

# 人体运动器官生物力学

人民体育出版社

# 人体运动器官生物力学

(苏) B. M. 扎齐奥尔斯基

A. C. 阿 鲁 因 合著

B. H. 谢鲁扬诺夫

B. M. 扎齐奥尔斯基教授主编

吴忠贯 刘荣曾 易先俊 译

书 名: **БИОМЕХАНИКА  
ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА  
ЧЕЛОВЕКА**

作 者: В. М. Зациорский  
А. С. Арунн  
В. Н. Селуянов

出 版 者: Физкультура и спорт

出版时间: 1981年

**人体运动器官生物力学**

В. М. 扎齐奥尔斯基  
(苏) А. С. 阿 鲁 因 合 著  
В. Н. 谢 鲁 扬 诺 夫  
吴忠贯 刘荣曾 易先俊 译

人民体育出版社出版

妙峰山印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

787×1092毫米1/32开 70千字 5.125印张

1987年5月第1版 1987年5月第1次印刷

印数: 1—4,000册

统一书号: 7015·2310 定价: 1.10元

责任编辑: 骆勤方

## 内 容 提 要

本书综合了人体运动器官生物力学方面的许多科研成果（其中也包括作者本人的研究在内）。全书分五大部分：动作的运动学描述和关节生物力学、人体质量的几何分布、腱与韧带的生物力学、肌肉生物力学、骨骼肌的生物力学性能。书末附录中介绍了根据简单易行的人体测量特征评定人体质量惯性指标的简易方法。

本书适用于一切对人体运动生物力学发生兴趣的读者以及生物力学专业人员。

# 目 录

序	1
<b>第一章 动作的运动学描述和关节生物力学</b>	<b>3</b>
一、对人体姿位的运动学描述	3
二、关节运动学	6
1. 关节的姿势和动作概述	6
2. 关节动作的几何学和代数学	7
三、动作的类型和关节轴	10
四、自由度	12
五、关节摩擦力学	13
1. 关节摩擦力的测量	13
2. 关节润滑机制的理论	15
3. 训练对关节运动被动阻力的影响	16
<b>第二章 人体质量的几何分布</b>	<b>17</b>
一、研究人体质量几何分布的方法	17
1. 尸体研究	17
2. 活体研究	18
3. 间接法	21
二、放射性同位素法测定人体质量的几何分布	23
1. 放射性同位素法原理	23
2. 放射性同位素装置的结构	25
3. 放射性同位素装置的工作原理	26

4. 环节划分法 .....	27
5. 放射性同位素法的准确度 .....	29
6. 实验概述 .....	30
三、人体质量的几何分布数据 .....	31
1. 总质心位置 .....	31
2. 人体转动惯量 .....	35
3. 人体环节重量(质量) .....	36
4. 人体环节质心的位置 .....	39
5. 人体环节的转动惯量和回转半径 .....	44
<b>第三章 腱与韧带装置的生物力学</b> .....	<b>45</b>
一、韧带和腱对伸展的应答反应 .....	46
二、韧带和腱的力学性能与负荷作用时间之间的关系 .....	48
三、影响韧带和腱的力学性能的因素 .....	50
<b>第四章 肌肉生物力学</b> .....	<b>52</b>
一、离体肌肉的生物力学基础 .....	52
1. 三元系统模型 .....	52
2. 肌力与肌肉长度之间的关系 .....	53
1) 被动肌的“力—长度”关系 .....	53
2) 串联弹性成分的“力—长度”关系 .....	54
3) 主动肌的“力—长度”关系 .....	54
3. 肌肉的激活状态 .....	57
4. “力—速度”关系 .....	58
5. 羽状肌的生物力学 .....	61
二、肌肉在机体内的机能行为 .....	63
1. 肌动元 .....	63
2. 控制肌肉激活性的生物力学观点 .....	65
3. 双关节肌的生物力学 .....	73

