

实用生物力学 实验方法

人民体育出版社

实用生物力学实验方法

[苏联] 生物学副博士 И. М. 柯兹洛夫主编

吴忠贯译

人民体育出版社

原 书 说 明

书名：Практикум по биомеханике

(Пособие для институтов
физической культуры)

作者：А. Ф. Бочаров, Г. П. Иванова,
И. Б. Клочков, И. М. Козлов

出版单位：Изд-во «Физкультура и спорт»

出版时间：1980年

实用生物力学实验方法

苏联生物学副博士И.М.柯兹洛夫 主编

吴忠贯 译

人民体育出版社出版

展望印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

787×1092毫米1/32 108千字 印张5

1983年12月第1版 1984年1月第1次印刷

印数1—3700册

统一书号：7015·2144 定价0.53元

责任编辑：骆勤方

内 容 提 要

这本实用生物力学实验方法是由列宁格勒体育学院教师集体编写的。全书共有四个部分。第一部分摘引了一些主要的力学理论资料；第二部分介绍各种生物力学研究方法；第三部分讨论生物力学测量数据处理的方法；最后一部分包含四组计算图象作业。

本书对象是体育学院和高等师范院校体育系师生及科研人员、教练员等。

目 录

人体动作力学基础(A. Ф. 博察罗夫、Г. П. 依万诺娃执笔).....	3
生物力学研究方法(A. Ф. 博察罗夫、Г. П. 依万诺娃、И. М. 柯兹洛夫执笔).....	18
2.1. 任务的提出和研究方法的选定.....	18
2.2. 测定生物力学参量的实验法.....	19
2.3. 记录动作的光学法.....	27
2.4. 测量时间间隔以测定动作特征指标的方法.....	52
2.5. 测量生物力学变量的电学法.....	57
2.6. 综合研究法.....	75
2.7. 人体动作能量特征指标的测定.....	81
生物力学测量数据的处理(A. Ф. 博察罗夫、И. М. 柯兹洛夫执笔)	86
3.1. 数据处理的任务.....	86
3.2. 测量误差的分类、误差的来源以及克服误差的措施.....	87
3.3. 生物力学参量测量数据的处理.....	88
3.4. 生物力学变量测量数据的处理方法.....	93
3.5. 测量结果的表示方法.....	98

4. 计算图象作业(И. Б. 克洛契柯夫、И. П. 柯

兹洛夫、Г. П. 依万诺娃执笔).....	101
附录 1	146
附录 2	147
附录 3	149
附录 4	150
附录 5 (译者附).....	153
附录 6 (译者附).....	154

序

人在生命活动过程中不断地同周围环境相互作用。在这种相互作用当中最具有积极意义的是人的运动活动，它既包涵着身体在时空里的定位，也直接包涵着动作本身。人们对于动作的本质和规律的知识面不断地扩大。这在许多方面都受到实验观察和测量的促进，在此基础上发展了种种理论原理，从而加深了我们的认识。运动员技术训练水平切切实实的提高，各种新颖动作和方法的应用，在许多方面都受实践的制约。分析实践的成就，用准确的科学语言论证提高技术的措施，以便在运动训练中得到广泛的应用，这是生物力学的迫切任务。所以本书的重点就是分析方法，即对运动员身体在时间和空间内的姿势、姿位和动作进行定量的评定，并且也评定造成各种姿势、姿位和动作的原因——即作用力。

在体育学院讲授的各种课程当中，生物力学的任务是以唯物主义为基础，运用精确的数学工具揭示人体运动的规律性，从而帮助学生形成正确的认识。

本书第一部分简要叙述一些力学基本知识，作为进一步深入学习的基础。

第二部分介绍实用生物力学研究的各种基本方法。这里叙述了各项生物力学特征指标的计算和测定方法，并选编了12个实验作业。实验作业的内容和组织安排皆围绕着扩大与加深学生的理论知识，掌握生物力学研究方法，并培养他

