

文章编号:1004-7220(2021)04-0519-09

# 赛艇水上动作技术生物力学指标降维及其在训练中的应用

梁志强<sup>1a,1b</sup>, 吕娇娇<sup>1a,1b</sup>, Thompson PAUL<sup>2</sup>, 刘宇<sup>1b</sup>

(1. 上海体育学院 a 运动科学学院, b 运动健身科技省部共建教育部重点实验室, 上海 200438;

2. 中国赛艇协会, 北京 100061)

**摘要:**目的 对赛艇动作技术指标进行降维,并依据现有研究成果对降维后指标在训练中的应用进行分析。  
**方法** 以16名赛艇运动员80次氧利用2(oxygen utilisation 2, UT2)训练课时的动作技术表现为分析对象,采用因子分析法对动作技术的生物力学指标进行降维。**结果** 赛艇水上动作技术的生物力学指标可归类为“动作技术特征因子”(70%峰值桨力角度、每1/4桨幅做功占比、抓水开始时间、出水打滑、峰值桨力点和峰值桨力角度)、“功率因子”(运动员平均功率、赛艇平均功率、运动员个人桨功率)、“桨幅因子”(入水角度、出水角度)和“桨运动的因子”(回桨时间、桨频和每桨位移距离)4大因子。**结论** 对上述因子及其包含的生物力学指标进行监控与分析,可便于教练员及科研人员准确地判断赛艇运动员的动作技术特点及存在的不足。

**关键词:**赛艇;生物力学指标;因子分析;有氧训练

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.04.004

## Reducing Dimension of Biomechanical Parameters of On-Water Rowing Technique and its Application in Rowing Training

LIANG Zhiqiang<sup>1a,1b</sup>, LÜ Jiaojiao<sup>1a,1b</sup>, Thompson PAUL<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>1b</sup>

(1a. School of Kinesiology, 1b. Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2. Chinese Rowing Association, Beijing 100061, China)

**Abstract: Objective** To extract key parameters from a series of biomechanical parameters of rowing technique, so as to provide useful information for coach training. **Methods** Based on rowing performance of 16 rowers in national team, the factor analysis was used to extract reducing dimension of biomechanical parameters of rowing technique of 80 oxygen utilisation 2 (UT2) training pieces. **Results** The biomechanical parameters of rowing techniques were classified as technical characteristic factors (angle of 70% peak force, work portion of per 25% stroke length, drive start time, finish slip, position of peak force and angle of peak force), power factor (rower power, average of boat power, port swivel power and stroke swivel power), stroke length factor (catch angle and finish angle) and oar's motion factor (recovery time, stroke rate and distance of per stroke). **Conclusions** Monitoring and analyzing these biomechanical factors would contribute coaches and scientific researchers to accurately judge the technical characteristics and shortcomings of rowers.

**Key words:** rowing; biomechanical parameters; factor analysis; aerobic training

收稿日期:2021-06-08; 修回日期:2021-06-14

基金项目:国家自然科学基金重点项目(11932013),教育部人文社会科学研究一般项目(19YJJCZH115)

通信作者:刘宇,教授,博士生导师,E-mail:yuliu@sus.edu.cn

2019年中国国家赛艇队女子公开级四人双桨和男子公开级双人双桨世锦赛的夺冠及东京奥运会资格赛的获取,2020年男子公开级赛艇运动员张亮赛艇划功仪极限挑战赛(42.195 km)世界纪录的刷新,2021年女子四人单桨、八人单桨奥运资格的获得,这一系列创纪录的成绩将赛艇这项运动推向社会的视角。作为一项周期性、竞速类体能项目,赛艇比赛要求运动员在尽可能短的时间内完成2 km比赛距离。因此,比赛的艇速成为决胜的关键<sup>[1]</sup>。相关研究发现,赛艇的艇速是赛艇运动员体能和动作技能相互作用的结果<sup>[2]</sup>。运动中,受限于桨栓推进力、运动员与脚蹬板的作用力以及水与空气等介质阻力的影响;而上述3类因素中,水与空气对艇身的阻力是一个无法消除的作用力,但其对艇速的消极影响可通过动作技术优化降低<sup>[2-3]</sup>。

研究发现,赛艇动作技术的优化需基于赛艇特殊的运动系统——“人-桨-艇”。相比其他类周期性项目,该系统相对复杂,运动系统的复杂性也使赛艇动作技术的分析更具有挑战性<sup>[4]</sup>。现阶段针对赛艇水上专项动作技术的生物力学分析,最理想的方式依靠赛艇生物力学实船测试系统,例如:Powerline、RowBio、Varely 和中国科学院合肥物理科学研究所自主研发的“智能桨栓”等国内外较为成熟的测量系统<sup>[5-6]</sup>。这些测试系统已被不同国家广泛用于赛艇桨力监测、桨叶运行、运动员动作技术特征以及配艇选择等方面,正积极地发挥对运动员动作技术优化和训练科学化的科技助力作用<sup>[7]</sup>。

