

正电子类药物全自动核素分装仪的研究进展

Research progress of positron radiopharmaceutical automatic nuclide packing instrument

Jiang Jiehui, Dai Shuangjie, Zuo Chuantao

引用本文:

蒋皆恢, 代双杰, 左传涛. 正电子类药物全自动核素分装仪的研究进展[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2021, 45(10): 648-653. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202010025-00108

Jiang Jiehui, Dai Shuangjie, Zuo Chuantao. Research progress of positron radiopharmaceutical automatic nuclide packing instrument[J]. *International Journal of Radiation Medicine and Nuclear Medicine*, 2021, 45(10): 648-653. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202010025-00108

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202010025-00108>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

核医学工作人员和受检者辐射防护现状

The status of radiation protection and control strategy for nuclear medicine workers and patients

国际放射医学核医学杂志. 2017, 41(4): 298-302 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2017.04.012>

正电子核素心肌代谢显像剂的研究进展

Research progress of positron radionuclide myocardial metabolism imaging agents

国际放射医学核医学杂志. 2021, 45(3): 192-197 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202002041-00021>

正电子放射性核素显像在肾癌诊断中的研究进展

Research progress of positron radionuclide imaging in the diagnosis of renal cell carcinoma

国际放射医学核医学杂志. 2020, 44(9): 575-581 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-201905013-00067>

放射性药物联合双膦酸盐类药物治疗肿瘤骨转移研究现状

Concurrent use of radionuclides and bisphosphonates in bone metastasis: a review

国际放射医学核医学杂志. 2019, 43(2): 166-170 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2019.02.012>

新型冠状病毒肺炎疫情防控期核医学诊疗工作的防护建议

Protection and management proposals on nuclear medicine diagnosis and treatment during the COVID-19 epidemic period

国际放射医学核医学杂志. 2020, 44(10): 622-626 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202002014-00079>

全国核医学现状与发展趋势研究分析

Current situation and development trend of nuclear medicine in China

国际放射医学核医学杂志. 2020, 44(2): 92-98 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2020.02.004>

·综述·

正电子类药物全自动核素分装仪的研究进展

蒋皆恢¹ 代双杰¹ 左传涛²

¹上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室 200444; ²复旦大学附属华山医院 PET 中心, 上海 200235

通信作者: 左传涛, Email: zuochuantao2000@126.com

【摘要】近年来,我国核医学事业飞速发展,放射性核素被广泛地应用于肿瘤、心脏疾病和神经疾病的诊疗中。正电子类药物分装是核医学诊疗前的必要步骤。由于手工分装会对核医学工作者造成一定的核辐射以及产生抽取剂量准确性等问题,因此研制全自动核素分装仪具有重要的临床价值。笔者系统回顾了全自动核素分装仪的发展历程,重点阐述现有产品在核素分装、原液稀释、气泡检测方面的功能,并提出现有产品存在的维护困难、价格昂贵、功能不完善等不足,最后对正电子类药物全自动核素分装仪在核素注射、核素剂量计算、功能模块化等未来发展方向上的应用进行了展望。

【关键词】核医学;放射性药物;辐射防护;效率;自动分装仪

基金项目:上海市科委生物医药领域重点支撑计划(19441903500)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202010025-00108](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202010025-00108)

Research progress of positron radiopharmaceutical automatic nuclide packing instrument

Jiang Jiehui¹, Dai Shuangjie¹, Zuo Chuantao²

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, School of Information and Communication Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; ²PET Center, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200235, China

Corresponding author: Zuo Chuantao, Email: zuochuantao2000@126.com

【Abstract】In recent years, with the rapid development of nuclear medicine in China, radionuclides have been widely used in the diagnosis and treatment of tumors, heart diseases, and neurodegenerative diseases. Positron radiopharmaceutical nuclide packing is a necessary step before diagnosis and treatment can be performed in nuclear medicine clinics. Given that the process of manual packing would expose nuclear medicine workers to nuclear radiation, the development of an automatic nuclide packing instrument is of great clinical value. The development process of the automatic nuclide packaging instruments was reviewed; the functions of existing products, including nuclide packing, stock solution dilution, and bubble detection, were demonstrated; and problems in existing products, including maintaining difficulties, expensive costs, and insufficient functions, were identified. Finally, this paper discussed the prospects for the future development directions of nuclide packing, such as combining nuclide injection, nuclide quantity calculation, functional modularization, and others.

