

师范院校体育系科试用讲义

# 运动生理学

师范院校体育系运动生理学编写组

90414  
~~17896~~

全国师范院校体育系、科试用讲义

# 运 动 生 理 学

师范院校体育系运动生理学编写组编写

一九八三年八月



# 编写说明

本讲义（试用本）是根据教育部80年颁发的“高等师范院校体育专业教学计划”（试行草案）和教育部82年“关于组织编写高等师范院校体育专业各科教材的通知”的要求，由教育部组织编写的。按照教育部的意见，试用本由编写本教材的召集单位湖南师院组织印刷，供全国师范院校体育系、科试用。

运动生理学是高师体育专业的专业基础课。在编写中，根据高师体育系培养目标和本课程在教学计划中的地位以及理论联系实际的原则，力图既突出本课程的应用性，尽量结合中学体育教学及业余训练实际，充分反映年龄特征；又加强本课程基础理论的阐述；同时适当地反映运动生理学现代水平。但由于在高师体育系中，把人体生理学与运动生理学分别独立为一门课程编写教材，尚属首次，既无经验，又乏资料；更由于编写组人员的业务水平有限和时间紧促，在本讲义的体系和内容上，不当与错误之处，在所难免，热切希望各院校在试用过程中提出宝贵意见，以便进一步修改定稿。

参加本书编写的单位和人员有：湖南师院王步标付教授、肖泽亮讲师，北京师大张志贤付教授、杭州大学华明付教授、上海师院邓树勋付教授、福建师大洪太田讲师、东北师大梁桂香讲师。本试用讲义在编写中，曾先后在杭州大学和福建师大进行两次讨论、修改，参加讨论、修改的单位和人员还有：河北师大王秀玲付教授、北京体师李妙琴付教授、南京师院张一鹏付教授、昆明师院许永佩付教授、西北师院汪锡福付教授、新乡师院许蕴璋付教授、宛霞讲师，东北师大金岭松讲师、湖南师院曾凡第讲师。付印前，由王步标付教授进行了初步的统稿。

湖南师院电教科欧运湘同志为本书设计了封面。湖南师院教务处、湖南师院体育系、长沙岳麓印刷厂的同志，在本书付印与印刷过程中给予大力的支持和帮助，特此表示衷心的感谢。

1982年7月长沙。

# 目 录

|                    |        |
|--------------------|--------|
| 前 言                | ( 1 )  |
| 第一章 肌肉的工作          | ( 3 )  |
| 第一节 肌肉工作的特征        | ( 3 )  |
| 一、肌肉工作的形式          | ( 4 )  |
| 二、肌肉工作的力学表现        | ( 5 )  |
| 三、肌肉的机械功和功率        | ( 10 ) |
| 四、肌电图在了解肌肉工作中的作用   | ( 12 ) |
| 第二节 肌纤维类型与运动能力     | ( 14 ) |
| 一、两类肌纤维的形态机能特征     | ( 14 ) |
| 二、人骨骼肌中两类肌纤维的分配    | ( 17 ) |
| 三、肌纤维类型与运动能力       | ( 18 ) |
| 四、训练对两类肌纤维的影响      | ( 19 ) |
| 第二章 运动技能的形成        | ( 23 ) |
| 第一节 运动技能的形成过程      | ( 23 ) |
| 一、运动性条件反射的建立       | ( 23 ) |
| 二、运动技能形成过程的时相变化    | ( 27 ) |
| 第二节 影响运动技能形成和发展的因素 | ( 29 ) |
| 一、调动两个积极性          | ( 30 ) |
| 二、提高输入信息的有效性       | ( 30 ) |
| 三、反馈信息的合理动用        | ( 31 ) |
| 四、其他影响因素           | ( 32 ) |
| 第三章 运动中氧的运输与摄取     | ( 34 ) |
| 第一节 需氧量与氧债         | ( 34 ) |
| 第二节 最大吸氧量          | ( 36 ) |
| 一、最大吸氧量的测定方法和正常值   | ( 37 ) |
| 二、决定最大吸氧量的生理因素     | ( 43 ) |
| 三、训练对最大吸氧量的影响      | ( 49 ) |
| 四、促进最大吸氧量增进的条件     | ( 52 ) |
| 第三节 无氧阈值           | ( 52 ) |
| 一、概 念              | ( 52 ) |
| 二、无氧阈值与其它生理因素的关系   | ( 53 ) |
| 三、无氧阈强度训练的价值       | ( 55 ) |
| 四、无氧阈值的年龄特征        | ( 55 ) |
| 第四章 运动中能量的供应       | ( 57 ) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 第一节 人体安静时和活动时的能耗量           | (58)  |
| 一、安静时的能耗量                   | (58)  |
| 二、常人和运动员每日平均能耗量             | (59)  |
| 三、运动活动时的能耗量                 | (61)  |
| 四、肌肉工作的机械效率                 | (64)  |
| 第二节 人体运动时的能量供应过程            | (66)  |
| 一、肌肉活动的直接能源—A T P           | (66)  |
| 二、肌肉活动时A T P的再合成            | (66)  |
| 三、肌肉活动过程中能源物质的动用            | (68)  |
| 第三节 人体内三种能量系统的特性            | (70)  |
| 一、磷酸原系统                     | (70)  |
| 二、乳酸能统系                     | (72)  |
| 三、有氧氧化系统                    | (73)  |
| 第四节 运动活动与能量连续统一体            | (74)  |
| 一、能量连续统一体的概念                | (74)  |
| 二、能量连续统一体的形式                | (74)  |
| <b>第五章 身体素质的生理学基础</b>       | (78)  |
| 第一节 力量素质                    | (79)  |
| 一、力量素质的分类                   | (79)  |
| 二、力量素质的生理基础                 | (80)  |
| 三、力量素质的自然增长                 | (82)  |
| 四、力量素质的训练                   | (84)  |
| 第二节 速度与速度耐力素质               | (89)  |
| 一、速度和速度耐力素质的生理基础            | (89)  |
| 二、速度和速度耐力素质的自然增长与训练         | (90)  |
| 第三节 一般耐力素质                  | (94)  |
| 一、一般耐力素质的生理基础               | (95)  |
| 二、一般耐力的自然增长与训练              | (98)  |
| 第四节 灵敏和柔韧素质                 | (100) |
| 一、灵敏素质                      | (100) |
| 二、柔韧素质                      | (101) |
| <b>第六章 运动过程中人体工作能力变化的特点</b> | (103) |
| 第一节 赛前状态                    | (103) |
| 第二节 进入工作状态和稳定状态             | (104) |
| 一、进入工作状态                    | (104) |
| 二、稳定状态                      | (106) |
| 第三节 运动性疲劳                   | (107) |
| 一、运动性疲劳学说简介                 | (107) |
| 二、运动性疲劳的年龄特征                | (109) |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 三、运动性疲劳的判断                   | 110 |
| 四、消除运动性疲劳的措施                 | 111 |
| 五、恢复过程                       | 112 |
| 一、能量物质的恢复过程                  | 112 |
| 二、人体内生理功能的恢复过程               | 113 |
| 三、恢复过程的年龄特征                  | 115 |
| <b>第七章 体育教学与训练的生理基础</b>      | 116 |
| <b>第一节 体育教学与训练主要原则的生理学基础</b> | 116 |
| 一、全面身体发展                     | 116 |
| 二、循序渐进                       | 119 |
| 三、区别对待                       | 119 |
| <b>第二节 运动量的生理学评价</b>         | 124 |
| 一、影响生理负荷量大小的主要因素             | 124 |
| 二、体育教学与训练的适宜运动量的生理学分析        | 125 |
| <b>第三节 若干训练方法的生理学分析</b>      | 128 |
| 一、重复训练法                      | 129 |
| 二、间歇训练法                      | 130 |
| 三、持续训练法                      | 130 |
| 四、循环训练法                      | 131 |
| 五、比赛训练法                      | 132 |
| <b>第四节 准备活动与整理活动的生理作用</b>    | 132 |
| 一、准备活动                       | 132 |
| 二、整理活动                       | 134 |
| <b>第五节 体育教学与训练效果的生理学评定</b>   | 135 |
| 一、体育教学与训练效果的生理学评定方法          | 135 |
| 二、常用生理指标的分析与评价               | 141 |
| <b>第八章 某些运动项目的生理特点</b>       | 149 |
| <b>第一节 周期性练习的生理特点</b>        | 149 |
| 一、跑                          | 149 |
| 二、游泳                         | 153 |
| 三、滑冰                         | 154 |
| <b>第二节 非周期性练习的生理特点</b>       | 156 |
| 一、体操                         | 156 |
| 二、投掷                         | 157 |
| 三、武术                         | 158 |
| <b>第三节 混合性练习的生理特点</b>        | 160 |
| 一、球类运动                       | 160 |
| 二、跳跃                         | 162 |

