

自动化丛书



核辐射在自动检测中的应用

[苏联] H. H. 苏米洛夫斯基 Л. B. 梅里特采尔著 吴欽焯译

365

上海科学技术出版社

核辐射在自动检测中的应用

〔苏联〕H. H. 苏米洛夫斯基, Л. B. 梅里特采尔 著

吴钦焯 译 沈宝夔 黄松 校

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书内容包括自动学及运动学的理論,自动装置、元件和仪器的結構及应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关資料,也包括国内編写的专题論著。本丛书由“自动化丛书編輯委员会”主編。

本书討論几种主要的核輻射的特性,和应用在自动检测装置中的輻射接收器,以及这类仪表的基本結構原理。并列举已在工业生产中应用的一些具体检测装置的实例。适合从事于生产过程綜合自动化专业方面的工程技术人员和大专师生参考。

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В
УСТРОЙСТВАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
Н. Н. Шумиловский, Л. В. Мельтцер
Госэнергиздат · 1958

自动化丛书(2)

核輻射在自动检测中的应用

吳欽璋 譯 沈宝囊 黃 溘 校

自动化丛书編輯委员会主編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

上海市印刷三厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印张 3 10/32 排版字数 70,000

1962 年 12 月第 1 版 1963 年 8 月第 2 次印刷 印数 1,801—2,900

統一书号 15119 · 1695 定价(十二)0.40 元

前 言

原子能的发展和工业生产的需要，导致人們去創造利用核輻射的新的自动檢測方法。这种新的方法和一般檢測方法比較起来，有很多的优点。在許多情况下，复杂的生产过程自动化中所出現的各种問題，就可以用新的方法来解决。它們能有效地改善生产工艺过程，提高生产效率。

这类自动檢測装置安装在車間中所占的体积是不大的，它附帶有盛置微剂量放射性物质的小容器。常常能够大量节约人工，減輕工人的劳动，并降低产品的廢品率和縮短工艺周期的時間。

1957年4月在莫斯科全苏科学技术會議上，发表了許多关于在国民經济和科学中应用放射性同位素和稳定同位素及輻射的报告。我們可以提出若干个别的例子作为例証來說明^[1]。

根据不完全的資料統計，在列宁格勒軋鋼厂和察波罗什鋼厂采用自动檢測鋼帶厚度仪表的結果，可以使金属因厚度而产生的廢品降低两倍，軋鋼机停車時間減少約10倍。在列宁格勒軋鋼厂采用了放射性标记鋼帶，就使化学分析次数差不多減少5倍，每年可节省近十萬卢布。河运部在挖泥机上装置了 γ 倫琴計，就使吸泥机的工作效率提高10~15%，每年大約可节省二百万卢布。在庫齐伏城諾吉那制造厂中装置了放射性紡織物測重計，每年可节约織物达12,000米。在造紙机上安装了帶有調节的放射性重量計，每年就可节省达到660,000卢布等等。在1957年初，根据美国的某些报告^[2]，由于在工业上应用放射性同位素后，每年节省总额已达到三亿

九千万美元，而在应用于自动检测物质厚度和重量的仪表部分，就占了这个总额的一亿一千一百万美元。共有 300 家以上不同的工厂企业已经采用了这类仪表，在正常生产期间，平均节约为产值的 2~3%。而在使用新的生产方式期间，就可以达到 10~20%。所以这些仪表在使用以后实际上就全部收回成本了。

这类仪表的品种很多，不可能全都列举出来。但是从引证的数字中，已经可以看到在自动化和测量方面采用核辐射的重要性。

同样地应该再考虑到自动检测这门学科的发展还只是刚开始，其每年的经济效果毫无疑问地将会增高的。

利用核辐射的仪表的主要优点是什么呢？首先是应用它们可能实现不接触式测量，就是在测量装置与被测介质之间，不需要有直接的接触，结果可免除被测介质和测量装置之间的相互作用，这是有很大意义的。