4. 肌肉的形态学测量(生物力学观点).....	77
1) 材料的综合问题.....	77
2) 肌肉的力臂.....	79
3) 肌肉拉力作用线.....	79
4) 肌肉的生理横径.....	86
5) 肌肉的长度及其变化.....	90
6) 派生的形态学测量指标.....	90
<b>第五章 骨骼肌的生物力学性能</b> .....	<b>93</b>
一、问题.....	93
二、肌肉的刚度.....	<b>95</b>
1. 测定固有机械刚度的方法.....	95
2. 研究肌肉生物力学刚度的方法.....	97
3. 肌肉刚度的测定结果.....	97
4. 肌肉刚度同各种因素的关系.....	102
三、肌肉的阻尼.....	104
1. 能量耗散特征的测定方法.....	106
2. 肌肉阻尼的测定结果.....	107
3. 肌肉阻尼与各种因素的关系.....	112
四、肌肉的其他生物力学性能.....	113
五、肌肉与腱的生物力学性能对于运动效率的 影响.....	114
<b>附录</b> .....	<b>120</b>
<b>文献索引</b> .....	<b>142</b>

## 序

教练员和运动员对运动生物力学发生兴趣有两个基本原因。第一，他们希望了解，怎样才能改进运动技术；第二，如何提高运动员的训练水平。这本书并不是讨论这个问题的。但它所包含的许多内容却是对上述问题作出科学回答所不可缺少的。

本书讨论的对象是从生物力学观点来看的运动员的运动器官，运动员的身体。要想理解动作是如何发生的，必须首先知道是什么在运动。所以可以说，运动器官生物力学就是运动生物力学的基础。以后陆续出版的其他书籍都将以本书所列的资料作为基础。

近年来生物力学的研究，无论是数量还是水平，都发展极快。我们认为，这有两个原因：第一，由于出现了三、四代电子计算机，研究能力得到了提高（大多数生物力学研究都要应用电子计算机）；第二，许多边缘专业的代表对生物力学材料的兴趣日益浓厚（例如机器人和机械手的制造、航天生物学、航天医学、矫形外科、创伤外科、神经生理学等等专业的专家，当然还有体育工作者——教练员、教员、科研人员、医护人员等等）。

然而，生物力学出版物中缺少综述、专论及最新教科书等。《运动的科学》丛书当中生物力学类正是在一定程度上填补这一空白。它的主要任务就是把运动生物力学各种课题上的最新资讯加以综合和系统化，并且反映国际文献中已经发



表的基本研究成果。

运动生物力学包括两大部分：

1. 普通生物力学，其中有①运动器官生物力学；②运动动作的普通生物力学；③研究动作和运动能力的个体特点和群体特点的分化生物力学。

2. 各种运动项目的生物力学。

考虑到运动器官生物力学具有基础性，所以这套丛书的运动生物力学类的出版便从本书开始。这里当然没有把运动器官生物力学方面的全部问题包罗无遗，仅只选辑了对于运动生物力学较为重要的部分。其中，如骨组织生物力学、关节面的压力分布及许多其他问题均未涉及。

Л.С.格林斯卡娅和Л.Г.丘贡诺娃帮助汇集文献索引和整理手稿，作者在此谨致谢意。

编著运动生物力学综合性书籍对于我们大家都还是一桩新鲜事物。我们欢迎各种批评意见，它不仅帮助我们提高本书的质量，对丛书的陆续出版也将是巨大的促进。

**В.М.扎齐奥尔斯基教授**

# 第一章 动作的运动学描述 和关节生物力学

## 一、人体姿位的运动学描述

描述人体的姿位可用各种方法。现介绍一种极为简便的方法。这种方法是**B.T.纳扎罗夫(1974)**根据**Г.В.科连涅夫**关于受控物体力学的研究(1964)制定的，即以人体的位置、空间取向和姿势来描述人体的空间姿位。

**人体位置**是指人体在给定时刻处于空间的那一部分（如在运动场或房间的某一部分）。欲测定人体位置，只须描述人体上某一点在静坐标系中的三个坐标值就足够了。这一点一般选人体总质心比较适宜，以此点作原点，建立一个新的动坐标系，使此动系各轴同静系各轴取向一致。

