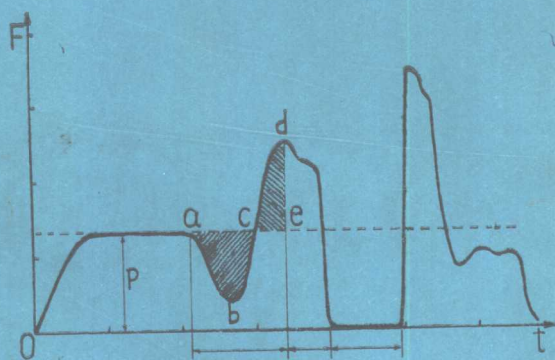


# 运动生物力学研究方法

(运动生物力学实验课参考书)



广州体育学院

《体育教学与训练》编辑部

# 运动生物力学研究方法

(运动生物力学实验课参考书)

ПРАКТИКУМ ПО БИОМЕХАНИКЕ

И. М. КОЗЛОВ

董晋纯编译

广州体育学院

《体育教学与训练》编辑部

一九八三年一月

## 说 明

运动生物力学是实践性很强的一门学科，在本课程的教学过程中，必须重视实验课的教学，使理论与实践相结合，用理论指导实践，又通过实践来加深对理论知识的理解。目前运动生物力学规定为我国体育院系的必修课程，但尚未有统一的教学大纲，特别是有关实验课的参考资料更为缺乏。为收集国外有关运动生物力学实验课的资料，现把我们翻译的苏联《运动生物力学实验课》教材和上海体育学院运动生物力学教学小组翻译的美国衣阿华州立大学体育系的10个运动生物力学实验指导编成《运动生物力学研究方法》一书，供我国体育院系作为参考资料之用。

本书在编译过程中得到参加中南地区运动生物力学学术会议全体代表的积极支持和鼓励，得到上海体育学院运动生物力学教学小组的大力支持，提供了美国衣阿华大学的有关译文资料。苏联教材的译文由李惠青同志进行重点校对，并经华南工学院物理系苏增燧同志和广州体育学院林诗万同志阅后提出修改意见，在此一并表示衷心的感谢。

因翻译水平所限和时间仓促，错误之处在所难免，恳切希望读者提出宝贵意见。

编译者

1983年1月

## 前 言

人们在生活过程中不断地和周围的介质发生相互作用。在这种相互作用中，对于人体的运动活动具有最重要作用的是包括人体在空间和时间内的定位和人体本身直接的动作。有关运动的本质和规律的知识在不断的发展和深化，在实验研究和测量的基础上促进了理论原理的深入研究和加深了我们的知识。运动员技术训练的改进，采用各种完成练习的新方法，在很大程度上是由实践所决定的。为了在运动教学中广泛地应用准确的科学语言来分析运动技术的成就，论证如何改进运动技术是生物力学的迫切任务。因此，在运动生物力学实验课中，对运动员在空间和时间内的运动，身体的位置和姿势进行定量分析的方法，以及评定其产生运动的原因——作用力等占有重要的位置。

在体育学院的教学课程体系中，生物力学是在唯物主义的基础上，利用准确的数学资料来揭示人体运动的规律性，解决形成学生科学知识的任务。

在实验课教材的第一章中简明讲述有关力学的基本知识，在这一基础上进一步叙述有关的资料。

第二章是讨论实用生物力学研究的基本方法，其中包括叙述生物力学特征的测量和计算的方法，并写了十二个实验指导。实验课的内容和组织，目的在于使学生扩大和加深理论知识，掌握生物力学研究的方法，并能把所获得的知识用于实践。实验课的内容与生物力学教材的主要章节相适应。

生物力学研究结果整理的任务放在实验课教材的第三章，其中有提高测量准确性的方法，包括应用计算技术的手

112.80/07

段，研究的结果如何书写和用图表来表达的建议。

在1至3章里面引入一系列计算实例和某种动作特性计算方法的插图。

在完成实验过程中所获得的实验材料，以及科研方法的文献资料都可用于完成计算—图解法作业。在实习课中列举了四个目的在于培养大学生对运动技术进行科学研究技能的计算—图解法的操作实验。

