

文章编号: 1004-7220(2023)06-1179-07

桡骨远端骨折夹板外固定的骨折缝应力预测

王聪轩¹, 萨日娜¹, 包呼和²

(1. 内蒙古工业大学 机械工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古自治区人民医院 骨创伤科, 呼和浩特 010017)

摘要:目的 运用静力学分析、试验设计法以及布谷鸟-支持向量机预测建立关于 C1_1、C2_1、C3_1 型桡骨远端骨折夹板固定不同厚度压垫下骨折缝应力关系的数学模型。方法 在 CT 影像中获得前臂中各个组织的形状, 建立对应的实体模型, 进行降噪、装配等过程实现建模; 在 Workbench 中根据实验测定的载荷数据对模型施加载荷, 获得一种情况下的骨组织力学情况; 再通过试验设计法对多种施加载荷情况下的骨组织力学情况进行模拟; 最后, 通过布谷鸟改进支持向量回归预测, 获得关于各骨折类型的数学模型。结果 对 B 曲面划分的 12 个压垫固定位置施加载荷, 通过试验设计法对 460 个样本在 Workbench 中 DOE 模块中进行求解, 460 个样本中随机抽取 400 个作为训练集得到数学模型, 用剩余 60 个样本作为测试集与数学模型预测结果进行对比, 即可建立高精度的有关夹板固定中压垫固定位置上不同载荷和骨折缝处载荷情况的数学模型。通过已知压垫固定区域施加不同厚度压垫的固定力对骨折缝应力的预测, 预测值与仿真值进行对比模型预测精度最高达到 99.66%, 最低达到 95.653%。从精度上分析, 压垫载荷与骨折缝处载荷存在模糊的数学关系, 即支持向量机预测模型有效。结论 通过研究压垫固定作用方式和压垫固定力对骨折缝的影响, 有利于传统固定夹板与现代科学技术相结合, 为临床骨折治疗桡骨远端骨折时固定器的选择和外固定器械设计提供参考。

关键词: 桡骨远端骨折; 夹板固定; 压垫; 试验设计法; 布谷鸟-支持向量机预测

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.019

Prediction of Fracture Suture Stress for Distal Radius Fractures Fixed by the Splint

WANG Congxuan¹, SA Rina¹, BAO Huhe²

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
2. Department of Orthopaedic Trauma, Inner Mongolia People's Hospital, Hohhot 010017, China)

Abstract: Objective To establish a mathematical model for fracture suture load relationship of C1_1, C2_1, C3_1 type distal radius fractures fixed by the splint with different pad thicknesses by using static analysis, design of experiment (DOE) and cuckoo-support vector machine prediction. **Methods** The shape of each tissue in the forearm was obtained from CT images, the corresponding solid models were established, and the modeling was achieved by noise reduction, assembly processes. The mechanical situation of bone tissues under one condition was obtained by applying load to the model according to load data measured by the Workbench. Then through the DOE method, the mechanical conditions of bone tissues under various conditions of the applied load were simulated. Finally, the mathematical models for various fracture types were obtained by cuckoo search-support

收稿日期: 2023-02-14; 修回日期: 2023-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51765052), 内蒙古自然科学基金项目 (2020LH05009), 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目 (JY20220282)

通信作者: 萨日娜, 教授, E-mail: srrnmg@163.com

vector regression (CS-SVR) prediction. **Results** The load was applied to the fixed position of 12 pressure pads divided by the B surface, and 460 samples were solved in DOE module in Workbench by the DOE method, and 400 of the 460 samples were randomly selected as the training set to obtain the mathematical model. The remaining 60 samples were used as the test set for comparison with prediction result of the mathematical model. The high precision mathematical models for different loads on the fixed position of the splint and the load at fracture suture could be established. The highest prediction accuracy of the model was 99.659%, and the lowest was 95.653%. From the accuracy analysis, there was a fuzzy mathematical relationship between the pad load and fracture suture load, indicating that the support vector machine prediction model was effective. **Conclusions** The study on the effect of pressure splint fixation mode and pressure splint stress on fracture suture is beneficial for the combination of traditional fixation splint and modern science and technology, and it can provide references for the selection of fixators and the design of external fixation devices in clinical treatment of distal radius fractures.

