



BIOMECHANICAL
INSIGHTS
INTO SAFE LANDING

牛文鑫 姚 杰 傅维杰 倪 明 著

安全着陆： 生物力学研究



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

安全着陆：生物力学研究

Biomechanical Insights into Safe Landing

牛文鑫 姚 杰 傅维杰 倪 明 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书系统介绍了作者近年来在着陆运动生物力学领域的研究成果,主要运用在体实验、离体实验、数字仿真和循证医学方法研究着陆动作中下肢,尤其是足踝和膝关节损伤的发生机理和保护机制,以及生物力学在常见着陆损伤的临床治疗和康复中的应用等。

本书可供生物医学工程、力学、临床医学、康复治疗学和体育科学等学科研究生阅读,也可供以上专业的研究人员和应用技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

安全着陆:生物力学研究 / 牛文鑫等著. —上海:同济大学出版社,2017.3

ISBN 978-7-5608-6764-9

I. ①安… II. ①牛… III. ①运动生物力学—研究
IV. ①G804.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 033996 号

同济大学学术专著(自然科学类)出版基金资助出版

安全着陆:生物力学研究

牛文鑫 姚 杰 傅维杰 倪 明 著

责任编辑 陈红梅 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 同济大学印刷厂
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 18
字 数 449 000
版 次 2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6764-9

定 价 78.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

力学和生命科学都是非常古老的学科,对认识、改造自然环境和人类自身都具有重要的意义。两者都具有鲜明的自身学科特征,但是,在生物力学中,两者走到一起,应用力学原理和方法对生物体的力学问题进行定量研究,一方面这是力学中最具活力的学科生长点,另一方面也为生命科学规律的定量化和数学化提供了良好的示范。人体着陆动作,是一个包含大量力学问题的生命体活动现象,对其科学的认知有助于发掘人体运动潜力,提升运动员表现,开发防护装备和完善训练计划,降低特殊职业者的损伤概率,以及针对着陆损伤设计理想的骨科内植物,制定科学的手术和康复方案等。

本书的初衷是对我们近年来的研究工作做一个小结,总结成果和经验,厘清思路并发现不足。对于着陆动作生物力学研究的涉足,起于2009年我在北京航空航天大学读博士期间,当时因参与一项空降兵防护的项目,从而在跳伞着陆方面开展了一系列实验研究。博士毕业后,我将该方向逐渐拓展到体育和医学领域,并得到国家自然科学基金和全国博士后科学基金等项目的支持。该领域的研究持续近8年,基本涵盖了我在博士研究生、博士后和助理教授阶段的研究历程。2017年1月,我在同济大学晋升为副教授,距离我从同济大学硕士毕业整整10年。从100周年校庆到110周年校庆,个人和团队都有了很大进步。这个时候,进行一次系统总结,对自己的研究历程、基金的资助、导师的支持、朋友的帮助、同行的认可和家庭的付出,都是一个交代。同时,也将部分合作者的相关研究工作纳入进来,使内容更加充实,结构更加完整。

本书共分8章。第1章为绪论,将该研究领域的内容和现状做一个简要介绍,给读者一个概念性认识。第2章介绍一系列实验研究,主要研究水平地面着陆时的下肢运动学、动力学和肌肉活动性,分析跳落高度、性别、踝关节防护、体侧偏利性、地面硬度等因素对下肢生物力学的影响。在第3章中,对斜坡着陆提出了一种替代实验模型,并对姿势稳定性问题进行了深入探讨。第4章将系统综述、荟萃分析和数学建模等数据分析方法应用于着陆生物力学。第5章通过模拟计算方法,深入研究着陆

冲击对人体肌肉和关节受力、组织的应力和应变影响,从组织层次上对损伤进行评价和预测。第6章集中讨论在体育中的着陆生物力学问题。在第7章中,应用有限元方法研究着陆冲击时膝关节的生物力学响应。第8章中,对着陆损伤常见的跟骨骨折进行了临床生物力学研究。

本书第1章至第5章由本人撰写。其中,第2章和第3章的研究内容由我和姚杰老师在北京航空航天大学生物与医学工程学院完成,我们的导师樊瑜波教授对研究工作进行了指导。第5章研究内容由我和黄伟志(Duo Wai-Chi Wong)博士在香港理工大学完成,我们的导师张明教授对研究工作进行了指导。第6章由上海体育学院运动科学学院傅维杰副教授撰写,研究内容受到了刘宇教授的指导。第7章由北京航空航天大学生物医学工程学院姚杰老师撰写,研究工作由我们共同完成,并受到导师樊瑜波教授的指导。第8章由倪明医生撰写,我本人也参与了部分指导工作。

