

# 运动水平和条件变化对正脚背踢球动作协调特征及变异性的影响

张力文<sup>1</sup>,张美珍<sup>1</sup>,刘卉<sup>2</sup>

(1.太原理工大学 体育与健康工程学院,太原 030024;2.北京体育大学 运动人体科学学院,北京 100084)

**摘要:**[目的]明确运动水平和条件变化对正脚背踢球动作协调特征及协调变异性的影响.[方法]选取14名足球专项和32名普通无足球专项训练经验大学生,获得其3种踢球条件下的运动学和肌电数据,确定下肢各环节各协调特征占时比例、肌肉协调激活率、耦合角标准差在不同运动水平和条件变化间的差异.[结果]无论踢球条件,后摆阶段,专项大学生踢球腿髌-膝同相和膝-踝近端占时比例显著大于普通大学生.普通大学生踢无时间限制定位球时,支撑腿髌-膝远端占时比例显著小于踢有时间限制定位球时,而专项大学生该指标在踢球条件间无显著差异.前摆阶段,专项大学生踢球腿膝-踝近端占时比例显著大于普通大学生,支撑腿髌-膝异相和近端占时比例显著小于普通大学生.加速阶段,专项大学生踢球腿膝-踝近端、支撑腿髌-膝异相和膝-踝近端占时比例大于普通大学生.无论踢球条件,专项大学生胫骨前肌-腓肠肌协调激活率显著小于普通大学生,踢球腿膝-踝耦合角标准差大于普通大学生.[结论]与初学者相比,专业运动员通过踢球腿膝关节屈伸控制主导和小腿肌群(胫骨前肌与腓肠肌)较低协调激活率的动作控制机制,完成更快速和更省力的正脚背踢球动作.建议足球运动员通过膝关节屈伸动态稳定性练习,结合小腿肌群激活与放松控制等训练,优化踢球动作的发力模式.建议实践中通过滚踢球训练引导运动员调整支撑腿各环节协调特征,提高踢球准确性和抗环境变化干扰的能力.

**关键词:**协调特征;耦合角;动作控制;动态系统理论;正脚背踢球

**中图分类号:**G808

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-2367(2026)04-0141-08

动态系统理论认为,动作协调特征指人体感觉、神经-肌肉-骨骼系统等与周围环境相互作用而产生的自组织行为的具体表现<sup>[1]</sup>,描述指标包括2环节间的耦合角<sup>[2]</sup>、主动肌和拮抗肌协调激活率<sup>[3]</sup>等.高水平运动员表现出更恰当的动作协调特征<sup>[4-6]</sup>,能帮助运动员快速建立高效的神经肌肉动作控制,精准控制身体各部位,把握动作的时空及节奏.研究显示跳台滑雪飞行距离更远的运动员在起跳阶段表现出更多的髋关节控制为主的协调特征<sup>[4]</sup>.高水平游泳运动员蛙泳时,肘-膝关节在推进阶段表现为异相协调,在滑行阶段表现为同相协调,而低水平运动员在2阶段均以同相协调为主,导致动作效率下降,蛙泳速度降低<sup>[5]</sup>.此外,动作协调变异性指动作协调特征会根据环境条件(如踢球时的时间限制和球的滚动等)改变而发生变化,常使用动作阶段内耦合角标准差评价<sup>[7]</sup>.协调变异性反映了动作系统灵活性,而灵活性是动作系统对自组织行为的良好掌控,表现为解除或建立感觉、中枢神经系统和运动器官之间的联系,以应对条件变化的干扰.一般较高的协

**收稿日期:**2025-08-22;**修回日期:**2025-09-22.

**基金项目:**国家自然科学基金(81572212);2024年度山西省基础研究计划自由探索类项目(202403021222072);2024年度山西省研究生教育创新计划项目(2024SZ04).

**作者简介:**张力文(1993-),女,山西临汾人,太原理工大学讲师,博士,主要研究方向为运动生物力学,E-mail:zhangliwen1399@163.com.

**通信作者:**刘卉(1972-),女,天津人,北京体育大学教授,主要研究方向为运动生物力学,E-mail:liuhuibupe@163.com.

**引用本文:**张力文,张美珍,刘卉.运动水平和条件变化对正脚背踢球动作协调特征及变异性的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(4):141-148.(Zhang Liwen,Zhang Meizhen,Liu Hui.Effects of sports level and kicking condition on the inter-segmental coordination and variability of instep kicking[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2026,54(4):141-148.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.08.22.0001.)

