

工业自动化仪表丛书

7



核辐射式检测仪表

欧绪贵 编

机械工业出版社

本书系《工业自动化仪表丛书》之一。它以通俗的语言较全面地介绍了：核辐射式厚度计、反射式厚度计、核辐射式密度计、核辐射式物位计、核辐射式成分分析仪以及测量其它参数的核辐射式检测仪表的构造、工作原理及使用知识。对有关核辐射式检测仪器的基础知识、常用的核辐射探测器及使用中的安全防护问题也作了简要的论述。

本书可供工业自动化仪表工人、技术人员和管理干部阅读，也可供有关学校师生参考。

核 辐 射 式 检 测 仪 表

欧绪贵 编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $3 \frac{1}{2}$ · 字数 73 千字

1978 年 1 月北京第一版·1978 年 1 月北京第一次印刷

印数 00,001—11,000 · 定价 0.30 元

*

统一书号：15033·4465

前 言

工业自动化仪表是实现工业生产过程自动化的一种重要装置。通过工业自动化仪表来了解生产过程中的物质变化状态，并将生产过程控制在预定的条件之下，确保着生产的优质、高效和安全。

随着我国社会主义工业的飞速发展，工业自动化仪表已日益广泛地应用于冶金、电力、化工、石油、轻纺、机械等工业部门，其发展前途是十分广阔的。

在党的“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”总路线的鼓舞下，特别是经过无产阶级文化大革命，我国仪表制造工业正在飞跃发展。

为了适应工业自动化仪表迅速发展的需要，进一步做好技术交流与推广工作，我们组织编写了这套《工业自动化仪表丛书》。

本丛书预定为二十册。各分册书名分别为：《工业自动化仪表》、《温度测量仪表》、《压力测量仪表》、《流量测量仪表》、《物位测量仪表》、《机械量测量仪表》、《核辐射式检测仪表》、《自动平衡显示仪表》、《动圈指示调节仪表》、《自动调节仪表》、《电动单元组合仪表》、《气动单元组合仪表》、《射流技术及其应用》、《工业控制计算机》、《电动执行器》、《气动执行器》、《工业程序控制装置》、《工业仪表防护》、《工业仪表应用》和《工业仪表维修》等，将陆续分册出版。

本丛书力求以深入浅出、通俗易懂的文字，辅以图表的

33133

形式，简要介绍各类工业自动化仪表的结构原理、性能特点、安装使用以及维修等知识，供同志们参考。但由于我们政治思想水平不高，业务水平有限，因而书中一定存在不少缺点，甚至错误，欢迎同志们批评指正。

本丛书在编写过程中，曾得到有关工厂、大专院校、科研单位的大力支持，在此谨致谢意。

《工业自动化仪表丛书》编写组

目 录

前言

第一章 绪论	1
第二章 核辐射及其与物质的作用	5
一、元素和原子核	5
二、放射性同位素和核辐射	6
(一) 同位素、放射性同位素和稳定性同位素	7
(二) 核辐射、辐射的种类和性质	8
(三) 仪表常用的放射性同位素和放射源	12
三、射线和物质的作用	14
(一) 带电粒子和物质的作用	14
(二) γ 射线和物质的作用	16
(三) 中子和物质的作用	18
第三章 常用的核辐射探测器	20
一、电流电离室	20
二、盖格计数管	23
三、闪烁计数器	26
四、正比计数管	29
五、中子计数管	29
第四章 核辐射穿透式厚度计	31
一、测量的基本原理	31
二、 β 穿透式厚度计	32
(一) 单电离室 β 射线厚度计	34
(二) 双电离室 β 射线厚度计	35
三、 γ 穿透式厚度计	37
(一) 自动标定式 γ 厚度计	37

