

DOI: 10.16305/j.1007-1334.2025.z20250430008

腰椎振荡推拿手法的施力频率对治疗效果的影响——一项基于脊柱多刚体模型的仿真研究

何天翔¹, 杨玉², 许成硕², 桂云飞², 樊昱驿², 刘巍峰¹

1. 上海中医药大学附属曙光医院推拿科(上海 201203); 2. 上海理工大学健康科学与工程学院(上海 200093)

【摘要】 **目的** 通过建立多刚体力学模型和仿真技术,研究腰椎振荡推拿手法的施力频率对腰椎各节段位移的影响,探讨不同退变程度的 L₄~L₅ 和 L₅~S₁ 椎间盘对施力频率的反应,为振荡推拿干预腰痛和优化提供理论依据。**方法** 建立腰椎生物力学模型:假设椎体为刚体,将椎间盘和韧带等软组织视为弹簧和阻尼器,建立六自由度质量-弹簧-阻尼系统模型。通过调整弹性系数和阻尼系数模拟不同程度的椎间盘退变。利用 Matlab/Simulink 软件建立仿真模型,以正弦波变式作为输入力,模拟不同施力频率对腰椎各节段位移的影响。分别在椎间盘未退变以及 L₄~L₅ 和 L₅~S₁ 不同程度退变的情况下,改变施力频率,记录腰椎各节段的最大相对位移。**结果** 在椎间盘未退变的情况下,腰椎各节段的最大相对位移在施力频率为 2.5~10 Hz 范围内,随着频率下降而显著增加;而在 1~2.5 Hz 范围内,随着频率下降则逐渐减小。当椎间盘 L₄~L₅ 和 L₅~S₁ 发生退变时,施力频率为 2.5 Hz 可引起最大位移响应。随着椎间盘退变程度的增加,腰椎各节段的最大相对位移逐渐减小。**结论** 推拿手法在一定频率范围内,较低的施力频率能够引起更大的腰椎位移,且在接近 2.5 Hz 时治疗效果最佳。

【关键词】 椎间盘退变;腰痛;推拿;频率;生物力学;中医外治法

Effect of force frequency in lumbar oscillation manipulation on therapeutic efficacy: a simulation study based on the spinal multi-rigid-body model

HE Tianxiang¹, YANG Yu², XU Chengshuo², GUI Yunfei², FAN Yuyi², LIU Weifeng¹

1. Department of Tuina, Shuguang Hospital Affiliated to Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China; 2. School of Health Sciences and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Objective By establishing a multi-rigid-body mechanical model and using simulation technology, this study aims to investigate the impact of applied force frequency in lumbar oscillation manipulation on segmental displacement in the lumbar spine, and to explore the response of intervertebral discs at different levels of degeneration, specifically at the L₄-L₅ and L₅-S₁, to various force frequencies, providing a theoretical basis for optimizing oscillation manipulation in the intervention of low back pain. **Methods** A biomechanical model of the lumbar spine was established by treating vertebral bodies as rigid bodies and intervertebral discs, ligaments, and other soft tissues as springs and dampers. A six-degree-of-freedom mass-spring-damper system model was constructed. The simulation of intervertebral disc degeneration was performed by adjusting the elastic and damping coefficients. A simulation model was established using Matlab/Simulink software, with a sine wave variation as the input force to simulate the effect of different force frequencies on lumbar segmental displacement. The maximum relative displacement of the lumbar segments was recorded under conditions of non-degenerated intervertebral discs and varying levels of degeneration at L₄-L₅ and L₅-S₁, with force frequency changes. **Results** In the case of non-degenerated intervertebral discs, the maximum relative displacement of lumbar segments significantly increased within a frequency range of 2.5-10 Hz as the frequency decreased, while it gradually decreased within the 1-2.5 Hz range. When the intervertebral discs at L₄-L₅ and L₅-S₁ degenerated, a force frequency of 2.5 Hz caused the maximum displacement response. As the degree of disc degeneration increased, the maximum

relative displacement of lumbar segments gradually decreased.

