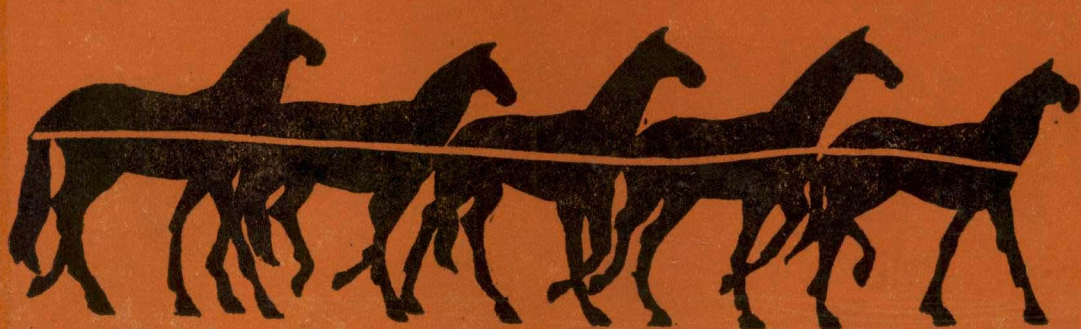


黄秀清

译

生物力学 与 四足兽机械力学



普通生物静力学和生物机械学

(美) D. M. Badoux 著

黄 秀 清 译

蓝 之 中 校

林 永 乐

南京农业大学

1990.10

译 者 的 话

《生物力学与四足兽机械力学》一册是译自〔美〕D·M·Badoux 著的《普通生物静力学和生物机械学》和〔新西兰〕A·S·Davies 著的《四足兽机械力学》两本专辑的合订本。可供综合性大学生物系、农业院校、兽医畜牧院校和有关研究单位的教师、研究人员、研究生、大学生以及培育训练家畜、兽类技术人员阅读参考。

在翻译过程中得到南京大学梁昆森教授、东南大学曹恕教授、南京农业大学谢成侠教授、祝寿康教授、蓝之中副教授、陈友松同志、胡少昶同志、印刷厂等的支持和帮助。译者借此向他们致以谢意。

本册若有错漏之处，尚希各方不吝指正，尤为感激。

译 者

一九九〇年十月于南京

普通生物静力学和生物机械学

目 录

引 论	3-3
力与矢量图解	3-8
应力与应变	8-17
显微结构的生物力学	18-20
骨皮质层的结构	20-20
骨的海绵样介质的结构	20-21
关节软骨的生物力学	22-22
形态发生与生物力学关系	22-23
哺乳动物躯体的生物力学	23-27
胸廓和肩带悬挂的力学机制	27-28
带和肢的构筑	28-32
前肢和后肢的带部、肢柱和肢杆组分	32-39
前肢和后肢的肢身组分	38-40
运 动	40-42
动 力 学	43-46
头的生物力学	46-52
参考书及资料	52-55

前 言

《普通生物静力学和生物机械学》，系译自美国Sisson and Grossmae 的《The Anatomy of the Domestic Animal》一书第五版本的第五章。该书由W·B·SAUNDERS 公司出版，在费城（美）、伦敦（英）、及多伦多（加拿大）发行。

原文中不仅从理论上分析了动物在静止及运动状态时的受力情况，阐述了动物各部份结构的力学原理与性质，还提供了作者多年精心研究的实践资料和大量的实验数据。为研究动物学、解剖学及兽医中有关动物运动系统失调或损伤，提供了力学知识和实践依据，而且为家畜的养殖，培育及提高观赏动物的观赏价值，提供了理论基础和实验方法。

生物力学知识对于从事兽医、解剖及家畜饲养等的科技工作者来说，是大有裨益的。生物力学也是当今的热门学科，在家畜解剖学方面的这种译册，在国内尚属首次出版。对充实和提高这门学科的教学，将起到应有的作用。对应用物理学与兽医学相结合，在国内也将开拓出一条新途径。

南京大学物理系 梁昆森 教授

88·5·

关于译稿“普通生物静力学和生物机械学”的意见

该译稿原文是美国Sisson and Grossmae 所编著“The Anatomy of the Domestic Animal”一书的第5章: General Biostatics and Biomechanics.

原文对动物的受力情况提供了各种物理模型,按照物理定律,对动物在静止时和运动时的力学状态进行了较详细的分析,对于畜牧兽医工作者和生物工作者来说,本书的内容无疑是十分有益的。

由于国内此类书籍甚少,在译稿进一步校正后,出版这本译册对于兽医学和应用物理学都是大有帮助的。

东南大学物理系教授

曹 恕 89.2.15.

关于“普通生物静力学和生物力学”译文的评语

黄秀清老师所译的“普通生物静力学和生物力学”一文系美国Sisson and Grossmal 的《The Anatomy of the Domestic Animal》一书的第五章。有幸拜读了译稿,特作如下评语:

1、黄秀清老师的译文流畅,概念准确,并如实地表达了原作者的意向。

2、生物力学是当今的热门,但在家畜解剖学方面,这篇译文尚属首次。无疑对充实和提高这门学科的教学内容,将起到应有的作用。对应用物理学方面也将在国内开拓出一条与兽医学相结的新途。

建议给予出版发行,这将是家畜解剖学这门学科的幸福,也必将引起物理学界的重视。这本小册子估计会受到两方面学者的欢迎。

南京农业大学 副教授

解剖教研室 主 任

蓝之中

1987.10.9.

