

•医工结合专题

医学电学层析成像技术发展

谭超^{1,2}, 陈漪璇^{1,2}

(1. 天津市过程检测与控制重点实验室; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 医工结合是将医学与工科技术进行交叉融合、协同创新的交叉领域, 即将工程技术方法引入到医学研究、诊断及治疗等环节中, 产生创新的仪器、设备及技术。由于医学是一门独特的面向人体的综合性学科, 因此在生物、化学、电子、机械等领域, 均有与医学进行一定交叉的可能。现围绕电学层析成像技术在医学检测中的应用问题进行如下综述。

关键词: 医工结合; 电学层析成像; 人工智能; 医学影像

中图分类号: R445

文献标识码: A

文章编号: 2096-3718.2022.02.0001.05

人类健康与医疗是现代社会的基礎需求, 随着现代医学的快速发展, 新的诊断、治疗与康复手段不断涌现。传统的医疗器械、设备与装备, 特别是随着智能技术的快速发展, 以人体测量信号分析为基础的 diagnosis 与康复设备逐渐成为新的、快速增长的领域。现代医学与医疗技术是伴随着新型仪器设备的发展而快速成长的, 从诊断、治疗到康复的过程中均离不开仪器设备的支撑。因此, 医疗器械已经成为国家重要的行业领域, 也是经济增长与科技创新的重要引擎之一。医工结合本身是一个自然交叉融合, 随着人口老龄化与城镇化比例的提高, 以现代工程技术为核心的新型仪器设备与技术将成为支撑人类健康发展的重要基础。目前, 在健康领域广泛出现了以工程技术为核心的技术, 如 3D 打印人工器官、人工心脏、智能成像、康复设备、手术机器人等, 其核心技术多为工程技术与医学应用的交叉领域。此外, 一些基础理工科知识也逐渐被应用于医学中, 如将流体力学应用于人体呼吸机设计中, 提高对患者痰液堆积的处理效率。可以说, 将自然科学, 特别是将工程技术中的基本原理、理论及仪器应用于医学中, 将极大丰富医学的诊断、治疗手段。

目前, 在医工交叉领域中, 主要以信息技术、材料科学及机械工程 3 个典型工科学科为主。本文仅从信息领域入手, 以电学层析成像技术为例, 从人体信息的获取、处理、智能 3 个层面对信息领域医工交叉作一综述。

1 电学层析成像技术

医疗影像技术作为现代医疗检测最常用的手段之一, 对疾病诊断与筛查起到至关重要的作用, 其基本原理是通过从不同角度对人体进行测量投影, 并结合反演算法重构出人体组织电性能参数分布。医学影像技术根据所利用的

物理场不同, 可分为超声影像、CT、MRI、正电子发射断层成像 (PET) 等。医疗影像技术的出现, 为临床医学提供了十分直观的诊疗手段, 可清晰区分出不同组织的形状、尺寸及位置, 用于判定病灶与病情评估。因此, 图像重建的精度是医学成像领域的关键技术。从超声成像到高精度的 MRI 以及功能性磁共振成像 (fMRI) 的出现, 已经为临床医师提供了大量有价值的信息。

新型检测技术是医工交叉的核心技术, 其通过新的检测方法, 获取更多的人体特性参数用于临床疾病的诊断和治疗, 或者是获取更高精度的人体参数, 打破现有技术的瓶颈和局限, 例如提升医学影像技术的空间分辨率等; 在工业中也存在较多的工业层析成像与检测技术, 可以为医学检测提供新的测试模式与成像方法, 例如电阻抗层析成像 (EIT)、电磁层析成像 (MIT)、电容层析成像 (ECT) 等, 其扫描速度可达上千帧每秒, 能捕捉人体血流、心脏跳动等快速过程, 可提供功能成像与动态信息, 是现有医学结构成像的有益补充。