【Key words】Nuclear medicine; Radiopharmaceuticals; Radiation protection; Efficiency; Automatic packing instrument

Fund program: Shanghai Scientific and Technological Committee Key Project in Healthcare (19441903500)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202010025-00108](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202010025-00108)

自上世纪30年代回旋加速器问世以后,放射性核素实现了人工制备,并越来越广泛地应用于医学实践中^[1]。核素示踪技术是核医学诊断中的重要技术手段,其将放射性药物作为示踪剂引入生物体内,随后应用射线探测方法来对其进行精确性、定量及定位测量。放射性药物是指应用于临床诊断或治疗过程中的放射性核素制剂及其标记化合物,主要包括诊断用放射性药物和治疗用放射性药物两类^[2-4]。过去,放射性核素的分装和稀释工作主要靠人工或机械手完成,存在分装计量精度和效率不高等缺点;同时由于医护人员不能一次性准确抽取所需要的药物剂量,需反复抽取测量才能满足要求,导致长期进行分装操作的医护人员的特定部位受到辐射损伤的可能性增加^[5-7]。

在这种背景下,正电子类药物全自动核素分装仪(以下简称全自动核素分装仪)应运而生。与传统的手工分装相比,全自动核素分装仪的主要优势包括以下几点:(1)医护人员可远距离操控核素分装仪进行放射性核素的分装,避免了医护人员与放射性核素的直接接触,有效减少了医护人员在药物分装过程中受到的辐射;(2)可通过活度计等工具实时测量抽取药物的活度,或测量抽取后药物瓶中的存量与之前的差值,保证了药物分装的高精度;(3)具有良好的功能扩展性,如可以实现数据的存储与打印等^[8];(4)核素分装过程自动化及可扩展一次分装多个针筒或药瓶功能,保证了药物分装的高效率;(5)使用的无菌耗材具有轻便、安全、无需灭菌、即开即用的特点,可以有效防止样品间的交叉感染。

本文旨在综述用于医疗机构的全自动核素分装仪的发展历程,并对其关键技术以及未来发展趋势进行讨论。

1 发展历程

以全自动核素分装仪的功能提升为脉络,全自动核素分装仪的发展历程大体上经历了3个阶段。

1.1 起步阶段

20世纪70至90年代出现了第一代自动核素分装仪。美国国立卫生研究院PET中心开发的自动核素分装仪以计算机为控制核心,将产物瓶放置于可以上下移动的铅防护罐中,利用真空泵通过电磁阀与抽取注射器连接,计算机控制电磁阀的导通时间来完成预定放射性药物的抽取^[9]。此产品虽然

在一定程度上实现了自动化,减少了辐射,但其管线连接多,操作复杂,自动化程度较低,且分装精度不高。美国通用电气公司研发的基于气体压力传输的蠕动泵核素分装仪,仅适用于大剂量分装^[10]。受限于当时的技术水平,第一代自动核素分装仪的功能单一,且有大量技术理论问题需要进一步完善,但其仍为全自动核素分装仪的发展积累了宝贵经验。

1.2 发展阶段

20世纪90年代至21世纪10年代属于全自动核素分装仪的发展阶段。1998年,将专用PET和螺旋CT组合为一体研制成的PET/CT,被美国权威杂志《时代周刊》誉为20世纪最有价值的三大医学发明之一^[11]。放射性核素分装及注射作为PET/CT检查前的必要步骤,使得全自动核素分装仪的临床使用需求大大提高,同时也对全自动核素分装仪的分装精度和分装效率提出了新的挑战。