们把所获得的知识应用于实践的能力。各实验作业的选题都跟生物力学教程的基本章节保持一致。

生物力学测量数据的处理放在本书的第二部分。这里论述提高测量准确度的各种方法,包括应用计算技术的各种手段。此外还介绍了研究结果的最后定形和图象表现形式。

第一、第三两部分援引了一系列数据实例,作为讨论各种特征指标计算方法的示范。

在进行实验作业过程中所取得的各项实验数据,以及取自各类方法学文献资料中的材料,皆可用于计算图象作业。本书共安排了四个计算图象作业,目的在于提高学生对运动技术进行科学研究的技能。

本书是根据运动生物力学教学大纲编写的,同时照顾到了运动实践日益增长的要求。全书皆以列宁格勒列斯加夫特体育学院*生物力学教研室组织实习作业的经验为基础。在这个学院里指导这项工作的先后有E. A. 科吉柯娃教授、Д. A. 谢苗诺夫副教授、技术科学副博士B. A. 彼得罗夫、E. Г. 科捷耳尼柯娃副教授等,他们对发展П. Ф. 列斯加夫特所奠定的思想都作出过贡献。

本书是由A. Ф. 博察罗夫、Г. П. 依万诺娃、И. Б. 克洛契柯夫、И. М. 柯兹洛夫四位作者集体编写的。

* 列宁格勒体育学院全称为“荣膺列宁和红旗勋章的国立列宁格勒列斯加夫特体育学院”。——译注。

1. 人体动作力学基础*

物体的静止或运动状态决定于它同其他物体的机械相互作用的性质。力是物质实体之间机械相互作用的定量量度。力是矢量，不仅有大小，还具有空间方向特征（图1）。在国际单位制（SI制）中，力的单位是牛顿（1牛顿=1千克·米/秒²）。



图 1 力是矢量

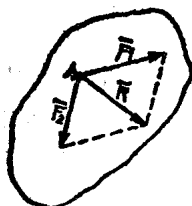


图 2 汇交力系

在现实条件下作用于物质实体的力常是非孤立的力，而是力系。力系有：1) 汇交力系，2) 平行力系，3) 任意力系。汇交力系可以作用于各力汇交点上的一个合力代替（图2）。平行力系可以作用于各平行力中心的合力代替。例如，

* 详见 В. А. 彼得罗夫、Ю. А. 加金合著的《体育专业理论力学》（В. А. Петров, Ю. А. Гагин. Механика Спортивных Движений. М., Физ., 1974. 人民体育出版社即将翻译出版）；С. М. 塔尔格著的《理论力学简明教程》（С. М. тарг. краткий курс теоретической механики. М., «Наука», 1967.）。

在人体各环节重力的这个平行力系中，合力作用中心就是人体的总重心（身体总重心的计算示例见实验作业№ 7）。

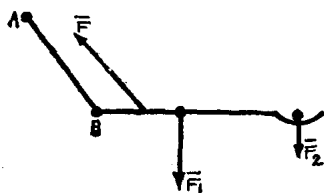


图 3 任意力系

化中心的选定。所以，同样一些环节的重力相对于不同关节的作用完全不同（图 3）（参阅计算图象作业№ 1）。

平面任意力系平衡的必要和充分条件是：主矢和主矩同时为零，即 $\bar{R}_0 = 0$ ； $\bar{M}_0 = 0$ ，其中下标“0”是平面上任意的点，因为当 $\bar{R} = 0$ 时，主矩的大小跟简化中心的选择无关。由此平衡条件可得平衡方程，根据它在直角坐标系的两个轴上的投影有如下形式：

$$\left. \begin{aligned} R_x &= F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx} = 0, \\ R_y &= F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