1.1 EIT EIT 利用人体不同组织电特性之间的差异, 向贴于皮肤表面的电极阵列注入安全电流并获得边界电压测量数据, 运用图像重建算法计算出被测区域内组织的电特性分布, 进而实现人体内部组织分布的可视化。EIT 技术具有非侵入、低成本、无辐射、响应快、使用便携及可视化等特点, 因此在医学成像领域受到了广泛的关注。EIT 技术在现有临床医学研究中的应用场景主要集中在肺部呼吸及水肿监测、脑卒中诊断、心脏活动监测等。

在肺部监测应用中, 由于人体在吸入气体时会使得肺泡扩张, 导致电流流动路径长度增加, 胸腔内的电阻率显著增大。EIT 技术通过向放置于胸腔周围的电极阵列注入交

变电流并测量电极间电压来重建胸腔内的电阻率分布,从而实现肺部通气情况的可视化测量^[1]。急性呼吸窘迫综合征是一种严重的异质性肺损伤,具有较高的死亡率,此类患者肺部通气分布极不均匀,不合理的机械通气方案会进一步加重急性呼吸窘迫综合征患者的肺部损伤^[2]。而 EIT 技术可以通过重建肺部通气分布来评估其不均匀程度,从而优化肺通气治疗方案^[3]。此外, EIT 技术还可应用于肺部水肿的诊断与监测中。肺部水肿病因复杂,可由多种疾病引起。NOBLE 等^[4]使用 16 电极阵列获得了由急性左心衰竭引起的肺部水肿患者的胸部 EIT 图像,成像结果表明,相比于未患病者的 EIT 图像,肺部水肿患者肺部的电导率值明显增加。ARAD 等^[5]利用 8 电极阵列 EIT 系统重建了胸腔积液患者胸腔内部左右两肺的电导率,重建结果表明,具有积液一侧的肺组织与另一侧肺组织的平均电阻率差值为 $-48 \Omega/\text{m}$,进一步证明了 EIT 技术在肺部水肿监测中的可行性。

在脑卒中诊断中应用 EIT 技术也受到了国内外学者的广泛关注。脑卒中按照其病因可分为两种类型:缺血性脑卒中和出血性脑卒中。其中,缺血性脑卒中是由于颅内动脉的狭窄或闭塞、脑供血不足引起;而出血性脑卒中是由于血管的破裂或泄露引起。脑卒发病后必须迅速区分这两种病因,然后才能根据各自特点制定不同的治疗方案^[6-7]。EIT 技术利用了出血部位、缺血部位与正常头部组织间的电导率差异,根据人体头部电导率分布的重建结果来确定脑卒中类型,并判断出血或缺血部位的具体位置及严重程度。现有研究中用于脑卒中诊断的 EIT 成像方法主要包括时差法、频差法和多频方法。时差法利用病变前后边界测量值的差值进行图像重建,这种方法虽然可以获得较好的成像效果,但由于对于病变前无先验数据的依赖性使其实际应用受到限制^[8];频差法利用生物组织电导率随频率变化的特点,利用不同频率下测量数据之间的差值来重建不同头部组织的电导率变化,这一方法避免了时差法中对于病变前无先验数据的依赖性,更符合脑出血检测的实际应用需求^[9-10];多频方法同样利用了头部组织电导率随频率变化的特点,而多频数据的利用极大地增加了 EIT 系统获得的测量数据量,从而有利于获得更全面、准确的出血或缺血部位信息。YANG 等^[11]提出了一种基于电导率谱分解的多频 EIT 方法用于脑卒中检测,该方法首先获得多个频率下头部组织的电导率谱图像,再利用独立分量分析方法从谱图像中分离出病变部位的图像,结果表明,这一方法能够有效减轻头部背景组织对于病变部位成像的影响,提高 EIT 系统对于脑卒中的检测精度。MCDERMOTT 等^[12]提出了一种结合机器学习的多频对称差分 EIT 方法,通过支持向量机分类方法实现了缺血性卒