然而,有一个不争的事实,赛艇生物力学测试系统反馈的指标少则几十个,多则上百个,仅依据生物力学方法原理对其进行笼统的运动学、动力学划分,教练员及科研人员多数时刻很难理解指标及其对训练的意义<sup>[8]</sup>。2019年,中国国家赛艇队引进Powerline赛艇生物力学实船测试系统,该系统对训练过程结果的即刻反馈以及可因项目特征进行个性化设置的特点,得到国家队教练员的高度认可;但同样也存在反馈指标多、教练员短时间内无法理清或归类指标的问题。此外,国内尚未涉及该方面的研究,亟待寻找解决该问题的手段与方法。基于该背景,本文采用因子分析法对赛艇生物力学指标进行降维,并基于国内外赛艇生物力学的研究成果,围绕降维后指标于训练中应用及意义展开一系列探讨。

## 1 研究与方法

### 1.1 研究对象及数据筛选流程

研究对象为中国国家赛艇队6名公开级男子双桨运动员[身高(193.50±2.66) cm, 体质量(97.30±4.97) kg]和12名公开级女子双桨运动员[身高(183.00±3.25) cm, 体质量(77.46±2.86) kg]。以2019年12月~2020年7月训练周期的氧利用1(oxygen utilisation 1, UT1)、氧利用2(oxygen utilisation 2, UT2)和氧利用3(oxygen utilisation 3, UT3)训练课为数据采集对象;根据不同训练课次的占比和世界赛艇训练趋势,选定该训练周期的82次UT2训练课为研究对象(见图1)。但因2次训练课数据导出失败,最终获取80次UT2训练课的有效数据。研究表明,赛艇动作技术指标不存在性别差异<sup>[8]</sup>。因此,本文未对赛艇运动员UT2训练课指标进行性别区分。

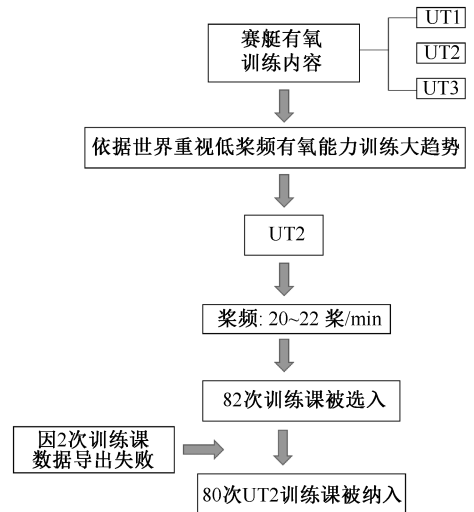


图1 赛艇 UT2 有氧训练课次数据选择流程及标准

Fig.1 Procedure and criterion choosing to UT2 aerobic training

赛艇训练器材的优化、训练理念与训练方法的细化推动赛艇比赛成绩的快速提高。前东德赛艇对稳定状态下有氧长划训练理念和方法的重视不仅造就了东德赛艇的成功,更直接推动了世界赛艇训练理念的更新,使中低桨频的有氧训练在赛艇训练中占比由过去的70%上升至目前的80%以上<sup>[10]</sup>。其次,赛艇中低桨频有氧能力训练以UT2训练为主(桨频20~22桨/min)。该强度训练下,运

动员体内血乳酸水平为 0.8~1.6 mmol/L,较低的血乳酸水平可使运动员进行长达几个小时训练,为运动员动作技术质量的提高奠定了保障<sup>[10]</sup>。因此,选择该强度的训练课作为研究对象,训练意义十分必要。此外,为清晰呈现 UT2 训练(20~22 桨/min)周期中的安排结构及占比,对数据采集周期国家赛艇队 UT2 训练里程(见表 1)及某阶段某周训练计划

(见图 2)进行展示。

表 1 UT2 有氧训练桨频、总课次及训练里程

Tab.1 Stroke rate, training piece and kilometer in UT2 aerobic training

桨频/ (min <sup>-1</sup> )	总训练划 距离/km	总训练课 次/次	平均单次训 练划距离/km
20~22	2 103.60	80	26.30

China Rowing Association														
WEEK xx	DAY / DATE	Wts (min)	PASSIVE Rest Tech		UT3 (min)	UT2 (min)	UT1 (min)	AT (min)	TR (min)	AC (min)	AP (min)	Mins Total	Km Water	Mode
Monday 周一	AM	90				115						115	24.4	24 km U2 Weights
	PM	45	20			20			20			60	12.7	10 x 500m on 90° off Ergo Functional Training
Tuesday 周二	AM	90				95						95	20.1	20 km U2 Weights
	PM	45				88						88	18.6	18 km U2 Ergo Functional Training
Wednesday 周三	AM					60						60	12.7	12 km U2
	PM		21			30	10	27				88	18.5	4 x 2000m R24 7' Off 4km Warm Up/4 km Warm Down
Thursday 周四	AM	90				115						115	24.4	24 km U2 Weights
	PM	45				80						80	16.9	16 km U2 Functional Training
Friday 周五	AM	90				95						95	20.1	20 km U2 Weights
	PM					60						60	12.7	16 km U2
Saturday 周六	AM					20	10	30				60	13.8	12 km U2
	PM					80						80	16.9	2 x 2000m 15' off Ergometer R26/28 28/30/32/32+
Sunday 周日	AM					95						95	20.1	20 km U2
	PM											0	0	
Total this week: 本周总训练时间		495	41	0	0	953	20	57	20	0	0	26.43h	232	RATINGS (目标桨频)
Target this week: % this week:		0	-	-	0	86.4	37.4	86	86	14	14	24h	-	UT3= <19 UT2= 20~22 UT1= 22~24 AT= 24+
目标任务训练时间占本 周总训练时间百分比		31.20%	2.60%	0.00%	0.00%	90.80%	1.90%	5.40%	1.90%	0.00%	0.00%			