引 论

生物机械学的范围和分支

生物机械学涉及到作用在有机体上的力和加速,借助于多种专门的和尖端的技术(Co-ntini and Drillis, 1966)使得生物机械学的分析成为可能。

动物也服从于无生命物体所服从的同样的物理规律和原理;因此,生物力学也象物理力学的分支一样,可分为生物机械学和生物静力学两门亚学科。

生物机械学可再分为生物运动学和生物动力学。生物运动学分析运动而不考虑引起运动的那些力,例如运用电影摄影法来分析马行走时四肢的运动。生物动力学研究由一个不平衡的力系统所引起的运动的变化和确定用于要产生任何预期的运动变化所需要的力。奔跑中狗的四肢力的分析是这问题的一个好例子。生物静力学是处理在静止状态或以匀速直线运动时作用于动物体和它们身上器官的力和力的平衡。作用于站立马体的力的探讨是生物静力学研究的一个例子。

尽管生物力学在分析动物的运动和结构特征时是一种强有力的工具,但未能解释动物体结构的巨大适应的多样性。一只动物力求在自然环境中生存下来和维持生活,这必须依赖对环境所确定的要求的一系列适应,其中有若干是属于单纯的力学性质。考虑到捕食与猎物之间的关系,有时,捕食动物必须进化成具有相当快的速度,才能捕获到猎物;这种高速度仅要求在运动器官方面有明显的力学适应性。动物需要高度发达的感觉器官来跟踪和追击猎物;捕杀猎物需要有合适的爪和牙;循环、呼吸、排泄和神经激素系统也有相应的特殊要求,所有这些必须在动物体的结构中得到协调一致。因此,如下事实是很清楚的:由于对动物所需求的各种形态学适应性完善平衡的结果,其中力学因素起了一定的作用,所以限制了力学解释动物体的结构;换句话说,用之于动物机体不管是其整体或各组成部份,其结构都是相互协调的。

除了这些一般生物学性质的考虑,还必须强调指出,生物力学在兽医实践上也有某种联系。有一种称为“直觉生物力学”,这是在修整马蹄和钉蹄铁的长期实践中发展起来的,这种经验性的知识,需要用实验加以证明。运动系统的失调和损伤病及其治疗需要力学作为基础知识,这已很明显并被普遍接受。因此,活体动物的力学进程这一基础知识对于兽医学学生和从业者来说,显然是大有裨益的。到此为止,基本上作为生物力学研究的引言。读者需要不时参考专业书籍和文献,以获得有关各学科的更详细的知识。

力与矢量图解

力是使处于静止状态或作匀速直线运动状态的物体,产生变化或引起变化趋势的原因。当下面的特点给定时,力就完全被确定。

(1) 力的大小 (以公斤 kg 或牛顿 N 表示, $1\ kg = 10\ N$);

(2) 力的作用点

(3) 力的作用线

任何物理量若必须用有向线段表示, 以便完全加以确定, 都称之为矢量。因此, 一个 5 公斤力作用于一个物体的 O 点并和水平线成 45° 角。可用一条长度为 5 个单位, 每个单位代表 1 公斤并以箭头表示方向, 如图 1 所示。

如果作用在一个物体上的力相互平衡, 那么这个物体即处于平衡状态, 因此, 若有两个等值反向的力 F_1 和 F_2 作用在一个物体的 O 点上, 两力在同一直线上, 它们将相互平衡, 而该物体将处于平衡状态 (图 2)。每一个力都必定有一个等值而反向的力, 即“对于每一个作用力都有一个反作用力”是这条规律的简单表述。术语反作用力经常用来和阻力相区别, 反作用力是由给定物体对力所作用的第二个物体所提供的, 该术语的一个例证可见于 (图 3)。重力 W 是由动物腿传递到地面, 而反作用力 N 则是地面对动物腿的作用。

(译者注)

单个力可以被给定的几个力或给定的系统力所代替, 而不改变其作用在物体上的效应, 称为力的合成; R 代表合力, 因此, 有 $\sum F = R$ 。

为了求出两个相交力 F_1 和 F_2 的合力 R (见图 4), 从 F_1 作用力的方向出发, 取一合适的比例 OA , 在 F_2 作用的方向上, 取相同的比例作 OB 。画成平行四边形 $OBCAO$; 其对角线 OC ; 亦即合力 R , 其大小由 OC 按相同的比例决定。 F_1 和 F_2 是 R 的分力。对一个问题, 我们经常是求出力的分力, 而不必求该力本身, 这显得很有用。这些分力一般是从以 90° 角相交在一个给定的力线上引出。因而, 对给定的 R , 其作用在 O 点和以 90° 角相交在 O 点的 OA 及 OB 两条线

