

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2021.08.022

生物力学与材料

基于有限元仿真的数字化脊柱侧弯矫形研究

盛然¹, 蒋国璋¹, 刘融²

1. 武汉科技大学机械自动化学院, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉市普仁医院骨科, 湖北 武汉 430081

【摘要】目的:对脊柱侧弯患者全脊柱进行数字化信息提取,研究矫形角度与矫形力的关系,并基于CT断层扫描数据信息对患者侧弯脊柱进行三维重建,验证矫形方案的可靠性,从而为患者提供最优的个体化脊柱侧弯矫形方案。**方法:**根据患者CT断层扫描数据,在Matlab软件中对患者侧弯脊柱进行数字化建模,以力学原理推导矫形力与矫形角度的关系式,从而确定脊柱侧弯矫形方案。利用Mimics19.0、3-Matic等医学三维软件,对患者脊柱侧弯部分进行完整三维重建并在AnsysWorkbench中进行有限元仿真,验证矫形方案效果。**结果:**重建出的脊柱三维模型能够准确反映患者实际脊柱侧弯情况,Matlab软件计算得到的最优矫形方案能够在有限元仿真中得到验证。**结论:**基于数字化三维重建的脊柱侧弯矫形能够针对患者个体情况提供最优化的矫形方案,辅助临床医生选择满足患者实际需求的治疗方案。

【关键词】脊柱侧弯; 矫形; 数字化; 有限元仿真

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)08-1033-06

Digitalized scoliosis correction based on finite element simulation

SHENG Ran¹, JIANG Guozhang¹, LIU Rong²

1. School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Department of Orthopedics, Wuhan Puren Hospital, Wuhan 430081, China

Abstract: Objective To study the relationship between orthopedic angle and orthopedic load after extracting the digital information from the entire spine of patients with scoliosis, and to perform three-dimensional reconstruction of the scoliosis spine based on the CT data for verifying the reliability of the correction scheme, thereby providing patients with the optimal individualized scoliosis correction scheme. **Methods** According to the CT data, the scoliosis spine was digitally modeled in MATLAB software, and the relationship between orthopedic angle and orthopedic load was derived based on the principles of mechanics, so as to determine the optimal scoliosis correction scheme. Mimics19.0, 3-Matic and other medical three-dimensional software were used to complete the three-dimensional reconstruction of the scoliosis, and the efficacy of the scoliosis correction scheme was verified using a finite element simulation based on AnsysWorkbench. **Results** The reconstructed three-dimensional model of the spine could accurately reflect the actual scoliosis, and the optimal correction scheme calculated by MATLAB software could be verified by finite element simulation. **Conclusion** Scoliosis correction based on digital three-dimensional reconstruction can provide the optimal scoliosis correction scheme for the patient's individual situation, and assist the clinicians to choose a treatment plan that meets the actual needs of the patients.

Keywords: scoliosis; orthopedics; digitalization; finite element simulation

前言

脊柱侧弯是一种严重影响患者身体正常发育的疾病,通常会随着患者的生长发育而持续加重,并且

生长发育速度越快加重的速度越快。据统计,目前我国脊柱侧弯患者超过300万人,并以每年30万人的速度递增,其中超过半数青少年^[1]。中轻度的脊柱侧弯多带来身体形态与外观异样,重度则会影响患者的心肺功能,压迫器官,对青少年身心带来巨大的压力与负担,不利于他们的正常生活与学习。因此,关于脊柱侧弯的康复治疗越来越受到家长、医生以及全社会的关注^[2]。目前,国际上公认的脊柱侧弯治疗手法主要有两种,手术治疗与保守治疗。手术治疗创伤大、风险高、治疗费用高,一般来说Cobb角大于40°时建议进行手术,大多数青少年达不到手术

【收稿日期】2021-01-10

【基金项目】湖北省卫生计生委联合基金创新团队项目(WJ2018H0042)