图 2 中国国家赛艇队某训练阶段某周训练计划

Fig.2 Training plan of China rowing team in one training session

注:(1)第 2 行为周训练课安排及训练内容;其中,“Wts”为体能训练,“Rest 和 Tech”为技术训练,“UT3、UT2 和 UT1”为有氧训练,“AT、RT、AC 和 AP”为速度无氧训练;“Mins Total”、“Km Water”分别为训练的总时间和总距离,“Mode”为训练内容;(2)“黄色区域为 UT2 训练时间,红色虚线框为 UT2 训练的周占比;UT2 训练占该周总训练的比例约 90%。

## 1.2 生物力学指标采集流程

18 名赛艇运动员按每日训练要求执行训练计划,测试者记录每日每堂课训练内容及目标划行距离。运动员下水前,标定实船生物力学测试系统;训练过程中,由该系统采集赛艇运动员每一桨的生物力学数据指标;并于训练结束后,依据 UT2 对应的桨频,筛选目标训练课,将采集的相关数据指标由采集系统软件导出。

## 1.3 生物力学采集系统及指标

本研究基于竞技运动动作技术分析定量、准确和有效的训练原则及需求,选用国际通用的赛艇生

物力学实船测试系统 Powerline(Peach 公司,UK)对赛艇运动员 UT2 训练的动作技术表现进行采集,采集频率为 50 Hz;其次,运用 Powerline 4.2 软件对采集数据进行分析,同时将所有生物力学指标导出(见表 3)。

## 1.4 数据处理与统计分析

本文对所有采集到的数据指标以均值±标准差表达。采用 Bartlett 球形检验和 KOM 分析对 80 次 UT2 训练课动作技术的生物力学指标及其结构进行检验;其次,采用因子分析法对采集到的数据进行主成分提取与降维,提取方法为主成分分析;依据

表3 赛艇45个水上动作技术的生物力学指标

Tab.3 Forty-five biomechanical parameters of rowing technique

	运动表现		动作技术指标	
	运动员	艇	右桨	左桨
运动学	桨频 桨数 每桨距离	时间 距离 平均艇速 瞬时速度 加速度 旋转角度 颠簸角度 偏航角度	右桨入水角度 右桨出水角度 右桨入水打滑 右桨出水打滑 右桨抓水开始时间 右桨抓水时间 右桨回桨时间 右桨最大功率角度 右桨峰值桨力角度 右桨峰值力点 右桨70%峰值桨力角度	左桨入水角度 左桨出水角度 左桨入水打滑 左桨出水打滑 左桨抓水开始时间 左桨抓水时间 左桨回桨时间 左桨最大功率角度 左桨峰值桨力角度 左桨峰值力点 左桨70%峰值桨力角度
动力学	运动员功率	平均功率	右桨功率 右桨1%~25%桨幅做功 右桨26%~50%桨幅做功 右桨51%~75%桨幅做功 右桨76%~100%桨幅做功	左桨功率 左桨1%~25%桨幅做功 左桨26%~50%桨幅做功 左桨51%~75%桨幅做功 左桨76%~100%桨幅做功

“成分累计贡献率 60% ~ 75%、单个贡献率 5% ~ 10% 和载荷绝对值 0.5 以上且因子中指标不重复”的筛选原则,对因子及指标进行筛选<sup>[11]</sup>。所有统计学分析由SPSS 26.0完成,差异性水平设为  $P < 0.05$ 。

## 2 研究结果

### 2.1 KOM 和 Bartlett 球形检验结果

表4呈现80次UT2训练中,赛艇运动员水上动作技术的生物力学指标结构与指标之间的相关矩阵关系结果。45个赛艇动作技术生物力学指标的KOM检验系数约为0.634,样本数据结构合理,适合进行因子分析。Bartlett球形检验结果表明,各指标之间存在明显的相关性( $P = 0.001$ ),数据指标可进行因子分析。

表4 KOM 和 Bartlett 球形检验结果

Tab.4 KOM and Bartlett's test of sphericity

KOM的取样适当性量数	Bartlett 球形检验		
	近似卡方	df	Sig.
0.634	8 799.496	0.861	$P = 0.001$

### 2.2 赛艇水上动作技术的生物力学因子及指标提取结果

从表5可知, No. 1 ~ No. 9 共计9个因子成分的累计贡献率达90.197%,符合提取范围。其次,结

合趋势图3和成分及指标的筛选原则<sup>[11]</sup>,提取因子1~6为最终因子。其中,因子1包含右桨峰值力点、左桨峰值桨力角度、左桨70%峰值桨力角度、左桨51%~75%桨幅做功、右桨51%~75%桨幅做功、左桨1%~25%桨幅做功、右桨1%~25%桨幅做功、右桨抓水开始时间、左桨抓水开始时间,为技术特征性因子;因子2包含右桨出水打滑、左桨出水打滑、右桨76%~100%桨幅做功、左桨76%~100%桨幅做功、右桨26%~50%桨幅做功、左桨26%~50%桨幅做功、右桨峰值桨力角度、左桨峰值力点,为技术特征性因子;因子3包含运动员功率、赛艇平均功率、左桨功率、右桨功率,为功率因子;因子4包含右桨