也就是说，1) 所有各力在两个坐标轴上的投影之代数和分别等于零；2) 所有各力相对于任意一点之矩的代数和等于零，

$$\sum M_{i0}(\bar{F}_i) = \bar{M}_0 = 0. *$$

合力在力学中是集中力，但在现实中许多力都是分布力，这一点在研究生物力学现象时尤应充分重视。

* 原书将式中 $\bar{F}_i$ 误为 F_i 。——译注。

大家知道，作用于刚体的力可分为外力与内力。在活体系统中（跟刚体不同），身体各部分的相对姿位可以发生变化，即发生相对运动。整个人体相对于其他静止物体（如地球）改变自己的位置或进行运动，只有在外力作用下才有可能。作用于物体的力可区分为主动力和约束反力。对于给定物体在空间位移的一切限制都叫做约束。约束物作用于物体的力阻碍着物体的这种或那种位移，这种力叫做约束反力。受到约束的物体叫做非自由体。但若解除非自由体的约束，即用约束反力来代替约束的作用，非自由体便可作为自由体看待，此自由体将受到一个表现为约束反力的广义物体系的作用。解除约束法适用于求解静力学问题。

例 1 体重为 $\bar{P}$ 的滑雪运动员站在与水平面成 α 角的斜坡上（图 4, a）。求维持运动员身体平衡所需摩擦力 $\bar{F}$ 的最小值，并求运动员对坡面的压力 $\bar{Q}$ 。

解：首先应确定要考察哪一个物体的平衡，然后加上给定的和未知的各力。因为力 $\bar{P}$ 作用于滑雪运动员，故力 $\bar{Q}$ 作用于坡面。找出与力 $\bar{Q}$ 等模反向的约束反力 $\bar{N}$ 。这样，已知力 $\bar{P}$ 和未知力 $\bar{F}$ 与 $\bar{N}$ 皆作用于运动员身体，它们是作用于同一物体的力。把运动员身体当作自由体看待（图 4, b），画出作用于其上的主动力 $\bar{P}$ 和 $\bar{F}$ 以及反力 $\bar{N}$ 。利用在汇交力系作用下物体的平衡条件，便可求得上述二未知力。

对于平面力系只须取 O_x 与 O_y 两个坐标轴。算出力 $\bar{P}$ 、 $\bar{F}$ 、 $\bar{N}$ 在这两个轴上的投影，填入表 1：

应用平衡方程(1)，列出沿 x 轴和沿 y 轴的平衡方程：

$$\sum F_{kx} = P \sin \alpha - F + 0 = 0,$$

$$\sum F_{ky} = N - P \cos \alpha + 0 = 0.$$

由第一式得摩擦力 $F = P \sin \alpha$ ，由第二式得斜面的反力 $N =$

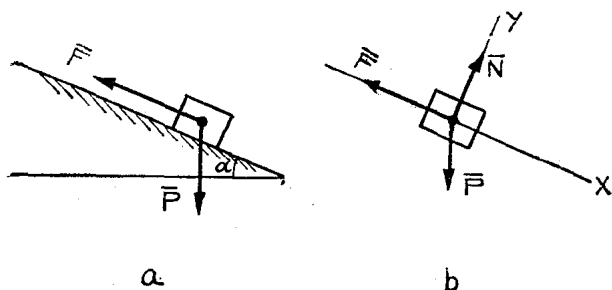


图 4 身体在倾斜坡面上的平衡：
a—物理现象图，b—隔离受力图

表 1

F_x	P	F	N
$F_{x,1}$	$P \sin \alpha$	$-F$	0
$F_{x,2}$	$-P \cos \alpha$	0	N

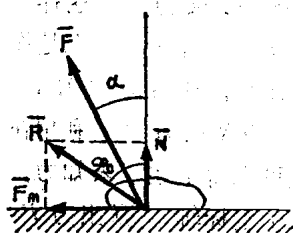


图 5 摩擦角的测定

$P \cos \alpha$ 。

粗糙表面的全反力是法向压力同摩擦力的矢量和。粗糙表面的全反力同该表面法线之间的最大夹角 φ_0 叫做摩擦角，且 $\tan \varphi_0 = \frac{F_m}{N}$ (图 5)。

极限摩擦力 $F_m = f_0 N^*$ ，其中摩擦系数 $f_0 = \tan \varphi_0$ 。任意力 F ，只要同法向间夹角 α 小于摩擦角 φ_0 ，都不能使物