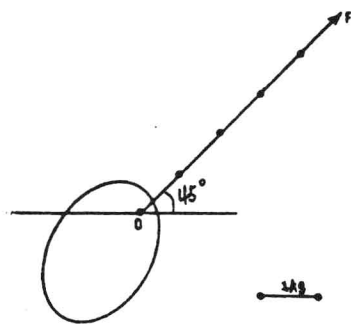


图 1 一个力 F 与水平成 45° 角作用在物体的 O 点上

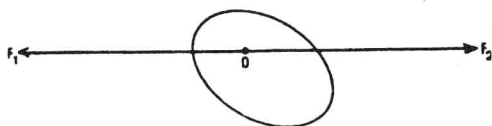


图 2 两个等值反向的力 F_1 和 F_2 , 在物体 O 点相互平衡

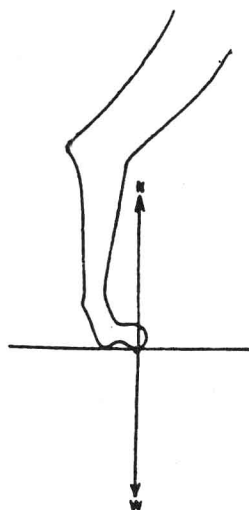


图 3 动物的重力 W 被法向反作用力 N 抵消

上, 求其分力是通过画 OC 等于 R , 按力的平行四边形 $OBCA$, 画出 F_1 等于 OA , F_2 等于 OB , 在这种情况下是矩形, 而 F_1 和 F_2 都是 R 的矩形分力。

对于作用在同一平面上任何一点的几个力 $F_1, F_2 \dots F_n$ 的净效应, 可通过如下途径来求得, 即沿着每一个力引出两条相互垂直的 OX 和 OY 轴, 两者在相交点 O 汇合, 再沿着 OX 和 OY 画出分力, 即沿着 OX 有 $F_1 \cos \alpha_1, F_2 \cos \alpha_2, F_3 \cos \alpha_3 \dots F_n \cos \alpha_n$; 沿 OY 有 $F_1 \sin \alpha_1, F_2 \sin \alpha_2, F_3 \sin \alpha_3 \dots F_n \sin \alpha_n$; 并且 $\sum_{i=1}^n F_i \cos \alpha_i = R_x, \sum_{i=1}^n F_i \sin \alpha_i = R_y$, 所以,

$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$, 处于平衡时, R_x 及 R_y 必须为零, 见 (图 6)。

给定力 F 的力矩, 是这个力对物体相对于某一给定轴 O 产生转动的一种趋势, (图 7)。力矩的大小是力 F 和力的作用线到转轴的垂直距离 d 的乘积。因而, 在图 7 中, F 对 O 的力矩是 $F \times d$ 公斤。

力矩的意义还与顺时针或反时针转动方向有关。合成力矩是物体对转轴各力矩的代数和。当使物体作顺时针方向转动的力矩等于反时针方向转动的力矩时 (当其等于零时), 则该物体处于平衡状态。

两个平行力的合力具有如下性质 (图 8)。

1、合力是给定力之和或差, 应视其为同向或反向而定: $R = F_1 \pm F_2$ 。

2、合力平行于给定的力, 并且更靠近较大的力; 如果这两个力方向相同, 则合力落在它们之间; 如果这两个力方向相反, 则合力落在它们中较大一个力的那边。

3、从合力的作用线到给定力的垂直距离, 是与给定力成反比; 因此,

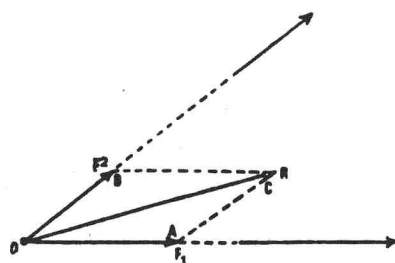


图 4 力的平行四边形合成
 $OC(R)$ 是 $OA(F_1)$ 与 $OB(F_2)$ 的合力

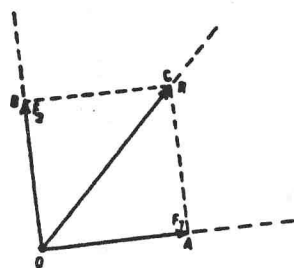


图 5 力的分解
力 $OC(R)$ 被分解为 $OA(F_1)$ 与 $OB(F_2)$ 两个分力

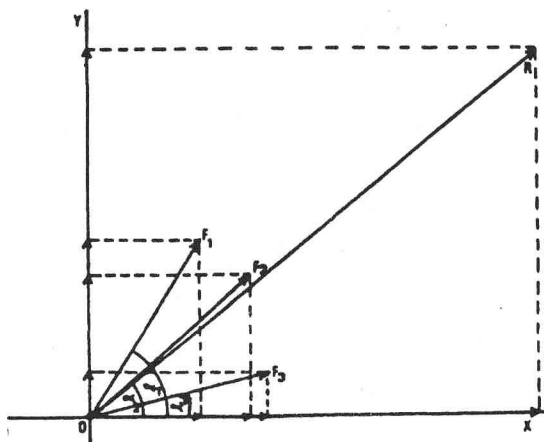


图 6 共面力系的净合力
 R 是 F_1, F_2 与 F_3 的合力

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{b}{a}$$

两个等值反向的力不能为一个合力所代替时，则须将力偶这一概念用于这一系统。如果 d 是它们之间的垂直距离或力臂，那么偶极矩等于 $(F \times d)$ 公斤(图9)。

