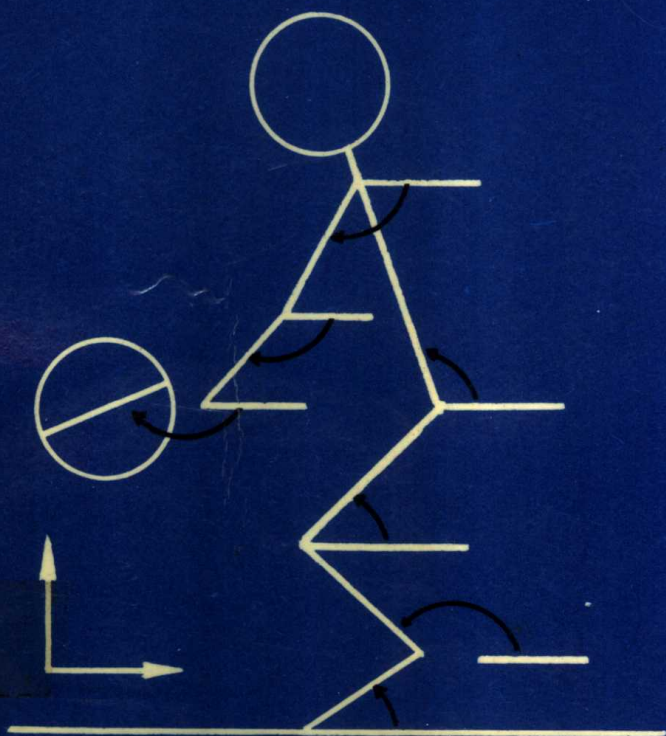


运动生物力学

YUN DONG SHENG WU LI XUE

周存敬 李智慧 编著



成都科技大学出版社

运动生物力学

周存敬 李智慧 编著

成都科技大学出版社

(川)新登字 015 号

责任编辑 宗 年

运动生物力学

周存敬 李智慧 编著

成都科技大学出版社出版发行

四川省新华书店 经销

成都科技大学印刷厂 印刷

开本:787×1092 1/32 印张:5.0625

1992 年 12 月第一版 1992 年 12 月第一次印刷

字数:110 千字 印数:1—1000

ISBN 7-5616-1638-4/Q·13

定价:1.54 元

内容提要

本书系统的阐述了运动生物力学所涉及的主要内容:运动器官的力学特性,某些运动器械力学分析,人体惯性参数,多刚体动力学在研究人体运动中的应用,人体运动的计算机模拟;还介绍了利用计算机图形功能再现体育动作的原理和方法.内容丰富,概念清晰.可作为大专院校高年级学生及研究生的教科书;并可供从事运动生物力学的科技工作者阅读参考.

前 言

运动生物力学是体育科学中一门比较年轻的科学。它是在体育学、生物学、力学和计算机科学等之间建立的边缘性学科。它无论在内容方面，还是学科体系上都还没有能够完全统一起来。在名称上各个国家也不尽相同。最初美国称作人体运动学(Kinesiology)，近来又改称运动生物力学(Sport Biomechanics)，前苏联亦叫运动生物力学，而日本等称为身体运动学等等。但总的说来它们都是围绕体育运动中的有关力学问题进行研究。早在15世纪，意大利科学家达·芬奇就开始对人体运动进行研究，提出了人体运动服从于力学定律的观点。几个世纪以来各国学者从不同方面对运动器械和人体运动进行研究，提出了许多观点、理论和研究方法，推动了运动生物力学的发展。

现代运动生物力学于1958年在我国出现，从那时起到1980年的二十多年间，这门学科从无到有，累积了一些经验。由于历史的原因，这一学科发展缓慢。1980年以后在我国这一学科有了很大的发展，目前国内从事运动生物力学教学和科研人员已近三百人左右。运动生物力学研究手段也逐步完善。高速摄影机，带计算机影片分析仪，录像解析系统，

三维测力台,多通道遥测肌电仪等已用于运动生物力学实际研究和教学工作。除国家体委科研所建立了运动生物力学研究室外,各省市自治区也先后建立了运动生物力学研究室,附属在体育科研所内。它们的研究成果已先后为我国竞技体育做出了贡献。

