

# 光子计数CT在肺部疾病诊疗中的革命性进展与应用前景

钱丹飞<sup>1</sup>, 杨建峰<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>绍兴文理学院医学院, 浙江 绍兴

<sup>2</sup>绍兴市人民医院(绍兴文理学院附属第一医院)放射科, 浙江 绍兴

收稿日期: 2026年1月3日; 录用日期: 2026年1月28日; 发布日期: 2026年2月5日

## 摘要

光子计数CT (PCCT)是一项革命性成像技术, 能同时实现超高分辨率与超低辐射剂量, 突破了传统CT的技术瓶颈。其原理大幅提升了图像质量, 显著减少了噪声和伪影。在临床应用上, PCCT能更清晰地显示肺内微小结节、气道和血管等细微结构, 显著提升肺癌筛查与间质性肺病早期诊断的敏感性与准确性。其卓越的空间分辨率与光谱成像能力, 也为肺部血管性疾病的评估和虚拟平扫应用提供了新可能。尽管面临成本高昂、数据处理复杂等挑战, 但PCCT凭借其独特优势, 有望成为推动肺部疾病早期精准诊断的核心工具, 为胸部影像学发展开辟新道路。

## 关键词

光子计数CT, 肺结节, 间质性肺病, 肺癌筛查

# The Revolutionary Progress and Application Prospects of Photon-Counting CT in the Diagnosis and Treatment of Lung Diseases

Danfei Qian<sup>1</sup>, Jianfeng Yang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Medicine, Shaoxing University, Shaoxing Zhejiang

<sup>2</sup>Radiology Department, Shaoxing People's Hospital (The First Affiliated Hospital of Shaoxing University), Shaoxing Zhejiang

Received: January 3, 2026; accepted: January 28, 2026; published: February 5, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 钱丹飞, 杨建峰. 光子计数 CT 在肺部疾病诊疗中的革命性进展与应用前景[J]. 临床医学进展, 2026, 16(2): 1324-1327. DOI: 10.12677/acm.2026.162518

## Abstract

Photon-counting CT (PCCT) is a revolutionary imaging technology that can simultaneously achieve ultra-high resolution and ultra-low radiation dose, breaking through the technical limitations of traditional CT. Its principle significantly improves image quality and significantly reduces noise and artifacts. In clinical applications, PCCT can more clearly display tiny nodules in the lungs, airways, and blood vessels, significantly enhancing the sensitivity and accuracy of lung cancer screening and early diagnosis of interstitial lung diseases. Its outstanding spatial resolution and spectral imaging capabilities also provide new possibilities for the assessment of pulmonary vascular diseases and virtual plain scan applications. Although it faces challenges such as high cost and complex data processing, PCCT, with its unique advantages, is expected to become a core tool for promoting early and precise diagnosis of lung diseases, opening up new paths for the development of chest imaging.

## Keywords

Photon-Counting CT, Pulmonary Nodules, Interstitial Lung Disease, Lung Cancer Screening

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

胸部计算机断层扫描(CT)是评估肺部疾病最常用的影像学手段, 可从位置、大小及密度等多维度精准评估肺部异常。然而, 随着近几十年 CT 检查量的激增, 其对整体人群的辐射剂量暴露贡献日益凸显[1]。为此, 自 1990 年代起, 低剂量 CT 方案被引入临床, 通过优化扫描参数, 在维持良好图像锐利度与病灶可视性的同时, 显著降低了辐射剂量[2]。随后的大量研究验证了该方案的价值, 确认其可在保障患者安全的前提下, 满足诊断所需的图像质量[3]-[5]。目前, 这一低剂量原则已广泛应用于全身各部位的 CT 检查中。

然而, 在诸如间质性肺病等特定胸部疾病中, 诊断依赖于识别磨玻璃影、细微网状结构等微小肺部变化, 这对影像的空间分辨率提出了极高要求。因此, 理想的肺部 CT 检查需同时实现低辐射剂量与高空间分辨率这两个要求, 而这正是传统 CT 的技术瓶颈所在。

传统能量积分探测器通过闪烁体将 X 射线光子转换为可见光, 再由光电二极管生成电信号, 此过程存在光子信息损失和电子噪声。2021 年, 首款采用量子技术的临床光子计数 CT (PC-CT) 的问世, 标志着 CT 技术迎来了革命性突破。光子计数探测器采用半导体材料, 直接将单个 X 射线光子转换为电信号[6][7]。这一技术转变, 使得 PC-CT 具有相似或更好的图像质量、更低的电子噪声、更高的碘对比噪声比、更少的射束硬化伪影和更高的空间分辨率, 从而能够同时达到更高的空间分辨率与更低的辐射暴露这两个关键目标。

综上所述, 光子计数 CT 凭借其先天技术优势, 有望从根本上突破传统 CT 在肺部影像中的应用局限, 实现“超高分辨率”与“超低剂量”的并行, 为拓展 CT 的临床应用、推动肺部疾病的早期精准诊断与纵向随访评估开辟新道路。