Conclusion Within a certain frequency range, lower force frequencies lead to greater lumbar displacement, with the best therapeutic effect achieved at around 2.5 Hz.

Keywords: intervertebral disc degeneration; lumbodinia; tuina; frequency; biomechanics; traditional Chinese medicine external therapy

[基金项目] 上海市浦东新区卫健委联合攻关项目(PW2024D-14);上海中医药大学“十五五”规划前期研究项目(2025FG15)

[作者简介] 何天翔,男,博士,主任医师,主要从事脊柱推拿的

基础与临床研究工作

[通信作者] 刘巍峰,副主任医师,硕士研究生导师;

E-mail: liuweifeng19777@163.com

腰痛已成为全球致残的主要原因之一,给社会带来了巨大的劳动力损失和经济负担^[1]。椎间盘退变是腰痛的重要病因,尤其在第 4 腰椎(L₄)~第 5 腰椎(L₅)和 L₅~第 1 骶椎(S₁)椎间盘区域更为常见^[2-3]。随着年龄增长,椎间盘的水分减少、纤维环破裂、髓核突出等退变过程会进一步损害其结构和功能,进而影响腰椎的稳定性,可能引发椎间盘突出、神经根压迫等一系列病理改变^[4-5]。

针对腰椎间盘退变的治疗,传统医学方法包括药物治疗、物理治疗和手术治疗等。然而,这些治疗方法各有其局限性,长期药物治疗可能带来副作用,手术治疗则存在较高的风险^[6]。因此,非手术治疗受到广泛重视,其中手法治疗因其非侵入性特点和可调控的力学刺激优势,成为临床研究热点。中医推拿是一种有效的传统外治方法,针对腰痛具有疗效显著、副作用少的优点,常作为临床一线治疗手段。研究^[7]表明,推拿疗法能够有效改善腰椎功能,缓解椎间盘退变引起的症状,且副作用较少。尽管已有研究证实推拿在缓解椎间盘退变相关症状中具有显著效果,但现有研究仍存在一些局限性。例如,目前的研究多集中于推拿对腰椎间盘突出症的整体疗效评估,而对于不同退变程度的局部椎间盘的针对性治疗效果研究较少^[8]。针对腰椎调整手法,有学者^[9]提出其力学模式包括传统脉冲激励模式和振荡激励模式。而无论何种模式,其推拿力学参数(周期、频率)与临床疗效之间的量效关系尚未明确。此外,不同退变程度的椎间盘在结构和功能上的差异,可能导致对力频率的反应不同。那么,是否存在推拿手法频率与椎间盘退变程度之间的最佳交互关系,需要进一步研究明确。因此,通过实验验证,合理设计推拿力频率从而优化治疗效果,可提高推拿治疗腰椎间盘突出症的个体化和针对性。

本研究通过建立多刚体力学模型,运用 Matlab/Simulink 仿真技术,模拟当 L₄~L₅和 L₅~S₁椎间盘发生不同程度的退变时,不同腰椎振荡推拿手法的施力频率对治疗效果的影响。通过仿真技术,我们可以精确模拟推拿过程中的腰椎力学响应,为推拿治疗的优化提供理论依据。

1 研究方法

1.1 腰椎生物力学模型的建立 假设椎体为刚体,胸椎整体 L_{Tho}质量 m_{Tho}为 26 kg;L₁~L₅质量 m₁~m₅分别为 0.170、0.114、0.114、0.114、0.114 kg,将腰椎正常椎间盘和周围结缔组织等视为刚体的连接弹簧和阻尼器装

