



游泳减阻与推进力技术优化研究进展

陈洁星^{1,2}, 温宇红^{3*}, 沈思佳¹, 彭义¹, 张腾⁴

(1. 北京体育大学 中国游泳运动学院, 北京 100084; 2. 福建师范大学 体育科学学院, 福建 福州 350117;
3. 北京体育大学 体育休闲与旅游学院, 北京 100084; 4. 杭州师范大学 体育学院, 浙江 杭州 311121)

摘要:通过梳理近20年国内外游泳阻力与推进力研究,总结游泳减阻与增加推进力技术等领域的研究进展。研究发现,在减阻研究中:水下0.6~1.0 m的波浪阻力可以忽略,该区间不同速度下滑行比水面滑行有一定的距离和时间优势;侧卧流线型姿势的水下腿优于俯卧和仰卧流线型姿势,且头前双手重叠会使身体重心发生轻微侧向偏移;滑行前采用腹式吸气优于胸式吸气,腹式吸气有利于人体浮心靠近重心和胸腹部涡流减少;滑行时头部保持平直姿势较头部微低姿势能够降低4%的总阻力;倒三角形体型的总阻力值优于倒梯形、矩形、椭圆形,且女运动员滑行时的附加重量少于男性;公开水域游泳中尾随运动员头部越接近领游运动员脚部时减阻效果越好,且不同位置的跟随对运动员的减阻效果不同;与2D泳帽相比,佩戴3D泳帽能帮助运动员降低6%的阻力值,且3D高尔夫球凹点型泳帽的阻力值最低。在增加推进力方面:不同手指开合和掌型对阻力推进力的影响不同;脚部是水下腿的主要推进力;不同水平运动员水下腿频率相近,但打腿幅度存在差异;踝关节柔韧性能够提高水下打腿幅度,但必须注意踝关节柔韧性不对称的代偿现象,保持打腿对称性;水下打腿时前伸的双臂有惯性减震作用,能够降低手臂上下摆动幅度;爬泳配合游时左、右臂划水的净阻力差异显著,但在仰泳划水中未见显著差异。总体上看,非复杂游泳动作的研究是当前国内外研究的热点,公开水域游泳减阻优化开始受到关注,但是基于4种泳姿的完整动作与技术优化的研究较少,探究完整动作与不同动作的速度、幅度、频率、节奏和姿态是今后研究的趋势。我国在高水平游泳运动员的减阻与推进力技术优化方面具有一定优势,但在流体力学基础研究领域发展缓慢,应加强跨学科研究,弥补我国在该领域的短板和不足。

关键词:游泳;减阻;推进力;进展

中图分类号:G808.1 **文献标识码:**A

运动员主要通过在水中增加推进力、减少阻力或同时改进两者提高游泳速度(Riewald et al., 2015)。增加推进力能够直接提升游泳运动员的游速,而减阻由于不必耗费额外的体能,被认为是提升游泳表现最具效率的方法之一(Barbosa et al., 2010),因此,围绕游泳减阻与增加推进力的研究一直是游泳训练和科研领域的热点。近20年,国内外学者对游泳减阻和推进力的基本理论问题研究(许琦, 2002; Maglischo, 2016)、测量工具和方法的研究(李天贽等, 2019; 闫卫星等, 2005; 仰红慧等, 2004; 张晓侠等, 2013; 仲宇等, 2005; Scurati et al., 2019),以及基于训练与比赛监测系统的减阻与增推技术优化和训练研究已较为全面(林洪, 2000; 温宇红等, 2005; 周晓东等, 2008),整体呈现基础理论与实践应用研究不断完善的发展态势。基于此,本研究对近20年游泳减阻与增加推进力的相关研究进行梳理,旨在总结游泳运动表现过程中减阻与增加推进力的技术优化研究进展,从而为我国游

泳科研和训练提供科学依据,助力我国竞技游泳的发展。

1 研究方法

本研究以发表时间在2000—2019年的文章为研究对象。中文文献在中国知网核心期刊中检索获得,以“游泳”“阻力”“推进力”为主题搜索词,共查得48篇期刊论文和38篇学位论文,通过题目和摘要剔除了17篇期刊论文和37篇学位论文,最后纳入31篇期刊论文和1篇学位论文。英文文献在Ebsco、Web of Science和ProQuest等数据库中检索获得,以“swimmer”“drag”为主题词,共查得234篇

收稿日期:2020-09-03; 修订日期:2021-08-01

基金项目:国家体育总局科技服务项目(BSU20180449)。

第一作者简介:陈洁星(1987-),男,讲师,在读博士研究生,主要研究方向为游泳教学与训练,E-mail:chenjiexing@fjnu.edu.cn。

*通信作者简介:温宇红(1968-),女,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为游泳教学与训练,E-mail:wuyhswim@126.com。

期刊论文和3篇学位论文;以“swimmer”“propulsion”为主题,共查得303篇期刊论文和1篇学位论文。经人工筛选排除非游泳运动相关领域的文献,最后得到114篇期刊论文和4篇博士学位论文。本研究根据研究的主题和内容对文献进行分类,将从减阻和增加推进力两个方面进行总结和梳理。

