

运动技术力学分析

(资 料)

下 册

上海体育学院图书馆资料室摘编

一九八〇年三月

运动技术力学分析(资料)下册目录

游泳部分

- 一、游泳的划水路线与推进力..... 3
- 二、自由泳“S”型划水的力学原理..... 6
- 三、自由泳的生物力学分析.....14
- 四、蛙泳划水技巧的流体动力分析.....20
- 五、游泳与流体力学.....26
- 六、物理学一些基本法则和定律在游泳中的应用.....28

体操部分

- 一、人体在无支撑阶段转动的力学原理.....33
- 二、自由体操翻腾动作的力学分析.....55
- 三、高低杠技术的力学原理.....62
- 四、双杠五种基本倒立的力学基础.....74
- 五、吊环练习的动力学特征.....77
- 六、跳马动作的力学基础.....80
- 七、关于体操运动员落地缓冲问题.....85

武术部分

- 一、“旋子”的旋转力学原理.....93
- 二、旋风脚的生物力学分析.....96
- 三、后扫腿的力学原理.....99

举重部分

- 一、举重技术基本原则的力学原理..... 105
- 二、推举蹬推的力学分析..... 112

球类部分

篮球.....	117
一、擦板投篮的旋转原理.....	117
二、投篮训练的生物力学基础.....	121
排球.....	126
一、发旋转球的力学原理.....	126
二、发飘球的力学分析.....	129
足球.....	135
一、弧线球技术原理.....	135
二、正脚背踢球技术的力学分析.....	140
乒乓球.....	148
一、乒乓球旋转规律的力学分析.....	148
二、乒乓球发球技术的力学分析.....	165
羽毛球.....	179
羽毛球旋转的力学分析.....	179

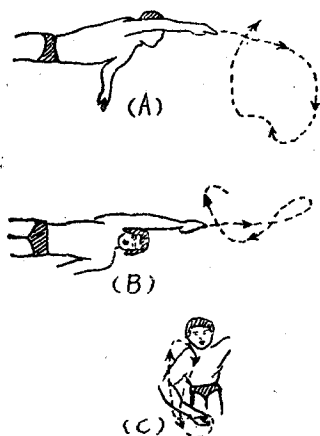
游 泳 部 分

一、游泳的划水路线与推进力

(一) 理论上的误解

六十年代前，在游泳理论中，主张履带式动作路线。这种理论把人体在水中看成是固定的，认为划水路线越直动作方向越向后，则反作用力方向越向前，推进作用也越大，严格要求沿身体的中线划水。

这种分析方法与游泳的实际条件不相符合。正确的方法应该是不只研究动作与身体之间的关系，应着重研究臂的划水动作与介质（水）之间的相互关系。如世界著名运动员马克·施皮茨的动作路线与过去游泳理论描绘的情况就完全不同（图1）。其动作路线是一幅类似圆型（A侧面图），螺旋型（C前面图）和“S”型（B正面图）的复杂的立体图象。



(图1) 马克·施皮茨的划水路线各

不同（图1）。其动作路线是一幅类似圆型（A侧面图），螺旋型（C前面图）和“S”型（B正面图）的复杂的立体图象。

可见，过去的游泳理论对于动作路线和方向的分析，并没有真正揭示推进力的本质。造成理论上的误解。

(二) 划到“静水”

履带式的每个叶片只是把少量的水推一个长距离，

水一旦被一个叶片向后推动，那个叶片在运动着的水中就不能产生推进作用了。这种现象很象人在逆流中游泳，老是感觉不到水对手的阻力，有效功率很低。履带式的直线划水实际上不能最有效地推进身体。可见，最大的有效功率是靠把大量的水推一个短距离，而不是直向后作长距离的推水。

螺旋桨在转动中，时时都能抓到“静水”，而不断起到推进作用。人体受解剖特点限制，不可能象螺旋桨一样动作，但在划水过程中，沿上下、左右、前后空间不断转换方向使手划到“静水”，则是可能的。自由泳、仰泳、蝶泳的“S”型划水，就是不断划到“静水”的有效动作路线。