在教材方面,国内已先后翻译出版了国外许多教材和专著,如,美国的詹姆斯·海英著《运动技术生物力学》,前苏联的顿斯科依和扎奥尔斯斯基合著《生物力学》,英国 H·G 戴森著《田径运动技术生物力学》等。国内也出版了运动生物力学教材,如,东北师范大学程国庆编著《运动生物力学》,苏州大学叶永延编著《人体运动力学》,体育院校及师范大学体育系的统编教材等。

以上教材内容主要是为体育院校学生和从事教练工作的人员编写的,在培养人材、普及运动生物力学知识方面都起了重要作用。它对于体育实践不够熟悉而有兴趣从事运动生物力学研究的人,都具有重要参考价值。对于理工科高年级学生和研究生,上述教材已不能够完全满足他们的要求。作者 1988 年为成都科技大学运动生物力学专业研究生讲授《运动生物力学》课程,编写过一本《运动生物力学》讲义,本书就是在这本讲义的基础上,进一步补充整理写出来的。其内容主要是选自国内外一些学者的研究成果和作者及其同事的近十年的研究成果材料。由于运动生物力学包含的内容十分广泛,这本书只能是挂一漏万。本书在后面几章比较详细的描述了利用多刚体动力学的理论和方法,结合 Hanavan 十五刚体人体数学模型,来模拟体育动作,介绍了借助计算机的图形功能,再现体育动作的方法。有关运动生物力学测试方法和手段,因

内已有不少著述,故不再编入.作者较详细的介绍了自己研制的两项运动生物力学测试系统,供读者参考.限于作者水平,所写内容不妥之处,在所难免,欢迎读者批评指正.

编著者

1992年9月

目 录

第一章 人体运动器官力学特性.....	(1)
§ 1.1 骨的力学特性.....	(1)
§ 1.2 软骨和韧带的力学特性.....	(4)
§ 1.3 关节的构造特点及其自由度.....	(6)
§ 1.4 肌肉力学特性	(10)
第二章 某些运动器械的力学分析	(14)
§ 2.1 概述	(14)
§ 2.2 射箭	(14)
§ 2.3 赛车设计	(20)
§ 2.4 标枪飞行的动力学分析	(22)
第三章 人体惯性参数	(29)
§ 3.1 均质刚体的重心和转动惯量	(29)
§ 3.2 惯性张量	(32)
§ 3.3 人体环节质心及总质心	(35)
§ 3.4 Hanavan 人体数学模型	(42)
§ 3.5 Yeadon 人体数学模型	(58)
第四章 人体静力学和人体动力学	(66)
§ 4.1 步枪立姿的技术静力分析	(67)
§ 4.2 人体动力学	(73)
第五章 多刚体运动学基础	(88)
§ 5.1 广义坐标与自由度	(88)
§ 5.2 卡尔丹角	(90)
§ 5.3 欧拉参数	(93)

§ 5.4	环节的连接数组	(95)
§ 5.5	变换矩阵	(97)
§ 5.6	微分算法	(99)
§ 5.7	伪速度	(101)
第六章	多刚体动力学中的 Huston 方法	(102)
§ 6.1	伪速度的选取	(102)
§ 6.2	角速度和角加速度	(105)
§ 6.3	环节质心的速度和加速度	(110)
§ 6.4	广义主动力和广义惯性力	(114)
§ 6.5	动力学方程	(118)
第七章	人体运动的计算机模拟	(121)
§ 7.1	人体运动的计算机求解	(121)
§ 7.2	人体运动的动画实现	(125)
§ 7.3	实例	(130)
第八章	测试仪器(实例)	(136)
§ 8.1	概述	(136)
§ 8.2	人体平衡功能测试仪及定量指标	(137)
§ 8.3	射击训练监测仪	(145)
参考文献		(153)

第一章 人体运动器官力学特性

人体是由神经系统、心血管系统、呼吸系统、运动器官系统所组成的一个统一整体。人体运动是在神经系统的指挥和协调下,各器官系统协调配合,由运动器官系统来完成的。人体运动器官系统由骨、关节和肌肉所组成。人体各种动作的完成,主要是肌肉收缩作用于骨的结果。换句话说,人体运动是以骨为杠杆、关节为中心、肌肉的收缩作用为动力而构成的。因此有必要研究它们的力学特性。