2 游泳减阻技术优化研究

2.1 水下滑行动作减阻研究

2.1.1 滑行深度与减阻

适宜的水下滑行深度和速度有利于滑行动量的保持,且有助于提高出水后第一次划水动作的初速度(Li et al., 2017; Lyttle et al., 1998)。首先,不同深度的滑行阻力不同。运动员在离水面0~0.25 m时的阻力值达到最高(Novais et al., 2012; Vr Mantha, 2014)。波浪阻力在水下0.6 m时接近可忽略的状态,水下1.0 m位置时运动员基本不受波浪阻力的影响(Vennella et al., 2006; Zhan et al., 2017)。其次,不同速度和深度的水下滑行距离不同。一项模拟运动员水下蹬边起始速度的研究发现,在滑行速度从3.1 m/s下降至1.6 m/s的过程中,在水深0.6 m位置的滑行时间比在水面滑行(离水面0 cm)多0.18 s,而第1 s时间内在水深0.6 m位置的滑行距离比在水面滑行多约0.31 m(Lyttle et al., 1998)(图1)。同时,另一项研究显示,当水下滑行的初速度从3.1~3.5 m/s下降至1.75~2.2 m/s时,即速度降至与水下腿速度接近时(Elipot et al., 2009; Lyttle et al., 2000),可认为是运动员第一次划水或打腿动作的最佳启动时间。值得注意的是,运动员跳台出发后的入水最大深度在0.92~1.03 m,其速度优势体现在出发后的7.5~15.0 m(Tor et al., 2015)。由于水下滑行受到第一次打腿时间、深度、距离、出水时间等因素的影响,应根据运动员的能力进行个性化调整。再者,不同速度和深度的水下滑行阻力不同。当水中牵引速度在1.9~2.5 m/s时,与水面位置滑行相比,水下0.4~0.6 m位置的牵引滑行能够降低10.7%~19.9%的阻力值(Lyttle et al., 1998);当运动员在离水面0.5~1.0 m的距离时,运动员的阻力值能够降低8%~24%(Elaine et al., 2015)。运动员的滑行速度在1.6 m/s时,不同深度滑行产生的阻力值变化不大,但在速度超过1.9~2.0 m/s时阻力值的变化显著增大(Lyttle et al., 1998)。最后,在不同水深的泳池(1 m、1.5 m、2 m和3 m)中,运动员水下滑行的阻力系数(C_D)同样随着滑行深度的加大而减小,但是在靠近池底(约0.25 m)时阻力值略微升高(Vr Mantha, 2014)。

2.1.2 滑行姿态与减阻

滑行过程中的身体姿态与形状阻力关系紧密。水中滑行时的身体姿态一般包括4种:1)俯卧流线型姿势,两臂前伸;2)俯卧流线型姿势,两臂置于体侧;3)侧卧流线

型姿势,两臂前伸;4)仰卧流线型姿势,两臂前伸。二维仿真研究结果表明,两臂前伸流线型姿势的阻力值显著低于两臂置于体侧;两臂前伸时,俯卧和仰卧流线型姿势的 C_D 值无显著差异,但侧卧流线型姿势的 C_D 值显著低于其他3种姿势(Marinho et al., 2011a)(图2)。水中侧卧流线型的滑行阻力较小,可能是由于仿真模拟状态下身体侧卧状态呈“水滴”形状,而“水滴”形状可以提供更好的流体动力学特性,但也有研究指出侧卧状态的阻力值无优势(Marinho et al., 2011a)。此外,在水下滑行过程中,流线型姿势使双臂在头部前方上下重叠,会导致运动员在蹬边后身体重心发生轻微侧向偏移,且初始速度越高,在纵轴发生偏差越明显(Li et al., 2017),由此可见在滑行过程中要注意保持姿态平衡。

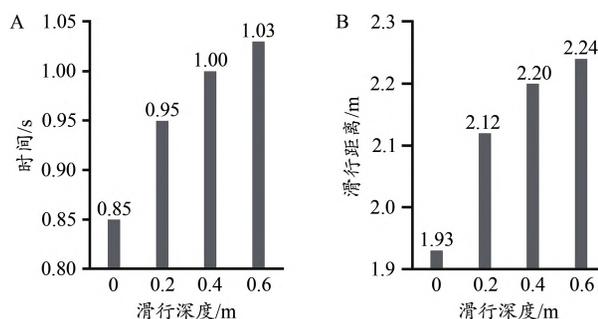


图1 不同深度情况下的滑行速度与距离(Lyttle et al., 1998)

Figure 1. Gliding Speed and Distance in Different Depth (Lyttle et al., 1998)

注:A:不同深度情况下滑行速度从3.1 m/s下降至1.6 m/s的时间; B:不同深度情况下1 s内滑行的距离。

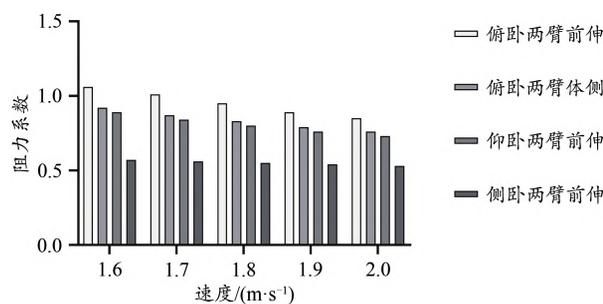


图2 不同速度下不同身体形态的滑行 C_D 值

Figure 2. Gliding C_D Value of Different Body Shapes at Different Speeds

2.1.3 呼吸方式与减阻

呼吸是影响人体沉浮的关键因素之一。研究发现,高水平运动员的呼吸-平衡比率(BB比率)高于初学者(Watanabe et al., 2017)。呼吸分为胸式呼吸(扩张胸廓)和腹式呼吸(扩张腹部)。胸式呼吸又称肋式呼吸法或浅表呼吸,吸气量较少,主要靠肋骨的侧向扩张来吸气;腹式呼吸又称膈肌呼吸,吸气量较大,吸气时横膈膜会下降,把脏器挤到下方(Maruyama et al., 2015)。研究表明,

水下滑行前采用腹式呼吸优于胸式呼吸,在滑行期间(受试者双臂置于体侧的水下滑行)的前2 s和4 s内,采用腹式呼吸能够比胸式呼吸时多滑行0.07 m和0.12 m,同时 C_D 下降5%。相比胸式呼吸,一方面,腹式呼吸能够将人体的浮心后移,使浮心靠近重心;另一方面,腹式呼吸能够在减少胸廓面积的同时使腹部凸起,使躯干部位的凹凸深度减小,减少了产生于胸部和腹部的涡流,从而降低阻力(Pacholak et al., 2014)。

