

doi: 10.7690/bgzd.2025.09.007

核辐射剂量监测中全身计数器自动化测量系统

苏 懿¹, 曹 磊¹, 谢世宇¹, 廖 鹏², 向叶舟², 彭建龙², 谭煦滨³, 周文雄³

(1. 中广核苍南核电有限公司安全防护部, 浙江 温州 325000; 2. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能测控事业部, 四川 绵阳 621000; 3. 重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为实现核电站全身计数器全流程无人值守测量, 设计了一套完整的自动化测量系统。全身计数器(whole body counter, WBC)自动测量系统涵盖了自动信息识别、管理、测量分析等重要功能, 通过相关传感器检测人员权限和位置, 并全程通过人员身份数据和测量数据调控扬声器和显示屏等交互设备, 引导人员有序自主测量。服务器内部程序对整个系统的信息进行自动化管理和分析, 最终实现有效数据的存储和异常状态的处理等。结果表明: 该系统有效降低了个人剂量检测过程的成本和人为误差, 提升了工作效率和测量准确性, 成功实现了人员自主化, 设备自动化的内污染检测流程。

关键词: WBC; 自动化测量; 辐照检测; 核辐射剂量; 内放射;

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Automatic Measurement System of Whole Body Counter in Nuclear Radiation Dose Monitoring

Su Yi¹, Cao Lei¹, Xie Shiyu¹, Liao Peng², Xiang Yezhou², Peng Jianlong², Tan Xubing³, Zhou Wenxiong³

(1. Safety Protection Department, Cangnan Nuclear Power Co., Ltd., China General Nuclear Power Group, Wenzhou 325000, China; 2. Intelligent Measurement and Control Division, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China; 3. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to realize the unattended measurement of the whole process of the whole-body counter of Nuclear Power Station, a complete set of automatic measurement system is designed. The automatic measurement system of the whole-body counter (WBC) covers important functions such as automatic information recognition, management, measurement and analysis. It detects the authority and position of the personnel through the relevant sensors, and controls the speaker and display screen through the personnel identity data and measurement data to guide the personnel to measure orderly and independently. The internal program of the server automatically manages and analyzes the information of the whole system, and finally realizes the storage of effective data and the processing of abnormal state. The results show that the system effectively reduces the cost and human error of the individual dose detection process, improves the work efficiency and measurement accuracy, and successfully realizes the internal pollution detection process of personnel autonomy and equipment automation.

Keywords: WBC; automatic measurement; irradiation detection; nuclear radiation dose; internal radiation

0 引言

依照《职业性内照射个人监测规范》^[1]规定, 核电厂等带放射性的工作区域需要对辐射控制区内的工作人员进行常规个人监测。国内外的涉核场所^[2]主要通过全身计数器(WBC)设备对人员进行活体测量和剂量监测。WBC全身计数器作为实现人体内放射性核素直接测定的内污染监测装置, 主要用于定性、定量测定和鉴别人体内伴有X、 γ 射线的放射性核素, 从而提供全身或特定器官剂量当量值以判断被测人员的健康程度^[3-5]。WBC整体较为复杂, 需要专业的防护人员进行学习和操作, 因此现代化

核电厂在原有WBC条件上设计自动化测量系统^[4], 从而实现人员内污染检测流程的高效运行。笔者基于核电站WBC系统项目需求, 自主设计了一套完整的自动化测量方案, 实现全身计数器全流程无人值守的自动化测量。该系统有效减少个人剂量监测所耗费的人力资源和时间成本并降低人为操作误差, 全程自主化技术设计满足了设备系统的长期维护和灵活改进的需求。