另一些优点是辐射源具有很大的稳定性和很长的使用寿命。在自动检测技术中，通常都是用同位素作为辐射源，这些同位素能够一直使用几年或者几十年，而不必更换。这样还可得出以下的结论：放射性辐射源不需要任何维护，在使用过程中不消耗能量，当外部条件变化时不会改变本身的特性。

最后，不能不指出这个优点，即在自动化线路中应用这类装置是很方便的。因为核辐射的检测仪表具有电气输出和良好的快速作用，这就促使它们适于在自动和运动系统中采用。在各种不同工业部门中，同样的仪表或调节器都能够用来自动检测和控制，这也是很方便的。

从应用各种检测方法的合理性观点来看，无论是使用核辐射，或不使用核辐射，可将所有的检测对象和范围分为三

类。

第一类的情况是只有使用核辐射，才能够做到对生产过程进行不破坏的检测。举例来说，象测量非磁性物体上的非磁性涂层的厚度，测量运动着的材料厚度和重量，寻找地下电缆线的故障位置等等。在这些情况下，因为再没有别的方法可用，就需要采用新的方法，而不能认为是浪费。在许多场合采用这种新检测方法的同时，还由于改进了生产过程本身，而最后能得到很大经济利益。

第二类是可以采用普通仪表进行不破坏地检测，同样也可以采用核辐射仪表进行检测，可是采用核辐射仪表来解决检测的问题比较好而简便。举例来说，如象缺陷探伤，可以采用放射性辐射法，也可以用 X 射线法和超声波法。但是在很多情况下，采用放射性方法是最简便的。

第三类是完全能够简单可靠地进行检测，并不需要采用核辐射方法。近年来许多不同的企业机构，常常有意地将放射性同位素应用到各种生产过程的自动检测装置上，经过严密的审查后，发现用一般的方法也能很好地解决问题，而不必使用放射性同位素的特殊仪表。所以为了要获得最好的检测目的，每一种情况都需要详细地和有经验地来审核，并不是随时都选用放射性检测方法就是最好的。

利用核辐射的自动检测装置，是基于这些核辐射与被检测介质间相互作用下产生的各种不同现象。因此，无论是研究测量方法；或者是设计试制这些装置的原理之前，都需要熟悉它们所利用的辐射的基本形式，辐射与介质相互作用的基本现象，以及这些辐射在自动检测装置中的记录方法。

目 录

前 言

第一章 核輻射	1
1. 輻射源	1
2. α 輻射	6
3. β 輻射	7
4. γ 輻射	11
5. 中子輻射	14
第二章 輻射接收器	17
6. 电离室	18
7. 气体放电計数管	21
8. 閃爍計数器	26
9. 中子接收器	30
第三章 利用核輻射的自动檢測装置中測量綫路的結構原理	33
10. 測量誤差	33
11. 測量綫路	35
12. 核輻射的調制	45
第四章 測量方法和檢測仪表	48
13. 利用核輻射的吸收来測量物质的厚度	48
14. 利用核輻射的吸收来測量物质的密度和重量	54
15. 物位的測量	60
16. 利用輻射的反射作用来測量棉織物厚度、复盖涂层厚度 和物质成分	65
17. γ 探伤法	69
18. 气体压力的測量	71
19. 气体分析	73
20. 測量气体和液体的流量	74

21. 放射性继电器	79
22. 核輻射能譜方法的利用	82
23. 中子束的利用	82
結 論	85
參考文獻	86
譯校后記	94

第 1 章

核 輻 射

1. 輻 射 源

在自动检测装置中，可以利用各种不同的核辐射—— α 辐射、 β 辐射、 γ 辐射和中子辐射等。

天然的和人造的放射性同位素都是核辐射源。放射性同位素与稳定的同位素不同，它本身具有放射性衰变的特性。在这种衰变过程中，同位素所放出的核辐射，结果使得某一种化学元素会转变为另一种化学元素。

在自然界中所发现的天然的放射性同位素，通常是列在门捷列夫周期表最后的一些元素。这些同位素的价格很高，在自动检测装置中是很少采用的。人造的放射性同位素是由稳定的同位素在核子反应堆中，经过照射而得到的。这些同位素由于价格便宜和使用方便，近来已极广泛地采用着。