与此同时,国内多家机构和高校开始研制新一代全自动核素分装仪。20世纪末,中国工程物理研究院核物理与化学研究所开始了恢复同位素生产的准备工作。该研究所的研究小组对原有的分装系统进行改造,研制了新的放射性同位素溶液分装系统,以适应生产发展的需要。该系统由储液瓶、蠕动泵、分样器、分装装置4个部分组成,蠕动泵可以保证分装精度,分装装置可以保证注入针的准确插入并限定其插入深度,从而提高了生产效率,减少了操作人员在辐射环境中的暴露时间。该分装仪不仅节省了分装时间,解决了药液从排气管滋出等问题,还将分装药量误差从10%~15%降低至5%以下^[12]。

2006年,由山东省立医院医学工程部研制的放射性核素自动分装仪以工业可编程逻辑控制器为主控单元,辅以触摸屏、蠕动泵、专门设计的管路系统、剂量仪、打印机等单元。与单片机相比,可编程逻辑控制器具有可靠性高、抗干扰能力强、编程方便、使用便捷、恶劣工业环境中适用性强等优点。触摸屏提供输入输出界面,可以完成各种核素及不同剂量的分装设置。该分装仪可以精确分装185~5550 MBq的剂量到合适的注射器中,并且使分装及注射人员的辐射剂量减少了95%^[12]。2009年,有科研团队提出转盘式核素自动分装仪,该系统以计算机作为主控单元,辅以专用液面传感器和

精密计量泵,能够精确测量、设置药液的体积。分装采用全程视频监控,在远距离非接触分装模式下移液、稀释、分配液态核素,减少了辐射对操作者的伤害及对周围环境的污染。该分装仪具有全自动连续取药、连续稀释、连续分装、现场照片拍摄及打印等功能,稀释容积范围和连续分药容积为1~500 mL,分装误差为 $\pm 2\%$ ^[13-14]。此外,该时期具有代表性的产品还包括德国拜耳以及日本 Universal Giken 公司的产品等。

在此阶段,全自动核素分装仪的所需功能已基本实现,达到了辐射防护标准,基本满足了临床要求。

1.3 成熟阶段

2010年至今,在短短的11年间,随着科学技术的飞速发展,全自动核素分装仪的分装精度和效率越来越高,功能也愈趋全面,在提高医护人员工作效率的同时,进一步将医护人员受到的辐射剂量由0.35 $\mu\text{Sv/h}$ 降低至0.1 $\mu\text{Sv/h}$ 以下,最大程度地保障了医护人员的身体健康^[8,15]。在此阶段,全自动核素分装仪的功能已逐渐趋于完善。

全自动核素分装仪多以计算机作为主控单元,由核素分装装置、标签打印机和活度计3个部分组成,通过高处理速度的单片机实现信息的转接,单片机与电脑之间采用无线保真(WiFi)和通用异步收发传输器(UART)串口2种通信方式,单片机与核素分装仪、标签打印机、活度计之间均采用通用异步收发传输器(UART)串口进行通信。该模式具有以下优势:(1)分装功能完备,可以按活度和体积进行分装;(2)分装的目标容器可选择,可分装至针筒或者药瓶,使用针筒分装时,能够基本清除针筒内的气体;(3)具有能够在线检测分装药瓶内核素的活度以及稀释母液的功能;(4)可实现核素分装远距离无线监控;(5)支持核素分装数据云存储以及分装结果打印;(6)分装时间 ≤ 90 s,且可以进行连续分装;(7)分装误差 $\leq \pm 2\%$ ^[16]。此外,核素分装一般采用针筒注射式抽取的针筒抽取方式,即体积抽取。相比于蠕动泵抽取的方式,该方式具有分液速度可控、原理简单、成本低廉等优点。此种分装方式可通过舵机驱动三通阀基座,带动分装管路的三通阀旋转,从而驱动针筒托,带动针筒活塞抽取液体。