我们可以把这些基本的力学原理应用到肌肉的作用中。肌肉是由排列在结缔组织简单及复杂的被膜之下的收缩纤维所组成的。这些肌纤维或多或少在表面之间是相互平行的，所以整条肌肉收缩部份的长度大约等于单条肌纤维的长度。这种类型的肌肉称为平行肌。在羽状肌中，肌纤维是呈角度地排列在腱的方向上，肌纤维不是呈平行羽状就是呈放射羽状，以扇形排列方式起作用。肌纤维和腱运动方向之间的角，称为羽状角 α ；该角在肌肉内是变化的，通常是在收缩时，该角变大。

我们以分析由简单平行肌所产生的力来开始我们的讨论，该平行肌是来自于平衡调节时，使屈戌关节活动的单关节肌(图10)。两肢节之间的关节平衡要求肌肉力 F 和B肢节的重力 W 的合力 R 通过该关节的旋转中心点 H 。单条平行肌纤维所产生的力的合成作用线通过联结起点和止点之间的直线来代表，因而肌肉力的方向也容易确定。

当生理横切面面积 D 与静止状态的肌肉纤维成直角时，则力 F 的大小是 D 的函数，因此， $F = (f \times D)$ 公斤(1)。在此式中， f 代表收缩力的系数，假设每平方厘米10公斤。

如果肌肉是羽状肌(图11)，计算将更复杂，由一组肌纤维所产生的合力 F ，可分解为两个分力，该分力沿腱而发生作用。 F_t 遵循如下式子： $F_t = f \times F \cos \alpha$ 公斤(2)，式中 α 是肌肉产生力时羽状角的角度。

各不同组的肌纤维必须公开一一计算，其净作用力， $F_{\text{净}} = F_{t1} f \cos \alpha_1 + F_{t2} f \cos \alpha_2 + \dots + F_{tn} f \cos \alpha_n$ ；对于非常小的肌肉，可用另一种方式计算，即肌

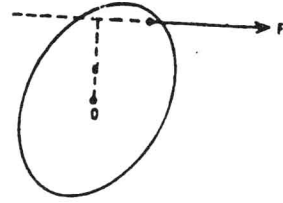


图7 力 F 对物体 O 点的力矩是 $(F \times d)$ kg

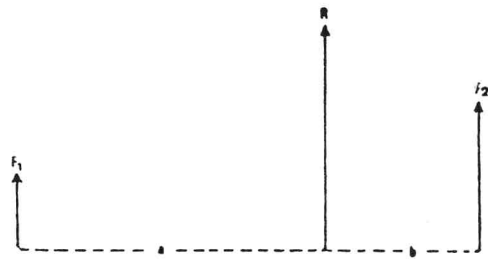


图8 两个平行力 F_1 与 F_2 的合力 R ，等于 F_1 与 F_2 的总和，且 $F_1 \times a = F_2 \times b$

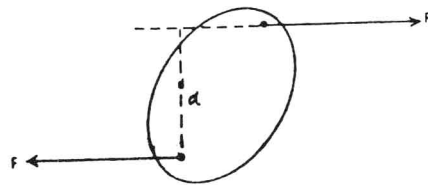


图9 两个平行等值反向的力构成力偶矩—— $(F \times d)$ kg

肉的重量是肌纤维长度 b ，横切面积 D 和比重 C 的乘积。因此：

$$W = D \times b \times C \quad \text{所以} \quad D = \frac{W}{C \times b} \quad (3)$$

对于所考虑的物质，肌肉比重 C ，必须先算出，即从下式求得：

$$C = \frac{W}{c \times b} \quad (4)$$

当 $C = 1.00$ 是一个较理想的数值

把(3)代入(1)得

$$F = \frac{f \times W}{c \times b} = \frac{10W}{b}$$

以MKS制单位的表达式为

$$F = \frac{10^5 \times g \times W}{b \times c} \quad (\text{牛顿}) \quad (5)$$

式中 g 是重力常数， W 是质量(公斤)， b 是肌纤维长度(米)， c 是肌肉比重(kg/M^3)。

肌肉所作的功 K 是肌肉力 F (牛顿)和腱张度(米)的乘积，因此有

$$K = F \times S \quad (\text{焦耳}) \quad (6)$$

由于肌肉力在收缩过程中是不断变化的，计算只是一个平均值。如果腱伸张一般距离 AB ，把 AB 分成无限多的小线元 Δs ，力作用在和中心腱成 α 角的方向上(在羽状肌中)。于是

$$K = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} F_1 \Delta s_1 \cos \alpha_1 = \int_A^B F \cos \alpha \cdot ds \quad (7)$$