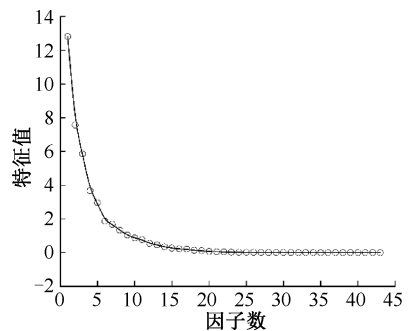


图3 赛艇水上动作技术生物力学指标因子碎石图

Fig.3 Screen plot of biomechanical parameters of rowing technique

入水角度、左桨入水角度,为桨幅入水因子;因子5为桨的运动因子;因子6包含右桨出水角度、左桨出水角度、右桨回桨时间、左桨回桨时间、桨频、每桨距离,为桨幅出水因子(见表6)。

表5 赛艇水上动作技术生物力学指标各因子旋转前后的成分特征值及总方差百分比

Tab.5 Total variance explained and squared loading after rotation of biomechanical parameter of rowing technique

指标 数量	初始特征值			提取载荷平方			旋转载荷平方和		
	因子 特征值	因子 贡献率%	因子累计 贡献率%	因子 特征值	因子 贡献率%	因子累计 贡献率%	因子 特征值	因子 贡献率%	因子累计 贡献率%
1	12.813	29.798	29.798	12.813	29.798	29.798	7.799	18.138	18.138
2	7.565	17.593	47.391	7.565	17.593	47.391	6.608	15.368	33.506
3	5.861	13.630	61.021	5.861	13.630	61.021	6.494	15.103	48.609
4	3.673	8.541	69.561	3.673	8.541	69.561	4.186	9.735	58.343
5	2.960	6.883	76.444	2.960	6.883	76.444	3.803	8.844	67.187
6	1.866	4.339	80.783	1.866	4.339	80.783	3.482	8.097	75.284
7	1.675	3.895	84.678	1.675	3.895	84.678	3.084	7.171	82.455
8	1.330	3.092	87.771	1.330	3.092	87.771	1.855	4.313	86.768
9	1.043	2.426	90.197	1.043	2.426	90.197	1.474	3.428	90.197
10	0.865	2.012	92.209						
...	...	...	...						
43	0	0	0						

注:“...”代表指标11~42因子的特征值和贡献率,因其特征值和贡献率低于本研究纳入标准,故将其省略。

表6 赛艇水上动作技术各因子的生物力学指标

Tab.6 Component of biomechanical parameters of rowing technique

序号	动作技术特征因子1		动作技术特征因子2		功率因子3		桨幅-入水因子4		桨运动因子5		桨幅-出水因子6	
	指标	特征值	指标	特征值	指标	特征值	指标	特征值	指标	特征值	指标	特征值
1	左桨峰值力点	0.944	右桨出水打滑角度	0.945	运动员功率	0.914	右桨入水角度	-0.851	右桨回桨时间	0.932	右桨出水角度	0.886
2	左桨峰值桨力角度	0.896	左桨出水打滑角度	0.860	平均功率	0.891	左桨入水角度	-0.872	左桨回桨时间	0.927	左桨出水角度	0.835
3	左桨70%峰值桨力角度	0.873	右桨76%~100%桨幅做功	-0.906	左桨功率	0.874			桨频	-0.844		
4	左桨51%~75%桨幅做功	0.829	左桨76%~100%桨幅做功	-0.895	右桨功率	0.795			每桨距离	0.789		
5	右桨51%~75%桨幅做功	0.717	右桨26%~50%桨幅做功	0.851								
6	左桨1%~25%桨幅做功	-0.767	左桨26%~50%桨幅做功	0.760								
7	右桨1%~25%桨幅做功	-0.550	右桨峰值力点	-0.553								
8	右桨抓水开始时间	-0.714	右桨峰值桨力角度	-0.565								
9	右桨抓水开始时间	-0.688										

### 3 讨论

本研究基于赛艇动作技术生物力学分析对训练效果评估的科学性以及多指标反馈对使用者评估训练效果的挑战性,借助因子分析法对赛艇水上动作技术的生物力学指标进行降维。结果表明,

45个赛艇动作技术的生物力学指标可以归类为6个关键因子,分别为动作技术特征因子1、动作技术特征因子2、功率因子3、桨幅-入水因子4、桨运动因子5和桨幅-出水因子6,18个动作技术的生物力学指标。因为1个完整的桨幅表现可由4个1/4桨幅之和反映,因子1、2调整为1个动作技术特征因



子。其次,因桨幅由入水角度与出水角度相加而成,因子4、6融合为1个因子。最终,上述因子调整为4个因子。

### 3.1 赛艇动作技术特征

**3.1.1 发力模式特征** 依据因子特征值、因子贡献率和因子累计贡献率,每1/4桨幅做功占比、峰值桨力点、峰值桨力角度、抓水开始时间、出水打滑角度和70%峰值桨力角度等指标被纳入赛艇动作技术特征因子,其中前3个指标共同反映发力模式特征,后3个指标反映技术风格的影响因素。赛艇每1/4桨幅的做功占比指每25%桨幅做功量占总做功量的百分比,是一个反映运动员发力模式的特征关键指标。但因该指标对发力模式特征的反映相对概括,尚不适用于高水平运动员的训练。对于高水平运动员发力模式的评估,赛艇的峰值桨力点(position of peak force, PPF)可能是1个较佳指标。PPF代表峰值桨力在拉桨周期中时刻点,该指标由PPF对应角度占全桨幅的百分比获得:

$$PPF = \frac{\text{峰值桨力角度} - \text{入水角度}}{\text{出水角度} - \text{入水角度}} \times 100\% \quad (1)$$

