

蝶泳：人体如何在水里造浪

从一条规则漏洞到两次打腿的时序，讲清四种泳姿里最难也最优雅的那一种

王建硕

费曼式写法 · 由多个 AI 代理撰写与互相审校

导读

从一条规则漏洞到两次打腿的时序，讲清四种泳姿里最难也最优雅的那一种

先别下水。先做一道思想实验。

海豚和你用同一套物理学游泳：一样的水，一样的阻力公式，一样受牛顿第三定律管。但海豚从不「划手」——它根本没有手。它从头到尾只做一件事：让身体从头到尾滚过一道波。然后它游出了人类世界冠军两倍以上速度，还显得毫不费力。

这本书要回答的问题就藏在这只海豚里：**如果把一个人按「必须对称、双臂必须出水」的规则约束放进水里，他最快的游法会长成什么样？**答案就是蝶泳——四种竞技泳姿里最年轻、最难、也最美的一种。它不是谁拍脑袋设计的动作，而是规则、流体力学和人体结构三方博弈出来的最优解。

所以这本书不按「游泳教程」的套路组织，而是像拆一台机器那样拆蝶泳：

- 先讲历史——蝶泳怎么从蛙泳的规则漏洞里「长」出来（第一章）；
- 再讲对手——水的阻力为什么是平方报复性的，为什么减阻比加力值钱（第二章）；
- 然后一台一台拆发动机：海豚腿（第三章）、钥匙孔划水（第四章）、两踢的拍子（第五章）；
- 接着算账：呼吸为什么这么贵（第六章）、身体造波为什么反而是赚的（第七章）、200 蝶为什么这么折磨人（第八章）；
- 最后落地：常见错误背后的力学（第九章），和一条真能练会的路径（第十章）。

每一章都试图回答「为什么是这样」，而不是「记住要这样」。读完你不一定能马上游出蝶泳——那需要水和时间——但下次你在泳池边看到一个人像海豚一样起伏着滑过水面，你会知道他身上的每一个动作都不是表演，而是一笔算清楚了力学账。

如果你自己会一点游泳，这本书会更狠一点：它会让你忍不住想立刻下水，去验证那道从胸口滚到指尖的波。

第一章 · 最晚出生的泳姿

四种竞技泳姿里，自由泳、仰泳、蛙泳都有上百年甚至几百年的历史，唯独蝶泳是个「00 后」——它到二十世纪三十年代才被发明出来，1956 年才第一次出现在奥运会上。一个合理的疑问是：人类在水里泡了几千年，为什么偏偏要等到现代竞技游泳时代，才有人想到「把两条胳膊同时抡出水面」这种动作？

答案有点反直觉：**蝶泳不是被「发明」的，是被规则「逼」出来的**。它最初根本不是一种新泳姿，而是蛙泳选手钻规则空子的产物。

一个规则的漏洞

二十世纪初的竞技蛙泳规则只规定了泳姿的对称性——两臂两腿要同时、对称地动作，至于手臂在水下收回来还是从水面上抡回来，规则没说。当时所有选手都老老实实地在水下收臂，因为「手臂不出水」被认为是蛙泳天经地义的样子。

1933 年，美国选手亨利·迈尔斯（Henry Myers）在布鲁克林的一场比赛里做了一件「离经叛道」的事：他在蛙泳比赛里把手臂直接抬出水面、向前抡回起点。裁判没法判他犯规——规则里确实没写不许这样。而他这么做的原因很简单：**水下的阻力比空气里大得多**，手臂在水里往回「收」，等于在往前游的同时又给自己挂了一个倒挡；把手臂抬到空气里抡回来，这个倒挡就没了。

大白话

大白话：游泳的速度不只看「向前推得多狠」，还看「往回拖了多少」。手臂在水下回收就像倒车入库时油门刹车一起踩，抬出水面抡回来等于把刹车松了。迈尔斯只是把那只一直踩着刹车的脚松开了。

艾奥瓦大学的教练戴维·阿姆布鲁斯特（David Armbruster）很快把这个动作系统化了。他从流体力学的角度研究过水回收的阻力问题，得出结论：手臂出水回收能明显减少阻力。他给这种「会飞的蛙泳」起名叫 butterfly——直译是「蝴蝶」，因为两臂同时出水、展开、前抡的样子，从侧面看像一只扇翅膀的蝴蝶。这就是「蝶泳」这个名字的由来。

腿也跟着「变异」了

故事没有停在手臂上。1935 年，阿姆布鲁斯特手下的年轻选手杰克·西格（Jack Sieg）琢磨的是另一个方向：腿。传统蛙泳腿是向两侧蹬夹的，西格却模仿鱼尾巴的动作，俯卧在水里，让两条腿并拢、像鞭子一样上下摆动——他管这叫 海豚式打腿（dolphin kick），就是模仿海豚尾鳍的上下摆动：发力从躯干开始，经髋、膝、踝一路传到脚尖，像波浪一样滚过去。

师徒俩把两个「作弊」拼在一起：手臂出水前抡 + 双腿海豚式打水。这套组合动作在当时的蛙泳比赛里是完全合法的——因为规则只查对称性，不查动作形态。于是三十年代末到四十年代，蛙泳赛场上出现了滑稽的一幕：同一场比赛里，有人用古典蛙泳，有人用「飞起来的蛙泳」，两种动作的速度差大到不像同一个项目。

到 1952 年赫尔辛基奥运会，男子 200 米蛙泳几乎被「变异蛙泳」选手占领。国际泳联终于坐不住了：**1953 年，蝶泳被正式从蛙泳里拆出来，成为独立的第四种泳姿**，同时蛙泳规则被改写，禁止手臂出水回收。1956 年墨尔本奥运会，蝶泳第一次有了自己的比赛项目。从钻空子到登堂入室，一共用了二十三年。

规则是技术的另一台发动机

这段历史值得记住的，不只是「蝶泳很年轻」，而是一个更一般的规律：**技术形态往往不是最优解的自然浮现，而是规则和物理博弈出来的结果**。规则画了一个框，选手就在框里找物理上最快的动作；框一改，动作跟着改。

大白话

大白话：蝶泳长得像蝴蝶，不是因为它美，而是因为规则只卡「对称」这一个条件时，「两臂同时出水 + 双腿并拢波动」恰好是物理上最快的对称动作。你看到的优雅，是约束条件筛出来的幸存者。

