

Application progresses of zero echo time MRI in musculoskeletal system

WU Ruotong¹, WANG Hua^{1,2*}, YE Zhaoxiang¹

(1. Department of Radiology, Tianjin Medical University Cancer Institute & Hospital, National Clinical Research Center for Cancer, Tianjin's Clinical Research Center for Cancer, State Key Laboratory of Druggability Evaluation and Systematic Translational Medicine, Key Laboratory of Cancer Prevention and Therapy, Tianjin 300060, China; 2. Department of Diagnostic Radiology, Tianjin Cancer Hospital Airport Hospital, Tianjin 300308, China)

[Abstract] Zero echo time (ZTE) imaging is a recently introduced three-dimensional MRI technique that achieves immediate encoding after radiofrequency pulse excitation through gradient field pre-saturation and radial filling, having significant advantages for imaging of short T2 tissue, hence be widely used in musculoskeletal system (MSK) diseases. The application progresses of ZTE MRI in MSK were reviewed in this article.

[Keywords] musculoskeletal diseases; magnetic resonance imaging; deep learning

DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2026.01.029

零回波时间 MRI 用于骨骼肌肉系统进展

吴若彤¹, 王 化^{1,2*}, 叶兆祥¹

(1. 天津医科大学肿瘤医院放射科, 国家恶性肿瘤临床医学研究中心, 天津市恶性肿瘤临床医学研究中心, 药物成药性评价与系统转化全国重点实验室, 天津市肿瘤防治重点实验室, 天津 300060;
2. 天津市肿瘤医院空港医院放射诊断科, 天津 300308)

[摘要] 零回波时间(ZTE)成像是新兴三维 MR 技术,通过梯度场预先爬升和径向填充方式,实现在射频脉冲激励后立即编码,对于短 T2 组织成像具有显著优势,近年广泛用于骨骼肌肉系统(MSK)疾病。本文就 ZTE MRI 用于 MSK 进展进行综述。

[关键词] 肌肉骨骼疾病; 磁共振成像; 深度学习

[中图分类号] R68; R445.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2026)01-0136-04

MRI 已广泛用于诊断骨骼肌肉系统(musculoskeletal system, MSK)疾病、术前评估及预测疗效等各方面;但常规 MR 序列往往显示短 T2 组织如骨皮质、韧带及肌腱等欠佳,难以识别细微病灶;而零回波时间(zero echo time, ZTE)技术在射频脉冲激励后立即编码,有效突破了这一技术瓶颈。融合应用深度学习(deep learning, DL)与 ZTE 技术,不仅能解决重建 ZTE 图像和伪影校正等关键技术难题,更将

推动 MRI 从结构成像向定量分析跃升。本文就 ZTE MRI 用于 MSK 进展进行综述。

1 ZTE 成像原理

ZTE 属三维 MRI 技术,其核心是在读出梯度爬升完成后立即施加射频脉冲,几乎同步进行信号编码与获取,可实现亚毫秒级(<1 ms, 接近零)回波时间(echo time, TE)成像。与传统 MRI 技术不同,ZTE 技术采用持续开启的梯度场模式而非快速开关切换,

[基金项目] 天津市医学重点学科(TJYXZDXK-3-003A)。

[第一作者] 吴若彤(2002—),女,山东泰安人,在读硕士。研究方向:体部肿瘤影像学。E-mail: 18263866028@163.com

[通信作者] 王化,天津医科大学肿瘤医院放射科,国家恶性肿瘤临床医学研究中心,天津市恶性肿瘤临床医学研究中心,药物成药性评价与系统转化全国重点实验室,天津市肿瘤防治重点实验室,300060;天津市肿瘤医院空港医院放射诊断科,300308。E-mail: wanghua0718@163.com

[收稿日期] 2025-03-06 **[修回日期]** 2025-11-21

通过在重复时间(repetition time, TR)之间逐渐调整梯度场方向、沿纯频率编码不同径向轨迹采集数据而实现 K 空间的三维径向填充^[1-2]。为优化短 T2 组织(如骨皮质、韧带等)成像效果并降低对 T1 对比度的影响, ZTE 成像采用小翻转角(通常为 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$)质子密度加权序列、选用大于脂肪-水化学位移(3.5 ppm)的带宽,以减少化学位移伪影^[3]。