置,建立 6 自由度质量-弹簧-阻尼系统腰椎生物力学模型^[10-11](见图 1)。其中,弹簧的弹性系数 K_{Tho}和 K₁~K₅分别为 50、40、35、30、30、45 kN·m⁻¹^[12],阻尼的阻尼系数 C_{Tho}和 C₁~C₅分别为 570、41、39、29、29、36 N·s·m⁻¹^[13]。既往研究^[14]表明,椎间盘退变伴随水分缺失、黏弹性下降等生物力学改变。为方便研究椎间盘退变引起的腰椎退变与腰椎振荡手法直接的相关性,将腰椎各节段弹性系数和阻尼系数分别增大 25%、50%、75%、100%、125%、150%,模拟不同退变程度^[15]。

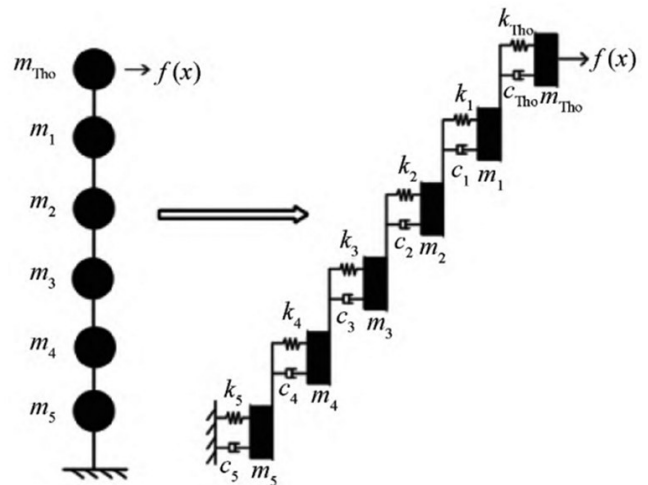


图 1 质量-弹簧-阻尼系统腰椎生物力学模型

腰椎斜扳法涉及三维六自由度方向,具体而言,振荡微调手法的作用力包括沿纵轴方向的牵伸力以及脊柱冠状位和矢状位扭转所产生的剪切力分力。在各种力的作用下,椎间关节紊乱得以调整,从而产生治疗效应。根据临床经验与前期研究^[16]结果表明,冠状位与矢状位的剪切力在腰椎斜扳法调整过程中发挥着至关重要的作用(纵轴牵伸力为准备阶段,剪切力为调整阶段)。因此,本研究聚焦腰椎斜扳法作用时切向力作用的仿真过程,将切向力作为腰椎模型的输入力并建立系统振动方程:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) \tag{1}$$

M、C、K 分别为 6×6 阶的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, F(t) 为激励力矩阵, X 为位移矩阵。其值分别为:

$$M = \begin{bmatrix} m_{Tho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{\text{Tho}} & -k_{\text{Tho}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_{\text{Tho}} & k_{\text{Tho}} + k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{\text{Tho}} & -c_{\text{Tho}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_{\text{Tho}} & c_{\text{Tho}} + c_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_3 & c_3 + c_4 & -c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_4 & c_4 + c_5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$X = [x_{\text{Tho}}, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T \quad (5)$$

$$F(t) = [f(t), 0, 0, 0, 0, 0]^T \quad (6)$$

振动系统的时域响应可以通过状态空间法求解。将系统的各个位移(各个位移是独立变量)定义为状态向量的分量,即定义状态向量。

$$Z(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ X'(t) \end{bmatrix}_{12 \times 1} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x'_1, x'_2, x'_3, x'_4, x'_5, x'_6]^T \quad (7)$$

假设每个状态变量的初始值 $Z(t_0) = 0$, 即 $t = 0$ 时间时刻每个状态变量为 0, 然后将微分方程转化为状态方程和输出方程:

$$\begin{aligned} Z'(t) &= AZ(t) + BF(t) \\ Y(t) &= DZ(t) + EF(t) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, 系数矩阵 $A = \begin{bmatrix} 0_6 & 1_6 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$, 输入矩阵

$$B = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} \\ M^{-1} \end{bmatrix}_{6 \times 6}, \text{ 输出矩阵 } D = [1_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 6}], \text{ 直接传输矩}$$