Key words: distal radius fracture; splint fixation; pressure pad; design of experiment; cuckoo-support vector machine prediction

夹板外固定是桡骨远端骨折治疗的常见医疗辅具。夹板外固定过程中桡骨远端骨折生物力学分析是外固定器械更新升级的关键依据。

针对外固定过程中骨折生物力学分析,国内外开展了很多相关的研究。孙汉娇^[1]通过数字化设计方法设计新夹板,对前臂纵向截面用椭圆拟合的方式构建夹板外形,采用静力学分析对比数字化设计夹板和传统夹板在 Colles 骨折下的效能。Yan 等^[2]为保证佩戴舒适性,通过力学分析得到前臂在多个点位的载荷,以伤肢支具模型和点位载荷为条件进行拓扑优化。张静等^[3]根据需求分析设计贴合前臂的外固定支具,实现固定、牵伸、活动 3 种模式,并根据力学分析进行优化。姜昆等^[4]对 C 型桡骨远端骨折进行生物力学分析,研究软组织和桡骨远端骨折位置,并讨论最大应力和相关影响。王颖等^[5]通过添加应变片的方式,分析施加载荷对空心螺钉固定股骨颈骨折力学特性的影响。此外,在压垫固定研究中,魏成建等^[6]利用动力气囊压垫控制气压,实现对桡骨远端骨折纠正残余侧方移位,以及增加局部固定力。陈延荣等^[7]对健康前臂进行夹板绑扎固定,通过实验研究在 Colles 骨折夹板固定绑法中有、无压垫以及腕关节休息位、伸直位、握拳位对腕关节局部压力的影响。刘金清^[8]通过夹板固定方式添加 3D 打印技术打印压垫为实验组与棉花压垫做对照组对比固定 Colles 骨折恢复情况。

综上所述,目前有关骨折生物力学分析和压垫固定的研究多见报道,研究结果为载荷稳定性与夹

板佩戴舒适性等方面提供参考。但是,对夹板外固定过程中压垫厚度与骨折缝应力之间的关系研究较少。本文围绕桡骨远端骨折中 C1_1、C2_1、C3_1 型骨折缝应力的预测,通过夹板外固定静力学分析和压垫厚度数据采集进行数值模拟,建立布谷鸟-支持向量机预测模型,利用软件 Workbench 和 Matlab 完成预测模型建立工作。

1 桡骨远端骨折模型

对 1 名 48 岁健康男性左前臂 CT 图像进行采集,共采集 257 层 CT 图像,扫描间隔 1 mm。首先用 Mimics 19.0 (Materialise 公司,比利时)进行 3D 建模,由于 CT 影像的灰度值不同可以将组织分隔开,形成骨组织和软组织。因为扫描影像分层间隔和图像精度等因素,生成的模型比较粗糙,且会存在很多表面尖点,故在 Mimics 中将建模后的模型保存为 STL 格式。然后,用 Geomagic Studio 2012 (Geomagic 公司,美国)三维逆向工程软件,对模型表面粗糙处进行处理,改善表面的光滑程度。最后将模型导入 UG 10.0 (Siemens PLM Software 公司,美国)中,利用 UG 曲面编辑功能,对模型外表面进行精确且合理划分,形成规则 B 曲面,并根据后期需要对模型进行改善。

以 C1_1、C2_1、C3_1 骨折类型作为研究对象(见图 1),其中 F-1-1、F-2-1、F-2-2、F-3-1、F-3-2、F-3-3 为各骨折缝的编号^[9]。

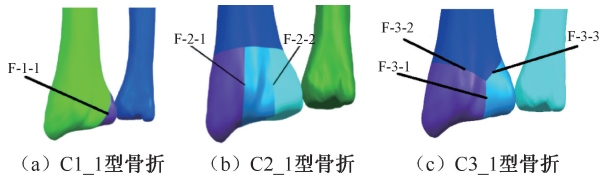


图 1 桡骨远端骨折示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distal radius fracture

- (a) C1_1 type fracture, (b) C2_1 type fracture,
- (c) C3_1 type fracture

2 力学分析与数据采集

将模型导入 Workbench 中进行静力学分析,包括定义材料属性、模型载入、接触与边界条件、网格划分、载荷和约束、求解。通过上述流程能够实现桡骨远端骨折前臂静力学分析过程。