ZTE MRI 的实际应用仍面临若干技术挑战。首先,射频脉冲发射与接收切换等因素所导致死区时间可造成 K 空间中心数据缺失,对此可通过数据过采样、结合数学重建或笛卡尔单点成像技术加以补偿^[4];如 FROIDEVAUX 等^[5]采用混合填充策略填补死区内 K 空间数据缺失,在提升图像信噪比的同时减少了化学位移伪影,提升了 ZTE 图像质量。其次, ZTE 采集特性使成像区域外组织也将产生信号,不同组织信号相互干扰产生混叠伪影;对此可通过优化线圈尺寸、选择适当视野范围加以消除^[6]。

2 临床应用

2.1 关节炎性疾病 MRI 为诊断关节疾病的有效影像学手段。ZTE 序列对短 T2 组织高度敏感,能够清晰显示关节软骨、骨质等结构的细微改变,有效揭示软骨破坏及关节侵蚀、硬化等关键影像学特征,可用于诊断关节炎性疾病,如骨关节炎及强直性脊柱炎等。

骨关节炎是退行性关节疾病,主要表现为关节间隙变窄、软骨退变及骨质增生。骨皮质 T2 弛豫时间极短且质子密度低;常规 MR 序列难以清晰显示骨关节炎引起的骨性结构异常如骨赘形成等。利用 ZTE 技术可捕捉骨质结构异常表现、实现骨皮质的清晰成像^[7]。膝关节是骨关节炎最常见累及部位^[8]。CHENG 等^[9]报道, ZTE 技术可改善 MR 图像质量、提高早期检出膝骨关节炎所致小骨赘的能力。LEE 等^[10]认为 ZTE 序列能清晰显示颞下颌关节紊乱患者关节骨性结构,其识别骨赘与髁突硬化能力与锥形束 CT(cone beam CT, CBCT)高度一致。另有研究发现^[11-12] ZTE MRI 检出颈、腰椎退行性变累及椎体的骨赘等骨性结构与 CT 所见高度一致。另有研究者^[13]成功将 ZTE 技术用于机器人导航腰椎手术,术中置入螺钉位置准确,证实 ZTE MRI 用于临床术前规划具有替代 CT 的潜力。

中轴型脊柱关节炎早期主要累及骶髂关节^[14]。多项研究^[15-17]证实, ZTE MRI 对于评估骶髂关节受损具有显著优势,其检测骶髂关节侵蚀与硬化的能力优于 T1 快速自旋回波(fast spin echo, FSE)序列、敏感

度高于肝脏容积加速采集(liver acquisition with volume acceleration, LAVA)序列,能为影像学评估骨性结构变化提供可靠依据。

2.2 骨折 X 线及 CT 是诊断骨折的常用影像学方法;MRI 显示细微骨折线效果不及 CT,却是诊断隐匿性骨折的金标准,并能显示韧带撕裂等软组织损伤。作为常规 MR 序列的有效补充, ZTE MRI 能清晰显示股骨外侧髁隐匿性骨折,检出其他 MR 序列及 X 线难以识别的骨折线^[3]。ZTE 亦广泛用于诊断其他部位骨折,且图像质量皆与 CT 相当。CHO 等^[18]指出, ZTE MRI 可清晰显示颅骨三层结构(外板、板障和内板)及骨折线,其颅骨厚度测值与 CT 无显著差异。BHARADWAJ 等^[19]发现 ZTE MRI 能准确识别 X 线未能检出的膝关节胫骨平台后内侧骨折。SAHR 等^[20]报道, ZTE 能准确描绘踝关节骨折碎片,提供骨折碎片大小、形状和位置的详细信息并全面评估踝关节,对后续手术治疗规划具有重要意义。de MELLO 等^[21]认为 ZTE MRI 在评估关节孟骨缺损方面与 3D CT 表现相当;FEUERRIEGEL 等^[22]的研究证实了 ZTE MRI 用于量化关节孟骨缺损的有效性和准确性。

2.3 骨肿瘤 常规 MR 序列能清晰显示骨肿瘤形态、评估软组织及骨髓浸润,但对于溶骨性骨质破坏等骨结构异常的敏感性较低。XU 等^[23]对比经灰度反转(gray-scale inversion, GI) ZTE 图像与 T1WI 评估下肢骨肿瘤或肿瘤样病变的效能,发现相比 GI-T1WI, GI-ZTE 图像评估骨皮质异常及骨膜反应的结果与 CT 的一致性更好,且能可视化更多骨皮质细节及骨内病变。LECOUVET 等^[24]分别基于 ZTE 与黑骨序列生成多发性骨髓瘤溶骨性病变“伪 CT”(pseudo-CT, pCT)图像,发现 ZTE 及黑骨序列用于诊断腰椎、骨盆及股骨近端病变均具有较高准确性。ZTE MRI 能清晰显示骨肿瘤硬化成分或新骨形成区域,有助于确定活检采样部位;药物治疗后 ZTE MRI 显示骨肿瘤出现硬化区提示治疗有效,对于评价骨肿瘤治疗效果具有重要临床意义^[25]。