中和出血性卒中的识别与区分。

此外, EIT 技术也被应用于心脏活动监测中。利用该技术可以重建出一个心动周期内的电导率分布图像序列,通过重建图像的电导率分布差异来判断心动周期内的不同阶段^[13]。心律失常是一种常见的心脏疾病,通过心电射频消融术可对其进行有效治疗。而有关心肌内病变部位发展状况的信息对手术的安全性和有效性至关重要, EIT 技术可以通过重建电导率分布图像来判断病变部位的尺寸并监测其发展状况,从而有利于辅助心律失常病患的临床治疗^[14]。

1.2 MIT MIT 是一种基于电磁感应原理的非接触式成像技术,通过向激励线圈中注入正弦交变电流产生交变主磁场,进而由被测介质内部的感应涡流产生次级磁场,两者的叠加会在检测线圈中产生感应电压。利用传感器阵列中各个检测线圈获得的边界测量数据即可重建出被测区域内介质的电导率或磁导率分布。在 MIT 技术检测中,传感器阵列不需要与被测物体直接接触,从而避免了 EIT 技术中存在的接触阻抗问题。此外,由于磁场可以穿透低电导率的颅骨组织,所以克服了 EIT 技术对于被测介质导电性的依赖。许多研究人员也开展了将 MIT 技术用于脑部成像的研究。

AI-ZEIBAK 等^[15]首先研制出一套用于医学检测的单通道 MIT 系统,通过机械旋转被测物体,得到了多个方向的投影数据进行图像重建,成像结果表明,利用该系统可以区分出不同电导率的生物组织,从而验证了 MIT 技术应用于生物医学成像的可行性。随后, KORJENEVSKY 等^[16]设计了一套多通道 MIT 实验系统,该系统采用环形传感器阵列,由 16 个激励线圈和 16 个检测线圈组成,工作频率为 20 MHz,结合基于人工神经网络的图像重建算法,该系统成功重建出了人体头部的电导率分布图像。多通道系统中的电子扫描取代了之前的机械扫描方式,极大地提高了成像速度,使 MIT 技术既可以实现对人体头部的快速实时成像,又可以对病变部位进行长期持续监测^[17]。环形传感器阵列是 MIT 系统中最典型的阵列结构,但其独立测量数据有限,基于半球形传感器阵列 MIT 系统的提出,不仅为图像重建提供了更多的独立测量数据,而且打破了环形传感器阵列的二维截面成像模式,提供了 MIT 人脑三维成像的可能。XU 等^[18]研制了一套用于颅内出血检测的半球形 MIT 系统,结合差值算法实现了电导率分布重建。GRIFFITHS 等^[19]综合考虑了重建图像质量与实际系统的成本和需求,对用于脑部成像的半球形 MIT 系统的传感器参数进行了优化,提高 MIT 系统对于出血部位附近的局部灵敏度。XIAO 等^[20-21]研究了一种局部曲面传感器阵列结构,在仿真中利用不同出

血大小的三维脑模型对局部曲面结构与圆环结构系统的成像效果进行了对比分析,仿真结果表明,局部曲面结构 MIT 系统在传感器阵列附近具有更高的灵敏度与成像精度,这种结构还可以实现对颅内出血的局部检测,相比于环形与半球形阵列在实际应用中更加便捷。但由于生物组织的电导率较低,其产生的次级磁场相比于激励线圈产生的主磁场十分微弱,难以准确检测,尤其对于局部传感器结构,由于各传感器间的距离较近,激励线圈产生的主磁场对检测信号的影响更大。为了减小主磁场的影响,提高 MIT 系统对脑组织电磁信号的检测精度,CHEN 等^[22]利用 Bx 传感器的主磁场抵消原理设计了一种用于颅内出血检测的局部平面传感器阵列,并对传感器参数进行了优化,仿真与实验结果表明,局部平面 MIT 系统可正确重建不同体积、不同位置颅内出血的电导率分布。