同济大学生命科学与技术学院丁祖泉教授对全书的写作给予了关心。同时,感谢同济大学出版社和同济大学科学技术研究院的支持,使本书获得同济大学学术专著(自然科学类)出版基金的资助。出版社的编辑老师对书稿的编审给予了具体的指导。

由于作者水平有限,书中难免有不足或错误之处,恳请读者批评指正。

牛文鑫

同济大学医学院康复治疗学系

上海市养志康复医院(上海市阳光康复中心)

2017年2月14日

目 录

前言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 着陆动作概述	(1)
1.2 着陆生物力学的研究方法	(2)
1.2.1 流行病学调查	(2)
1.2.2 模型实验	(3)
1.2.3 在体测试	(3)
1.2.4 计算机模拟仿真	(4)
1.3 着陆生物力学的研究现状	(6)
1.3.1 跳伞着陆生物力学	(6)
1.3.2 临床医学中的着陆生物力学	(8)
1.3.3 体育运动中的着陆生物力学	(9)
1.4 本书的内容和结构	(10)
参考文献	(11)
第 2 章 水平面着陆的运动生物力学研究	(15)
2.1 双腿水平面着陆的动态姿势稳定性	(15)
2.1.1 地面反力与肌电图测量	(16)
2.1.2 数据处理与统计	(17)
2.1.3 不同高度着陆时的稳定时间	(19)
2.1.4 不同高度着陆时的肌电图	(21)
2.1.5 水平面着陆是稳定的动作	(23)
2.2 着陆生物力学的内在影响因素	(23)
2.2.1 研究背景	(23)
2.2.2 着陆动作实验	(26)
2.2.3 双侧下肢差异性	(28)
2.2.4 性别差异性	(33)
2.2.5 小结	(37)
2.3 着陆生物力学的外在影响因素	(38)

2.3.1 研究背景	(38)
2.3.2 半刚性护踝与弹性绷带	(42)
2.3.3 缓冲垫实验	(48)
2.3.4 小结	(51)
参考文献.....	(52)
第 3 章 斜坡着陆的替代模型实验.....	(56)
3.1 背景知识	(56)
3.1.1 倾斜平面着陆研究现状	(56)
3.1.2 斜面着陆与单足站立稳定性的关系	(57)
3.1.3 人体的平衡	(59)
3.1.4 人体姿势稳定性	(60)
3.1.5 小结	(66)
3.2 瞬态姿势稳定性的评价	(66)
3.2.1 实验设计	(66)
3.2.2 参数计算与分析	(68)
3.2.3 评价参数的比较	(71)
3.2.4 小结	(72)
3.3 站立于倾斜平面的瞬态姿势稳定性	(72)
3.3.1 研究背景	(73)
3.3.2 足底压力测量.....	(74)
3.3.3 踝关节内翻的影响	(75)
3.3.4 踝关节外翻的影响	(82)
3.3.5 对斜坡着陆的启示	(91)
参考文献.....	(92)
第 4 章 系统综述(评价)在着陆研究中的应用.....	(96)
4.1 基本概念与背景知识	(96)
4.1.1 概述	(96)
4.1.2 循证医学与流行病学	(98)
4.1.3 PRISMA 声明	(99)
4.1.4 研究案例	(105)
4.1.5 小结	(106)
4.2 系统综述(评价)与数学模型分析	(106)
4.2.1 系统综述(评价)	(107)
4.2.2 数学建模	(112)
4.2.3 影响因素分析	(114)