压垫的主要用途是在骨折端防止或矫正残余移位的固定力。将压垫放置在腕关节处,通过增加腕关节处高度实现载荷的增加^[10-11]。从腕关节处 Z 向偏移 20 mm 分割面形成第 1 排压垫固定位置,再向后偏移 20 mm 作为第 2 排压垫固定位置。将前臂外表面通过有理 B 曲面功能划分成 12 个压垫固定位置,其中掌侧、背侧曲面的面积约为尺侧、桡侧曲面的 2 倍。在掌侧、背侧各划分 4 个压垫固定位置,在尺侧、桡侧各划分 2 个压垫固定位置,共 12 个压垫固定位置,分别命名为 R1、R2、B1、B2、B3、B4、C1、C2、Z1、Z2、Z3、Z4(见图 2)。

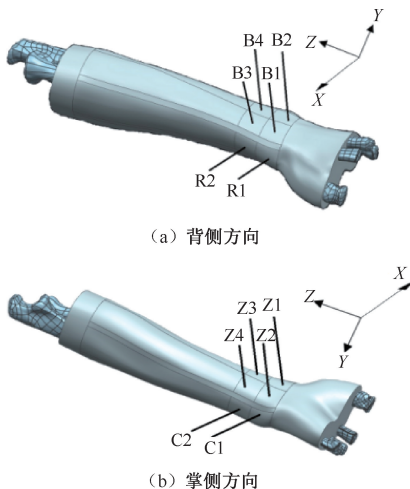


图 2 压垫固定位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fixed position of the pressure pad

- (a) Dorsal direction, (b) Volar direction

参照文献[12],为夹板、骨组织、软组织、骨折线赋予力学属性。在理想工况下,表面光滑且接触面积小,可采用无摩擦接触,以便于直观骨折断端发生偏移的情况。采用自适应网格划分方法,网格尺寸按 4、3、2、1.5、1、0.75、0.5 mm 划分,并进行网格收敛性分析。结果显示,2 mm 后细分逐渐趋于收敛,故设置单元尺寸为 1 mm;设置相关性中心(Relevance Center)为细化(Fine)。网格划分共有节点数 213 581,单元数 121 969。通过压力传感器测量夹板固定不同厚度压垫在前臂上产生的固定力,以不同厚度压垫固定产生的固定力作为输入参数^[13]。根据输入参数,选择用 5 mm 厚度压垫固定力为 14.5 N,肘关节一端处尺骨、桡骨设置固定约束,以实现模型的稳定[见图 3(a)]。图 3(b)所示为分析模型的应力云图。

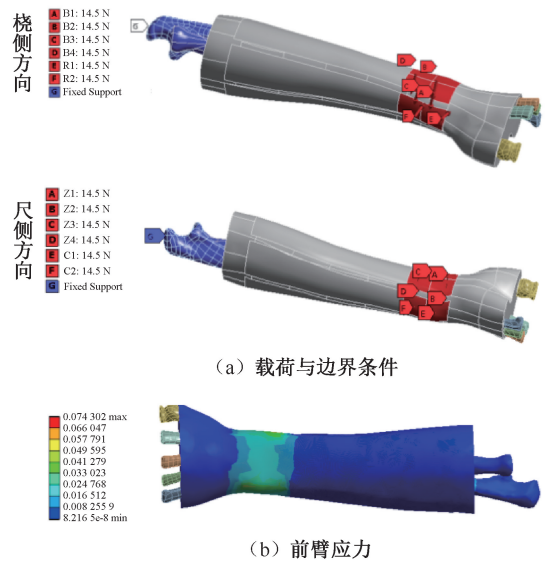


图 3 静力学分析

Fig. 3 Static analysis (a) Load and boundary conditions, (b) Forearm stress

以 12 个压垫固定区域施加不同厚度压垫固定力为输入参数,以桡骨远端骨折断端面应力作为输出参数。图 4 所示为压垫厚度为 5 mm 时 C1_1、C2_1、C3_1 型桡骨远端骨折缝应力分布。压垫厚度输入参数值为 5.0~9.5 mm 每间隔 0.5 mm 测量 1 次,施加在 12 个压垫固定位置上。由 12 个压垫载荷施加区域作为因素,10 个厚度的压垫固定载荷作为水平,构成 12 因素 10 水平的正交试验。在