目前市场上主流的全自动核素分装仪主要来自日本 Universad Giken 公司、德国拜耳公司、意大利 TEMA SINERGIE 公司以及中国善为、同辐、

中福安和青盾等公司。

目前,全自动核素分装仪的主要功能大致可以分为以下几类。(1)核素分装功能:全自动核素分装仪的基本功能,旨在实现精准分装出指定活度和浓度的液体。其中按照分装目标容器不同可以分为针筒分装和药瓶分装。(2)原液稀释功能:分装仪可以根据分装和注射的核素浓度要求,自动抽取无污染的生理盐水对原液进行稀释。(3)气泡检测功能:对经过管道的气泡进行检测,去除针筒分装时针筒内的气体,防止过量的气体在注射时注入患者体内,威胁患者生命安全。(4)远程监控功能:医护人员可以远程操控分装仪,实现对分装仪的状态以及分装过程的监控,避免近距离接触分装仪,从而减少辐射对身体的伤害。(5)核素活度测量功能:对原液瓶、药瓶或针筒内的核素进行活度测量,以便能实时精确测量原液瓶、药瓶或针筒内的放射性核素活度,保证每次分装的精度。(6)核素衰变纠正功能:根据患者使用核素的时间长短对核素的衰变进行补偿,自动纠正原液活度和浓度的衰变。(7)辅助电池供电功能:分装仪配有备用电源,保证在突发停电时仪器仍然能稳定运行,方便操作人员灵活移动仪器进行分装操作。(8)数据云存储功能:将每次的分装信息与患者信息传输至云端存储,方便医院进行数据管理。(9)结果打印功能:将分装或者注射的基本信息进行打印,方便医护人员进行查阅。

2 存在问题及解决方案

虽然目前全自动核素分装仪的精度和效率已经可以满足临床要求,但是仍存在针筒排气泡功能不完善、维护困难、通信方式落后、价格昂贵等问题。

2.1 针筒排气泡功能不完善

目前,市场上的全自动核素分装仪在将原液分装至注射针筒时,针筒内可能存在气体。医护人员给患者注射时,需要将注射针筒内的气体排出后,才能对患者进行注射,这无疑增加了医护人员和患者与放射性核素接触的时间。针对此问题,解决的方案是采用气泡传感器,并通过机械装置排除注射针筒内的气体。气泡传感器能够实时监测管路中是否存在气体,其检测灵敏度高,能够及时对管路中的气体变化作出响应^[17-18]。

2.2 维护困难

目前,市场上的全自动核素分装仪大多体积较大,且分装管路的替换较为麻烦。医院核医学科对放射性核素的分装主要在封闭的热室内进行。由于热室空间有限且热室内的设备不易操控,全自动核素分装仪应具备体积小、质量轻且更换管路便捷等特点。另外,目前大多数全自动核素分装仪的操作软件只实现了参数设置、分装状态监控、分装信息存储等功能,并不具备设备维护功能,不能对分装仪内部驱动器件的控制和状态(如各个步进电机或舵机的运行状态)进行显示,因此无法快速对核素分装仪出现的故障或异常的原因进行分析并处理。

针对此问题,解决的方案是将分装管路和分装仪进行模块化设计,降低分装仪产品之间的耦合性并设计轻便的分装管路,便于分装管路的替换。同时设计相对应的管理维护软件,实时对分装仪内部各个驱动部件的运行状态进行监测,在发生故障时发出警告并提示可能的故障原因。

2.3 通信方式落后

相比于有线通信,无线通信具有不受线路约束、成本较低、节约空间等优点,但市场上大多数全自动核素分装仪的通信方式均是有线通信,不具有无线通信的功能,仅有少数产品可以选用无线通信方式。针对此问题,解决的方案是可以配置多种通信方式,如无线保真(WiFi)、蓝牙等,并且设计合适的通信协议,从而实现远程无线控制全自动核素分装。