1 系统功能和组成

1.1 主要功能

如图1所示, WBC自动化测量系统的主要功能

收稿日期: 2024-09-11; 修回日期: 2024-10-19

第一作者: 苏 懿(1995—), 男, 江西人。

分为识别交互、信息管理和测量分析，分别分布在等候间、处理系统、测量间。在合理的空间布局下实现对人员授权、传呼、测量、分析的有序管理，自动化辐射剂量测量流程。

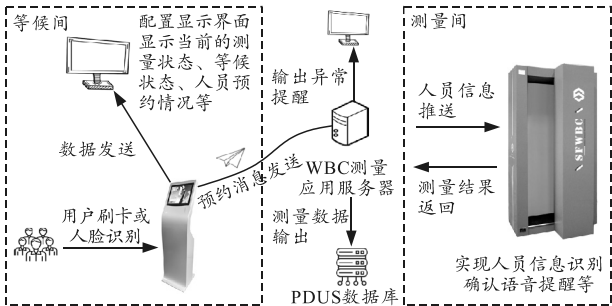


图 1 WBC 全身计数器自动化测量流程

自动识别交互功能通过人脸信息或身份卡信息识别人员，由视听方法反馈。信息处理依托于后台程序和相关传感器，无需人员操作。授权预约依靠于设备终端界面和传呼系统。相关识别结果和测量类型选择等内容均在设备显示屏上显示，而传呼系统则围绕语音提示系统进行，涵盖整个测量流程，根据当前流程进度自动播报相关语言辅助人员。自动传呼功能将设备系统和测量人员时刻绑定，保证了自动化测量流程的有序管理。自动信息管理功能基于通信设备、服务器主机和上位机软件。通过服务器内部程序时刻监测和管理数据的传输和处理工作。该功能是 WBC 自动化测量系统的核心，其有效连接了系统内的设备，也是该方案自主化设计的关键和难点。自动测量分析功能围绕 WBC 设备对待测人员进行测量和分析进行。测量人员到位后，测量程序会自动开启。测量结束后，正常测量结果会自动上传到 PDUS 数据库，软件将自动筛选并剔除异常数据，然后根据具体标准对结果进一步分析。测量异常中断时，软件会自动判断，并提示重新开始测量流程。

1.2 系统组成

WBC 自动测量改造详细原理如图 2 所示。3 部分中处理系统主要由异常报警器、WBC 测量应用服务器、PDUS 数据库，相关通信设备组成。WBC 自动测量系统的 3 部分通过人员信息和测量结果信息进行交互，通过显示屏，扬声器，红外感应器等外部设备与测量人员进行交互。

2 设备配置

2.1 等候间

等候间是 WBC 自动化测量流程的第 1 部分，

主要负责测量人员的预约和身份识别，搭配自动处理系统共同完成识别和传呼。上述功能通过取号机连接多个外设实现通信实现。等候间所包含的额外硬件设备为：读卡器、大厅液晶显示屏和扬声器。

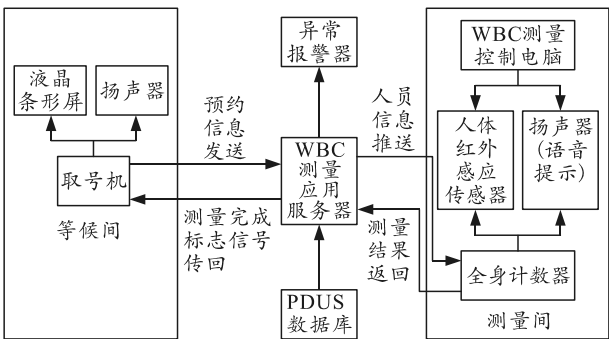


图 2 WBC 全身计数器自动化测量原理

立式取号机通过局域网连接外部液晶窗口显示屏（32 寸，采用壁挂安装方式）和扬声器（先科 TH4-1 ST51 系列 90 W 单主机），通信范围涵盖整个测量区域。取号机通常处于待机状态，等待用户进入选择界面开始预约流程。用户取号后，大厅液晶屏幕将显示取号人员的姓名、身份证号码、入厂时间等信息，并通过扬声器提示用户确认等信息。取号机的窗口显示屏设置界面或内部硬件均可进行相关网络参数的配置，方便随时进行调整以确保收发数据格式一致。基于上述配置，测量人员的相关取号信息能够快速准确地显示在显示屏上，同时通过扬声器播报确认信息。取号机携带双目摄像头，并通过 USB 转韦根 36 协议连接读卡器，读卡器用于读取被测人员的条码信息，型号为航天华拓 SAAT-F326W。其所有接口均采用防护器件，耐受 4 kV 静电。该读卡器有效通信距离分别高达 120 和 200 m 以上具体的接口定义如图 3 所示。

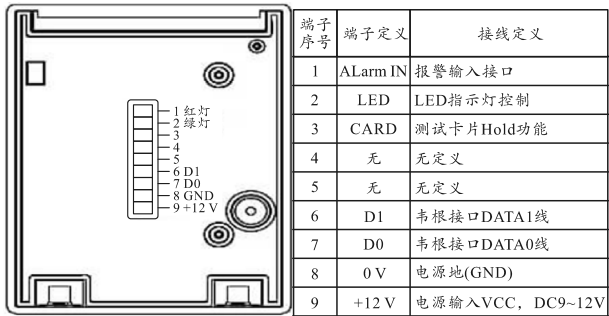


图 3 读卡器外部接口定义

2.2 操作间

操作间是 WBC 自动化测量流程的第 2 部分，等候间和测量间设备的自动信息处理和交互通过中央的 WBC 测量应用服务器和交换机共同实现。该

系统涵盖的主要功能包括信息中转、数据存储、数据分析。该系统的硬件设备包括 WBC 测量应用服务器主机(联想 ThinkServer TS80X)、异常报警器和交换机,软件部分包括主要运行程序和 PDUS 数据库。服务器主机内容包含:1) 可操作 WBC 测量应用软件(负责执行 WBC 测量应用,处理人员信息和测量数据);2) 连接取号机预约系统(交换数据进行实时交互,确保人员测量信息与预约信息同步);3) 连接全身计数器端电脑(控制 WBC 测量软件,实现测量数据采集);4) 连接异常报警器和 PDUS 数据库,实现自动数据管理。