2.1.4 头部姿态与减阻

水下滑行时头部的位置会对阻力产生一定的影响。根据手臂和头部位置可以将俯卧滑行姿势分为6种:1)两臂置于体侧,头部微抬(双眼目视前方);2)两臂置于体侧,头部保持平直(双眼目视下方);3)两臂置于体侧,头部微低(双眼目视后方);4)两臂前伸,头部微抬(双眼目视前下方,耳部置于两臂上方);5)两臂前伸,头部保持平直(双眼目视下方,耳部夹在两臂中间);6)两臂前伸,头部微低(双眼目视后方,耳部置于两臂下方)。两臂置于体侧为蛙泳水下长划臂后的滑行姿势,该姿势产生的阻力值大于两臂前伸(Vilas-boas et al., 2010)。研究发现,相比于两臂前伸时头部上抬姿势,两臂前伸时头部保持平直和头部微低这两个滑行姿势的阻力值更小(Cortesi et al., 2015);且头部保持平直姿势时优于头部微低姿势,平直的头部姿势能够降低4%的总阻力(Zaidi et al., 2008)。

2.1.5 身体形态与减阻

不同体型的运动员在滑行时的阻力值不同。研究发现,在2.2 m/s流速数值模拟下,倒三角体型的总阻力值(81.88 N) < 倒梯形(84.76 N) < 矩形(93.49 N) < 椭圆形(103.862 N)(图3),这是由于倒三角体形与水滴形状相似,而“水滴”体形具有更好的减阻形态(Li et al., 2015)。Naemi等(2012)揭示了倒三角身体形态在水下滑行的优势,研究发现,男运动员的上身细度比(fineness ratio of upper body, $r > -0.788$)、胸-腰部锥度指数(chest to waist taper index, $r > 0.808$)、腰-臀部锥度指标(waist to hip taper index, $r > -0.759$)等指标,女运动员的胸-腰部锥度指数($r > 0.732$)、腰-臀锥度指数($r > 0.718$)等指标与水下滑行效率的相关度较高,研究提示较好的流线型姿势的重要性,即滑行效率更多地取决于游泳运动员的形态特征(包括适当的姿势角度)。此外,身体形态与自身体重会同时影响游泳的附加重量(added mass),即游泳时周围水流对人体的反作用力。体重是附加重量的主要影响因素($r^2 = 0.84$),在水下滑行时,人体会受到约1/4体重的附加重量,由此,体重也是被动阻力(F_D)的重要预测指标之一(Benjanuvatra et al., 2001)。女运动员的附加重量要少于男运动员,因此女运动员的被动阻力更低(Caspersen et al., 2010);同样,在相同牵引速度下,青少年游泳运动员滑行时的被动阻力高于儿童游泳运动员。

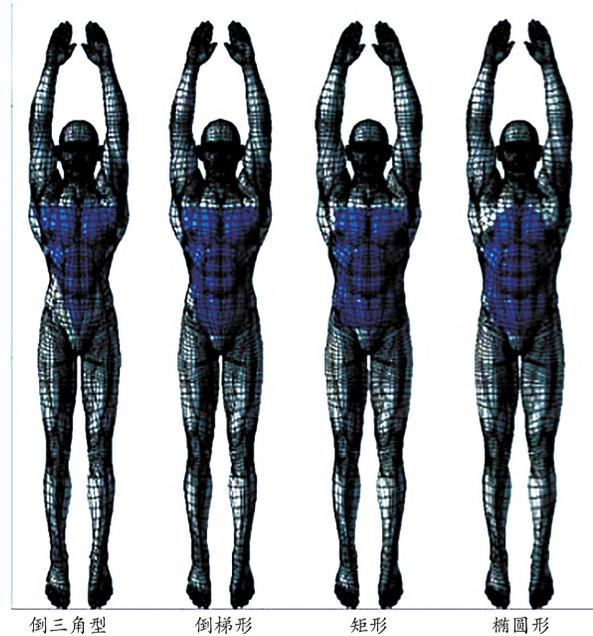


图3 不同游泳运动员体型3D模型(Li et al., 2015)
Figure 3. Four 3D Virtual Models of Different Swimmer's Physiques(Li et al., 2015)

2.2 游泳尾随位置减阻研究

公开水域游泳运动中的“尾随”一般是指运动员在另一名运动员的后方或侧面游进,以此获得体能和战术优势,从而节省体能(Bassett et al., 1991),提升游速(Chollet et al., 2000)。根据运动员游进的相对位置,可将尾随位置分为纵队尾随和并排尾随。

当2名运动员成纵队游进时,尾随运动员的头部越接近领游运动员的脚部,减阻效果越好(Beaumont et al., 2017)。实验研究显示,尾随运动员的氧耗量能够下降11%、乳酸下降38%、心率下降6%、划频下降6%、RPE下降20%、划幅提升6%,阻力值平均下降约26%(Chatard et al., 2003)。此外,数值模拟显示,尾随者的 C_D 均值可到领游运动员的56%(Silva et al., 2008),而尾随者的波浪阻力减阻峰值可达125%,说明该时刻波浪阻力转变为尾随运动员的推进力(Yuan et al., 2019)。水波理论(water wave theory)认为,波峰表面下方的压强高于波谷。结合伯努利方程可知,当尾随者身体前部处于波谷而后部处于波峰时,会造成尾随者身体后部的压强分布高于身体前部,较高的压强分布差将推动身体向前,产生推进力;反之,当尾随者身体前部处于波峰而后部处于波谷时则产生额外的阻力。此外,领游者也能在一定程度上降低阻力值。当尾随者与领游者位置接近时,领游运动员头前产生的波浪将在尾随运动员的头部结束,此时领游运动员脚部与头部的压差能为其带来向前的推进力(Yuan et al., 2019)。但有研究指出,当尾随运动员落后于领游运动员超过50%的身体长度时,领游运动员必须消耗额外的能量来克服阻力(Westerweel et al., 2016)。