(二) 周期地调制放射源的 γ 厚度计	39
四、举例	40
(一) 热轧钢板厚度计	40
(二) 用于测量塑料薄膜的 β 厚度计	42
第五章 核辐射反射式厚度计	46
一、测量的基本原理	46
二、 β 反射式厚度计	48
三、 γ 反射式厚度计	49
四、举例	50
第六章 核辐射式密度计	52
一、 γ 穿透式密度计	52
(一) 闪烁计数器式密度计	52
(二) 电离室式 γ 密度计	54
二、 γ 散射式密度计	56
三、举例	57
第七章 核辐射式物位计	60
一、检测物位的几种方式与原理	60
(一) 利用放射源和探测器间距离的变化测量物位	60
(二) 利用物质对射线的吸收程度测量物位	60
(三) 利用继电器作用测量物位	62
二、固定式物位计	63
三、随动式物位计	64
四、举例	65
(一) 一种固定式物位计及其使用情况	65
(二) 用于钢铁厂高炉的固定式料位计	67
第八章 核辐射式成分分析仪	68
一、核辐射式成分分析仪测量物质成分的原理	68
(一) γ 吸收法	68
(二) β 散射法	69

(三) 能谱分析法	71
二、同位素 X 射线荧光分析仪	72
(一) 概述	72
(二) 测量原理	75
(三) 仪表结构	76
(四) 使用	78
三、核辐射式气体成分分析仪	79
四、中子湿度计	81
第九章 测量其他参数的核辐射式检测仪表	84
一、核辐射式气体压力计	84
二、核辐射式流量计	85
三、核辐射式继电器	88
四、 γ 射线探伤仪	89
五、核辐射式称重仪	91
六、核辐射式温度计	92
七、核辐射式测距仪	94
八、核辐射式检漏仪	94
九、核辐射式转速仪	95
第十章 核辐射式检测仪表的安全防护问题	97
一、射线的防护	98
二、 β 射线的防护计算	100
三、 γ 射线的防护计算	101
四、中子的屏蔽	103

第一章 绪 论

随着我国国民经济的发展，对工业生产自动化的要求就越来越迫切。提高工业生产的自动化水平可以减少手工操作，减轻工人的劳动强度，提高产量，保证质量和节省材料。要实现工业生产自动化，就必须使用各种工业自动化仪表，利用放射性同位素来进行测量的工业自动检测仪表就是这种自动化仪表之一。此类仪表一般称为核辐射式检测仪表或放射性同位素仪表。凡带有一个或数个放射性同位素辐射源的工业自动检测仪表都属于这类仪表。

核辐射式检测仪表是根据被测物质对射线的吸收、反散射或射线对被测物质的电离激发作用而设计的新型仪表。所谓被测物质对射线的吸收，即射线投射到被测物后，一部分射线被物质吸收了，只有一部分射线穿过被测物质，穿过被测物质后的射线强度在物质成分一定的情况下和被测物的厚度和密度有关，若被测物密度为已知则可测出厚度，厚度计即利用这种关系制成；若厚度已知，则可制成密度计。被测物质对射线的反散射是指射线通过被测物质时有一部分射线反散射回来，反散射回来的射线数量在物质成分一定的情况下和物质厚度、密度和射线源与被测物的相互位置都有一定关系，在密度和相互位置已知的情况下就可以制成反射式厚度计。根据同样的道理，也可制成反射式密度计或物位计。射线对被测物质的电离作用是指射线穿过气体时可以使气体原子电离而形成正离子和负离子，根据这种现象的进一步研究

表明：由于气体原子电离而形成的电离电流，其大小与被电离气体的气体压力成正比；可以测量出电离气体流过已知距离所需要的时间，根据这种关系就可以作出气体压力计和气体流量计。若用一个合适的初级射线去照射被测样品时，样品中的物质受到激发而产生各种元素的特征X射线，特征X射线的能量和元素有关，特征X射线的强度与该元素的含量有关，根据这种关系就可作出用来分析物质成分的X荧光分析仪。