这个规律在蝶泳自己身上还在继续上演。规则后来规定蛙泳出发和转身后的水下长划臂阶段可以做一次海豚式打腿——就是 2004 年北岛康介引发的争议换来的修改；而蝶泳比赛里，选手们发现全程最快的部分其实是出发和转身后的水下海豚腿，快到后来规则不得不限制水下潜行不得超过 15 米。每一次规则改动，都在重新定义「蝶泳到底长什么样」。

所以，要弄懂蝶泳，得先放下「它是一个游泳姿势」的想法，把它当成一道物理题的最优解：在「必须对称、必须出水」的约束下，人体怎样才能在水里前进得最快？接下来这本书就顺着这个问题往下拆。而拆它的第一步，是先认识对手——水。第二章我们就来讲，水的阻力到底是个什么脾气。

第二章 · 水的脾气

上一章说，蝶泳是「规则约束下物理上最快」的答案。要理解这个答案长什么样，得先认识这道题里唯一的对手：水的阻力。这一章不下水、不谈动作，只讲一件事——**水的脾气到底有多坏，以及它的坏脾气如何决定了所有泳姿的形状。**

水是一堵会流动的墙

先建立一个数量感。空气的密度大约是每立方米 1.2 公斤，水是 1000 公斤——差了八百多倍。你在空气里挥手臂毫无感觉，是因为你每次只是推开了一小捧「几乎是空的」气体；而在水里做同样的动作，你推开的是实实在在的质量。游泳的本质，就是和这堵会流动的墙较劲。

较劲的结果可以用一个式子概括——阻力公式：阻力 $\approx \frac{1}{2} \times \text{水的密度} \times \text{速度的平方} \times \text{阻力系数} \times \text{迎流面积}$ 。这个式子不用背，里面真正要紧的只有两个词：**速度的平方**，和**迎流面积**。

先说「平方」。速度翻一倍，阻力不是翻一倍，而是翻四倍；速度翻两倍，阻力变九倍。而推进的功率（每秒做的功）= 阻力 $\times$ 速度，所以**功率需求随速度的三次方增长**——想把游速翻倍，你得输出八倍的功率。这就是游泳和跑步的根本区别：跑步的主要敌人是重力，大致上出多少力就跑多快；游泳的敌人是阻力，而阻力是个会「报复性增长」的敌人。

大白话

大白话：在水里加速就像还高利贷。速度是你的欠款，阻力是利息——欠款翻一倍，利息翻四倍。所以游泳这项运动的核心矛盾不是「怎么更有劲」，而是「怎么少欠债」。

阻力其实有三副面孔

「阻力」不是一个东西，是三个东西叠加起来的，对付它们的办法完全不同：

- 摩擦阻力：水贴着皮肤流过时「蹭」出来的阻力，取决于体表面积和表面粗糙度。这是剃毛、泳帽、高科技泳衣要对付的那部分。听起来唬人，其实它是三者里最小的——大概只占

百分之几。

- 形状阻力（也叫压差阻力）：你的身体把水「顶开」时，前方压力高、后方留下一个低压的涡流区，前后压力差把你往后拽。它取决于迎流面积和体形——身体像一块板还是像一条鱼雷，差别是好几倍。**这是人体游泳阻力的大头。**
- 兴波阻力：你贴水面游，会拖着一道船头波，造波要消耗能量。它只在贴近水面时才存在，而且随速度增长得比平方还快——这正是一米深的「水下海豚腿」比水面游快得多的原因：潜到水下，兴波阻力基本消失。

把三副面孔摆在一起，结论就出来了：一个泳姿快不快，主要看它把**形状阻力**压得多低——也就是，你的躯干和腿在前进方向上「摊开」了多大一块面积。

为什么「身体位置」值半秒钟

举个最具体的例子。同样一个人，同样使劲，两种姿势：

姿势 A：身体水平，头、肩、臀、脚跟几乎贴成一条直线漂在水面上。迎流面积大约只有肩宽乘以一个头的厚度。

姿势 B：抬头挺胸，下半身下沉，身体和水面的夹角有三十度。这时候迎流面积不再是「一条线」，而是整个躯干加大腿在竖直方向上的投影——面积翻了好几倍，阻力跟着翻好几倍。

初学者在水里感觉「怎么使劲都不走」，十有八九不是没劲，而是姿势 B：他每划一下水，一半力气花在推自己前进，另一半花在顶着因为腿沉而多出来的那块「墙」。高手和新手之间的差距，一半以上不是发动机功率的差距，而是风阻系数的差距。

大白话

大白话：游泳界的真理是「减阻优先于加力」。人力发动机的功率天花板极低——普通人持续输出不过一两百瓦，世界冠军也就四百瓦上下，差不多只够同时点亮四五只老式白炽灯泡。发动机改不动，能改的只有车身。所以所有泳姿的所有技术细节，归根结底都在回答一个问题：怎样让前进的每一瞬间，迎流面积最小。

这条定律如何预言了蝶泳

现在我们手里有了一把尺子，回头看蝶泳的每个设计决定，都会发现它们全是「减阻定律」的推论：

手臂为什么必须出水回收？因为空气密度只有水的八分之一，出水回收把「回程阻力」几乎归零——上一章迈尔斯钻的空子，物理根源在这里。双腿为什么并拢？因为分开蹬夹的蛙泳腿，在收腿瞬间会把大腿竖起来挡水，迎流面积瞬间暴涨；并拢上下摆动则始终贴着水流方向。身体为什么要像波浪一样起伏？这是为了在不破坏流线型的前提下把力量从躯干传到脚尖——但起伏必须控制在「振幅够小」的范围，否则波峰波谷本身就在给自己造墙。

当然，蝶泳也为这套设计付出了代价——它的身体起伏比任何泳姿都大，兴波阻力天然偏高，所以它从来不是最快的泳姿（自由泳才是）。它追求的不是绝对速度，而是在「**双臂双腿必须对称**」这条规则下，**阻力与动力的最优妥协**。

阻力讲完了。但光有减阻还走不了路——你总得从什么地方弄到向前的推力。下一章先看蝶泳的半台发动机：那两条并拢的腿，和那个从胸口一路滚到指尖的波浪，到底是怎么推水的。