* 原书误为 $F_m = fN$ ——译注。

体沿该平面移动, 因为只有当 $\operatorname{tg} \alpha > \operatorname{tg} \varphi_0$, 即当 $\alpha > \varphi_0$ 时, 不等式 $P \sin \alpha > f_0 P \cos \alpha$ (其中 $f_0 = \operatorname{tg} \varphi_0$) 才能成立。蹬地角同摩擦力之间的这种关系, 滑冰、滑雪等项目的运动员都是很熟悉的, 他们在蹬冰蹬雪时, 摩擦力越大, 蹬推力同水平面之间的夹角就应越小。

到此为止, 我们所讨论的都还是恒力, 尚未考虑到这些力可能随时间而变化。可是作为物体运动原因的力无论是模还是方向都可能变化。给定的主动力或约束反力都可能是变力。力可能随时间而变, 也可能以身体姿势及其运动速度为转移。肌肉收缩力、打击力都随时间而改变; 肌肉的弹力受有关的关节角的影响; 介质(水、空气)阻力取决于运动速度。变力的合成和简化的定理跟恒力相同。

力学中把运动理解为给定物体相对于其他物体的空间位置随时间的变化, 或给定物体各部分之间相互位置随时间的变化。

运动学是从纯几何学观点出发来研究物体的运动。运动学是动力学的一种独特形式的前导, 它考察运动进程中的各类特征指标, 但不涉及引起运动的原因。动力学不同于运动学, 它在研究物体运动时既把注意力放到驱动力上, 又注意物质实体本身的惯性量。

为了测定动点的位置, 总要选择一个物体, 把坐标系固连在它上面, 作为参考坐标系。如果在选定的参考系内物体上各点的坐标值不随时间改变, 始终为恒定值, 则该物体相对于这个参考坐标系处于静止状态; 若各点的坐标有变化, 则该物体相对于这个参考系, 也就是相对于此参考系所固连的物体(参考体)在运动着。

物体的运动发生于空间, 随时间而进行。在一切选定的

参考坐标系内时间是普遍的，统一的，用秒表示。时间是连续变化的标量。力学中一切测量都自某一初始时刻开始，初始时刻的选定是任意的，表为 $t=0$ 。时刻 t 用秒来计测，即从初始时刻起算的秒数，而各时刻之间的差值表示运动的持续时间，或者表示一个动作各个部分持续的时间(时相)。对于人体运动活动过程中动作时间特征指标的研究方法，将在实验作业 № 4 和 № 8 中讨论。

如果物体在任意时刻相对于选定的参考系的位置是已知的，这个物体的运动便是给定的运动。点的运动的特征指标有轨迹、路程、速度和加速度。

确定点的运动的方法有两种：自然法和坐标法。下面讨论这两种方法对于点的平面运动的应用。采用自然法时，点在选定的参考系 O_{xy} 中的运动用轨迹和函数图象来确定：

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

其中 s 为点沿轨迹的位移。用坐标法时，点的运动由沿每一坐标轴的运动方程来确定：

$$\left. \begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \end{aligned} \right\}^{\circ} \quad (3)$$

每一种方法都能完全地描述运动，并且全部运动学特征指标皆可计算。如果采用坐标法，确定一个运动先要算出速度在选定坐标系各轴上的投影 v_x 和 v_y ，然后求出速度的模 v 和速度矢同 x 轴正方向的夹角。

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt}; \quad v_y = \frac{dy}{dt}; \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \\ (\hat{v}, x) &= \arccos \frac{v_x}{v}; \quad (\hat{v}, y) = \arccos \frac{v_y}{v} \end{aligned} \right\}^{\circ} \quad (4)$$

与此相仿，可确定点的加速度：

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

若用自然法，速度的模可按式确定：

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

而速度矢的方向则是轨迹的切线方向，指向运动的一侧。用自然法确定运动，须分别测定加速度的两个分量，一个沿轨迹的切线方向（切向加速度 a_τ ），一个沿轨迹的法线方向（法向加速度 a_n ）：