核辐射式检测仪表一般由放射源、探测器、电信号变换电路和显示装置等四部分组成。放射源是这种仪表的特殊部分，它是由放射性同位素做成的，它放射出肉眼看不见的射线。探测器即核辐射探测器，它可以探测出射线的强弱和变化，将射线信号转变为电信号。电信号变换电路由各电路单元所组成，它将电信号进行各种变换和处理。显示装置可是电流表、指示灯或由数字管组成的数字显示装置，它把被测参数显示出来。核辐射式检测仪表还可以配上自动记录仪自动记录被测量的变化情况，也可以输出代表被测参数情况的电信号。若和其他自动化仪表配套，可以组成自动控制系统。

核辐射式检测仪表一般有两种分类方法，即按测量参数分或按测量原理分。按测量参数可分为：厚度计、密度计、物位计、流量计、压力计、成分分析仪等。按测量原理可分为：穿透式仪表、反射式仪表、电离式仪表和激发X荧光式仪表等。

核辐射式检测仪表从出现到现在只有二十多年的历史，但由于它本身的特点已使它在工业自动化仪表中获得了特殊的地位。核辐射式检测仪表的最大优点是可以进行不接触测

量，因而它能测量其他仪表很难测量的对象，例如：它能不接触地自动检测正在轧制过程中的冷钢板或热钢板的厚度；它可以不接触地测量轧制过程中的马口铁的镀层厚度；它可以不接触地连续地测量密封管道内流动的泥浆或矿浆的密度；它可以不接触地测量密封容器内具有高温、高压、高腐蚀性介质的液位等。另外，仪表所用放射源还具有很大的稳定性和使用寿命，不需经常更换，当外部条件变化时，放射源不会改变本身的特性等。

在毛主席革命路线指引下，我国从五十年代末就开始了核辐射式检测仪表的研制工作，并已取得很大的成绩，到目前为止，已研制了各种类型的厚度计、密度计、物位计、X荧光分析仪和中子湿度计等等，在推广应用方面已作了不少工作。近年来，一方面继续研究试制新仪表；一方面推广应用比较成熟的仪表。在使用这种仪表后，已取得很好效果，如某炼油厂利用核辐射液面计进行自动调节生产后，使生产操作平稳，提高了劳动生产率，减轻了劳动强度，每套仪表节约了三个操作人员，节省大量原材料，每年节省材料费相当于一万八千元人民币。

目前核辐射式检测仪表在冶金、化工、石油、电站、轻纺和其他工业部门已获得了广泛的应用。从这种仪表的原理分析，它可以测量很多参数，如测量厚度、密度、物位、和分析成分等，但是否一定采用这种仪表将根据具体情况而定。一般有几种情况：一种是一定要用核辐射式检测仪表，如前面提到的某些厚度、密度和物位的测量就属于这种情况；一种是可用可不用，即用其他方法或用核辐射式方法各有优缺点；另一种是选用其他方法较好。

由于核辐射式检测仪表采用了放射性同位素作辐射源，

因此就有放射性的衰减和辐射的统计涨落问题。放射性的衰减是放射性同位素的固有特性，在仪表中所选用的放射性同位素都是半衰期比较长的，所谓半衰期是指放射性原子数因衰变而减少到原来的一半时所需要的时间。由于有这种特性，若仪表选用的放射性同位素的半衰期不够长的话，仪表必需考虑定期校准和仪表使用时间长了要更换放射源。辐射的涨落现象也是核辐射式检测仪表的固有特性，它给仪表读数带来了误差。所谓辐射的涨落是指同一放射源在相同条件下进行放射性测量，每次所得的结果不完全相同，这种放射性涨落现象使核辐射式检测仪表在被测物不变时指针略有摆动，从而带来涨落误差，因此，核辐射式检测仪表的精度在一般条件下作到百分之一就不错，作到千分之几就比较困难了。