# 绪 言

运动生理学是生理学的一个分支,研究人在体育活动过程中各种机能变化的规律,指导人们合理地从事体育锻炼或科学地组织运动训练。运动生理学是师范院校体育专业的专业基础理论课,体育系学生学习运动生理学的目的是:(1)掌握在体育运动影响下,人体各种生理机能(如肌肉活动、心肺功能、能量供应)的适应性变化及其发展变化的规律;明确体育锻炼对提高人体各种活动能力(如力量、速度、耐力等)的作用及其生理机制。(2)掌握体育锻炼及运动训练的基本生理学原理,特别是青少年生理机能的年龄、性别特征与体育锻炼的关系,为科学地从事体育教学和青少年业余训练打下理论基础;(3)初步掌握评定人体机能能力的基本科学方法和依据人体机能变化从事体育教学和训练的基本理论。

运动生理学的研究对象是人。运动生理学的知识主要是通过对人体的测定、实验而得到的。但也常采用动物做为实验对象,以便在特定的条件下对运动所引起的某一生理机制进行实验观察,特别是当这种实验要损及机体时,如将雄性动物去势以研究雄激素对运动能力的影响。

对人体的测定和实验常用的方法有:(1)运动现场测定法:这种方法是在运动场上直接测定体育锻炼或运动训练时(如运动前、运动后即刻,运动中完成某项练习后)运动者某些生理机能的变化。这种测定方法的特点是符合运动的实际情况,且随着遥测仪器的使用,已能在运动过程中直接对某些生理指标进行测定,如心率。但由于易受运动环境,研究条件的影响,给测量结果的准确性和精确分析造成一定的困难。(2)实验研究法:这种方法是让受试者按照研究目的所预定的训练方案,在实验室内利用各种训练器械如跑台、自行车功量计进行实验性训练,并在训练前后或过程中进行某些生理指标的测定,以了解各种(如不同训练方式,强度…等)训练与某些生理机能变化的特定关系或对人体某一机能的特定影响。这种方法的优点是研究条件容易控制,对欲研究的问题能做较深入的分析,但不能大规模使用。(3)机能测试法:通过对不同年龄、性别经常锻炼者和不锻炼者或不同训练水平,不同运动项目的运动员在同一条件下(安静时,定量工作时等)各种生理机能进行测定,以了解体育锻炼和运动训练对提高人体各种生理机能的作用和规律。这种测定包括横向研究和纵向研究两种方式。横向研究是通过对不同年龄、性别或不同训练水平的人群,进行一过性的测定,从中得出某些生理机能变化规律。如通过对10—18岁各年龄组的青少年台阶试验后心率的变化进行测定,以了解青少年台阶试验后心率变化的年龄特征。纵向研究是对同一组或同一受试者进行多年性的追踪研究。

目前,由于新的研究方法的建立和新的科学仪器的采用,运动生理学的研究不论在广度和深度上都日益发展。特别是分子生物学出现后,运动生理学在继续开展宏观的研究如心肺功能的同时,也开始了微观的即分子水平的研究,如运动训练对两类肌纤维机能特性的影响的研究。

