

六轴外固定器在下肢畸形治疗中的发展与应用

https://doi.org/10.12307/2022.077

张兴东¹, 张永红², 王栋²

投稿日期: 2021-04-02

送审日期: 2021-04-08

采用日期: 2021-05-26

在线日期: 2021-07-15

中图分类号:

R459.9; R319; R605

文章编号:

2095-4344(2022)03-00468-06

文献标识码: A

文章快速阅读:

文章特点一

△六轴外固定器已在下肢畸形、骨不连及马蹄足等疾病治疗中取得较好的疗效,它可以在为患肢稳定固定的同时实现骨折及下肢畸形的精确复位。

适应证:

四肢畸形矫正、四肢长骨骨折、骨不连及骨缺损等。

常见六轴外固定器:

TSF、Ortho-SUV、TL-Hex。

优点:

(1) 矫正精度高;
(2) 矫正过程中无需改变构型;
(3) 带架时间降低。

缺点:

(1) 对使用者要求高、学习曲线复杂;
(2) 使用价格高昂;
(3) 受人为因素影响大。

改进方向:

(1) 自主研发,降低成本;
(2) 改进处方软件,降低人为因素影响;
(3) 实现矫正过程中的信息化与自动化。

文题释义:

张力-应力法则: 作用于活体组织的缓慢而持久的牵张力,使活体组织细胞受到刺激并被激活而出现再次生长。

六轴外固定器: 典型的六自由度Steward平台并联机构,由参考环(静平台)、矫正环(动平台)及六根连接杆组成。通过调节六根连接杆完成多平面畸形矫正。

摘要

背景: 由于下肢开放骨折所导致的骨髓炎、骨缺损及下肢畸形患者数量显著增加,使得Ilizarov环形外固定架的应用逐步增多。尽管Ilizarov环形外固定架治疗这类疾病取得较好的效果,但仍存在诸多缺陷。

目的: 文章就六轴外固定器在下肢畸形治疗中的发展与应用现状进行综述。

方法: 第一作者通过检索2001年2月至2021年2月为止PubMed、中国知网及万方数据库。英文检索词: “hexapod external frame, taylor spatial frame, ortho-SUV, truelok-Hex”, 中文检索词: “六轴外固定、泰勒外固定支架、奥尔托夫架、taylor外固定支架”。最终纳入50篇文献,并以此对六轴外固定器在下肢畸形治疗中的发展与应用进行综述。

结果与结论: ①应用环形外固定架治疗不宜使用内固定的下肢开放骨折和肢体畸形等疾病取得较好的效果,并可通过张力-应力法则牵拉骨及软组织再生,使许多传统骨科技术无法治疗的疾病得到治愈。②Ilizarov环形外固定架存在治疗周期长、操作复杂及对医师经验要求高等缺陷。③六轴外固定器主要特点为通过六根可调节连接杆,形成虚拟铰链,以实现多维度畸形同时矫正,且在治疗过程中无需更换铰链;在计算机软件辅助下,矫正精度显著提高,畸形残留率大幅降低;④六轴外固定器已广泛应用于下肢骨不连、骨缺损、马蹄足及关节畸形等疾病的治疗,且同Ilizarov环形外固定架相比术后并发症发生率明显降低。⑤六轴外固定器存在稳定性较差、人为因素影响较大、学习曲线复杂及价格高昂等缺陷,使其无法进一步推广使用。⑥今后需进一步改进处方软件,降低人为因素影响,逐步实现六轴外固定器的智能化与信息化,同时还需实现自主研发,降低使用成本,使其可以广泛地推广使用。

关键词: 下肢畸形; 六轴外固定器; 环形外固定架; 泰勒式架; 奥尔托夫架; 骨折固定; 畸形矫正; Ilizarov技术

Development and application of hexapod external fixator in the treatment of lower limb deformity

Zhang Xingdong¹, Zhang Yonghong², Wang Dong²

¹Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China; ²Department of Orthopedics, Second Hospital, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China

Zhang Xingdong, Master candidate, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China

Corresponding author: Zhang Yonghong, MD, Chief physician, Department of Orthopedics, Second Hospital, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China

Abstract

BACKGROUND: The number of patients with osteomyelitis, bone defects, and lower extremity deformities due to open fractures of the lower limb has increased significantly, leading to an increasing use of Ilizarov circular external fixators. Although the Ilizarov circular external fixator has achieved good results in the treatment of these conditions, there are still many defects.

OBJECTIVE: To summarize the progress of the development and application of hexapod external fixator in the treatment of lower limb deformity.

METHODS: Articles from PubMed, CNKI and Wanfang database from February 2001 to February 2021 were retrieved with the key words of “hexapod external frame, taylor spatial frame, ortho-SUV, truelok-Hex” in both English and Chinese. Fifty articles were included, and the application progress of the hexapod external fixator in the treatment of lower limb deformity was reviewed.

¹山西医科大学, 山西省太原市 030001; ²山西医科大学第二医院骨科, 山西省太原市 030001

第一作者: 张兴东, 男, 1993年生, 山西省忻州市人, 汉族, 山西医科大学在读硕士, 主要从事外固定与肢体矫形方面的研究。

通讯作者: 张永红, 博士, 主任医师, 国际肢体延长与重建协会及Ilizarov技术应用研究协会中国副秘书长, 中国骨搬移糖尿病足学组组长, 山西医科大学第二医院骨科, 山西省太原市 030001

https://orcid.org/0000-0002-9912-9407 (张兴东)

基金资助: 山西省社会发展基金(201803D31126), 项目负责人: 张永红

引用本文: 张兴东, 张永红, 王栋. 六轴外固定器在下肢畸形治疗中的发展与应用 [J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(3):468-473.



RESULTS AND CONCLUSION: (1) The application of circular external fixator in the treatment of extremities fracture and limb deformity that are not suitable for internal fixation has achieved positive results, and can be used to pull bone and regenerate soft tissue following the tension-stress rule, curing various diseases that cannot be treated by traditional orthopedic technology. (2) The Ilizarov circular fixator suffers from defects such as long treatment cycle, complex operation and high requirement on physician experience. (3) The main feature of the hexapod external fixator is that it forms a virtual hinge through six adjustable telescopic struts to realize multi-plane deformities and correct simultaneously, and there is no need to replace the hinge during the treatment. With the help of computer software, the accuracy of correction is improved significantly, and the residual rate of malformation is reduced significantly. (4) The hexapod external fixator has been widely used in the treatment of lower limb non-union, bone defect, clubfoot, joint deformity and other diseases, and can significantly reduce the incidence of postoperative complications compared with the Ilizarov circular external fixator. (5) The shortcomings of the hexapod external fixator, such as poor stability, misuses, difficult learning process and high price, make it unable to be further popularized. (6) In the future, it is necessary to improve the prescription software, reduce the influence of human factors, gradually realize intellectualize and informationize hexapod external fixator. Also, it is critical to achieve independent research and development and reduce the cost of use so as to make hexapod external fixator being widely used.