核辐射式检测仪表有它的优点和缺点，但由于它的优点很突出，能测量一些其他方法难以测量的对象，因此虽然它有放射性危险和仪表指示涨落等缺点，但近二十多年来它越来越被人们所采用。随着我国核辐射式检测仪表在一些工业部门的推广应用，有必要向广大使用部门的技术人员和工人介绍这种仪表的用途、基本原理和结构。

毛主席教导我们：“我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。”我们相信，核辐射式检测仪表在今后我国的社会主义建设中将发挥它日益巨大的作用。

第二章 核辐射及其与物质的作用

一、元素和原子核

随着生产实践和科学实验的发展，人们分析了很多物质，发现它们都是由为数不多的一些最基本的物质所组成，如碳、氢、氧、氮等就是最基本的物质。人们把这些最基本的物质称为元素。到目前为止，人们发现的元素总共有一百零五种。当不同种类的元素在一定的条件下按不同的数量进行化合后，就形成了很多的较复杂的物质，人们称这些物质为化合物。我们日常所碰到的物质绝大部分都不是元素本身，而是由一些元素相互化合而成的化合物，如水是由氢和氧两种元素化合而成的；食盐是由钠元素和氯元素化合而成的；糖、脂肪等是由碳、氢、氧三种元素化合而成的。

组成每种元素的基本单元就是原子，原子是具有元素一切特性的最小“微粒”，能够单独存在。元素就是所有同种原子的总称。由一些元素的原子构成的基本复合物质叫做分子。如两个氢原子和一个氧原子化合成一个水分子，水就是所有水分子的总称。

原子是很小的，它是用肉眼看不见的东西，一个原子的直径只有一亿分之一厘米左右。原子又是很轻的，如一个氢原子的质量只有 1.673×10^{-24} 克。最重的铀原子，它的质量也不过 3.951×10^{-22} 克。在原子的中心是一个原子核，电子围绕着原子核按照一定轨道而运行，如图 2-1 所示。原子核带正电荷，电子带负电荷，原子本身是中性，所以原子核所

带的正电荷数恰好等于核外的电子数。如氢原子只有一个绕行电子，它的核正电荷数为1。原子核几乎具有原子的全部质量，外部绕行电子比起核来要轻得多。例如，氢原子核的质量为 1.673×10^{-24} 克，而它的一个绕行电子的质量只有 9.1085×10^{-28} 克，一个氢核的质量是一个电子质量的1840倍。原子的直径约 10^{-8} 厘米左右，而原子核的直径仅在 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 厘米，比原子的直径约小一万到十万倍左右，所以在原子核和绕行电子之间大部分是空间。

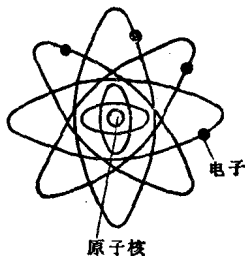


图2-1 原子结构示意图

原子核是由质子和中子组成，质子带正电荷，中子是一种不带电的中性粒子，它的质量是 1.6747×10^{-24} 克，比质子的质量略重一些。质子和中子人们称它们为核子，由于中子不带电，因此，原子核所带的正电荷就是核内所有质子所带的正电荷。核电荷数（或原子序数）就等于核内质子数。为简便起见，常用符号来表示原子核，例如，氦核内有2个质子、2个中子，可用符号： ${}^4_2\text{He}$ 来表示，符号左下方的数字代表核电荷数（即质子数），右上方的数字代表核子数。在一般情况下，符号左下方的核电荷数常省略不写。