2.4 软组织钙化和骨化 常规 MRI 对于肌腱病变的敏感度较低(13%~79%)^[26];而 ZTE 技术为实现肌腱等短 T2 组织的清晰成像带来新的可能^[27]。PUEL 等^[28]报道,相比单一常规 MRI,结合 ZTE 序列可提高 MRI 对于肩袖钙化性肌腱炎所致钙化沉积的检出率。AMAR 等^[29-30]发现 ZTE 技术在评估神经源性异位骨化位置、表现及骨矿化质量方面与 CT 相当,且显示异位骨化与周围血管和神经的关系(如神经有无受压等)

方面更具优势,可为术前评估及术后制定康复治疗方
案提供重要参考。MA 等^[31]认为 ZTE MRI 用于可
视化颈椎后纵韧带骨化细节的对比度与 CT 相似。

2.5 局限性 尽管 ZTE MRI 在关节炎、骨折、骨
肿瘤及软组织钙化等 MSK 疾病中展现出对短 T2 组
织的独特成像优势,但其临床应用仍面临以下挑战:
①空间分辨率瓶颈,ZTE MRI 空间分辨率虽显著
优于常规 MRI,但与高分辨率 CT 或 X 线相比仍
存在差距,如肩袖钙化性肌腱炎中约 25% X 线
可见钙化而未能通过 ZTE MRI 检出^[28];②信
噪比低,易受伪影干扰,受亚毫秒和高带宽采集
方式所限,ZTE MRI 的信噪比通常低于常规 MRI^[32],
且 ZTE 序列易受脂肪-水化学位移等伪影的影响
而致漏诊早期溶骨性病变,其对于多发性骨髓瘤
溶骨性病变的假阴性率较黑骨序列增加 23%^[24];
③存在骨皮质模糊现象,由于信号衰减特性,ZTE
MRI 显示骨皮质-骨髓界面存在模糊带,用于评
估骨关节炎时可能高估小关节退变严重程度^[12];
④临床适配性受限,ZTE 扫描时间显著长于 CT,
急诊或患者配合度差时适用性受限。临床实践
中,将 ZTE 与常规序列结合进行多模态 MR 检查
有助于解决上述问题。

3 与 DL 相结合

ZTE 与 DL 相结合为解决当前应用难题提供了
新思路。U-Net、GAN 等 DL 模型用于 ZTE 技术
可生成与 CT 高度一致的 pCT 图像;基于 DL 的
重建方法(DL-based reconstruction, DLRecon)能
有效抑制噪声与伪影,结合超分辨率技术可全
面提升图像质量^[33]。

LEYNES 等^[34]通过 DL 方法结合 ZTE 与水脂
分离(Dixon)技术,利用卷积神经网络基于包含
Dixon 及 ZTE 在内的多参数 MRI 数据合成 pCT
图像,可有效捕捉骨组织信息、显著提升盆腔
PET/MRI 衰减校正精度,为临床诊断和制定治
疗计划开辟了新途径。GETZMANN 等^[35]利用
DL 模型成功将骨盆 ZTE 图像转化为高质量 pCT
图像,不仅能高效模拟骨骼结构,还可模拟软
组织对比度,包括脂肪及肌肉的特定 X 线衰
减,对于提升诊断骨盆疾病精度、优化术前规
划具有重要意义。ENSLE 等^[36-37]发现 DLRecon
能显著提升肩关节及膝关节 ZTE 图像质量、
优化可视化效果、提高 ZTE 评估准确性,提示
DL 用于处理 ZTE MR 图像具有巨大潜力,用
于临床实践有望进一步提升诊断效能。

4 小结

ZTE 技术用于短 T2 组织成像具有显著优势;通

过调整和优化参数,ZTE MRI 可满足临床诊断
关节炎、骨折及骨肿瘤等多种 MSK 疾病的需
要。尽管当前 ZTE MRI 空间分辨率较低,且易
出现混叠伪影、化学位移等伪影,但 DL 等
人工智能技术的发展将能在一定程度上弥补
ZTE 技术的固有不足;结合 DL 合成高质量
pCT 图像也为 ZTE 的临床广泛应用带来新的
可能。随着 MR 硬件及 ZTE 技术的持续改进
与完善,在 DL 的强大助力下,ZTE MRI 有望
在诊断 MSK 疾病中实现更高的精度与效率,
为精准治疗提供有力支持。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:吴若彤查阅文献、撰写和修改文
章;王化指导、审阅文章、经费支持;叶兆祥
审阅文章、经费支持。