(三) 柏努利定律的应用

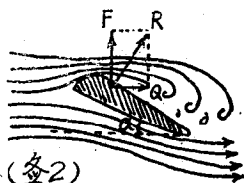
根据牛顿第三定律，手在水中划动时，水对手的反作用力（总的推进力）是与手的划动方向相反的阻力和静压力的合力。这种静压力（也称升力）的大小，随手与其移动方向所成斜角的大小而变化。

为了避免履带式的“划空”而划到“静水”，静压力的作用就显得特别重要。用柏努利定律来说明问题。柏努利定律是：流体在管子里作恒流时，流动速度快的地方静压强低，流速慢的地方静压强高。或者说，理想液体在作稳恒流动时，它的动能、势能和压强能的总和不变。柏努利方程是：

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{常量}$$

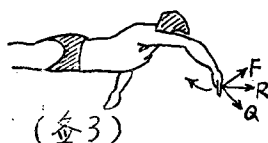
$$\text{即：压强} + \frac{1}{2} \text{密度} \times \text{速度}^2 \\ = \text{常量}$$

当机翼与前进方向成一个小斜角 α 时（图 2），使机翼顶部的流线变密，并出现涡旋现象，流速



增大；而低部的流线稳定（或稀疏），流速减弱，因而低部静压力大于顶部而产生把飞机举起的升力（ F ）， F 与阻力（ Q 与飞行方向相反）合成总压力（反作用力 R ）。

在快速游泳中，优秀运动员就是利用推进升力作“S”型划水路线来推进身体的。手掌不是正对后方，而是与前进方向成一定的斜角，这时升力作用使手象握住一个稳定的把手，在推进阻力和推进升力的合力作用下，快速地牵引和推进身体（图3）。



（四）“临界斜角”

游泳时的划水路线实际只是一幅复杂的立体图象。因此，手的斜角在划水路线的各阶段过程中的大小并不固定，

而且因人而异。这种最合适的斜角，称作“水感”。也就是产生推进升力的“临界斜角”。应在明确推进升力的理论指导下，通过刻苦训练，摸索和确定最好的水感（图4C），手与其动作方向所成的斜角如果过大（图4B）升力作用减小，与履带式的效果相似；如果斜角大小（图4A），升力和阻力都同样减小，形成在水中“滑动”而不是“划动”。



（五）阻力与速度平方成正比

牛顿定律引出：物体在流体中运动，产生涡旋的情况下，物体在运动中所受的阻力与物体的运动速度平方成正比。当速度增大一倍时，阻力则增大四倍。在最好的“水感”（即临

界斜角)的条件下,动作速度越快,推进阻力 Q 与推进升力 F 时时增长,总推进力 R 也越大。

合理的划水路线所构成的立体图象,在侧面、正面、前面等三度空间,都获得最妙的“水感”(取得“临界斜角”)时,沿“S”型的动作路线,加快动作速度,所作的有效功率将大大超过履带式直线向后推水的动作路线。

(摘自“游泳推进力问题的研究”,钟用,广州体院《体育教学与训练》1978年第3期)

二、自由泳“S”型划水的力学原理

(一)曲线划水代替直臂划水

自由泳的速度主要取决于手和手臂的划水动作。据第二届国际游泳生物力学会议上的研究报告指出:自由游推进力的90%是靠手和手臂划水获得的,其中45%是靠手掌;45%靠上臂和前臂;剩下10%的推进力是由两腿打水提供的。

按照通常的认识,为了获得一个向前的运动速度,必须朝运动正相反的方向做一个推力动作。因此游泳时用手掌正对着与前进方向相反的方向用力划水,即臂向后划水,理应获得良好的速度效果。但是综合国内外优秀自由游运动员的技术动作,他们的划水动作都是采用曲线划水的,如“S”型路线、倒问号路线等,而且手掌也不正对着后方,而是保持某一适当角度。直臂划水动作早被曲臂划水动作所淘汰。

(二)直臂划水推进力分析

在流体力学中,对平板垂直迎水运动的问题已经有了透彻的研究。我们把手掌近似看做一块平板就可应用流体力学的

研究成果来说明划水时手掌上的作用力了。

当平板在静水中垂直迎水缓慢前进时，板前的水被推开，板后的水跟着一起向前运动，板周围的水在边推边跟的

平板小速度迎水前进



(图1)