2.4 价格昂贵

目前,市场上的全自动核素分装仪普遍价格昂贵,一般在20万元/台以上。如何在保证分装精度、分装效率以及功能全面的前提下降低开发成本,是当前全自动核素分装仪研发的一个重要挑战。针对此问题,解决的方案是将分装仪的功能模块化,使用户可以根据自身需求选择合适的功能,从而降低产品的价格。

3 发展趋势

近年来,医疗设备国产化成为国家卫生和工信行业信息主管部门的一个重要工作方向,在这种背景下,核医学显像设备的需求量明显提升^[18-20]。前瞻产业研究院发布的数据显示,2011年至2019年,我国PET保有量年均复合增长率达到15%,医用

同位素用量的年增幅也维持在10%左右。2018年至2020年,我国PET/CT配置达710台,新增377台,年新增率达24%^[21]。核医学显像设备的大量投入和医用同位素用量的增长,将有力推动放射性药物行业的发展^[22]。同时,全自动核素分装仪的临床需求量也会大大增加。为了满足医护人员的实际应用需求,全自动核素分装仪的功能也应该趋于多元化。

基于临床需求,笔者认为全自动核素分装仪的发展趋势有以下几个方向。(1)智能核素计算。医护人员只需输入患者的基本生理信息,全自动核素分装仪就能精确计算出该患者需注射的核素剂量,无需医护人员人工计算每例患者需要分装的核素剂量,并可以自动录入患者相关信息,便于设备自动计算SUV等参数,减少医护人员的工作量,提升工作效率^[23-24]。(2)防辐射功能。在使用具有核素注射功能的分装仪时,护士和患者在注射过程中需要近距离接触仪器,所以必须对仪器进行辐射屏蔽。当操作人员或者患者靠近仪器时,仪器需最合理限度地屏蔽辐射,减少周围的人受到辐射的影响^[25]。(3)功能模块化。价格偏高是全自动核素分装仪在临床大规模推广的主要障碍之一。因此,应尽可能实现核素分装仪功能模块化,使用户可以根据需求选择需要的功能模块,减少冗余功能,降低成本。(4)分装注射功能一体化。核素注射指的是在核素自动分装的基础上,增加自动注射功能,不仅能够完成核素的自动分装,同时还能自动将分装的液体注射至患者体内,从而在更大程度上减少医护人员在注射过程中与放射性核素的接触。除此之外,分装注射功能一体化还能实现分装注射的可移动化,随时随地到受检者床前为受检者提供无人化注射服务,解决传统核素分装仪需要在热室中使用的缺陷,节省人力成本。(5)提高美观感。对全自动核素分装仪外观进行美化以及制作简洁美观的人机交互界面。(6)提升用户体验。在保证分装仪分装精度的前提下,简化分装操作流程,缩短分装时间,从而减轻操作人员的负担;还可以通过增加语音提示功能,实时播报分装仪的分装状态和分装进度,使操作人员无需一直通过关注显示界面来观察分装仪的分装状态^[26]。

4 小结

综上所述,随着核医学事业在全世界范围内的

蓬勃发展,全自动核素分装仪的市场前景将会越来越广阔。国内企业应当抓住机遇,不断对全自动核素分装仪进行完善,解决目前存在的各种问题,为核医学科从业人员提供更加完善的辐射防护,并根据医护人员需求增加新的功能,为医疗行业提供更加优质的服务。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 蒋皆恢负责综述命题的提出与设计、综述的撰写;代双杰负责文献的收集与分析、综述的审阅;左传涛负责综述的审阅、最终版本的修订。