1.3 ECT ECT 通过测量安装在被测区域边界的电极对之间的电容值,结合图像重建算法,获得被测区域内介质的介电常数分布。现有研究中对于 ECT 技术的医学应用主要集中于牙齿与人脑活动检测中。牙髓治疗,也被称为根管治疗,是牙医学中治疗牙髓坏死和牙根感染的一种常见方法。通过 X 射线照片可以确定牙齿的结构和位置,同时也可以作为离线诊断与治疗的参考。但由于 X 射线的电离辐射与 CT 技术的成像速度问题,使其在治疗过程中对牙根部位进行持续监测并提供实时图像等应用受限。ECT 技术具有低成本、无辐射、成像速度快等特点,可以在根管治疗过程中提供牙齿的实时图像。此外,还可以将 ECT 图像与 X 射线照片进行图像配准,从而进一步提高牙根部位的成像质量,使根管治疗更加准确有效^[23-24]。

除了辅助牙髓治疗外,ECT 技术还可用于人脑活动检测中。人类大脑活动成像是神经科学研究中的重要课题,在预防和治疗神经系统疾病方面具有重要意义。大脑活动会引起头皮上或头皮内特定区域电势变化,而这一电势变化影响着大脑内部的介电常数分布^[25]。ECT 技术可根据传感器阵列各电极对之间的电容测量数据,重建头部的介电常数分布图像,进而实现对大脑活动的监测。TARUNO 等^[26]设计了一种头盔式的 ECT 传感器阵列进行大脑活动成像,实验结果表明,在移动右手、移动左手及阅读书籍这 3 种不同的大脑活动下,利用 ECT 系统重建出的介电常数分布图像存在显著差异,证明了 ECT 技术在人脑活动检测中的可行性。

2 可穿戴式电学层析成像

可穿戴设备是人体健康监测与管理的重要发展方向。目前如心率、血氧饱和度等参数的随身监测技术已经获得

了较成熟的发展,而对于血糖、血脂等基础性慢性疾病指标的监测还未达到成熟的无创可穿戴检测水平。电学层析成像也可以用于可穿戴的检测中,例如肺部呼吸过程、心脏活动及疲劳监测等。

WU 等^[27]设计了一套基于高性能的有源电极专用集成电路的多功能可穿戴 EIT 系统,该系统将柔性印刷电路板与由 32 个电极组成的传感器阵列固定在一个环形织带上,并通过计算机对获得的临床参数进行可视化,利用这一可穿戴 EIT 系统成功实现了肺部呼吸过程成像与心率监测。为了最大限度地提高胸腔检测的便捷性,RAPIN 等^[28]对可穿戴 EIT 系统进行了优化设计,将传感器阵列集成在一件背心上,传感器在接触皮肤时自动开启,然后进行连续测量,直至患者脱下背心停止测量。在测量过程中,数据存储在主传感器中,并在测量结束后通过 Wi-Fi 将其传输到外部单元(如计算机)中,患者只需穿上背心即可实现对肺部呼吸过程及心脏活动的监测。DARMA 等^[29]提出了一种适用于可穿戴 EIT 中柔性边界传感器的实时动态成像方法,这一研究中所设计的传感器由 4 个可伸缩层组成,包括电极层、固定电极位置的弹性织物材料、拉伸检测器及角度检测器,利用拉伸检测器与角度检测器的测量数据可实现柔性边界的形状估计;最终,利用设计的可穿戴 EIT 系统成功实现了人体手臂成像。XIE 等^[30]设计了一种用于生物力学运动监测的可穿戴电磁传感器,这一设计将电磁传感器附着在日常的可穿戴物品上(如假睫毛、手套等),眼睑或关节之间的相对运动会引起电磁传感器间的互相阻抗与电感信号变化,利用这一可穿戴电磁传感器的检测数据,可实现对眨眼频率、手腕或手指的弯曲程度、频率进行实时监测,从而有助于眼部疲劳与腕管综合征的及时检测与治疗。