已经知道的各种放射性衰变有以下几种：

(1) 在 α 衰变时，放射性核放射出一个氦原子核 ${}^4_2\text{He}$ ，称为 α 粒子。同时这个原子核转变成为另一个元素的原子核，比原来的元素在原子序数上减小 2，而质量数目减少 4。门捷列夫周期表最后的一些元素，通常都会产生 α 衰变。

(2) β 衰变或电子衰变，这与原子核的一个中子转变成

质子有关。它放射出电子(β 粒子)和較輕的中子,这时原来元素的原子核轉变成成为原子序数增大一个单位的元素原子核。我們已知道正电子在衰变时,原子核中的一个质子轉变成中子,而放射出正电子和中子,这时原来的原子核原子序数减小一个单位。与电子衰变正好相反的现象称为 K 俘获,在这种情况下,原子核从它旁边的 K 层俘获一个电子,而产生一个中子。电子就从离原子核較远的外层轉移到原子核俘获电子的内层,在轉移时即会产生 X 輻射特性。在稳定的原子核中,中子和质子数目之間始終保持一定的比例关系,若是从任一方向来破坏这种比例,則会发生 β 衰变或 K 俘获。

(3) γ 輻射,是在原子核的放射性轉变(例如 β 衰变时)中出現的多余的能量。当原子核失去这种能量后,即从能量激发状态轉变为不激发状态,并发射出电磁脉冲波或 γ 量子。

这种轉变可用鈷⁶⁰的衰变为例,鈷⁶⁰的原子核当放射出 β 粒子时,即轉变为鎳⁶⁰原子核,可是后者处在激发状态,刹那间就将自己激发的能量,以两种能量为 1.17 和 1.33 兆电子伏的連續的 γ 量子发射出来。

(4) 中子源,在自动檢测装置中应用的中子源,通常是基于呈 α, n 形式的原子核反应,这时由于原子核受到 α 粒子轰击而产生中子。一般采用的中子源是鐳-铍,或者鈾-铍。鐳-铍源是封焊在安瓿中的鐳和铍的粉状混合物,当鐳衰变时放射出的 α 粒子,轰击铍的原子核,而在某种情况下,就形成中子,从安瓿的各个方向放射出来。

在自动檢测装置中采用的輻射源的活性,通常是按毫居里来测量的。一毫居里的活性相当于每秒钟有 3.7×10^7 次衰变。輻射源的活性(亦即輻射的强度)是随着時間按指数定律而減低的,即

$$a = a_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

式中 a_0 —— 起始的活性；
 a —— 經過時間 t 秒后的活性；
 λ —— 放射性衰变常数。

輻射源的活性减低到原有的一半所需要的时间，称为半衰期，以 $T_{\frac{1}{2}}$ 表示

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2)$$

要得到一毫居里活性所需要的放射性同位素(以克計的)重量，可按下列公式来计算

$$P = 2.79 \times 10^{-9} A T_{\frac{1}{2}}$$

式中 A —— 这种同位素的质量数；
 $T_{\frac{1}{2}}$ —— 半衰期，以年計。

各种 γ 輻射物质的量也可以用克鐳当量来表示，一克鐳当量($g\text{-Rb}$)所表示的 γ 輻射强度，是等于一克鐳与它的衰变产物处于放射性平衡时，在同样条件下所具有的放射性强度。

对于中子源来说，“中子輸出”也是很重要的特性，通常它对于一次衰变数目的关系上是不大的，而当中子源的结构为最适宜的情况时，每一毫居里鐳-铍源有每秒 10^4 个中子，每一毫居里钋-铍源有每秒 10^3 个中子。

与物质相互作用的核輻射的剂量是用倫琴(R)来表示的，一倫琴的輻射量，是指在标准状态下(当压力为 760 毫米汞柱，温度为 0°C 时)一立方厘米干燥空气中产生一个静电单位离子电荷所需的輻射剂量。輻射剂量的功率是用每秒倫琴来表示。