研究发现,PPF在划桨周期中的位置不仅与赛艇的划船效率相关<sup>[12]</sup>,还与发力模式的相关<sup>[7]</sup>。依据PPF桨幅中所处的位置,可将赛艇运动员的发力模式分为前发力模式(<35%)、中前发力模式(36%~40%)、中发力模式(41%~45%)、中后发力模式(46%~50%)和后发力模式(>50%)等多种模式<sup>[7]</sup>。研究表明,赛艇运动员不同的发力模式源于下肢、躯干和上肢等肢体环节抓水阶段主导方式的差异<sup>[13]</sup>。通常,前发力模式主要出现在下肢用力占优势的队员中,中发力模式主要出现在躯干用力占优势队员中,而后发力模式则出现在上肢用力占优势的队员中<sup>[14]</sup>。但何种技术模式为最佳的发力模式,目前尚未有一致的定义<sup>[6]</sup>。卢德明等<sup>[15]</sup>研究指出,相比前、后发力两种模式,中发力模式具有机械效率最高、平均功率高,且乳酸水平低的特点,是一种较佳的发力模式。也有学者认为,因为下肢、躯干环节动员具有力的加载速度快、PPF时间点早、80%桨力维持时间长且拉桨后期艇速高于拉桨初期的特点,故前发力模式优于后发力模式<sup>[10]</sup>。然而针对奥运冠军的分析结果却表明,即使最优秀的一组赛艇运动员,其水上力与角度曲线、力与时间曲线

仍旧存在很大的差异,目前尚未存在一致力学特征的赛艇奥运冠军<sup>[16]</sup>。赛艇发力特征的差异性提示,任何发力模式均有可能获得成功,在依靠发力模式进行配艇的重点在于巧妙搭配不同的发力模式,而非选择一致的发力模式。

尽管不同发力模式特征的赛艇运动员均可在配艇时考虑,但为成就最佳的艇速,了解最佳发力模式所具备的力学表现仍是首要前提。研究表明,赛艇前进的动力源于桨与水的相互作用,两者相互作用结果又通过外在的发力模式进行呈现<sup>[22-23]</sup>。因此,从桨的运动着手是认识最佳发力模式力学表现的第一步。研究发现,桨力与时间、桨力与桨角曲线面积的最大化可有效增加抓水阶段的做功量和冲量<sup>[19]</sup>。其次,平滑流畅的动作技术可有效降低赛艇运行中艇身的晃动对艇速的影响,同时增加每桨总的做功量<sup>[2,22]</sup>。相比近似三角形的发力特征,近似矩形并伴随快速的发力率可在相同桨力输出的条件下增大推进功率<sup>[4]</sup>。最后,PPF<90°(桨与艇身垂直前)不仅具有升力的优势,又可充分利用拉桨过程中桨形变所释放的弹性势能<sup>[20]</sup>。此外,还有研究报道,除了认识发力模式力学表现外,最佳发力模式的形成还需要顾及不恰当力学表现对损伤的影响和性别的差异。Jones等<sup>[21]</sup>对上肢在拉桨阶段的作用分析发现,快速突增的桨力容易引起运动员下背部损伤,赛艇运动员切勿为了追求高的桨力过度使用上肢。其次,男子(双桨)运动员相比女子(双桨)运动员更倾向于采用力量水平形成PPF,女子运动员更依赖于动作技术的优化形成最佳的PPF<sup>[22]</sup>。因此,从这些研究可以发现,具备较大的发力曲线面积、平滑的发力曲线、倾向矩形的发力形态以及PPF<90°等特征的发力模式,不仅可以使赛艇获得高推进功率,还可以充分发挥外力(如弹性势能)对赛艇的积极作用。但由于不同发力模式所动员身体环节的不同,上肢过度的发力又会带来伤病风险。因此,为形成最佳的发力模式,避免不必要的伤病,应鼓励运动员使用下肢和躯干环节形成较佳的发力模式。

**3.1.2 技术风格的影响指标** 抓水开始时间、出水打滑和70%峰值桨力角度作为影响技术风格的3个生物力学指标分别对赛艇运动表现产生不同的影响。抓水开始时间(drive start time, DST)代表运动

员抓水时机的开始。通常,精英运动员的 DST 在运动中呈现出现时间早,抓水前半周期右桨早于左桨的特点<sup>[18]</sup>。研究发现,DST 的这种表现与运动员力学机制的形成密切相关。训练中,强调赛艇运动员 DST 不仅可以充分利用升力,避免上肢过重的局部负荷;同时,也会将身体放置到形成高效的力学比例的恰当位置,对随后身体各环节的运动起到强化作用<sup>[23]</sup>。