人体是一个对立统一的整体。从某种意义上说,运动生理学是从整体水平来研究人体机

能发展变化的科学。因为任一运动活动的实现，除有赖于不同肌群协调有序地用力收缩以完成巨大的功外，还有赖于有大量的能量充分供应。例如，剧烈运动时，能耗量比安静时增加到几倍至十几倍，这时，不仅需氧量较安静时增大几倍到十几倍，同时代谢产物也相应的增多。因而必须充分动员身体中呼吸、循环、和排泄等器官的机能，使之与肌肉工作协调配合，为运动的肌肉提供所需要的氧，清除代谢产物和维持内环境的恒定，这样，运动活动才能得以持续进行下去。而呼吸、循环和排泄等器官的机能之所以与肌肉工作协调配合，则是依靠中枢神经系统及一些内分泌器官分泌的激素来实现统一调控的。可见，运动时，各器官机能的协调活动是十分重要的，凡身体中各器官机能的协调能力越好，则运动能力也相应越高。

运动生理学是在人体生理学的基础上发展起来的。即是在人体生理学阐明的正常人体生理机能活动的规律的基础上，运动生理学进一步阐述在体育运动影响下，人体生理机能活动发展变化的规律。运动生理学与运动生物化学关系密切，一方面，运动生物化学是在运动生理学的基础上发展起来的；另一方面，运动生物化学所阐明的运动时人体内的生化变化规律，对认识运动时人体生理机能的变化具有重要意义。例如，运动生物化学揭示的，在训练影响下，快肌和慢肌纤维中酶活性变化规律，对认识两类肌纤维的运动机能就具有重要意义。运动生理学也是体育保健学和人体测定等课程的基础，体育保健中的机能评定，人体测定中有关机能测定方法的应用，均是以人体生理学和运动生理学所阐述的基本理论、基本知识和基本技能为基础进行的。

(湖南师范学院 王步标)



# 第一章 肌肉的工作

肌肉包括骨骼肌、心肌和平滑肌。本章只讨论骨骼肌的工作，因此，本章中所用肌肉一词，实指“骨骼肌”。

前已述及，运动生理学的主要任务是研究在运动活动中或影响下，人体机能能力的急性和慢性的改变。而人体任一运动动作的实现，都有赖于肌肉的活动，即通过肌肉的收缩，牵拉骨杠杆产生位移或固定骨杠杆于一定位置而实现各种运动活动。因此，运动生理学的各个方面都直接或间接与肌肉所实现的工作特性相关，为此，我们把肌肉的工作作为本书的开端。

## 第一节 肌肉工作的特征

在着手考虑肌肉的工作时，必须想到，肌肉能完成各种运动活动，是由于肌肉的不同的结构和机能水平结合实现的。这些不同结构和机能水平包括全身各肌群的协调活动，单块肌肉，单块肌肉中的单个肌纤维，每一肌纤维中的收缩成分，收缩成分中的蛋白质丝等。本节是从单块肌肉，即器官水平来研究肌肉的工作。

作为一个器官的单块肌肉，同身体中其他器官一样，由几种组织构成。构成肌肉的基本组织有：肌组织（由肌纤维组成）、结缔组织、神经组织。此外，肌肉还分布有丰富的血管网。其中，肌纤维构成肌肉的主体，肌肉器官的绝大部分（大于90%）由肌纤维组成，它是肌肉中的收缩成份，其专门机能是通过收缩而产生拉力。肌肉中的其他组织即起着调节和支持作用。

肌肉的结缔组织成份在结构机能上紧密地与肌纤维相连。肌内膜、肌束膜和肌外膜以及肌腱均由结缔组织构成。

肌肉中的结缔组织是肌肉中“弹性成份”的重要构成部份。肌肉中的弹性成份，由肌肉中的结缔组织、肌腱、Z线和横桥的被动弹性组成，它与肌肉的“收缩成份”成并连或串连存在（图1—1）。肌肉的弹性成份在肌肉收缩的力学中起着重要作用。例如，当收缩成份缩短

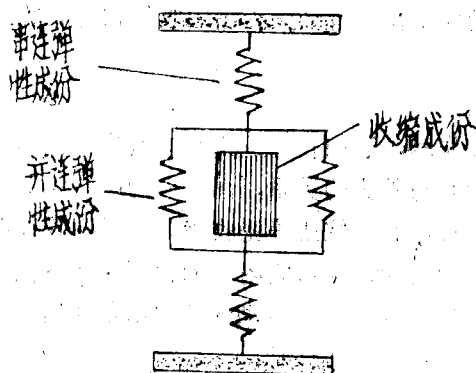


图1—1 肌肉的收缩成份和弹性成份排列示意图

时，弹性成份被拉长而将前者释放的部份能量吸收贮存起来，这如同通过一条橡皮带而提起一个重物，开始橡皮带被拉长而贮存能量，当能量贮存足够时（即相当于重物时），重物即被提起（图 1—2）。这种贮存的能量，其后即以弹性反作用力的形式发挥出来，而促使肌肉产生的运动速度，超过肌肉缩短的最大速度，肌肉弹性成份这种作用实际上是实现收缩力的第二种机制，是提高有节奏的和弹性反冲性（如跳远）运动的效率的根据。例如，跑中发挥力量的肌群在蹬地前所做的伸展，实际上是利用它来贮备能量（力），以便其后将它转化为向前的推进力，而增进跑速。研究证明，跑中消耗的能量 40~50% 是用于此种反作用力的。外此，由于弹性成份的伸展特性可吸收一部份力，从而使收缩成份产生的张力变化趋于缓和，在完成跳跃、跑步、投掷等急剧运动时，起着保护的作用，而防止肌肉的损伤。