当领游运动员在前,而尾随运动员在侧后方时,领游运动员产生的波浪阻力与尾随运动员的位置有关。数值模拟发现,当2名运动员并排且横向间隔距离 ≥ 1 m时,运动员间的波浪阻力干扰可以忽略,在此位置上如果尾随运动员落后于领游运动员0.5~1 m,则能降低6%~7%的阻力(Chatard et al., 2003; Westerweel et al., 2016),这一位置大致在领游运动员的肩部和髋部之间(Beaumont et al., 2017)。此外,当2名领游运动员保持并排在前,而尾随运动员在2名领游运动员的正后方时,减阻程度取决于尾随运动员身体所在的波峰位置(Beaumont et al., 2017)。

2.3 游泳装备减阻研究

游泳装备减阻研究主要着眼于泳衣和泳帽。在泳衣方面,自2009年国际泳联决定全面禁用高科技泳衣后,相关研究及其争议暂时告一段落。在泳帽方面,研究指出,佩戴泳帽的运动员在水下滑行时可以降低约15%的被动阻力(牵引速度为1.5~2.5 m/s)(Marinho et al., 2011b)。专业型泳帽主要为硅胶材质,从设计上分为2D和3D泳帽。2D泳帽为两片硅胶拼接的泳帽,由于头部贴合较差,佩戴后会在头部会产生褶皱;而3D泳帽为一体成型。研究发现,与2D泳帽相比,佩戴3D泳帽的运动员在1.9 m/s牵引速度下能够降低6%的阻力值(Gatta et al., 2013),因此3D泳帽应是竞技游泳运动员的首选。3D泳帽有3种常见的表面设计:光滑型、高尔夫球凹点型和浮雕型泳帽(Gatta et al., 2015)。对运动员进行了900次的水下阻力测试发现,佩戴不同类型泳帽的运动员在做流线型滑行(双臂置于胸前)时阻力值无显著差异,但是佩戴3D浮雕型泳帽的运动员在水下滑行(双手置于体侧姿势)测试中的阻力值较高(15.9 N, 1.9 m/s)。

3 游泳推进力技术优化研究

3.1 手部姿态与推进力

运动员划水时手指外展与内收状态对游泳推进力的影响一直是游泳力学研究的热点之一(袁武等, 2006)。首先,运动员在划水的不同阶段需要考虑不同形态的手掌对划水效果的影响。Vilas-Boas等(2015)根据五指的外展和内收程度,将手掌(包括前臂)划分为9种形态。研究表明,不同手型的阻力系数随着攻角(AA)的增大而增大,并在攻角为90°时达到最大值,而各手型的升力系数(C_L)最大值在攻角为40°~60°达到最佳,因此该角度范围可认为是组合优化阻力和升力的最佳攻角。此外,在同样攻角下,大拇指领先划水时的 C_D 略高于小拇指领先划水时(Samson et al., 2017; Vilas-Boas et al., 2015)。

其次, C_D 与大拇指外展与内收程度关系较弱,但与其他四指指间距关系较强(Takagi et al., 2001),而 C_L 则反之。有关 C_D 的研究指出,大拇指完全闭拢-四指中等展开这一手型的 C_D 值较其他手型略高(Vilas-Boas et al., 2015)。不

同研究给出的四指最优指间距的单位不同,Minetti等(2009)指出将平均指间距控制在0.32~8 mm可最多提高8.8% C_D ; Lorente等(2012)认为将指间距控制在0.2~0.4 D(D为单根手指直径)范围时阻力推进力提升效果较优;还有研究以手指间角度为单位,认为将指间距控制在5°(Bazuin, 2018)和10°(van Houwelingen et al., 2017)时可提升阻力推进力。但是有研究发现,指间距为20°时的 C_D 相比于指间距0时会下降1.5%(Bazuin, 2018)。有关 C_L 的研究指出,大拇指外展时的 C_L 值大于大拇指半外展和內收时(Takagi et al., 2001);另有研究发现,大拇指完全外展-四指完全闭拢、大拇指中等外展-四指完全闭拢、大拇指中等外展-四指中等展开和四指中等展开这4种手型对提升升力的作用较强(Marinho et al., 2009; Vilas-Boas et al., 2015)。此外,四指平均间距在0.32 cm的手型对 C_L 的贡献率较四指指间距为0.64 cm和0 cm时更大,该间距同样属于最佳 C_D 值的手指间距范围(Marinho et al., 2010)。

再者,掌型对 C_D 、 C_L 也会产生一定的影响。扁平掌型和自然掌型能够产生最大的阻力值,比手球(杯状)和篮球掌型高出0.4%~0.9%,而反弓形掌型的阻力值最低,建议游泳运动员在游泳时采用除反弓形掌型以外的4种掌型增大阻力推进力,提高游速(Bazuin, 2018)。

3.2 水下腿与推进力

运动员在出发和转身后双臂向前伸展形成流线型姿势,两腿在矢状面向垂直方向按照一定的节奏同时上抬和下打,从而推动身体向前,该动作称为水下海豚腿,或称水下波浪型打腿(underwater undulatory swimming)。

水下海豚腿时的身体姿态、幅度、频率、力量和形态要求运动员在减小阻力、增加阻力推进力以及节省能耗三者之间找到平衡。研究发现,人类在使用水下海豚腿时的有效功率($W_{\text{useful}}/W_{\text{total}}$)为11%~29%,而鲸鱼的有效功率约为56%;高水平运动员的斯特劳哈尔数(strouhal number)均值在0.81,而个体的最佳值可达0.45(Von Loebbecke et al., 2009a, 2009b, 2009c),可以看出优化水下海豚腿的效率十分重要。研究发现,海豚腿的效率与运动员的身体姿势和水中位置有关。在水下15 m内,侧向体位时使用海豚腿比俯卧体位时效率更高;但在水面游进时,侧向体位使身体部分露出水面,导致海豚腿推进效率降低,且视觉受限,不利于直线游进(Collard et al., 2008)。