阵 $E = 0_{6 \times 6}$ 。

考虑振荡激励斜扳法切向力波形与正弦波绝对值波形类似^[16], 选择正弦波变式作为模型输入力。

$$f(t) = 4.9 \times \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 4.9 \quad (9)$$

即推拿最大作用力为 9.8 N, 周期 $T = 2\pi/\omega$, 频率 $f = 1/T$, 本研究通过改变 $f(t)$ 的周期达到改变推拿频率的目的。

1.2 建立 Matlab/Simulink 仿真模型 利用 Matlab/Simulink 软件, 建立如图 2 所示的仿真模型, 设置各模块参数。模拟的作用力为输入模块 From Workspace 的参数; 参数 A、B、C、D 的值作为模块 State-Space 中各参数的值; 设置仿真初始时间为 0, 终止时间为作用力的终止时间; 其余默认系统设置。

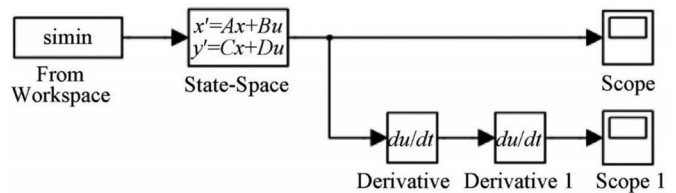


图 2 Matlab/Simulink 仿真模型

2 结果

2.1 腰椎间盘未退变 在腰椎间盘未退变时改变作用力的频率, 腰椎各节段的最大相对位移如表 1 所示。当作用力频率在 2.5 ~ 10 Hz ($T = 0.1 \sim 0.4$) 时, L_4 和 L_5 椎体节段最大相对位移随着作用力频率的下降而逐渐增加。当作用力频率在 1 ~ 2.5 Hz ($T = 0.4 \sim 1.0$) 时, L_4 和 L_5 椎体节段最大相对位移随着作用力频率的下降逐渐减小。