参 考 文 献

- [1] Vano E, Jimenez P, Ramirez R, et al. Main problems and suggested solutions for improving radiation protection in medicine in Ibero-American countries. Summary of an International Conference held in Madrid, 2016[J]. *J Radiol Prot*, 2018, 38(1): 109–120. DOI: [10.1088/1361-6498/aa914a](https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa914a).
- [2] 李建国,秦秀军,胡波,等.放射性药物的研究现状与前景展望[J]. *中国药物警戒*, 2019, 16(1): 27–31. DOI: [10.3969/j.issn.1672-8629.2019.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-8629.2019.01.006).
Li JG, Qin XJ, Hu B, et al. Research status and prospect of radiopharmaceuticals[J]. *Chin J Pharmacovigilance*, 2019, 16(1): 27–31. DOI: [10.3969/j.issn.1672-8629.2019.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-8629.2019.01.006).
- [3] 余巧生,葛贤顺,仝青英,等.同位素药物分装装置的设计与研制[J]. *医疗卫生装备*, 2014, 35(12): 36–38. DOI: [10.7687/J.ISSN.1003-8868.2014.12.036](https://doi.org/10.7687/J.ISSN.1003-8868.2014.12.036).
Yu QS, Ge XS, Tong QY, et al. Design and development of isotope medication dispensing device[J]. *Chin Med Equip J*, 2014, 35(12): 36–38. DOI: [10.7687/J.ISSN.1003-8868.2014.12.036](https://doi.org/10.7687/J.ISSN.1003-8868.2014.12.036).
- [4] 甘湘庆,谢兵,秦宗会.放射性同位素在医学中的应用研究进展[J]. *检验医学与临床*, 2012, 9(2): 215–217. DOI: [10.3969/j.issn.1672-9455.2012.02.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9455.2012.02.046).
Gan XQ, Xie B, Qin ZH. Research progress in the application of radioisotopes in medicine[J]. *Lab Med Clinic*, 2012, 9(2): 215–217. DOI: [10.3969/j.issn.1672-9455.2012.02.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9455.2012.02.046).
- [5] 李承泽,耿建华,梁颖,等.核医学分装人员在不同氟代脱氧葡萄糖分装模式下的手部剂量测量研究进展[J]. *中国医学装备*, 2020, 17(3): 171–174. DOI: [10.3969/J.ISSN.1672-8270.2020.03.044](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1672-8270.2020.03.044).
Li CZ, Geng JH, Liang Y, et al. Research progress of measure on hand of dispensing personnel of nuclear medicine department under different dispensing mode of FDG[J]. *China Med Equip*, 2020, 17(3): 171–174. DOI: [10.3969/J.ISSN.1672-8270.2020.03.044](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1672-8270.2020.03.044).
- [6] 李广义,刘峰,项茂琳.基于 PLC 控制的蠕动泵式核素药物自动稀释分装仪的研制[J]. *医学影像学杂志*, 2010, 20(10): 1520–1523. DOI: [10.3969/j.issn.1006-9011.2010.10.040](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9011.2010.10.040).
Li GY, Liu F, Xiang ML. Development of an apparatus driven by peristaltic pump and base on PLC controlling for automatic packing and diluting radionuclide drugs[J]. *J Med Imag*, 2010, 20(10): 1520–1523. DOI: [10.3969/j.issn.1006-9011.2010.10.040](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9011.2010.10.040).
- [7] 陈亮平,韩春彩,许忠扬.制备放射性药物^{99m}Tc^m对工作人员手部的辐射影响研究[J]. *中国辐射卫生*, 2020, 29(5): 500–502. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.014](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.014).