【作者简介】盛然,硕士研究生,研究方向:智能康复辅具,E-mail: shengran1996@163.com

【通信作者】刘融,E-mail: dr_liurong@whu.edu.cn

指征,也不愿意采用手术治疗。因此保守治疗就成为了患者首选,保守治疗包括脊柱侧弯矫形器和其他辅助运动锻炼^[3-6]。然而当前脊柱侧弯的矫形方案中,仅依据三点力矫形原理与临床治疗经验对患者进行矫形治疗^[7]。对矫形力大小、施力点、施力方向等并没有明确其具体数值,在矫形器的制备与使用中,往往会因此导致矫形过度或不足,影响患者治疗进展^[8]。为保证患者安全高效地完成矫形治疗,提出一种更加科学合理的系统化矫形方案迫在眉睫。

1 数字化矫形方案分析

1.1 脊柱侧弯数字化信息提取

为了实现患者矫形信息数字化,利用 Matlab 软件进行编程计算,自动获得患者 Cobb 角与最大偏移量数值,并且通过数学建模计算对应的矫形力与位置。

安排经验丰富的脊柱外科医生,利用 Mimics 19.0 软件从患者的 CT 断层扫描数据中,以人工标定的方式,提取出冠状面每个节段椎体上下终板的坐标,导入 Matlab 数据栏中。利用 cftools 工具箱对离散的数据点进行曲线拟合,综合考虑拟合效果、均方根误差(RMSE)、残差误差值(adjusted R-square)等影响,最终选定三阶高斯函数进行拟合^[9]。如图 1 所示。

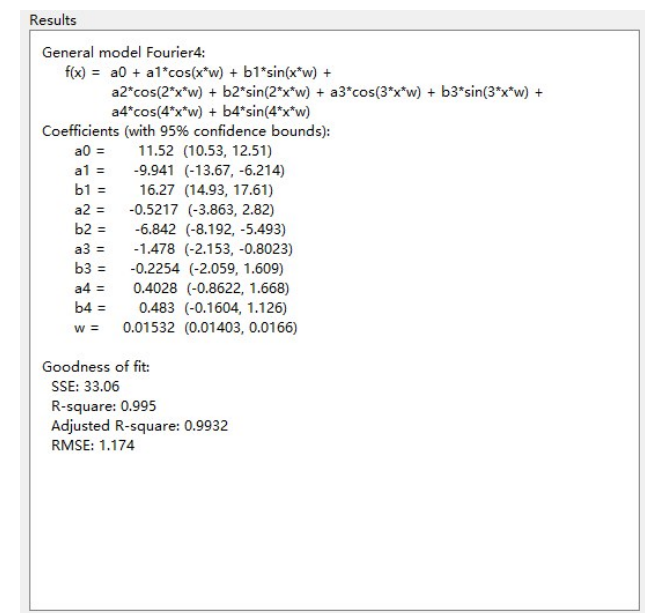


图 1 三阶高斯函数拟合曲线图
Fig.1 Third-order Gaussian function fitting curve

拟合曲线方程确定后,找到此弯的上下端椎坐标,利用编程算法伪代码(图 2),得到编程测算结果(图 3),计算获得患者的 Cobb 角为 36.54°,最大偏移位置在距原点 170.10 mm 处,最大偏移量为 40.76 mm。

```
x=0:0.1:300;
y=a1.*exp(-((x-b1)/c1).^2)+a2.*exp(-((x-b2)/c2).^2)+a3.*exp(-((x-b3)/c3).^2);
[a,b]=findpeaks(y);
plot(xmin,ymin,'ro');
//导入患者脊柱拟合多项式,标记其极值点坐标
x1=90;
f2=@(x)(x-x1)/(-k)+y1;
f0=feval(f2,x);
//选择侧弯下端椎体位置构造其切线方程
x2=250;
f3=@(x)(x-x2)/(-k1)+y2;
f1=feval(f3,x);
//选择侧弯上端椎体位置构造其切线方程
t=abs((k1-k)/(1+k1.*k));
c=atan(t)*180/pi;
//计算两切线垂直线夹角
```