本教材是根据运动生物力学教学大纲和运动实践的需要，是在列宁格勒体育学院生物力学教研室进行实验课教学经验的基础上编写的。在生物力学教学工作发展的不同阶段，科齐科娃、谢苗诺夫，彼得洛夫，卡捷里尼科娃领导了教研室的工作并发展了列斯加伏特的基本思想。

本教材由伊·莫·科兹洛天主编，参加编写的成员有：阿·弗·博恰罗夫，格·普·伊凡诺娃，伊·勃·克洛契科夫。

# 目 录

## 前 言

第一章	运动动作的力学因素.....	( 1 )
第二章	运动生物力学研究方法.....	( 16 )
第一节	提出研究任务和选择研究方法.....	( 16 )
第二节	测定生物力学参数的实验方法.....	( 17 )
一、	测定人体重心的位置.....	( 17 )
二、	测定人体转动惯量.....	( 21 )
第三节	运动动作的光学描记方法.....	( 24 )
一、	基本知识.....	( 24 )
二、	生物力学研究中进行摄影的原则.....	( 26 )
三、	根据电影图片资料测定动作的力学特征... ( 31 )	
第四节	在测量时间间隔的基础上确定动作特性 的方法.....	( 46 )
第五节	生物力学变量的电测方法.....	( 50 )
一、	应变动态描记仪.....	( 52 )
二、	稳定性测定法.....	( 56 )
三、	加速度测量法.....	( 57 )
四、	角度测量法.....	( 63 )
五、	肌电描记法.....	( 65 )
第六节	综合研究方法.....	( 66 )
第七节	测定运动动作的能量学特征.....	( 72 )

第三章 生物力学测量结果的整理 ..... (76)

第一节 整理材料的任务 ..... (76)

第二节 测量误差的分类、误差的来源及减少误差的措施 ..... (77)

第三节 生物力学参数测量结果的整理 ..... (78)

一、直接测量结果的整理 ..... (78)

二、间接测量结果的整理 ..... (80)

第四节 生物力学变量测量结果的整理方法 ..... (82)

第五节 测量结果的表述 ..... (87)

第四章 计算——图解法作业  
..... (89)

附录: 1. 人体重心坐标的计算表 ..... (130)

2. 美国衣阿华州立大学体育系 运动生物力学实验指导 ..... (131)

# 第一章 运动动作的力学因素

物体的静止或运动状态取决于它与其它物体相互作用的力学特征。力是物体相互作用时数值上的量度。力是一种矢量，它不仅表明作用量值的大小，而且还表明在空间的作用方向（图1）。在国际单位制中力的单位是牛顿，在1牛顿力的作用下，一仟克质量的物体获得1米/秒<sup>2</sup>的加速度，即  
 $1 \text{ 牛顿} = 1 \text{ 仟克} \times 1 \text{ 米/秒}^2$

在现实条件下，实际作用于物体的力往往不是孤立的力，而是一种力系。力系一般可分为：（1）汇交力系；（2）平行力系；（3）随意分布的力系。汇交力系可以用一个作用于力的交点的合力来代替（图2）。平行力系可用作用于平行力中心的合力来代替，例如人体各环节重力的平行力系合力作用的中心就是人的总重心（重心的计算实例见实验№7）。

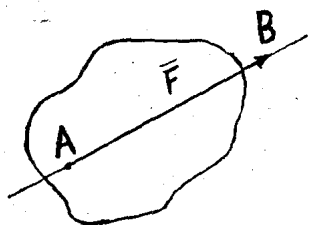


图1 力的矢量

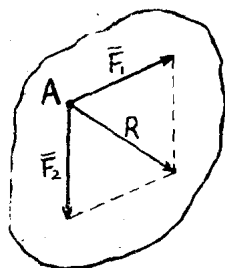


图2 汇交力系

所有作用于刚体的平面力系可用其合力 $\bar{R}$ 来代替， $\bar{R}$ 是所有作用于中心点的总矢量，而一个力偶矩等于系统的总力矩 $\bar{M}$ 。总力矩的大小和方向取决于着力中心的选择。因此，