第三章·海豚不划手

上一章的结论是：游泳是减阻的游戏。但光会躲阻力还停在原地，你总得从哪儿弄到向前的推力。蝶泳的推力有两台发动机——腿和手臂。这一章先讲腿，因为蝶泳的腿是全泳姿里最特别的一台：它不「蹬」，它「摆」。

向海豚借的方案

先看一个事实：海豚游泳不用任何类似「划手」的动作。它的全部推进来自尾鳍的上下摆动——注意，是上下摆，不是左右摆。鱼的尾鳍是竖着的，左右摆；海豚的尾鳍（叫 [fluke](#)，即水平展开的那两片「尾巴叶子」）是横着的，上下摆。海豚是哺乳动物，脊椎继承的是陆地上「弓背—塌腰」的上下弯曲方向，于是它的整套游泳方案就长成了「身体上下波动」。

这个方案效率高得惊人。海豚的巡航速度和冲刺速度，按它的肌肉功率算本来是「不可能」的——这就是生物学史上著名的「格雷悖论」：1936 年动物学家詹姆斯·格雷（James Gray）估算，海豚的肌肉力量根本不足以解释它游那么快。后来半个世纪的流体力学研究给出的答案是：海豚的摆动推进效率极高，阻力又极低，账不是格雷那样算的。悖论的教训倒是留给了游泳运动员：**摆动式推进，是被大自然优化了几千万年的高效方案。**

1935 年西格「发明」海豚式打腿，本质就是把这套方案移植到人身上。人没有尾巴，但人有整条腿可以当尾巴用——前提是，你得学会像海豚一样「从躯干开始波动」，而不是像踩自行车一样「从膝盖开始蹬」。

波浪从胸口出发

正确的海豚式打腿，是一条从头（其实是胸口）滚到指尖的波：

1. 胸口微微下压，躯干启动一个弯曲；
2. 弯曲传到髋部，大腿跟着下压；
3. 再传到膝盖——膝盖的弯曲是**被波浪「带出来」的，不是主动弯的**；
4. 最后传到脚踝和脚尖，脚像鞭梢一样「甩」出一记下打。

为什么非要从躯干开始？想想鞭子。甩鞭子时你动的只是鞭把，但波沿着鞭子越滚越快——因为鞭子越到末梢越细越轻，同样的能量集中在越来越小的质量上，速度就被放大了，鞭梢甚至可以突破音速（鞭子的「啪」声就是小型音爆）。人体的腿也是这个结构：躯干最重，大腿次之，小腿轻，脚最轻。**从胸口启动的波，滚到脚尖时正好被放大成一记又快又狠的「鞭梢」**；而如果从膝盖才开始动，等于抓住鞭子的中段甩——前面那截「放大器」被你浪费了。

大白话

大白话：海豚式打腿不是「用脚打水」，是「用整个身体荡秋千，脚只是秋千的尽头」。初学者最常见的问题——膝盖猛弯、小腿上下捣——就像拿一根棍子中间使劲抖，棍子两头都只是晃，出不来鞭梢那一下脆响。

脚蹼你自己就有

这套波的最后一段是脚。这里有个常被忽略的细节：脚的姿势要绷脚尖（脚背伸直、脚尖指向后方，芭蕾里叫绷脚），让整条腿到脚尖形成一片平滑的「蹼」。脚一勾起（所谓「锄头脚」），这片蹼就折断了——鞭梢变成了鞭梢上绑的一把锄头，迎流面积暴增，推进力归零还倒贴阻力。游泳运动员的踝关节柔韧性是练出来的，很多高手脚背可以绷到几乎和小腿成一条直线，这不是为了好看，是为了让波的最后一段不漏能量。

摆动推进凭什么高效

最后回到力学：一片上下摆动的「蹼」为什么能往前推？粗略地说，摆动的蹼在身后留下一串交替旋转的小涡——这串涡合起来相当于一股指向正后方的水流（行家叫它反卡门涡街：普通圆柱脱落的涡街把物体往后拽，而摆动尾鳍刻意造出方向相反的涡街，把水往后喷）。根据牛顿第三定律，水往后走，你就往前走。船用螺旋桨、鱼尾、海豚尾鳍、蜂鸟的翅膀，用的是同一类原理：**不是把水「推开」，而是给身后制造一股持续向后的射流。**

而且这种推进还有一个「甜区」：摆动的频率和幅度要配得上流速——摆太慢、幅度太小，蹼只是在原地拍水；摆太猛，能量又浪费在大幅度搅动上。海豚天生就游在这个甜区里，人得靠成千上万次打腿去找到它。这也是为什么蝶泳腿练到最后，教练看的不是你踢得多狠，而是你的节奏稳不稳。

大白话

大白话：把这一章压缩成三句话——腿并拢当尾巴；波从胸口起、膝盖不主动弯、脚尖绷直；追求的是身后一股稳定的向后的水流，不是水面上噼里啪啦的水花。水花越大，说明能量浪费在水面上的越多。

腿这台发动机讲完了。但蝶泳里腿有个古怪的拍子：手臂划一次，腿要踢两次，而且两次一大一小。为什么不是一划一踢？这要先弄清手臂这一划里发生了什么——下一章，解剖一次完整的划水。

第四章 · 一次划水的解剖

腿的发动机讲完了，轮到主发动机：手臂。一次蝶泳划水从两臂入水到回到入水点，只有一秒多钟，但这一秒里发生的力学转折比想象的多。这一章把它放慢，一格一格看。

先纠正一个直觉：手不是把水桶往后倒

绝大多数人对划水的想象是「把手当船桨」：手掌正对后方，直臂把水从前往后推。这个模型叫阻力型推进——推力来自桨板正面顶水的压差。它不算错，但它漏了一个关键事实：**水是稀的，顶不住**。你用手掌正对后方推水，水不是乖乖被你推走，而是从手掌边缘绕过来「滑」掉——你感觉到的力越大，滑掉的水越多，效率反而越低。

上世纪七十年代，美国教练「博士」康西尔曼（Doc Counsilman）用水下摄影研究顶级泳手，发现他们的手在水里根本不是走直线往后推，而是在**划一条左右蜿蜒的曲线**——他据此提出手更像机翼，靠侧向滑动产生的升力推进。这套「升力说」统治了游泳教学几十年，后来的研究又给它降了温：伯努利式的升力解释站不住脚，手的推进主要还是「向后加速水」加「身后造涡」那套账——但康西尔曼留下的观察本身是对的：**高手的手在水里走的是曲线，不是直线**。

