

骨科生物力学

王以进 王介麟 编著



民軍醫出版社

骨科生物力学

GUKE SHENGWU LIXUE

王以进 王介麟 编著

人民军医出版社

1989年·北京

内 容 简 介

本书简明扼要、深入浅出、系统地介绍了骨科生物力学分析的基本力学基础知识及其有关的生物功能解剖方面的知识。内容分为二篇，共十二章。第一篇重点介绍人体刚体生物力学中的静力学、运动学和动力学方面的内容；第二篇重点介绍肌肉、骨骼和关节力学方面的变形体生物力学内容。在每一章末附有习题和思考题。

本书力求避免使用过多的数学、过深的力学原理，以适合于医学院校作为研究生物力学的基础读物，也可作为基础教材的参考书。

本书的读者对象为骨科医生，医用生物力学、生物学、体育界、生物材料工程、力学、医学院校的科技人员及有关大专院校的师生。

2011/20

骨 科 生 物 力 学

王以进 王介麟 主编

*

人民军医出版社出版

(北京复兴路22号甲3号)

(邮政编码100842)

新华书店北京发行所发行

一二〇一工厂印刷

*

开本：787×1092毫米¹/₁₆·印张：20.5·字数：516千字

1989年10月第1版 1989年10月(北京)第1次印刷

印数：5,000 定价：9.85元

ISBN 7-80020-115-5/R·107

〔科技新书目：202-172⑨〕

前 言

生物力学是60年代兴起的一门新的跨学科的学科，将工程原理，特别是机械力学的原理应用于临床医学。20多年的经验证实它对医学的发展起到重要作用。工程师的参予临床医学极大地改变了过去学科之间的互不通气，使力学与医学吸收了新的养料，似一匹脱缰的骏马向前奔跑。例如近年来关节置换术的临床使用，促使两学科之间的合作。关节置换术所涉及到的负荷、速度、植入物的设计、材料的选择等必然需要力学工程师的密切配合，而力学工程师也从机器的认识发展到关节的机械效能的认识，为力学工程带来新的课题。所以多学科协调必然会促进科学的发展，开辟新的广阔前景，真是“山穷水尽疑无路，柳暗花明又一村”。

由于科学的不断前进，人们的思想不得不接受“开放政策”。临床医师迫切需要懂得力学的术语、原理和应用，而力学工程人员也只有熟悉临床的需求和存在的问题，才能为人类的健康作出贡献。目前有必要打开这座隔开学科之间的门户，这就是本书所欲达到之目的。

要沟通两学科不是一件简单的事。力学工程人员习惯于数学分析，而临床医师习惯于对比和归纳。因此要求临床医师掌握数学演算是不现实的，但要求临床医师掌握工程人员已经通过数据而得出的结论，并用这结论应用于临床实践，则不为过分。所以殷切希望本书能做为两学科的桥梁，沟通两个不同类型的学科，造福于人类。

最后，衷心祝贺王以进、王介麟在这方面辛勤劳动所获得的成果，愿力学工程人员和临床医务人员紧密协作，为发展这门新的学科作不懈的努力。

上海第二医科大学骨科教授 过邦辅

1988年7月16日

目 录

第一篇 刚体生物力学

第一章 刚体生物力学的静力分析基本概念	(1)
§ 1-1 静力分析的研究对象——刚体	(1)
§ 1-2 力	(2)
§ 1-3 力的基本性质	(8)
§ 1-4 约束和约束反力	(11)
§ 1-5 研究对象和受力分析图	(14)
第二章 平面力系	(22)
§ 2-1 汇交力系	(22)
§ 2-2 力矩和力偶	(28)
§ 2-3 平面一般力系的简化和平衡	(33)
§ 2-4 平面平行力系的平衡方程	(40)
§ 2-5 骨杠杆	(41)
§ 2-6 人体重心	(47)
§ 2-7 平衡的稳定性	(53)
第三章 空间力系	(63)
§ 3-1 空间汇交力系	(64)
§ 3-2 空间力偶理论	(68)
§ 3-3 力对轴之矩与力对点之矩	(70)
§ 3-4 空间一般力系的简化和平衡	(73)
第四章 点的运动	(83)
§ 4-1 点的运动方程	(83)
§ 4-2 速度和加速度	(86)
§ 4-3 点的运动的分类	(88)
§ 4-4 自由落体运动	(89)
§ 4-5 点的圆周运动	(91)
§ 4-6 抛射体运动	(94)
§ 4-7 有关人体行走时步态分析中的若干问题	(96)
第五章 物体的运动	(103)
§ 5-1 生物体运动的分类	(103)
§ 5-2 物体的定轴转动	(106)
§ 5-3 合成运动	(114)
§ 5-4 平面运动分解为平动和转动	(116)