[参考文献]

- [1] FLORKOW M C, WILLEMSSEN K, MASCARENHAS V V, et al. Magnetic resonance imaging versus computed tomography for three-dimensional bone imaging of musculoskeletal pathologies: A review[J]. J Magn Reson Imaging, 2022, 56(1):11-34.
- [2] LEE H M, WEIGER M, GIEHR C, et al. Long-T₂-suppressed zero echo time imaging with weighted echo subtraction and gradient error correction[J]. Magn Reson Med, 2020, 83(2): 412-426.
- [3] FUJISAKI A, TSUKAMOTO J, NARIMATSU H, et al. Zero echo time magnetic resonance imaging; techniques and clinical utility in musculoskeletal system[J]. J Magn Reson Imaging, 2024, 59(1):32-42.
- [4] CHONG L R, LEE K, SIM F Y. 3D MRI with CT-like bone contrast: An overview of current approaches and practical clinical implementation[J]. Eur J Radiol, 2021, 143:109915.
- [5] FROIDEVAUX R, WEIGER M, RÖSLER M B, et al. HYFI: Hybrid filling of the dead-time gap for faster zero echo time imaging[J]. NMR Biomed, 2021, 34(6):e4493.
- [6] LOMBARDI A F, MA Y J, JANG H, et al. Synthetic CT in musculoskeletal disorders: A systematic review [J]. Invest Radiol, 2023, 58(1):43-59.
- [7] 张琪明, 祁良, 顾晓清, 等. MR 骨皮质成像研究进展[J]. 中国医学影像技术, 2022, 38(12):1881-1884.
- [8] EHMIG J, ENGEL G, LOTZ J, et al. MR-imaging in osteoarthritis: Current standard of practice and future outlook [J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13(15):2586.
- [9] CHENG K Y, MOAZAMIAN D, MA Y, et al. Clinical application of ultrashort echo time (UTE) and zero echo time (ZTE) magnetic resonance (MR) imaging in the evaluation of osteoarthritis[J]. Skeletal Radiol, 2023, 52(11):2149-2157.
- [10] LEE C, JEON K J, HAN S S, et al. CT-like MRI using the zero-TE technique for osseous changes of the TMJ [J]. Dentomaxillofac Radiol, 2020, 49(3):20190272.