**人体各部的空间取向**表征人体各部在静坐标系内绕轴的转动（如头向上、向下、水平等）。

**人体姿势**是指人体各环节的相对排布。测定人体姿势的问题将在1.2.节讨论。这里仅指出，不要将“人体姿位”同“人体姿势”这两个概念混为一谈，因为“人体姿位”除了姿势以外还包含空间取向和位置这两个因素。

测定人体位置一般不太困难，而测定人体的空间取向却难得多，特别在杂技的“向后下腰”和“向前下腰头臂穿腿”动作中要求表现极限柔韧性的各种复杂姿势下更为困难。因为从力学观点来看，人体是一个变形体[B.T.纳扎罗夫,1974]。目前对于这种形体的空间取向问题尚无严密的概念。

现介绍一下人体的基本平面和轴[参阅B.B.布纳克,1941](图1)。

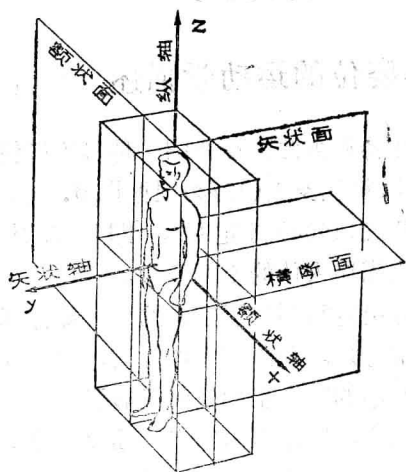


图 1 人体的基本平面和轴

人体的基本平面由三条互相正交的轴组成的坐标系来确定，这三根轴包括一根竖轴和两根水平轴，即横轴与前后轴。

沿身体前面正中线和脊柱线通过的竖直面，以及与此平面平行的一切平面，均称为矢状面。矢状面将人体分为左右两部分。

垂直于矢状面的竖直面以及与此面平行的一切平面，称为额状面。额状面将人体分为前后两部分。

同时与这两个平面垂直的水平面称为横断面(水平面)，它将人体分为上下两部分。

可是用基本解剖面和轴来描述人体动作，在很多情况下

都不大合适，因为在人体上建立坐标系时，必须使坐标系取向的变化能反映出人体取向的变化。

为此，M.C.卢金（1964）建议采用下述方法测定人体纵轴。人体取两臂上举的立姿，以水平面将人体平分为重量相等的两部分。联结人体上下两部分质心（当然也通过人体总质心）的连线便是人体的纵轴（OY）。其他两个轴（OX与OZ）应与此轴垂直，三轴的原点则在人体总质心上。前后轴与骨盆对称面平行，而横轴与此面垂直。

采用人体总质心作为人体坐标系原点并非处处行之有效，因为总质心的位置极难测定，当姿势变化时人体总质心甚至可能移出体外。因此，不同作者建议采用不同部位作为坐标系原点的固定人体测量标志点：

①易于触诊的骶管口（两骶角之间）。因为骶骨是属于刚性结构，以此为原点的坐标系便于定向；竖轴（OY）沿骶骨向上，额状轴OX——向左，矢状轴——向前（潘查比等，1974）；

②第五腰椎棘突尖（A.H.拉普京，1976）。这一点极为接近人在一般立姿下总质心的位置（参看第二章）。

为了测定人体的空间取向，必须建立两个原点相吻合的坐标系。其中一个坐标系的三根轴要同静坐标系相平行（据此测定人体位置）；另一坐标系的三轴则按M.C卢金、纳扎罗夫、潘查比、拉普京等）坐标系统与人体相固连。这样，只要用三个欧拉角就可以完全表征人体的空间取向，同时，利用欧拉角也易于进行坐标变换。