调变异性代表灵活的动作协调模式,应对环境变化干扰的能力更强<sup>[8]</sup>.因此,明确各动作协调特征和协调变异性在不同运动水平运动员间和条件变化下的差异,有助于理解神经系统动作控制机制及面对环境变化干扰时的策略差异,为提高运动表现提供重要依据.

明确正脚背踢球动作协调特征及变异性在不同运动水平和条件变化下的差异是提高踢球动作表现的前提.尽管以往多数研究发现球速和准确性与脚触球前踢球腿的髌、膝、踝关节运动学特征显著相关<sup>[9]</sup>,但踢球腿屈膝角和伸髌角同时增大时,正脚背踢球动作表现更好<sup>[10]</sup>,提示应关注多关节动作协调特征,而非单个关节特征.然而目前对正脚背踢球动作协调特征及变异性的研究尚不充分.研究发现,相比于初学者,有一定训练经验的足球运动员正脚背踢球时踢球腿的髌、膝关节运动范围更大<sup>[11-12]</sup>,对远端环节的控制能力较强<sup>[13]</sup>.也有研究<sup>[12]</sup>发现无论有无训练经验,受试者正脚背踢滚动球时膝关节活动范围均小于踢地面定位球,表明面对更复杂的运动情境,协调特征发生了变化.以上研究少有较为量化的结论,且缺乏从神经肌肉动作控制视角对运动时关节间时空协调特征的深入阐述.

因此,本研究目的是明确运动水平和条件变化对正脚背踢球动作协调特征及协调变异性的影响.本研究提出假设1:不同运动水平受试者正脚背踢无时间限制定位球、有时间限制定位球和滚动球条件下,下肢各环节协调特征占时比例、肌肉协调激活率和耦合角标准差显著不同;假设2:踢球条件变化对不同水平受试者各指标的影响不同.

## 1 方法

### 1.1 研究对象

研究对象共46人,包括32名男性普通大学生,身高为 $(178.0 \pm 6.5)$  cm,体质量为 $(70.9 \pm 9.4)$  kg;14名足球专项男性大学生,身高为 $(178.7 \pm 4.5)$  cm,体质量为 $(73.8 \pm 10.3)$  kg.普通大学生为足球爱好者,纳入标准为:1)通过自主练习接触过正脚背踢球等基础技术,具备一定的踢球经验;2)未接受过系统的足球专项训练;3)未参加过正式足球比赛<sup>[11]</sup>.足球专项大学生运动水平均为二级.所有受试者通过微信朋友圈及线下张贴广告等形式招募,优势侧均为右侧,半年内无下肢损失史.测试前告知受试者实验流程并签署知情同意书.

### 1.2 测试流程及数据采集

受试者穿着紧身短裤,进行10~15 min热身,包括正脚背踢球练习、慢跑和跳跃等.在受试者下肢粘贴21个反光标志点.在球上方贴一个反光标志点,用来记录足-球接触时刻.

在踢球腿股直肌、股外侧肌、股内侧肌、胫骨前肌、股二头肌、半腱肌、腓肠肌外侧粘贴肌电电极,并进行2次最大自主等长收缩(maximum voluntary contraction, MVC)测试.