同一个环节的重力作用于相对不同的关节轴是完全不一样的  
(图3)(见计算—图解法作业No 1)。

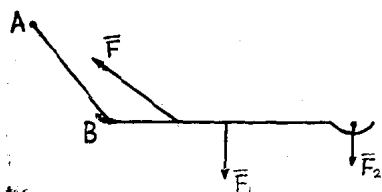


图3 随意分布力系

为使任何平面的力系平衡，必须同时实现  $\bar{R}_O = 0$ ； $\bar{M}_O = 0$ ，这里O是平面上的任何一点，因为当  $\bar{R} = 0$  时，力矩的大小不取决于受力中心的选择。根据该平衡条件的等式导出在直角坐标轴上的投影为：

$$R_x = F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx} = 0, \quad (1)$$

$$R_y = F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny} = 0,$$

即(1)诸力在两个坐标轴的投影总和等于零；

(2)诸力相对于任何点的力矩总和等于零；

$$\sum M_{io}(\bar{F}_x) = \bar{M}_O = 0,$$

在力学中，合力看作是一种集中的力量，但是在现实条件下许多力都是分散的力，在研究生物力学现象时考虑到这一点是非常重要的。

大家知道，作用于刚体的力可分为外力和内力。在活体系统中(它区别于刚体)可能产生姿势的改变和身体各部位的相对运动，但只有在外力的作用下才能使整个人体相对于其它固定不动的物体(如地面)产生位置的改变和运动。作用于物体的力分为主动力和约束反作用力。所有限制该物体在

空间自由移动的条件就是约束，作用于物体上限制物体的某种移动的力称为约束反作用力。受约束所限制的物体是不自由的物体，但是如果将不自由的物体从约束解脱，即用约束反作用力代替约束的作用，物体又可以看成是自由的，作用在这种物体上的力是扩大到物体系统的约束反作用力，在解决静力学任务时，就是采用这一种方法。

**例一** 体重为  $\bar{P}$  的滑雪运动员站在与水平面夹角为  $\alpha$  的斜面上（图 4 a）。

计算为保持物体平衡所必需的最大摩擦力  $\bar{F}$ ，求出滑雪运动员对斜面的压力  $\bar{Q}$ 。

**题解** 首先必须把物体看作是平衡的，确定所给的作用力和要求的力。因为  $\bar{F}$  力作用于运动员，而  $\bar{Q}$  力作用于斜面，将与  $\bar{Q}$  力的大小相等，方向相反的反作用力  $\bar{N}$  代替  $\bar{Q}$ 。这样，所给定的力  $\bar{P}$  和所求出的力  $\bar{F}$  和  $\bar{N}$  将作用于运动员身上，即作用于同一物体。把滑雪运动员看作是自由的物体（图 4、b），画出作用于他的主动力  $\bar{P}$  和  $\bar{F}$  及约束反作用力  $\bar{N}$ ，为计算所求的力，可利用物体平衡的方程式求得所谓汇交力系的作用。

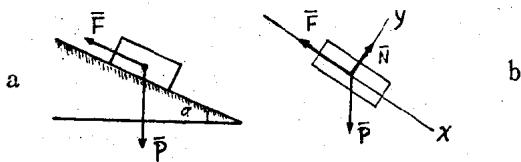


图 4 物体在斜面上的平衡

a. 物理图解      b. 计算图解

对于平面力系，只要选择二个轴，例如  $ox$  和  $oy$  就足够了。在坐标轴上计算出  $\bar{P}$ 、 $\bar{F}$ 、 $\bar{N}$  的投影记入下表

$F_K$	$P$	$F$	$N$
$F_{kx}$	$P \cdot \sin \alpha$	$-F$	$O$
$F_{ky}$	$-P \cdot \cos \alpha$	$O$	$N$