Workbench 中将压垫固定载荷作为输入参数,骨折缝应力作为输出参数,代入试验设计法 (design of

experiment, DOE) 模块。分析得到各个样本输出的骨折缝应力, C1_1、C2_1、C3_1 样本数据集。

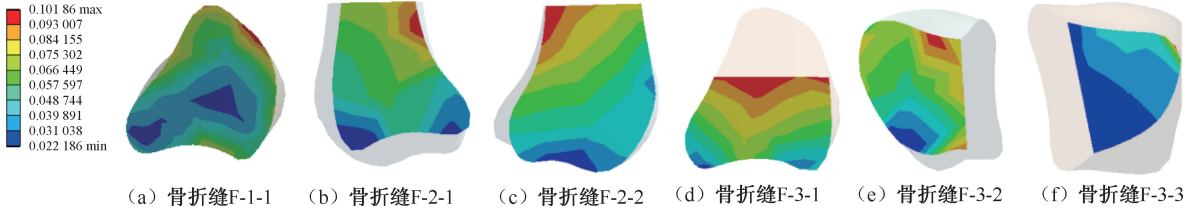


图4 压垫厚度为5mm时桡骨远端骨折缝应力

Fig. 4 Distributions of fracture suture stress for distal radius fractures (a) Seam of fracture F-1-1, (b) Seam of fracture F-2-1, (c) Seam of fracture F-2-2, (d) Seam of fracture F-3-1, (e) Seam of fracture F-3-2, (f) Seam of fracture F-3-3

3 骨折缝应力预测

3.1 CS-SVR 预测算法

骨折缝应力预测技术路线如图5所示。

支持向量机 (support vector machine, SVM) 主要用于模式识别和回归问题的最优工具,具有稳健和快速的数据挖掘技术^[14-15]。SVM的优点是鲁棒

性好,预测方式简单,参数变量易控制,缺点是对大规模数据的计算比较困难,不提供概率区间估计,需要预处理和调参工作,对参数变量较敏感。

采用 SVR 进行非线性平稳预测,函数拟合的效果很好,但是需要调节惩罚因子 C 和径向基函数核参数 γ ,才能得到较好的精度^[16]。参数 C 与 γ 决定预测效果,传统的支持向量机预测算法使用穷举的