4.2.4 小结	(117)
4.3 关于踝关节防护的荟萃分析	(117)
4.3.1 研究背景	(117)
4.3.2 文献搜索和研究	(118)
4.3.3 统计学分析	(124)
4.3.4 对分析结果的解读	(127)
4.3.5 小结	(129)
参考文献	(130)
第5章 数值仿真技术在生物力学中的应用	(133)
5.1 逆向动力学分析	(133)
5.1.1 着陆动作中的肌肉作用	(133)
5.1.2 逆向动力学分析简介	(135)
5.1.3 AnyBody 软件	(136)
5.1.4 小结	(141)
5.2 着陆速度对下肢关节和肌肉力的影响	(142)
5.2.1 研究方法	(142)
5.2.2 下肢关节力	(143)
5.2.3 下肢肌肉力	(144)
5.2.4 小结	(148)
5.3 有限元技术在生物力学中的应用	(149)
5.3.1 肌骨生物力学有限元研究发展历程	(149)
5.3.2 骨生物力学研究中的几对矛盾	(151)
5.3.3 小结	(154)
5.4 足踝冲击损伤的有限元分析	(155)
5.4.1 模型的建立和验证	(155)
5.4.2 冲击速度的影响	(157)
5.4.3 讨论	(158)
5.4.4 小结	(159)
参考文献	(160)
第6章 体育运动中的着陆生物力学研究	(163)
6.1 不同着陆冲击模式的下肢生物力学研究	(163)
6.1.1 实验方法和仪器	(164)
6.1.2 着陆动作的运动学	(165)
6.1.3 着陆动作的冲击力	(168)
6.1.4 软组织振动	(169)

6.1.5	肌电图	(171)
6.1.6	小结	(173)
6.2	紧身装备对着陆冲击时下肢生物力学的影响	(173)
6.2.1	研究背景	(173)
6.2.2	实验测试	(176)
6.2.3	着陆运动学和动力学	(177)
6.2.4	软组织振动	(179)
6.2.5	肌电图特征	(182)
6.2.6	小结	(184)
6.3	运动鞋对人体着陆冲击和下肢软组织共振的影响	(184)
6.3.1	研究对象与测试方案	(185)
6.3.2	着陆冲击力特征	(187)
6.3.3	软组织振动	(190)
6.3.4	小结	(193)
6.4	高低帮篮球鞋对着陆时踝关节的稳定及肌肉功能的影响	(194)
6.4.1	受试者与仪器	(194)
6.4.2	着陆运动学	(196)
6.4.3	着陆地面反力	(197)
6.4.4	肌电图	(198)
6.4.5	小结	(201)
	参考文献	(201)
第7章	水平面着陆的膝关节生物力学研究	(204)
7.1	背景介绍	(204)
7.1.1	概述	(204)
7.1.2	膝关节生物力学	(205)
7.1.3	小结	(209)
7.2	膝关节的有限元建模和着陆模拟	(209)
7.2.1	概述	(209)
7.2.2	有限元建模	(211)
7.2.3	有限元分析	(217)
7.2.4	讨论与思考	(221)
7.2.5	小结	(222)
7.3	膝关节前交叉韧带重建的生物力学分析	(222)
7.3.1	研究背景	(223)
7.3.2	有限元建模	(226)
7.3.3	有限元分析	(228)

7.3.4 讨论与思考	(231)
7.3.5 小结	(234)
参考文献	(234)
第8章 跟骨骨折手术治疗的生物力学研究	(237)
8.1 跟骨骨折概论	(237)
8.1.1 跟骨骨折与着陆生物力学	(237)
8.1.2 跟骨着陆骨折的预防	(238)
8.1.3 跟骨骨折的临床诊治	(239)
8.1.4 小结	(246)
8.2 跟骨骨折内固定的离体力学实验研究	(246)
8.2.1 研究背景	(246)
8.2.2 离体实验设计	(248)
8.2.3 垂直刚度与跟骰关节压力	(249)
8.2.4 结果	(250)
8.2.5 不同内固定术的比较	(250)
8.2.6 小结	(252)
8.3 跟骨骨折手术治疗的有限元分析	(253)
8.3.1 有限元建模	(253)
8.3.2 有限元分析	(255)
8.3.3 生物力学评价	(258)
8.3.4 小结	(260)
8.4 跟骨骨折髓内固定的模拟分析	(260)
8.4.1 研究背景	(260)
8.4.2 有限元建模	(261)
8.4.3 有限元分析	(262)
8.4.4 生物力学比较	(264)
8.4.5 小结	(265)
参考文献	(266)
附录 彩图	(269)