Key words: lower limb deformities; hexapod external frame; Ilizarov circular frame; Taylor spatial frame; Ortho-SUV; fracture fixator; deformity correction; Ilizarov method

Funding: Shanxi Provincial Social Development Fund, No. 201803D31126 (to ZYH)

How to cite this article: ZHANG XD, ZHANG YH, WANG D. Development and application of hexapod external fixator in the treatment of lower limb deformity. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu.* 2022;26(3):468-473.

0 引言 Introduction

当今社会迅速发展，由交通、工业生产事故等导致的高能量损伤发病率迅速升高，这使得伴有严重软组织损伤的长骨骨折患者数量显著增加，骨髓炎及骨缺损的发病率也随之升高^[1]。许多此类患者无法使用内固定只能应用外固定架进行治疗，但是普通外固定架术后无法进行畸形矫正^[1-2]。此外，中国还存在数量众多的各种类型肢体畸形患者，这些肢体畸形中许多患者无法使用内固定或普通外固定架进行治疗，使得 Ilizarov 环形外固定架的应用逐渐增多。由于患者对治疗的效果、便捷性方面的需求增加，Ilizarov 环形外固定架已无法满足相应的需求。由于 Ilizarov 环形外固定架具有较长的学习曲线，对使用者的经验、技术要求较高^[3]，限制了此类外固定架的应用。

随着科技进步，基于计算机导航技术而研发的六轴外固定器逐步进入临床。它延续了环形外固定架的优点，并针对 Ilizarov 环形外固定架的缺陷进行了诸多改进并取得了较好的治疗效果，但由于使用要求较高、价格高昂等原因，现阶段六轴外固定器在中国并未得到推广使用。

目前中国与六轴外固定器相关的文献数量较少，且多为单一型号外固定器的临床研究。因此文章将近年来国内外关于六轴外固定器在下肢畸形治疗中的发展情况及使用特点进行综述，为六轴外固定器的在中国的推广应用、改进及研发提供参考及帮助。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源

- 1.1.1 检索人及检索时间 第一作者在 2021 年 2 月进行检索。
- 1.1.2 检索文献时限 2001 年 2 月至 2021 年 2 月。
- 1.1.3 检索数据库 PubMed、中国知网 (CNKI) 和万方数据库。
- 1.1.4 检索词 英文检索词包括：“Taylor Spatial Frame, Ortho-SUV, Truelok-Hex, hexapod external frame, hexapod external fixator”；中文检索词包括：“六轴”和“外固定”“泰勒”和“外固定”“奥尔托夫”和“外固定”。
- 1.1.5 检索文献类型 研究原著、综述、述评、经验交流、病例报告和荟萃分析。
- 1.1.6 手工检索情况 无。
- 1.1.7 检索策略 详见图 1。

#1 六轴	#7 #1 AND #4 in 主题
#2 泰勒	#8 #2 AND #4 in 主题
#3 奥尔托夫	#9 #3 AND #4 in 主题
#4 外固定	#10 #4 AND #5 in 主题
#5 Taylor	#11 #4 AND #6 in 主题
#6 Ortho-SUV	

图 1 | 中国知网数据库检索策略

1.1.8 检索文献量 总计检索文献 451 篇，其中英文 361 篇，中文 90 篇。

1.2 入选标准

1.2.1 纳入标准 文章中描述六轴外固定器优势、特点以及疗效相关的研究原著、综述、病例报道和荟萃分析等文献。

1.2.2 排除标准 ①与课题内容不一致的文章；②内容陈旧、结论重复的文章。

1.3 质量评估和数据提取 通过检索词，计算机共检索到 451 篇文献，其中英文文献 361 篇，中文文献 90 篇，依据纳入及排除标准，通过阅读文献标题及摘要进行初步筛查，除外与文章无关文献；通过阅读全文，排除内容重复的文献。最终共纳入 50 篇文献进行归纳综述^[1-50]，其中中文 11 篇，英文 39 篇。文献检索流程见图 2。

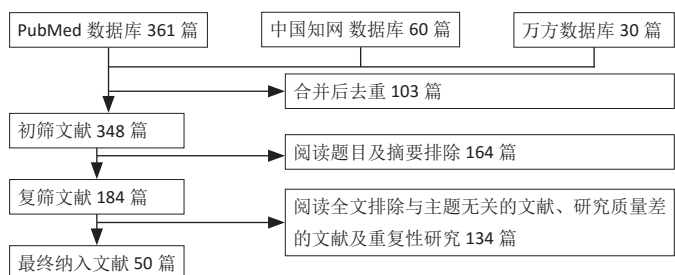


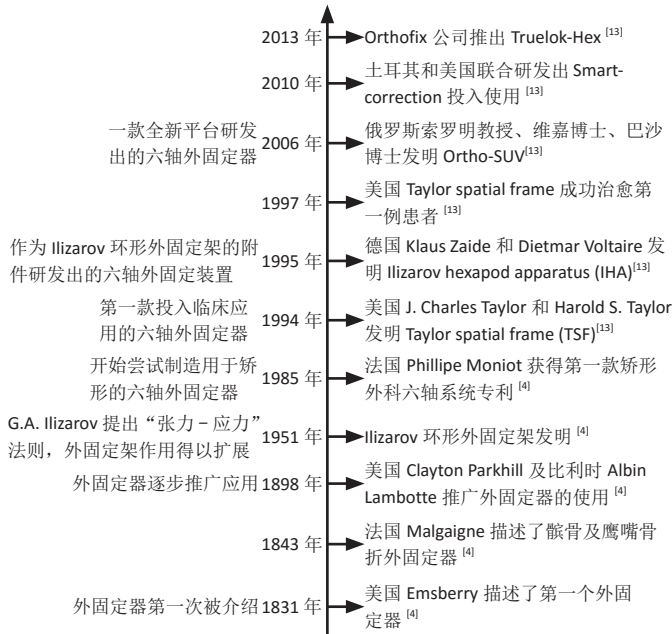
图 2 | 文献检索流程图

2 结果 Results

2.1 环形外固定器的起源及应用

2.1.1 环形外固定器的起源 骨外固定技术最早出现于 19 世纪中叶，是治疗骨折的 3 大固定技术之一。1831 年美国人 Emsberry 向人们描述了第一个外固定器。1843 年法国医生 Malgaigne 介绍了一种治疗髌骨及鹰嘴骨折的外固定器，该器械形似钳夹，被称为 Malgaigne 外固定器。随后美国外科医生 Clayton Parkhill 和比利时外科医生 Albin Lambotte 在当时推广应用了外固定器。20 世纪 50 年代，随着苏联 G.A. Ilizarov 教授提出张力-应力法则及 Ilizarov 环形外固定架的发明，外固定架的应用与发展进入了一个新的阶段^[4]，见图 3。