按动作的阶段划分,水下海豚腿可分为上打(最低点和中位点)和下打阶段(最高点和中位点)。Higgs等(2017)对上抬和下打各阶段的运动学指标进行了进一步研究后发现,澳洲高水平游泳运动员的打腿持续时间(duration, $r=-0.79$)、脚趾垂直速度峰值(peak vertical toe velocity, $r=0.71$)、身体摆动速率(body wave velocity, $r=0.81$)、膝关节平均角速度(mean knee angular velocity, 0.63)和髋关

节角速度峰值(peak hip angular velocity, 0.73)与上打阶段的速度能力关联较高。其中,与膝关节平均角速度相比,髌关节角速度峰值与速度能力的相关性更高,说明在上抬阶段,加快髌关节伸展的速度更为重要。髌关节快速伸展能够促进膝关节屈曲速度的提高,从而更好地使踝关节趾屈,为下打阶段做好准备。与初学者相比,水平较高的运动员在膝关节屈曲下打之前,其髌关节的伸展动作更为充分(Arellano, 1999; Atkison et al., 2014)。普通运动员水下腿的上抬速度均低于下打速度,但高水平运动员两阶段的速度比值接近于1,即打腿对称性(kick symmetry)较好(Atkison et al., 2014)。在下打阶段,脚趾垂直速度峰值($r=0.86$)和躯干摆动速率($r=0.72$)同样与速度能力显著相关,因此,综合上打阶段数据认为,脚趾垂直速度峰值($r=0.85$)和躯干摆动速率($r=0.78$)是预测水下海豚腿速度能力的重要指标(Atkison et al., 2014)。

不同水平运动员水下腿的速度差异与打腿频率和幅度有关。研究显示,美国年龄组全国赛游泳运动员、奥运级别运动员和世界级别运动员的水下海豚腿速度分别为 (1.2 ± 0.13) m/s、 (1.45 ± 0.23) m/s和 1.614 m/s,打腿频率分别为 (2.13 ± 0.23) Hz、 (2.18 ± 0.34) Hz和 2.139 Hz;打腿幅度为 (0.46 ± 0.06) m、 (0.53 ± 0.09) m和 0.618 m(Arellano et al., 2005; Connaboy et al., 2015; Von Loebbecke et al., 2009a),可以看出不同水平的运动员在水下海豚腿速度和幅度上有较为明显的区别,但在打腿频率上区别较小,这说明游泳运动员需要在单位时间内增大打腿幅度。踝关节柔韧性能够提高水下腿幅度,在 2.18 m/s的模拟速度下,运动员水下腿踝关节趾屈减少 10° 时会降低 16.4 N的阻力推进力,而踝关节背屈增加 10° 时能够增加 31.4 N的阻力推进力(Keys, 2010)。

3.3 手臂划水与推进力

手臂划水是游泳运动员获得推进力的主要方式,快速划水能获得较大的推进力(林洪等, 2006)。研究发现,我国优秀游泳运动员在 7 m全力游时,划手、打腿、蹬边滑行产生的平均最大力值与配合游时的平均最大力值之比分别为 85% 、 73.15% 和 41.36% ,存在较明显的个体差异(程燕等, 2016);在 30 s全力冲刺时,男运动员划手和打腿的推进力贡献率为 70.3% 和 29.7% ,女运动员为 66.6% 和 33.4% (Morouço et al., 2015),且打腿与划水推进力之和大于配合游的推进力(仲宇等, 2005)。运动员在拉水阶段与推水阶段的阻力推进力和升力推进力的占比不同,现有研究均认为,拉水阶段阻力推进力显著高于推水阶段,而升力在推水阶段的贡献显著高于拉水阶段(Bixler et al., 2002; Kudo et al., 2017),建议运动员在手臂入水后立即加速划水以获取更大的推进力(Gourgoulis et al., 2015)。

此外,一项对运动员左、右两臂划水对称性的研究发

现,有 50% 的受试运动员在爬泳配合游时左、右臂划水推进力存在较大的差异,差值最高为 246.5 N(左 228.9 N,右 475.4 N),而差值最低的仅为 3 N(左 165.9 N,右 162.9 N),运动员之间存在显著的个体差异(Formosa et al., 2011),且有呼吸和无呼吸状态下的推进力同样呈显著差异(Formosa et al., 2014a),而在仰泳划水的研究中,左、右臂划水时的推进力差异不显著(Formosa et al., 2014b)。爬泳运动员两臂划水推进力的差异性表明运动员需要改进技术或提高弱侧手臂力量,避免肌力失衡现象的发生。

4 总结与展望

首先,阻力与推进力既相互独立又相互联系。减阻与增加推进力是游泳技术的核心,其目的是提高游速,同时降低身体耗能。从技术动作上看,可将阻力与推进力技术划分为减阻技术、增推技术与减阻增推组合技术3种。减阻技术指实现减阻效应的技术,如对运动员的水下滑行深度、呼吸方式、身体姿态、头部姿态以及身体形态等进行优化,从而实现减阻和降低推进力的损耗,但对直接提升推进力的贡献甚微;增推技术即实现推进力增加的技术,如运动员通过控制手指间距、手型或踝关节柔韧度等方式提高推进力;减阻与增推组合技术是动作在时间上的优化,即动作节奏优化,如蛙泳蹬腿中强调的“慢收腿,快蹬腿”。近20年的相关研究更倾向于对减阻技术与增推技术进行独立分析。