平板低速前进时的流线图

作用下它的流线如图1小矢号所示。

只要流线有序不乱，平板向前运动是不费多大力气的。但当平板速度增加时，有条不紊的流线给打乱了，在平板后面要产生旋涡（如图2所示），使平板后面压力降低，平板前后就产生压力差。这个压力差和一小部分表面摩阻对平板前进来讲是阻力，正是这个阻力对游泳者来说就是获得游速所需推进力的根本来源。

在流体力学中做了大量实验，测

得不同形状、不同大小的物体以不同

速度迎水前进时所需克服的阻力。一

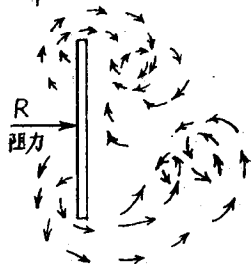
般可归纳成一个近似公式： $R = C_R \frac{1}{2}$

$\rho A V^2 \dots \dots \dots (1)$

其中R—阻力， C_R —阻力系数，
A—平板面积， ρ —水密度，当20℃时
 $\rho = 101.7 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$ ，V—平板速度。
粗略估算直臂划水的推进力如下：

手掌面积近似取 $0.2 \text{ 米} \times 0.1 \text{ 米} = 0.02 \text{ 米}^2$ ，考虑到上臂和前臂对推进力有同样的作用，相当于增加一个手掌的面积，故： $A = 2 \times 0.02 \text{ 米}^2 = 0.04 \text{ 米}^2 \dots \dots (2)$

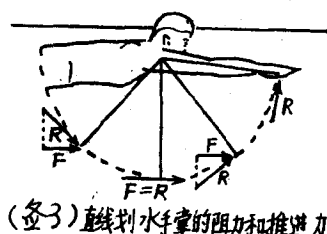
平板大速度迎水前进



(图2)

平板后产生涡流

从流体力学的实验结果得知，当平板的长与宽为 2:1 时阻力系数 $C_R = 1.15$ ，故阻力为 $R = 1.15 \times \frac{1}{2} \times 101.7 \times 0.04 V^2 \approx 2.33 V^2 \dots\dots ③$ 在一个直臂划水动作的完整过程中，阻力 R 的方向在不断变化（图 3），只有阻力 R 的水平分量



即与游泳前进方向一致的分量（图 3 中的 F ）才起推进作用。当手臂向下垂直于水平面时划水推进力 F 才等于阻力 R ，其他情况下 F 都小于 R 。故在整个划水过程中，有效推进力 F 只能取阻力 R 水平分量的平均值，约为阻力 R 的 60%，即： $F = 0.6 \times R \approx 1.4 V^2 \dots\dots ④$

当手掌在静水中划水速度分别为 1 米/秒、2 米/秒、3 米/秒、4 米/秒时的阻力 R 和推进力 F 的大小列于表一：

表一 阻力 R 、推进力 F 变化表

速度 V (米/秒)	1	2	3	4
阻力 R (公斤)	2.33	9.32	21	37.3
推进力 F (公斤)	1.4	5.6	12.6	22.4

从表一或④式可推算出为要得到一定大小的推进力，必须克服大 1.6 倍左右的阻力。

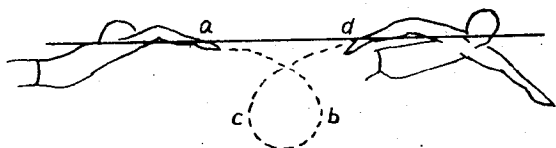
(三)直臂划水的缺点

人体在水中滑行的阻力试验，测得在前进速度为2米/秒时，人体阻力基本上为10公斤左右。

这样对照表一，似乎采用直臂划水时，只要手掌用3米/秒的速度划水，可获得超过10公斤的推进力，也可达到2米/秒的高水平游泳速度。但事实上用直臂划水是不可能创造良好成绩的。因为：

1. 上述测得的人体阻力，是在没有移臂动作情况下获得的。实际游泳时由于移臂动作引起相当大的兴波阻力，阻碍人体前进的速度。

2. 当人体相对池水不动时，用直臂划水，从手掌入水至手掌出水，手掌都是把水向身后推去，都可产生或大或小的推进力（如图3）。但当人体已获向前的速度后，情况就不同了。手掌划出的是一条摆线般的轨迹，称为绝对轨迹（如图4）。手掌在入水和出水阶段（ab和cd）都是顶着人体前进方向运动的。在这两个阶段内手划水的阻力是阻碍人的游速的。只有bc这一段手掌划水阻力才能发挥出推进力的作用，游速愈高有效划程bc段愈短，这意味着有效推力 F （参看④式）不是划水阻力 R 的0.6倍，而是0.3倍或更小。