2.1.2 环形外固定器的适应证 目前环形外固定器主要适应证：①各种类型的骨折，特别是伴有较为严重软组织损伤或治疗较晚的开放性骨折、需维持肢体长度的骨折、局部严重烧伤的骨折以及不稳定的骨盆骨折等^[4]；②各种骨折不愈合、畸形愈合和骨不连；③矫形外科疾病，如骨缺损、感染性骨科疾病和先天性胫骨假关节、胫骨和腓骨缺损等；④关节疾病，如严重膝关节屈曲挛缩畸形和僵硬型马蹄足畸形等。



图注: TSF 为泰勒式架; Ortho-SUV 为奥尔托夫架; IHA 为 Ilizarov 六轴装置

图 3 | 六轴外固定器发展记时线图

2.1.3 环形外固定器的特点 早期外固定架的功能及结构较为单一, 一般用于临时的骨折固定, 在此之后还需行内固定^[4]。伴随张力-应力法则的发现, 外固定架的功能与应用得到了极大的发展。而今外固定架已不只是单纯地固定骨折, 还可以让骨、血管、神经和皮肤等组织再生, 使以前无法治疗的肢体畸形、骨缺损、慢性骨髓炎等疾病得到很好的救治, 使人类的诊疗技术得到了拓展。因环形外固定架通过动态调整实现了牵拉骨再生/牵拉组织再生, 有文章说环形外固定架是“活”的外固定架。这类外固定架主要的优点如下: ①微创治疗, 闭合穿针, 对软组织及血供影响较小^[5]; ②牵拉治疗过程中实现血管、神经和肌肉等软组织及骨组织再生, 软化瘢痕皮肤^[6-7]; ③应用环形外固定架治疗开放性骨折极少发生感染^[8], 这与内固定治疗形成鲜明对比; 同时环形外固定架也可以用于治疗因内固定导致的感染; ④环形外固定架稳定性好, 术后患肢即可负(持)重, 同时可给予患肢轴向应力, 利于骨痂的形成, 促进骨折愈合^[4, 9]; ⑤基于患者的疾病变化进程, 可个体化调整外固定架, 从而实现了各种疑难骨科疾病的治疗^[10-11]。虽然环形外固定架有以上优点, 但在使用过程中存在带架治疗周期长、患者复查频次较高等缺点, 尤其是在矫正多平面畸形时, 需要多次更换外固定器铰链^[12], 使得带架时间进一步延长。在矫正过程中需多次拍摄 X 射线平片容易造成额外的 X 射线暴露, 给患者增加经济负担。同时环形外固定架的构型、治疗方案的设计与调整均需要拥有丰富临床经验并熟练掌握环形外固定架的主治医师^[1], 因此使用门槛较高, 无法快速、广泛的普及。

2.2 六轴外固定器的发展与应用 由于环形外固定架在多平面畸形矫正中存在的缺陷, 以及计算机技术的进步, 在 20 世纪 90 年代中期后, 研究人员开发出多种基于计算机导航技术及 Stewart 和 Ceppel 平台的六轴外固定器。目前投入临床使用中的六轴外固定系统包括: Taylor spatial frame(美国)、Ilizarov 六轴装置(IHA, 德国)、Ortho-SUV(俄罗斯)、Smart-Correction(土耳其、美国)和 TrueLok-Hex(美国)等^[13]。这类外固定器在延续环形外固定架的优点基础上, 针对其存在的缺陷进行了改进, 并增加了处方软件的应用。这类外固定器的基本操作流程, 见图 4。

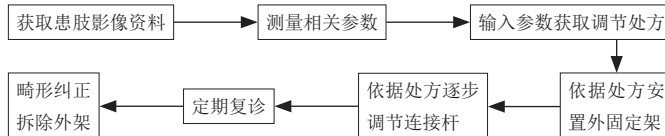


图 4 | 六轴外固定器基本操作流程

目前应用的六轴外固定器多由两个全环与六根长度可调节伸缩杆组成, 这种结构使得这类外固定器具有同时矫正多平面复杂畸形的能力, 在配套处方软件的辅助下可实现骨折的精确复位, 减少外固定架的带架时间^[4, 11, 13-14]。特别是在足踝部畸形矫正过程中, 由于足踝部解剖结构复杂, Ilizarov 环形外固定架在矫正过程中需根据矫正情况逐步换关节铰链, 造成治疗时间的延长, 而六轴外固定器则不需更换铰链, 可在安装后直接进行矫正^[15-16]。目前六轴外固定器已被证实四肢畸形矫正、四肢长骨骨折、骨不连及骨缺损等疾病治疗中具有良好的效果^[14-27], 特别是在下肢畸形的治疗中, 与 Ilizarov 环形外固定架相比, 六轴外固定器治疗成功率显著提高, 相关并发症的发生率及畸形残留率均显著降低^[3]。目前常见六轴外固定器特点, 见表 1。

表 1 | 常见六轴外固定器的特点总结

外固定架类型	研发国家	研发时间	特点	缺陷
TSF	美国	1994	(1) 六轴平台, 可同时校正多平面畸形 ^[2, 14, 31] ; (2) 处方软件辅助可实现精确复位 ^[31] ; (3) 并发症发生率降低 ^[31, 48]	(1) 对使用者要求较高; (2) 使用价格高昂 ^[4]
Ortho-SUV	俄罗斯	2006	(1) 可应用非标准环进行安装; (2) Z 形连接板可增加调节范围 ^[38] ; (3) 可串联安装多个框架同时矫正畸形 ^[15, 39]	框架体积较大, 患者肢体活动受限 ^[38]
TL-Hex	美国	2013	(1) 处方软件进行改进提升 ^[40] ; (2) 对安装要求较 TSF 降低 ^[42]	应用较少, 缺乏研究
QSF	中国	2014	处方软件数据基于 CT, 矫正精度提高 ^[50]	应用较少, 缺乏研究