其次,国内外关于游泳减阻与推进力技术优化研究的特点不同。国外研究的研究方法以模型法(model method)、水下牵引法(towing method)和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)等为主;研究内容主要围绕手臂形态、水下滑行、水下腿、泳装、泳帽以及尾随阻力等非复杂形态与动作的流体特征展开,注重游泳流体力学的基础研究;研究人员主要由具备计算机与运动生物力学专业背景的科研人员组成;研究结果有较高的理论性、科学性与普适性,但缺乏游泳专项知识的融入与探讨。而国内学者对基础研究的关注较少,更重视实践与应用层面的研究。一方面,我国学者在游泳技术监控、诊断与优化等实践研究方面的探索较为深入,科研人员侧重通过软件技术解析运动员训练与比赛的视频、图像,获得运动学监测数据,进而对运动员的技术进行诊断与分析,提出运动员水中减阻技术与推进力增加技术的优化方案;另一方面,通过水中阻力测量设备(部分为自研设备)测量我国高水平游泳运动员在水中的阻力水平,评价运动员在减小阻力、优化技术方面的实际效果,并取得了积极的研究成果。值得指出的是,近年国家游泳队、国家体育总局体育科学研究所与北京体育大学等单位的科研人员在蹲踞式出发的侧向入水技术、身体转动幅度最优化、水下腿技术特征和公开水域游泳技术优化等领域进行了积极

创新的探索,并引入了智能测量与数字训练系统等,为运动员训练与参赛提供科技服务保障。

综上所述,在基础研究层面,当前关于游泳非复杂技术动作的研究已较为成熟,但对完整动作的模拟和建模仍有较大难度,围绕完整动作与不同动作速度、幅度、频率、节奏和姿态进行探索是今后研究的趋势,特别是对高水平游泳运动员的计算流体研究。在实践研究层面,创新仍是实践研究的核心,应通过大量实证研究验证技术创新的可行性,探索和构建科学化的冠军指标与模型。虽然我国在奥运会和世锦赛的室内与公开水域游泳比赛中不断突破现有成绩,科研水平与创新能力也有显著提升,但需指出的是,从已发表的学术论文上看,目前我国从事游泳减阻与推进力技术优化研究的专家和团队较少,跨学科研究团队不足,科研硬件和软件有待提升,对流体力学的基础研究尚待加强。因此,应加强我国竞技游泳流体力学领域的研究,为我国游泳运动科学化训练提供科技支撑。

参考文献:

程燕,陈琪,何伟,等,2016.YLC型游泳拉力测试仪在不同游泳运动员专项力量测试中的应用[J].中国体育科技,52(1):141-145.

李天赠,黄丹,2019.基于计算流体力学的游泳动态数值模拟研究进展[J].中国体育科技,55(2):19-28.

林洪,2000.游泳技术监测系统的应用[J].体育科学,20(2):39-42.

林洪,阎超,何枫,等,2006.游泳运动技术优化与创新的研究[J].体育科学,26(4):40-57.

温宇红,林洪,程燕,等,2005.我国重大游泳比赛技术参数采集与分析系统的应用研究[J].武汉体育学院学报,39(12):65-68.

许琦,2002.对游泳中阻力与推进力问题的研究综述[J].体育科学,22(2):73-77.

闫卫星,王连泽,李德坚,等,2005.测量游泳动态阻力的附加阻力微扰法[J].清华大学学报(自然科学版),45(5):110-113.

仰红慧,魏文仪,2004.游泳动态阻力研究的现状评述[J].体育科研,25(5):48-51.

袁武,康宏琳,高瑞泽,等,2006.两种手姿态在不同攻角下划水的数值模拟[J].水动力学研究与进展(A辑),21(3):369-373.

张晓侠,马吉光,2013.CFD仿真技术在游泳运动力学问题研究中的应用[J].体育科学,33(7):70-75.

仲宇,吴钟权,2005.游泳推进力与阻力测试系统的研制[J].西安体育学院学报,22(5):64-66.

周晓东,程燕,林洪,2008.游泳比赛技术监测系统的应用[J].中国体育科技,44(4):84-86.

ARELLANO R, PARDILLO S, GAVILAN A, et al., 2005. 水下蝶泳打腿技术的理论与实践:运动学特征,涡流的产生以及在出发、转身、划水过程中的应用[J].体育科研,26(6):58-63.

MAGLISCHIO E W, 2016. 游得最快:游泳技术训练及计划设计宝典[M].温宇红,袁守龙,译.北京:北京体育大学出版社.

ARELLANO R, 1999. Vortices and Propulsion[C]// XVII International Symposium on Biomechanics in Sports. Parth, Australia: ISB.

ATKISON R R, DICKEY J P, DRAGUNAS A, et al., 2014. Importance of sagittal kick symmetry for underwater dolphin kick perfor-

mance[J]. Hum Movement Sci, 33(1):298-311.

BARBOSA T M, BRAGADA J A, REIS V M, et al., 2010. Energetics and biomechanics as determining factors of swimming performance: Updating the state of the art[J]. J Sci Med Sport, 13(2):262-269.

BASSETT D R, FLOHR J, DUEY W J, et al., 1991. Metabolic responses to drafting during front crawl swimming [J]. Med Sci Sports Exer, 23(6):744-747.

BAZUIN R, 2018. The effects of hand configuration on propulsive forces in swimming [D]. Delft, Nederland: Delft University of Technology.

BEAUMONT F, TAIAR R, POLIDORI G, 2017. Preliminary numerical investigation in open currents-water swimming [J]. Appl Math Comput, 302(1):48-57.

BENJANUVATRA N, BLANKSBY B A, ELLIOTT B C, 2001. Morphology and hydrodynamic resistance in young swimmers[J]. Pediatr Exerc Sci, 13(3):246-255.

BIXLER B, RIEWALD S, 2002. Analysis of a swimmer's hand and arm in steady flow conditions using computational fluid dynamics [J]. J Biomech, 35(5):713-717.

CASPERSEN C, BERTHELSEN P A, EIK M, et al., 2010. Added mass in human swimmers: Age and gender differences [J]. J Biomech, 43(12):2369-2373.

CHATARD J, WILSON B D, 2003. Drafting distance in swimming [J]. Med Sci Sports Exer, 35(7):1176-1181.

CHOLLET D, HUE O, AUCLAIR F, et al., 2000. The effects of drafting on stroking variations during swimming in elite male triathletes[J]. Eur J Appl Physiol, 82(5):413-417.

COLLARD L, AUVRAY E, BELLAUNAY I, 2008. Why have swimmers neglected the "fish kick" technique?[J]. Int J Perf Anal Spor, 8(3):18-26.