其值大约为：

$$K = \frac{1}{2} (\cos \alpha + \cos \alpha_1) F_S \times S \quad (\text{焦耳}) \quad (8)$$

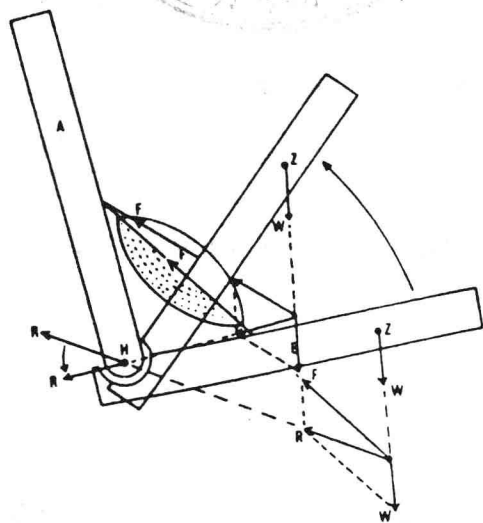


图10 关节间的平衡、要求力系的重力 W 与肌肉力 F 的合力 R 通过 H 点

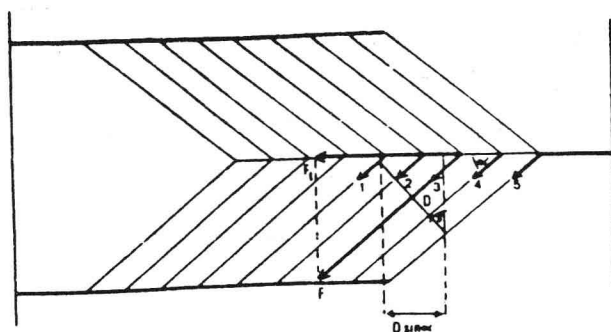


图11 在小肌肉中心腱里、对每一组肌纤维的力为 F_t $D \sin \alpha$ 是中心腱上1到5组肌纤维的生理横截面的投影

式中 α 与 α_1 分别是肌肉收缩的起始和终了时的羽肌角， F_S 是各条肌纤维的力， S 是腱张度。

输出功率 p 是肌肉收缩一次所做的功，除以肌肉收缩所需要的时间，以瓦特表示则。

$$p = \frac{k \text{ (焦耳)}}{t \text{ (秒)}} = \frac{k}{t} \text{ (瓦特)}$$

(有关这一课题的许多有用的练习可以从Williams和Lissner 1967年的著作中找到)。

应力与应变

设 F 为腱以角度 α 作用于一骨之上(图12)的力，这个力可分解为法向力 $N = F \sin \alpha$ ，平行作用于骨的表面。和切向力 $H = F \cos \alpha$ ，垂直作用于骨的表面。

设 XX 代表垂直于骨的长轴的平面，该骨的横切面具有一平方厘米。 XX 平面内的物质是处于力的作用下，而这些物质对这个力的反作用称之为应力。

力 N 与平行等值的 N' 相等， N' 是处于偶矩子和切面的中点(O)， $N'N''$ 有一个力矩 $N \times u$ 。切面在 N 作用下产生法向应变，在 H 作用下产生切向应变，并且由于受偶矩子 M_b 作用的结果，有弯曲的倾向，在 XX 平面内，应力是由下面三方面组成的。

- 1、有一个法向应力 $\sigma_n = \frac{N}{a} \text{ kg/cm}^2$ ，

这个力是可使压缩或伸长，它取决于应变的性质。考虑到箭头是离向 XX 面，因而 σ 是使伸长的应力。

- 2、有一个切向应力 $\tau = \frac{H}{a} \text{ kg/cm}^2$ 。

- 3、弯曲力矩 $M_b = N \times u$ ，使在骨的右边引起一个压缩应力，在骨的左边引起一个伸长应力，两者都是附加在处于(1)情况下的应力上，来自于偶矩子的应力的强度是随 u 的大小而变化的。

结合在 XX 平面内的(1)及(3)的应力，在图13表示，有关运动系统组织的应力，更详细的资料可从Evans (1957、1961)，Frost (1967)和Frankel及Burstein