第六章 动力学和基本定理	(121)
§ 6-1 动力学基本定理	(121)
§ 6-2 人体的外力和内力	(123)
§ 6-3 动力学二类问题	(127)
§ 6-4 动量、冲量、动量定理和动量守恒	(130)
§ 6-5 功和能量	(134)
§ 6-6 基本定理在生物力学中的应用	(137)
第七章 转动动力学	(142)
§ 7-1 刚体的转动方程	(142)
§ 7-2 转动惯量	(143)
§ 7-3 动量矩定理和动量矩守恒	(146)
§ 7-4 转动与平动的比较	(148)
§ 7-5 跑步中腿的运动	(150)

第二篇 变形体生物力学

第八章 整个骨和骨组织的生物力学分析	(156)
§ 8-1 骨骼力学的几个基本概念	(156)
§ 8-2 骨的拉伸与压缩	(159)
§ 8-3 不同载荷下骨的力学性能	(172)
§ 8-4 复合载荷下骨的力学分析	(187)
§ 8-5 有关骨骼力学的几个问题	(191)
第九章 关节软骨的生物力学	(207)
§ 9-1 膝关节上的软骨	(207)
§ 9-2 软骨组织的结构与成份	(208)
§ 9-3 软骨的生物力学性质	(212)
§ 9-4 软骨变性的生物力学	(217)
§ 9-5 滑膜液的流变学模拟	(218)
§ 9-6 关于软骨的二相流变特性	(219)
§ 9-7 动态相互作用问题	(221)
第十章 关节力学	(223)
§ 10-1 关节的一些基本问题	(223)
§ 10-2 关节稳定性的维持	(230)
§ 10-3 关节的力和力矩	(238)
§ 10-4 人体肘关节的生物力学	(242)
§ 10-5 手、腕关节的生物力学	(249)
第十一章 人体髌关节的生物力学	(256)
§ 11-1 解剖学上的考虑	(256)
§ 11-2 髌关节的运动	(263)

§ 11-3	髋关节的静力学	(267)
§ 11-4	髋关节的动力学	(269)
§ 11-5	髋关节的应力强度计算	(272)
§ 11-6	人工髋关节的生物力学问题	(279)
第十二章	人体膝关节的生物力学	(290)
§ 12-1	膝关节的功能解剖及动力学	(290)
§ 12-2	关节运动学与动力学分析	(302)
§ 12-3	膝关节的应力分析	(310)
§ 12-4	膝关节的病理力学分析	(314)
参考文献		(320)

第一篇 刚体生物力学

静力分析是研究物体或人体在平衡时各个作用力之间关系的科学，这里所谓平衡就是物体或人体相对于地面保持静止或作匀速直线运动状态，它是物体运动状态的一种特殊情形，也可说是一种最基本和最典型的一种情形。

人在各种活动过程中，其所做的各种动作，大多属动态的，但这种动态可看为“在不同瞬时各种静止状态的组合和迭加”。此外，也有不少动作是静态的，如人在坐、卧、立、蹲时各种姿势，体育锻炼时各种静力姿势以及杂技表演的各种平衡动作都可用静力学方法加以解决。

由于静力分析所研究的是最特殊、最基本、最典型的运动情形，故它是生物力学的重要基础之一。

本篇着重介绍静力分析中的两个基本问题：（一）力系的简化，即如何将作用在物体上的一个复杂的力系用一个最简单的和它等效的力系来代替。（二）力系的平衡条件，即受力作用的物体处于平衡状态时所需满足的条件。

此外，在上述基础上，还根据人体的特征，介绍一些骨杠杆原理，人体的重心和人体平衡的稳定性等概念。

第一章 刚体生物力学的静力分析基本概念

本章首先阐明在研究刚体生物力学时要经常遇到的几个基本概念，然后介绍作为整个静力分析基础的几个力的基本性质，最后着重讨论约束、约束反力和生物体的受力分析。

§ 1-1 静力分析的研究对象——刚体

前已指出，静力分析是研究物体机械运动的特殊情形，即研究物体平衡规律的科学。具体地说，它是研究作用在物体上的力使物体处于平衡状态时，必须满足的充分和必要条件，它的主要研究对象是刚体。

在力学中，所谓刚体就是物体在受外力作用下，保持它的大小和形状都不改变的物体。换句话说，刚体是不变形的物体。我们知道，在自然界，任何物体都有它的大小和形状，但当在研究问题中，只要它的大小、形状不影响研究问题的本质时，可将实际物体抽象化为刚体。所以刚体是一个被抽象化了的理想模型，它实际上并不存在。在力学中所以这样做的目的，就是在研究物体的平衡或运动问题时，使问题简化。

在生物力学中，为了定量地进行分析，可将人体按其主要关节分为头、躯干、大腿、小腿、足、上臂、前臂、手等各个部分，一般称为环节。而人的各个环节可自由运动，人体的姿势可任意加以改变，所以不是一个刚体，但由于人体的骨骼具有固定的形状，并借助各肌肉的力量，将身体各部分维持一定的姿势，为此，在研究分析人体的平衡和运动时，可以有条件地将人体作为刚体来处理。