Chen LP, Han CC, Xu ZY. Study on the radiation effect of ^{99m}Tc^m on workers' hands[J]. *Chin J Radiol Health*, 2020, 29(5): 500–502. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.014](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.014).
- [8] 刘柳芳.放射性核素自动分装仪在¹³¹I 治疗中的评价[J]. *广西医学*, 2014, 36(6): 851–852. DOI: [10.11675/j.issn.0253-4304.2014.06.52](https://doi.org/10.11675/j.issn.0253-4304.2014.06.52).
Liu LF. Evaluation of radionuclide automated fractionator in ¹³¹I therapy[J]. *Guangxi Med J*, 2014, 36(6): 851–852. DOI: [10.11675/j.issn.0253-4304.2014.06.52](https://doi.org/10.11675/j.issn.0253-4304.2014.06.52).
- [9] 刘峰,李广义,李军.放射性核素自动分装仪的研制[J]. *医疗设备信息*, 2006, 23(5): 18–20. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1633.2006.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1633.2006.05.008).
Liu F, Li GY, Li J. Development of an automated radiopharmaceutical dispenser[J]. *Inf Med Equip*, 2006, 23(5): 18–20. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1633.2006.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1633.2006.05.008).
- [10] Plascjak PS, Kim K, Meyer W Jr, et al. An automated radiopharmaceutical dispenser[J]. *Appl Radiat Isot*, 1997, 48(3): 345–348. DOI: [10.1016/S0969-8043\(96\)00215-1](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(96)00215-1).
- [11] Kinahan PE, Townsend DW, Beyer T, et al. Attenuation correction for a combined 3D PET/CT scanner[J]. *Med Phys*, 1998, 25(10): 2046–2053. DOI: [10.1118/1.598392](https://doi.org/10.1118/1.598392).
- [12] 徐建,刘中林,刘国平,等.一种放射性同位素溶液分装系统的研制与应用[J]. *同位素*, 2003, 16(3/4): 218–221. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7512.2003.03.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7512.2003.03.022).
Xu J, Liu ZL, Liu GP, et al. Development and application of an injection set for radioactive isotope solution[J]. *J Isot*, 2003, 16(3/4): 218–221. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7512.2003.03.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7512.2003.03.022).
- [13] 王良峰,聂诗良,李驹光,等.放射性液体药品自动分装系统的设计[J]. *桂林理工大学学报*, 2012, 32(1): 136–139. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9057.2012.01.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9057.2012.01.023).
Wang LF, Nie SL, Li JG, et al. Design of automatic loading system on radioactive liquid medicine[J]. *J Guilin Univ Technol*, 2012, 32(1): 136–139. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9057.2012.01.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9057.2012.01.023).
- [14] 陈勇,吕霞付.基于模糊控制的放射性试剂分装机器人[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(2): 330–334. DOI: [10.3321/j.issn.0254-3087.2009.02.020](https://doi.org/10.3321/j.issn.0254-3087.2009.02.020).
Chen Y, Lyu XF. Fuzzy control for radiative reagent diluting and dividing robot arms[J]. *Chin J Sci Instrum*, 2009, 30(2): 330–334. DOI: [10.3321/j.issn.0254-3087.2009.02.020](https://doi.org/10.3321/j.issn.0254-3087.2009.02.020).