表注: TSF 为泰勒式架; Ortho-SUV 为奥尔托夫架; QSF 为基于 CT 数据六轴外固定架

2.2.1 常见六轴外固定器的种类及特点

Taylor 空间支架的特点: Taylor 空间支架 (Taylor spatial frame, TSF; 以下简称泰勒式架) 是首个在临床中投入使用的六轴外固定器。它是由 J.Charles Taylor 和 Harold S.Taylor 于 1994 年在改良 Ilizarov 外固定系统基础上, 基于 Stewart 平台及 Chasles 理论, 研发出 Taylor 空间支架^[28]。在骨折患者的应用中, 泰勒式架可以做到闭合复位, 从而减少了对骨折周围软组织血运的破坏, 降低了骨折不愈合率^[5, 23]。由于泰勒式架对患处软组织的影响较小, 使得患肢筋膜室综合征的发生率得到降低^[21]。泰勒式架构型简单、易于操作和掌握, 在拍摄标准正侧位 X 射线片后输入相应参数即可由软件生成电子处方。医师只需根据电子处方调节外架即可完成相关疾病的治疗。泰勒式架的畸形矫正是通过调节六根连接杆, 使骨段围绕虚拟铰链进行移动而实现的^[29]。因此在矫正过程中, 泰勒式架仅需更换各种型号的延长杆, 不必过多使用铰链^[30]。在处方软件的辅助下, 其使骨折复位及多平面畸形矫正的准确性大幅提高^[31], 可以达到解剖复位^[21]。理论上讲, 其调节精度可达到 1/1 000 000 英寸和 1/10 000^[29], 但由于实际应用中无法达到如此的精确, 其实际矫正精度为 1° 和 1 mm^[32-33]。同环形外固定架相比, 泰勒式架的应用大幅减少了患者的带架时间及治疗时间, 从而降低了相应并发症的发生率以及治疗过程中患者 X 射线的暴露风险^[5]。

由该综述纳入相关研究及文献文章可以看出, 泰勒式架是目前中国外应用最广的六轴外固定器, 并在临床治疗中成功治愈了大量骨折、组织缺损、骨折不愈合、下肢畸形等疾病患者, 取得了较好的治疗效果, 详见表 2。

表 2 | 六轴外固定器治疗下肢畸形的文献归纳

研究作者	发表年份	国家	病例数	畸形来源	外固定架类型	矫正结果	临床意义
LIU 等 ^[41]	2021	中国	23	胫骨	TSF	23 例 (100%) 骨性愈合	TSF 可替代单边外固定治疗胫骨骨折
LIU 等 ^[14]	2021	中国	34	胫骨	TSF	34 例 (100%) 骨性愈合	TSF 是治疗胫骨干骨折的有效方法
LIU 等 ^[35]	2021	中国	25	胫骨	TSF	25 例 (100%) 骨性愈合	三维重建六轴外固定器可有效治疗复杂肢体畸形
DABASH 等 ^[31]	2020	美国	21	足部	TSF	26 例 (100%) 骨性愈合	TSF 可有效治疗马蹄足畸形, 且并发症少
FRIHAGEN 等 ^[34]	2020	挪威	31	胫骨	TSF	31 例 (100%) 骨性愈合; 3 例延迟愈合	TSF 对胫骨干骨折的疗效于髓内钉治疗相同
ROY 等 ^[41]	2020	法国	58	胫骨、股骨	TrueLok-Hex	58 例 (100%) 骨性愈合	TL-Hex 可有效治疗下肢畸形
吴刚等 ^[48]	2020	中国	23	足部	TSF	23 例 (100%) 骨性愈合	证实 TSF 在马蹄足畸形治疗中的优势, 且并发症少
姚恩洋等 ^[49]	2020	中国	20	胫骨	TSF	20 例 (100%) 骨性愈合	TSF 在骨性关节炎并膝内翻治疗具有优势
王学等 ^[50]	2020	中国	8	膝关节	QSF	8 例 (100%) 骨性愈合	验证 QSF 治疗膝关节畸形的有效性
RIGANTI 等 ^[18]	2019	意大利	47	胫骨	TrueLok-Hex	44 例 (93%) 骨性愈合	TrueLok-Hex 在下肢多轴畸形治疗疗效较好
曹海鲲等 ^[46]	2019	中国	21	胫骨	TSF	21 例 (100%) 骨性愈合	TSF 在开放胫骨骨折治疗中的优势
赵远航等 ^[47]	2019	中国	37	胫骨	TSF	37 例 (100%) 骨性愈合	TSF 在合并下肢畸形的胫腓骨骨折治疗中具有优势
MANGGALA 等 ^[28]	2018	泰国	14	足踝	TSF; IRF	13 例 (92.8%) 骨性愈合;	在足踝畸形治疗中 TSF 较 IRF 具有优势
ARVESEN 等 ^[3]	2017	美国	37	胫骨	TSF	35 例 (94%) 骨性愈合	TSF 可有效治疗胫骨不连及骨不连畸形
HORN 等 ^[19]	2017	挪威	128	胫骨 股骨	TSF	128 例 (100%) 骨性愈合;	验证 TSF 在儿童复杂下肢畸形中的疗效
王金国等 ^[39]	2017	中国	31	胫骨	Ortho-SUV	31 例 (100%) 骨性愈合	验证 Ortho-SUV 在胫骨骨折治疗中的优势
PESENTI 等 ^[40]	2017	法国	31	胫骨	TrueLok-Hex	31 例 (100%) 骨性愈合	第一项评估 TrueLok-Hex 在肢体畸形治疗中疗效的研究
FERREIRA 等 ^[24]	2015	南非	46	胫骨	TSF; TrueLok-Hex	45 例 (97.8%) 骨性愈合	验证六轴外固定器在胫骨不连治疗中的疗效
MENAKAYA 等 ^[22]	2014	英国	122	胫骨	TSF; IRF	122 例 (100%) 骨性愈合	验证了 TSF 在畸形矫正中的疗效
IOBST 等 ^[20]	2010	美国	21	胫骨	TSF	21 例 (100%) 骨性愈合	证实 TSF 在多平面畸形矫正能力由于 IRF
BLONDEL 等 ^[25]	2010	法国	11	胫骨	TSF	11 例 (100%) 骨性愈合	TSF 在胫骨骨折治疗中疗效较好