§ 1-2 力

(一)力的概念

长期以来,人们从日常生活和生产劳动中,常常会碰到“力”,例如人在推、拉、提、举等活动中,由于肌肉的紧张收缩,手上就会感到用“力”,在跑、跳、蹲时,脚上又会感到用“力”,在挑、抬、扛时,肩上也会感到用“力”。这种由于肌肉紧张收缩,而使人感到对物体施加了力,结果使物体的运动状态发生变化。对于人来说,其身体各部分的运动就是由各种肌肉收缩而产生的力牵引身体的各个环节绕各关节轴旋转而产生的,后来人们进一步观察到物体与物体之间也有这样的力的相互作用,再通过长期的生产实践和科学实践的积累,才在理论上建立了力的概念。所谓力是物体间相互机械作用,这种机械作用的结果,使物体运动状态发生变化。例如在日常生活中,人推车的力使车子的运动状态发生变化(如由静到动,由慢到快等);在自然界由于地球对月球的引力使月球不断改变运动方向而绕着地球运转;对于人来说,如收缩肱二头肌(原动肌)则可使前臂绕肘关节前屈(图 1-1),由于肱二头肌收缩

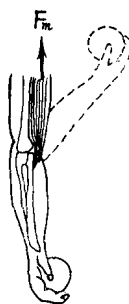


图 1-1

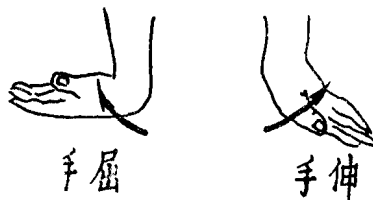


图 1-2

程度不一,可使前屈这个动作由静到动,由慢到快地运动着,又如收缩手屈的肌群(挠侧腕屈肌、掌长肌,尺侧腕屈肌,指深屈肌等),则可使手内屈,收缩手伸的肌群则使手外伸(图 1-2)。可知人体的某一部分的运动实质是一群肌力作用的结果。

力使物体运动状态发生变化的效应称为力的外效应,而力使物体产生变形的效应称为力的内效应。本书的第一篇讨论的是力的外效应,第二篇讨论的是力的内效应。

实践证明,力对物体的效应决定于三个要素:(1)力的大小;(2)力的方向;(3)力的作用点。三者缺一不可。

力的作用点就是力对物体作用的位置。一般而言它并不是一个点,往往是物体的某一部分的体积或面积。但在很多情况下,可把这些分布在体积或面积上的分布力简化为作用于一个点上的集中力。例如重力分布在物体的整个体积上,而当研究力的外效应时,就可把重力简化为集中力作用在物体的重心上;又如肱二头肌的下端附着在桡骨粗隆这一区域上,在计算该肌力时,就可作为一集中力来处理。

力的法定单位是N(牛),习用单位是kgf(千克力), $1\text{kgf}=9.80665\text{N}$ (在一般计算时可略为9.8)。压力和应力的法定单位是Pa(帕),习用单位是 $1\text{kgf}/\text{cm}^2=98.0665\text{kPa}$ (一般计算可略为98kpa)。

很显然,力和一些仅有大小而没有方向的量是不同的,在数学上,若用大小即可表示的

量称为“标量”，如时间、温度、长度、质量等，而将考虑大小又考虑方向的量称为“矢量”（或“向量”），而力对物体的效应不仅决定于它的大小，而且还决定于它的方向，所以力是矢量。

力是矢量，就可用有向线段（矢线）把力的三要素表示出来，如图 1-3 所示。

图中，力矢的长度可按比例尺代表力的大小，沿着力矢顺着箭头的指向表示力的方向，矢线的始端（或末端）表示力的作用点，通过力的作用点沿着力的方向的直线就称为力的作用线。

最后，为了表示力是矢量，本书用粗黑体字母表示矢量，而以普通字母表示这矢量的模（即大小）。

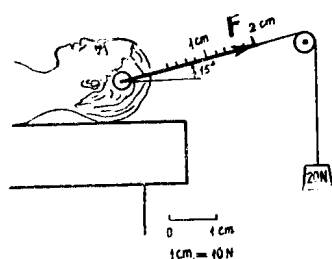


图 1-3

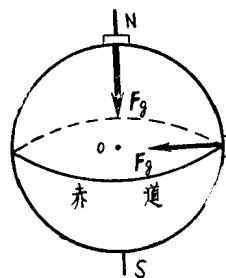


图 1-4

（二）几种常见的力

由上可见，力是物体之间的相互机械作用，由于相互作用的形式是多种多样的，所以在力学上一般将遇到五种形式的力。它们是：万有引力、弹性力、接触力、摩擦力和肌肉力，前四种力在各个领域中都有一定的典型性和普遍性，而最后一种力则是生物力学所特有的。兹分别介绍于下：