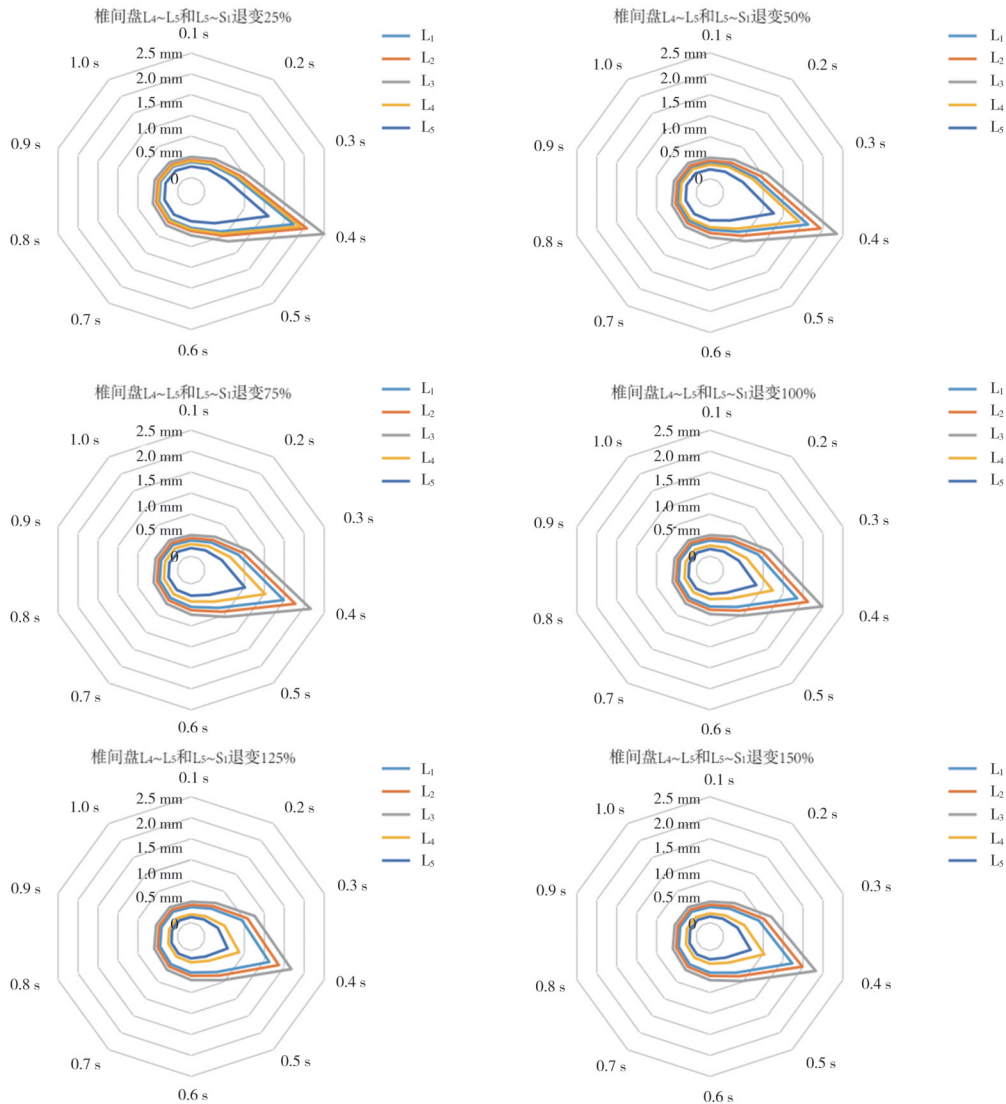
表 1 不同作用力频率下 $L_1 \sim L_5$ 各节段的最大相对位移

频率/Hz	周期/s	L_1 /mm	L_2 /mm	L_3 /mm	L_4 /mm	L_5 /mm
10.00	0.1	0.25	0.29	0.34	0.34	0.23
5.00	0.2	0.31	0.36	0.42	0.42	0.28
3.33	0.3	0.48	0.56	0.65	0.65	0.43
2.50	0.4	1.52	1.75	2.04	2.05	1.37
2.00	0.5	0.67	0.77	0.90	0.90	0.60
1.67	0.6	0.40	0.46	0.54	0.54	0.36
1.43	0.7	0.35	0.40	0.47	0.47	0.32
1.25	0.8	0.33	0.37	0.44	0.44	0.29
1.11	0.9	0.30	0.35	0.40	0.40	0.27
1.00	1.0	0.28	0.32	0.38	0.38	0.25

注: L 为腰椎。

2.2 腰椎间盘发生退变 当 $L_4 \sim L_5$ 和 $L_5 \sim S_1$ 椎间盘发生不同程度退变时, 改变作用力的频率, 腰椎各节段的最大相对位移如图 3 所示。在所有子图中, 无论 $L_4 \sim L_5$ 和 $L_5 \sim S_1$ 椎间盘退变程度如何, 当作用力频率在 2.5 Hz ($T = 0.4$) 时, 腰椎各节段的位移达到最大值。随着作用力频率从 10 Hz 下降至 2.5 Hz ($T = 0.4$) 时, 位移逐渐增