表注: TSF 为泰勒式架; Ortho-SUV 为奥尔托夫架; QSF 为基于 CT 数据六轴外固定架

LIU 等^[14]应用泰勒式架治疗 34 例高能量胫骨骨折患者均取得了获得了骨折愈合, 且对位满意。FRIHAGEN 等^[34]在治疗胫骨闭合骨折患者时发现泰勒式架的应用可显著避免胫骨畸形愈合, 术后膝关节疼痛等并发症发生率也较髓内钉治疗患者低; DABASH 等^[31]报道 24 例马蹄内翻足畸形患者通过应用泰勒式架, 在不需广泛剥离软组织情况下精确矫正畸形, 同时降低了潜在并发症的发生率。可见泰勒式架在下肢畸形治疗中疗效显著, 同传统治疗方案相比, 可以有效降低术中及术后并发症的发生率。但是在临床工作中, 它的广泛使用仍受到诸多的限制: 首先泰勒式架的手术操作精度要求较高, 其操作手册要求在使用时, 参考环必须与参考骨段保持垂直, 而在实际操作中, 由医师手动安装的外固定很难保证二者完全垂直。其次, 泰勒式架在应用标准外固定环时, 需精确测量所需的 13 项参数 (包括 6 项畸形参数、4 项安装参数和 3 项框架参数) 并严格按照操作要求进行安装才能达到较好的矫正效果^[35]。错误的测量结果、X 射线片拍摄不标准以及安装过程中未按照其操作标准进行安装都有可能影响矫正效果^[13, 33]。且因调节杆的安装结构特点, 泰勒式架在安装后稳定性较差, 容易造成患者术后患肢疼痛^[13]。另外, 泰勒式架价格高昂^[14], 其配套处方软件的使用需要联网计算机的支持, 在手术中使用亦有不便。

Ortho-SUV 的特点: 奥尔托夫架 (Ortho-SUV) 是索罗明教授、维嘉博士和巴沙博士于 2006 年在俄罗斯圣彼得堡伍列登医院, 以 Ilizarov 技术为基础研发出的管状骨环形数字化矫正外固定架^[36]。虽然其外型与泰勒式架相似, 但操作系统是独特的 Solomin-Utehin-Vilenskij(SUV) 系统^[13]。奥尔托夫架由 2 个固定环与 6 根连接杆组成, 其中每个固定环只与 3 个连接杆相连, 而另外 3 根连接杆则与相邻连接杆的侧面相连。这种结构为变铰点结构, 而不像泰勒式架或 TrueLok-Hex 六轴外固定系统将所有铰点均连接在固定环上^[37]。该型外固定器与其他六轴外固定器相比, 其连接杆可以与任何可用的环或拱相连, 包括 Ilizarov 环形外固定架、泰勒式架或其他类型外固定架所用到的环。而这种灵活的安装方式则是该型外固定器与其他外固定器相比所具有的最大的优势^[15]。另外调节杆和外架相连的连接片长度不受限制, 可以定制为直板或 Z 形板, 所以可在较窄的框架内提供

更大的调节间隙, 增加了畸形的矫正范围, 避免经常更换延长杆^[38]。然而使用 Z 型板会占据较大的空间, 导致患者行走时外固定架易与对侧肢体发生碰撞, 造成行动不便^[38]。

与环形外固定架相比, 奥尔托夫架最大的优点在于不必针对每个旋转中心分别设计矫正轴, 或进行多次不同调节以纠正每个畸形, 仅需单一设计框架的串联, 即可完成多处畸形矫正的目的, 或可以使用 2 个或多个框架同时进行矫正而互不影响^[15, 39]。另外临床上观察到该型外固定架稳定性较泰勒式架好, 其在使用过程中 X 射线片的拍摄要求较低, 可以不是标准的正侧位片。配套软件内置错误检查机制, 以防止由于使用者输入错误的数据而生成错误的电子处方造成治疗失败。在软件应用方面, 其配套软件可直接离线使用^[15]。目前奥尔托夫架已经在长骨矫正、膝关节挛缩、足踝畸形矫正中取得了较好的治疗效果^[15]。但在现阶段可检索到有关文献资料相对较少, 在中国应用范围也较小。

其他六轴外固定器的特点: 除上述常见的 2 类六轴外固定器外, 目前投入使用的六轴外固定系统还有: 德国 Ilizarov 六轴装置 (即 IHA), 它是由德国骨科医师在 1995 年以环形外固定架为基础研发而成。该型外固定架矫正环间通过六根调节杆相连, 它同泰勒式架相比其优势在于使用球形接头连接调节杆与外固定环, 使得其初始稳定性大幅提高; 在安装过程中可根据情况选择任一安装位置, 无需像泰勒式架必须安装于连接环的固定位置^[13]。但由于该型外固定架未得到广泛使用, 仅在德国、以色列及巴西有应用。由于相关文献资料较少, 故不对其优缺点进行过多评价。

在 2012 年, 由 Orthofix 公司推出了 TrueLok-Hex 六轴外固定系统, 它由 2 个圆环或半环组成, 六根独立的支撑杆连接, 可实现三维度畸形同时矫正。该系统由在线软件即时生成矫正计划, 并可根据患者情况在术后及时进行调整。与泰勒式架相比, 两者的主要区别就在于用以通过 X 射线确定肢体延长和分析畸形矫正参数的软件^[40]。当患者病情出现变化时, 该软件可在不需要外科医师改变外固定器组件的情况下, 对患者的矫正计划进行调整^[41]。TrueLok-Hex 六轴外固定系统在使用过程中允许外科医师采用非垂直于参考骨段的方式进行安装, 并据此生成矫正计划^[42]。文章检索到的文献资料显示, TrueLok-Hex 六轴外固定

系统已在下肢骨折、复杂下肢畸形、骨不连及夏科氏足等治疗过程中取得了较好的治疗效果^[18, 41-42]。有研究报道在阶段性治疗复杂夏科氏足部畸形过程中，通过 TrueLok-Hex 六轴外固定器可以安全、准确进行矫正，降低对血管及周围软组织的损伤，并为下一阶段治疗奠定基础^[17]。还有研究报道在 47 例复杂下肢畸形合并双下肢长度不均等的患者治疗中，该型六轴外固定器可以很好地矫正下肢畸形，完全矫正率达到 90% 以上^[18]。但目前该型外固定器未引入中国，缺乏相关数据。由于 Smart-Correction 目前未推广使用，缺乏相关临床研究资料，故文章不作赘述。

2.2.2 六轴外固定器的缺陷 尽管目前所使用的六轴外固定系统在继承 Ilizarov 环形外固定架的优点基础之上，针对环形外固定架的不足之处做出了许多的改进与提升，但除外固定架应用中常见的并发症外，仍旧存在着一些不足与缺陷：