例如，在空翻时做翻转是绕在空间固定取向的轴进行，而在做空翻转体时，最少是同时绕两根轴进行转动的。其中一根轴的取向固定，而另一轴（人体纵轴）与人体相固连，不

断地改变着它的空间取向。

## 二、关节运动学

### 1. 关节的姿势和动作概述

解剖学描述关节的姿势和动作常用屈、伸、外展、内收、旋前、旋后等术语。这些术语是叙述性的，不是以研究各种关节中动作的特点为依据。例如，髋关节和膝关节发生屈的时候，相连二关节面的运动完全不同（参看1.2.2.），也没有给出用以测定关节姿位的欧拉角系，而这在对动作进行生物力学分析时特别重要。因此，在连续动作中肢体的终末姿位取决于动作完成的顺序，甚至还可能发生变化，例如，虽然没有发生过旋前动作，但却出现了旋前的终末姿位。再如叫一个人从基本立姿开始两臂前屈，然后侧伸并内收，那末，尽管这一系列动作中没有包含两臂的旋后动作，但结果手的掌侧面后旋了 $90^\circ$ 。这种附加动作（没有明显旋后动作的后旋结果）称为**伴发性动作**。有鉴于此，生物力学描述关节中的三维动作常常利用欧拉角，而为了运用理论力学算符，又常作如下假设：

①模型（指人体）的一切环节都是刚体。对于躯干，这项假设在很多情况下难以成立，所以，躯干常用两个或三个环节组成的环节系来加以模拟（参看第二章）；

②模型各环节的几何参数（长度等）与人体各环节相应参数一致；

③模型的各环节相互联结为理想的三类运动偶（球型铰链）。

这种模型称为**基础模型**（Г.В.科连涅夫，1977）。

在生物力学实验中，测定欧拉角的真值比较困难。

采用光学法记录动作（立体摄影、电影摄影、电视以及其他光电方法），能够直接测定的只是人体各环节标志点的坐标。金蔡耳等（1972）提出了用人体每个环节的四点坐标测定该环节空间取向的方法；M.B.维里克松（1975），列夫·列维斯（1977）和С.Ю.阿列申斯基（1977）等给出了以人体每个环节的三点坐标计算欧拉角的算术值。但是用光学方法记录人体所有环节上的三个标志点，在目前仍是一项难于解决的课题。所以，在绝大多数研究中，作者对于肢体绕其纵轴的转动均不予记录。

为了同时描述人体所有环节的动作，即人体姿势及其变化的运动学（由于环节数量多，自由度也多，所以这是相当复杂的），目前已有两类方法。第一类方法（Г.В.科连涅夫，1977）是把人体模型分成15个环节，建立15个环节模型的运动方程。这种方法不要求绘制运动学分析图，而且可以用电子计算机直接求解。第二类方法是以图形为基础（M.B.维里克松，1975；B.A.波格丹诺夫，B.C.古尔芬克里，1978）。以图形的各个顶点表示模型的各个环节，而以具有一定取向的各边表示一个环节的坐标在另一个环节坐标系中的投影。图2所示即为一例。

## 2. 关节动作的几何学和代数学

这一节的内容是介绍马克·柯奈耳（1966，1969）的方法，即关节面几何学的综合描述和关节动作的随意连续性（动作代数学）。这些方法不用欧拉角，就可以指出一组连续动作系列之后某个环节的终末姿位，即可预示伴发性动作

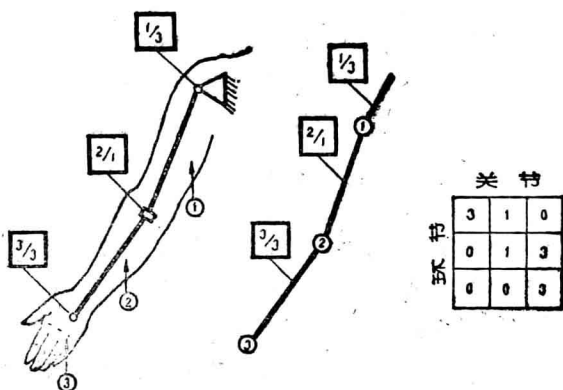


图 2 上肢模型及相应图示和关联矩阵。

方格中分子表示关节号码，分母表示关节级数，小圆中的数字表示环节号码（据M.В.维里克松Велик-сон, 1975）

的出现。这里仅将马克·柯奈耳的主要思想作一简略介绍。

他的思想依据是断定在人体关节中只可能进行两种运动：扭动（Spinning）和旋动（Swinging）。**扭动**是指关节凸面（关节头）除一点之外的所有各点均沿关节凹面移动，而**旋动**则是有异于纯粹扭动的一切其他形式的关节运动。用屈、伸、外展等常用术语来表示的关节运动，要不就是扭动，要不就是旋动，或者是这两种运动的组合。例如，髋关节的屈和伸实质上皆为扭动。