- [15] 李卫国, 杨国仁, 李全太, 等. PET/CT 放射性核素的分装和注射人员受照剂量[J]. *中国辐射卫生*, 2012, 21(2): 181-183. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2012.02.016.
- Li WG, Yang GR, Li QT, et al. The exposure dose to PET/CT technologists[J]. *Chin J Radiol Health*, 2012, 21(2): 181-183. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2012.02.016.
- [16] 郭宁, 王瞳, 霍力, 等. 正电子放射性药物自动分装注射系统的设计与测试[J]. *中国医学科学院学报*, 2021, 43(3): 429-434. DOI: 10.3881/j.issn.1000-503X.13840.
- Guo N, Wang T, Huo L, et al. Design and test of automatic dispensing and injecting system for positron radiopharmaceuticals[J]. *Acta Academiae Medicinae Sinicae*, 2021, 43(3): 429-434. DOI: 10.3881/j.issn.1000-503X.13840.
- [17] 石慧杰, 曹勇全, 陈龙珑, 等. 基于红外原理的气泡传感器设计[J]. *信息系统工程*, 2020(7): 146-148. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2362.2020.07.065.
- Shi HJ, Cao YQ, Chen LL, et al. Design of bubble sensor based on infrared principle[J]. *China CIO News*, 2020(7): 146-148. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2362.2020.07.065.
- [18] 胡永涛, 冯新庆, 周强, 等. 基于 LPC1549 的智能超声波气泡传感器[J]. *河南工学院学报*, 2021, 29(1): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2093.2021.01.002.
- Hu YT, Feng XQ, Zhou Q, et al. Intelligent ultrasonic bubble sensor based on LPC1549[J]. *J Henan Inst Technol*, 2021, 29(1): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2093.2021.01.002.
- [19] 陈思, 史继云, 王凡. 加强我国核医学分子影像技术的自主创新发展[J]. *中国科学: 生命科学*, 2020, 50(11): 1192-1201. DOI: 10.1360/SSV-2020-0168.
- Chen S, Shi JY, Wang F. Strengthening the independent innovation and development of nuclear medicine molecular imaging in China[J]. *Sci Sin Vitae*, 2020, 50(11): 1192-1201. DOI: 10.1360/SSV-2020-0168.
- [20] 刘健, 张晓军, 张锦明, 等. 国产 PET/CT 技术进展[J]. *中国医疗器械信息*, 2013, 19(10): 21-24, 35. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6586.2013.10.004.
- Liu J, Zhang XJ, Zhang JM, et al. Progress of domestic PET/CT[J]. *China Med Device Inf*, 2013, 19(10): 21-24, 35. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6586.2013.10.004.
- [21] 赵微鑫, 王强, 杨陆婷, 等. 全国核医学现状与发展趋势研究分析[J]. *国际放射医学核医学杂志*, 2020, 44(2): 92-98. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2020.02.004.
- Zhao ZX, Wang Q, Yang LT, et al. Current situation and development trend of nuclear medicine in China[J]. *Int J Radiat Med Nucl Med*, 2020, 44(2): 92-98. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2020.02.004.
- [22] 崔凡, 邹剑明, 谭展, 等. 2016 年广东省临床核医学基本状况调查[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2019, 39(6): 454-459. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2019.06.010.
- Cui F, Zou JM, Tan Z, et al. Survey of nuclear medicine practice in Guangdong in 2016[J]. *Chin J Radiol Med Protect*, 2019, 39(6): 454-459. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2019.06.010.
- [23] 袁炜焯. 放射性核素内污染所致人员辐射剂量估算模型应用研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2020. DOI: 10.27351/d.cnki.gszhu.2020.000138.
- Yuan WY. Application research on the model of radiation dose calculation caused by radionuclide internal pollution[D]. Suzhou: Soochow University, 2020. DOI: 10.27351/d.cnki.gszhu.2020.000138.
- [24] 古望军, 朱明乔, 李征, 等. ^{18}F 标记芳环类 PET 显像剂方法的研究进展[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2019, 39(8): 499-503. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.08.012.
- Gu WJ, Zhu MQ, Li Z, et al. Methodological progress of ^{18}F -labeled aromatic PET radiotracers[J]. *Chin J Nucl Med Mol Imag*, 2019, 39(8): 499-503. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.08.012.
- [25] 中国原子能科学研究院. 新型柔性辐射屏蔽材料[J]. *中国核工业*, 2021(1): 45. DOI: 10.3969/j.issn.1007-8282.2021.01.031.
- China Institute of Atomic Energy. New flexible radiation shielding materials[J]. *China Nucl Ind*, 2021(1): 45. DOI: 10.3969/j.issn.1007-8282.2021.01.031.
- [26] 徐雨晨, 曲延瑞. 从产品设计到用户体验[J]. *家用电器*, 2019(2): 42-43. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5626.2019.02.017.
- Xu YC, Qu Yanrui. From product design to user experience[J]. *Home Appl*, 2019(2): 42-43. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5626.2019.02.017.

(收稿日期: 2020-10-21)



微信公众号



官网二维码



微信服务号(微平台)