利用平衡的条件(1)建立 $x, y$ 轴的平衡方程式:

$$\sum F_{KX} = P \cdot \sin \alpha - F + O = 0$$

$$\sum F_{KY} = N - P \cos \alpha + O = 0$$

从第一个方程式求得摩擦力 $F = P \cdot \sin \alpha$ , 而从第二个方程式求得斜面反作用力 $N = P \cdot \cos \alpha$ 。

不光滑表面上的全部反作用力是垂直压力和摩擦力的合力。不光滑表面的全部反作用力与其表面的法线所组成的最大角度 $\varphi_0$ 。称为摩擦角:  $\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{F_{\text{摩擦}}}{N}$  (图5)。最大摩擦力

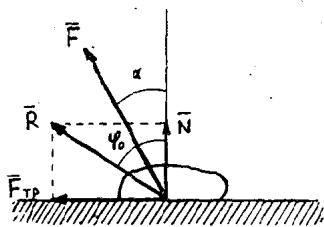


图5 测定摩擦角示意图

$F_{\text{最大}} = f_0 \cdot N$ , 这里摩擦系数 $f_0 = \operatorname{tg} \varphi_0$ , 任何力引起的反作用力 $F$ 与法线所组成的 $\alpha$ 角小于摩擦角 $\varphi_0$ , 物体沿该表面就不能运动, 因为 $P \cdot \sin \alpha > f_0 \cdot P \cdot \cos \alpha$ 不平衡, 其中 $f_0 = \operatorname{tg} \varphi_0$ , 只有在 $\operatorname{tg} \alpha > \operatorname{tg} \varphi_0$ , 即 $\alpha > \varphi_0$ 时蹬地角才是正确的, 这种蹬

地角取决于摩擦角的现象对于滑雪和滑冰运动员都是很清楚的，蹬地力与水平面所成的蹬地角越小，摩擦力也就越大。

现在我们只是讨论到恒定力的作用问题，并没有考虑到在用力过程中可能发生力量的变化。作为使物体产生运动的力，既可以改变其大小，也可以改变力的作用方向，作用力（主动的）和约束反作用力都可能改变。力量可能取决于用力的延续时间、身体的姿势和运动的速度。肌肉收缩的力量和冲击力取决于工作时间；保证关节运动的肌肉弹性力取决于关节的角度；介质的阻力（水、空气）取决于物体运动的速度以及运动物体的形状。变力的合成或分解的规律仍然是按恒力那样计算。

在力学中，所谓运动应理解为在时间过程中该物体相对于其它物体在空间位置的改变，或是该物体的各部位之间相互位置的改变。

运动学是纯粹从几何学的观点来研究物体的运动，它不考虑引起物体运动的原因来认识运动过程的特点，用特殊的形式来了解动力学。动力学则不同于运动学，它在研究物体运动时注意引起运动的力和物体本身的惯性。

为了确定运动物体质点的位置，任何时候都要选定一个和参照物体相联系的坐标系并把它作为计算系统，如果在选定的计算系统中物体所有质点的坐标函数在时间过程中是保持恒定的，那么该物体相对于这一计算系统是静止的。如果其坐标函数是改变的，那么物体相对于该计算系统的参照物是处于运动之中。

运动是在空间和时间过程中完成的，在所有的计算体系中，时间单位通常用秒，时间的量值是累计的不断变化的。在力学中，时间的测定是从随意选定的开始那一瞬间定为  $t = 0$ ，时刻  $t$  由开始瞬间的累计秒数来确定，而时刻之间

的差数就是运动的延续时间或动作阶段的延续时间。在运动过程中人体运动动作的时间特性的研究方法在实验 № 4, № 8 中进行学习。

如果知道在任何瞬间物体相对于选定的计算系统的位置, 就可以计算所要研究的动作中, 质点运动的轨迹、路程、速度和加速度以说明运动的特点。

质点运动的参数用自然法和坐标法两种方法来测定, 它适用于质点的平面运动。在自然法中, 质点的运动在  $Oxy$  计算系统中给出运动的轨迹和图象:

$$\left. \begin{array}{l} f(x, y) = 0 \\ s = s(t) \end{array} \right\} \quad (2)$$