把已经发现的元素按它们的原子所含的电子数目，依次排列成一个表，这个表就叫做元素周期表。氢是周期表第一号元素，氧是第八号元素，铀是第九十二号元素。

二、放射性同位素和核辐射

核辐射式检测仪器的最大特点在于它带有放射性同位素源，因此，要了解核辐射式检测仪器首先必须了解什么是放

放射性同位素和核辐射。

(一) 同位素、放射性同位素和稳定性同位素

每种元素的原子都不是只存在一种。*如氢就有三种：氢¹、氢²、氢³。具有相同的核电荷数 Z 而有不同的质量数 A 的原子所构成的元素称为同位素。它们在周期表中占有同一位置。例如 ${}_{27}\text{Co}^{60}$ 就是 ${}_{27}\text{Co}^{59}$ 的同位素； ${}_{6}\text{C}^{14}$ 是 ${}_{6}\text{C}^{13}$ 的同位素。

假如某种同位素的原子核在没有任何外因的作用下它的核成分自动变化，这种变化称为放射性衰变，这种在衰变过程中将放出射线的同位素就称为放射性同位素。若原子核成分不发生自动变化的同位素称稳定的同位素。发生衰变的放射性同位素也常被称为母体同位素。

关于放射性同位素和稳定性同位素，我们可以从图 2-2 来看：稳定同位素的原子核中，

质子和中子的数目从最轻的原子核到氮原子核 ($Z=7$) 是相等的或最多差一个，随着原子核的加重，中子数 N 逐渐超过质子数 Z ，到最重的核中，中子数比质子数多达 50 个。这是因为重核中，质子数多，若中子数更多则可增加质子间的距离以减小质子间的正电排斥力，这样就可以维持原子核的稳定。在图 2-2 中稳定线上下

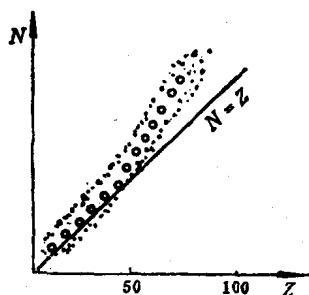


图 2-2 放射性同位素和稳定性同位素

○—稳定的 ·—放射性的
 N —中子数 Z —质子数

的同位素都是不稳定的，也就是放射性同位素。

原子序数在 83 以下的每一种元素都有一个或几个稳

定的同位素，原子序数在 83 以上的同位素则只有放射性同位素。放射性同位素又分天然的和人工的，原子序数大于 83 的天然放射性分三个放射性系，即钍系，铀系和锕系。从天然矿石中提出的天然放射性同位素，量少，品种少，价格贵。目前知道的可以利用的放射性同位素有二百多种，这些放射性同位素是用原子能反应堆和回旋加速器等办法制造出来的。原子能反应堆是用人工办法制备放射性同位素的“工厂”，物质被反应堆中的中子流照射而变为放射性物质，这种方法产量高，成本低，品种多。从反应堆用过的铀棒中也可用化学方法分离出许多种有用的放射性同位素。利用回旋加速器也可制备一些反应堆所不能制备的放射性同位素。

(二) 核辐射、辐射的种类和性质

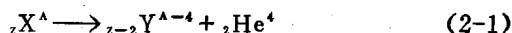
放射性同位素的原子核进行变化时放出 α 粒子、 β 粒子或 γ 射线而变为另外的同位素，这种现象称为核衰变（或称放射性蜕变），核衰变是不稳定同位素的必然现象，它不受外界条件的任何影响，有的衰变后就变成了稳定的同位素，有的衰变后仍是不稳定的，它继续衰变直到变为稳定的同位素为止。核衰变中放出不同的带有一定能量的粒子或射线的放射性现象称为核辐射。核辐射的种类可分为 α 辐射、 β 辐射、 γ 辐射和中子辐射。

核衰变中，核辐射粒子或量子带有能量，为了估计这个能量的数量，在原子物理中使用了专门的单位——电子伏特。电子伏特是电子在 1 伏特电压的作用下被加速所获得的能量数值。

α 辐射：

从放射性同位素原子核中可放射出 α 粒子， α 粒子的质量为 4.002775 原子质量单位（1 原子质量单位 $= 1.6599 \times 10^{-24}$