3 人工智能与医学影像

医学影像技术的出现同时带动了现代信息处理与人工智能技术在医疗领域中的应用,机器学习的能力是建立在医学影像技术的基础上的,也就是说,机器能识别病灶的前提是医学影像技术能准确获取高精度的病灶影像。因此,医学影像图像的高精度重建是人工智能技术的基础,即利用机器学习的智能分析手段,通过分析海量的医学影像图像,学习各类病灶的形状特性等,并给出专家级评估。其优势在于,计算机可以通过学习,持续不断地改进对病灶图像的识别能力,能将临床医师看片的经验量化,并快速迭代增加评估经验促进性能的进化。因此,人工智能技术在医学影像分析上有很大的发展潜力,目前已经在脑癌、肺癌等肿瘤性疾病的诊断方面,达到甚至超过了专家医师看片的能力。

COUDRAY 等^[31]利用 inception v3 深度卷积神经网络模型对从癌症基因组图谱中获得的全切片图像进行自动分类,结果表明,这一方法可以实现对不同的肺癌类型与正常肺部组织的准确识别,同时可以预测不同类型的基因突变,在癌症治疗中具有重要意义。LAKHANI 等^[32]利用 AlexNet 和 GoogLeNet 深度卷积神经网络模型实现了胸部医学影像中对患有肺结核的肺部与正常肺部图像的分类。CHOI 等^[33]利用深度卷积神经网络模型结合脱氧葡萄糖和 AV-45 正电子发射层析成像的成像结果,预测轻度认知障碍患者的认知能力下降程度,并判断其转化为阿尔兹海默症的可能性,从而有助于对该病的早期诊断与治疗。LEE 等^[34]研制了一套深度学习系统用于急性颅内出血的检测,利用深度卷积神经网络模型实现了对 CT 图像中不同出血类型的准确识别,以促进对颅内出血的及时诊断与治疗。

但机器学习的弊端在于泛化能力较弱,对于已有训练样本的病灶通过大量训练可以实现较高的识别率和评估水平,而对于特殊病例的识别和评估则容易因为机器学习模型的泛化能力而导致识别率低下,因此临床医师与机器智能结合是目前解决方案。

4 总结与展望

医工结合是当前十分热门的研究方向,如何将丰富的工科技术,应用于医疗中是多个研究领域需要不断探讨与探索的问题。此外,由于医疗检测技术的不断发达,其也可以在工科领域中进行应用,例如超声医学检测中常用的成像技术、MRI 技术等,已经逐步被用于工业复杂流体检测研究中,并展现出各自的独特优势。因此,医工结合并不是仅将工程技术移植于医学中,而是两个领域互相渗透与借鉴的过程。