核輻射的能量在很大程度上决定着它的特性，輻射能量

愈大，其透射能力就愈大。随着能量的改变，能够改变辐射与介质间相互作用的特性。在自动检测装置中所采用的辐射能量，通常按兆电子伏或千电子伏来测量（可缩写为 MeV 或 keV）。

按照近代物理学的概念，任何能量的变化 δE ；和相应的质量变化关系为

$$\delta m = \frac{\delta E}{c^2} \quad (3)$$

式中 c ——光速。

按照式(3)，从原子核分出的能量值：

(1) 当 α 衰变时

$$E_\alpha = (M_1 - M_2)c^2 - m_\alpha c^2 \quad (4)$$

(2) 当 β 衰变时

$$E_\beta = (M_1 - M_2)c^2 - (m_e + m_\nu)c^2 \quad (5)$$

式中 M_1 和 M_2 ——在衰变前和衰变后的原子核质量；

m_α 、 m_e 和 m_ν —— α 粒子、电子和中子的质量。

γ 辐射的能量是与受激发而射出 γ 量子的原子核所具有的剩余能量有关系，这时原子核或者是越过自己的基本能级，立刻发出全部的剩余能量，或者是引起某些中间过渡的状态，连续不断地发射出各种能量的 γ 量子。

中子的能量是由它们产生时受到的反应所确定，例如对于受镭 α 粒子轰击 Be^9 而得到的中子来说，我们可由下面的能量方程式中求得

$$E_n = (M_{\text{Be}} + m_\alpha)c^2 - (M_{\text{C}} + m_n)c^2 + E_\alpha - E_{\text{C}} \quad (6)$$

在这里 E_n 和 E_{C} ——是经过反应结果所产生的中子能量和碳原子核能量， M_{Be} 、 M_{C} 和 m_n ——是铍原子量、碳原子量和中子质量。

輻射的特性不受外界条件如压力、温度、电场、磁场等的任何影响，这是核輻射源的一个重要特点。其原因是放射性并不是由原子的电子壳层的过程所决定，在电子壳层間相互作用的能量与通常物理现象的能量有同一数量級。而放射性是与原子核內部的现象有关系，在这里相互作用的能量会增高为3~4个数量級。

表1列举了一些主要的同位素和輻射源，都是在自动检测装置中广泛应用的。

表 1

元素符号	元素名称	輻射种类	半衰期	粒子能量 (兆电子伏)	γ 量子能量 (兆电子伏)
Co ⁶⁰	钴	β, γ	5.3 年	0.31	1.17; 1.33
Sr ⁹⁰ Y ⁹⁰	锶, 在衰变下生成钇	β β	20 年 2.54 天	0.54 2.27	— —
Ru ¹⁰⁶ Rh ¹⁰⁶	钌, 在衰变下生成铑	β β, γ	290 天 30 秒	0.039 3.5	— 0.52
Cs ¹³⁷	铯	β, γ	33 年	0.52	0.66
Ce ¹⁴⁴ Pr ¹⁴⁴	铈, 在衰变下生成镨	β, γ β, γ	282 天 17.5 分钟	0.3 2.96	0.03~0.23 0.7~2.2
Tu ¹⁷⁰	钍	β, γ	120 天	0.97	0.084
Ir ¹⁹²	铱	β, γ	74 天	0.67	0.14~0.88
Tl ²⁰⁴	铊	β, γ	2.7 年	0.76	0.076
Po ²¹⁰	钋	α, γ	138 天	5.3	0.8
Po ²¹⁰ +Be ⁹	钋+铍(中子源)	η, γ	138 天	4(平均值)	
Ra ²²⁶ +Be ⁹	镭+铍(中子源)	η, γ	1590 年	5(平均值)	

(注) 含有复杂能谱(钴⁶⁰, 铱¹⁹²等)的 γ 輻射吸收可参看式(20)来计算。

2. α 輻射

一般的 α 輻射是由某一組強度較大的 α 粒子和若干其他組能量較小的 α 粒子所組成。例如：鈾實際上可算是單一能量的輻射源，可是它有 12 組 α 粒子，鈾的 α 粒子中基本的一組能量為 5.3 兆電子伏，在它的能譜中要比其他任何一組的強度約大 5×10^3 倍。