大白话

大白话：划水的目标不是「把水往后倒」，而是「在水里找到一个能抓住的东西」。手在水里走曲线，是在不停地找还没被搅动的「静水」——就像攀岩者不停找新的支点，把身体从支点旁边挪过去。你感觉到的「抱住了水」，就是手暂时锚定在了一团相对静止的水里。

一划的五格分解

带着这个模型，看一次完整的蝶泳划水（两臂完全对称，以下说的是每只手各自的动作）：

1. **入水**：两手在肩宽处入水，指尖先入，掌心略向外。入水点不能太窄（窄了后面没地方划），也不能太宽（宽了够不着水）。

2. **抱水 (catch)**：手臂外划、屈腕屈肘，肘部保持在高位——这就是「高肘抱水」。目的是尽早让**小臂加手掌**这一整片「桨叶」竖起来、朝向后方。只用手掌当桨和用小臂加手掌当桨，面积差了将近一倍，推进力也差一大截。高肘就是在抢这块面积。
3. **划水 (内划)**：两手从外划转到向内、向胸口下方收——从侧面看，两只手的轨迹合起来像一把钥匙的钥匙孔，所以叫「钥匙孔曲线」。这其实就是两个自由泳划水的镜像对称版。
4. **推水**：手臂从胸下向后、向大腿方向把水推出去，直到手臂接近伸直。这是整个划水里速度最快、出力最狠的一段——因为水在打滑，手必须一路加速才能维持压力，推水的末段是「油门踩到底」。
5. **移臂 (recovery)**：两臂同时出水，放松、基本伸直，贴着水面从两侧抡回入水点。这一段不提供任何推进，只负责一件事：**别添乱**——所以手臂要放松、要贴着水面走弧线，把第二章说的「回程阻力」压到最低。

为什么曲线比直线聪明

回到钥匙孔曲线——它为什么是那个形状？三个原因，全是前面几章定律的推论。

第一，**躲开水流**。手刚入水时，身边的水是静的，好抓；划到中段，身边的水已经被你搅动了，再直线推就是推一团已经跟着你跑的水——等于推自己的影子。向外、向内变换方向，是为了让桨叶始终对着「新鲜的、静止的水」。

第二，**凑齐桨叶**。直臂划水时，能朝后顶水的只有手掌；屈臂高肘之后，手掌加小臂甚至大臂内侧都参与「面壁」。钥匙孔的弯曲轨迹，正是手臂从「伸展开够水」平滑过渡到「屈臂桨叶推水」的几何结果。

第三，**接力不断档**。划水的前段靠肩背大肌群，末段推水靠手臂伸直——轨迹的弯曲让不同肌群接力，力输出更平滑，不会出现「前半程有劲、后半程空转」。蝶泳两臂同时划，没有自由泳那种左右交替的掩护，任何断档都会直接变成速度的坑。

大白话

大白话：钥匙孔曲线可以这么想——你的手在水里不是在「划船」，而是在爬梯子：横档（静水）用一根就少一根，所以手得不停地斜着挪动去找下一根没踩过的横档。划得直的人是在一根横档上原地猛蹬，梯子没坏，但人没上去。

一个常被问的问题：蝶泳和自由泳的划水差多少

水下部分几乎一样——高肘抱水、钥匙孔、加速推水，把自由泳的单臂划水复制粘贴成对称双份，就是蝶泳的水下划臂。真正的差别在水上：自由泳一臂划水时另一臂在移臂，推进此消彼长、连绵不断；蝶泳两臂同时划、同时移臂，推进是「一脚油门一脚空挡」的脉冲式的。这个脉冲式节奏直接决定了腿的拍子——手臂踩油门的瞬间身体要往上窜，手臂空挡的瞬间身体往下掉，需要腿在这两个瞬间分别「托一把」和「顺一下」。

这就是下一章的主角：为什么一次划水要配两次打腿，以及这两次踢一大一小、一先一后，究竟在和手臂对什么暗号。

第五章 · 两次打腿的时序

上一章末尾留了个问题：蝶泳的手臂是「一脚油门一脚空挡」的脉冲式推进，而蝶泳的腿偏偏要在一划里踢两次。这一章把这个拍子拆开——先看为什么「脉冲」本身是灾难，再看两次踢腿是怎么救场的，最后看两次踢和手臂之间那套严丝合缝的暗号。

速度的忽快忽慢，是要付税的

回到第二章那条平方定律：阻力 $\propto$ 速度²。平方是个「欺软怕硬」的函数，它带来一个不太显然的后果：**同样是平均 1.5 米/秒，匀速 1.5 和「一会儿 2、一会儿 1」地波动着游，后者的平均阻力更大。**算一笔账：匀速 1.5 时，阻力正比于 $1.5^2=2.25$ ；波动方案里，一半时间阻力 $\propto 2^2=4$ ，一半时间 $\propto 1^2=1$ ，平均 2.5——白白多交了 11% 的「波动税」。速度起伏越大，税越重。

蝶泳是四种泳姿里速度波动最大的：划水推进的那零点几秒身体往前窜，移臂的空挡期身体明显减速。如果没有腿来「填谷」，蝶泳的效率会难看到没法比赛。**两次打腿的第一重意义，就是把脉冲抹平一些**——在手臂不管事的时候，由腿来供动力。

大白话

大白话：开车都知道匀速最省油，一脚油门一脚刹车最费。游泳里「油」直接由阻力说了算，而且是平方关系——速度波动的惩罚比开车狠得多。两次打腿就是蝶泳的「定速巡航系统」。

两次踢，各管一件事

把一划的时间轴拉直，两次下打的位置是固定的。泳坛有句口诀：**「手进踢一次，手出踢一次」**（kick your hands in, kick your hands out）。

第一次下打：手臂入水时。此刻两臂刚结束移臂、扎进水里，是全周期推进最空、阻力最大（手臂入水瞬间迎流面积增加）的时刻。这一踢的任务是**托住下半身**：不让臀腿在身体前窜的惯性里沉下去，维持第二章说的那条「水平直线」。它同时给身体一个向前的小推进，补上手臂的空挡。