- [11] 王聪, 王娅, 崔峰, 等. ZTE 成像技术在颈椎骨赘检测中的应用价值[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(12):2344-2349.
- [12] HOU B, LIU C, LI Y, et al. Evaluation of the degenerative lumbar osseous morphology using zero echo time magnetic resonance imaging (ZTE-MRI)[J]. *Eur Spine J*, 2022, 31(3): 792-800.
- [13] ALTORFER F C S, BURKHARD M D, KELLY M J, et al. Robot-assisted lumbar pedicle screw placement based on 3D magnetic resonance imaging[J]. *Global Spine J*, 2025, 15(2): 1243-1250.
- [14] ROBINSON P C, van der LINDEN S, KHAN M A, et al. Axial spondyloarthritis: Concept, construct, classification and implications for therapy[J]. *Nat Rev Rheumatol*, 2021, 17(2): 109-118.
- [15] LI Y, XIONG Y, HOU B, et al. Comparison of zero echo time MRI with T1-weighted fast spin echo for the recognition of sacroiliac joint structural lesions using CT as the reference standard[J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(6):3963-3973.
- [16] LIN C, LIU D, WEN H, et al. Zero echo time MRI improved detection of erosions and sclerosis in the sacroiliac joint in comparison with LAVA-flex[J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2023, 14:1167334.
- [17] ZHANG Z, WANG J, LI Y, et al. Bone assessment of the sacroiliac joint in ankylosing spondylitis: Comparison between computed tomography and zero echo time MRI [J]. *Eur J Radiol*, 2024, 181:111743.
- [18] CHO S B, BAEK H J, RYU K H, et al. Clinical feasibility of zero TE skull MRI in patients with head trauma in comparison with CT: A single-center study[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2019, 40(1):109-115.
- [19] BHARADWAJ U U, COY A, MOTAMEDI D, et al. CT-like MRI: A qualitative assessment of ZTE sequences for knee osseous abnormalities [J]. *Skeletal Radiol*, 2022, 51(8): 1585-1594.
- [20] SAHR M E, BREIGHNER R E, BURGE A J, et al. Utility of zero echo time MRI for the diagnosis and characterization of ankle fractures[J]. *HSS J*, 2024, 20(4):502-507.
- [21] de MELLO R A F, MA Y J, ASHIR A, et al. Three-dimensional zero echo time magnetic resonance imaging versus 3-dimensional computed tomography for glenoid bone assessment[J]. *Arthroscopy*, 2020, 36(9):2391-2400.
- [22] FEUERRIEGEL G C, KRONTHALER S, WEISS K, et al. Assessment of glenoid bone loss and other osseous shoulder pathologies comparing MR-based CT-like images with conventional CT[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(12):8617-8626.
- [23] XU J, HU Y, ZHOU R, et al. Zero echo time vs. T1-weighted MRI for assessment of cortical and medullary bone morphology abnormalities using CT as the reference standard [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2023, 58(3):752-760.
- [24] LECOUVET F E, ZAN D, LEPOT D, et al. MRI-based zero echo time and black bone pseudo-CT compared with whole-body CT to detect osteolytic lesions in multiple myeloma [J]. *Radiology*, 2024, 313(1):e231817.
- [25] AYDINGÖZ Ü, YILDIZ A E, ERGEN F B. Zero echo time musculoskeletal MRI: Technique, optimization, applications, and pitfalls[J]. *Radiographics*, 2022, 42(5):1398-1414.
- [26] ZHU Y, CHENG X, MA Y, et al. Rotator cuff tendon assessment using magic-angle insensitive 3D ultrashort echo time cones magnetization transfer (UTE-Cones-MT) imaging and modeling with histological correlation [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 48(1):160-168.
- [27] SNEAG D B, ABEL F, POTTER H G, et al. MRI advancements in musculoskeletal clinical and research practice[J]. *Radiology*, 2023, 308(2):e230531.
- [28] PUEL U, LOMBARD C, HOSSU G, et al. Zero echo time MRI in shoulder MRI protocols for the diagnosis of rotator cuff calcific tendinopathy improves identification of calcific deposits compared to conventional MR sequences but remains sub-optimal compared to radiographs[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(9):6381-6391.
- [29] AMAR R, THIRY T, SALGA M, et al. Comparison of magnetic resonance imaging and computed tomography for bone assessment of neurogenic heterotopic ossification of the hip: A preliminary study[J]. *J Orthop Surg Res*, 2021, 16(1):725.
- [30] AMAR R, SALGA M, TORDJMAN M, et al. Neurogenic heterotopic ossification of the hip: Magnetic resonance imaging versus computed tomography for pre-surgical assessment [J]. *Eur J Radiol*, 2024, 175:111466.
- [31] MA Y J, CHANG E Y. Ossification of the posterior longitudinal ligament on zero-TE MRI with "CT-like" contrast[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2021, 217(5):1242.
- [32] WEIGER M, PRUESSMANN K P. Short-T₂ MRI: Principles and recent advances [J]. *Prog Nucl Magn Reson Spectrosc*, 2019, 114-115:237-270.
- [33] SUN S, TAN E T, MINTZ D N, et al. Evaluation of deep learning reconstructed high-resolution 3D lumbar spine MRI[J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(9):6167-6177.
- [34] LEYNES A P, YANG J, WIESINGER F, et al. Zero-echo-time and Dixon deep pseudo-CT (ZeDD CT): Direct generation of pseudo-CT images for pelvic PET/MRI attenuation correction using deep convolutional neural networks with multiparametric MRI[J]. *J Nucl Med*, 2018, 59(5):852-858.
- [35] GETZMANN J M, DEININGER-CZERMAK E, MELISSANIDIS S, et al. Deep learning-based pseudo-CT synthesis from zero echo time MR sequences of the pelvis[J]. *Insights Imaging*, 2024, 15(1):202.
- [36] ENSLE F, KANIEWSKA M, LOHEZIC M, et al. Enhanced bone assessment of the shoulder using zero-echo time MRI with deep-learning image reconstruction[J]. *Skeletal Radiol*, 2024, 53(12):2597-2606.
- [37] ENSLE F, ABEL F, LOHEZIC M, et al. Deep learning reconstruction for optimized bone assessment in zero echo time MR imaging of the knee[J]. *Eur J Radiol*, 2024, 179:111663.