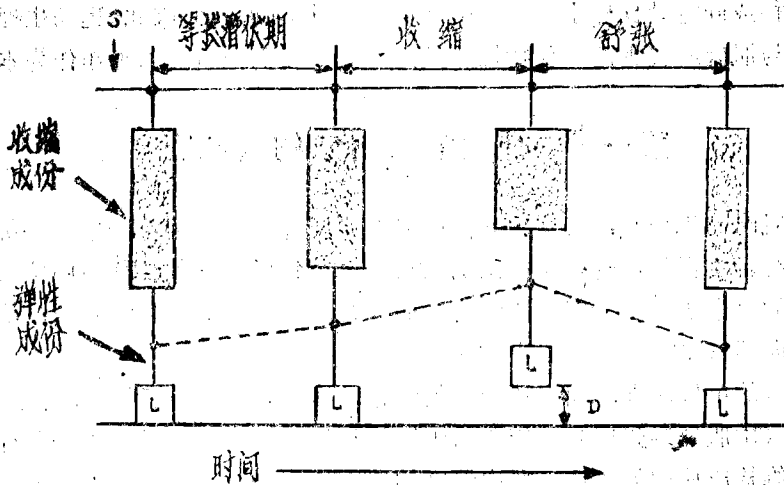


图 1—2 等长收缩的力学观

S = 刺激，L = 负荷；D. 肌肉尽力缩短的最大距离（虚线）。在受刺激后的等长潜伏期中，肌肉在能完成任何外功之前，其收缩成份中所增加的张力必需使其弹性成份变形。

## 一、肌肉工作的形式

肌肉能完成各种运动动作或工作，均是通过肌肉收缩这一专门机能来实现的。肌肉收缩时表现出长度和张力的变化，根据不同的长度和张力变化的配合，肌肉的工作有动力性和静力性工作两种形式。动力性工作又可区分为缩短收缩和拉长收缩。

### （一）动力性工作

肌肉在完成动力性工作时，肌肉长度发生明显变化。根据肌肉长度变化的特点以及肌肉收缩时发生的张力（内力）与外力的关系，而又分为：

1. 缩短收缩 它又称向心收缩或等张收缩。当肌肉收缩时所产生的张力（内力）大于外加阻力（负荷）时，肌肉缩短，牵拉它附着的骨杠杆做相向运动，这种收缩叫缩短收缩。它是人体得以实现各种加速运动或位移运动的基础，如屈肘，高抬腿、挥臂等。缩短收缩时，肌肉消耗了大量的能量用以完成外功。

2. 拉长收缩 它又称离心收缩。当肌肉收缩时所产生的张力小于外力时，此时，肌肉

虽积极地收缩，但仍然被拉长了，这种收缩，即称拉长收缩，拉长收缩在实现人体运动中，起着制动或减速的作用。例如，在跑步中，当屈髋肌群产生强烈的缩短收缩而使大腿快速抬高到一定限度时，伸髋肌群即积极收缩以制止其过分上抬，但由于伸髋肌群产生的张力小于屈髋的张力，此时，它虽积极收缩，仍然被拉长了。又如，双手正握杠铃进行弯举时，屈肘肌群产生缩短收缩，使杠铃从肘关节伸 180° 位置弯举到屈 90°，其后，若屈肘的张力下降到低于杠铃的重量，重力将使肘关节被动伸展，杠铃下落，此时，屈肘肌群转为产生拉长收缩，以减缓杠铃的下落速度。拉长收缩时，肌肉做负功。

## (二) 静力工作

当肌肉收缩产生的张力等于外力时，肌肉虽积极收缩，但长度并不变化，这种收缩叫静力工作或等长收缩。实际上，如图 1—3 所示，此时整块肌肉虽未缩短，但收缩成份却积极收缩，而产生很大的张力，此张力使弹性成份拉长并作用于外力。等长收缩时，肌肉的张力可发展到最大，但由于没有位置的移动，从物理学上来说，肌肉此时未做外功，但仍然消耗了很多能量。在实现人体运动中，等长收缩起着支持、固定和保持某一姿势的作用，如站立、悬垂、支撑等。应该指出，由肌肉等长收缩所产生的固定功能在实现位移运动中起很重要的作用，例如，要使一关节产生位移运动，当运动此关节的一端缩短时，另一端就必须固定。

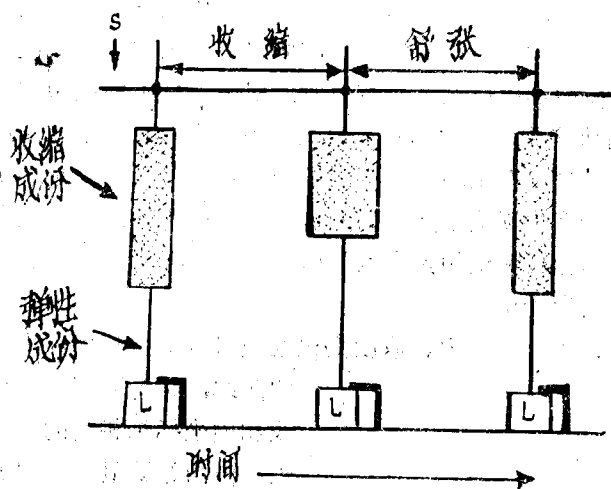


图 1—3 等长收缩的力学观

S = 刺激      L = 负荷

实验中，肌肉受夹具阻止不能缩短，然而收缩成份作用于负荷的张力使弹性成份拉长（见图中央）。

总之，完整人体中任何一个运动动作的实现，都有赖于这三种肌肉工作形式的配合。在实际工作中，我们把跑、跳这些运动称之为动力性工作，把体操中的支撑、悬垂称之为静力性工作，并不意味着这些动作中绝不包含其他肌肉工作形式；而只是表明这种肌肉工作形式在这类活动中起主要作用。

上述三种肌肉工作的形式有关知识总结如表 1—1。

表 1-1 肌肉的三种工作形式的比较

| 工作形式           | 肌肉长度变化 | 外力与肌张力的比较 | 在运动中的机能 | 肌肉对外所作的功 | 能量供给率  |
|----------------|--------|-----------|---------|----------|--------|
| 缩短收缩<br>(向心收缩) | 缩短     | 小于肌张力     | 加速      | 正        | 增加     |
| 拉长收缩<br>(离心收缩) | 拉长     | 大于肌张力     | 减速      | 负        | 减少     |
| 等长收缩           | 不变     | 等于肌张力     | 固定      | 未        | 小于缩短收缩 |