1. 万有引力

由物理学知：任何两物体之间都有相互吸引的力的作用，这在力学中称为万有引力，它们之间的作用符合牛顿万有引力定律，用数学式表示则为：

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1-1)$$

式中的 m_1 、 m_2 为两质点的质量， r 为它们的距离，常数 G 为万有引力常数，经测定其值为 $G = 6.685 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^2$ ，也就是两个 1g 的质点相距 1cm 时，它们相互的引力约 $7 \times 10^{-8} \text{ g}$ 。

对一给定材料的物体，则地球对该物体的引力在地球表面的任何地方差不多是相同的。根据精密测量，物体在地球南北极和赤道上，引力的数量仅差 0.5%，这在我们研究的问题中是可以忽略不计的。引力的方向指向地球中心，例如物体的引力方向在南北极和在赤道上是不同的（图 1-4）。

在地球上的任何物体不论大的、小的、宏观的或微观的，都受到地球的引力作用，故万有引力是一个表现很普遍而又很重要的力，一般称为“重力”。实质上就是地球对物体作用的引力的表现，说得更精确一点的话就是物体相对地球静止时的重量等于它的重力。重力的大小可用物体的质量（ m ）与重力加速度（ g ）的乘积表示，即

$$W = mg$$

可以证明，物体的重力就是地球对物体的引力的精确近似值，只不过物体的重力比它所受的地球引力小了 $mR\omega^2\cos^2\lambda$ (此处 R 为地球半径， ω 为地球自转的角速度， λ 是地球纬度)，小的原因是由于地球自转而使物体还受一向心力的缘故(图 1-5)。

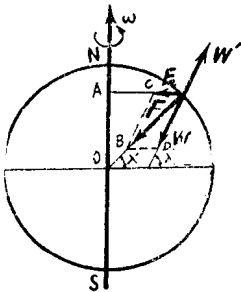


图 1-5

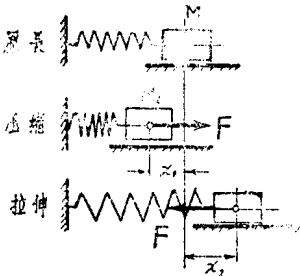


图 1-6

2. 弹性力

弹性力以弹簧最为典型，一般利用弹簧形变而产生的力称为弹性力，它是以弹簧的伸长或压缩为前提的，在弹性极限内，弹性力 F 的大小与弹簧的变形 x (伸长或压缩)成正比关系(图 1-6)，即

$$F=k \cdot x \tag{1-2}$$

式中 k 称为弹簧的弹性系数，它是使弹簧发生单位变形所需的力，它的单位是牛顿/米(N/m)或牛顿/厘米(N/cm)。例如图 1-6 中，当用 1 牛顿的拉力作用时，弹簧伸长 0.75cm，当用 2 牛顿拉力作用时，弹簧伸长 1.5cm，则由 $F=kx$ 得弹簧的弹性系数 k 为

$$k=\frac{F}{x}=\frac{1}{0.75}=\frac{2}{1.5}=1.33\text{N/cm}$$

3. 接触力

所谓接触力就是物体之间的相互接触而作用的力，例如一物体放在桌面上(图 1-7)，若物体接触面之间的摩擦力远小于物体所受的其它力，则该摩擦力可以略去不计，而认为接触面是“光滑”的。假若接触面是光滑的，则物体可以沿光滑桌面滑动，或沿接触面在接触点的公法线方向脱离接触，但不能沿公法线方向压入接触面，所以物体所受的接触力的方向必沿着接触面的公法线上。

4. 摩擦力

当相互接触的物体有相对滑动或相对滑动趋势时，在接触面的切线方向出现了阻止相对滑动的力，这个力称为滑动摩擦力。滑动摩擦力与物体相互滑动的速度有关，滑动摩擦力不仅能够在相互接触的固体之间发生，且能在固体与液体、固体与气体之间发生，但它们对于速

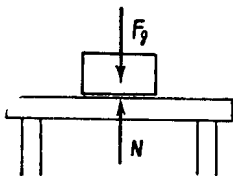


图 1-7

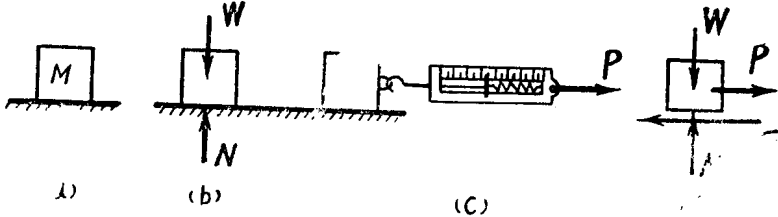


图 1-8

度的依赖关系是不同的,为了区别它们,称前者是干摩擦力,后者为湿摩擦力。在这里只讨论干摩擦力的问题。

为了研究滑动摩擦的规律,先来做简单的实验。设重为 W 的物体 M 放在一固定的水平面上(图 1-8a),这时物体只受重力 W 和接触力 N 的作用而处于平衡(图 1-8b),显然,物体在水平方向没有滑动趋势,因而在接触面间也就不存在摩擦。现在我们给物体一水平拉力 P (图 1-8c),其大小可由弹簧秤读出,当拉力 P 由零逐渐增加而还不大时,物体并没有被拉向滑动,这是因为接触面的切向产生了阻止物体滑动的摩擦力 F (图 1-8d),而使物体保持静止,这种在两个接触物体之间有相对滑动趋势时所产生的摩擦力称为静摩擦力,由平衡条件得:

$$N=W, F=P$$

如果拉力 P 再逐渐增加,在一定范围内物体仍继续保持静止,这表明在此范围内摩擦力 F 随拉力的增加而不断增大,所以静摩擦力可以有任意的大小和在接触面内的任意方向,只要物体保持静止,它的大小就应由平衡条件来确定,其方向与物体滑动趋势相反。实验进一步表明,静摩擦力不能超过某一定值,当拉力达到这个定值时,物体处于将要滑动而未滑动的临界状态,此时只要拉力 P_K 稍大一点时,物体即开始滑动,可见,当物体处于临界平衡状态时,摩擦力达到最大值,称为最大静滑动摩擦力(简称最大静摩擦力),以 $F_{\max}$ 表之。

通过大量实验表明,最大静摩擦力的方向与相对滑动趋势相反,大小与两物体间的正压力 N 的大小成正比,即:

$$F_{\max} = \mu N \quad (1-3)$$

这就是库仑摩擦定律,式中比例常数 μ 是静摩擦系数,其与两接触物体的材料以及表面情况(粗糙度、干湿度,温度等)有关,而一般与接触面积的大小无关,该系数可由实验测定,对于一般光滑的表面其数值见表 1-1。

表 1-1 常用材料的静摩擦系数

材 料	静 摩 擦 系 数 μ
冰-冰	0.05~0.15
皮革-水	0.3~0.4
皮革-金属	0.6
钢-钢	0.6
钢-钢(干润滑)	0.10
木-木(干)	0.25~0.50
木-金属(干)	0.20~0.60

当外力超过最大静摩擦力时,物体开始作相对滑动,此时存在于接触面间的摩擦力称为滑动摩擦力。滑动摩擦力也与表面状态有关,并且对于一定的表面状态,滑动摩擦力近似地和接触面间的垂直压力成正比,即:

$$F' = \mu' N \quad (1-4)$$

式中比例系数 μ' 称为滑动摩擦系数。实验表明, 滑动摩擦系数不仅与接触面的性质有关, 且与接触面的相对滑动速度有关, 对于各种材料的接触面来说, 滑动摩擦力总是在开始时随速度之增加而减少, 而后又随速度的增加而增加 (图 1-9)。且由图可知, 当速度不很大时, 滑动摩擦力总小于最大静摩擦力, 也即是说滑动摩擦系数 μ' 总小于静摩擦系数 μ 。



图 1-9

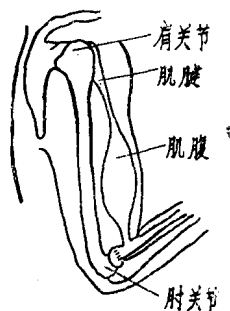


图 1-10

5. 肌肉力

运动是动物对外界反映的主要形式之一, 对于脊椎动物来说, 各种动作的形成, 主要是由于肌肉收缩所产生的肌力作用于骨骼的结果。从力学上来看, 人体的各种运动是以骨为杠杆, 关节为枢纽, 肌肉的收缩作为动力而构成的, 因此对形成运动来说, 肌肉是主动部分, 而骨和骨连结则是被动部分。

运动器官通过肌肉的活动得以调整肌体部分之间的位置关系, 得以进行人类特有的各种社会劳动和日常生活。

运动器官系统中所指的肌肉都是横纹肌, 一般附着于骨, 可随人的意志而收缩, 所以又称为骨骼肌或随意肌。骨骼肌在人体内分布较广, 全身肌肉共计有434块, 约占体重的40~45%, 其中四肢肌又占肌肉总重量的80%左右, 对于完成各环节运动的动作有关的肌肉约有75对。其它的则比较小, 主要完成一些象控制声音, 脸部表情和吞咽等一些精细动作。

从宏观的结构上看, 骨骼肌分中间的肌腹部分和两端的肌腱部分, 肌腹部分色红、柔软, 在神经支配下进行收缩, 其主要成份是肌纤维, 其次是结缔组织膜, 肌腱部分色白、坚韧, 无收缩能力, 其主要部分是腱组织, 肌肉借肌腱分别附着于两根骨的骨膜、筋膜和关节囊的表面 (图 1-10)。分布到肌肉的神经有两种, 一种是感觉神经, 它向中枢神经传递肌肉紧张状态的感觉; 另一种是运动神经, 接受中枢神经传导来的脉冲刺激肌肉, 引起肌肉的收缩。肌腱只有感觉神经, 向中枢神经传递被拉长时的程度感觉。由此可知, 肌肉的主要特性是收缩, 若从能量观点来看, 肌肉是把食物氧化反应最终产生的化学能转换成为作机械功的生物学机器。故从这点看, 每块肌肉都是一部能量转换器, 也相当于工程上的发动机, 而全身就可看作为装有四百多台发动机来完成各种各样的动作的生物学机器。