第 1 章

绪 论

人生于天地之间,每天都会进行各种行为活动。人的日常行为、娱乐、学习和工作等行为活动通常是由身体各部分组成一系列运动,即动作组合而成。例如,吃饭,即眼、手、口各器官协调运动来完成的一个最基本的行为,如果再考虑食管、胃肠、血液,甚至神经调控系统、消化酶等的运动,则更为复杂。人体的某些行为可能存在危险性因素,或者某些正常的行为在病理条件下可能发生异常,对危险性因素的规避和正常行为的恢复都需要对这些行为有深入的了解。这些复杂的行为具有一定规律性,将其拆解为单纯的动作运动形式,可以方便对其进行科学研究,有利于对这些动作运动形式的了解和认识。

1.1 着陆动作概述

着陆,作为一种动作,可以定义为人或动物从较高位置落到较低位置的一种运动形式。广义来说,只要有足部离地的行为,肯定就会伴随着落地行为,都可以称其为着陆。因此,着陆动作是一种典型、常见而重要的运动形式。对于一般性的行走和奔跑,其着陆阶段通常作为一个相期在步态周期中进行研究。所谓“典型着陆动作”,其实并不是某一具体动作,而是一类动作的合称,包括单腿着陆、双腿着陆、跳跃着陆、跳台式着陆、悬挂式着陆、对抗式着陆等。比如,在跳伞活动中,着陆动作非常重要,其标准动作可以分为前滚翻式着陆、侧滚翻式着陆和半蹲式着陆。在舞蹈、跑酷,以及体操、排球、篮球、网球、滑雪、跳高、跳远等体育项目中,着陆动作在细节上各有所不同。但是,所有上述这些着陆动作,在其生物力学特征方面又具有相同的或者类似的表现,这使得有可能将针对不同着陆动作的具体研究结合起来进行分析。

着陆动作极易引起损伤。例如,在体操训练中,约 49%~71% 的损伤发生在着陆时。另外,体操着陆中发生在下肢的损伤最多,占有所有损伤的近 60%。在挪威军队中,80% 以上的跳伞损伤发生在下肢,其中踝关节损伤占 36%。踝关节损伤占英国民用跳伞损伤的 40% 以上。在体育跳伞运动中,踝关节损伤占有所有损伤的 37%。对着陆损伤进行合理的

防护,以及损伤后患者的治疗和康复,都需要对着陆损伤发生和防护机制的科学认识。

生物力学,是应用力学原理和方法对生物体的力学问题进行定量研究的生物物理学分支。人体中大量的力学问题,早就引起科学界的关注,体现在人体动作研究中,生物力学主要关注人体关节活动、肌肉协调运作方式及作用强度、人体各组织的受力情况等。着陆动作会造成人与地面的强烈冲击,并有可能因此超出人体组织力学阈值而导致损伤。所以,与着陆动作相关的重要问题及其研究,是不可能离开生物力学的。

1.2 着陆生物力学的研究方法

对着陆生物力学的研究方法,从方法学上基本可以划分为流行病学调查、模型实验、在体实验和计算机模拟仿真四种。

1.2.1 流行病学调查

流行病学是研究疾病、健康和卫生事件的分布及其决定因素的方法学。流行病学基本上是一门归纳性的科学,从描述与分析两方面来体现它的归纳性。着陆生物力学的流行病学调查研究,通常是对一系列因着陆发生的损伤事故进行统计和分析,借以寻找其背后的生物力学普遍性规律。这是对着陆生物力学进行认识的初级阶段,也是最为关键的阶段之一,因为这种方法所面对的对象是鲜活的事实。

目前,针对着陆损伤的流行病学调查可以分为三类:

(1) 描述性研究:流行病学基础研究方法,主要为现况研究,通过调查描述着陆损伤部位的分布,损伤发生的环境,各种可疑致病因素,以及它们的相互关系,提出病因假说。例如谢雄等人^[1]共调查 1960—1995 年空军某部队伞兵 211 108 人,跳伞伤 1 759 例(不含软组织损伤),外伤种类和致伤因素按国际疾病分类 ICD—9 标准进行判定,用 AIS90—ISS 评价损伤程度。

(2) 分析性研究:对由描述性研究提出的病因或其他假设进行分析检验。同是调查跳伞着陆损伤,比利时伞兵训练中心调查了 1 880 名伞兵的身高、体重与他们的损伤率,发现只有体重显著影响损伤率,体重和损伤率符合二次公式^[2]:

$$y = 43.14 - 1.22x + 0.01x^2$$

(3) 实验法:流行病学实验是在人群现场中进行的,将观察人群随机分为试验组和对照组,给试验组施加某种干预措施,通过随访观察,判定干预措施的效果,进一步验证假说。例如,美国陆军健康促进与预防医学中心使用单变量分析比较了是否使用护踝对跳伞着陆损伤的影响,发现不佩戴护踝的踝关节扭伤率是佩戴护踝组的 2 倍,踝关节骨折率是佩戴护踝组的 1.83 倍,任意类型的踝损伤率是佩戴护踝组的 1.92 倍。佩戴护踝组与