§ 1.1 骨的力学特性

人体共有 206 块骨,由骨、关节连接起来组成的骨骼构成了人体的支架和基本外形,骨具有支持软组织(肌肉、内脏等)和承担人体局部及全体重量的作用,骨被肌肉牵引,绕关节轴转动,使人体局部或整体产生各种各样的运动,因而骨是人体运动的杠杆。骨还具有保护内脏的作用。例如,胸廓保护心脏,颅骨保护脑等。

骨具有较大的弹性和坚固性,其应力—应变关系与一些常用的金属材料很相似,因此,研究金属材料力学性能的测试方法也可用于骨的应力分析。图 1.1 是人体股骨在受单向拉伸时的应力—应变关系。由图可见,干骨性较脆,当应变为 0.4% 时即破坏,而鲜骨最大应变可达 1.2%。

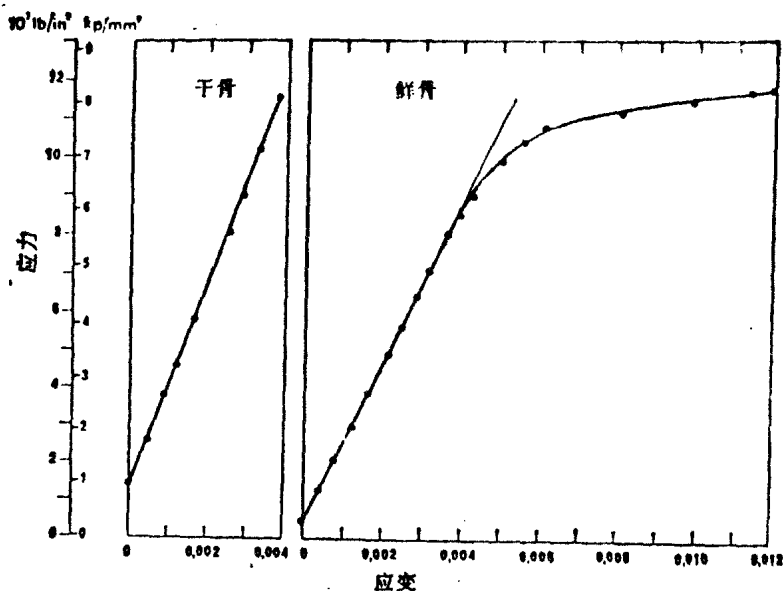


图 1.1 人股骨的应力—应变曲线

在单向受载时,在比例极限以下,应力 σ 与应变 ϵ 的关系为

$$\sigma = E\epsilon$$

式中 E 为杨氏模量. 表 1.1 给出了人湿密质骨的力学性能.

从表 1.1 可以看出,骨的压缩强度极限比拉伸时大,这是由骨结构的非均匀性所造成的. 骨是一种复合材料,它由有机物(骨胶元、骨粘蛋白等)和无机物(磷酸钙、碳酸钙)所组成. 有机物具有较好的弹塑性,无机物具有较高的抗压强度. 它们胶合而成,好像钢筋混凝土结构一样,既能避免硬材料的

脆性破坏,又能避免软材料的过早屈服.骨与其它金属材料相比,其最大特性在于它是一种有生命的器官.在骨中有血液循环.血液向骨输送所需养料,同时带走无用的东西.研究表明,应力对骨的改变、生长发育起着重要调节作用,这对于人体健康和受伤后的康复是非常重要的.每一块骨都有一个最适宜的应力范围.应力过低或过高都会使骨逐渐萎缩.例如,患有瘫痪病者,由于不受压应力作用,就容易造成骨退化性变化.相反,过高的压应力,反而造成骨质消失.例如,脑肿瘤患者,由于脑肿瘤长时持续挤压颅骨,则颅骨被挤压的地方,造成应力集中,骨质消失而穿洞.实践和临床都证明压应力能刺激新生骨的生长,并与维持骨中矿物质的正常代谢有密切关系.正常年轻人通过六个星期卧床,则尿液中钙的排除量增多到正常人的两倍.如果每日卧姿进行 1—4 小时蹬固定自行车练习,尿液中钙并不下降;可是每日除静卧外,再站立 3 小时,则尿液中钙逐渐下降到正常.由此可见,尿液中钙的增加,并不是因为不活动,而主要是骨缺乏压应力.