第二次下打：手臂在水下推水时。此刻手臂正在踩主油门，身体往前窜。这一踢的任务是**顺势加力**：和推水叠加成一个推进高峰，更重要的是把臀部「抬」回高位，为下一个周期的移臂做准备——移臂时整个上半身要出水前抡，如果此时臀部是沉的，等于拖着一堵墙抡胳膊。

两次踢一般一大一小，但哪次大因人而异：多数选手配合推水的第二踢更狠（叠加高峰），也有人第一踢更重（优先保身体位置）。真正不能错的是**时机**，不是力度——踢早了或晚了零点一秒，就从「填谷」变成「添乱」：比如在最该顺势的时候你给了腿一个向上的制动，推进高峰直接被自己削掉一截。

身体的跷跷板

两次踢能「对上拍」，靠的不是大脑每秒下两次指令，而是身体内部的一套机械联动。从侧面看，蝶泳中段的躯干像一架以髌为支点的跷跷板：胸口下压时臀部上浮，胸口上浮时臀部下沉，两者此消彼长。手臂入水 → 胸口顺势下压 → 跷跷板把臀部抬起来 → 双腿正好处于「从上往下甩」的位置，第一踢几乎是被重力加跷跷板「送」出来的；推水结束时胸口上浮、臀部下沉的趋势，又被第二踢的「抬臀」正好对冲。

这就是为什么教练说蝶泳「用胸口引领」：你主动做的只有「压胸—拱臀」这一套波浪，踢腿时机是波浪的副产品。**节拍器不在腿上，在胸口**。反过来说，那些「腿手永远对不上」的初学者，多半不是腿笨，而是胸口没有启动波浪——节拍器停了，鼓手自然乱打。

大白话

大白话：别想着「一秒钟内指挥手做五件事、腿做两件事」，没人有这样的 CPU。正确姿势是只启动一个东西——胸口的波浪，然后让手和腿都挂在这套波浪上，时机自动对齐。蝶泳的协调是「结构性」的，不是「反应性」的。

少一踢会怎样

实验一下就知道：只踢一次（比如只在推水时踢），移臂期间下半身立刻失托，臀腿下沉，身体从「一条线」变成「一张弓」，下一划等于顶着墙出发；而且波动税立刻变重——速度曲线从「小波浪」变成「过山车」。有些短距离选手会用一次重踢的变种拼前程，但那是有

意拿效率换节奏；作为泳姿的默认形态，两踢是把脉冲推进和水平体位同时救回来的最小配置。

到这里，腿、手、拍子都齐了，蝶泳的「发动机+变速箱」已经完整。但还有一个动作，它不提供任何推进，却能在一瞬间毁掉前面所有章节建立的一切——抬头呼吸。下一章算算呼吸这笔账。

第六章 · 呼吸是最贵的动作

前面五章搭起来的東西——減阻的直線、海豚腿、鑰匙孔划水、兩踢的拍子——可以被一個動作在零點幾秒內全部拆掉。這個動作不划水、不打腿，看起來人畜無害：**抬頭呼吸**。這一章專門算呼吸的賬，它是蝶泳里最貴的一個動作。

抬頭為什麼會「腰斬」整條身體

先看一個物理事實：人的身體在水里天然是一架不平衡的跷跷板。肺是兩個大氣囊，浮力集中在上半身；腿主要是肌肉和骨頭，密度比水大。所以人漂在水里時，重心和浮心（浮力的等效作用點）不在同一個位置——浮心偏上（胸部），重心偏下（髖部），兩者錯開，身體天然有「頭輕腳重」的下沉趨勢，全靠前進時的升力和打腿維持水平。

現在抬頭。頭是一顆四五公斤重的球，裝在身體最前端。你把它從水里抬到空氣中，等於在跷跷板的最外端加了一塊砝碼——**上半身被抬起的每一分角度，都通過跷跷板以幾乎相等的幅度把臀腿壓下去**。初學者抬頭換氣時旁觀者看到的經典畫面：腦袋出水的同時，屁股和腿沉到半米深，整个人從「一條線」折成「一張弓」。第二章算過，這意味著迎流面積翻幾倍——一次抬頭換氣的代價，大致相當於在身上掛了一隻裝滿水的塑料袋游兩三米。

大白話

大白話：呼吸本身不花錢，「為了呼吸而改變體形」才花錢。蝶泳的呼吸貴，是因為它往往伴隨著抬頭，而抬頭 $\approx$ 主動往水下按自己的腿。省錢的辦法只有一個：呼吸的時候盡量不改變體形。

省錢的呼吸長什麼樣

看頂級選手的慢鏡頭，會發現他們換氣時根本不「抬頭」——至少不是初學者那種把整個腦袋昂起來。動作要點是三個：

1. **借現成的浪，不自己造浪**。上一章說過，划水推進時胸口本來就處於全周期最高點、身體自然前沖上抬。呼吸窗口就設在這零點幾秒里——**身體已經抬起來了，嘴只是順便露出水面**，

呼吸是搭顺风车，不是另起炉灶。

2. **下巴贴水，眼睛看前下方。**换气时下巴几乎擦着水面前伸，而不是朝天昂起。头抬高一厘米，臀腿就沉一截；高手追求的是「嘴刚好高过水线」，多一毫米都是浪费。
3. **头比手先回家。**吸气结束，头必须在两臂移臂入水**之前**回到水中、回到低位。这样手臂入水时身体已经恢复直线，第一次打腿托住的是一条线而不是一张弓。口诀是「低头领着手入水」。

多久吸一次：频率不是关键，姿势才是

新手教学里常说「两划一吸」，理由是少抬头少沉腿，利于保持节奏。但看奥运会决赛你会困惑：菲尔普斯游 200 蝶几乎**每一划都呼吸**。谁对？都对。频率本身不是变量，**每次呼吸的「价格」才是**。如果每次呼吸都是低位、借势、头先回家，一划一吸的总税也很低，还换来了充足的供氧；如果每次呼吸都是昂头折腰，那两划一吸只是少交几笔天价税而已。