对照组在除踝关节外的其他下肢部位具有相似的损伤率^[3]。

1.2.2 模型实验

模型实验方法是通过人体组织或器官的替代品来完成相关实验,进行定量研究的一种方法。人类离体标本是与有生命的人体最为接近的事物,是人体科学研究的重要工具。在新鲜人类离体标本中,保存有完整的骨、软骨、韧带和关节结构。在尸体标本中,虽然肌肉的活性丧失,但其结构以及与其他组织的解剖关系仍被完整地保留下来,其被动力学性能也未发生改变。所以,在生物力学研究中,离体实验是一种重要的手段。

在 Withrow 等人^[4]的实验中,采用 11 具膝关节离体标本来研究在着陆时前交叉韧带牵张与冲击力、股四头肌力和膝关节屈曲角度的关系。Hashemi 等^[5]通过巧妙的实验设计,应用离体实验来研究在着陆运动中膝关节前交叉韧带的非接触性损伤机制。新加坡国立大学的研究者们应用人类离体实验,研究反复着陆冲击载荷对前交叉韧带失效的影响,以及离体膝关节软骨损伤的程度和分布^[6]。

虽然人类离体标本实验具有一定优越性,但是标本来源有限,实验成本较高。由于动物具有与人类类似的解剖结构和组织力学性质,可以在一定程度上代替人体进行实验。新加坡国立大学使用猪膝关节离体标本研究在着陆冲击时前交叉韧带损伤对关节软骨的影响^[7]。另外,他们也采用细胞活性评估、甘油氨基聚糖和胶原成分测定、组织学、免疫组织化学和 μ -CT 等方法通过猪标本来评价着陆动作引起的膝关节软骨损伤和退行性改变^[8]。

无论是人类离体标本,还是在体的或离体的动物模型,都是有生命的人体的天然替代品,但是其应用往往受到相关法律、法规、宗教或伦理限制。另外,对实验标本的构成很难人为进行控制,不同标本之间的个体差异性比较大,对实验结果构成影响的因素比较多。在冲击生物力学中,也经常采用机械的,带有加速度传感器的假人来作为真实人体的替代品。一般来说,在人体突然遭受冲击时,人体的神经肌肉系统来不及做出相应自主反应,例如在车祸、非自主跌落中,这时候假人能够在相当程度上模拟组织器官的生物力学响应。但是,在具有自主调节姿势、神经肌肉收缩以对抗冲击的着陆动作中,假人的使用效果并不理想。这也是这种方法极少应用在着陆生物力学研究中的原因。

1.2.3 在体测试

流行病学调查能提供第一手的数据资料,是研究跳伞着陆损伤病因和防护的根本依据。但是,流行病学调查研究周期长,成本高。着陆损伤本身具有明显的不可预知性和不可控性,难以进行实时测量。在实验室条件下进行合理设计,采用受试者在标准条件下,应用现代测量技术对人体各种运动学和动力学数据进行测量,能够获取更多有价值的信息。目前通用的志愿者测试方法是从平台跳落着陆或者悬挂一定高度后自主着陆,在过程中实时测量运动学参数、地面反力、肌肉反应时间和活动性等数据。

Madigan 和 Pidcoe^[9]采用 12 名受试者进行实验,研究了在着陆动作中下肢疲劳对地面反力、下肢运动学和动力学的影响。分别利用测力台、运动捕捉系统、肌电图仪采集受试者疲劳着陆时的地面反力,髋关节、膝关节和踝关节的运动学参数,以及股外侧肌的肌电图。所采用的疲劳着陆不仅可以确定疲劳状态和非疲劳状态的生物力学差异,还可以提供在疲劳进展中多个生物力学参数的时变特征。