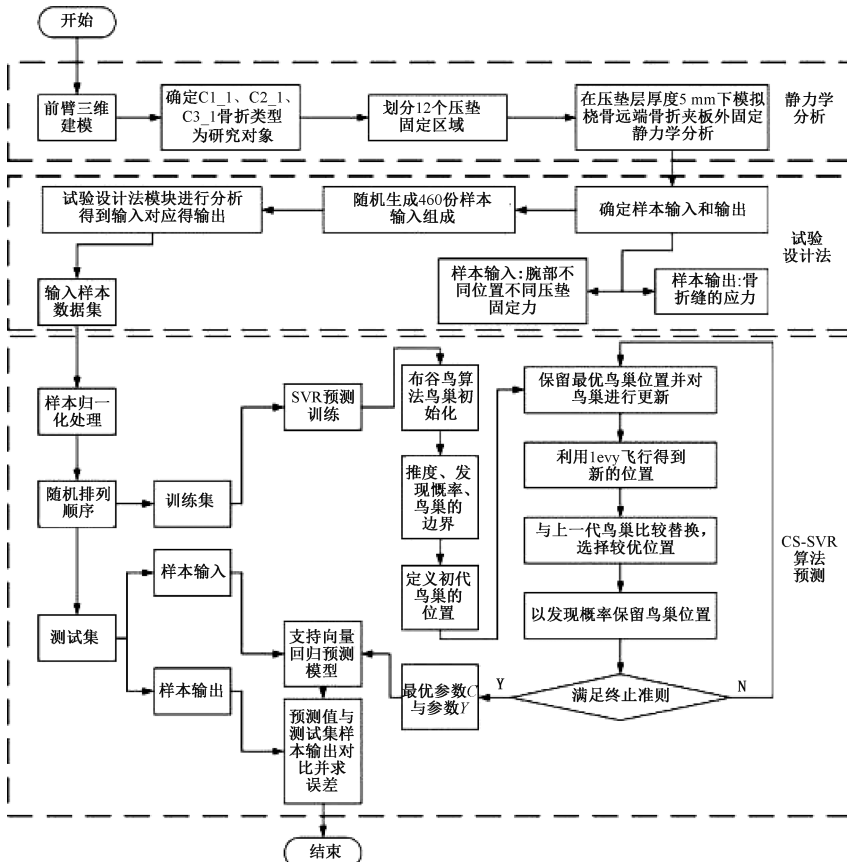


图5 骨折缝应力预测技术路线图

Fig. 5 Technical roadmap for fracture suture stress prediction

搜索方法,搜索范围大,无法保证精度和计算速度。布谷鸟算法改进的支持向量回归(cuckoo search-support vector regression, CS-SVR)预测模型通过随机搜寻路径,不断迭代更新鸟巢实现寻优过程,其具有强大的寻优能力,在运算速度和寻优精度等方面都优于传统算法。

CS-SVR 预测算法步骤如下:

- (1) 确定样本数据以及其输入、输出;
- (2) 数据进行归一化处理并随机排列顺序;
- (3) 划分训练集、测试集,训练集带入支持向量机预测模型进行训练;
- (4) 布谷鸟算法初始化;
- (5) 定义问题的维度、发现概率、鸟巢的边界值;
- (6) 计算初代鸟巢,代入参数 C 与 γ 预测精度;
- (7) 保留上一代最优的鸟巢,并对鸟巢进行更新;
- (8) levy 飞行到新的位置;

(9) 将新鸟巢位置与上一代鸟巢比较替换,选择较优的位置,代入参数 C 与 γ 预测精度;

(10) 发现概率保留鸟巢位置;

(11) 判断是否满足准则,不满足返回(7),满足则保留参数 C 与 γ ;

(12) 用支持向量机回归预测模型预测测试集的预测值;

(13) 对比预测值与实际值,并求出误差。

3.2 CS-SVR 骨折缝应力预测

通过 DOE 法求解由 12 个压垫固定位置添加不同厚度压垫的固定力对应的骨折缝应力,由 12 个压垫固定位置上压垫厚度作为输入,由桡骨远端骨折缝最大应力作为输出,通过骨折缝应力数据集来实现支持向量机的预测模型训练和测试过程。对 C1_1、C2_1、C3_1 型骨折的分析模型均进行上述操作,实现模型建立过程。通过 DOE 方法共生成 460 个样本数据,随机抽取 400 个为训练集,剩余 60 个为测试集,用来验证模型预测精度。其中,CS-SVR 预测模型的预测结果对比如图 6 所示。