- ① 泰勒架在使用时，要求其参考环必须与其参考骨段保持垂直，而在实际操作中，由医师手动安装的外固定器可能存在一定的安装误差，对后续的治疗效果造成一定影响。
- ② 各型六轴骨外固定器均需在精确测量各项参数的情况下才能达到较好的矫正效果^[43]。由医师自行测量的相关数据本身可能存在一定的误差，而这样的误差，以及由于 X 射线片拍摄不标准导致的测量误差都有可能畸形矫正失败或二次矫正^[14, 35, 44-45]，增加患者带架时间^[33]。
- ③ 因调节杆的安装结构特点，部分外固定器在安装后稳定性较差。
- ④ 尽管外固定装置可以由软件生成电子处方，但其矫正畸形的过程中仍需依靠患者自行调节，患肢变化情况仍需要经验丰富的主治医师进行评估，这均使得人为因素对治疗效果有着较大的影响。
- ⑤ 在矫正过程中，由于外固定架结构较为复杂，导致 X 射线及 CT 检查均无法对患肢进行准确的评估^[45]。
- ⑥ 在畸形矫正过程中，患者仍需要频繁前往医院复诊，主治医师也无法及时获取患者的外固定架调整过程中的相关信息，并对相关调节误差做出及时纠正。

尽管六轴骨外固定器的应用较 Ilizarov 环形外固定架简便，但其学习曲线仍较复杂^[14]，对主治医师的临床经验仍然有着较高的要求。目前，中国应用较多的六轴骨外固定器主要为进口泰勒式架和中国授权仿制品，这 2 款外固定器与环形外固定架相比，其使用价格高昂，其配套处方软件的在线使用也使其在术中的应用受到一定限制。

3 总结与展望 Summary and prospects

目前六轴外固定器在下肢畸形治疗中取得显著的疗效。纳入的文献对六轴外固定器的结构特点、使用方法、适应证以及治疗效果进行了充分研究及分析，但对于六轴外固定器存在的不足以及缺陷各项研究中仅简单描述，未进行相应分析。因此文章在对六轴外固定器的特点及优势进行总结的同时，对其存在的缺陷及不足亦进行了描述。六轴外固定器在应用过程中存在一些无法避免的并发症，特别是针道感染。在文章纳入研究中有并发症描述的 18 项研究中，有针道感染报道的研究为 14 项，且在每项研究中，针道感染也是各类并发症中发生率最高的一项，见表 3。虽然部分研究仅将其视为治疗过程中出现的问题，而非并发症，且通过对针道进行规律消毒、护理和抗生素治疗可以很快治愈，但由于它会对患者的治疗进程及心理造成一定的影响。所以在外固定架应用的过程中如何进一步降低针道感染的发生率需要得到医师的重视。

在中国，投入使用的六轴外固定器主要为泰勒式架，奥尔托夫架虽有应用，但使用范围较小。目前六轴外固定器主要用于胫腓骨开放/闭合骨折、马蹄足及关节畸形等疾病的治疗^[46-49]，并取得了较好的治疗效果。但受制于繁琐的操作、复杂的学习曲线、高昂的价格以及技术专利等因素，这类外固定器在中国相关

疾病治疗中仍无法得到有效的推广应用。目前中国使用的六轴外固定器多为进口或授权生产，而中国具有自主知识产权的六轴外固定器研发仍处于起步阶段，王学等^[50]报道已将自主研发的基于 CT 数据的六轴骨外固定架应用于膝关节畸形患者的治疗，并治愈 8 例患者，畸形均无复发且术后肢体功能恢复良好。该型外固定架通过改进连接杆与处方软件，使得矫形精度、固定效果、操作简易度等方面较泰勒式架有所提升。但目前该型外固定架尚未推广应用，纳入病例数较少其治疗效果仍需进一步检验。

表 3 | 六轴外固定器治疗下肢畸形常见并发症及发病率

作者	发表年份	国家	病例数	畸形来源	外固定架类型	并发症及发病率
LIU 等 ^[14]	2021	中国	34	胫骨	TSF	针道感染 15 例 (44%) 延迟愈合 2 例 (6%) 骨不连 1 例 (3%) 关节僵硬 1 例 (3%)
LIU 等 ^[35]	2021	中国	25	胫骨	TSF	针道感染 12 例 (48%) 延迟愈合 1 例 (4%) 踝关节僵硬 1 例 (4%)
DABASH 等 ^[31]	2020	美国	21	足部	TSF	针道感染 2 例 (10%) 固定针断裂 1 例 (5%) 足底脓肿 1 例 (5%)
FRIHAGEN 等 ^[34]	2020	挪威	31	胫骨	TSF	浅表皮肤感染 22 例 (71%) 延迟愈合 3 例 (10%)
ROY 等 ^[41]	2020	法国	58	胫骨 35 例 股骨 23 例	TrueLok-Hex	40 例患者出现相关并发症 (69%)
姚恩洋等 ^[49]	2020	中国	20	胫骨	TSF	针道感染 2 例 (10%)
王学等 ^[50]	2020	中国	8	膝关节	QSF	无
RIGANTI 等 ^[18]	2019	意大利	47	胫骨 股骨	TrueLok-Hex	针道感染 25 (53%) 延迟愈合 2 例 (4%) 截骨端移位 2 例 (4%) 膝关节僵硬 1 例 (2%)
曹海鲲等 ^[46]	2019	中国	21	胫骨	TSF	针道感染 1 例 (5%) 下肢血栓 2 例 (10%)
吴刚等 ^[48]	2019	中国	23	足部	TSF	皮肤及伤口并发症 2 例 (9%)
MANGGALA 等 ^[28]	2018	泰国	14	足踝	TSF; IRF	针道感染 2 例 (14%) 延迟愈合 2 例 (14%) 创面裂开 2 例 (14%) 骨不连 5 例 (35.7%)
ARVESEN 等 ^[3]	2017	美国	37	胫骨	TSF	针道感染 128 例 (100%) 延迟愈合 9 例 (7%) 治疗中骨折 3 例 (2%) 其他并发症 7 例 (5%)
HORN 等 ^[19]	2017	挪威	128	胫骨 77 例 股骨 51 例	TSF	针道感染 16 例 (52%) 深部感染 1 例 (3%) 治疗中骨折 2 例 (7%)
PESENTI 等 ^[40]	2017	法国	31	胫骨	TrueLok-Hex	针道感染 9 例 (20%)
FERREIRA 等 ^[24]	2015	南非	46	胫骨	TSF; TrueLok-Hex	针道感染 4 例 (3%) 针道感染 17 例 (14%)
MENAKAYA 等 ^[22]	2014	英国	122	胫骨	TSF; IRF	针道感染 3 例 (14%) 膝关节挛缩 1 例 (5%) 膝关节半脱位 1 例 (5%)
IOBST 等 ^[20]	2010	美国	21	胫骨	TSF	针道感染 1 例 (9%)
BLONDEL 等 ^[25]	2010	法国	11	胫骨	TSF	针道感染 1 例 (9%)