前交叉韧带撕裂是常见的运动损伤,有严重的后遗症。对具有前交叉韧带损伤高风险的运动员进行重点的预防训练,可以有效降低损失率,因此在运动队中进行前交叉韧带损伤风险的筛查具有重要意义。Padua 等人^[10]提出一种着陆错误评分系统(Landing Error Scoring System, LESS)作为临床筛查工具,并进行了一项 2 691 名受试者的实验。受试者进行跳跃-着陆-反跳动作,使用摄像机记录额状面和矢状面的动作影像,并采集地面反力数据,最后随机选择其中 25 名男性和 25 名女性,对其运动学和动力学参数进行比较分析。比较结果认为,LESS 是一种有效且可靠的预测跳跃着陆运动中的损伤风险的方法。

为评价踝关节背屈活动度和着陆生物力学的关系,Fong 等人^[11]进行了一项 35 名受试者参与的在体实验研究。实验过程中,在屈膝和伸膝状态进行被动背屈活动度测试,并通过光学运动捕捉系统和测力台进行着陆动作的生物力学测试,用单相关方法来评价背屈活动度和各着陆生物力学参数之间的关系。根据实验结果发现,较大的踝关节背屈活动度与较大的屈膝位移及较小的着陆地面反力相关。该研究建议,为了有效预防着陆过程中的前交叉韧带损伤,提高跖屈肌伸展性和踝关节背屈活动度的临床技术是非常重要的手段。

着陆动作在舞蹈中也非常常见。Orishimo 等人^[12]采用在体测试方法比较研究了男性和女性舞蹈演员着陆生物力学差异。研究者招募了 33 名专业现代舞和芭蕾舞演员,令其从 30 厘米高台上跳下并单腿着陆,对运动学和地面反力参数进行测量和比较。研究发现,两性在着陆时采用相似的损伤预防策略,两性之间不存在关节运动学和动力学方面的显著差异,但是演员开始接受训练的年龄和着陆时髋关节最大内收角度之间存在显著相关性。儿童早期开展跳跃和平衡训练,有利于成熟后在着陆动作中避免潜在的损伤。

1.2.4 计算机模拟仿真

志愿者实验虽然能为深入研究跳伞着陆损伤及其防护提供大量重要数据,但是也有局限性。首先,由于志愿者之间的个体差异,受训练程度不同和主观意识的影响,志愿者实验数据的可靠性往往需要大样本的测试,并依赖于昂贵的实验设备,需要花费大量的测试分析时间。其次,由于在测试过程中要考虑志愿者的人身安全,不能真正去完成有可能造成实际损伤的动作,所以实验条件下要比真实跳伞环境下风险系数大大减小,这降低了实验结果的说服力。另外,由于在测试过程中只能考虑无损测量方法,所取得的数据形式具有很大局限性,对诸如组织内部应力、关节压力等重要数据不能获取。应用数值模拟方

法,建立标准的数学模型,通过控制边界条件和加载条件,可以得到良好的结果,可比较性和可重复性都优于志愿者测试。

人体多刚体动力学模拟目前已经作为一种成熟的技术被普遍应用。得益于计算机技术的发展,多刚体动力学模型一方面可以分析自由度和运动形式更复杂的问题,另一方面也便于与其他模拟方法结合,更灵活地解决人体运动问题。例如,第四军医大学刘铁汉等^[13]和北京航空航天大学张俊等^[14]都曾建立数学模型对着陆冲击力进行分析,其建模和分析都使用了高速摄影资料。

有限元方法是现代计算力学发展的一个里程碑。由于有限元计算精度高,能适应各种复杂形状,因而成为有效的生物力学分析手段,极大地促进了生物力学的发展,在损伤生物力学研究中有重要的应用价值。美国军方已经开展了有限元方法研究跳伞着陆损伤。美国军方研究人员基于 GEBOD 程序建立了人体全身有限元模型研究跳伞着陆。模型中身体除下肢以外的部分都被定义为刚体,刚体之间的联结性质通过适当的载荷偏移曲线定义。这项研究分析了直立着陆和跳伞着陆不同姿势下踝关节竖直方向速度、角速度和冲击力,还分析了各种因素对跳伞着陆冲击力的影响^[15]。在后续的研究中,将这个模型进行了改进,尤其对足踝结构进行了更为精确的建模^[16]。他们将这个模型应用于评价跳伞着陆时不同护具对踝关节的防护作用,比较分析了不同护踝,着陆速度、负荷条件和地面倾斜度对着陆时足冲击力、背屈、内翻和外翻的影响^[17]。