肌肉所做的工作, 基本上可有动力工作和静力工作两种, 动力工作例如走路、奔跑或进行劳动等各种运动, 静力工作见于保持人体平衡和保持身体各部分之间一定的姿势, 这两种工作, 实际上就是骨骼肌运动的两种形式。当着互相拮抗的两群肌肉的收缩处于暂时相持和相对平衡时, 就表现为静力工作。例如, 当人们举着红旗时, 保持着上臂前屈的姿势是靠屈上臂的肌肉和伸上臂的肌肉收缩处于彼此暂时相持和相对平衡的表现。

全身的骨骼结缔组织、软骨组织和骨组织相连,形成骨连结,但因各部分的功能不同,连结的形式也有不同,骨连结可分为直接连结和间接连结两种。

直接连结是指相邻骨之间充满连接组织,中间不留空隙,故又称为无间隙的连结。例如颅骨骨缝和椎间盘等,这种连结一般运动幅度较小。间接连结在结构上的特点是骨和骨之间有间隙,故又称为有间隙的连结,因而能做较广泛程度的运动,这种骨连结又称为关节,例如髋关节、膝关节、肩关节、肘关节等都是。关节是骨连接的主要形式,关节在运动中如同枢纽一样,作成杠杆装置中的支点,而骨骼就以关节为轴心,在肌肉的牵动下产生运动。

根据肌肉的布配规律,肌肉至少需跨过一个关节,才能使肌肉收缩发力,牵动骨杠杆绕关节运动,因此根据肌肉跨过关节的数目,可把肌肉分为单关节肌和双关节肌。顾名思义,凡只跨过一个关节的肌肉称为单关节肌,例如臀中肌、大收肌、肱肌和三角肌等。凡跨过二个或二个以上关节的肌肉叫双关节肌(或叫多关节肌),例如下肢的半腱肌、半膜肌、缝匠肌、前臂伸肌群等。单关节肌只用于一个关节,对提供关节运动的独立性是必需的,也就是说,使一个关节单独地活动,而与其它关节的活动分开。但是当同时需要在二个不同的关节中完成某些联合的动作时,一块双关节肌是更加有效,单关节肌的作用比较简单,双关节肌的作用就比较复杂,一般在一个关节中,往往同时配布有单关节肌和双关节肌,它们互相协作,相互取长补短,以利完成动作。例如双关节肌由于跨过两个或两个以上的关节,所以肌肉长度一般要比单关节肌长一些,这在运动幅度上可以弥补单关节肌的不足,而单关节肌发力始终集中在一个关节上,能补偿双关节肌发力不足的力量。以股直肌为例,它的近侧端有髂腰肌和耻骨肌,远侧端有股外肌、股内肌和股中肌都能补偿股直肌的张力不足。

在力学中,衡量每块肌肉的性能主要是肌肉的力量,而影响肌肉力量的因素是很复杂的,有肌纤维本身的特点(如数量、质量、长度等),有力学方面的因素(如肌肉的起止点位置、肌拉力角、收缩速度、几个关节复合运动的情况等),有神经-肌肉以至整个身体状况的生理方面因素,这里主要根据肌纤维本身的特点作一简略介绍。

我们知道,横切一块肌肉所有肌纤维的横截面总和称为生理横断面(图 1-11),肌肉的生理横断面越大,则肌肉的力量就越大。因此,两块体积相同的肌肉,羽状肌的生理横断面比梭形肌大,故力量也大。但从力学的角度来看,要确定一块肌肉能发挥出多大力量,需要解决两个问题,即该块肌肉的生理横断面面积以及单位生理横截面的肌纤维的绝对力量。目前国内仅北京体院解剖组在 1960 年发表了《人体肌肉生理横断面的研究》,对中国人全身大部分肌肉的生理横断面作了研究,并提出了一套完整的数据;至于第二个问题,国内尚未见闻,而国外的数据也有多种观点,尚未统一,仅供参考。例如美国威尔斯的资料说是 $4\sim 11\text{ kgf/cm}^2$,莫利斯则提出男子是 9.2 kgf/cm^2 ,女子是 7.1 kgf/cm^2 ,而德国生理学家菲克说是 $6\sim 10\text{ kgf/cm}^2$ 。

此外,不仅肌纤维的数量,而且肌纤维的质量也对肌肉力量有着直接的关系,然而影响肌纤维质量的因素也十分复杂。例如性别、年龄、营养、锻炼程度、肌肉的生化成份以及神经-肌肉特性等。这里列出一张男女力量的对比表以及国外肌肉力量与年龄性别关系的曲线图(图 1-12)以供参考。由图可以看出,