大,达到最大值后,随着作用力频率继续下降,位移开始减小,这种趋势在所有子图中均保持一致。



注:L为腰椎,S为骶椎。

图3 不同作用力频率下, L₄~L₅和L₅~S₁椎间盘不同程度退变时腰椎各节段的最大相对位移

当椎间盘L₄~L₅和L₅~S₁发生不同程度的退变时,改变作用力的频率对L₄和L₅椎体节段的最大相对位移产生影响的具体结果如图4所示。无论退变程度如何,

L₄和L₅椎体节段在作用力频率为2.5 Hz(T=0.4)时均表现出最大相对位移。同时,随着退变程度的增加,最大位移逐渐减小。

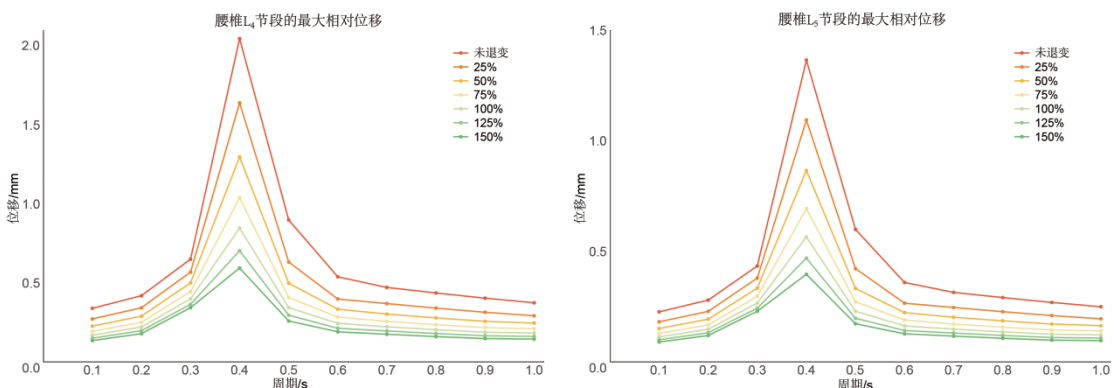


图4 不同作用力频率下, L₄~L₅椎间盘不同程度退变时L₄和L₅椎体节段的最大相对位移

3 讨论

本研究通过仿真技术探讨了腰椎振荡推拿手法的施力频率对腰椎各节段位移的影响。研究表明,当椎间盘未发生退变时,腰椎各节段的最大相对位移在作用力频率为 2.5~10 Hz 时,随着频率的下降而显著增加,而在 1~2.5 Hz 时则随着频率的下降而逐渐减小。这表明在一定频率范围内,较低的施力频率能够引起更大的腰椎位移。这一发现提示,在推拿治疗中,选择合适的施力频率对于提高治疗效果具有重要意义。

进一步研究发现,当椎间盘 $L_4 \sim L_5$ 和 $L_5 \sim S_1$ 发生不同程度的退变时,腰椎各节段的最大相对位移在作用力频率为 2.5 Hz 时均达到峰值。为验证本研究结论的合理性,我们对比了已有相关文献的研究成果,发现该结果与前期研究结果类似^[17]。通过建立多刚体力学模型,对比了传统脉冲激励的斜扳法和简谐激励的改良斜扳法(腰椎振荡推拿手法),发现腰椎振荡推拿手法在施力频率为 1~2.5 Hz 时表现出较好的治疗效果,且安全性更高。这表明在较低的施力频率下,腰椎的力学响应更为显著,可能与椎间盘的生物力学特性及其对力学刺激的响应机制密切相关。具体而言,椎间盘退变会导致其弹性下降和变得僵化,这是由于椎间盘内蛋白多糖(PG)减少,导致其黏弹性丢失,推拿手法可以通过调整椎间盘的内部结构来改善其功能^[18]。这种变化会影响椎间盘的生物力学特性,使其在承受载荷时的应力分布发生改变,进而影响腰椎的稳定性和灵活性。外力在传递过程中可能被上部结构耗散,难以有效作用于椎间盘。在较低的施力频率下,推拿手法能够更有效地作用于椎间盘,促进其内部结构的调整和修复,从而改善腰椎的功能。然而,当施力频率过高时,作用力可能无法充分传递到椎间盘,导致治疗效果不佳。从生物力学角度分析,推拿手法的施力频率与椎间盘的固有频率之间可能存在共振现象。当施力频率接近椎间盘的固有频率时,能够产生最大的位移响应,从而达到最佳的治疗效果。本研究发现,当施力频率为 2.5 Hz 时,推拿治疗效果较好,这可能与椎间盘的固有频率相匹配,从而促进了椎间盘内部结构的调整和修复。临床研究^[19]表明,在振荡手法频率为 60~120 次/min 时,较常规脉冲激励手法疗效更好,也接近 2.5 Hz 频率。此外, $L_4 \sim L_5$ 和 $L_5 \sim S_1$ 椎间盘是腰椎退变的高发区域,其退变对腰椎整体稳定性的影响尤为显著。因此,在推拿治疗中,针对这两个关键节段的治疗策略可能需要更加谨慎和个体化。例如,椎间盘退变较轻的患者,推拿频率可以适当提高,以增强腰椎的活