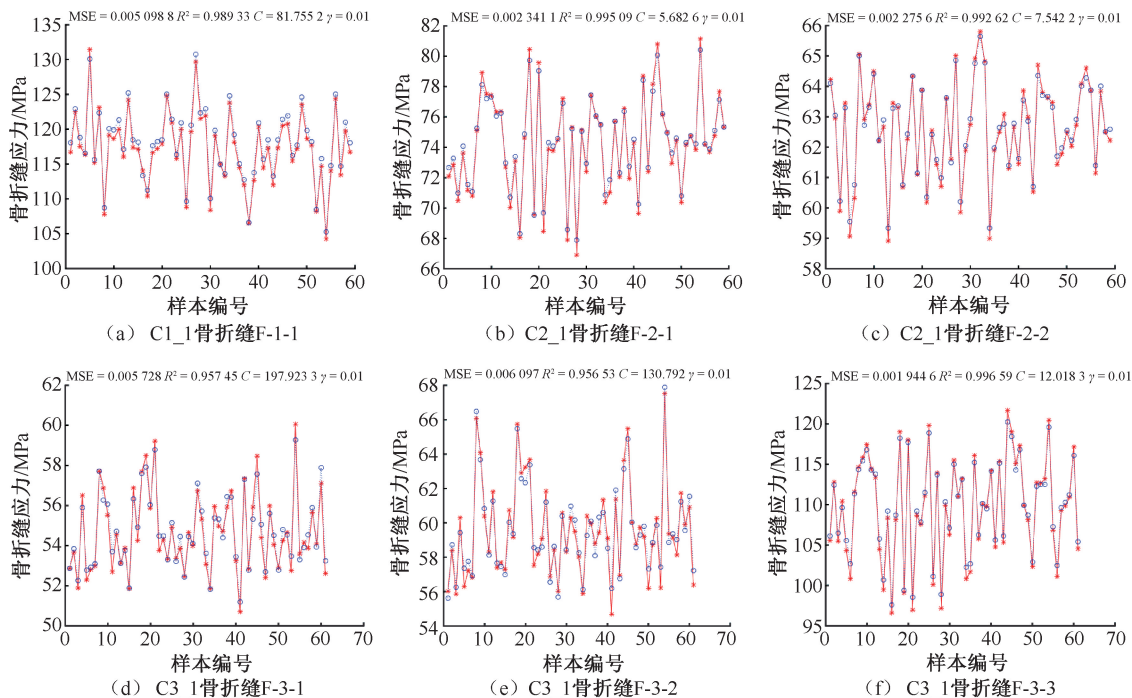


图 6 不同骨折类型骨折缝应力预测结果对比

Fig. 6 Comparison of fracture suture stress prediction results for different fracture types (a) Seam F-1-1 of fracture C1_1, (b) Seam F-2-1 of fracture C2_1 (c) Seam F-2-2 of fracture C2_1, (d) Seam F-3-1 of fracture C3_1, (e) Seam F-3-2 of fracture C3_1, (f) Seam F-3-3 of fracture C3_1

注: MSE 为均方误差, R^2 为决定系数。

通过上述方法建立模型,通过枚举的方式抽取样本代入模型,获得实现数据寻找数据最优值(即骨折

缝的最大应力)。表1所示为抽取样本中骨折缝处最大应力以及对应的外侧压垫厚度和施加载荷。

表1 骨折缝最大应力预测值

Tab. 1 Predicted maximum stress of fracture suture

骨折缝	参数	B1	B2	B3	B4	R1	R2	Z1	Z2	Z3	Z4	C1	C2	骨折缝应力/kPa
C1_1/	载荷/N	14.5	16.2	15.3	15.6	14.5	18.2	17.8	16.2	18.1	17.8	17.5	16.2	132.91
F-1-1	厚度/mm	5	6.5	5.5	6	5	9.5	8.5	6.5	9	8.5	8	6.5	
C2_1/	载荷/N	15.3	18.2	15.6	14.5	14.5	17.8	18.1	17.8	17.8	18.2	16.6	17.8	83.75
F-2-1	厚度/mm	5.5	9.5	6	5	5	8.5	9	8.5	8.5	9.5	7	8.5	
C2_1/	载荷/N	16.6	18.1	18.1	16.6	16.2	18.2	17.8	17.8	18.2	17.2	17.8	16.6	66.58
F-2-2	厚度/mm	7	9	9	7	6.5	9.5	8.5	8.5	9.5	7.5	8.5	7	
C3_1/	载荷/N	18.1	17.5	18.2	18.2	18.2	14.5	16.6	16.2	15.3	15.3	18.1	17.2	61.08
F-3-1	厚度/mm	9	8	9.5	9.5	9.5	5	7	6.5	5.5	5.5	9	7.5	
C3_1/	载荷/N	17.5	14.5	14.5	16.2	17.2	17.5	16.6	18.1	17.8	18.2	17.2	16.2	68.59
F-3-2	厚度/mm	8	5	5	6.5	7.5	8	7	9	8.5	9.5	7.5	6.5	
C3_1/	载荷/N	15.3	18.2	15.6	14.5	14.5	17.8	18.1	17.8	17.8	18.2	16.6	17.8	127.25
F-3-3	厚度/mm	5.5	9.5	6	5	5	8.5	9	8.5	8.5	9.5	7	8.5	

