子秤不可克服的缺点。核子秤的非接触测量原理使核子秤除了广泛应用于皮带输送机外,还可以应用到原来电子秤不能使用的输送机械上;也正是因为核子秤的这一特点,使核子秤的测量精度不受输送机的机械性能变化的影响。

核子秤的广泛应用进一步促进了核子秤的研究工作。各种不同类型的探测器和放射源的使用使核子秤的种类和应用范围不断增加与扩大。但是,所有的研究工作都是为了提高核子秤的测量精度、可靠性和稳定性。计算机技术的飞速发展作为开发核子秤的应用提供了更加强有力的手段。核子秤不仅可以作为单纯的计量仪表,而且可以参与生产过程的控制,为提高工业产品质量、降低能耗、材耗、提高自动化程度作出了贡献。核子秤配料系统、计量与管理系统、自动装卸系统等的开发,把核子秤的应用推上了一个新的台阶。

国内的核子秤研究与开发工作起步较晚,十几年来通过科研人员和工矿企业技术人员的共同努力,核子秤已在我国工业核仪表中占有了重要的地位,为国民经济的发展作出了很大的贡献。1986 年,黑龙江技术物理研究所采用闪烁探测器、 ^{137}Cs 源研制的核子秤通过了鉴定,但是没有形成批量生产。1985 年初清华大学核能技术设计研究院应用核技术研究室开始了充气电离室型核子秤的研究工作。电离室型核子秤

于1988年通过技术鉴定。目前该种类型的核子秤在全国的销售量已超过2000台。这个销售量远远满足不了全国工业生产中
对核子秤的需求。据美国KAY-RAY公司驻京办事处和农业部银龙公司1988年预测,国内共需各种动态秤15万~20万台,核子秤占1/3以上。可见,在我国核子秤的潜在市场是非常大的。

一、核辐射及其与物质的相互作用

核辐射是原子核衰变中放射出不同的带有一定能量的粒子或射线的一种放射性现象,要了解核辐射首先要弄清楚元素和原子核。

(一)元素、原子核与放射性同位素

元素是组成物质的最基本单元。不同元素在一定条件下按不同的数量进行化合后,就形成了很多复杂的物质,这些物质称为化合物。日常碰到的物质绝大多数是化合物,如水是由氢和氧两种元素组成的。

原子是具有元素一切特性的最小“微粒”,能够单独存在,它是元素的基本单元。元素就是所有同一种类的原子的总称。在原子的中心是一个原子核,电子围绕原子核按一定轨道运行。原子核带正电荷,电子带负电荷,原子所带的正电荷数与核外的电子数相等。原子核是由质子和中子组成的,质子带正电荷,中子不带电荷,是一种中性粒子。所以原子核所带的正电荷就是核内所有质子所带的正电荷。原子核带有原子的几乎全部质量。

每种元素的原子都不止一种,但是,同一种元素的几种原子的核电荷数是相同的,不同的是原子的质量数。也就是说,这些原子的中子数不同。这种质子数相同而中子数不同的原子构成的元素称为同位素。

某种同位素的原子核在没有任何外因作用下它的核成分或能量自动变化,这种变化称为放射性衰变或核衰变。这种在衰变过程中放出射线或粒子的同位素称为放射性同位素,也叫不稳定同位素。

(二)核辐射的种类及性质

放射性同位素的原子核在衰变过程中放出 α 粒子、 β 粒子或 γ 射线而变成另外的同位素。这种放射性同位素的核衰变是一种必然现象,是一种自发的过程,它不受任何外界条件的影响。核衰变中放出不同的带有一定能量的粒子或射线的放射性现象称为核辐射。对于核辐射的粒子或射线的能量,我们用电子伏(eV)作单位来表示。1电子伏(eV)是电子在1伏特(V)电压的作用下,在电场中被加速所获得的能量数值。

核辐射可分为带电粒子辐射和非带电(粒子)辐射。带电粒子辐射又分为快电子辐射和重带电粒子辐射;非带电(粒子)辐射又分为电磁辐射和中子辐射。归纳起来,可分为下列四大类:

