

工业核仪表的现状与发展

安继刚

(清华大学核能技术研究所)

摘要: 本文介绍了工业核仪表的现状与发展,重点介绍了强度测量型工业核仪表、能量分析型仪表、数字图象处理型仪表和其它同位素仪表的国内外有关情况。

一、概况

本世纪五十年代以来,随着核物理、核反应堆工程及核武器工业发展起来的放射性同位素与核辐射检测技术大量应用于工业并发展成为经济效益显著的工业技术领域——工业核辐射检测、分析与控制仪表,简称“工业核仪表”(也叫“同位素仪表”)。

工业核仪表不同于其它工业仪表,它是利用辐射与物质相互作用时发生的吸收、散射、电离、激发等效应取得有关物质的微观、宏观信息的,因而具备一些突出的优点:

- (1) 不接触被测对象,是一种非破坏性的检测工具;
- (2) 检测灵敏度高、响应速度快、性能稳定可靠;
- (3) 可在一些恶劣的现场条件下,如高温、高压、腐蚀或毒性等情况下对物料进行检测、分析与控制。

自从1951年美国首先将放射性同位素厚度计应用于橡胶生产以后,国外工业核仪表在工业上的应用得到大力开发,大体经历了三个发展阶段:

(1) 开发阶段(40年代末~60年代初)。这一阶段是工业核仪表开创时期。美国等一些工业较发达国家进行了大量开发研制工作,成果反应在1955和1958年两次日内瓦和平利用原子能国际会议上。这一阶段总的特

点是,同位素仪表在技术上还未完全成熟,仪表质量还难于完全适应工业现场使用条件,此外,仪表的开发也还带有某种盲目性,因而发展较缓慢,推广面有限。

(2) 技术成熟阶段(60年代~70年代中期)。随着晶体管与集成电路等电子技术的发展,以及新型核辐射探测器件的出现,工业核仪表进入了一个新阶段。在这一时期,国外,特别是西方国家正处于经济高速度发展时期,因而对包括同位素仪表在内的新技术表现出了强烈的兴趣。这一时期,工业核仪表也进入了成熟阶段:仪表稳定性与可靠性大大提高、性能明显改善、使用对象明确、应用领域不断扩大、经济效益日趋明显。

(3) 高水平发展阶段(70年代中期以后)。随着电子计算机技术的迅速发展,工业核仪表在大量推广的基础上进一步更新换代,朝高水平方向发展。仪表的灵敏度和精确度日益提高,可靠性和稳定性越来越好,功能范围和应用领域也大大扩展。目前在一些工业发达国家,正出现某种智能化的大型多功能同位素仪表,以解决实际工作中遇到的高难度综合性问题。此外,另一些对口专用的小型同位素仪表也得到了发展。

工业核仪表在国外的概况及所产生经济效益的估算如表1.2.3.所示。

我国同位素仪表发展起步比日本晚三年,但由于种种原因,发展速度不快,与西方发达国家的差距拉大了。到80年代,随着改革、开放的形势,我国的工业核仪表也有

表1. 世界各国工业核仪表发展概况

	1960年	1965年	1970年	1975年	1980年
美 国	4650	11000	31500	103000	215000
英 国	760	2143	5330	11700	34000
法 国	1190	1965	5000	8300	26500
西 德	1210	1647	5000	12000	31000
日 本	185	520	2155	7550	20000
苏联与东欧		33000	58000	95000	150000
其他西方国家	5753	11534	30500	91900	290100
印 度			1800(1978年)		
印 尼			265 (1980年)		

表2. 西方国家以及苏联和东欧国家工业核仪表的经济效益

	装 置 名 称	经济效益/年·台	效益/成本比
西方国家	放射性同位素厚度计、密度计等	3500~5000美元	—
苏联与东欧国家		3500~5000卢布	7.0~8.5
西方国家	γ探伤仪、中子照像装置	5000~8000美元	5.0~12.0
苏联与东欧国家		5500~8500卢布	9.0~2.0