受试者分别进行正脚背踢无时间限制定位球、有时间限制定位球和滚动球测试,顺序随机.踢定位球时,球放在测试区域,距离球门5 m,球门长3 m,高2 m.受试者从足球左后方45°方向助跑2~4步踢球.无时间限制时,受试者准备好后自行踢球;有时间限制时,须在5 s内完成踢球动作;滚动球测试时,由实验人员将球从坡度为35°的斜坡上滚下,速度为1.2~1.5 m/s.踢球前告知受试者:1)最大力踢球,尽可能提高球速;2)尽量向球门中心踢.

使用8摄像头红外高速动作捕捉系统(200 Hz, Raptor-4; Motion Analysis Inc., Santa Rosa, CA, USA)和无线表面肌电采集系统(2 000 Hz, Delsys Inc., Natick, Massachusetts, USA)同步采集受试者踢球时体表点3维坐标和肌电信号.为保证协调变异性指标计算的统计效率,每名受试者需完成3种踢球动作,每种动作各采集10轮次有效数据<sup>[6,14]</sup>.在运动平面右侧和前侧各架一台摄像机(50 Hz, GC-PX100, JVC, Japan),分别用于记录足球运动轨迹和进入球门位置(附录图S1).

### 1.3 数据处理

踢球动作分为后摆(踢球腿足尖离地到髌关节最大后伸)、前摆(髌关节最大后伸到膝关节最大屈曲)和加速阶段(膝关节最大屈曲到足-球接触)<sup>[15-17]</sup>.所有标志点3维坐标采用Butterworth低通滤波法进行平滑,截断频率为13 Hz,并采用欧拉角方法计算髌、膝、踝关节屈伸角度.将每名受试者每轮次测试动作的踢球周期内各关节角度插值成101个对齐的等时间间隔时间序列,将整个踢球周期标准化为100%动作阶段.共

测 10 轮次.对于 2 组角度时间序列  $\alpha, \beta$ , 定义第  $i$  时刻耦合角<sup>[2]</sup> $\gamma_i(\alpha, \beta) = \arctan\left(\frac{\beta_{i+1} - \beta_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i}\right)$  (若  $\alpha_{i+1} - \alpha_i = 0$ , 则  $\gamma = 180^\circ$ ). 使用上式分别计算第  $j$  轮第  $i$  时刻的  $\gamma_{i,j}(\alpha_{\text{支撑腿髌},j}, \beta_{\text{支撑腿膝},j}), \gamma_{i,j}(\alpha_{\text{支撑腿膝},j}, \beta_{\text{支撑腿踝},j}), \gamma_{i,j}(\alpha_{\text{踢球腿髌},j}, \beta_{\text{踢球腿膝},j}), \gamma_{i,j}(\alpha_{\text{踢球腿膝},j}, \beta_{\text{踢球腿踝},j})$ . 由于耦合角具有方向性, 因此对轮次使用循环统计的方法求得第  $i$  时刻的平均耦合角<sup>[2]</sup> $\bar{\gamma}_i = \arctan(y_i/x_i)$  (若  $x_i = 0$ , 则  $\bar{\gamma}_i = 180^\circ$ ), 其中,  $x_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\cos \gamma_{i,j}), y_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\sin \gamma_{i,j}), n$  为总轮数.

根据表 1 计算各阶段各环节 4 种协调特征占时比例(表 1)<sup>[2]</sup>. 对肌电原始信号进行 10~800 Hz 带通滤波处理、全波整流和 20 Hz 低通滤波处理, 获得肌电线性包络线. 肌肉激活程度由各时刻线性包络线除以对应肌肉 MVC 值得到. 肌肉协调激活率为整个踢球周期内股四头肌-腘绳肌、胫骨前肌-腓肠肌激活程度之比. 计算每名受试者每种情况 10 轮次踢球耦合角标准差, 作为该情况协调变异性大小. 使用 Fastmove 3D Motion(大连锐动科技有限公司, 中国) 获得足球球心坐标, 最大球速为相邻 2 帧足球最大位移对应的平均球速. 踢球准确性定义为足球进入球门时刻球心与球门中心的距离.