带电粒子辐射	{	快电子辐射
		重带电粒子辐射
非电带电(粒子)辐射	{	电磁辐射
		中子辐射

快电子包括核衰变中发出的 β 粒子,以及其它过程产生的具有相当能量的电子。重带电粒子包括质量为一个或多个原子质量单位(u)并具有相当能量的各种离子,如 α 粒子、质子、裂变产物和核反应产物等。电磁辐射包括原子的壳层电子

重新排列时发射的 X 射线、高速带电粒子(电子)轰击靶物质而产生的韧致辐射以及原子核衰变时发出的 γ 射线。中子辐射是各种核反应过程中产生的中子,中子不带电。在这里我们只讨论 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线和中子四种特殊的有代表性的辐射。

1. α 辐射

α 辐射是放射性同位素原子核放射出的 α 粒子。 α 粒子实际上是氦原子核,它带有正电荷。 α 粒子的能量一般在 $4 \sim 10\text{MeV}$ (兆电子伏)范围内,平均寿命为几微秒(μs)到 10^{10} 年(a)。同一种同位素放出的 α 粒子的能量一般是单一的, α 辐射往往还伴有 γ 射线放出。

2. β 辐射

β 辐射是放射性同位素原子核放射出的 β 粒子。 β 粒子就是高速的电子,它带有一个单位的电荷(可正可负)。 β 粒子的运动速度比 α 粒子的运动速度快得多。 β 粒子的能量从零到最大值 E_m 连续分布,粒子的计数率在 $0.3 E_m$ 处最大。有些同位素在衰变时不是只放出一组 β 粒子,而是放出 k 组 β 粒子,并且每组 β 粒子的最大能量 E_m 是不相同的。

β 辐射的放射源是核辐射工业检测仪表(以下简称工业核仪表)中常用的一种射线源。

3. γ 辐射

γ 辐射是一种从原子核中发出的电磁辐射。某种同位素从激发态变到基态时就发出 γ 射线, γ 射线的能量是分立的。

γ 射线是一种高能光子,它的静止质量为0,它的波长较短,一般在 $10^{-8} \sim 10^{-11} \text{cm}$ 范围内。 γ 射线不带电,但其携带的能量相当高,足以使物质原子电离。

γ 辐射的放射源也是工业核仪表常采用的一种射线源。核子秤就采用了这样一种射线源。

4. 中子辐射

中子辐射的产生有几种类型。从原理上大体可分为三种:

1) (γ, n) 中子源,它利用 γ 光子轰击原子核而产生中子;

2) (α, n) 中子源,它利用放射性同位素放出的 α 粒子轰击轻元素靶核而产生中子;

3) 自发裂变中子源,超铀元素大多具有很强的自发裂变能力,而产生中子。

中子的质量比氢核(质子)略重,中子是不带电荷的粒子,它和原子核之间不存在电排斥力,常利用它来产生原子核反应。在工业核仪表中常用中子辐射来测量物质的水分或分析物质的成分等。

5. 放射性同位素的衰变规律

前面已经讲到,外界条件不能影响放射性同位素的衰变快慢,但是其放射源的辐射强度随着时间的增加而越来越弱,而且大量的放射性同位素原子核因不断地放出射线而陆续发生转变,使处于不稳定状态的原子核数目不断减少,变成另外一种原子核,这就是原子核的衰变过程。原子核很小很小,即使是很少量的放射性物质也含有大量的核,如 10ng (纳克)即亿分之一克(g)镭,它也含有 10^{15} 个镭原子核。在大量的具有

放射性的原子核中,任何时刻,任意一个原子核都可能发生衰变,至于哪一个核发生衰变,这完全是一个偶然事件。因此,放射性同位素的衰变规律是一个统计规律,就大量的放射性原子核组成的整体来讲,放射性同位素的衰变规律可表示为下式:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.1)$$

式中: N_0 —— $t = 0$ 时的放射性同位素核数;

N —— t 时刻的放射性同位素核数;

λ ——衰变常数。

对于同一种放射性同位素来讲,同一时刻的每个核衰变的概率是相同的,所以,其辐射强度随时间的变化也服从(1.1)式的规律:

$$I = I_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

式中: I_0 —— $t = 0$ 时的辐射强度;