屏气的代价也要算进账里：不呼吸，二氧化碳在体内堆积，肌肉很快开始酸胀——这个「缺氧税」随距离指数式变重。所以真实的策略曲线是：距离越短越敢憋（50 米可以只吸一两次甚至不吸），距离越长越需要规律供氧，而无论长短，**呼吸的力学姿势一分钱都不能省**。

大白话

大白话：呼吸节奏的讨论（一划一吸还是两划一吸）是地表上的争论，真正的分水岭在水下——你呼吸时是「搭身体的顺风车」还是「自己另开一台起重机」。前者每划都吸也快，后者两划一吸也慢。

为什么偏偏是蝶泳

四种泳姿里，仰泳的脸始终在水面之上，呼吸本来就不要钱；自由泳呼吸时有身体滚动可以借力，转头只是顺着滚动的边；蛙泳本来就允许抬头换气。唯独蝶泳身体不许左右滚（规则要求双肩保持水平）、双腿又绑在一起，没法用打腿把下沉的下半身单独救回来。**呼吸造成的每次「折腰」，都得由下一次划水和打腿硬扛回来**——这就是蝶泳「一乱全乱」的力学根源，也是它难学的真正原因：不是动作多，而是容错率低。

不过故事还有另一半。身体这个「胸口起、臀腿落」的起伏，如果被驯服、被控制在恰好的幅度和频率里，它就不再是阻力来源，反而能变成第二台发动机。下一章讲蝶泳里最玄也最美的部分：用整个身体造波。

第七章 · 用身体造波

上一章结束时埋了一个转折：身体的上下起伏，在坏蝶泳里是阻力来源，在好蝶泳里却是发动机的一部分。这一章解释这个反转——蝶泳最深处的一层原理：**游蝶泳的人不是在水里「划船」，是在水里「造波」，然后骑在自己造的波上往前走。**

波本身就是推力

先看大自然。鳗鱼、海蛇、七鳃鳗游泳时，全身都在波动——一道弯曲从头滚到尾，人跟着就往前走了。这种推进叫波动推进：身体上有一道向尾部传播的行波，波所到之处把身边的水向后下方「搓」出去，反作用力的向前分量合成推力。它和我们第三章讲的尾鳍摆动是同一家族——摆动是「只有尾巴在动」，波动是「全身都是尾巴」。

人类泳姿里，只有蝶泳用到了这一层。好的蝶泳选手，波浪不只存在于打腿的那零点几秒，而是贯穿全身：胸口压下、髋部抬起、大腿下压、小腿甩出——这道波从头滚到脚，和鳗鱼的波是同一个东西，只是人的「尾巴」短、波幅小。研究者的水下测量证实了这一点：高手的身体波浪本身就贡献可观的推进，而不仅仅是腿「踢」出来的。

大白话

大白话：把身体想象成一条湿毛巾。你可以抓着毛巾一头「抽」水（这是踢腿），也可以让一道拧转的波顺着毛巾滚过去（这是波动）。后者看着柔和，推起水来一点不含糊——大自然里最快的游泳者，用的都是波，不是桨。

振幅的甜区：波太小没劲，太大是墙

但波动有个严格的窗口。第二章的定律还在头顶悬着：波峰和波谷意味着身体的某些部位在「横向」于前进方向运动，幅度一大，这些部位就变成迎流的墙。所以蝶泳的波必须满足一个听起来矛盾的要求：**要足够大，大到能把能量传到脚尖、把水下表面的「搓水」利用起来；又要足够小，小到不撞破流线型。**

这个窗口大致落在：从头顶到脚尖，波的最大偏移控制在躯干厚度量级——换句话说，旁观者看高手游蝶泳，第一反应往往是「他身体没怎么大起大落啊，怎么这么快」。而初学者以为蝶泳就要「猛烈地拱起来砸下去」，结果振幅超标，每一次起伏都在给自己造墙。判断标准甚至可以量化：如果头和臀的上下位移很大、水花四溅，那不是有劲，是漏劲。

节奏为什么比力气值钱

波动推进还有一个隐藏收益：**它能回收利用能量**。身体下压时获得的动能和「被压弯」的肌腱弹性能，不会在动作结束时消失——它们像弹簧一样存起来，在波浪反向时释放出来还给下一个动作。荡秋千的人都懂这个感觉：顺着秋千自己的节奏推，每次只用一点力就越荡越高；逆着节奏硬推，累死也荡不起来。

蝶泳就是一架有自己固有频率的秋千。每个人的身高、体重、柔韧性决定了他的「本命节奏」，在这个节奏上，手臂、波浪、打腿三者共振，能量在体内循环而不是耗散——这就是老手说的「找到了蝶泳的节奏」。而一旦你试图用蛮力提速、打乱这个频率，共振崩塌，所有动作开始互相打架，体能消耗立刻翻倍。这就是为什么蝶泳看起来「越放松越快」：放松不是玄学，是让身体回到能回收能量的共振频率上。

大白话

大白话：力气是钞票，节奏是利息。硬游的人每一米都在掏现钞；找到节奏的人，上一个动作存的能量在替下一个动作付账。同样一箱油，一个在开手动挡新车，一个在推着熄火的卡车。

15 米规则的旁证

这套「造波」原理有多强，规则替我们做过实验。比赛里最快的段落往往不是泳姿本身，而是出发和转身后的水下海豚腿——没有划臂、没有呼吸、没有兴波阻力，只剩纯粹的全身波动推进，速度快到选手恨不得整池都潜着游。泳联最终出手，给仰泳、蝶泳、自由泳统一划了 15 米的水下上限（蛙泳的水下长划臂另有规定）。注意一个细节：被限制的「水下海豚腿」正是波动推进的裸机版。对蝶泳来说，这个旁证尤其直白——**它平时引以为傲的，是那两把抡出水面的胳膊；而它跑得最快的时候，用的恰恰是从头到脚这道波。**

读到这里，一个问号应该已经冒出来了：既然波动这么高效、能量还能回收，蝶泳为什么还是以「累死人不偿命」著称？200 米蝶泳怎么就成了游泳运动员最怕的项目？这笔账值得单

算一章——下一章，蝶泳的能量账单。

第八章 · 为什么蝶泳这么累

上一章把波动推进说得像免费午餐，这一章来买单。事实摆在那儿：200 米蝶泳被广泛认为是游泳里最难熬的项目，游泳圈流传的说法是「能游完 200 蝶的人，什么苦都能吃」。同样是 200 米，自由泳轻松得多——差距不在意志力，在一份写在力学里的能量账单。这一章逐项对账。