CONNABOY C, NAEMI R, BROWN S, et al., 2015. The key kinematic determinants of undulatory underwater swimming at maximal velocity[J]. J Sports Sci, 34(11):1036-1043.

CORTESI M, GATTA G, 2015. Effect of the swimmer's head position on passive drag[J]. J Hum Kinet, 49(1):37-45.

ELAINE T, PEASE D L, BALL K A, 2015. How does drag affect the underwater phase of a swimming start? [J]. J Appl Biomech, 31(1):8-12.

ELIPOT M, HELLARD P, TAIAR R, et al., 2009. Analysis of swimmers' velocity during the underwater gliding motion following grab start[J]. J Biomech, 42(9):1367-1370.

FORMOSA D P, MASON B, BURKETT B, 2011. The force-time profile of elite front crawl swimmers [J]. J Sports Sci, 29(8):811-819.

FORMOSA D P, SAYERS M G L, BURKETT B, 2014a. Quantifying stroke coordination during the breathing action in front-crawl swimming using an instantaneous net drag force profile[J]. J Sports Sci, 32(18):1729-1737.

FORMOSA D P, SAYERS M G L, BURKETT B, 2014b. Stroke-coordination and symmetry of elite backstroke swimmers using a comparison between net drag force and timing protocols [J]. J Sports Sci, 32(3):220-228.

GATTA G, CORTESI M, ZAMPARO P, 2015. Effect of swim cap surface roughness on passive drag [J]. J Strength Cond Res,

- 29(11):3253-3259.
- GATTA G, ZAMPARO P, CORTESI M, 2013. Effect of swim cap model on passive drag[J]. *J Strength Cond Res*, 27(10):2904-2908.
- GOURGOULIS V, BOLIA A, AGGELOUSSIS N, et al., 2015. The influence of the hand's acceleration and the relative contribution of drag and lift forces in front crawl swimming [J]. *J Sports Sci*, 33(7):696-712.
- HIGGS A J, PEASE D L, SANDERS R H, 2017. Relationships between kinematics and undulatory underwater swimming performance [J]. *J Sports Sci*, 35(10):995-1003.
- KUDO S, SAKURAI Y, MIWA T, et al., 2017. Relationship between shoulder roll and hand propulsion in the front crawl stroke [J]. *J Sports Sci*, 35(10): 945-952.
- LI T, CAI W, ZHAN J, 2017. Numerical investigation of swimmer's gliding stage with 6-DOF movement [J]. *PLoS One*, 12 (1) : e170894.
- LI T, ZHAN J, 2015. Hydrodynamic body shape analysis and their impact on swimming performance [J]. *Acta Bioeng Biomech*, 17(4):3-11.
- LORENTE S, CETKIN E, BELLO-OCHEDE T, et al., 2012. The constructal-law physics of why swimmers must spread their fingers and toes[J]. *J Theor Biol*, 308(14):141-146.
- LYTTLE A D, BLANKSBY B A, ELLIOTT B C, et al., 1998. The effect of depth and velocity on drag during the streamlined glide[J]. *J Swim Res*, 13:15-22.
- LYTTLE A, BLANKSBY B, ELLIOTT B, et al., 2000. Net forces during tethered simulation of underwater streamlined gliding and kicking techniques of the freestyle turn[J]. *J Sports Sci*, 18(10) : 801-807.
- MARINHO D A, BARBOSA T M, REIS V M, et al., 2010. Swimming propulsion forces are enhanced by a small finger spread[J]. *J Appl Biomech*, 26(1):87-92.
- MARINHO D A, BARBOSA T M, ROUBOA A I, et al., 2011a. The hydrodynamic study of the swimming gliding: A two-dimensional computational fluid dynamics (CFD) analysis [J]. *J Hum Kinet*, 29(1):49-57.
- MARINHO D A, MANTHA V R, ROUBOA A I, et al., 2011b. The effect of wearing a cap on the swimmer passive drag [J]. *ACSM*, 11(2): 319-322.
- MARINHO D A, ROUBOA A I, ALVES F B, et al., 2009. Hydrodynamic analysis of different thumb positions in swimming [J]. *J Sports Sci Med*, 8(1):58-66.
- MARUYAMA Y, YANAI T, 2015. Abdominal breathing manoeuvre reduces passive drag acting on gliding swimmers [J]. *Sports Biomech*, 14(4):413-423.
- MINETTI A E, MACHTSIRAS G, MASTERS J C, 2009. The optimum finger spacing in human swimming[J]. *J Biomech*, 42(13) : 2188-2190.
- MOROUCO P G, MARINHO D A, IZQUIERDO M, et al., 2015. Relative contribution of arms and legs in 30 s fully tethered front crawl swimming[J]. *BioMed Res Int*, doi: 10.1155/2015/563206.
- NAEMI R, PSYCHARAKIS S G, MCCABE C, et al., 2012. Relationships between glide efficiency and swimmers' size and shape characteristics[J]. *J Appl Biomech*, 28(4):400-411.
- NOVAIS M L, SILVA A J, MANTHA V R, et al., 2012. The effect of depth on drag during the streamlined glide: A three-dimensional CFD analysis[J]. *J Human Kinet*, 33(1):55-62.
- PACHOLAK S, HOCHSTEIN S, RUDERT A, et al., 2014. Unsteady flow phenomena in human undulatory swimming: A numerical approach[J]. *Sports Biomech*, 13(2):176-194.
- RIEWALD S, RODEO S, 2015. *Science of Swimming Faster* [M]. Champaign, IL: Human Kinetics.
- SAMSON M, MONNET T, BERNARD A, et al., 2017. Analysis of a swimmer's hand and forearm in impulsive start from rest using computational fluid dynamics in unsteady flow conditions[J]. *J Biomech*, 67:157-165.
- SCURATI R, GATTA G, MICHIELON G, et al., 2019. Techniques and considerations for monitoring swimmers' passive drag [J]. *J Sports Sci*, 37(10):1168-1180.
- SILVA A J, ROUBOA A, MOREIRA A, et al., 2008. Analysis of drafting effects in swimming using computational fluid dynamics [J]. *J Sports Sci Med*, 7(1):60-66.
- TAKAGI H, SHIMIZU Y, KURASHIMA A, et al., 2001. Effect of thumb abduction and adduction on hydrodynamic characteristics of a model of the human hand [C]// XIX International Symposium on Biomechanics in Sports. University of San Francisco: ISB.
- TOR E, PEASE D L, BALL K A, 2015. Comparing three underwater trajectories of the swimming start [J]. *J Sci Med Sport*, 18(6) : 725-729.
- VAN HOUWELINGEN J, WILLEMSSEN D, KUNNEN R, et al., 2017. The effect of finger spreading on drag of the hand in human swimming[J]. *J Biomech*, 63:67-73.
- VENNELL R, PEASE D, WILSON B, 2006. Wave drag on human swimmers[J]. *J Biomech*, 39(4): 664-671.
- VILAS-BOAS J P, COSTA L, FERNANDES R J, et al., 2010. Determination of the drag coefficient during the first and second gliding positions of the breaststroke underwater stroke [J]. *J Appl Biomech*, 26(3):324-331.
- VILAS-BOAS J P, RAMOS R J, FERNANDES R J, et al., 2015. Hydrodynamic analysis of different finger positions in swimming: A computational fluid dynamics approach [J]. *J Appl Biomech*, 31(1):48-55.
- VON LOEBBECKE A, MITTAL R, FISH F, et al., 2009a. A comparison of the kinematics of the dolphin kick in humans and cetaceans[J]. *Hum Movement Sci*, 28(1): 99-112.
- VON LOEBBECKE A, MITTAL R, FISH F, et al., 2009b. Propulsive efficiency of the underwater dolphin kick in humans[J]. *J Biomech Engineering*, doi: 10.1115/1.3116150.
- VON LOEBBECKE A, MITTAL R, MARK R, et al., 2009c. A computational method for analysis of underwater dolphin kick hydrodynamics in human swimming[J]. *Sports Biomech*, 8(1):60-77.
- VR MANTHA D M A S, 2014. The 3D CFD study of gliding swimmer on passive hydrodynamics drag [J]. *Braz Arch Biol Technol*, 57(2):302-308.
- WATANABE Y, WAKAYOSHI K, NOMURA T, 2017. New evaluation index for the retainability of a swimmer's horizontal posture [J]. *PLoS One*, 12(5): e0177368.
- WESTERWHEEL J, ASLAN K, PENNINGNS P, et al., 2016. Advantage of a lead swimmer in drafting[J]. *arXiv*, 16(10):1-11.
- Yuan Z M, Li M, Ji C Y, et al. Steady hydrodynamic interaction be-