表 1.1 湿骨拉伸、压缩时的力学性能

(单位 MPa, 年岁 20—39 岁)

骨	拉伸强度极限	压缩强度极限 _m
股骨	124±1.1	170±4.7
胫骨	174±1.2	
肱骨	125±0.3	
桡骨	152±1.4	

§ 1.2 软骨和韧带的力学特性

软骨和韧带都属于具有粘弹性的生物材料。一般而言,粘弹性具有以下三个特点:

(1) 当物体突然发生应变时,若应变保持不变,则相应的应力将随时间增加而逐渐下降,这种现象称为应力松弛。

(2) 若应力保持不变,物体应变随时间增加而增大,这种现象称为蠕变。

(3) 对物体作周期性的加载和卸载,则加载时的应力应变曲线与卸载时的应力应变曲线不重合,这种现象称为滞后。

图 1.2 表示在加载速率不变的条件下,腱做简单拉伸实验时的典型载荷—变形曲线,该曲线由三部分组成:第一段 OA 为正常生理范围,载荷随着变形成指数关系增加;第二段为 AB ,近似为一直线;第三段为 BC ,载荷与变形是非线性关系,在终点处产生破坏。 AB 、 BC

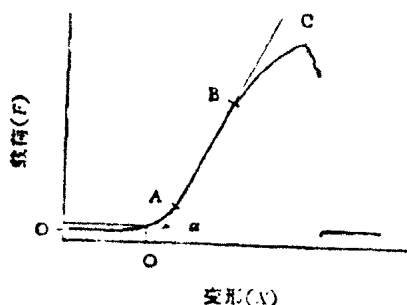


图 1.2

相当于腱的强度裕量。人体腱的极限应力（在 C 处）为 $50\text{--}1000\text{N/mm}^2$ 。

图 1.3 是前交叉韧带受到约等于其 $1/3$ 的破坏载荷时。

在加载速率和卸载速度不变的情况下,加载、卸载得到的载荷变形曲线,明显看出有滞后现象。

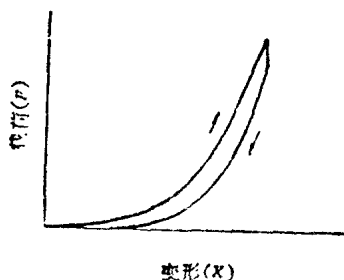


图 1.3

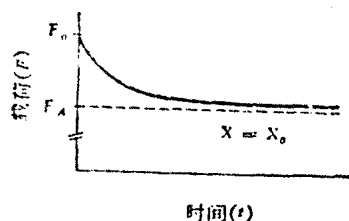


图 1.4

图 1.4 是韧带加载到某一载荷 F_0 时,保持长度不变,而载荷松弛,渐近于一个极限值 F_A 。

软骨是一种多孔粘弹性材料,组织间隙为液体所充满。在应力作用下,液体可在组织中流进或流出(当组织膨胀时流进,收缩时流出),软骨的力学性能随液体含量而变化。

当关节软骨受压时,由于组织中液体被挤出,软骨应力出现快速松弛现象。图 1.5 即为压缩时应力松弛曲线图。

图 1.5(a)中, δ 表示压缩时,实验中位移随时间的变化, OAB 为压缩期, $BCDE$ 为应力松弛阶段。(b)图为相应的应力变化过程。

每个关节上面都有软骨,其功能是提供关节润滑表面,当有冲击载荷作用时,还可吸收冲击和载荷。人体脊椎各椎骨之间也有软骨,它与髓核一起组成椎间盘,具有弹性,承受作用在脊柱上的载荷,并使脊椎骨保持稳定。