研究发现,赛艇的运行除了源于水平推力外,升力对其也具有特别关键的作用<sup>[24]</sup>。赛艇运行的升力主要出现在抓水的开始阶段和结束部分;运动中,适当地增大桨幅,强调 PPF<90°,可在能量流失最少的前提下获得最大的升力和推进力。但动作技术的打滑(angle slip, AS)却会对升力起到侵蚀作用。AS 又称为无效桨幅,是指桨叶在水中运行未提供给赛艇前进动力的位移角度。对于 AS 的量化评判,国际常用低于 20 kg(入水)/10 kg(出水)的角度、30% 峰值力的角度和艇身加速度从负值变为正值的角度等标准进行评估<sup>[25]</sup>。相关研究证实,AS 本质是对桨幅的缩短和每桨做功距离的降低<sup>[26]</sup>。运动中,不仅会降低不同发力模式的做功量,同时减缓拉桨周期升力对动力的贡献度。因此,因子分析结果中出水打滑指标的出现提示,要特别留意出水阶段 AS 指标变动对桨幅、发力模式的消极影响。

技术风格因子中的最后一个影响指标——70% 峰值桨力角度是指 70% PPF 对应的桨幅角度,主要用于判断运动员快速用力的能力<sup>[27]</sup>。但相关研究发现,迅速增加至 70% PPF 也是前发力模式的一个关键特征<sup>[4]</sup>。因此,70% 峰值桨力角度不仅可以作为一个评估赛艇运动员快速用力能力的指标,同时也是一个判断运动员发力模式的评判指标。

### 3.2 功率

赛艇的艇速由艇上队员的推进功率和作用于赛艇运动系统的阻力等决定<sup>[17]</sup>。运动中,由运动员的输出功率、对抗阻力所消耗的功率和赛艇获得的净功率等关键因素决定。其中,前者由运动员体能水平决定,后者由器材、动作技术与调船的合理性决定<sup>[28]</sup>。因子 3 包含运动员功率、平均功率、左桨功率和右桨功率等指标,上述指标已全部覆盖赛艇运动系统三要素,指标的分布再次凸显功率对赛艇运动表现的重要作用。Shimoda 等<sup>[29]</sup>研究发现,

下肢蹬伸的功率、功率的变异系数和最大摄氧量等指标可预测 2 km 比赛时间。运动中,保持每桨功率的一致性有利于整体功率的维持。Akça<sup>[30]</sup>研究发现,赛艇的启航与冲刺成败主要依靠赛艇运动员无氧功率的输出,无氧代谢供能占总供能比例 20% ~ 30%。因此,无氧功率输出的高低可以预测 2 km 的专项表现。Lawton 等<sup>[31]</sup>研究发现,力量表现可以很强地预测每桨峰值功率、500 m 和 2 km 运动时间。其中,卧拉功率和最大力量(one repetition maximum, 1 RM)的功率是两个预测每桨峰值功率的最佳指标,5 RM 腿推、6 RM 卧拉或 60 RM 坐姿上臂拉是预测 2 km 最佳指标。从功率与赛艇运动表现的研究结果可知,赛艇的运动表现可通过不同类型的功率进行预测,多指标与赛艇运动表现的相关性为赛艇运动表现的监控提供了多种较佳途径。但赛艇的艇速由桨叶的推进功率和推进效率决定,桨叶的推进功率由运动员的体能决定,桨叶的推进效率又由动作技能的精湛性决定<sup>[9]</sup>。因此,当利用功率变动对运动员的训练表现进行监控和评估时,教练员及科研人员除了对训练状态进行诊断外,也应及时地对赛艇运动的体能和动作技术进行诊断分析,以确定最终的影响因素。

### 3.3 桨幅

因子 4 入水角度指桨叶从船头入水点开始至桨与艇身垂直的角度,因子 6 出水角度指桨叶从艇身垂直的位置至船尾出水的角度<sup>[26]</sup>。两者组成赛艇桨幅(stroke length, SL),指桨在水中运行的总距离或每桨的做功距离。研究发现,在桨力和桨频不变的条件下,每桨 SL 的增加可直接带来单位时间的功率增加<sup>[1]</sup>。但 SL 的过度增加会导致 AS 的发生,对运动表现产生适得其反的影响,训练中不可为了追求高的每桨功率过度增加 SL<sup>[32]</sup>。此外,Čerme 等<sup>[33]</sup>研究发现,SL 也会因竞技水平的差异呈现略微不同。相比低水平运动员和非专业的赛艇运动员,精英级别赛艇运动员的 SL 并不会随着桨频的变动发生明显的改变。这种细微的差异提示,SL 的应用需要针对运动员竞技状态区别对待。对于低水平和非专业的赛艇运动员,鼓励其适当地增加 SL 提高每桨功率。但对于高水平或精英运动员,应发展其高桨频下保持 SL 的能力。