表3. 工业核仪表效益/成本比 (1981年)

仪 表 种 类	效益/成本比
塑料薄膜厚度计	3:1
纸张厚度与湿度计	9:1
镀锌层厚度测量仪	30:1
硫含量分析仪	10:1
高炉焦炭湿度计	20:1
家用供暖系统检漏	7:1

了迅速的发展。1983年统计,我国工业已采用1700台工业核仪表,其中绝大部分还是技术上比较简单的开关式料位计。到1985年,据不完全统计是2500台,到1988年9月国家科委统计我国工业核仪表在用的已有6000台左右。

工业同位素仪表种类繁多,应用领域十分广泛,其工作原理与作用方式也不尽相

同,因而很难全面的加以分类。按照基本工作原理和作用方式,工业核仪表可分为以下几类:

(1) 强度测量型仪表。包括放射性同位素料位计、密度计、厚度计、浓度计、泥沙量计、中子水分计和核子秤等。主要是利用物质对射线的吸收、散射与(中子)慢化等作用,使射线的强度发生变化,反映出被测物的某些有关的宏观物理参数。

(2) 能谱分析型仪表。主要指野外或现场分析仪表,例如X射线荧光分析仪、核测井和在线活化分析等仪器仪表。利用这类仪表分析测定有关射线的能谱,确定物质的成分和结构。

(3) 数字图像处理型仪表。包括核无损检验(即射线探伤)装置,如X射线探伤和γ射线探伤和中子照相以及工业断层显像(即

工业CT)等装置。这类装置主要是利用胶片照相技术、二维或三维阵列探测技术、数字图像重建与处理技术等确定射线的空间或平面分布,反映被测对象的有关信息。

(4)其他同位素仪表。包括某些无法归类的同位素仪表,如放射性同位素火灾预警装置,静电消除器,放射性同位素放电装置,放射性避雷针,放射性同位素电离真空计等。这类仪表一般多是利用放射性同位素放出的辐射的电离效应。

二、强度测量型工业核仪表

这是一类数量最多、应用领域最广、技术发展最为成熟的同位素仪表。其中尤以料位计、密度计和厚度计,所谓“老三计”为最。国外几乎每个工矿企业都使用这类仪表,少则几台多则几十台,甚至上百台。很多工业成套设备通常也都配备这类仪表,作为生产过程的一种监测控制手段。这类仪表一般可正常工作10年左右,维修费用仅占仪表费用的2%左右。国外老三计在工业仪表中所占的比例为:美国10%、欧洲共同体5%、东德4%、苏联3%。这三类仪表就技术难度而言,以开关式料位计(包括 γ 继电器)最为简单。苏联拥有的8万多台同位素仪表中,绝大部分属于 γ 继电器型仪表。目前 γ 继电器在苏联已广泛应用于劳动强度大、工作条件差的部门,如煤炭、采矿、冶金、建筑等部门。据估计,苏联每台 γ 继电器的效益为:可降低生产能耗5~8%,节约原材料2~3%,提高劳动生产率3~5%。欧洲等国也大量采用 γ 继电器,如控制饮料工业的装瓶,食品工业和化学工业中的罐头包装等。

料位计的监控可分为定点监控和连续监控两种。料位开关和 γ 继电器是典型的定点监控仪表。连续监控料位计可用多点源或非线性长条源与点探测器,也可用点源与长条探测器相配合。西德出产的连续料位计多用前一方案。美国Kay-Ray公司出的连续料位计