## 二、肌肉工作的力学表现

### (一) 肌肉收缩的张力-速度关系

肌肉收缩的张力-速度关系是指负荷对肌肉收缩速度的影响。实验发现，肌肉的收缩速度，随肌肉收缩时所对抗的负荷量（称为后负荷）的变化而变化，即随负荷的增加而减小。在实验中，逐步增加肌肉的负荷，肌收缩产生的张力虽逐渐增大，但肌收缩的速度和缩短的长度即逐渐减小，当负荷增加到超过某一数值时，肌肉全然不能缩短，此时，肌缩短的速度及长度均等于零，但肌肉所产生的张力即达到最大（简称  $P_0$ ）。由于此时肌缩短的距离为零，故从理论上说，肌肉此时是没有做功的。在同样的实验中，当逐次减小肌肉的负荷时，肌肉收缩的速度和缩短的长度也逐次增大，但发展的张力即逐次减小。当负荷减小到零时，肌缩短的速度达到最大，简称最大缩短速度（ $V_{max}$ ），但这时肌肉的张力即为零，故从理论上讲，肌肉此时也是没有做功的。

若将上述不同负荷时肌肉的张力、速度变化绘成对应的坐标图，即可得到图 1-4 所示

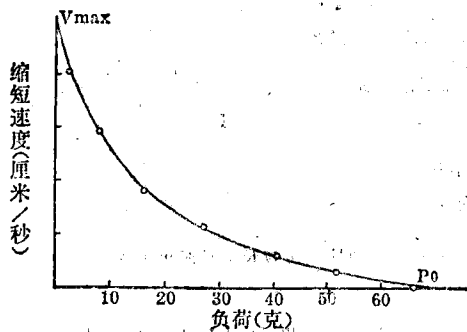


图 1-4 骨骼肌的张力-速度关系曲线

的曲线，称为张力-速度关系曲线。图中曲线和横坐标轴相交的一点，肌肉完全不能缩短，张力达到最大（以  $P_0$  表示）；在曲线和纵坐标相交的一点，肌肉产生的张力为零，但缩短速度最大（ $V_{max}$ ），在这两个极端之间，曲线为双曲线式，说明肌肉产生的张力和当时的缩短速度呈反变。

肌肉的张力-速度关系这种特性，主要取决于肌肉的性质。肌肉收缩时产生的张力和速度的变化，是分别由两种独立的机制控制的。肌收缩时产生张力的多少，取决于活化的横桥数目，而肌收缩的速度即取决于能量释放的速率和肌凝蛋白 ATP 酶的活性，而与活化的横桥数目无关。当负荷较大时，有更多的横桥处于活化状态，以增加肌肉末端的张力，但却抑制 ATP 的水解，减低能量释放率，从而使

肌收缩速度减慢。而当负荷减低时，单位时间内能量释放速率增加，因而肌收缩速度亦增加。肌收缩速度与活化的横桥数目无关，可用这样一个事例加以解释：如果一个人拖着一根无负荷的绳以最大速度每小时跑10公里，那么三个或更多的人排在一起跑的速度也是一样的

$$P=0 \quad V=V_{max}$$

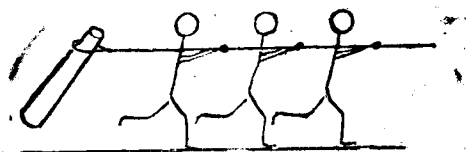


图1-5 比拟一块肌肉在负荷为零时的收缩状态 ( $P=0$ ,  $V=V_{max}$ ) 所有活动点都处于释放能量的状态

此外，肌肉的最大缩短速度还与肌凝蛋白内源性ATP酶活性密切相关，肌凝蛋白ATP酶活性高时，最大缩短速度 ( $V_{max}$ ) 也高；而肌凝蛋白ATP酶活性低时， $V_{max}$  也低。根据张力-速度关系曲线来分析，在其他条件相同的情况下，如果我们希望收缩有较大的速度，则负荷必须做相应的减少；如果肌肉要克服较大的阻力，则缩短速度不可能维持原有的数值；如果要完成最大的物理功，则负荷过大过小皆非所宜，以中等负荷较为理想。所以，在运动或劳动实践中，张力-速度关系可用来考虑确定最适作业的最佳负荷和发挥最大爆发力。

研究证明：肌肉收缩的张力-速度关系曲线可通过训练而改变，有训练的运动员，其张力-速度关系曲线关系向右上方偏移。亦即是，在相同的力量下，可发挥更大的速度，或在相同的速度下，可表现出更大的力量（图1-6）。

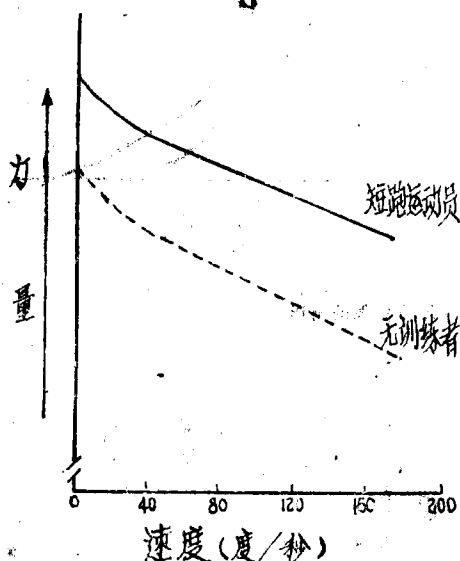


图1-6 短跑运动员和无训练者的张力-速度曲线（两者快肌纤维%相似）（依Fox, 略加修改）

金子等报告，不同的训练负荷（负荷分别为最大力量 ( $P_0$ ) 的0%、30%、60%和100%）对张力-速度曲线产生不同的专门性影响。无负荷 (0%  $P_0$ ) 的最大向心收缩训练，最有效地增进最大速度，而100%  $P_0$  的等长训练，则使最大力量增进最多。因而它们的张力-速度曲线在训练后的特点是分别在速度或力量上有较大的改变。在30%  $P_0$  和60%  $P_0$  训练组，表现运动速度和力量的全面增进。因而其张力-速度曲线在训练后成平行的改变（图1-7）。