10~12 岁以前,男儿童力量的性别差别不大,10 岁以后,随着年龄的增长,肌肉力量值上

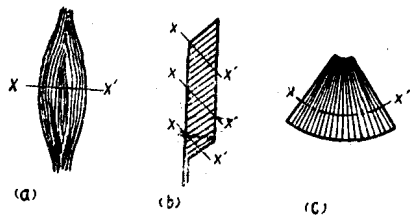


图 1-11

表 1-2 男 女 力 量 对 比 表

肌 肉 群	男 子 力 量 (%)	女 子 力 量 (%)
前臂屈肌和前臂伸肌群	100	65
躯干屈肌和伸肌群、手指屈肌群、足伸肌等	100	60
手指内收肌群、小腿伸肌群、臀内收肌群	100	65
臂外展肌群、手伸肌群和屈肌群、手指外展肌群	100	75
大腿屈肌群和伸肌群、小腿屈肌群、咀嚼肌群	100	80

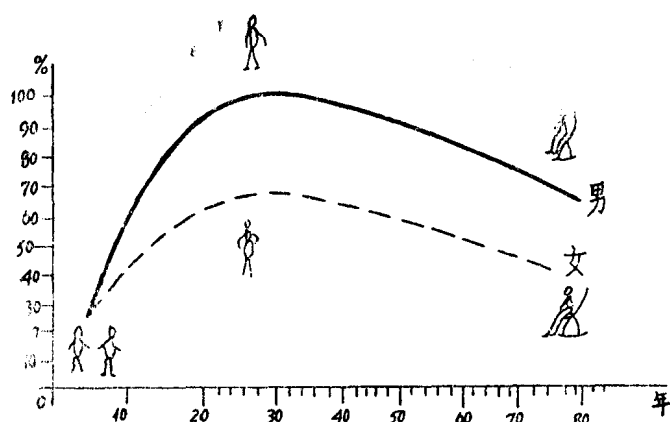


图 1-12

升得很快，因此男女性别差别表现得很明显。一个人一生中最大的力量值约在 30 岁 左右，30 岁以后，肌肉力量逐渐下降。

§ 1-3 力的基本性质

人类经过长期的实践、认识、再实践、再认识的过程，不仅建立了力的概念，而且还概括出力的各种基本性质，一般称之为静力学公理，这些都是从实践中总结出来的客观规律。为了便于讨论和研究力的基本性质，首先提出一些定义。

(1) 作用在一个物体上的一群力称为力系。

(2) 如果某一个力系作用在物体上，而使物体处于平衡状态，则这个力系就称为平衡力系。

(3) 如果作用于物体上的力系可以用另外一个力系来代替，而它对物体作用的效应相同，则称这两个力系彼此等效。由这个定义可知，平衡力系对物体的作用等于零。

(4) 如果一个力系和一个力系等效，则这个力称为这个力系的合力。

力的基本性质如下：

(一) 二力平衡条件

这里首先讨论一个最简单而又最重要的平衡问题——二力平衡，设在杠杆 AB 的两端分别受到 F_A 和 F_B 的作用(图 1-13)。

由经验可知，要使杠杆平衡，则这二个力必须大小相等、方向相反，并且作用在同一直

线上，如在理疗的一些牵引装置中，钢丝绳所悬挂的重物则是一例(图 1-14)，重物受到钢丝



图 1-13

的拉力 T 和重力 W 的作用，这两个力的方向相反，且作用在同一直线上。若 $T > W$ ，则重物加速上升， $T < W$ ，则重物加速下降， $T = W$ ，则重物匀速上升、下降或静止，即处于平衡状态。这样，通过无数次的实践，就得出了这样的结论：受二力作用的刚体处于平衡状态的充分和必要的条件是，这两个力大小相等、方向相反、作用在一条直线上，这个性质又称为二力平衡原理，这二力互为平衡力，若以 F_A 和 F_B 表示之，则其关系为

$$F_A = -F_B \quad (1-5)$$

我们利用二力平衡原理可方便地得到一个推论：作用在刚体上的力，可沿其作用线移到刚体上任一点而不改变该力对刚体的外效应。力的这个可传递的性质称为力的可传性原理，这一推论将有助于我们讨论复杂受力时的简化问题。例如力 F 作用在小车上的 A 点(图 1-15a)，今在力 F 的作用线 AB 上任取一点 B ，加上一对与 F 大小相同的平衡力 F_1 、 F_2 ，且作用在同一直线上，则对物体的外效应不变，也即是力 F 与力系 F 、 F_1 、 F_2 等效(图 1-15b)，但这时可以看出， F 与 F_2 也是一对平衡力，我们把它们去掉并不影响原来力系对小车的效应(图 1-15c)。这样，我们就可以发现，实际上是将力 F 沿作用线 A 移到了 B ，而对小车的外效应不变。