第一项：双臂同时抡出水面，是笔大开销

自由泳移臂，一次只抡一条胳膊，而且另一条胳膊在水下撑着，身体有支点。蝶泳移臂，**两条胳膊同时出水**，而且在出水的一瞬间，身体没有任何水下支点——全部体重等于短暂地「挂」在正在下压的胸口上。把两条加起来七八公斤的手臂在一秒钟内加速抡出水面、甩过头顶弧线，这个动作的功率需求，和自由泳的单臂移臂完全不是一个量级。

更麻烦的是力学方向：出水瞬间手臂要对抗的不只是重力，还有惯性——手臂出水前正在向后推水，要抡回来得先「刹车」再「反向加速」。一进一出，全是净消耗，没有一寸转化为前进。

第二项：波动税在蝶泳身上收得最重

第五章算过「速度忽快忽慢要交税」。四种泳姿里，蝶泳和蛙泳的速度波动最大，而蝶泳的波动尤其剧烈：划水时窜到接近 2 米/秒以上，移臂空挡期掉到谷底。一划一周，每秒都在交税。自由泳的滚动和交替划臂天然把速度曲线抹平了，蝶泳的对称规则却把「脉冲」写进了基因里——两踢能缓解，但抹不平。

第三项隐形成本是垂直方向的运动：身体的波峰波谷意味着每个周期都有一部分能量花在「把身体抬起来又放下去」上。这部分能量对前进的净贡献是零——它是波动的入场费。蝶泳的入场费，四种泳姿里最高。

第三项：人体的功率天花板，蝶泳顶得最满

第二章给过数字：普通人持续输出一两百瓦，顶尖选手四百瓦上下。而蝶泳的高速档对功率的需求正好顶在这个天花板上——它要求你在整个比赛距离里持续输出接近极限的功率，还不能掉节奏，因为节奏一掉（第七章的共振崩塌），能量回收机制失效，同等速度的成本立刻上浮。

这就是 200 蝶的残酷之处：50 蝶可以靠无氧爆发硬顶过去；100 蝶是爆发和耐受的混合；**200 蝶恰好落在「必须全程高功率有氧输出 + 技术不能有一厘米变形」的死亡区间**。最后 50 米，乳酸堆积让手臂像灌了铅，而此刻任何一个动作变形（抬头高了、踢腿晚了）都会通过前几章讲的杠杆放大成速度的崩塌。200 蝶的末程崩盘是游泳比赛里最惨烈的景观之一——领先者常常在最后 15 米「突然不会游了」，那其实不是意志崩溃，是功率账穿底了。

大白话

大白话：蝶泳像一辆油耗极高的跑车，发动机功率却只是家用轿车水平。50 米是踩一脚地板油，油箱扛得住；200 米是让你用这辆车跑长途——你不是在开，是在精算每一滴油，而且油门还踩着不放。

账单的反面：为什么值得

账单这么难看，为什么还有人爱蝶泳？因为账单的另一面写着：**蝶泳是对全身训练效率最高的泳姿**。核心、肩背、腿、柔韧、节奏感，一个动作全包；波动推进调动的大肌群数量在四种泳姿里最多。也因为它是「会就是会、装不出来」的泳姿——力学门槛把投机取巧挡在外面，能连续游出标准蝶泳本身就是一种全身协调能力的证书。

而且对普通爱好者，账单有个出口：这本书讲了七章力学，每一条都在告诉你同一个省钱方向——**把动作做对，账单能砍掉一半以上**。问题只剩「做对」长什么样、错又错在哪。下一章先画一张错误地图：那些几乎每个人都犯过的错，各自踩在哪条力学定律上。

第九章 · 错误的地形图

前八章把「对的蝶泳」拆完了。这一章换个角度：画一张错误地图。几乎每个自学蝶泳的人都踩过下面这几个坑，而每个坑底下都埋着一条前面讲过的定律——看懂错误背后的力学，比记住一百条「动作要领」有用得多。

坑一：锄头脚——鞭梢上绑了把锄头

症状：打腿时脚尖勾起、脚背和小腿成九十度，像两把锄头在水里刨。**踩的定律：**第三章的鞭子原理。海豚腿的推进靠「波滚到脚尖甩出最后一记脆鞭」，而勾脚把柔韧的鞭梢换成了硬邦邦的直角——波传到脚踝就被截断，脚不但推不了水，还成了迎流的一块板。**解法：**陆上压脚背（跪坐，脚背着地，每天几分钟）+ 水里短距离绷脚打腿，先求「脚尖指向池底后方」，再求力量。踝关节柔韧是硬指标，骗不了人。

坑二：两头翘——把波游成了跷跷板

症状：头和腿像跷跷板两端一样猛烈地一起一伏，水花巨大，旁观者看着都累。**踩的定律：**第七章的振幅甜区 + 第二章的迎流面积。波幅一旦超过躯干厚度量级，起伏的躯干本身就成了反复撞水的墙——能量全花在「把自己抬起来砸下去」，前进反而没分到多少。**解法：**把「往上拱」的念头换成「往前钻」——胸口是向前下方压，不是向上顶。好的自检：请人看你游，若头顶的上下位移接近一个头的高度，就是超标了。

坑三：膝盖捣蒜——波从中间断开了

症状：大腿不动、小腿在膝盖处猛弯猛直，像在水里踩一辆看不见的自行车。**踩的定律：**第三章「波从胸口起」。膝盖主动弯曲等于抓住鞭子中段甩，前面整条躯干的放大器全部作废，打腿频率再高也只是原地搅水。**解法：**先做不带腿的陆上波浪（站立，从胸口开始把一道弯滚到脚），再下水做「浅水区扶边海豚腿」，注意力全程放在髋的起伏上，膝盖只允许「被带动」。

坑四：抬头换气——自己按沉自己的腿

症状：每次呼吸脑袋昂出水面，同时臀腿肉眼可见地下沉，呼吸后的一划格外费劲。**踩的定律：**第六章的跷跷板。头抬高一分，腿沉一截，迎流面积翻倍，下一划等于顶着墙出发。**解法：**练「下巴贴水呼吸」——想象下巴底下压着一个网球，换气时只允许它滚出来，不许它飞起来；再配合「头比手先回家」。可以先用脚蹼降低速度门槛单独练这个窗口。