以上研究使用的有限元模型无论在结构还是组织力学性质上都并非基于解剖,不能预测踝关节各组织的应力,所以依然存在较大的局限性^[15-17]。借助计算机硬件软件的飞速发展和医学影像、数字图像处理技术的进步,人体各节段生物力学有限元模型越来越成熟。所以在当前技术条件下,应用基于解剖的生物力学有限元模型解决着陆损伤的部分问题,已经具备了可能性。

虽然有限元方法在很多生物力学问题的解决中有明显的优势,但是也有其自身的不足,比如对肌肉力的模拟能力有限。虽然在静力学分析中,可以使用集中载荷模拟肌力作用。但是在着陆等动作的动态分析中,肌肉活动性随动作的变化不断变化,不同肌肉之间互相协调,以此保证身体各节段和关节的正常平稳运动和平衡,这时有限元模拟就存在较大困难。在这种情况下,肌骨系统逆向动力学分析模型可以被用来计算肌肉活动性、韧带拉力和关节力传递等动态参数。Spagale 等人^[18]使用二维肌骨系统模型计算起跳到着陆的整个过程中 9 条下肢肌肉的活动性。Shin 等人^[18,19]结合离体实验模拟了着陆冲击条件下膝关节肌肉力和韧带拉力的变化。

随着技术的发展和科学问题的需要,通常在一个任务中使用两种或两种以上不同形式的模型来解决运动生物力学问题。不同模型通过数据交换将一方的计算结果作为边界或加载条件,来完成模型各自所适用的任务。事实上,随着计算机的应用,在有些情况下不同模型之间的界限也不是特别清晰。例如近年来兴起的肌骨系统模型在一定程度上可以看作传统的多刚体动力学模型框架下添加了肌肉功能模拟单元。在已经商业化的肌骨

系统模拟软件和开源软件中,逆向和正向人体动力学分析已经变成其肌肉功能分析的基础。而如果将刚体节段和肌肉分别看作有限单元,其与有限元法的联系便自然而然。目前大多数商业有限元软件都提供刚体的模拟功能,也正是淡化了和多刚体动力学模拟的差别。Halloran 等人^[21]联合使用肌骨动力学和有限元分析来研究步态足底组织的应力变化,为着陆研究提供了良好的借鉴。

1.3 着陆生物力学的研究现状

通过 SCI 数据库,以“landing”和“biomechanics”为关键词,对近 20 年的文献进行检索,搜索到文献 723 篇。由图 1-1 这些文献的年度发表趋势,可以看出,在最近的 10 年,尤其在 2008 年后,对着陆生物力学的研究快速增加。对这些 SCI 论文进行分析,其中大部分文献发表在运动科学(Sports Science)领域(70.2%),涉及到的其他学科主要包括:矫形外科学(Orthopedics, 26.4%),生物医学工程(Engineering Biomedical, 20.8%),康复(Rehabilitation, 9.3%),生物物理学(Biophysics, 6.1%),外科学(Surgery, 5.1%)等。因此,着陆动作的生物力学是典型的交叉学科问题,需要多学科协同合作进行研究。

在 SCI 数据库搜索到的 723 篇文献中,超出一半(435 篇)的文献来自美国。美国之外,对着陆生物力学研究较多的分别是澳大利亚(63 篇)、英国(47 篇),中国(不含台湾)发表了其中的 41 篇论文,排第四位。这些自动搜索的数据并不全面,也包含了一些不相关的论文,但是能一定程度地说明该领域的研究历史和现状。单纯从发表论文情况来看,我国在着陆生物力学的研究已经起步,但是做的工作还远远不够。

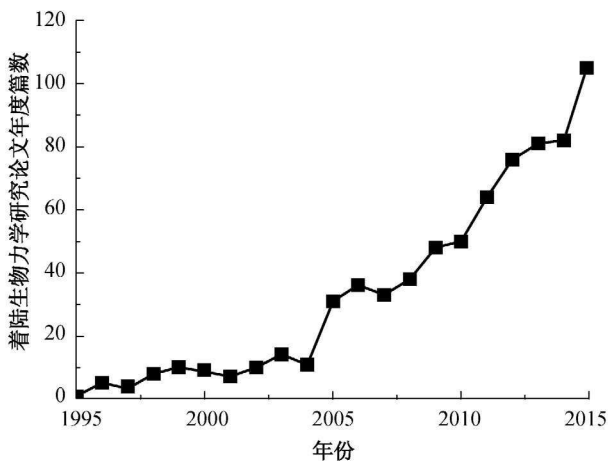


图 1-1 通过 SCI 数据库查询所得着陆生物力学研究论文发表趋势图

1.3.1 跳伞着陆生物力学

在战场有生力量的快速投送、飞行员逃生和救援救灾等活动中,跳伞有不可替代的作用。但是,跳伞又具有高度危险性,跳伞者的损伤概率比其他人高 20 倍。绝大部分的跳伞损伤发生在着陆阶段,因此对跳伞着陆的研究对军事、民用和娱乐性跳伞都非常重要。