骨科医师根据各个骨折缝在夹板固定过程的影响程度划分权重,将C2_1型骨折中骨折缝F-2-1、F-2-2权重分别定为0.6、0.4。将C3_1型骨

折中骨折缝F-3-1、F-3-2、F-3-3权重分别定为0.5、0.2、0.3。经过分配权重C1_1、C2_1、C3_1型骨折缝应力最优预测值见表2。

表2 加权骨折缝应力最优预测值

Tab. 2 Optimal prediction values of weighted fracture seam stress

骨折类型	参数	B1	B2	B3	B4	R1	R2	Z1	Z2	Z3	Z4	C1	C2	骨折缝应力/kPa
C1_1	载荷/N	14.5	16.2	15.3	15.6	14.5	18.2	17.8	16.2	18.1	17.8	17.5	16.2	F-1-1;132.91
	厚度/mm	5	6.5	5.5	6	5	9.5	8.5	6.5	9	8.5	8	6.5	
C2_1	载荷/N	15.3	18.2	15.6	14.5	14.5	17.8	18.1	17.8	17.8	18.2	16.6	17.8	F-2-1;83.75
	厚度/mm	5.5	9.5	6	5	5	8.5	9	8.5	8.5	9.5	7	8.5	F-2-2;65.19
C3_1	载荷/N	17.5	14.5	14.5	16.2	17.2	17.5	16.6	18.1	17.8	18.2	17.2	16.2	F-3-1;60.77
	厚度/mm	8	5	5	6.5	7.5	7.5	7	9	8.5	9.5	7.5	6.5	F-3-2;68.592 F-3-3;126.38

3.3 骨折缝应力预测结果分析

通过力学分析,试验设计法,CS-SVR预测模型预测生成不同厚度压垫下骨折缝的应力。压垫在夹板固定过程中有防止或矫正残余移位的固定力作用,通过建立数学模型可以实现压垫对骨折缝应力大小预测,为桡骨远端骨折闭合复位外固定治疗提供依据。结果显示,模型能够实现对桡骨骨折缝应力的预测(见图6)。通过枚举方式生成样本代入预测模型中,其中骨折缝F-1-1、F-2-1、F-2-2、F-3-1、

F-3-2、F-3-3最大应力预测值分别为132.91、83.75、66.58、61.08、68.59、127.25 kPa,加权重后骨折缝F-1-1、F-2-1、F-2-2、F-3-1、F-3-2、F-3-3应力最优预测值分别为132.91、83.75、65.19、60.77、68.592、126.38(见表1、2)。

将测试集用CS-SVR预测算法得出预测结果与仿真值进行对比。结果显示,各类骨折预测模型的均方误差(mean square error, MSE)均小于0.007, $R^2 = 99.659\% \sim 95.653\%$ (见表3)。

表3 布谷鸟-支持向量机预测模型主要参数

Tab.3 Main parameters of cuckoo-support vector machine prediction model

骨折类型	骨折缝	MSE	R^2	C	γ
C1_1	F-1-1	$4.550\ 0 \times 10^{-3}$	0.982 9	153.40	0.043 6
	F-2-1	$2.341\ 1 \times 10^{-3}$	0.995 1	5.68	0.010 0
C2_1	F-2-2	$2.275\ 6 \times 10^{-3}$	0.992 6	7.54	0.010 0
	F-3-1	$5.728\ 0 \times 10^{-3}$	0.957 5	197.92	0.010 0
C3_1	F-3-2	$6.097\ 0 \times 10^{-3}$	0.956 5	130.79	0.010 0
	F-3-3	$1.944\ 6 \times 10^{-3}$	0.996 6	12.02	0.010 0

4 结论

本文以 C1-1、C2-1、C3-1 型桡骨远端骨折为研究对象,通过力学分析、试验设计法、CS-SVR 方法实现腕部不同位置不同厚度压垫对骨折缝应力影响的关系,并建立骨折缝应力预测模型。结果表明,桡骨远端夹板下压力随压垫厚度增加而增大。利用 Mimics、Geometric、UG 进行建模,将前臂模型根据需求、医学经验进行曲面划分,划分 12 个压垫固定位置。通过模拟压垫在 5 mm 对前臂的作用下实现的桡骨远端骨折固定情况。以压垫厚度为输入参数,以骨折缝应力为输出参数,随机生成大量样本。通过 CS-SVR 算法可以实现不同位置、不同厚度压垫对骨折缝应力的预测。医师通过预测的骨折缝应力调整压垫厚度进而实现桡骨远端骨折科学有效的固定,设计了压垫厚度关于骨折缝应力的 CS-SVR 预测模型。本文对桡骨远端骨折夹板固定中压垫的固定作用进行研究,有利于传统固定夹板与现代科学技术相结合,为临床骨折治疗桡骨远端骨折时固定器的选择和外固定器械设计提供参考。