坑五：直臂捞月亮——划得又宽又空

症状：两臂直挺挺地在身体两侧画大圈，划幅极宽，感觉「抱了很多水」却不见走。**踩的定律：**第四章的抱水原理。直臂宽划时，手掌只是在水平方向上扫过水流，桨叶根本没立起来对着后方；划得越宽，手离「向后推」的有效方向越远。**解法：**把划幅收窄到肩宽附近入水，划水时刻意「肘高手低」，想象小臂是一面墙去顶身后的水。单臂蝶（一手划、一手前伸）是练这个手感最好的分解动作。

坑六：砸水入水——带着手刹起步

症状：移臂结束时两臂「拍」进水里，水花四溅，入水后身体明显一沉一顿。**踩的定律：**第五章的波动税。砸水让速度曲线在谷底又挨了一刀——入水冲击不但不推进，还把身体砸沉，第一踢的托举量被迫加倍。**解法：**移臂末段主动减速，让手「插」进水里而不是「拍」上去——指尖先入，手臂顺势滑入。听起来是细节，但它直接决定下一个周期的起点高度。

大白话

大白话：六个坑可以归成一句话——凡是「用蛮力对抗水」的动作都是错的，凡是「顺着波、借势、提前量」的动作都是对的。锄头脚是对抗，绷脚是顺势；两头翘是对抗，前钻是顺势；抬头是对抗，借势呼吸是顺势。蝶泳没有例外。

地图的用法

这张地图最好的用法不是「一次全改」——那是不可能的，六个错误共用一个神经系统，同时改等于同时都不改。正确的顺序是顺着力学因果链从上游往下游修：先脚（坑一）和波（坑二、三），因为它们是下半身这条链；再修呼吸（坑四），因为它放大一切；最后修手臂

细节（坑五、六）。每修一个，其他坑的「症状」都会减轻——因为它们是同一条链上的连锁反应。

地图画完了，还剩最后一章：如果从今天零开始，一条什么样的练习路径，能把这本书讲的每条原理逐个装进身体里。下一章，学会造浪。

第十章 · 学会造浪

九章力学讲完了，但蝶泳不是用脑子学会的——神经系统学的是动作，不是原理。最后一章把前面所有定律翻译成一条可执行的练习路径。它的总原则只有一条：**把整条因果链拆成一节一节，每一节练到自动化再接下一节；全程不追求快，只追求「形不散」。**

第零站：陆上，先把波装进身体

下水之前，两件事在陆地上效率更高。一是**站立体波**：站直，从胸口开始，把一道弯曲依次滚过髌、膝、踝，像一股波浪穿过身体——这就是第三章的「波从胸口起」，陆上练它没有水的干扰，大脑可以专注建立这个运动程序。二是**压脚背**：跪坐，脚背贴地，每天几分钟，解决锄头脚的硬件限制。这两件小事做两周，下水后的弯路能少走一半。

第一站：只要腿——海豚腿的四种体位

由易到难，一级一级来：**扶边海豚腿**（手扶池边，体会髌部发力、膝盖被动）→ **俯卧徒海豚腿**（两臂前伸，小幅度，目标是「身体像一块板在波动」而不是「脚在拍水」）→ **垂直海豚腿**（深水区身体竖直，双手抱胸，只用波动让身体保持头在水上——这是检验「波是否真从躯干发」的试金石，腿上捣蒜的人在这里会立刻沉下去）→ **水下海豚腿**（蹬壁后潜入水下，体会没有兴波阻力时波动推进的顺滑——顺便亲身验证第七章的 15 米规则）。脚蹼可以在前两站使用，它放大反馈，让你更早「尝到」鞭梢甩出去的感觉。

第二站：加一只手——单臂蝶

海豚腿自动化之后，加手臂，但一次只加一只：**一手做蝶泳划水，另一手前伸扶板或伸直，腿保持两次打腿的拍子**。单臂蝶是蝶泳教学里的万能分解动作，因为它同时解决三件事：钥匙孔曲线和高肘抱水（第四章，只需要关注一只手）、身体波浪不被打断（第七章）、以及侧向换气——先学会「低位的呼吸姿势」，再把它转正成第六章的双肩水平呼吸。左右手交替练，再过渡到「右三划、左三划、双臂三划」的组合。

第三站：完整配合，但先从「不呼吸」开始

双臂合起来之后，先别急着呼吸。用**连续两到四划不换气**的方式体会第五章的完整拍子：手进踢一次、手出踢一次，胸口领波，头保持低位。呼吸是最后加进来的——而且按第六章的规矩加：借划水的势、下巴贴水、头比手先回家。一开始「划三次吸一次」，姿势稳定后再加密度。

终考：慢蝶

整条路径的终点是一个听起来矛盾的考试：**用最慢的速度游标准蝶泳**。为什么慢反而难？因为快速游动时，惯性会替你掩盖时机错误——拍子差了零点一秒，速度能把你「带过去」。慢速时没有任何惯性可借，波浪的幅度、两踢的时机、呼吸的窗口，每一处都必须精确落在力学要求的位置上，否则身体当场下沉给你看。能连续慢蝶 25 米而形不散，意味着你的动作不再靠力气硬撑，而是真的骑在了自己造的波上——这本书讲的每一条原理，都装进了你的身体。

大白话

大白话：整条路径就一句话——先造波（陆上+腿），再划手（单臂），再加呼吸，最后用「慢」来验收。快蝶谁都能瞎抡两下，慢蝶才是毕业证。

尾声：回到那只海豚

这本书从一只不划手的海豚开始，绕了十章，现在可以合上那个环了。蝶泳的全部秘密——出水移臂、并拢双腿、两踢拍子、低位呼吸、胸口领波——都是同一道题的解：**一副人类身体，在规则的约束下，如何最大限度地模仿那道穿过海豚身体的波**。你下次下水，第一次成功让一道波从胸口滚到脚尖、身体顺势向前一窜的那个瞬间，会有一种奇怪的感觉：不是你学会了蝶泳，而是你短暂地借用了海豚花几千万年打磨出来的东西。那一下，就是这本书想给你的一切。