正确的跳伞着陆姿势对减少着陆损伤非常必要。各国都强调着陆姿势的重要性,但各国的姿势规定并不一致。在早期跳伞中,美国和德国都采用前滚翻式着陆姿势。后来英国采用了侧滚翻式着陆姿势,据称这种着陆姿势可以显著降低着陆损伤,美军在1943年6月也开始采用这种姿势。这种姿势要求跳伞者着陆时双臂抬起,前臂在面部抱紧,下颌内收,足与地面接触时,膝关节微屈,并向侧向旋转,小腿、大腿、臀部和躯干依次触地并完成翻滚,通过身体各关节的运动将强大的身体动能吸收,并延长缓冲时间和增大身体冲击面积。目前,大多数国家军事跳伞都采用侧滚翻式着陆姿势。

但是,与大多数国家不同,我国和原苏联一些国家采用的是半蹲式跳伞着陆姿势^[8]。半蹲式跳伞着陆姿势要求在未着陆时下肢成半蹲姿势,做到“三紧一平”,即两腿弯曲,并将膝、踝关节、前脚掌内侧靠齐夹紧,脚掌与地面平行。其主要特点在于在初始接触后主动地大幅度弯曲下肢关节,通过延长缓冲时间和增加缓冲距离来减小冲击过载和预防潜在损伤。其中的“三紧”是为了保证双腿可以同时承受冲击,避免单独承载而造成损伤,“一平”是为了保证自始至终人体与地面接触都有最大的接触面积。

20世纪80年代后期,第四军医大学使用高速摄像和仪器分析方法,研究了男性伞兵用平台训练模拟跳伞着陆时,用半蹲式和侧滚翻式两种姿势条件下人体质心、足部和人体各节段承受的冲击力。但是,作为30多年前的研究,他们的研究存在测量和分析方法相对落后、实验样本过小使得结果无统计意义等局限性。在目前条件下,从关节运动学、动力学和肌电图等角度更科学地认识这种半蹲式跳伞着陆姿势,以期更好地进行防护和降低损伤率,是生物力学研究者的责任。

自2009年以来,北京航空航天大学生物与医学工程学院开展了跳伞着陆的生物力学研究,将运动人体科学、临床生物力学中的新思想和新技术应用到这一传统课题中去,重新激活了这一研究领域。2009年4月2日,中国空军首批16名战斗机女飞行员被授予空军中尉军衔,获得象征飞行员身份的飞行员证书和飞行等级证章。在当年的国庆阅兵中,这批飞行员以优异的表现得到全国人民的赞誉。但是,大量事实数据表明,女性在执行跳伞任务时比男性更加容易发生损伤,但是对其原因从来没人研究过。

2010年,牛文鑫等人^[22]关于在半蹲式跳伞着陆过程中两性生物力学差异的研究发表在《航空航天与环境医学》(*Aviation, Space, and Environmental Medicine*)。该杂志是美国航天医学联合会的会刊,已有80余年的发行历史,是航空航天医学领域唯一的SCI杂志,2015年后更名为《航天医学与人类的行为》(*Aerospace Medicine and Human Performance*)。该论文发表的重要意义在于,中国人第一次在国际期刊上发表了关于跳伞着陆生物力学的研究,英语世界的研究者第一次知道在滚翻式跳伞着陆姿势以外,还有一种姿势叫半蹲式跳伞着陆姿势。在审稿过程中,审稿专家提出质疑:“你们为什么不使用正规的跳伞着陆姿势?”“世界上到底有多少人会用这种不标准的姿势跳伞?”面对这种质疑,作者在不违背保密条例的前提下,利用公开发表的中文论文进行了回应,最终让审稿专家明白,世界上有一种标准的、正规的半蹲式跳伞着陆姿势,与他们意识中唯一的滚