异常报警器外设由同款显示器和扬声器组成。若监测和处理测量过程中出现的异常情况,服务器会及时反应异常状况,自动发出声音或视觉警报,提醒测量人员及时处理。其他设备如交换机主要提供网络连接功能,保证 WBC 测量应用服务器、WBC 测量控制电脑、PDUS 数据库、DMS 系统和预约控制主机之间的数据传输顺畅。交换机(TP-LINK TL-SG1008M)支持最高 1 000 Mbps 的传输速度。通过上述模块的协同工作,系统能够高效地进行测量数据的采集、处理和存储,实现测量流程的全程监控和管理,确保了系统的稳定性和可靠性。

2.3 测量间

测量间是 WBC 自动化测量流程的第 3 部分,主要负责测量人员的内照射测量和分析,搭配自动处理系统共同完成测量分析。WBC 作为内照射监测的重要手段,测量内容包括谱分析、体内滞留量计算、等多个环节。作为一个独立完整的内照射测量工具,WBC 符合放射性工作人员体检或核事故现场快速处理的要求。这些功能和数据的管理需要人员操作,自动化能力不足。对 WBC 本身的自动化改造是该方案重要的一环。自动化方案采用站立式全身计数器(SFWBC)作为内照射监测设备。SFWBC 配置包括 2 个 NaI 探测器、高性能谱仪、低本底屏蔽体、专用全身计数器能谱分析和内照射剂量评估软件,能够通过直接测定沉积在体内放射性核素的分布与转移,对体内多种放射性核素作定性与定量分析。自动化方案中 SFWBC 与对射光电传感器、语音播报器、测量控制电脑和服务器主机相连接。语音播报器(诚汇 JR750)负责语音功能,可以实现远程控制和数据传输,适合于测量间的语音传呼。

对射光电传感器基于对射原理和光电效应,通

过发射器将光束发送至接收器,当有物体穿过两者之间的空间时,光信号将被阻挡或反射,从而触发传感器做出相应的响应。该传感器用于检测人员是否进入全身计数器,品牌为 LEUZE 系列 LS46CI-M12 和 LE46CI.1/4P-M12,检测距离控制在 0.5~120 m,可稳定工作于-40~60 ℃。传感器对测量人员做出反应后,SFWBC 才开始对内部人员进行内照射测量。测量结束后,搭配 SFWBC 的控制电脑内部测量软件会对结果进行分析,确认流程状态。

3 实际搭建和应用

最终 WBC 自动化测量系统搭建完成后,基本使用流程概况如下:1) 等候间取号机处人员确认信息和授权取号;2) 呼叫排号人员按规定进入测量室;3) 进入 SFWBC 内部制定位置等待系统响应;4) 传感器判断人员位置启动全身扫描;5) 测量结束,后台数据分析并提示人员离开;6) 根据分析结果决定是否叫号重新测量或收入数据库。当前研究对搭建完成的 WBC 自动化测量系统进行了放射性核素识别效果的测试。全身计数器主要关注的指标包括能量分辨率和识别准确性。能量分辨率直接反映了 WBC 对不同核素的分辨能力,即所能识别的最小能量间隔,定义为能谱分析中全能峰半高宽(FWHM)与峰位能量的比值。表 1 为 SFWBC 自动化测量系统对 ^{137}Cs 的测量结果,WBC 上下探测器对该核素多次测量能量分辨率均在 7%以下,平均能量分辨率分别为 6.44%和 6.54%,较好地满足了测量指标。另一方面,通过 FWBC 对 ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{131}I , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 等主要内污染源核素进行了至少 10 次周期 60 s 的重复识别实验,结果显示其对任意核素识别率接近 100%,实现了不同核素的准确识别。

表 1 FWBC 自动测量系统对 ^{137}Cs 检测效果

探测器	高压/ V	增益	半高宽/ keV	峰位 能量/keV	能量 分辨率/%
上	750	0.81	27.61	433.50	6.37
			28.31	438.20	6.46
			27.89	429.70	6.49
下	790	0.72	28.12	435.60	6.46
			29.45	441.80	6.67
			29.56	454.20	6.51