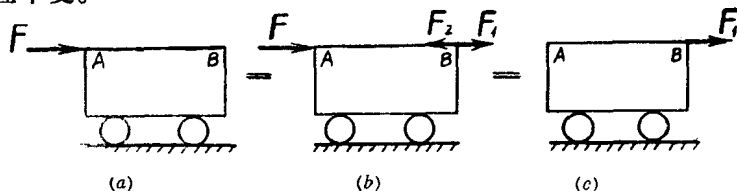


图 1-15

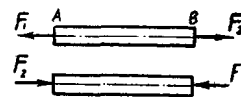


图 1-16

必须指出“力的可传性”仅在讨论力的“外效应”时，才是适用的，而在讨论力的内效应时，是不适用的，因为力移动后，物体的内力与变形和移动前是根本不同的。如图 1-16 是一根钢材，两端受有拉力 F_1 、 F_2 ，此时钢材受拉变形，若将力 F_1 、 F_2 各沿作用线移动后，则钢材受压缩变形，此时力对物体的内效应是显著变化了。

(二) 力的平行四边形法则

作用于刚体上的力有时不止一个，而是受到两个或更多的力，此时，为了使问题简化，常需要在不改变力的作用效果的条件下，设法用一个力来代替几个力(或力系)，这就是力的分解。下面将讨论“力的平行四边形法则”，这是进行力的合成和分解的重要基础。

作用于物体上同一点的两个力可以合成为一个合力，该合力也作用于该点，合力的大小和方向可用以两分力为邻边所组成的平行四边形的对角线表示(图 1-17a)，这就是力的平行

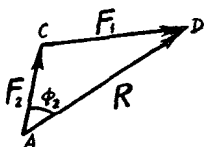
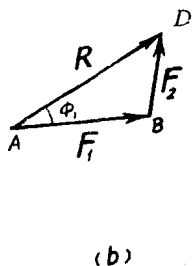
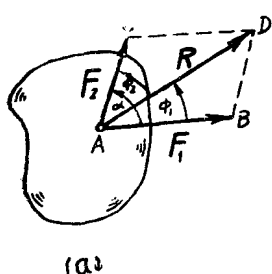


图 1-17

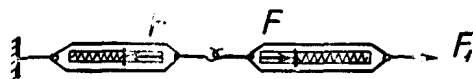


图 1-18

四边形法则，图中 R 表示合力， F_1 、 F_2 表示分力。

力的平行四边形法则指出，两个力相加(合成)不能简单地求算术和，而要用平行四边形法则求几何和(即矢量和)。分力 F_1 、 F_2 和合力 R 之间的矢量关系为

$$R = F_1 + F_2 \quad (1-6)$$

为了求出合力 R 的大小和方向，可以用几何作图法或利用几何关系计算，当用几何作图法时，可选取恰当的比例尺作一平行四边形，然后直接从图上量取对角线长度，按比例量得合力 R 的大小，对角线与分力之间的夹角表示合力的方向，可用量角器量出，当用几何关系计算时，如已知 F_1 、 F_2 和它们的夹角 α ，则由余弦定理可得

$$\begin{aligned} R^2 &= F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos(180^\circ - \alpha) \\ &= F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha \end{aligned}$$

所以合力的大小是

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha} \quad (1-7)$$

为了求合力 R 与分力 F_1 、 F_2 之间的夹角 φ_1 、 φ_2 ，可对 $\triangle ABC$ 应用正弦定理

$$\frac{F_1}{\sin\varphi_2} = \frac{F_2}{\sin\varphi_1} = \frac{R}{\sin(180^\circ - \alpha)}$$

所以

$$\sin\varphi_1 = \frac{F_2\sin\alpha}{R}, \quad \sin\varphi_2 = \frac{F_1\sin\alpha}{R} \quad (1-8)$$

按照矢量运算方法，在 $\square ABCD$ 中， $AC = BD = F_2$ ，因此，我们求合力 R 也可不必作出平行四边形 $ABCD$ ，只要作一个 $\triangle ABD$ 或 $\triangle ACD$ 就可以了，如图 1-17b、c 所示。这就是力的三角形法则，作法就是将两分力 F_1 、 F_2 按其方向首尾相连，然后连接 F_1 尾和 F_2 的头，即为合力 R 。

连续运用平行四边形法则或三角形法则，就可以求出更多个相交力的合力。

(三)作用力和反作用定律

当一物体 A 对另一物体 B 有一个作用力 F_1 的同时，另一个物体 B 同时也对该物体 A 有一个反作用力 F_2 的作用。作用力与反作用力的大小相等、方向相反，并且在同一直线上，即

$$F_1 = -F_2$$

这条定律可以用实验证明，如图 1-18 用两个弹簧秤对钩，当拉动它们时可以看到读数相同，方向相反，作用在同一直线上，并且二力分别作用在两秤上。必须注意，作用力和反作用力不是作用在同一物体上，而是分别作用在相互作用的两个物体上，因此对每一物体来说，不能把作用力和反作用力说成是一对平衡力。

作用力和反作用力是力学中普遍存在的一对矛盾，它们相互对立，相互依存，同时出现，