图 2 编程算法伪代码
Fig.2 Programming algorithm pseudocode

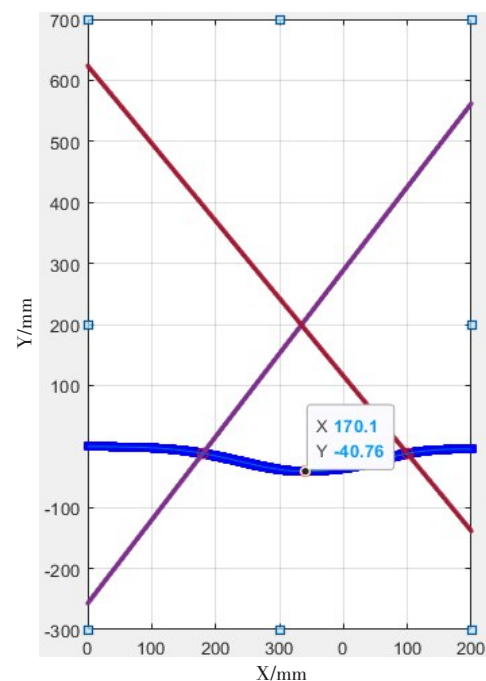


图 3 编程测算结果图
Fig.3 Calculation results of programming

1.2 矫形力与矫形位置分析

脊柱侧弯矫形支具设计中的矫形力大小与位置往往通过临床经验设定,尚未出现可靠的理论依据支撑^[10-11]。考虑到脊柱在矫形力作用下的形变类似于平面曲杆的受力方式,可以用弯曲梁模型对主弯部分进行等效代替^[12]。将近骨盆一端设为原点视作固定铰支座,另一端为可动铰支座。

由于脊柱侧弯矫形过程为矫形力在空间中始终垂直于椎体部分,在模型等效计算中,可将脊柱的弯曲变形视作纯弯曲。而截面形状近似为圆形截面进行计算,本例中截面直径为 43.82 mm(图 4)。

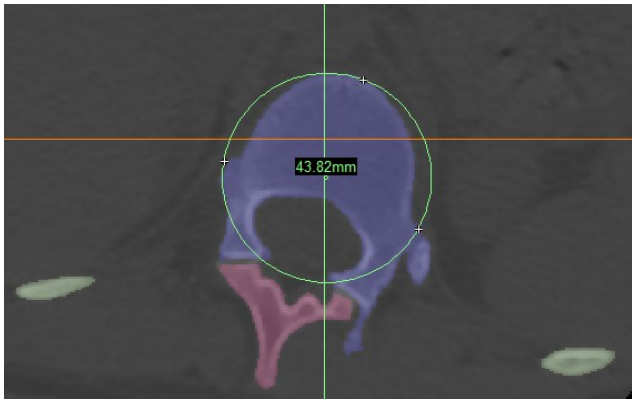


图4 等效横截面直径示意图

Fig.4 Diagram of equivalent cross section diameter

假设在脊柱不同位置受到 n 个集中力作用, 分别为 $F \sim F_n$, 集中力对应位置分别为 $x_1 \sim x_n$, 如图5所示。其中, R_A 为固定铰支座受矫形力时的支反力, R_B 为可动铰支座支反力, l 为主弯部分上下端椎之间的距离, 本例中 $l=152.16$ mm。

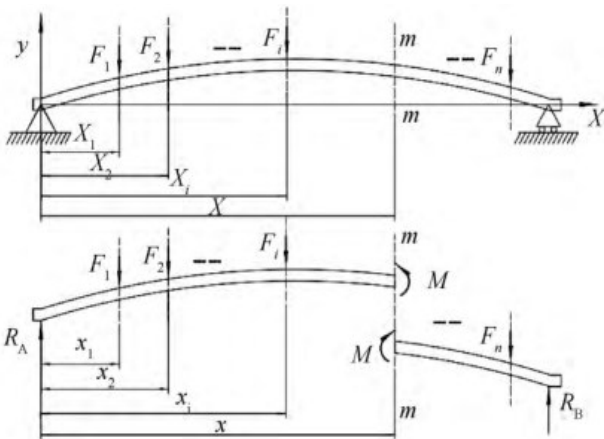


图5 等效弯曲梁模型受力分析图

Fig.5 Force analysis diagram of equivalent curved beam model

$$R_A = \frac{F_1(l-x_1)}{l} + \frac{F_2(l-x_2)}{l} + \frac{F_3(l-x_3)}{l} + \dots + \frac{F_n(l-x_n)}{l} \quad (1)$$

$$R_B = \frac{F_1 x_1}{l} + \frac{F_2 x_2}{l} + \frac{F_3 x_3}{l} + \dots + \frac{F_n x_n}{l} \quad (2)$$