4 结束语

笔者设计的 WBC 自动化测量系统改造方案可以成功实现放射性工作人员全程自主内照射测量和数据管理,且流程简便高效,完整覆盖语音提示指

导和安全设置，成功实现了 SFWBC 设备的自动化提升。其主要意义在于：

1) 进行了等候室到测量间的有序结合，完善了测量人员与测量设备间的交互，实现了 WBC 测量系统的自动化管理和测量，降低了人力成本和人为操作干预的影响，提升了测量效率。

2) 自主化设计的服务器监管软件将整套系统的各个部件紧密联系在一起，且所采用硬件设备具有较好的通用性和改造性，能满足多样的工作环境或通信方式。既实现了复杂的信息管理和分析功能，又有利于后期维护和更新工作，系统稳定性较好。

3) 对 WBC 自动化测量系统进行了搭建和检验，对不同核素进行了多次检验，识别率达 100%，对特定核素能谱分析能量分辨率平均值约 6.5%，满

(上接第 17 页)

表 5 输电规划主要拥塞场景信息统计结果

场景	规划阶段	概率/%	输电阻塞程度	
			规划前	规划后
1	1	1.50	0.63	0
2	5	2.40	0.61	0
3	5	1.50	0.58	0.19
4	1	2.40	0.47	0
5	3	2.40	0.46	0
6	4	2.40	0.46	0
7	4	1.50	0.44	0.22
8	4	2.40	0.44	0
9	5	14.40	0.43	0.18
10	3	1.20	0.38	0.23
均值	—	3.20	0.49	0.09

表 6 社会效益统计结果

类型	效益×10 ⁶ /元	类型	效益×10 ⁶ /元
C^{inv}	20.608 8	$C^{sb}(\text{规划前})$	1.668 2
C^{om}	4.098 9	$C^{sb}(\text{规划后})$	1.705 5

4 结论

笔者基于输电网络阻塞模型对输电网规划方案进行了分析，提出一种考虑输电阻塞的网络规划模型。基于经济调度模型，根据运行场景优化调度结果和阻塞场景筛选结果，研究主要阻塞场景的输电网规划问题；根据当前规划方案对主要拥堵场景进行评估和筛选；运用改进的 MCSBO 算法求解规划模型，并给出最优规划方案。所提输电网规划模型可以应用于实际的输电网系统，通过分析规划中获得的主要阻塞场景，可以有效帮助电力系统规划人员识别电力系统阻塞风险源，从而指导输电网的扩建建设。

足测量精度需求。

参考文献：

[1] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 职业性内照射个人监测规范: GBZ 129—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[2] 韦丽雯. 海南昌江核电厂参加 2017 年全身计数器比对结果分析[J]. 商品与质量, 2019, (46): 94.

[3] 史定国. 三门核电厂全身计数器性能测试[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2017(12): 161.

[4] 王悦. 核电厂职业内照射全身计数器自动化测量系统的研发与应用[J]. 辐射防护通讯, 2024, 44(3): 1-6.

[5] HAYANO R S. BABYSCAN: a whole body counter for small children in Fukushima[J]. Journal of radiological protection, 2014, 34(3): 645-53.

参考文献：

[1] 毛龙灿, 杨南. 基于大数据背景的皮革人才培养优化研究[J]. 中国皮革, 2021, 50(9): 38-41.

[2] 杨涛. 互联网时代下皮革行业电商物流体系研究分析[J]. 中国皮革, 2021, 50(8): 82-85.

[3] 丁斌, 袁博, 郑焕坤, 等. 面向新型电力系统的电力大数据副本管理算法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 10-17.

[4] 王伟臣, 张天宇, 宣文博, 等. 考虑机组组合和网络结构优化的电网规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 108-115.

[5] 张衡, 程浩忠, 张建平, 等. 高比例风电背景下计及 N-1 安全网络约束的发输电优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 5929-5936.

[6] 张衡, 程浩忠, 曾平良, 等. 基于随机优化理论的输电网规划研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3121-3129.

[7] 辜炜德, 金东亚, 荆朝霞, 等. 基于线性预测的输电节点阻塞控制方法研究[J]. 电子设计工程, 2020, 28(20): 93-96, 101.

[8] 周景, 张衡, 刘盾盾, 等. 考虑连锁故障的输电网扩展规划方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 136-142.

[9] 刘帅, 孔亮, 刘自发, 等. 基于深度强化学习的输电网网架规划方法[J]. 电力建设, 2021, 42(7): 101-109.

[10] 程浩忠, 张程铭, 柳璐, 等. 可再生能源接入下考虑短路电流限制的发输电鲁棒规划方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 68-76.

[11] 孙东磊, 赵龙, 秦敬涛, 等. 基于学习理论的含光储联合系统的输电网双层规划[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(4): 90-97.