纯粹的旋动（Pure swinging）是关节凸面某一点沿凹面以最短路径（即大地测量线）移动（按马克·柯奈耳的术语，沿着弦移动，联结关节面上某两点的弦只有一条，其他所有的线都是弧）。弦对应于球上的子午线或平面上的直

线。

具有一个自由度的关节或者只能发生纯粹扭动，或者只能发生纯粹旋动；有两个自由度的关节，这两种运动可能同时发生，但纯粹扭动不可能。如果关节中既有纯扭动，又有纯旋动，那就意味着该关节具有三个自由度。

我们假设，在具有三个自由度的关节连续发生三种运动，且使凸面某点沿着最短路径移动，最后又回到初始位置。这样，该点就在凹面上画了一个三角形（令为 $\Delta ABC$ ）。其三内角之和（以 $\psi$ 表示）将大于 $180^\circ$ ，可表为：

$$\alpha = \psi - 180^\circ \quad (1-1)$$

这里， $\alpha$ 是评定伴发性动作量的一个差值。这个动作是在三个连续动作当中的第二个动作时间内发生的（即从点B移到点C时）。设有两种情形，一种是动作分两个阶段，由点A到点B，然后到点C；另一种情形是由点A直接到点C。要使在这两种情形下肢体的终末姿位相同，在第二种情形下就必须于点C扭动 $\alpha$ 度角。这一点，可用关节动作代数式表述如下：

$$AB \times BC = AC \times E^\alpha \quad (1-2)$$

式中AB表示从点A移到点B（其余类推）， $E^\alpha$ 表示扭动了 $\alpha$ 度角。连续动作用乘（ $\times$ ）来表示。

如果不是沿着弦运动，而是沿着弧线运动，即同时进行扭动和旋动，那就不可能出现伴发性动作，且肢体将会回复其初始姿位。在这种情况下相应的三角形三内角之和将等于 $180^\circ$ 。这样的动作顺序称为**保守循环**<sup>\*</sup>。

关节运动代数学中论证了几条定理，可用以确定连续动

---

<sup>\*</sup>原文为 Эргономический цикл，直译为“人类工程学循环”，这里译作“保守循环”，是指在一个动作循环过程中无伴发性动作产生，初始姿位具有保守性——译注



作系列之后环节的终末姿位以及动作循环的互换性。

### 三、动作的类型和关节轴

把关节模拟成理想的球铰链，假定关节中任何一种动作都是绕定轴的球面运动，这种模型大大简化了实际情况。其实，转动瞬轴的位置是可变的。这一情况的重要性以及忽视这一情况的可能性，皆与所研究的具体问题有关。尤其是转动轴的移动，虽不能明显地改变质量的几何分布，但对各肌肉的力臂却有极大的影响（斯密特，1973）。

转动瞬轴之所以能发生移动，是因为关节面有三种类型的基本运动（卡庞支，1970）：一种是滑动，相当于环节绕定轴的转动，另外两类是移动和滚动。形成这三种运动的原因是关节面并不完全一致。

试以膝关节为例。屈膝时，股骨相对于胫骨向后移动，刚过 $15\sim 20^\circ$ 时，就开始纯滑动，并以滚动而告终（卡庞支，1970）。在这种情况下转动瞬轴不局限于某一位置上，而在动作的开始和结束时甚至越出关节范围。但是，如果忽略屈膝的开始时间和结束时间（大约在 $15^\circ$ 范围内）不计，则膝关节转动瞬轴（类定轴）可认为是限定在股骨髁部的一个小区域内。在这种情况下各转动中心（即在膝关节主动屈和被动屈时各转动瞬轴在矢状面上的投影）相距极近，致使该范围内的运动成为单中心运动（Э.И.波利亚科夫，1972和哈丁等，1977）。与此同时，另有一些作者倾向于膝关节瞬轴沿一定轨迹移动的观点（图3）。

测定转动瞬轴的位置一般采用鲁劳克斯法（1876）。为此，将关节中一骨固定，在另一动骨上任意选定两点（图