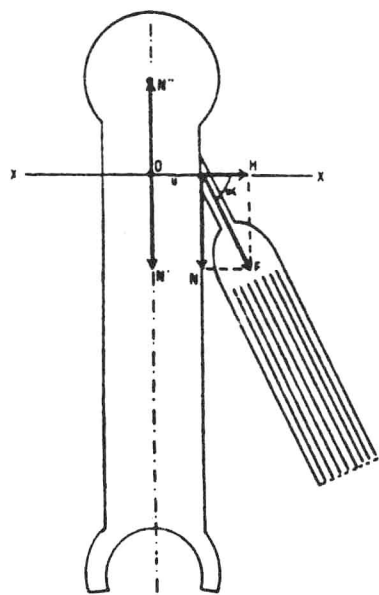


图12 肌肉作用力 F 在长骨骨干上，骨中的应力由横切面 XX 的表面各分力说明

(1970)的工作中获得。

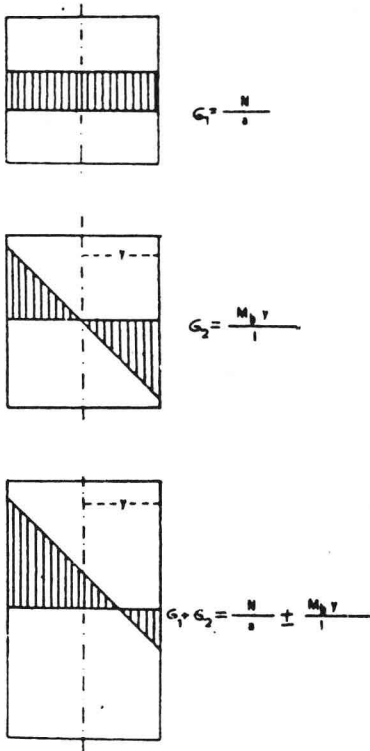


图13 应力的图解表示

骨——肌肉——关节系统

图12所描述的情况是十分普遍的，鉴于在运动系统的各组成部份上，有一个大小变化持久的应变。人们发现有若干对这些应变和运动系统的结构的适应是这样的：弯曲力尽可能地靠近骨的中心轴，而应力则分布在可能大的面积上。

我们将分析后肢的模型来解释上述特征，图14描绘了一左后肢（侧面）的模型，此后肢为单柱状，无关节的，承受100公斤重量W，假设该单柱状是实心的，直径为4cm，则其横切面积： $a = \pi r^2 = 3.14 \times 2^2 = 12.56 \text{ cm}^2$ ，上部的中心轴和通过 h_1 的垂直线构成 30° 角，因此，法向力 $N = 100 \cos 30^\circ = 86.6 \text{ kg/cm}^2$ 。通过一点A，对给定横切面应力的计算遵循如下：

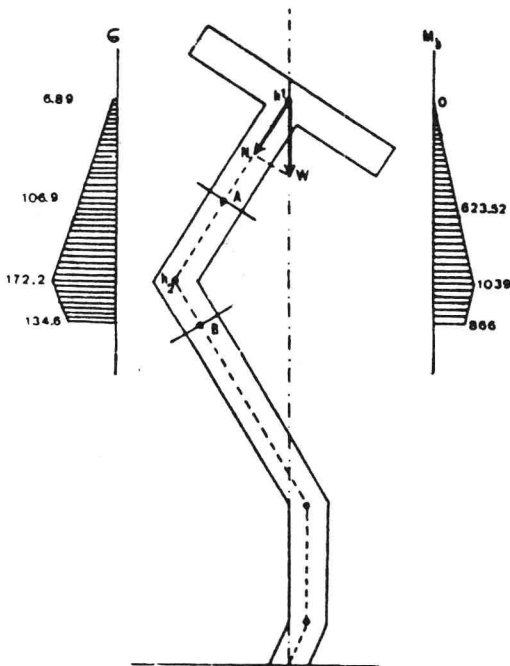


图14 在中心负荷W作用下的实心柱体，最大应力强度是 172.2 kg/cm^2 ，而最大弯曲力矩为 1039 kgcm 。

它是由两部份组成的；一个法向压缩应力 N/a ；和一个附加在其上的弯曲应力的偶矩力—— M_b ， $M_b = 86 \cdot 6 \times 7 \cdot 2 = 623 \cdot 52 \text{ kg cm}$ ，在这切面上的总应力可以从 $\frac{N}{a} \pm \frac{M \times y}{I}$ 式中计算出来。式中 y 是 2 cm ，代表着从单柱状的中心轴到它边缘之间的距离；它被定义为切面的每一个无限小部份（面积元）乘以到中心距离的平方的积分。在圆形实心切面的情况下， $I = \frac{1}{4} \pi r^4 = \frac{1}{4} \times 3 \cdot 14 \times 2^4 = 12 \cdot 56 \text{ cm}^4$ ，对 A 、 h_2 、 B 应力的计算，也如同上法。

在图 15 中，该模型有一个髋关节，一个膝关节和两条纽带 t_1 及 t_2 ，第一条代表股直肌，第二条代表股二头肌的单关节部份。膝关节的平衡要求绕 h_2 的力矩元之和必须为零；因而有 $100 \times 2 = 4 \times t_1$ 所以 $t_1 = 300 \text{ kg}$ ；同样； $t_1 \times 4 = t_2 \times 10$ ，因此 $t_2 = 120 \text{ kg}$ ， w 、 t_1 及 t_2 的合力为 475 kg ，并通过 h_1 以及和股骨中心轴一致，压缩应力是 $\frac{475}{12 \cdot 56} = 37 \cdot 81$

kg/cm^2 ， A 、 h_2 及 B 在水平方向上的应力的计算，和在第一个模型里所用的方法是一样的，计算结果的比较揭示了肌肉功能一个很重要的方面：应力强度的减少是由于它们的作用象“一组纽带”。在这种情况下，股骨的应变从 $86 \cdot 6 \text{ kg}$ 增加到 475 kg ，但 A 的弯曲力矩却从 $632 \cdot 52$ 下降到 $463 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ ，应力强度从 $106 \cdot 09$ 下降到 $104 \cdot 4 \text{ kg/cm}^2$ ；在 h_2 轴减少还更明显，从 $172 \cdot 2$ 减少到 $30 \cdot 7 \text{ kg/cm}^2$ 。