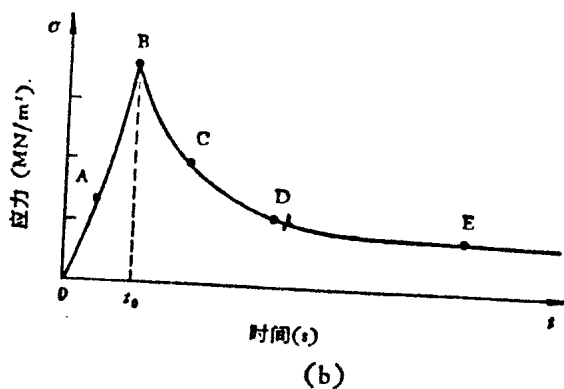
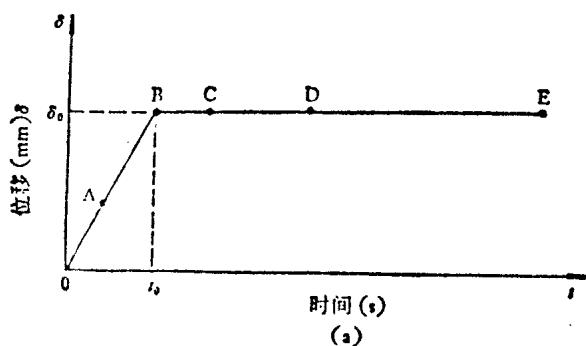


图 1.5

§ 1.3 关节的构造特点及其自由度

人体骨与骨之间的连接有多种形式,其中最主要的是关

节形式. 关节具有较大的活动性,是由肌肉收缩而引起的骨绕关节运动.

(一) 关节的构造特点

关节与骨的其它连接形式的最大不同之处,就是关节有腔隙,称为关节腔. 此外,组成关节还必须有两个或更多的骨关节面(关节面盖有软骨)和关节囊,如图 1.6 所示. 两个骨关节面组

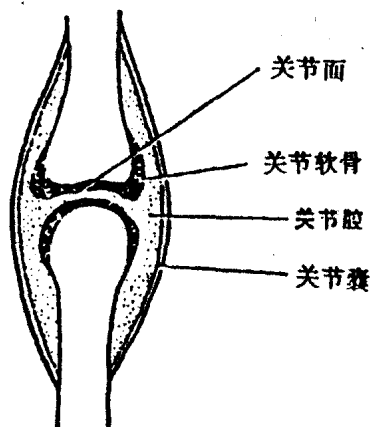


图 1.6

成一定的几何形状. 两个关节面盖的软骨使骨的接触面很光滑,有利于关节转动. 关节囊包绕在两关节面四周,使关节面包在密封腔内,关节囊的张、弛对关节的灵活性和牢固性有影响. 关节囊内层能分泌滑液,以润滑两关节面,其效果优良,根据用离体的动物关节,保持自然关节形状、运动方式和化学环境作完整关节模拟实验,其摩擦系数比最好的人工材料要低许多倍,比大多数金属材料在油的润滑条件下要低两个数量级. 例如,在相同情况下,金属表面油润滑,摩擦系数为0.3—0.5左右,而用牛滑液润滑,摩擦系数为0.0019—0.0025. 由此可见,滑膜关节的优越性是十分惊人的.

(二) 人体主要各关节及其自由度

人体各个关节的运动都是转动,一般均绕关节中心进行,其转动的幅度,需由人体解剖学确定。

通过关节中心可假设一组正交轴系,有矢状轴(前后方向),额状轴(亦称冠状轴,左右方向),垂直轴(上下方向)。

(a) 上肢各关节及其自由度

肩关节为球铰性关节,相对人体躯干而言,人体上臂可绕关节中心、矢状、额状和垂直轴转动。在体育运动中,上臂绕矢状轴转动,从轴正向看,逆时针转动称为内收,顺时针转动称为外展;绕额状轴转动,顺时针转动称为屈,逆时针转动称为伸;绕垂直轴转动,顺时针转动称为旋外,逆时针转动称为旋内。由以上分析可以看出此关节具有三个自由度,如图 1.7 所示。

肩关节绕三轴转动幅度,根据解剖学确定为,绕矢状轴可做外展内收,外展约 90 度;绕额状轴可以屈伸,屈可达 90 度以上,伸约 50 度;绕垂直轴旋内和旋外加在一起约为 90—100 度左右。

肘关节仍为复合性关节,分别由滑车、圆柱、球状关节组成,它包在一个关节囊内,若将上臂固定,前臂只能绕额状轴进行屈伸,屈伸达 150 度。绕垂直轴进行旋内旋外转动,旋内约 90 度,旋外约 90 度。因而肘关节具有两个自由度(图 1.8)。手腕关节亦为两轴性关节,手可绕额状轴屈伸,亦可绕矢状轴外展约 40 度,内收约 45 度,腕关节为两自由度关节。手指间均为一轴性关节,只能进行曲伸运动。