以 x 左端为研究对象, 推导弯矩 M 与截面位置的函数为:

$$M = R_A x - F_1(x-x_1) - F_2(x-x_2) - \dots - F_i(x-x_i), \quad 0 \leq x_1 < x_2 < \dots < x_i \leq x \quad (3)$$

为在弯曲梁等效模型中计算出相关应力与应变, 设 r 为中性层半径; $E_{\text{综}}$ 为脊柱综合弹性模量; Φ 为支反力与 x 位置的夹角; $\Delta\Phi$ 为施力位置 x 处的矫形恢复角。由胡克定律 $\sigma = E\varepsilon$ 以及弯矩的定义, 推导

可得到在横截面 x 处弯矩:

$$M = E_{\text{综}} \frac{\Delta\phi}{\phi} \int \frac{(R-r)^2 dA}{R} \quad (4)$$

其中, R 为侧弯偏移量, A 为等效截面面积。在弯矩 M 的作用下, 主弯部分在横截面上以中性轴为基准, 一侧受拉, 一侧受压, 则在脊柱上应力总和为0。而在计算曲杆弯曲应力时, 圆形截面的中性层半径的计算公式为:

$$r = \frac{d^2}{4(2R_0 - \sqrt{4R_0^2 - d^2})} \quad (5)$$

最大偏移量 $R_0=40.76$, 截面直径 $d=43.82$ 带入计算可得 $r=37.56$ 。由上式可得到在 x 处的矫形力与矫形角度的函数关系式:

$$E_{\text{综}} \frac{\Delta\phi}{\phi} (R_0 - r) A = R_A x - F_1(x-x_1) - F_2(x-x_2) - \dots - F_i(x-x_i), \quad 0 \leq x_1 < x_2 < \dots < x_i \leq x \quad (6)$$

最终确定 $E_{\text{综}}=0.285$ MPa。

本例患者脊柱在冠状面未见明显畸形, 故仅考虑其矢状面方向的矫形方案。本例中患者侧弯为单弯, 主弯部分主要在胸腰椎段, 上下端椎长度 $l=152.16$ mm, 最大偏移量 $R_0=40.76$ mm, Cobb角为 36.54° 。目前临床治疗经验表明, 矫形角度不足可能导致矫形效果不明显, 甚至引起侧弯状况恶化; 而过大的矫形角度将对患者的康复过程造成不适, 严重者可导致不可逆转的脊柱损伤^[13]。临床上, 人体可承受范围内最佳矫形角度为脊柱侧弯角度的 $\frac{1}{2}$, 即

$$\Delta\Phi/\Phi = \frac{1}{2} \quad [14]。$$

再根据脊柱侧弯三点力矫形原理计算得到最优矫形位置 x 与最优矫形力大小 F , 即在距离原点 $x=170.10$ mm 的位置施加 65.2 N 的矫形力, 为最优矫形方案。

2 脊柱侧弯数字化仿真

本研究以患者的CT断层扫描数据为基础, 对患者脊柱进行数字化三维重建。通过 Mimics19.0 软件CT骨分割功能, 提取患者全脊柱骨骼信息。使用3D蒙版重建功能对患者脊柱全长进行初步重建, 如图6a所示。

本例脊柱侧弯患者为C型单弯, 主弯部位为腰弯, 为了研究矫形力与矫形位置对患者矫形效果的影响, 应对主弯部分进行精确建模。利用 Mimics19.0 软件的 remesh 功能, 将3D蒙版导入3-Matic中对其进行实体化。为保证重建模型的精度, 将每个椎体导入 Geomagic Studio 2013 软件中进行模型孔洞修复与坏片修复处理,