采用后一方案,探测器是长电离室。我国目前还只有定点监控料位计已批量生产,尚不能生产连续料位计。

放射性同位素厚度计主要用于造纸、纸浆、塑料制品、橡胶制品、纤维、玻璃、轻工、化工、钢铁、有色金属等部门。据报道,美国一大型橡胶轮胎制造厂由于采用放射性同位素厚度计,一年可节约原材料70万美元。美国一钢铁厂采用放射性同位素厚度计控制钢板厚度,一年可节省钢材24万美元。又如,美国一家生产塑料薄膜制品的工厂,由于采用了放射性同位素厚度计,每年节约18万美元。一家图纸制造厂,采用放射性同位素厚度计,每年节约原料25万美元。目前北美、西欧以及苏联等工业发达国家70%的造纸厂都采用放射性同位素厚度计。例如日本一家造纸厂共使用了25台同位素仪表,其中放射性同位素厚度计占21台。苏联一造纸厂由于采用了放射性同位素厚度计,使每台造纸机每年可多获5.8万卢布的经济效益。据估计,若全苏纤维素工业和造纸工业全部采用放射性同位素厚度计,那么一年全国就可节约木材600万卢布,而为此投资仅为340万卢布,若全部实现生产综合自动化(需投资700万卢布),则可获得年经济效益为1700~2000万卢布。

我国的钢板与带钢测厚仪已经发展多年。清华大学核能所近年来发展的直读式带钢测厚仪,获1988年国家发明奖三等奖,已推广七十多台。国家科委组织的“六五”攻关项目——纸张定量控制系统在上海工业自动化仪表研究所,清华核能所,广东测试所等单位的共同努力下,已经安装在北京造纸一厂,早已实现PID方式控制,正在调试数学模型。

密度计也是基于 γ 射线穿透介质时强度发生变化的原理对介质密度进行检测的一种非接触式仪表。采用这种密度计,可检测密封容器或在管道中流动着的液体、泥浆、矿料等介质,甚至卷烟烟丝的密度。目前国外

多采用高压电离室作为探测器。这种探测器性能稳定可靠，然而灵敏度较低，故需较强的放射源。为了提高灵敏度，降低放射源强度，国外也有采用闪烁计数器作为探测器的。然而采用闪烁计数器时必须采取特殊的“稳峰”措施，以提高电压稳定性，避免漂移。国外配有微处理机的密度计的测量精度达到 0.0001克/厘米^3 ，并可同时进行温度补偿。

放射性同位素密度计的应用领域也十分广泛，包括工业、林业、畜业、水利等部门，特别是烟草、食品、建材、造纸、化工、石油、冶金、采矿、煤炭、机械、纺织等部门。据报道，美国一家石棉水泥厂，由于采用放射性同位素密度计调节控制泥浆密度，一年节约原材料9.8万美元。美国的卷烟业由于采用这类密度计测量烟丝密度，估计每个卷烟厂每年可节约300万美元的烟草。苏联与东欧一些国家在制糖厂、卷烟厂、纤维素厂等工业部门由于采用了放射性同位素密度计，可使生产成本降低1~2%，每台仪表每年可取得6500~8000卢布的经济效益，效益/成本比为2.8~9.6，投资回收期为0.1~0.4年。

中子水分计是利用快中子与介质作用而被减速慢化的程度与介质的含氢量有关，因此测定介质中慢化中子的量可以反应介质的含水量。目前，中子水分计是解决生产过程中大体积物料水分测量难题的最佳方法。中子水分计的水分测量范围一般在0~15%（重量）之间，精度可达2.5%（重量）左右。中子水分计最适于含氢量很低的物料中含水量的测量，例如焦炭、烧结矿、沙土以及混凝土混合物等物料的含水量的测定，其相应的测量精度为：焦炭 $\pm 0.5\%$ （重量）（含水量1~15%（重量）），烧结矿 $\pm 0.3\%$ （重量）（含水量8~10%（重量）），沙土 $\pm 0.1\%$ （重量），工程混凝土 $\pm 0.3\%$ （重量）。