这里  $S$  是质点沿轨迹的移动路程, 而在坐标法中要知道每一个坐标函数的运动规律:

$$\left. \begin{array}{l} x = x(t) \\ y = y(t) \end{array} \right\} \quad (3)$$

每一种方法都要充分记录动作, 以便计算动作的所有运动学特点。用坐标法时, 首先要在计算系统坐标轴上求出运动速度的投影  $V_x$  和  $V_y$ , 然后测定速度的模量和速度  $V$  与  $x$  轴正方向之间的夹角:

$$\left. \begin{array}{l} V_x = \frac{dx}{dt}, \quad V_y = \frac{dy}{dt}, \quad V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}; \\ (\widehat{V}, x) = \arccos \frac{V_x}{V}, \quad (\widehat{V}, y) = \arccos \frac{V_y}{V}; \end{array} \right\} \quad (4)$$

同理确定质点的加速度:

$$\left. \begin{aligned} a_x &= \frac{dv_x}{dt}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt}, \quad a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \\ (\hat{a}, \hat{x}) &= \arccos \frac{a_x}{a}, \quad (\hat{a}, \hat{y}) = \arccos \frac{a_y}{a} \end{aligned} \right\} (5)$$

在自然法中速度模量由下式确定：

$$V = \left| \frac{ds}{dt} \right| \quad (6)$$

这时速度的矢量沿运动轨迹的切线方向，在自然法中给出的运动分别确定其沿轨迹的切线方向（切线加速度 $a_r$ ）和沿轨迹的法线方向（法向加速度 $a_n$ ）的加速度：

$$a_r = \frac{dv}{dt}, \quad a_n = \frac{V^2}{R} \quad (7)$$

这里 $R$ 是所确定加速度的质点轨迹的曲率半径。

加速度模量和加速度矢量方向与运动轨迹的切线方向的夹角按下列公式确定：

$$a = \sqrt{a_r^2 + a_n^2}, \quad (\hat{a}, \hat{\tau}) = \arccos \frac{a_r}{a} \quad (8)$$

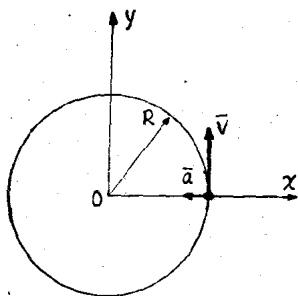


图6 确定链球的运动学特征的计算图

**例二** 链球沿半径  $R = 2$  米的圆周匀速转动，角速度  $\omega = 573^\circ/\text{秒} = 10$  弧度/秒，求链球的加速度模量  $a$ 。

**题解** 选择以链球转动平面上的圆心为原点的  $oxy$  坐标系（图 6），链球的运动可以用坐标法或自然法求出。在用自然法时用  $x^2 + y^2 = R^2$  的圆周方程式描述运动的轨迹和运动的图象——质点按圆周运动的规律（ $S = \omega R t$ ），这样利用公式（6）、（7）、（8）求出：

$$V = \frac{d(\omega R t)}{dt} = \omega R, \quad a_{\tau} = \frac{dv}{dt} = \frac{d(\omega R)}{dt} = 0$$

$$a_n = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R, \quad a = a_n = \omega^2 R$$

在用坐标法时，用坐标来描述质点运动的方程式，质点的运动从坐标的  $y = 0, x = R$  开始，描述运动的方程式为：

$$\left. \begin{aligned} x &= R \cos \omega t \\ y &= R \sin \omega t \end{aligned} \right\}$$

根据（4）、（5）方程式在计算系统的坐标轴上确定合成速度和加速度，然后求出链球运动的加速度模量：

$$\left. \begin{aligned} V_x &= -R\omega \sin \omega t \\ V_y &= R\omega \cos \omega t \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} a_x &= -R\omega^2 \cos \omega t \\ a_y &= -R\omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \right\};$$