(图4)人体速度对手掌划水轨迹的影响

3. 推进力 F 的计算式④中，速度 V 是手掌在静水里划水时的速度，称为绝对速度。当人体的本体已有速度时，为

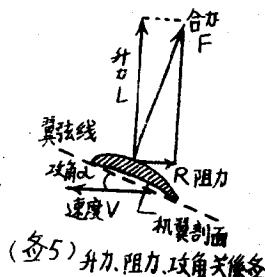
要获得必需的绝对速度，手掌相对人本体的速度（相对速度）就要更高。

4. 从上面分析看都要求提高手掌划水速度。划水速度的提高引起移臂频率的增加，这就意味着兴波阻力、入水和出水阻力增加。由此可见用力加快直臂划水，对推进力提高不多而相应人体前进阻力却增加很快，所以马上就达极限速度。

（四）升力理论

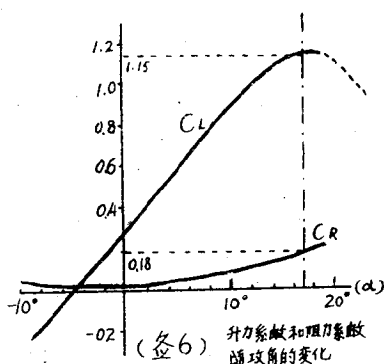
桨板与划水方向倾侧一个角度会产生较大的推进力。这在流体力学中早有研究，这就是机翼升力理论。

飞机的翼膀、木船的橹或桨都可看成一块状物在流体中滑行（如图5），统称为机翼。由于机翼剖面的弦线滑行方向保持一个夹角 α 为攻角，加上翼剖面形状的一些因素，使机翼上表面压力降低，下表面压力增大，上下表面的压力差就产生一个垂直于滑行速度方向的升力 L 和滑行的阻力 R 。平板垂直逆水运动的情况相当于攻角为 90° 这时只有阻力。在流体力学中，机翼的升力和阻力的大小与①式相似的关系式，即：



$$L = C_L \frac{1}{2} \rho A V^2 \dots\dots ⑥ \quad R = C_R \frac{1}{2} \rho A V^2 \dots\dots ⑦$$

（ C_L 为升力系数， C_R 为阻力系数）。 C_L 和 C_R 随翼型的不同和攻角的变化而变化。（图6）取用了一对与手型较接近的机翼 C_L 和 C_R 随攻角 α 变化的曲线。从曲线图可看到当攻角从零度开始增加，升力也随着增加；但当攻角超过一定大小后，如 25° 左右，升力突然大幅度降低。



自由泳划水时，手掌就是一个机翼，只要保持一个合适的攻角，选择一条合理的划水路线，就能充分发挥升力的作用。从图6可见，当手掌的攻角接近 20° 时，升力系数 $C_L = 1.15$ ；阻力系数 $C_R = 0.18$ ，则升力 $L = 1.15 \times \frac{1}{2} \times 101.7 \times 0.04 \times V^2 \approx 2.33V^2 \dots\dots$ ⑧ 阻力 $R = 0.18 \times \frac{1}{2} \times 101.7 \times 0.04 \times V^2 \approx 0.36V^2 \dots\dots$ ⑨ 当手掌在静水中以不同速度划水时，它的升力和阻力如下：（表二）