α 粒子在空氣和物質中的射程 l (厘米) 是

$$l_{\alpha 03\delta} = 0.318 E^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

$$l_{\alpha e u} = l_{\alpha 03\delta} \frac{\rho_{\alpha 03\delta}}{\rho_{\alpha e u}} \sqrt{\frac{Z_{\alpha e u}}{Z_{\alpha 03\delta}}} \quad (8)$$

式中 E ——粒子的起始能量(兆電子伏)；

$\rho_{\alpha 03\delta}$ 和 $\rho_{\alpha e u}$ ——空氣和物質的密度；

$Z_{\alpha 03\delta}$ 和 $Z_{\alpha e u}$ ——空氣和物質的平均原子量。

射程的長度在空氣中不超過幾厘米，而在固體物質中不會超過幾十微米。

當 α 粒子穿過氣體介質時， α 粒子的電場與分子外部的電子殼層相互作用，使電子加速而讓某些電子從殼層逸出。

這樣，氣體的分子被電離，每形成一對離子(自由電子和正離子)需要 32.5 電子伏的能量。

α 粒子與氣體分子相互作用的結果，將失去自己的能量而停止運動。隨着 α 粒子速度減緩的程度，會提高更多分子數目的電離概率。說明比電離 $n_{y\delta}$ 和殘余粒子射程間關係的

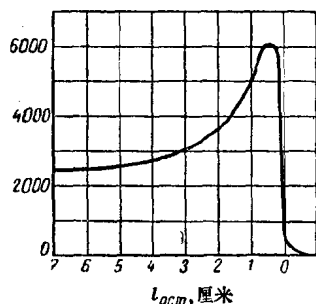


圖 1 布喇格曲綫圖

曲綫，称为布喇格曲綫，如图 1 所示。

用 α 粒子来使气体电离，比用其他輻射强得多，因此，在自动检测装置中 α 輻射主要的应用范围是气体分析；测量气体压力、气体流量和与气体电离有关的其他方法^[3]。

3. β 輻射

β 輻射具有連續的能譜，它从最小的能量开始，一直到代表該同位素特性的最大能量 $E_{\text{макс}}$ 为止。 β 輻射連續能譜的存在，是由于当 β 衰变时产生出中微子，这些中微子带走了能量 δE ，使 β 粒子不能得到最大能量 $E_{\text{макс}}$ 。

$$\delta E = E_{\text{макс}} - E \quad (9)$$

式中 E —— β 粒子从原子核中带走的能量，

β 輻射的分解能譜形状，可以下式来表明

$$N(E) = kF(Z, W)W\sqrt{W^2 - 1}(E_{\text{макс}} - E)^2 \quad (10)$$

式中 $N(E)$ ——在单位能量内相对的 β 粒子数；

k ——任意的常数；

$F(Z, W)$ ——費密微分函数；

W ——在单位靜止质量中 β 粒子的全部能量；

Z ——受到 β 衰变的同位素原子序数。

【注】当計算利用 β 輻射的自动检测装置时，常常需要熟习 β 輻射能譜的形状^[4]。在同位素表中所列出的一般只是 $E_{\text{макс}}$ 值。

在图 2 中引用了按已知 $E_{\text{макс}}$ 和 Z 值，从式 (10) 来求得輻射能譜曲綫的作图法^[5]。图表的使用步骤如下：按图 2b 所示的模板图形剪下，将它沿横坐标放在图 2a 上，使它的直角位置与 $E_{\text{макс}}$ 点相吻合，量出相应的曲綫 Z 和模板抛物綫边缘之间的纵坐标差值，并对各个不同 E 单位按纵坐标計算出差值，作 $N=f(E)$ 的关系图。图 3 所示就是按照这种作图法而得到的鈾 $^{201}\beta$ 輻射的能譜曲綫。