动度;而对于退变较重的患者,则应选择较低的频率,以避免过度的外力对已受损的椎间盘和周围组织造成进一步的损伤。

尽管本研究通过仿真技术为推拿治疗的优化提供了理论依据,但仍存在一些局限性。首先,本研究假设椎体为刚体,这可能与实际情况存在偏差。实际上,椎体并非完全刚体,在外力作用下也会发生一定的形变。其次,本研究仅考虑了推拿手法的切向力,而忽略了轴向拉力的作用。在实际的推拿治疗中,轴向拉力也可能对治疗效果产生重要影响。此外,本研究的仿真结果还需要通过临床试验进一步验证。未来研究可考虑建立更符合人体生理结构的力学模型,并结合临床试验,进一步探讨不同推拿手法的力学特点对治疗效果的影响,从而提高推拿诊治腰痛的临床疗效。

参考文献:

- [1] GBD 2017 Disease and Injury Incidence and Prevalence Collaborators. Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 354 diseases and injuries for 195 countries and territories, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. Lancet, 2018, 392(10159): 1789-1858.
- [2] JOAQUIM A F, GHIZONI E, TEDESCHI H, et al. Fundamentals of neurosurgery [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2019: 211-220.
- [3] YANG S, ZHANG F, MA J, et al. Intervertebral disc ageing and degeneration: The antiapoptotic effect of oestrogen [J]. Ageing Res Rev, 2020, 57: 100978.
- [4] PENG B G. Pathophysiology, diagnosis, and treatment of discogenic low back pain[J]. World J Orthop, 2013, 4(2): 42-52.
- [5] ZHAO C Q, WANG L M, JIANG L S, et al. The cell biology of intervertebral disc aging and degeneration [J]. Ageing Res Rev, 2007, 6(3): 247-261.
- [6] 孙月华,李寒露,刘玉欢,等.推拿治疗腰椎间盘突出症的作用机制探讨[J].中国中医药现代远程教育,2025, 23(6): 168-170.
- [7] 石丰坦.中医推拿在腰椎间盘突出症治疗中的应用效果[J].延边大学医学学报,2025, 48(1): 100-102.
- [8] 左高骈,何育风,张龙,等.推拿治疗腰椎间盘突出症的机制研究[J].西部中医药,2024, 37(4): 97-100.
- [9] 张延海,曹金凤,吕杰,等.基于多刚体力学模型腰椎推拿斜扳法的优化[J].医用生物力学,2021, 36(2): 277-283.
- [10] KELLER T S, COLLOCA C J, BÉLIVEAU J G. Force-deformation response of the lumbar spine: a sagittal plane model of posteroanterior manipulation and mobilization [J]. Clin Biomech (Bristol), 2002, 17(3): 185-196.
- [11] 陈忻,于杰,冯敏山,等.坐位旋转手法治疗退行性腰椎滑脱的椎间盘力学分析[J].中华中医药杂志,2019, 34(4): 1395-1400.
- [12] 周家兴,韩磊,周必业,等.2011~2015年度海军某型战机飞行员住院疾病谱分析[J].中华保健医学杂志,2018, 20(4): 327-330.

(下转第 63 页)