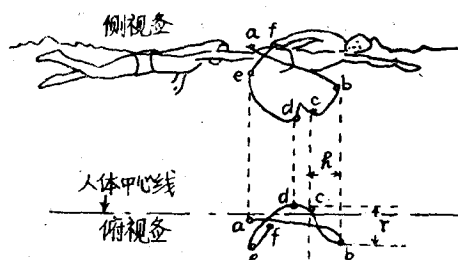
表二 升力L、阻力R变化表

速度V（米/秒）	1	2	3	4
升力L（公斤）	2.33	9.32	21	37.3
阻力R（公斤）	0.36	1.44	3.24	5.76

从表二可见如划水路线选择得合理象“S”型等，就能充分利用升力和阻力在人体前进方向的分量，获得比直臂划水大得多的推进力。

(五)“S”型划水推进力分析

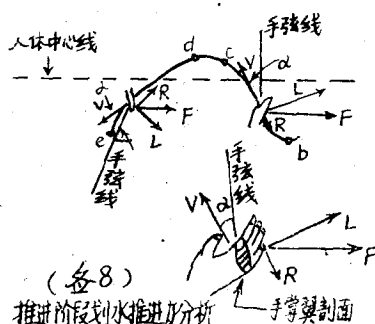
“S”型划水的受力分析就是分析手掌在绝对轨迹上划水时的推进力。自由泳技术的好坏就在于是否充分利用了升力。要发挥升力有三个主要因素：一是攻角，二是速度，三是手型。加上选择一条合理的路线。我们把一个完整划水动作分为入水(ab)、推进(bcde)、和出水(ef)三个阶段(图7)。



(图7) “S”型划水的绝对轨迹图

1. 推进阶段bcde

划水时，手掌沿着 bcde 路线划动（如图8）。当手掌在



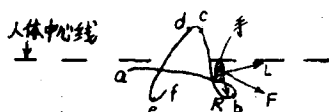
(图8) 推进阶段划水推进力分析

bc段划水时，手掌与绝对划水路线bc必需保持一个有利的攻角 α ，使产生升力L，它与阻力R合起来组成合力F，要求合力方向指向人体前进方向，而且尽可能取得最大的值，合力F就是我们要求获得的推进力。

当在de段划水时，由于路线改变了，手掌所取的角度也必须作相应的变化，以使手掌与de曲线保持合适的攻角，从图8可见在de段划水时升力和阻力的方向也都变化了，但必须要求它们合成的力F仍然指向前进方向，在bcde阶段，升力和阻力都起着推进的作用，只要划水速度增加，推进力与速度平方成正比地增加。

bc、de段主要是手掌朝侧向划水而获得升力，侧向距离r与人的速度无关，手掌的侧向分速度也不受人速的影响，推进力就不会因人本体速度的提高而削减。

这样看来，似乎“S”型划水侧向分量愈大愈有利，即大“S”型总比小“S”型好，但事实上“S”型划水的推进力F是



(图9)

大“S”型划水造成推进力F偏斜

升力L与阻力R的合力，合力F的方向是取L和R组成平行四边形对角线的方向，游泳时必须使F指向前进方向。如“S”型过大，即bc段过分垂直于前

进方向（图9），则合力F的方向不正，人的身体就要晃动，人体阻力大大增加，所以“S”不能过大。“S”型的大小与人体速度也有一定关系。游速高了bc段间的距离h缩短了（图7），bc段就要更垂直于前进方向，推进力会产生侧向分力，这是不允许的，因此要改变bc段曲线的形状也即取小“S”型较好。

2. 入水阶段ab

为使阻碍减至最小程度，手掌必须取一个最小升力和阻力的攻角，手的平面或手弦线基本上与绝对轨迹相切，又在这段结束后，马上进入推进阶段，在交接点b上手掌做一个向下压水动作，一方面使手掌做好推进准备，另一方面可使手掌附近的水流产生一个旋转的环量，这个环量可以使手掌在推进阶段增加升力的大小。

3. 出水阶段ef

这一段主要是选择推进阶段的结束位置e，使de段尽量发挥推进作用。另外为减少出水阻碍，手掌基本上应与出水段的绝对轨迹相切。

4. 手型（即翼型）：

根据流体力学研究，微拱的翼型要比平板式翼型能发挥更大升力。因此，在推进阶段手型略带弯曲是有利的。手指略为分开也可增加升力。

（摘自“自由泳”“S”型划水的力学原理”，上海交大力学教研组李家钟、罗福声。《体育科技资料》1979年第9期）

三、自由泳的生物力学分析

（一）三种划水式样的力学比较

一九六九年，康西尔曼发表了一篇《桨式臂划水动作的作用》，首次提出了游泳推进力的正确分析。对三种划水动作式样和三种航海推进力式样进行对比。

图1左描绘一个“履带”明翼轮，当时以为翼片沿一直