### 3.4 桨的运动表现

**3.4.1 桨频和回桨时间** 因子5包含右桨回桨时间、左桨回桨时间、桨频和每桨距离等动作技术的生物力学指标,这些指标共同反映赛艇桨的运动表现。相关研究表明,赛艇的桨频(stroke rate, SR)、功率和艇速在一定范围内呈正向相关性。在SL不变的前提下,SR的升高带来功率的增加和整体平均艇速的增加。训练中,为获得高的艇速,必然要提高运动中的SR<sup>[34]</sup>。然而,高SR也会带来不可避免的消极影响。随着SR的增加,运动员身体重心的波动逐渐增加,这种波动明显增加艇身晃动,导致艇速也产生大的波动<sup>[9]</sup>,有悖于赛艇训练所追求的“大的平均艇速、小的艇速波动”原则。研究发现,SR的高低受限于桨的回桨时间(recovery time, RT)。赛艇完整的划桨周期由拉桨和回桨组成,两者时间消耗呈1:3分布。优秀赛艇运动员常在保持拉桨时间和SL不变的前提下,通过增加回桨速度、缩短RT来提高SR<sup>[8]</sup>。此外,研究也发现,RT对艇速也有较大的影响,赛艇因运动员抓水阶段主动驱桨使得最高艇速出现在RT期间<sup>[35]</sup>。保持滑座回桨周期的最大的滑动,延长RT时间,有利于RT期间艇速波动的降低和功率的流失<sup>[1]</sup>。从上述研究可知,高SR是获得最佳艇速的一个关键因素,SR提高需要以SL为基础,同时在保障滑座最大位移的基础上缩短RT进行。运动员可基于上述两者,对标赛艇的平均艇速获得最佳的SR。

**3.4.2 每桨位移距离** 追求最大的平均艇速是赛艇运动员训练的首要目标。赛艇艇速是每桨距离或每桨位移距离(distance of per stroke, Dist/Stroke)与桨频的产物,两者反比性关系共同决定赛艇的平均艇速的高低。训练中,在保持桨频不变的前提下增加Dist/Stroke是增加艇速的最有效方式。但因Dist/Stroke易受“艇型”因素的影响,赛艇运动员Dist/Stroke会因赛艇类型差异而不同。例如:相比单桨运动员,双桨艇拥有每桨更长的位移<sup>[4]</sup>。研究表明,赛艇奥运金牌获得者SR和Dist/Stroke关系呈现一定的规律分布。首先,大多数赛艇奥运冠军的SR与Dist/Stroke处于适当的比例区间;其次,依靠较长Dist/Stroke取胜的运动员处于第2种分布;最后,仅有少数奥运冠军依靠高的SR获胜<sup>[4]</sup>。针对奥运冠军的分析表明,Dist/Stroke和SR的恰当配

合是大多数奥运冠军获胜的关键。训练中,寻找与赛艇运动员自身Dist/Stroke配比的SR是成就高水平运动表现的一个重要因素。

对于Dist/Stroke的发展,已有研究证实,赛艇Dist/Stroke可通过运动员自身因素(运动员选拔、每桨的平均桨力、每桨的桨幅以及每桨的拉桨时间等)和外在的装备条件(桨叶面积、艇的空气阻力和流体阻力等)改善<sup>[5,12]</sup>。Valery等<sup>[36]</sup>研究发现,高大、强壮的赛艇运动员相比身材矮小的赛艇运动员Dist/Stroke更大,输出功率更高;选拔身材高大、强壮的赛艇运动员可以获得先天的优势。速度和速度耐力训练可提高赛艇运动员维持高桨频能力,强调有氧能力训练、力量训练、力量耐力训练和动作技术的优化训练可以增加Dist/Stroke<sup>[4,37]</sup>。

## 4 结论

依据赛艇动作技术生物力学指标对运动表现重要性(贡献度),45个赛艇动作技术的生物力学指标依次为:“技术风格特征因子”,包含每1/4桨幅做功占比、峰值桨力点、峰值桨力角度、抓水开始时间指标、出水打滑角度和70%峰值桨力角度指标;“功率因子”,包含运动员功率、平均功率和左右桨功率指标;“桨幅因子”,包含入水角度、出水角度指标;“桨的运动因子”,包含回桨时间、桨频和每桨距离指标等。对上述因子及指标的监控与反馈不仅可以反映运动员的技术风格、功率和桨的表现,同样有利于教练员及科研人员对运动员的动作技术特点的判断和训练效果的评估。

### 参考文献:

- [1] SMITH RM, LOSCHNER C. Biomechanics feedback for rowing [J]. J Sport Sci, 2002, 20(10): 783-791.
- [2] BAUDOIN A, HAWKINS D. A biomechanical review of factors affecting rowing performance [J]. Br J Sports Med, 2002, 36(6): 396-402.
- [3] 肖如意, 刘扬, 宋旭, 等. 我国优秀男子双人划艇运动员运动生物力学技术分析 [J]. 南京体育学院学报(自然科学版), 2015, 14(6): 36-40.
- [4] KLESHNEV V. Biomechanics of rowing [M]. Wiltshire: Crowood Press Limited, 2016: 6-10.
- [5] COKER J, HUME PA, NOLTE V. Validity of the Powerline Boat Instrumentation System [C]// Proceedings of XXVII International Conference on Biomechanics in Sports.