肌肉的静力效应可以很清楚地显示出来。

肌肉的功能概念经常与运动类型相一致。现已证明，肌肉不仅诱导运动（由于肌肉作为运动的起点和止点的结果）。而且也可以调节骨上应力强度。经过一个关节的肌肉数对骨上弯曲力矩及应力强度有着可论证的影响。通过下列的计算，阐明于图 16 中。画着肘关节的模型及纽带 t_1 ，它代表肘关节屈肌，称为臂肌。下臂假设重 w 为 3 kg ，被分成十段，每一段为 $0 \cdot 3 \text{ kg}$ ，矩形分力，在 t_1 的力 N ，遵循 h 处力矩的规律的应用： $3 \times 5 = N \times 3$ ，所以 $N = 5 \text{ kg}$ ，鉴于平衡时，需要向上的力等于向下的力。在肘关节的反作用力是 $5 - 3 = 2 \text{ kg}$ 。从第一到第十段在内的弯曲力矩的计算可在表 1 找到。显然，在线段 3 处，有一个高峰值达 $7 \cdot 35 \text{ kg}$ 。

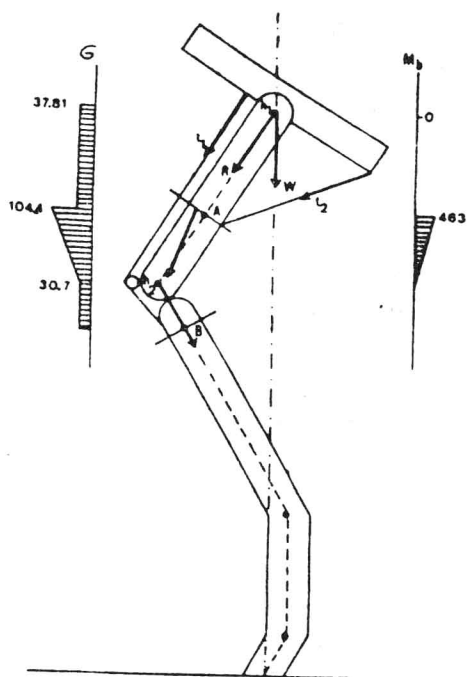


图 15 二条纽带 t_1 和 t_2 相加，减小了应力强度 ($104 \cdot 4 \text{ kg/cm}^2$) 和弯曲力矩 (463 kg cm)

在图 1 7 中, 第二条纽带 t_2 , 代表腕桡侧伸肌, 加到原来模型中。在纽带上的两个垂直分力, 分别是 2 和 1.5 kg , 所以在关节处的反作用力是 $3.5 - 3.0 = 0.5 \text{ kg}$, 弯曲力矩的数值见于表 2, 从第一到第五在内的弯曲力矩的数值都小于前一个模型; 很明显, 通过同一关节的两条肌肉, 产生减小它们所附着在骨上的弯曲倾向。

由于肌肉呈扇形终止于骨上, 也可减小弯曲力矩。在图 1 8 中, 一肌肉对一骨产生一拉力 F 为 12 kg , 平衡时要求在 A 点的反作用力为 7.2 kg , 在 B 点为 4.8 kg , 各段弯曲力矩的数值见于表 3。

在图 1 9 中, 肌肉呈扇形终止于骨上, 12 kg 的净拉力被分成 5 个 2.4 kg 的分拉力, 相应的弯曲力矩见于表 4, 这证明了肌肉有一个尽可能分布在较大的骨表面积上的效应。