表 1 协调特征定义

Tab. 1 Scheme used to categorize coordination patterns

协调特征	$\gamma$	协调特征	$\gamma$
近端控制协调(近端)	$(-180^\circ, -157.5^\circ), [-22.5^\circ, 22.5^\circ], [157.5^\circ, 180^\circ]$	远端控制协调(远端)	$[-112.5^\circ, -67.5^\circ], [67.5^\circ, 112.5^\circ]$
同相协调(同相)	$[-157.5^\circ, -112.5^\circ], [22.5^\circ, 67.5^\circ]$	异相协调(异相)	$[-67.5^\circ, -22.5^\circ], [112.5^\circ, 157.5^\circ]$

### 1.4 数据分析

使用  $2 \times 3$  双因素方差分析确定踢球运动表现、各环节各协调特征占时比例、肌肉协调激活率和耦合角标准差在不同运动水平和条件变化间的差异. 若运动水平和条件变化之间存在交互作用, 后继使用单因素方差分析确定同一运动水平下条件变化对各指标的影响, 使用独立样本 T 检验确定同一条件下运动水平对各指标的影响. 所有统计分析应用 SPSS21.0(IBM, Armonk, NY, USA) 完成, 显著性水平定义为一类误差概率不大于 0.05.

## 2 结果

### 2.1 踢球运动表现

运动水平和踢球条件对最大球速的交互作用显著(表 2). 3 种踢球条件下, 专项大学生最大球速均显著大于普通大学生, 而足球球心与球门中心距离显著小于普通大学生. 2 组受试者踢无时间限制定位球时该指标小于踢有时间限制定位球( $p=0.015$ )和滚动球时( $p=0.005$ ).

表 2 踢球运动表现

Tab. 2 Kicking performances

球的状态	专项大学生(14 名)			普通大学生(32 名)			$p$ 值 (运动 水平)	$p$ 值 (踢球 条件)	$p$ 值(运 动水平 $\times$ 踢 球条件)
	无时间限 制定位球	有时间限 制定位球	滚动球	无时间限 制定位球	有时间限 制定位球	滚动球			
最大球速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$20.57 \pm 5.22^{*b}$	$20.48 \pm 5.36^{*b}$	$19.21 \pm 5.43^{*a}$	$13.22 \pm 2.38^b$	$13.33 \pm 2.48^b$	$13.92 \pm 1.94^a$	<b>&lt;0.001</b>	0.659	<b>0.009</b>
足球球心与球 门中心距离/m	$0.37 \pm 0.11^{*ab}$	$0.40 \pm 0.13^*$	$0.42 \pm 0.15^*$	$0.99 \pm 0.26^{ab}$	$1.05 \pm 0.27$	$1.10 \pm 0.25$	<b>0.001</b>	<b>0.014</b>	0.495

注: \* 与普通大学生比有显著性差异; a 与有时间限制定位球比有显著性差异; b 与滚动球比有显著性差异.

### 2.2 协调特征占时比例

后摆阶段: 无论踢球条件, 专项大学生踢球腿髌-膝同相和膝-踝近端占时比例大于普通大学生, 而髌-膝

近端小于普通大学生(表3).2组受试者踢无时间限制定位球时,踢球腿髌-膝同相占时比例显著大于有时间限制定位球( $p=0.009$ )和滚动球时( $p=0.016$ ),膝-踝同相占时比例大于踢滚动球时( $p=0.032$ ).踢无时间限制定位球时,专项大学生踢球腿髌-膝异相占时比例显著大于普通大学生.无论踢球条件,专项大学生支撑腿髌-膝异相占时比例小于普通大学生,而髌-膝同相占时比例大于普通大学生(表3).此外,专项大学生踢滚动球时,支撑腿髌-膝同相占时比例显著小于踢有、无时间限制定位球时.普通大学生踢无时间限制定位球时支撑腿髌-膝远端占时比例小于踢有时间限制定位球时( $p=0.018$ ),而专项大学生该指标在3种踢球方式间无显著性差异.