男、女性的张力-速度曲线表现明显的性别差别。图1-8表明，不论是屈腕肌群或伸足肌群，成年男性的张力-速度曲线均高于成年女性。

## (二) 肌肉收缩的长度-张力关系

肌肉收缩的长度-张力关系是指肌肉收缩前的初长度对肌肉收缩时所产生的张力的影响。如果在肌收缩前就给予肌肉一定的荷重（称为前负荷），使肌肉拉长以改变其收缩前的

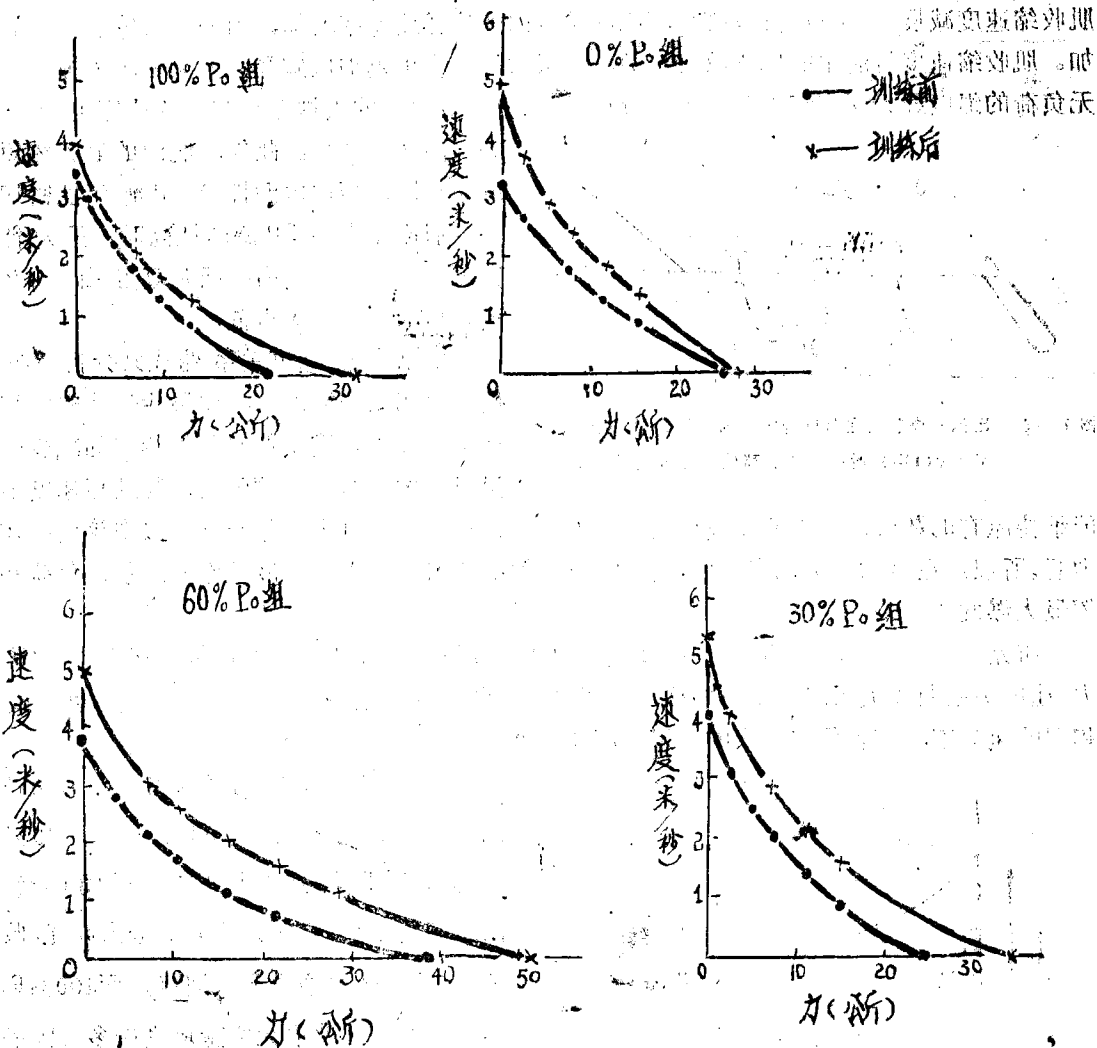


图1-7 不同的训练负荷对张力-速度曲线的影响

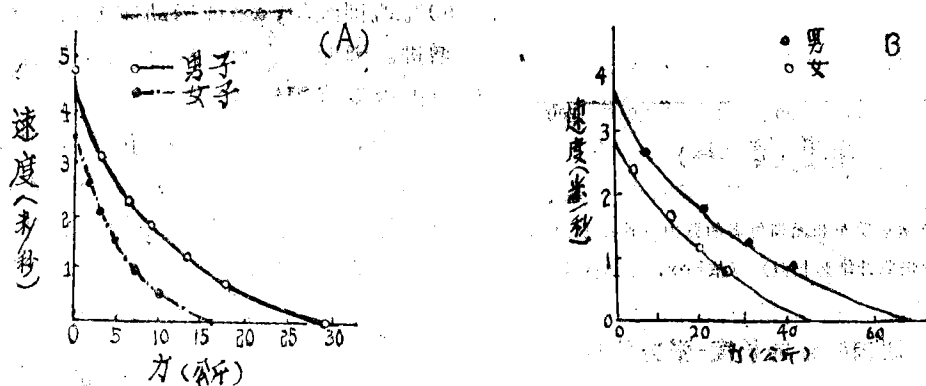


图1-8 成年男子和成年女子的屈腕肌(A)和伸足肌(B)的张力-速度曲线  
(依金子、川初 略修改)