I —— t 时刻的辐射强度。

由于放射性同位素的衰变规律是一个统计规律,那么,每个原子核衰变的时刻不相同,其寿命也不相同。我们引入平均寿命来描述这种情况。平均寿命即所有原子核寿命的平均值,它与衰变常数的关系如下:

$$\tau = 1/\lambda \quad (1.3)$$

式中 τ ——平均寿命。

不过我们通常习惯用半衰期即放射性同位素原子核数目衰变到原有数目一半所需要的时间 T ,

$$T = 0.693/\lambda \quad (1.4)$$

不同放射性同位素的半衰期相差极大,从几千万分之一秒(10^{-7} s)到一百多亿年(10^{10} a)。如: ^{145}Nd 的半衰期为 $3.3 \times$

10^{-7} s, ^{137}Cs 为 33. 2a, ^{60}Co 为 5. 26a, ^{241}Am 为 470a, ^{14}C 为 5720a 等。

(三)射线与物质的相互作用

辐射分为电离辐射和非电离辐射。有些辐射如红外线、微波等,由于能量低,不能引起物质电离,称为非电离辐射。非电离辐射不是本书讨论的对象。

电离辐射是指与物质直接或间接作用时能使物质电离的一切辐射。电离辐射是由直接或间接电离粒子或由两者混合组成的任何辐射。直接电离粒子是指那些具有足够大的动能,以致通过碰撞就能产生电离的带电粒子,如电子、 β 射线、质子和 α 粒子等。间接电离粒子是那些能够释放出直接电离粒子或引起核变化的非带电粒子,如X、 γ 射线及中子等。

射线与物质的相互作用是探测射线是否存在及其强弱的基础,同时也是利用放射性同位素的工业核仪表的设计基础。核子秤就是利用 γ 射线与物质相互作用、一部分被吸收或被散射的原理而设计制造的。

不同的核辐射与物质的相互作用是不一样的。重带电粒子与物质的相互作用主要是通过其正电荷与物质原子中核外电子的库仑作用力而实现的。这种粒子的能量是通过大量的与核外电子的“碰撞”而不断损失的。快电子则不同,与重带电粒子相比较,它的能量损失较慢,并且通过作用物质时的路径要曲折得多。中子,由于它不带电荷,因而不能通过库仑力与物质发生相互作用,这与带电粒子完全不同。中子是与物质的原子核发生相互作用的。 γ 射线与物质的相互作用与前面所

讲的其它辐射与物质的相互作用又具有不同的特点。下面,我们分别讨论带电粒子、X、 γ 射线与物质的相互作用。

• 带电粒子与物质的相互作用:

电离辐射作用于物质所引起的某些物理、化学变化,或作用于生物体时所产生的某些生物效应,几乎都是通过带电粒子把能量传递给物质所引起的。即使是间接电离粒子,如X、 γ 射线或中子,它们与物质作用过程中的能量传递,最终也是通过在此作用过程中产生的带电粒子实现的。带电粒子与物质相互作用的过程是复杂的,主要过程有:电离和激发,弹性散射和韧致辐射。其它过程有:湮没辐射、切伦科夫辐射、核反应以及引起物质化学变化等。带电粒子主要通过电离和激发过程损失能量,其次是通过韧致辐射。这两种过程构成了带电粒子在碰撞过程中的能量损失。

• X、 γ 射线与物质的相互作用:

大多数核子秤都采用 γ 放射源。 ^{137}Cs 是核子秤最常用的一种 γ 源,它所发出的 γ 射线主要是0.66MeV的 γ 光子。

X、 γ 射线是一种比紫外线的波长短得多的电磁波,它与物质相互作用时,能产生次级带电粒子(主要是电子)和次级光子,通过这些次级带电粒子的电离、激发过程把能量传递给物质。

γ 射线与物质的相互作用有许多可能的机制,但是只有三种主要机制在辐射测量中起着重要作用。这三种主机制是:光电吸收、康普顿散射和电子对的生成。从原子核放射出来的 γ 射线是一种高能光子,叫 γ 光子。 γ 射线由于其不带电荷,所以,它和物质的相互作用与带电粒子与物质的相互作用具有完全不同的特点。带电粒子与物质的相互作用是逐渐地损失