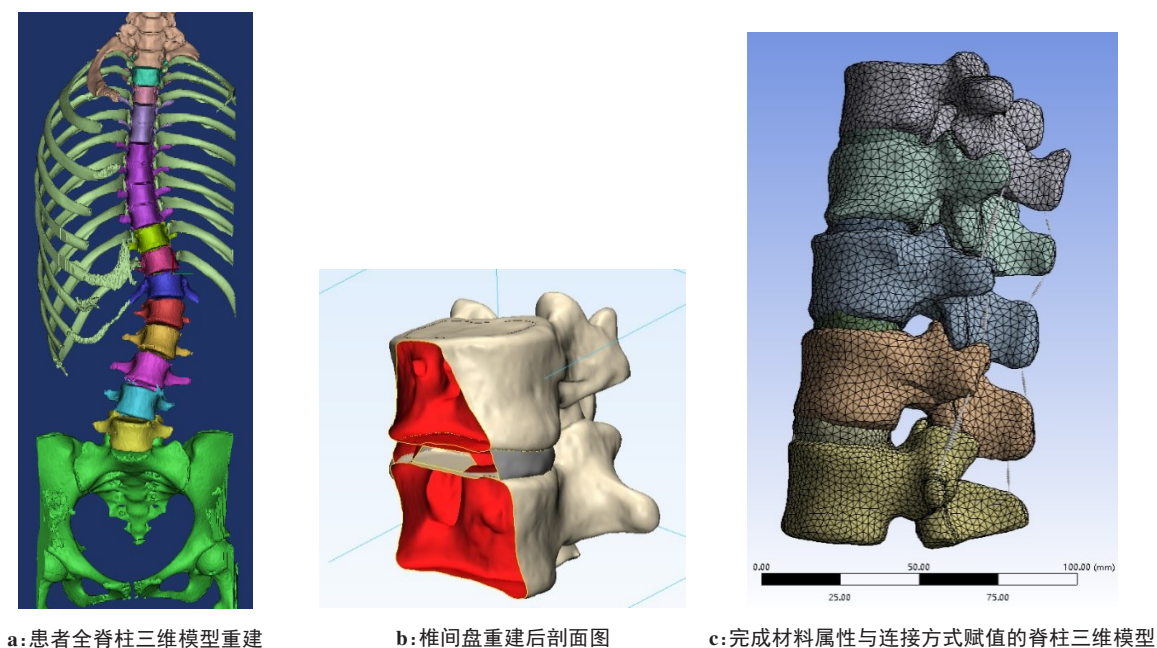


图6 侧弯脊柱的数字化仿真

Fig.6 Digital simulation of the scoliosis

并对实体化的椎体进行体网格划分,简化三角面片数量,以确保计算速度。

将优化后的椎体导入 3-Matic 软件中,准备进行椎间盘重建。由于在脊柱侧弯矫形过程中,在矫形力作用下椎体形变可忽略不计,发生形变的主体实质上是连接每段椎骨间的椎间盘,因此重建出符合人体生物结构的椎间盘十分重要。当前,在 CT 断层扫描图像中无法通过灰度值划分出椎间盘此类软组织,故需要在椎体模型间对椎间盘进行手动重建。

椎间盘结构由外围的纤维环与内部的髓核构成。在 3-Matic 中,使用 Mark 功能标记两块椎骨的上下表面,利用解剖重建功能进行椎间盘的重建,并以向内抽壳方式构建髓核,剖面图如图 6b 所示

不同于以往重建案例中通过 workbench 对脊柱的单元类型、弹性模量与泊松比进行均一化材料属性赋值^[15](表 1),本例经过实体网格划分后,将模型导入 Mimics19.0 后对骨骼进行基于灰度值划分的材料属性赋值。由于骨骼本身的密度层次复杂,基于灰度值赋值相比均一化赋值而言更能反映患者骨骼结构的真实情况^[16](表 2)。椎间盘的纤维环与髓核部分,按照表 1 中弹性模量与泊松比进行赋值。