- Limerick: [s.n.], 2009.
- [ 6 ] 李吉如, 刘扬, 梁东梅, 等. 优秀赛艇女子双人单桨运动员拉桨阶段技术特点及配艇技术分析[J]. 天津体育学院学报, 2019, 34(2): 92-97.
- [ 8 ] 徐开胜. 中国优秀公开级赛艇双桨运动员划桨技术诊断研究[D]. 上海: 上海体育学院, 2017.
- [ 9 ] 徐开胜, 徐开娟. 赛艇技术研究进展[J]. 上海体育学院学报, 2017, 41(2): 83-90.
- [10] 诺特. 划得更快: 赛艇训练的科学与艺术[M]. 北京: 北京体育大学出版社, 2011.
- [11] 惠小珊, 杨帅, 张金生, 等. 基于量表等级化和主成分分析法探究缺血性中风证候要素与治法间关系[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(4): 159-167.
- [12] HERBER S, RUNKEL M, PITTON MB, *et al.* Physiologic changes in rowing performance associated with training in collegiate women rowers [J]. *Int J Sports Med*, 1985, 6(4): 229-233.
- [13] CHU DPK, LAM ATK. Kinematics and kinetics rowing pattern on ergometer [C]// Proceedings of 29<sup>th</sup> International Federation of Sports Medicine. Beijing: [s.n.], 2006.
- [14] 曹景伟, 季林红, 马祖长, 等. 我国优秀赛艇运动员桨力-时间曲线特征[J]. 天津体育学院学报, 2007, 22(4): 281-283.
- [15] 卢德明, 王庆君, 王云德. 赛艇技术的生物力学研究[J]. 体育科学, 1992, 12(6): 75-79.
- [16] HASE K, ANDREWS BJ, ZAVATSKY AB, *et al.* Biomechanics of rowing [J]. *Jsm Int J C-Mech Sy*, 2002, 45(4): 1082-1092.
- [17] BAUDOIN A, HAWKINS D. Investigation of biomechanical factors affecting rowing performance [J]. *J Biomech*, 2004, 37(7): 969-976.
- [18] WARMENHOVEN J, COBLEY S, DRAPER C, *et al.* Force-angle characteristics and level of competitive representation in on-water rowing [C]// Proceedings of XXXIV International Conference on Biomechanics in sports. Tsukuba: [s.n.], 2016.
- [19] HILL H, FAHRIG S. The impact of fluctuations in boat velocity during the rowing cycle on race time [J]. *Scand J Med Sci Spor*, 2009, 19(4): 585-594.
- [20] AFFELD K, SCHICHL K, ZIEMANN A. Assessment of rowing efficiency [J]. *Int J Sports Med*, 1993, 14(S1): S39-S41.
- [21] JONES JA, ALLANSON-BAILEY L, JONES MD, *et al.* An ergometer based study of the role of the upper limbs in the female rowing stroke [J]. *Procedia Eng*, 2010, 2(2): 2555-2561.
- [22] WARMENHOVEN J, HARRISON A, ROBINSON MA, *et al.* A force profile analysis comparison between functional data analysis, statistical parametric mapping and statistical non-parametric mapping in on-water single sculling [J]. *J Sci Med Sport*, 2018, 21(10): 1100-1105.
- [23] SCHWANITZ P. Applying biomechanics to improve rowing performance [J]. *Fisa Coach*, 1991, 2(3): 1-7.
- [24] 刘宇. 生物力学在运动控制与协调研究中的应用[J]. 体育科学, 2010, 30(11): 62-73.
- [25] KLESHNEV V, Baker T. Understanding rowing technique. The timing of the catch [J]. *Rowing Regatta Mag*, 2011; 4.
- [26] 陈炜, 程亮亮, 杨栋栋, 等. 我国优秀赛艇女子单桨运动员实船运动生物力学特征研究[J]. 体育科学, 2016, 36(12): 72-76.
- [27] LASCHOWSKI B, NOLTE V, ADAMOVSKY M, *et al.* The effects of oar-shaft stiffness and length on rowing biomechanics [J]. *J Sport Eng Tech*, 2015, 229(4): 239-247.
- [28] HOFMIJSTER MJ, LANDMAN EH, SMITH RM, *et al.* Effect of stroke rate on the distribution of net mechanical power in rowing [J]. *J Sport Sci*, 2007, 25(4): 403-411.
- [29] SHIMODA M, FUKUNAGA T, HIGUCHI M, *et al.* Stroke power consistency and 2 000 m rowing performance in varsity rowers [J]. *Scand J Med Sci Spor*, 2009, 19(1): 83-86.
- [30] AKÇA F. Prediction of rowing ergometer performance from functional anaerobic power, strength and anthropometric components [J]. *J Hum Kinet*, 2014, 41(1): 133-142.
- [31] LAWTON TW, CRONIN JB, MCGUIGAN MR. Strength, power, and muscular endurance exercise and elite rowing ergometer performance [J]. *J Strength Cond Res*, 2013, 27(7): 1928-1935.
- [32] NOLTE V. Rowing faster [M]. Champaign: Human Kinetics, 2005.
- [33] ERNE T, KAMNIK R, VESNICER B, *et al.* Differences between elite, junior and non-rowers in kinematic and kinetic parameters during ergometer rowing [J]. *Hum Movement Sci*, 2013, 32(4): 691-707.
- [34] HELD S, SIEBERT T, DONATH L. Changes in mechanical power output in rowing by varying stroke rate and gearing [J]. *Eur J Sport Sci*, 2020, 20(3): 357-365.
- [35] CELENTANO F, CORTILI G, DI PRAMPERO P, *et al.* Mechanical aspects of rowing [J]. *J Appl Physiol*, 1974, 36(6): 642-647.
- [36] VALERY K. Method of analysis of speed, stroke rate and stroke distance in aquatic loco-motions [C]// Proceedings of XXIV International Conference on Biomechanics in Sports. Salzburg: [s.n.], 2006.
- [37] EBBEN WP, KINDLER AG, CHIRDON KA, *et al.* The effect of high-load vs. high-repetition training on endurance performance [J]. *J Strength Cond Res*, 2004, 18(3): 513-517.