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{(-R\omega^2 \cos \omega t)^2 + (-R\omega^2 \sin \omega t)^2} \\ &= R\omega^2 \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = \omega^2 R \end{aligned}$$

将两种方法所得的结果进行比较，结果表明它们完全相同。

**例三** 已知质点运动方程式中  $x = 14t, y = 7t - 4.9t^2$ ,

求轨迹方程式，经过一秒后质点离开始点运动的速度和加速度模量及其位置。

**题解** 为求出轨迹方程式，必须从两个方程式中消去时间，为此，从第一个方程式中的时间表示式代入第二个方程式：

$$t = \frac{x}{14}; \quad y = 7 \frac{x}{14} - 4.9 \frac{x^2}{196}$$

化简后轨迹方程式为  $y = 0.5x - 0.025x^2$ 。速度和加速度的投影按(4)、(5)方程式确定。

(1) 为了确定一秒后质点的位置，必须计算出  $x$ 、 $y$  坐标函数： $x = 14$  米， $y = 7 - 4.9 = 2.1$  米。

(2) 确定在时间  $t = 1$  秒时速度模量的大小，

$$V_x = \frac{d}{dt}(14t) = 14 \frac{\text{米}}{\text{秒}};$$

$$V_y = \frac{d}{dt}(7t - 4.9t^2) = 7 - 9.8t;$$

$$V_x = 14 \text{米/秒}; \quad V_y = 7 - 9.8 = 2.8 \text{米/秒};$$

$$V = \sqrt{14^2 + (-2.8)^2} = 14.4 \text{米/秒}。$$

(3) 在时间  $t = 1$  秒时确定加速度的模量：

$$a_x = \frac{d^2}{dt^2}(14t) = \frac{d}{dt}(14) = 0;$$

$$a_y = \frac{d^2}{dt^2}(7t - 4.9t^2) = \frac{d}{dt}(7 - 9.8t)$$

$$= -9.8 \text{米/秒}^2;$$

$$a = -9.8 \text{米/秒}^2$$



在运动技术研究中常用曲线图的形式来说明运动，质点沿坐标轴运动的曲线图，可用画有坐标的电影图片来求得。沿各个轴运动的曲线图能使研究者得到在选定的计算系统中求出质点运动的轨迹，速度和加速度矢量的投影等资料。

在研究刚体运动时，要研究其平动和转动。

刚体转动的特征或参数是转动角、角速度和角加速度。

研究物体运动的运动学特征可以获得在分析运动技术时所必需的材料，但是物体或物体系统运动状态改变的原因，只有在研究动力学过程的基础上才可能揭示动力学特性与物体的惯性有关。在平动中，质量是物体惯性的量度，在转动中，物体惯性的量度是转动惯量，其数值等于组成该物体的所有质点相对于该转轴的转动惯量的总和，而质点的转动惯量  $I = mr^2$ ，这里  $m$ —质点的质量， $r$ —质点离转轴的距离。

这样，在转动时物体的惯性将不仅取决于物体的质量，而且也取决于物体质量的分布。在运动技术研究中，这一重要的运动特征的计算方法在实验 № 2 和 № 6 中进行。

作用力和加速度之间的关系按牛顿第二定律确定：

$$\sum \bar{F}_K = m \bar{a} \quad (9)$$

刚体相对于固定轴转动的动力学方程式为：

$$\sum M(\bar{F}_K) = I \varepsilon \quad (10)$$

这里  $\sum M(\bar{F}_K)$  是物体相对于转轴的全部外力矩的总和， $\varepsilon$ —是物体的角加速度。  $I$  是物体对于转轴的转动惯量。

力矩是力臂乘力的矢量值，如果物体在力的作用下按顺时针方向转动，那么通常力矩就看作是负号。在关节中，肌肉的力矩是一种变力，因为在完成动作的过程中，不仅改变