除了椎体与椎间盘外,各类韧带也是脊柱的重要组成部分。脊柱的连接依赖前纵韧带、后纵韧带、棘上韧带等多种韧带。为了更好地模拟患者在各类矫形方案下脊柱的形变状况,本例中通过添加弹簧连接模拟韧带连接,如图 6c 所示。至此,脊柱数字化仿真建模完成。

表1 ANSYS材料属性赋值

Tab.1 ANSYS material attribute assignment

结构	单元类型	弹性模量/MPa	泊松比
皮质骨	壳单元	12 000	0.300
松质骨	四面体	100	0.200
纤维环	四面体	4.2	0.450
髓核	四面体	1	0.499

表2 Mimics骨骼灰度值赋值经验公式

Tab.2 Empirical formula for the assignment of Mimics bone gray value

表观密度 ρ	相关系数	方向	杨氏模量 E/MPa	相关系数
$\rho=1.122\text{ HU}+47$	0.69	前-后	$E=1.92\rho-170$	0.92
$\rho=1.122\text{ HU}+47$	0.69	前-后	$E=0.02\rho^{1.69}$	0.86
$\rho=1.122\text{ HU}+47$	0.69	内-外	$E=2.20\rho-209$	0.94
$\rho=1.122\text{ HU}+47$	0.69	内-外	$E=0.02\rho^{1.75}$	0.89
$\rho=1\text{ HU}$	-	上-下	$E=7.136\rho-172.3$	0.73

3 结果

利用前文建立的脊柱侧弯三维模型,对计算出的最优矫形方案进行有限元分析验证。三维模型底端设为固定端,空间移动设置为 0,在距离原点 170.10 mm 的位置对脊柱侧弯三维模型施加 65.2 N 的矫形力,应力云图如图 7 所示。

等效弹性应变云图反映出应变主体部分为椎间盘,椎体部分不受形变影响,证明了脊柱侧弯三维模型的有效性。总变形云图显示,在此矫形方案下,最

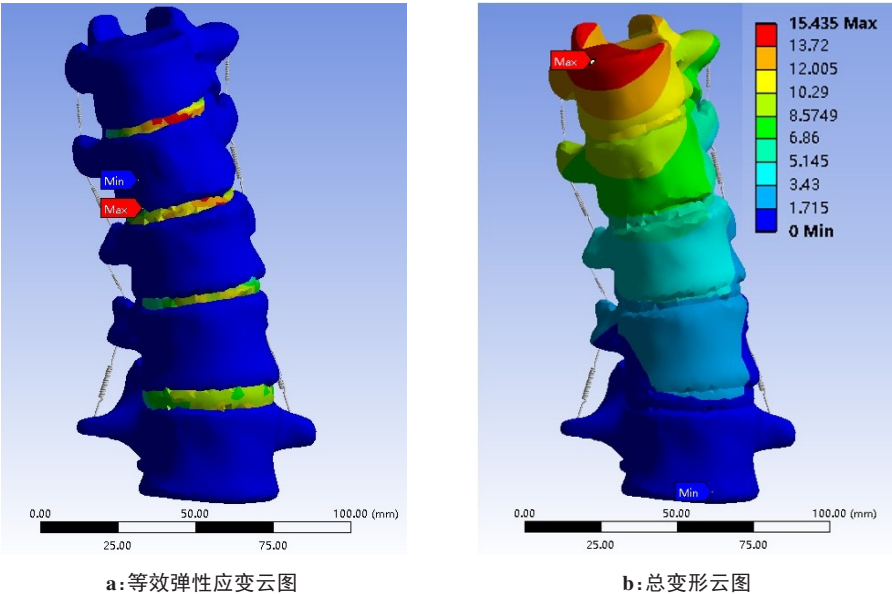


图 7 侧弯脊柱模型有限元仿真结果

Fig.7 Finite element simulation results of scoliosis model

大位移 15.435 mm, 形变后 Cobb 角 19.86°, 相比矫形前的 36.54° 减少了 16.68°, 基本满足 $\Delta\Phi/\Phi=\frac{1}{2}$ 的矫形要求, 证明了本矫形方案的有效性。