中子水分计的发展已有三十年的历史。最早用于农业（例如土壤湿度判定）与市政工程，随后推广到水文地质、工业生产等领

域。目前美国、苏联、加拿大、英国等国都有中子水分计系列产品。日本起步较晚，但发展很快，目前日本的冶金工业中中子水分测量水平居世界领先地位。据估计，1983年日本全国炼钢厂共采用中子水分计347台，其中高炉焦炭水分测定用高精度透射型中子水分计，每台每年经济效益可达10万美元。目前日本正在开发 Cm-252 中子水分计，可同时测定物料的水分与密度，精度提高到0.5%（重量）。这特别有利于含水量低的物料以及物料深部的水分测定。据国际原子能机构的统计，高炉焦炭水分测定用中子水分计的效益/成本比一般都可高达20:1。例如，一座年产1000万吨的高炉，由于采用了中子水分计，平均每年可节约焦炭0.5%（即0.1万吨），约为仪表投资的20倍。

核子秤是利用物质对辐射的吸收或散射的原理制成的。它能连续测量各种传送机上物料流量。这种核子秤与常规的称量方法相比具有不少优点：（1）由于是非接触式测量仪表，所以不需在传送带上安装任何机械部件，因而不存在输送带磨损、撕裂、变形等问题；（2）不需对传送系统进行任何改动，只需保证传送带上下有200毫米的空间，便可直接将仪表安装在原有的设备上；（3）操作方便、测量迅速且可连续测量，维护工作量小，可在恶劣环境条件下工作。

核子秤主要由分别置于传送带上下的放射源与探测器组成。为了测定物料流量，需安装一台测速计以测定传送带的速度，有的还配有微型计算机。

美国Kay-Ray公司大量生产6000X型及6060型微机核子秤，用 $100\text{mc}^{137}\text{Cs}$ 源及高压电离室探测器，最高计量精度可达0.5%（在一系列关于颗粒度，水分，料形等前提条件下才能达到此精度，一般1%或略低）。美国德克萨斯核仪器公司生产的核子秤也用 ^{137}Cs 源及高压电离室探测器。我国自1983年后已陆续引进核子秤，迄今累计有数十台。

在国家科委支持下，黑龙江技术物理所

于1986年鉴定通过了采用闪烁计数器作探头的核子秤。清华大学核能技术研究所研制了用高压电离室作探头的微机核子秤，并已由北京市科委鉴定通过，而且获得了北京市计量局的计量许可证，精度优于1%。

煤灰分计与石油含硫量分析仪，都是利用不同原子序数的物质对射线具有不同吸收和散射效应制成的分析监控仪表。这类分析装置共同的特点是，可以在生产线上连续在线分析控制煤炭和石油中的无用成分和有害成分的含量，提高产品质量，提高生产效率，降低劳动强度，改善劳动条件。

放射性同位素煤灰分计在国外已得到普遍应用，是一种常规分析检测控制手段。它能满足生产中一般监控要求。例如，由镭-241源与闪烁计数器组成的散射式煤灰分计，可在线测定煤炭中的灰分，误差小于0.3%（重量）（含量0~6%（重量））。据理论估计，在煤灰分计中用15千电子伏的 γ 射线时仪表灵敏度最高、精度最好，因而采用铯-137源最为合适。

石油含硫量分析仪可连续在线监测控制石油生产工艺中硫含量。这有利于提高产品合格率，延长石油后续加工中铂网催化剂的使用寿命，大大减轻分析实验室的工作量。通常含硫量分析仪由 γ 放射源与闪烁计数器组成。由于硫对同一能量 γ 射线的吸收系数比碳、氢大16倍，故这种分析仪的测量精度应该是很高的。在含硫量为0~2.0%（重量）时精度可达 $\pm 0.01\%$ （重量）。用这种分析仪还可测量汽油中的铅含量，在含硫量为0~5克/升时测量精度可达 ± 0.01 克/升。

目前国外强度测量型同位素仪表正朝着如下几个方面加以改进和完善：

(1) 提高可靠性，以适应恶劣工作环境的要求；

(2) 提高响应速度和测量精度。随着工业生产的高速化，监控仪表的响应速度和精度是确保产品质量的关键；

(3) 为实现生产过程的最佳化控制，仪表本身必须能对各种影响因素进行自动校正。

（未完待续）