表3 后摆阶段各环节协调特征占时比例

Tab. 3 The time rates of each coordination pattern in backing swing phase

%

环节	协调特征	专项大学生(14名)			普通大学生(32名)			$p$ 值 (运动水平)	$p$ 值 (踢球条件)	$p$ 值(运 动水平×踢 球条件)
		无时间限 制定位球	有时间限 制定位球	滚动球	无时间限 制定位球	有时间限 制定位球	滚动球			
踢球腿髌-膝	同相	41.0±15.9* <sup>ab</sup>	39.4±13.0*	40.0±13.4*	37.3±17.3 <sup>ab</sup>	30.3±16.5	27.9±16.0	<b>0.050</b>	<b>0.015</b>	0.083
	异相	6.5±3.5*	7.6±8.0	5.7±5.7	4.6±2.3 <sup>b</sup>	6.6±5.6 <sup>b</sup>	8.7±7.7 <sup>a</sup>	0.578	0.541	<b>0.048</b>
	近端	8.7±4.5*	9.7±7.3*	10.0±7.2*	12.6±7.1	15.6±14.8	13.5±11.2	<b>0.032</b>	0.146	0.638
	远端	41.1±16.0	43.3±17.0	44.4±16.2	45.5±19.0	47.8±20.6	49.9±19.8	0.401	0.144	0.939
踢球腿膝-踝	同相	20.6±15.3 <sup>b</sup>	21.0±16.1	17.0±11.4	28.3±18.6 <sup>b</sup>	22.9±15.9	20.6±15	0.343	<b>0.020</b>	0.339
	异相	6.2±7.8	6.6±9.8	6.3±7.9	6.3±6.8	8.4±8.3	9.4±10.3	0.491	0.234	0.443
	近端	59.2±18.2*	58.4±19.1*	62.8±10.8*	45.8±23.9	44.6±25.9	44.3±26.7	<b>0.034</b>	0.632	0.597
	远端	14.0±7.3	14.1±5.9	13.8±6.7	19.7±16.9	24.1±20.6	25.7±20.2	0.071	0.113	0.117
支撑腿髌-膝	同相	18.5±8.6*	20.7±10.5* <sup>b</sup>	14.1±10.5* <sup>a</sup>	8.6±8.7	7.8±7.0	8.1±7.6	<b>&lt;0.001</b>	0.059	<b>0.016</b>
	异相	13.9±10.9*	13.5±9.9*	13.4±7.6*	22.4±12.5	19.9±11.7	22.2±11.8	<b>0.023</b>	0.325	0.470
	近端	5.2±4.2	5.2±4.9	5.5±4.4	6.6±6.1	5.8±5.4	6.6±4.0	0.460	0.697	0.795
	远端	62.4±17.9	60.6±17.9	67.0±16.6	62.4±17.7 <sup>a</sup>	66.6±17.6	63.1±16.4	0.888	0.509	<b>0.038</b>
支撑腿膝-踝	同相	7.1±7.5	6.3±5.6	8.2±6.2	6.9±5.6	5.7±4.3	7.5±6.8	0.746	0.141	0.976
	异相	7.9±7.9	5.1±3.0	8.0±6.9	7.7±5.4	6.3±5.3	5.3±3.6	0.689	0.059	0.099
	近端	81.5±14.2	80.6±16.7	80.3±11.4	80.8±13.0	82.9±13.1	77.8±16.7	0.939	0.562	0.502
	远端	3.5±3.9	4.1±4.3	3.5±3.4	3.4±2.4	3.7±3.0	5.7±4.5	0.547	0.268	0.163

注: \* 与普通大学生比有显著性差异.a 与有时间限制定位球比有显著性差异.b 与滚动球比有显著性差异.