度长，即肌肉的初长度，再观察肌肉在不同后负荷下收缩时，其张力-速度变化关系；将可看到：随着前负荷的增大，肌肉的初长度逐渐增加，肌肉的收缩效果也逐渐增大，当肌肉的初长度增加到某一长度时，肌肉将产生最大的收缩效果。具体讲：此时若让肌肉进行等长收缩，肌肉将产生最大的张力；此时若让肌肉在不同后负荷下进行缩短收缩，其每一后负荷下所产生的收缩速度，都要较肌肉处于其他长度时为大，说明其作功能力增大。但当前负荷进一步增加，而使肌肉的初长度超过此限度后，收缩效果将随前负荷的继续增加而逐渐减小。

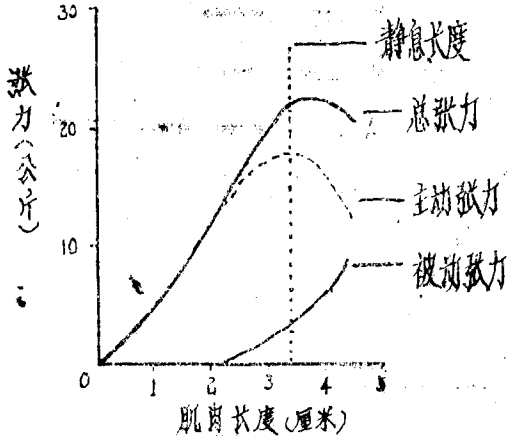


图 1—9 人体三头肌等长收缩的长度-张力关系

由此可见，每一肌肉都存在一个最适的初长度或最适前负荷，肌肉在此初长度下收缩时，可产生最大的收缩效果或作功能力，而在初长度较长或较短时，其收缩效果将下降。一般认为，人体中最适初长度约与肌肉在身体中的“自然长度”或静息长度相当，此长度被认为接近在人体内自然条件下最大可能的伸长，但亦有人认为它实际上较此为短。

图 1—9 表示人体三头肌的长度与其最大运动时所产生的张力的关系。在实验中分别测出拉长肌纤维与结缔组织至某一长度的被动张力和处在同一长度时肌肉所产生的总张力，从总张力中减去被动张力则得出主动

张力。主动张力是肌肉收缩过程中产生的真正的张力量。由图可见，主动张力随肌肉的初长度的增加而增加，在静息长度时达最大值，而超过此长度后，主动张力即逐渐下降。在离体的肌肉中，可以记录出超过体内可能达到的长度以上的张力，可以看到，当肌肉拉长到约为静息长度 2 倍时，主动张力最后降到零。在这种伸长程度下所记录到的总张力与纯粹被动张力相同。

肌肉在最适初长度为何能产生最大张力呢？目前认为，根据肌丝相互关系的分析，这样的长度能使粗丝和细丝处于最理想的重迭状态，使收缩时起作用的横桥数目达到最大，因而能出现最有效的收缩。以下以蛙半腱肌的肌节长度-张力曲线为例加以说明（图 1—10）。图 1—10 曲线上 A 点的张力为零，此点相当于蛙半腱肌肌节长度（3.65 微米），在此长度时，粗丝与两条细丝间没有重迭，因而横桥和肌纤蛋白细丝间就不可能发生相互作用，从而就不能产生张力。肌节长度从图 11 的 A 点向 B 点逐渐缩短，张力则随之增加，至 B 点达最大。与此点相当的肌节长度约为 2.2 微米，在此长度下，肌节内肌凝蛋白丝的全部横桥与两条细丝相邻，此长度即静息长度，在两细丝末端留有一段空隙，其宽度约为 0.20 微米，相当于粗丝无横桥的“裸露”区。

当肌节长度继续从 2.2 微米缩短至 2.0 微米（图 1—10 中 B 到 C）张力并无明显变化，在曲线上形成一段“坪”。这是由于在肌节中央粗丝无横桥，细丝虽伸入中央但无从附着，但细丝外周端仍能与粗丝两端的横桥发生作用，故粗丝之间的相互作用能力既未增加，也未减少。但肌节长度如进一步缩短（图 1—10 中 C—D），张力开始逐步下降。当肌节长度进一步缩短至 1.65 微米以下时，细丝的中心端在肌节中央交错（重迭），Z 线（细丝外端之垂直线）侵入粗丝的末端，从而使粗丝发生“皱折”，结果，肌原纤维变形，张力急剧下降。

从生理学意义上来看，大多数骨骼肌的工作范围可能在长度-张力曲线的升支段(图1—10中的D至C)。这是因为在静息时，大多数肌肉的长度相当于长度-张力曲线的最高点，因此，当肌肉缩短时，肌节长度就进入到张力下降的区域。当加在肌肉上的前负荷增加时，肌肉张力就会增加(图1—10中从B到C)。

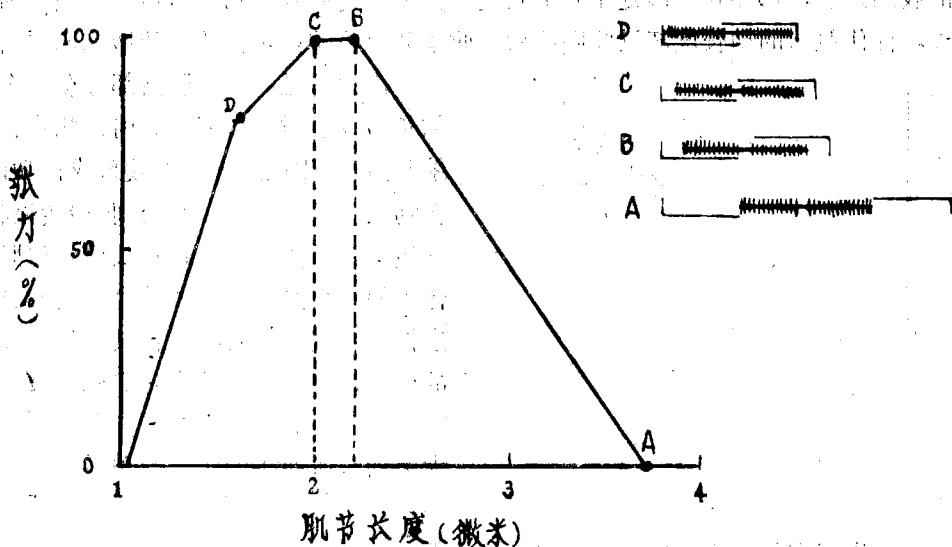


图1—10 单个肌节长度-张力关系曲线。图中表示当肌节长度为2.0—2.2微米时，收缩的强度最大。右上角各图表示肌节长度-张力曲线各相应点上的肌节长度以及粗丝与细丝的相对位置。  
依 Jense 等改绘