4 讨论

本研究基于患者全脊柱 CT 断层扫描数据, 利用 Matlab 软件编程, 计算出患者的 Cobb 角、最大偏移量与偏移位置。能够在治疗前期, 高效准确地为医生提供脊柱侧弯患者的数字化信息, 减少了人为测量导致的误差与时间。辅助医生快速判断患者是否需要进行治疗, 能否以佩戴矫形器的方式进行矫形治疗。

将脊柱侧弯部分以圆截面弯曲梁模型进行等效替代, 进而分析出脊柱侧弯矫形力与矫形角度的关系, 为患者提供了具体的矫形方案。区别于依赖临床经验的传统矫形方案, 本研究提出的矫形方案有相关力学理论支持, 并且经过患者脊柱侧弯三维模型的有限元验证其有效性, 更具科学性。

需要引起注意的是, 若患者脊柱在矢状面存在畸形时, 需要将矢状面脊柱以相同的方式在 Matlab 中进行计算分析, 并且在确定矫形力与矫形位置时在空间中计算合力的作用点与力的大小, 以保证脊柱侧弯矫形的全面性。考虑到本例中患者为 C 型脊柱侧弯, 且主弯位置在腰部, 近骨盆处才能等效为固定端进行力学分析。当患者的侧弯类型与主弯位置发生变化时, 需结合具体情况进行等效建模与相关分析^[17-19]。

基于数字化三维建模的脊柱侧弯矫形研究旨在

为患者提供最优化矫形方案。不仅能在治疗前期准确地为医生提供判断患者侧弯状况的依据, 也为后续脊柱侧弯矫形器的设计打下了基础。

当前我国正在大力推进智慧医疗进程, 在脊柱侧弯矫形研究方面, 智能化程度远远不足。未来智能化脊柱侧弯矫形的发展, 将集中在结合人工智能算法, 自动生成个性化矫形方案。从 CT 断层扫描数据, 自动提取患者身体信息, 生成最优矫形方案, 并结合虚拟现实技术, 直观反映脊柱侧弯矫形过程与个体化矫形器定制方案。笔者也将以此课题作为今后的关注重点, 继续深入研究。

【参考文献】

[1] 邹艳, 林云, 章荣华, 等. 儿童青少年脊柱侧弯筛查和干预研究进展[J]. 预防医学, 2019, 31(10): 1017-1021.
ZOU Y, LIN Y, ZHANG R H, et al. Research progress in screening and intervention of scoliosis among children adolescents [J]. Preventive Medicine, 2019, 31(10): 1017-1021.

[2] 黄忍, 王星, 李志军, 等. 青少年特发性脊柱侧弯的诊治进展[J]. 中国临床解剖学杂志, 2016, 34(4): 472-475.
HUANG R, WANG X, LI Z J, et al. Progress in diagnosis and treatment of adolescent idiopathic scoliosis[J]. Chinese Journal of Clinical Anatomy, 2016, 34(4): 472-475.

[3] 胡怡佳, 黄任秀, 罗雪梅, 等. 青少年特发性脊柱侧凸非手术治疗现状[J]. 智慧健康, 2020, 6(1): 49-51.
HU Y J, HUANG R X, LUO X M, et al. Current status of non-surgical treatment for adolescent idiopathic scoliosis[J]. Smart Healthcare, 2020, 6(1): 49-51.

[4] 许建中. 特发性脊柱侧弯诊治的历史与未来[J]. 第三军医大学学报, 2019, 41(19): 1855-1858.
XU J Z. Diagnosis and management of idiopathic scoliosis: history and future[J]. Journal of Third Military Medical University, 2019, 41(19): 1855-1858.

[5] 傅涛, 厉彦虎. 功能性康复训练改善青少年特发性脊柱侧弯的研究[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(28): 4462-4468.
FU T, LI Y H. Functional rehabilitation training improves adolescent idiopathic scoliosis [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2017, 21(28): 4462-4468.