## 2. 临床应用

对于结节成像, 与传统能量积分探测器 CT (EID-CT) 相比, PC-CT 显示几乎所有肺结构的可见度都

显著增强[8], 尤其是微结节、小叶间和小叶内线、周围气道和小叶中央肺气肿, 这得益于更大的矩阵尺寸(例如 1024~2048)、更薄的层厚(例如低至约 0.2 毫米)以及更高的频率滤波器(48~50), 这可能会改善诊断性能, 如提高敏感性、特异性、阳性预测值、阴性预测值、优势比和准确性, 降低肺癌筛查的风险和危害(例如假阳性和假阴性)。研究表明[9] PC-CT 大大提高了体积测量的准确性, 特别是对于不规则形状的小结节(如星形)或直径不超过 5 毫米的小结节, 这些发现对偶发肺结节的管理具有重要意义, 因为具有不规则或有刺状边缘, 包括邻近血管变形的结节恶性风险更高[10]。此外, 此外, 初步研究已证明低剂量和超低剂量 PCCT 成像的可行性其图像质量可能优于当前 CT 系统在相似辐射剂量下。总体来看, PCCT 的预期益处可能使其成为即使在较低辐射下更高效的肺癌筛查工具。

在间质性肺病的研究中, Gaillandre 等[8]人发现, 光子计数 CT 能够清晰显示高达 13 级的高阶支气管区域(中位数 10 级), 优于高分辨率 CT (HRCT)的 10 级(中位数 9 级), 也显著超越了既往文献[11]中通常报告的 7~8 级水平。对比分析显示, PCCT 对支气管管壁(57.2% vs 23.2%)及右侧斜裂轮廓(30.4% vs 8%)的显示清晰度均显著优于高分辨率 CT (HRCT)。这种卓越的成像能力使其对微小的肺部病变, 如小叶内网状结构和细支气管扩张, 具有更高的敏感性; 部分在 HRCT 图像上因模糊而无法识别的细支气管扩张, 在 PCCT 上得以清晰显现。这些发现与井上等人的研究结果一致, 后者指出 PCCT 提供了更优的图像质量, 并显著提高了阅片者对诸如网状、磨玻璃影及马赛克灌注等细微肺部浸润征象的诊断信心。因此, PCCT 有望获得足以诊断间质性肺炎的图像质量, 对该类疾病的精准诊断与长期随访具有重要价值。

除了在常规成像方面性能卓越外, PCCT 的光谱成像能力还能将解剖学与功能性数据相结合, 为多种肺部血管疾病的诊断提供支持, PCCT 凭借其更高的空间分辨率, 能对细微血管分支及其管壁进行更精细的评估。同时, 通过提升信噪比以及减少光晕伪影, 还有助于减少钙化斑块相关的硬化伪影, 从而提升图像的整体诊断质量, 对肺栓塞和慢性血栓栓塞性肺动脉高压[12]-[14]有较好的诊断效能。此外, 一项研究证实[15], 在临床 PCCT 中, 利用动脉期和门脉期数据生成的虚拟平扫图像对肺气肿进行定量分析具有可行性, 甚至比真实平扫图像具有更高准确性。因此, PCCT 有望通过提供精准可靠的虚拟平扫图像, 显著减少真实平扫扫描。

### 3. 挑战

尽管光子计数 CT 前景广阔, 但其临床普及与深入应用仍面临多重挑战: 一、成本控制与可及性: PCCT 系统购置与维护成本高昂, 远超传统 CT 设备, 导致其目前主要集中于大型学术研究型医疗中心, 限制了其在更广泛医疗环境中的普及与应用经验积累。二、数据管理与处理效能: PCCT 能谱成像产生海量数据, 对图像的存储容量、传输速度与后处理分析流程构成了巨大压力, 亟需构建与之匹配的高性能计算平台与智能化工作流程。三、标准化与规范缺失: 由于缺少对 PCCT 的扫描协议、能谱参数定量分析以及图像质量评估等的统一标准, 这为多中心研究比对、结果复现以及临床推广带来了障碍。四、新型伪影的识别与校正: PCCT 技术引入了如脉冲堆叠伪影等新型图像伪影, 可能影响对非钙化斑块成分和软组织炎症的分析, 其物理成因不同于传统 CT, 需要开发专门的识别方法与校正算法来保障诊断图像的可靠性。

### 4. 总结与展望

光子计数 CT 凭借其超高空间分辨率与低辐射剂量等核心技术优势, 正为肺部疾病(如肺结节、间质性肺病及血管性疾病)的诊疗带来革命性影响。它通过同时提供精细的解剖结构与功能信息, 有望显著推动肺部疾病的早期发现、精准分型与个性化治疗进程。随着技术的日益普及与成本的降低, PCCT 注定将成为未来胸部影像学中不可或缺的核心工具。