本文主要研究桡骨远端骨折缝应力预测工作,在将来工作中,将骨折缝应力预测方法与外固定器械设计相结合,实现科学的桡骨远端骨折外固定。

参考文献:

[1] 孙汉娇. 数字化设计夹板和弹力扎带治疗 Colles 骨折的有限元分析和临床研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2017.

[2] YAN W, DING M, KONG B, et al. Lightweight splint design for individualized treatment of distal radius fracture [J]. *J Med Syst*, 2019, 43(8): 1-10.

[3] 张静, 萨日娜, 嘎拉台. 基于瞬态分析的桡骨远端骨折外固定支具结构优化设计[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(5): 952-959.

ZHANG J, SA RN, GA LT. Structure and optimal design of

external fixator for distal radius fracture based on transient analysis [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(5): 952-959.

[4] 姜昆, 陶宝琛, 魏成建. 小夹板治疗桡骨远端关节内骨折的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(3): 206-211.

JIANG K, TAO BC, WEI CJ. Finite element analysis on small splint for the treatment of intra-articular fracture of distal radius [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(3): 206-211.

[5] 王颖, 马剑雄, 柏豪豪, 等. 股骨颈骨折术后不同复位质量的力学特性分析[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 284-289.

WANG Y, MA JX, BAI HH, et al. Analysis on mechanical characteristics of femoral neck fracture with different reduction qualities [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2): 284-289.

[6] 魏成建, 陶宝琛, 张满臣, 等. 动力气囊压垫纠正桡骨远端 AOC3.1 型骨折残余侧方移位的三维有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(1): 13-17.

WEI CJ, TAO BC, ZHANG MC, et al. three-dimensional finite element analysis of residual angulation displacement after manual reduction of distal radius AO C3.1 fracture corrected by dynamic airbag pad [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(1): 13-17.

[7] 陈延荣, 孙长虹, 梁学振, 等. 健康成人前臂小夹板固定时压垫对腕关节局部压力的影响[J]. *中医正骨*, 2022, 34(10): 27-31.

[8] 刘金清. 3D 个性化压垫对维持 Colles 骨折手法复位后稳定性的疗效观察[D]. 昆明: 云南中医药大学, 2020.

[9] 黄彬斌. 小夹板治疗桡骨远端 C 型骨折有限元研究[J]. *中国当代医药*, 2019, 26(31): 4-7.

[10] 王志彬, 欧来良, 李林安, 等. 纸压垫的力学性能测试和优化分析[J]. *中国骨伤*, 2001, 14(4): 27-27.

[11] 朱晓飞, 郑军, 端磊. 改良小夹板固定技术与传统石膏固定治疗桡骨远端骨折的疗效比较[J]. *外科研究与新技术*, 2022, 11(3): 156-160.

[12] 杨克忠. 小夹板治疗桡骨远端骨折的临床疗效观察及生物力学研究[D]. 济南: 山东中医药大学, 2022.

[13] 庞可昌. 小夹板治疗桡骨远端骨折布带约束力及纸压垫厚度的生物力学研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2013.

[14] 刘德利, 王科奇, 闫海燕. 基于 Octopus 和 SVMs 的住区强排多目标优化设计研究[J]. *建筑节能*, 2022, 50(11): 21-27.

[15] SINGH S, BANSAL P, HOSEN M, et al. Forecasting annual natural gas consumption in USA: Application of machine learning techniques—ANN and SVM [J]. *Resour Policy*, 2023, 80: 103159.

[16] YANG MG, CONG BR, XIAO LL, et al. Adaptive online prediction method based on LS-SVR and its application in an electronic system [J]. *Front Inform Tech*, 2012, 13(12): 881-890.