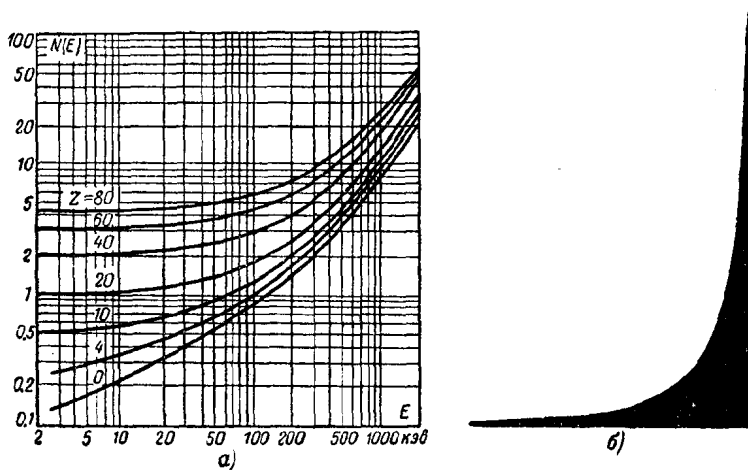


图 2 供繪制 β 能譜的图表

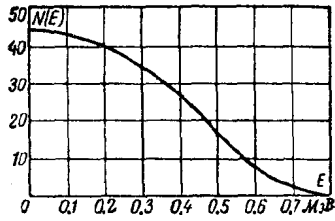


图 3 鈹 Tl^{204} β 輻射能譜图

β 粒子(电子)透射过物质时与物质的电子和原子核相互作用, 这种相互作用可以是彈性的和非彈性的。当彈性相互作用时, 电子的能量沒有損失, 但是它們会明显地改变着方向——散射。反方向的散射值与散射体厚度及原子序数有关, 即

$$J_{обp} = J_{обp, макс} (1 - e^{-\mu_{обp} d}) \quad (11)$$

式中 $J_{обp}$ ——当散射体厚度等于 d 时, 在相反方向輻射的散射值;

$J_{\text{обр. макс}}$ ——当 $d \rightarrow \infty$ 无穷大时的散射值；

$\mu_{\text{обр}}$ ——辐射的反散射系数。

在相反方向 β 辐射所散射的强度，与散射体原子序数间的关系，可用公式表示为

$$\frac{J_{\text{обр. макс1}}}{J_{\text{обр. макс2}}} = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^n \quad (12)$$

式中 $J_{\text{обр. макс1}}$ 和 $J_{\text{обр. макс2}}$ ——从原子序数为 Z_1 和 Z_2 的物质辐射的最大散射值；

n ——与几何实验有关的常数(一般 $n=0.7\sim 0.8$)。

当非弹性相互作用时，在 β 粒子与原子的电子撞击情况下， β 粒子的能量会因物质原子的电离而损失(电离损失)，若在 β 粒子受到库仑电场的强烈制制情况下， β 粒子的能量会因制制伦琴辐射而损失(辐射损失)。第一种损失和第二种损失之比，可以近似地用关系式 $1000/ZE$ 来求得。因此随着 β 辐射通过的物质原子序数的增加，和辐射能量 E 的增加，电离损失将会降低，而辐射损失则增加。空气被电子电离后所产生的比电离值 $n_{y\beta}$ 与电子能量间的相互关系曲线如图 4 所示。

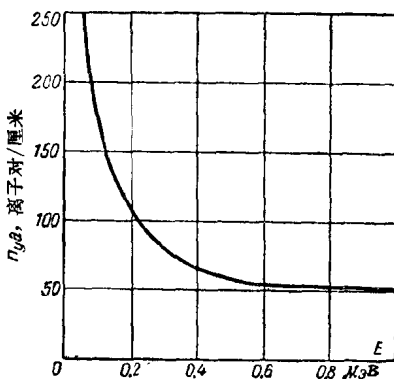


图 4 在空气中每一厘米电子路程上生成的离子对 $n_{y\beta}$ 数 1 与电子能量的关系

β 粒子的能量损失决定着它在物质中的射程。具有能量