- [6] 周斌, 赵自平, 王治国, 等. 支具治疗青少年特发性脊柱侧弯的研究进展[J]. 中国当代医药, 2015, 22(13): 38-41.
ZHOU B, ZHAO Z P, WANG Z G, et al. Research progress of braces in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis[J]. China Modern Medicine, 2015, 22(13): 38-41.
- [7] 赵菁, 虞锡丹, 徐纯鑫, 等. 青少年特发性脊柱侧凸的国内外治疗现状[J]. 南通大学学报(医学版), 2018, 38(3): 203-205.
ZHAO J, YU X D, XU C X, et al. Current status of domestic and foreign treatment of adolescent idiopathic scoliosis[J]. Journal of Nantong University (Medical Sciences), 2018, 38(3): 203-205.
- [8] 李伟剑. 改良脊柱矫正系统的生物力学研究[D]. 百色: 右江民族医学院, 2019.
LI W J. The biomechanical study of the improved spine correction system[D]. Baise: Youjiang Medical College for Nationalities, 2019.
- [9] 武文佳. MATLAB在数学建模中的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2019(11): 78-79.
WU W J. Application of MATLAB in mathematical modeling[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019(11): 78-79.
- [10] 陶静, 胡君, 赵立伟. 脊柱侧弯矫形器的临床应用[J]. 科技导报, 2019, 37(22): 87-93.
TAO J, HU J, ZHAO L W. Clinical application of scoliosis orthosis[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(22): 87-93.
- [11] 鲁德志, 王彩萍, 刘子凡, 等. 特发性脊柱侧弯矫形器的研究进展[J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28(13): 1215-1219.
LU D Z, WANG C P, LIU Z F, et al. Research advance in orthosis for idiopathic scoliosis[J]. Orthopedic Journal of China, 2020, 28(13): 1215-1219.
- [12] 张恩泽, 廖振华, 刘伟强. 人体脊柱生物力学特性的研究方法进展[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(48): 7273-7279.
ZHANG E Z, LIAO Z H, LIU W Q. Research methods and progress on the biomechanical properties of the human spine[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2016, 20(48): 7273-7279.
- [13] 张玉芳, 关天民, 郭侨阁, 等. 基于3D打印技术的个性化脊柱侧弯矫形支具数字化设计[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(36): 5824-5829.
ZHANG Y F, GUAN T M, GUO Q G, et al. Digital design of personalized scoliosis orthopedic brace based on 3D printing technology[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2019, 23(36): 5824-5829.
- [14] AHMAD A A. Early-onset scoliosis and current treatment methods[J]. J Clin Orthop Trauma, 2020, 11(2): 184-190.
- [15] 张彬. 脊柱侧弯发展趋势的预测和矫形的有限元分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
ZHANG B. Prediction of the development trend of scoliosis and finite element analysis of correction[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [16] KAMAL Z, ROUHI G, ARJMAND N, et al. A stability-based model of a growing spine with adolescent idiopathic scoliosis: a combination of musculoskeletal and finite element approaches[J]. Med Eng Phys, 2019, 64: 46-55.
- [17] 毛锐涛, 陈禹彤. 生物力学在青少年特发性脊柱侧弯中的应用进展[J]. 智慧健康, 2019, 5(2): 67-69.
MAO R T, CHEN Y T. Application of biomechanics in adolescent idiopathic scoliosis[J]. Smart Healthcare, 2019, 5(2): 67-69.
- [18] HAWARY R E, ZAAROR-REGEV D, FLOMAN Y, et al. Brace treatment in adolescent idiopathic scoliosis: risk factors for failure-a literature review[J]. Spine J, 2019, 19(12): 1917-1925.
- [19] SEKI S, YAHARA Y, MAKINO H, et al. Differential rod contouring on thoracolumbar/lumbar curvature in patients with adolescent idiopathic scoliosis: an analysis with intraoperative acquisition of three-dimensional imaging[J]. J Orthop Sci, 2019, 24(5): 780-786.

(编辑: 薛泽玲)