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}, \quad a_n = \frac{v^2}{R}, \quad (7)$$

其中 R 为在测定某点的加速度时，该点的轨迹曲率半径。

加速度模和加速度矢跟轨迹切线正方向（即运动方向）之间的夹角由下式决定：

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}, \quad (\bar{a}, \tau) = \arccos \frac{a_\tau}{a}. \quad (8)$$

例 2 链球以角速度 $\omega = 573^\circ/\text{秒} = 10$ 弧/秒沿 $R = 2$ 米的圆周匀速转动。求链球加速度的模 a 。

解： 选定坐标系 O_{xy} ，使其原点同圆心重合，并与链球旋转平面共面（图 6）。链球的运动可用自然法或坐标法加以

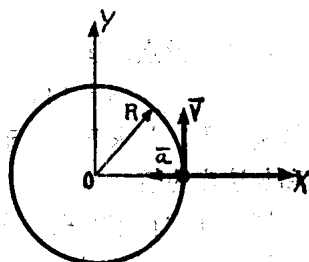


图 6 求解链球运动的运动学特征指标的计算图示

* 原书误为 a_r ，——译注。

确定。若用自然法，以它的轨迹来描述，即用圆的方程 $(x^2 + y^2 = R^2)$ 和点沿圆周运动的定律 $(s = \omega R t)$ 来加以描述。由公式(6)–(8)，我们有：

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

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

若用坐标法，则按两个坐标轴来描述点的运动方程：

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

根据式(4)–(5)确定各坐标轴上的速度和加速度分量，然后求出链球运动加速度的模：

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

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

$$= R\omega^2 \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = R\omega^2。$$

比较两种方法所得的结果，可以看出它们是完全等效的。

例 3 设点的运动由下式决定：

$$x = 14t; \quad y = 7t - 4.9t^2。$$

求轨迹方程，并求开始运动后经过 1 秒，点的位置及点的速度和加速度的模。

解：欲求轨迹方程，先应由两式中消去时间 t 。为此，可由第 1 式得到时间表达式，再代入第 2 式：

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

* 原书误为 $a = a_\tau = \omega^2 R$ ——译注。

经过化简后，便得轨迹方程：

$$y = 0.5x - 0.025x^2.$$

速度和加速度的投影可由式(4)——(5)确定：

1. 欲求点的位置，只须算出 $t=1$ 秒时的 x 值和 y 值：

$$x = 14 \text{ 米}, y = 7 - 4.9 = 2.1 \text{ 米}^*.$$

2. 求 $t=1$ 秒时速度的模：

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

$$v_y = \frac{d}{dt}(7t - 4.9t^2) = 7 - 9.8t = 7 - 9.8 = -2.8 \text{ 米/秒},$$

$$v = \sqrt{14^2 + (-2.8)^2} = 14.3 \text{ 米/秒}^{**}.$$

3. 确定 $t=1$ 秒时加速度的模：

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

$$a_y = \frac{d^2}{dt^2}(7t - 4.9t^2) = \frac{d}{dt}(7 - 9.8t) = -9.8 \text{ 米/秒}^{2***},$$

$$a = -9.8 \text{ 米/秒}^2.$$

在运动教学研究中常用图象法来确定人体的运动。点沿各坐标轴运动的图象可由电影图片获得，为此需拍摄出相应的时间坐标。沿坐标轴运动的图象有助于研究者掌握点在选定参考坐标系中运动轨迹以及速度矢与加速度矢的投影等资料。

刚体的运动常分为平动和转动来研究。

刚体转动的特征指标有角位移(转动角度)、角速度和角加速度。

* 原书此处误为 $y = 7 - 9.8 = -2.8$ 米——译注。

** 原书计算结果是 14.4 米/秒²——译注。

*** 原书把 $a_y = \frac{d^2}{dt^2}(7t - 4.9t^2)$ 误作 $a_y = \frac{d^2}{dt}(7t - 4.9t^2)$ ——译注。