tween human swimmers[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2019, 16(150): 20180768.

ZAIDI H, TAIAR R, FOHANNO S, et al., 2008. Analysis of the effect of swimmer's head position on swimming performance using

computational fluid dynamics[J]. J Biomech, 41(6): 1350-1358.

ZHAN J, LI T, CHEN X, et al., 2017. Hydrodynamic analysis of human swimming based on VOF method [J]. Comput Method Biomech Biomed Engin, 20(6): 645-652.

Research Progress of Swimming Drag Reduction and Propulsion Technology Optimization

CHEN Jiexing^{1,2}, WEN Yuhong^{3*}, SHEN Sijia¹, PENG Yi¹, ZHANG Teng⁴

1. China Swimming College, Beijing Sport University, Beijing 100084, China;
2. School of Physical Education and Sport Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China;
3. School of Leisure Sports and Tourism, Beijing Sport University, Beijing 100084, China;
4. School of Physical Education, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China

Abstract: To summarize the research literatures of swimming drag reduction and propulsion technical optimization in recent 20 years. For the aspect of swimming drag reduction, the wave resistance of 0.6~1.0 m underwater can be ignored, and the gliding at different speeds under this condition has a certain distance and time advantage than that of the water-surface gliding; the underwater dolphin kick of lateral streamlined positions is better than dorsal and ventral streamlined position, and the overlapping of hands in front of the head will slightly offset the center of gravity of the body; abdominal breathing is better than chest breathing before underwater sliding; head-middle position reduces total drag by 4% compared to head-up position; the total resistance value of inverted triangle shape is better than that of inverted trapezoid, rectangle and ellipse, and the additional weight of female swimmers is less than that of men; in open-water swimming; the closer between draft swimmer and leader swimmer will lead to a better drag reduction effect, and the drag reduction effect is different when draft swimmer at different positions; the swimmer wearing 3D swimming cap can reduce the resistance value by 6% compared with 2D swimming cap, and the 3D Golf concave point swimming cap has the lowest resistance value. For the aspect of increasing propulsion, the finger opening and closing and palm shape have different influences on resistance propulsion; foot is the main propulsion force of underwater dolphin kick; the frequency of underwater dolphin kick is similar among swimmers, but the kicking amplitude is different; ankle flexibility can improve the amplitude of underwater kick, but the compensation of ankle flexibility asymmetry should be considered; the forward extended arms have inertia damping effect, which can reduce the amplitude of arm up and down motion; the net resistance of left arm and right arm in crawl swimming is significantly different, but there is no significant difference in backstroke. In conclusion, the non-complex swimming movement research is a hot issue, and some research has paid attention to the resistance optimization of open water swimming. However, there are little research focus on the complete action and technical optimization based on four swimming styles. The research on the complete action and different movement speed, amplitude, frequency, rhythm and posture need more future research. China has some advantages in drag reduction and propulsion technology optimization of high-level swimmers, but it develops slowly in the field of basic research of fluid mechanics. Therefore, interdisciplinary research should be strengthened to make up for the shortcomings and deficiencies in this field.

Keywords: swimming; drag reduction; propulsion; progress