参考文献

- [1] GONG B, KRUEGER-ZIOLEK S, MOELLER K, et al. Electrical impedance tomography: functional lungimaging on its way to clinical practice[J]. Expert Rev Respir Med, 2015, 9(6): 721-737.
- [2] SCHEPENS T, LU X, HOLSBEKE C V, et al. Functional respiratory imaging of the airways in the acute respiratory distress syndrome[J]. Anaesth Crit Care Pa, 2020, 39 (2): 207-213.
- [3] ZHAO Z, MOLLER K, STEINMANN D, et al. Evaluation of an electrical impedance tomography-based global inhomogeneity index for pulmonary ventilation distribution[J]. Intens Care Med, 2009, 35 (11): 1900-1906.
- [4] NOBLE T J, MORICE A H, CHANNER K S, et al. Monitoring patients with left ventricular failure by electrical impedance tomography[J]. Eur J Heart Fail, 1999, 1(4): 379-384.
- [5] ARAD M, ZLOCHIVER S, DAVIDSON T et al. The detection of pleural effusion using a parametric EIT technique[J]. Physiol Meas, 2009, 30(4): 421-428.
- [6] RUDD A G, BOWEN A, YOUNG G R, et al. The latest national clinical guideline for stroke[J]. Clin Med, 2017, 17(2): 154-155.
- [7] DEKDOUK B, PHAM M H, ARMITAGE D W, et al. A feasibility study on the delectability of edema using magnetic induction tomography using an analytical model[J]. Ifmbe Proceedings, 2008, 22(1): 736-739.
- [8] MCEWAN A, ROMSAUEROVA A, YERWORTH R, et al. Design and calibration of a compact multi-frequency EIT system for acute stroke imaging[J]. Physiol Meas, 2006, 27(5): 199-210.
- [9] ADLER A, BOYLE A. Electrical impedance tomography: tissue properties to image measures[J]. IEEE T Bio-Med Eng, 2017, 64(11): 2494-2504.
- [10] SEO J K, LEE J, KIM S W, et al. Frequency-difference electrical impedance tomography (fdEIT): algorithm development and feasibility study[J]. Physiol Meas, 2008, 29(8): 929-944.
- [11] YANG L, XU C H, DAI M, et al. A novel multi-frequency electrical impedance tomography spectral imaging algorithm for early stroke detection[J]. Physiol Meas, 2016, 37(12): 2317-2335.
- [12] MCDERMOTT B, ELAHI A, SANTORELLI A, et al. Multi-frequency symmetry difference electrical impedance tomography with machine learning for human stroke diagnosis[J]. Physiol Meas, 2020, 41(7): 75010.
- [13] ISAACSON D, MUELLER J L, NEWELL J C, et al. Imaging cardiac activity by the D-bar method for electrical impedance tomography[J]. Physiol Meas, 2006, 27(5): 43-50.
- [14] NGUYEN D M, ANDERSEN T, QIAN P, et al. Electrical Impedance Tomography for monitoring cardiac radiofrequency ablation: a scoping review of an emerging technology[J]. Med Eng Phys, 2020, 84(4): 36-50.
- [15] AL-ZEIBAK S, SUNDER S N H. A feasibility study of in vivo electromagnetic imaging[J]. Phys Med Biol, 1993, 38(1): 151-160.
- [16] KORJENEVSKY A, CHEREPENIN V, SAPETSKY S. Magnetic induction tomography: experimental realization[J]. Physiol Meas, 2000, 21(1): 89-94.
- [17] SAPETSKY S A, KORJENEVSKY A V. Magnetic induction tomography: visualization of extensive objects[C]// Proceedings of XII International Conference on Electrical Bio-Impedance and V Electrical Impedance Tomography. Jun. 20-24, 2004, Gdansk,