### 三、肌肉的机械功和功率

#### (一) 肌肉的机械功

从物理学角度来考察，功是作功多少的具体量度，而在任何作功过程中，都存在一定的力，以及在力的作用下所发生的位移。

据此，功的定义是：功等于沿位移方向作用于物体的力与力的作用点的位移的乘积。简言之，功(W)等于作用力(F)与其通过距离(D)的乘积。即

$$W(\text{功}) = F(\text{力}) \times D(\text{距离})$$

因之，肌肉的机械功等于肌肉收缩时所产生的张力(克或千克)乘其缩短的距离(厘米或米)。例如，一块肌肉收缩时，产生张力10千克，缩短的距离为0.02米，其机械功为：

$$10\text{千克} \times 0.02\text{米} = 0.2\text{千克} \cdot \text{米}$$

又如，一运动员将置于杠铃架上重50公斤(千克)的杠铃上举一米高，此时，其做机械功将为50千克 $\times$ 1米=50千克 $\cdot$ 米。

肌肉机械功的大小，与肌肉生理横断面的大小和肌肉的长度有关。

肌肉的生理横断面，是该肌肉中所有肌纤维横断面的总和，与肌纤维行走的方向成直角。在其他条件相同下，肌肉的生理横断面愈大，包含的肌纤维也愈多，它所产生的力量也愈大，故能举起的荷重或完成的机械功也愈大。



人体肌肉中，肌纤维排列的方式有多种，有的与肌肉的纵轴平行，如平行肌，有的与肌肉纵轴成一定角度，如半羽状肌和羽状肌。由于肌肉的生理横断面与肌纤维行走方向成直角，故在相同的体积下，羽状肌的生理横断面积比平行肌大很多（图1—11），故其肌力也大得多。但另一方面，羽状肌的肌纤维长度仅及羽状肌全长的1/3甚至1/4，所以其缩短距离即较小。故羽状肌结构见于那些能产生很大力量而缩短不多的肌肉中。

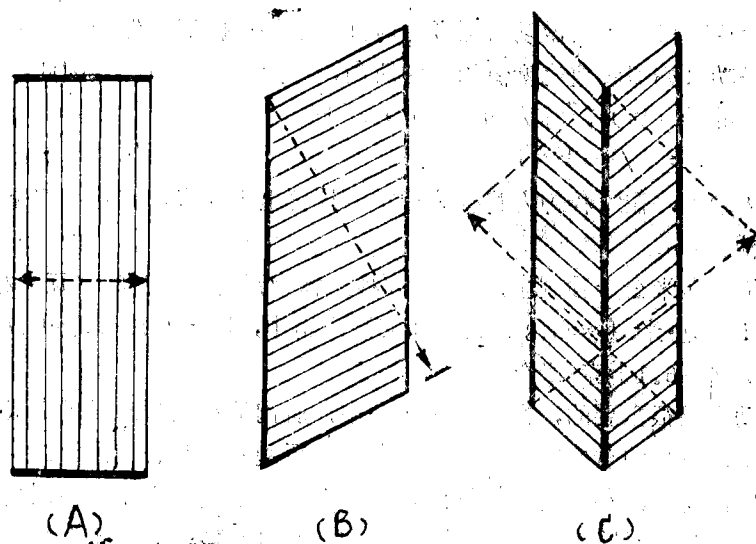


图1—11 肌纤维排列形式不同的肌肉的生理横断面（虚线）。若以平行肌（A）的生理横断面为100%，那么，半羽状肌（B）为250%，羽状肌（C）为450%。

肌肉的长度决定肌肉能缩短的最大距离。肌纤维平行排列的肌肉，其机械功大小取决于肌肉长度。在其他条件相同时，肌肉愈长缩短的距离愈大，肌肉作功能力就愈大。但是这个规律只适用于肌肉不太长，因而分布于肌肉全长的肌纤维能够几乎在同时发生兴奋时。在肌纤维很长的肌肉中（如缝匠肌），肌肉的机械功与其长度之间并不成完全的成正比关系，这是因为，兴奋与收缩总是先发生在肌肉的某几个部位，而此时未兴奋部位由于被伸展而在很大程度上丧失收缩能力，故作功能力的增大远赶不上肌肉长度的增加。

在羽状肌中，肌肉的机械功并非取决于整个肌肉的长度，而是取决于最大肌肉束的长度，其次也取决于最大肌肉束与中央腱所成的角度。

当一肌肉在对抗它能勉强移动的负荷下收缩时，它所产生的最大张力或最大力量，叫做肌肉的绝对力量。由于肌肉的力量与肌肉的横断面大小相关，为了准确测量肌肉的作功能力，通常以单位横断面积（每平方厘米）所能发挥的最大力量来表示。称为比肌力或肌肉相对力量。据文献报告，人体每平方厘米肌肉横断面的最大力量为4—10公斤，并认为，锻炼引起的肌肉收缩力增加，是由于肌肉的横断面积增加，肌肉的绝对收缩力也随之成比例地增加，而单位横断面积肌肉收缩力并无变化。例如日本的猪饲和福永（1968年）用超声波及特殊记录仪描记人体肌肉横断面法，测得了245名男、女受试者的肌力平均为6.3公斤/厘米<sup>2</sup>横断面积，此值并不因性别及训练而有差异，但猪饲（1969年）用其他方法发现，训练可以使肌肉的横断面积及每单位横断面积的肌肉力量均增加。