克),带有正电荷,实际上即氦原子核,放射出 α 粒子后同位素的原子序数将减小2个单位而变为另一个元素。一般 α 衰变过程可用下式表示:



α 粒子一般具有4~10百万电子伏特的能量,平均寿命为几微秒到 10^{10} 年。它从核内射出的速度约为2万公里/秒。作 α 衰变的放射性同位素有 ${}_{84}\text{Po}^{210}$, ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ 等。人造同位素大部分都不放出 α 粒子,只有少部分人造同位素才放出 α 粒子,如 ${}_{88}\text{Ra}^{213}$ 、 ${}_{93}\text{Np}^{235}$ 等。由一种同位素放出的 α 粒子的能量一般是单一的,并伴有 γ 射线。 α 粒子的射程长度在空气中为几厘米到十几厘米。用 α 粒子来使气体电离比用其他辐射强得多。因此在自动检测仪表中 α 辐射主要应用范围是气体分析,用来测量气体压力、流量和与气体有关的其他参数。

β 辐射:

β 粒子的质量为0.000549原子质量单位,带有一个单位的电荷,它所带的能量从100千电子伏~几兆电子伏,带有几百千电子伏的 β 粒子的运动速度或带有几兆电子伏的 β 粒子的运动速度都比 α 粒子的运动速度高得多,约20多万公里/秒。 β 粒子也就是具有高速度的电子。放射 β 粒子的原子核衰变过程可认为是由一个中子变为一个质子而放射出一个电子。我们可用下式来描述它的衰变:

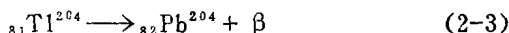


β 粒子的能量从零到最大值成连续分布,如图2-3所示,纵座标表示测得的 β 粒子计数率,即单位时间内的 β 粒子数;横座标表示 β 粒子所带的能量。从图可看出: β 粒子的能量在 $0.3E_m$ 时计数率最大,在最大能量 E_m 处计数率最

小。

对于某些同位素在衰变时不仅放出一组 β 粒子，而是放出 K 组 β 粒子，且每组的最大能量是不相同的。

β 衰变的结果，由于放出一个 β 粒子，原子核的正电荷数就增加 1 个，因此原子序数也增加 1 个，如 $_{81}\text{Tl}^{204}$ 放出一个 β 粒子后，变成 $_{82}\text{Pb}^{204}$ ，该核的质量变化极小，因此认为质量保持不变。常用的同位素铊²⁰⁴ 可以用下式表示它的衰变：



β 粒子在气体中的射程可达二十米，在自动检测仪表中，主要是：根据 β 辐射吸收来测量材料的厚度、密度或重量；根据辐射的反散射来测量覆盖层的厚度；利用 β 粒子很大的电离能力来测量气体流； β 辐射也用于放射性继电器。

γ 辐射：

γ 射线是一种从原子核中发出的电磁辐射，它的波长较短，为 $10^{-8} \sim 10^{-11}$ 厘米，它是原子核从激发态变到基态时的产物。 γ 射线的发射对原子核的原子序数和质量数没有影响。它的发射常伴有 α 及 β 射线，发生 γ 辐射的核常是 β 衰变或其他衰变的产物，称同质异能素。

某种同位素从激发态变到基态就发出 γ 射线， γ 射线的能量是单色的，它可用能级图来表示，如核辐射式检测仪表常用的同位素 Co^{60} ，可用图 2-4 表示它的衰变，它先放出一个 β 粒子，然后放出两个 γ 光子，其过程可用下式表示为：

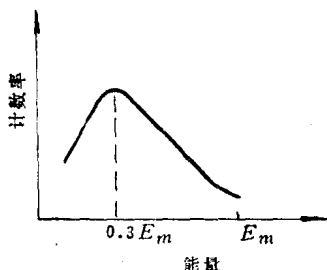


图2-3 β 粒子能量分布