## 参考文献

- [1] Brenner, D.J. and Hall, E.J. (2007) Computed Tomography—An Increasing Source of Radiation Exposure. *New England Journal of Medicine*, **357**, 2277-2284. <https://doi.org/10.1056/nejmra072149>
- [2] Naidich, D.P., Marshall, C.H., Gribbin, C., Arams, R.S. and McCauley, D.I. (1990) Low-Dose CT of the Lungs: Preliminary Observations. *Radiology*, **175**, 729-731. <https://doi.org/10.1148/radiology.175.3.2343122>
- [3] Dangis, A., Gieraerts, C., De Bruecker, Y., Janssen, L., Valgaeren, H., Obbels, D., *et al.* (2020) Accuracy and Reproducibility of Low-Dose Submillisievert Chest CT for the Diagnosis of COVID-19. *Radiology: Cardiothoracic Imaging*, **2**, e200196. <https://doi.org/10.1148/ryct.2020200196>
- [4] Larke, F.J., Kruger, R.L., Cagnon, C.H., Flynn, M.J., McNitt-Gray, M.M., Wu, X., *et al.* (2011) Estimated Radiation Dose Associated with Low-Dose Chest CT of Average-Size Participants in the National Lung Screening Trial. *American Journal of Roentgenology*, **197**, 1165-1169. <https://doi.org/10.2214/ajr.11.6533>
- [5] Zhu, X., Yu, J. and Huang, Z. (2004) Low-Dose Chest CT: Optimizing Radiation Protection for Patients. *American Journal of Roentgenology*, **183**, 809-816. <https://doi.org/10.2214/ajr.183.3.1830809>
- [6] Willeminck, M.J., Persson, M., Pourmorteza, A., Pelc, N.J. and Fleischmann, D. (2018) Photon-Counting CT: Technical Principles and Clinical Prospects. *Radiology*, **289**, 293-312. <https://doi.org/10.1148/radiol.2018172656>
- [7] Niehoff, J.H., Woeltjen, M.M., Laukamp, K.R., Borggreffe, J. and Kroeger, J.R. (2021) Virtual Non-Contrast versus True Non-Contrast Computed Tomography: Initial Experiences with a Photon Counting Scanner Approved for Clinical Use. *Diagnostics*, **11**, Article 2377. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11122377>
- [8] Gaillandre, Y., Duhamel, A., Flohr, T., Faivre, J., Khung, S., Hutt, A., *et al.* (2023) Ultra-High Resolution CT Imaging of Interstitial Lung Disease: Impact of Photon-Counting CT in 112 Patients. *European Radiology*, **33**, 5528-5539. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-09616-x>
- [9] Si-Mohamed, S.A., Mialhes, J., Rodesch, P., Boccacini, S., Lacombe, H., Leitman, V., *et al.* (2021) Spectral Photon-Counting CT Technology in Chest Imaging. *Journal of Clinical Medicine*, **10**, Article 5757. <https://doi.org/10.3390/jcm10245757>
- [10] MacMahon, H., Naidich, D.P., Goo, J.M., Lee, K.S., Leung, A.N.C., Mayo, J.R., *et al.* (2017) Guidelines for Management of Incidental Pulmonary Nodules Detected on CT Images: From the Fleischner Society 2017. *Radiology*, **284**, 228-243. <https://doi.org/10.1148/radiol.2017161659>
- [11] Bartlett, D.J., Koo, C.W., Bartholmai, B.J., Rajendran, K., Weaver, J.M., Halaweish, A.F., *et al.* (2019) High-Resolution Chest Computed Tomography Imaging of the Lungs: Impact of 1024 Matrix Reconstruction and Photon-Counting Detector Computed Tomography. *Investigative Radiology*, **54**, 129-137. <https://doi.org/10.1097/rli.0000000000000524>
- [12] Li, K., Li, Y., Qi, Z., Garrett, J.W., Grist, T.M. and Chen, G. (2021) Quantitative Lung Perfusion Blood Volume Using Dual Energy CT-Based Effective Atomic Number (Zeff) Imaging. *Medical Physics*, **48**, 6658-6672. <https://doi.org/10.1002/mp.15227>
- [13] Masy, M., Giordano, J., Petyt, G., Hossein-Foucher, C., Duhamel, A., Kyheng, M., *et al.* (2018) Dual-Energy CT (DECT) Lung Perfusion in Pulmonary Hypertension: Concordance Rate with V/Q Scintigraphy in Diagnosing Chronic Thromboembolic Pulmonary Hypertension (CTEPH). *European Radiology*, **28**, 5100-5110. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5467-2>
- [14] Si-Mohamed, S., Moreau-Triby, C., Tylski, P., Tatar-Leitman, V., Wdowik, Q., Boccacini, S., *et al.* (2020) Head-to-Head Comparison of Lung Perfusion with Dual-Energy CT and SPECT-CT. *Diagnostic and Interventional Imaging*, **101**, 299-310. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2020.02.006>
- [15] Jungblut, L., Sartoretto, T., Kronenberg, D., Mergen, V., Euler, A., Schmidt, B., *et al.* (2022) Performance of Virtual Non-Contrast Images Generated on Clinical Photon-Counting Detector CT for Emphysema Quantification: Proof of Concept. *The British Journal of Radiology*, **95**, Article 20211367. <https://doi.org/10.1259/bjr.20211367>