表注：TSF 为泰勒式架；Ortho-SUV 为奥尔托夫架；QSF 为基于 CT 数据六轴外固定架

现阶段六轴外固定器的在下肢畸形的治疗中取得了很好的效果，但要进一步的推广使用，还需要针对不足及缺陷进行不断地改进。特别是随着信息时代的来临，六轴外固定器需要逐步的实现智能化与信息化，以简化其操作流程，降低使用要求，便于快速准确地投入使用。如在处方软件使用方面，通过软件对患者影像资料进行数据分析得出测量结果，生成电子处方，以降低因医师经验不足、测量误差等因素对疾病治疗的影响。目前有文章报道通过使用标定器及标定软件处理 X 射线片结果可以有效提升

安装参数测量精度^[33],减少测量误差,或通过应用计算机辅助三维重建与MIMICS软件模拟骨折复位^[35],以提升矫正精度。但这些方式对提高肢体畸形矫正的效果仍需进行进一步研究分析。其次,可以通过医学、工学等学科联合研究以实现外固定架矫治信息及时反馈与外固定架可控的自动调节,减少外固定架调节过程中不可控的人为误差,降低患者自身因素对治疗效果的影响。

在应用外固定架的过程中,给患者带来的疼痛、焦虑和抑郁等心理方面的问题也值得外科医师重视,因为在部分研究中发现由疾病以及外固定给患者带来的心理问题会对其预后及肢体功能恢复产生一定影响^[8]。当前六轴外固定器在四肢骨折及下肢畸形治疗中优势显著,但在中国使用仍受限,因此建议在肢体畸形矫形、创伤治疗、灾害抢救和战伤救援过程中可以增加六轴外固定器的应用,以达到使患者早期恢复肢体功能,减少治疗时间,降低医疗、社会经济成本的目的。同时不断积累使用经验,为六轴外固定器的推广应用,以及研发具有自主知识产权的六轴外固定器提供参考依据。

作者贡献: 张兴东负责文章设计、资料收集及数据分析。张兴东撰写论文。张永红和王栋负责审核。

经费支持: 该文章接受了“山西省社会发展基金(201803D31126)”的资助。所有作者声明,该经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突: 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程不存在利益冲突。

写作指南: 该研究遵循《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA声明)。

文章查重: 文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审: 文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发表宗旨。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