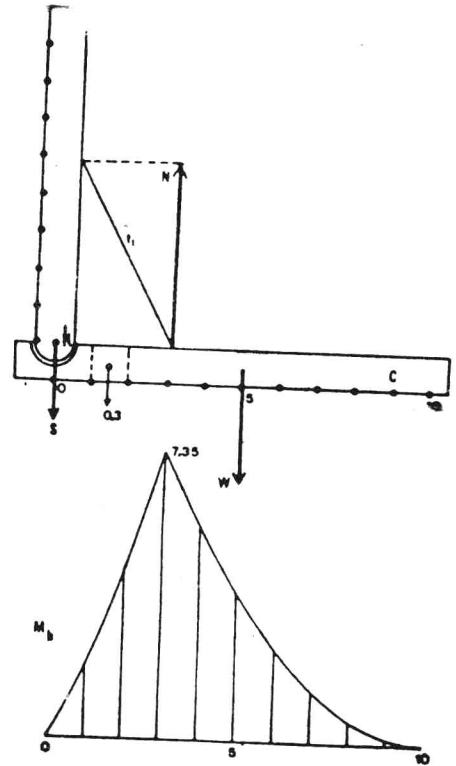


图 1 6 在关节 h 中, 下臂 C 由力 N 平衡

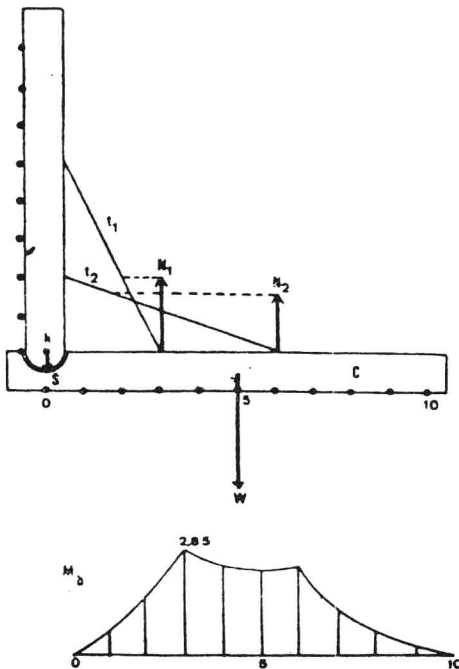


图 1 7 在关节 h 中, 下臂 C 由两个力 N_1 与 N_2 平衡

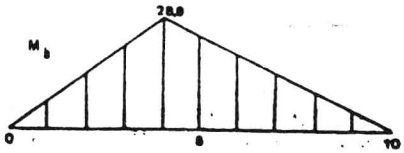
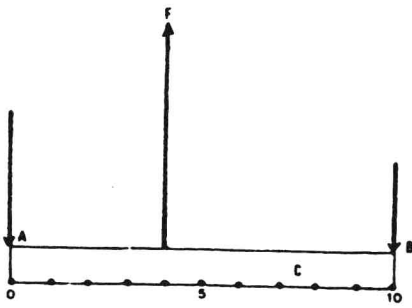


图 18 长骨 C 在力 F 作用于第 4 点处的情况

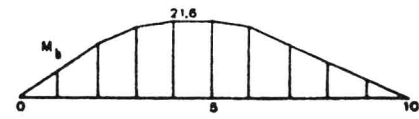
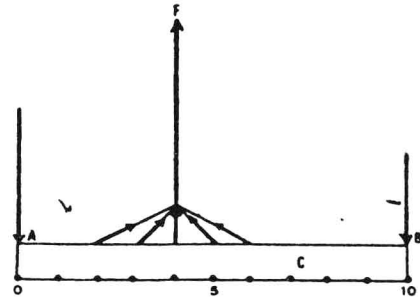


图 19 长骨 C 在力 F 作用于扇形肌的情况

表 1 肘关节的弯曲力矩

段	$M_b(\text{kg} \cdot \text{cm})$
0 (2×0)	0
1、(2×1)+(0·3×0·5)	2·15
2、(2×2)+(0·6×1)	4·60
3、(2×3)+(0·9×1·5)-(5×0)	7·35
4、(2×4)+(1·2×2)-(5×1)	5·40
5、(2×5)+(1·5×2·5)-(5×2)	3·75
6、(2×6)+(1·8×3)-(5×3)	2·40
7、(2×7)+(2·1×3·5)-(5×4)	1·35
8、(2×8)+(2·4×4)-(5×5)	0·60
9、(2×9)+(2·7×4·5)-(5×6)	0·15
10、(2×10)+(3×5)-(5×7)	0

表2 肘关节的弯曲力矩，具有两条肌肉通过这一关节

段	M_b (kgcm)
0、(0.5×0)	0
1、(0.5×1)+(0.3×0.5)	0.65
2、(0.5×2)+(0.6×1)	1.60
3、(0.5×3)+(0.9×1.5)-(2×0)	2.85
4、(0.5×4)+(1.2×2)-(2×1)	2.40
5、(0.5×5)+(1.5×2.5)-(2×2)	2.25
6、(0.5×6)+(1.8×3)-(2×3)-(1.5×0)	2.40
7、(0.5×7)+(2.1×3.5)-(2×4)-(1.5×1)	1.35
8、(0.5×8)+(2.4×4)-(2×5)-(1.5×2)	0.60
9、(0.5×9)+(2.7×4.5)-(2×6)-(1.5×3)	0.15
10、(0.5×10)+(3×5)-(2×7)-(1.5×4)	0

表 3

段	M_b (kgcm)
0(7.2×0)	0
1(7.2×1)	7.2
2(7.2×2)	14.4
3(7.2×3)	21.6
4(7.2×4)-(12×0)	28.8
5(7.2×5)-(12×1)	24.0
6(7.2×6)-(12×2)	19.2
7(7.2×7)-(12×3)	14.4
8(7.2×8)-(12×4)	9.6
9(7.2×9)-(12×5)	4.8
10(7.2×10)-(12×6)	0