- Poland. 2004: 695-698.
- [18] XU Z, LUO H, HE W, et al. A multi-channel magnetic induction tomography measurement system for human brain model imaging[J]. *Physiol Meas*, 2009, 30(6): S175-S186.
- [19] GRIFFITHS H, ZOLGHARNI M, LEDGER P D, et al. The cardiff Mk2b MIT head array: Optimising the coil configuration[J]. *J Phys Conf Ser*, 2010, 224(1): 12046.
- [20] XIAO Z L, TAN C, DONG F. Sensitivity comparison of a cambered magnetic induction tomography for local hemorrhage detection[C]// 2018 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, Jun. 11-13, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE, 2018.
- [21] XIAO Z L, TAN C, DONG F. 3-D Hemorrhage imaging by cambered magnetic induction tomography[J]. *IEEE T Instrum Meas*, 2019, 68(7): 2460-2468.
- [22] CHEN Y X, TAN C, DONG F. Combined planar magnetic induction tomography for local detection of intracranial hemorrhage[J]. *IEEE T Instrum Meas*, 2020, 69(99): 1.
- [23] REN Z, YANG W Q. Visualisation of tooth surface by electrical capacitance tomography[J]. *Biom Phys and Engin Exp*, 2017, 3(1): 15021.
- [24] YANG W Q, REN Z, TAKEI M, et al. Medical applications of electrical tomography[C]// 2018 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, Oct. 16-18, 2018, Krakow, Poland. New York: IEEE, 2018: 368-373.
- [25] GAFANIZ R, SANCHES J M. ATP consumption and neural electrical activity: a physiological model for brain imaging[C]// 2010 Annual Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Aug. 30-Sep. 4, 2010, Buenos Aires, Argentina. New York: IEEE, 2010: 5480-5483.
- [26] TARUNO W P, BAIDILLAH M R, SULAIMAN R I. 4D brain activity scanner using electrical capacitance volume tomography (ECVT)[C]// 2013 IEEE 10th International Symposium on Biomedical Imaging, Apr. 7-11, 2013, San Francisco, United States. New York: IEEE, 2013: 1006-1009.
- [27] WU Y, JIANG D, BARDILL A, et al. A high frame rate wearable EIT system using active electrode ASICS for lung respiration and heart rate monitoring[J]. *IEEE T Circuits-I*, 2018, 65(11): 3810-3820.
- [28] RAPIN M, BRAUN F, ADLER A, et al. Wearable sensors for frequency-multiplexed EIT and multilead ECG data acquisition[J]. *IEEE T Bio-Med Eng*, 2019, 66(3): 810-820.
- [29] DARMA P N, BAIDILLAH M R, SIFUNA M W, et al. Real-Time dynamic imaging method for flexible boundary sensor in wearable electrical impedance tomography[J]. *IEEE Sens J*, 2020, 20(16): 9469-9479.
- [30] XIE Y D, LU M Y, YIN W L, et al. Novel wearable sensors for biomechanical movement monitoring based on electromagnetic sensing techniques[J]. *IEEE Sens J*, 2020, 20(2): 1019-1027.
- [31] COUDRAY N, OCAMPO P S, SAKELLARPOULOS T, et al. Classification and mutation prediction from non-small cell lung cancer histopathology images using deep learning[J]. *Nat Med*, 2018, 24(10): 1559-1567.
- [32] LAKHANI P, SUNDARAM B. Deep learning at chest radiography: automated classification of pulmonary tuberculosis by using convolutional neural networks[J]. *Radiology*, 2017, 284(2): 574-582.
- [33] CHOI H, JIN K H. Predicting cognitive decline with deep learning of brain metabolism and amyloid imaging[J]. *Behav Brain Res*, 2018, 344: 103-109.
- [34] LEE H, YUNE S, MANSOURI M, et al. An explainable deep-learning algorithm for the detection of acute intracranial haemorrhage from small datasets[J]. *Nat Biomed Eng*, 2019, 3(3): 173-182.

作者介绍: 谭超 天津大学电气与自动化工程学院教授、博士生导师。主要从事控制科学与工程 / 检测技术与自动化装置学科研究。研究内容紧密结合检测技术与自动化装置领域的技术发展趋势, 包括工业过程智能传感与仪器、多模态过程层析成像、生物信息测试与成像技术、过程诊断与机器学习等, 在新型智能传感仪器的软硬件系统开发、层析成像与信息处理算法设计、多相流过程测试建模等领域承担多项国家与省部级重要课题, 在检测技术领域国内外重要期刊上发表论文 100 余篇, 其中 SCI 论文 70 余篇, 授权国家发明专利 30 余项, 软件著作权 4 项, 担任 4 本检测领域重要 SCI 期刊编委 (含 3 本 IEEE 期刊), 入选天津市“131”创新型人才、日本学术振兴会 (JSPS) 特邀学者, 研究成果获多项国内外重要学术期刊与国际会议优秀论文奖, 并在中国海洋石油总公司、徐州工程机械集团有限公司、中国石油大学等教学、科研与生产中获得应用。现为天津市过程成像与检测国际联合研究中心主任, 与爱丁堡大学、巴斯大学、克兰菲尔德大学、利兹大学、德累斯顿工业大学、卑尔根大学、东芬兰大学、北海道大学、千叶大学、巴拉那联邦理工大学有长期稳定的科研与人才联合培养合作。