- LIU Y, LIU J, ZHANG X, et al. Correction outcomes of the postoperative malalignment salvaged by the temporary application of the hexapod external fixator in tibial diaphyseal fractures treated by monolateral external fixation. *Injury*. 2021. doi: 10.1016/j.injury.2021.01.018.
- DHAR S, BUTT M, MIR M, et al. Use of the Ilizarov apparatus to improve alignment in proximal humeral fractures treated initially by a unilateral external fixator. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2008;3(3):119-122.
- ARVESEN J, TRACY WATSON J, ISRAEL H. Effectiveness of treatment for distal tibial nonunions with associated complex deformities using a hexapod external fixator. *J Orthop Trauma*. 2017;31(2):e43-e48.
- KANI KK, PORRINO JA, CHEW FS. External fixators: looking beyond the hardware maze. *Skeletal Radiol*. 2020;49(3):359-374.
- TANG P, HU L, DU H, et al. Novel 3D hexapod computer-assisted orthopaedic surgery system for closed diaphyseal fracture reduction. *Int J Med Robot*. 2012;8(1):17-24.
- 扈克治, 甘干达, 任磊, 等. Ilizarov 技术治疗长管状骨骨髓缺损的研究进展 [J]. *创伤外科杂志*, 2021,23(1):74-77.
- BORZUNOV D, CHEVARDIN A. Ilizarov non-free bone plasty for extensive tibial defects. *Int Orthop*. 2013;37(4):709-714.
- DICKSON D, MOULDER E, HADLAND Y, et al. Grade 3 open tibial shaft fractures treated with a circular frame, functional outcome and systematic review of literature. *Injury*. 2015;46(4):751-758.
- HENDERSON D, RUSHBROOK J, et al. What Are the Biomechanical Properties of the Taylor Spatial Frame™? *Clin Orthop Relat Res*. 2017;475(5):1472-1482.
- 贺国宇, 张永红, 王栋. Ilizarov 技术治疗胫骨骨髓缺损的优势及改进策略 [J]. *中国组织工程研究*, 2020,24(24):3870-3876.
- GANADHIEPAN G, MIRAMINI S, HARWOOD PJ, et al. Bone fracture healing under Ilizarov fixator: influence of fixator configuration, fracture geometry, and loading. *Int J Numer Method Biomed Eng*. 2019;35(6):e3199.
- SIBBEL J, ABDULKARIM A, FISHER R, et al. Eccentric Taylor spatial frame placement for the correction of femoral fracture deformity: a novel technique. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2020;30(5):869-875.
- VILENSKY A, POZDEEV P, BUKHAREV V, et al. Orthopedic hexapods: History, present and prospects (Article). *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2015(1):61-69.
- LIU Y, LIU J, YUSHAN M, et al. Management of high-energy tibial shaft fractures using the hexapod circular external fixator. *BMC Surg*. 2021;21(1):95.
- TAKATA M, VILENSKY VA, TSUCHIYA H, et al. Foot deformity correction with hexapod external fixator, the Ortho-SUV Frame™. *J Foot Ankle Surg*. 2013;52(3):324-330.
- LIU Y, YUSHAN M, LIU Z, et al. Application of elliptic registration and three-dimensional reconstruction in the postoperative measurement of Taylor spatial frame parameters. *Injury*. 2020;51(12):2975-2980.
- WROTSLAVSKY P, KRIGER S, HAMMER-NAHMAN S, et al. Computer-assisted gradual correction of charcot foot deformities: an in-depth evaluation of stage one of a planned two-stage approach to charcot reconstruction. *J Foot Ankle Surg*. 2020;59(4):841-848.
- RIGANTI S, NASTO L, MANNINO S, et al. Correction of complex lower limb angular deformities with or without length discrepancy in children using the TL-HEX hexapod system: comparison of clinical and radiographical results. *J Pediatr Orthop B*. 2019;28(3):214-220.
- HORN J, STEEN H, HUHNSOCK S, et al. Limb lengthening and deformity correction of congenital and acquired deformities in children using the Taylor Spatial Frame. *Acta Orthop*. 2017;88(3):334-340.
- IOBST C. Limb lengthening combined with deformity correction in children with the Taylor Spatial Frame. *J Pediatr Orthop B*. 2010;19(6): 529-534.
- IOBST C. Hexapod external fixation of tibia fractures in children. *J Pediatr Orthop*. 2016;S24-S28.
- MENAKAYA C, RIGBY A, HADLAND Y, et al. Fracture healing following high energy tibial trauma: Ilizarov versus Taylor Spatial Frame. *Ann R Coll Surg Engl*. 2014;96(2):106-110.
- KESHET D, EIDELMAN M. Clinical utility of the Taylor spatial frame for limb deformities. *Orthop Res Rev*. 2017;9:51-61.
- FERREIRA N, MARAIS LC, ALDOUS C. Hexapod external fixator closed distraction in the management of stiff hypertrophic tibial nonunions. *Bone Joint J*. 2015;97-b(10):1417-1422.
- BLONDEL B, LAUNAY F, GLARD Y, et al. Hexapodal external fixation in the management of children tibial fractures. *J Pediatr Orthop B*. 2010;19(6):487-491.
- AHREND MD, RÜHLE M, SPRINGER F, et al. Distance from the magnification device contributes to differences in lower leg length measured in patients with TSF correction. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2021. doi: 10.1007/s00402-021-03831-1.
- CHAVOSHNEJAD P, AYATI M, ABBASSPOUR A, et al. Optimization of Taylor spatial frame half-pins diameter for bone deformity correction: application to femur. *Proc Inst Mech Eng H*. 2018;232:673-681.
- MANGGALA Y, ANGTHONG C, PRIMADHI A, et al. The deformity correction and fixator-assisted treatment using Ilizarov versus Taylor spatial frame in the foot and ankle. *Orthop Rev (Pavia)*. 2018;4(4):7337.
- GANTSOUDES G, FRAGOMEN A, ROZBRUCH S. Intraoperative measurement of mounting parameters for the Taylor Spatial Frame. *J Orthop Trauma*. 2010;24(4):258-262.
- 王亚洲, 徐佳, 康庆林. Taylor 空间支架的临床应用进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2014,22(19):1773-1777.
- DABASH S, POTTER E, CATLETT G, et al. Taylor spatial frame in treatment of equinus deformity. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2020;15(1):28-33.
- LIU Z, TANG G, GUO S, et al. Effects of Taylor Spatial Frame on tumors and tumor-like lesions with pathological fractures of lower extremities. *Pak J Med Sci*. 2018;34:440-445.
- GESSMANN J, FRIELER S, KÖNIGSHAUSEN M, et al. Accuracy of radiographic measurement techniques for the Taylor spatial frame mounting parameters. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(1):284.
- FRIHAGEN F, MADSEN JE, SUNDFELDT M, et al. Taylor spatial frame or reamed intramedullary nailing for closed fractures of the tibial shaft: a randomized controlled trial. *J Orthop Trauma*. 2020;34(11):612-619.
- LIU Y, LI H, LIU J, et al. Long bone fracture reduction and deformity correction using the hexapod external fixator with a new method: a feasible study and preliminary results. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(1):221.
- 刘长山. 俄罗斯骨科奥尔托夫 (Ortho-SUV) 技术在创伤骨科应用现状 [J]. *转化医学杂志*, 2013,2(6):366-366.
- 傅超, 范佳程, 王石刚, 等. Ortho-SUV 支架空间位姿建模与求解 [J]. *上海交通大学学报*, 2020,54(10):1007-1014.
- SKOMOROSHO PV, VILENSKY VA, HAMMOUDA AI, et al. Determination of the maximal corrective ability and optimal placement of the Ortho-SUV frame for femoral deformity with respect to the soft tissue envelope, a biomechanical modelling study. *Adv Orthop*. 2014;2014:268567.
- 王金国, 闫秀中, 韦庆申, 等. 计算机辅助 Ortho-SUV 外固定支架用于开放性胫腓骨骨折患者效果观察 [J]. *山东医药*, 2017,57(40):72-74.
- PESENTI S, IOBST C, LAUNAY F. Evaluation of the external fixator TrueLok Hexapod System for tibial deformity correction in children. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2017;103(5):761-764.
- ROY A, PESENTI S, CHALOPIN A, et al. Can the TrueLok Hexapod System™ be used to accurately correct lower limb deformity in children? *Orthop Traumatol Surg Res*. 2020;106(7):1361-1366.
- FERREIRA N, BIRKHOLTZ F. Radiographic analysis of hexapod external fixators: fundamental differences between the Taylor Spatial Frame and TrueLok-Hex. *J Med Eng Technol*. 2015;39(3):173-176.
- BAUMGARTNER H, GRÜNWALD L, AHREND MD. The application of the Taylor spatial frame for deformity correction at the lower extremity. *Z Orthop Unfall*. 2020;158(4):414-416.
- AHREND MD, FINGER F, GRÜNWALD L, et al. Improving the accuracy of patient positioning for long-leg radiographs using a Taylor Spatial Frame mounted rotation rod. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2021;141(1):55-61.
- AL-UZRI M, THAHIR A, ABDULKARIM A, et al. Improving radiographic imaging for circular frames: the Cambridge experience. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020;140(12):1965-1970.
- 曹海颀, 万春友, 姚辉, 等. 计算机辅助 Taylor 空间支架治疗开放性胫腓骨骨折 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2019,27(4):331-335.
- 赵远航, 万春友, 张涛, 等. Taylor 空间支架外固定治疗闭合性胫腓骨骨折合并膝内翻畸形 [J]. *中医正骨*, 2019,31(10):60-62.
- 吴刚, 陈建文, 郭悦, 等. 后足截骨结合泰勒空间外固定支架矫正严重马蹄足畸形临床研究 [J]. *足踝外科电子杂志*, 2020,7(1):1-5,38.
- 姚恩洋, 田野. 胫骨高位截骨联合 Taylor 外固定架治疗膝骨性关节炎并膝内翻的临床疗效 [J]. *中国医科大学学报*, 2020,49(7):597-600, 605.
- 王学, 乔锋, 刘曙光. 基于 CT 数据六轴数字化骨科外固定架在膝关节复杂畸形中的临床应用 [J]. *实用骨科杂志*, 2020,26(12):1118-1122.

(责任编辑: WJ, ZN, ZH)