前摆阶段:无论踢球条件,专项大学生踢球腿髌-膝同相占时比例显著小于普通大学生(表4).运动水平和踢球条件对踢球腿膝-踝异相、近端和远端占时比例交互作用显著.普通大学生踢无时间限制定位球时膝-踝异相占时比例显著大于踢滚动球时( $p=0.018$ ),且在所有踢球条件下均大于专项大学生.此外,普通大学生踢无时间限制定位球时踢球腿膝-踝近端占时比例小于踢滚动球时( $p=0.003$ ),并在2种定位球条件下小于专项大学生,而膝-踝远端占时比例则相反.无论踢球条件,专项大学生支撑腿髌-膝异相和近端、膝-踝远端占时比例显著小于普通大学生,而支撑腿髌-膝同相和膝-踝同相占时比例大于普通大学生.

加速阶段:无论踢球条件,专项大学生踢球腿膝-踝异相和支撑腿髌-膝同相占时比例显著小于普通大学生,而踢球腿膝-踝近端、支撑腿髌-膝异相和膝-踝近端占时比例大于普通大学生(表5).

### 2.3 其他指标

运动水平和踢球条件对肌肉协调激活率的交互作用均不显著(附录表S1).2组受试者踢无时间限制定位球时,股四头肌-腘绳肌协调激活率显著大于踢滚动球时( $p=0.028$ ),胫骨前肌-腓肠肌协调激活率显著小于踢有时间限制定位球( $p=0.036$ )和滚动球时( $p=0.013$ ).无论踢球条件,专项大学生胫骨前肌-腓肠肌协调激活率显著小于普通大学生.无论踢球条件,专项大学生3个阶段踢球腿膝-踝及前摆阶段支撑腿膝-踝耦合角标准差显著大于普通大学生(附录表S2).

表 4 前摆阶段各环节协调特征占时比例

Tab. 4 The time rates of each coordination pattern in leg-cocking phase

%

环节	协调特征	专项大学生(14名)			普通大学生(32名)			p 值 (运动水平)	p 值 (踢球条件)	p 值(运 动水平×踢 球条件)
		无时间限制定位球	有时间限制定位球	滚动物球	无时间限制定位球	有时间限制定位球	滚动物球			
踢球腿髌-膝	同相	0.3±0.6*	0.3±0.7*	0.2±0.4*	0.6±1.0	0.7±1.0	0.5±0.8	<b>0.006</b>	0.588	0.930
	异相	51.3±13.8	50.9±13.2	49.3±9.3	47.1±10.7	47.0±12.9	45.2±13.2	0.744	0.308	0.993
	近端	14.1±2.5 <sup>b</sup>	15.1±3.0 <sup>b</sup>	17.3±5.0 <sup>a</sup>	16.2±5.7 <sup>b</sup>	16.0±5.7 <sup>b</sup>	17.2±6.4 <sup>a</sup>	0.499	<b>0.048</b>	0.458
	远端	34.3±14.2	33.7±13.6	32.9±9.5	35.7±12.3	36.2±14.5	36.8±14.5	0.476	0.999	0.831
踢球腿膝-踝	同相	7.7±6.8	10.4±12.7	5.7±4.2	7.1±6.0	6.6±7.1	6.3±6.8	0.529	0.105	0.200
	异相	7.7±6.4*	8.6±7.6*	12.7±10.6*	35.4±19.2 <sup>b</sup>	33.7±20.7	31.0±20.5	<b>&lt;0.001</b>	0.871	<b>0.022</b>
	近端	73.4±18.5*	71.4±22.3*	67.1±21.7	49.1±21.1 <sup>b</sup>	51.8±23.6	55.7±23.1	<b>0.009</b>	0.965	<b>0.006</b>
	远端	4.7±2.7* <sup>b</sup>	5.1±3.2*	6.4±4.5	8.4±4.2 <sup>b</sup>	7.9±4.1	7.0±3.9	<b>0.046</b>	0.895	<b>0.002</b>
支撑腿髌-膝	同相	40.6±10.8*	39.3±10.5*	42.5±19.6*	27.7±10.6	28.9±11.1	29.0±11.8	<b>0.001</b>	0.674	0.617
	异相	1.1±1.7*	0.6±1.8*	0.4±0.9*	9.7±11.0	10.2±11.4	7.4±8.0	<b>0.001</b>	0.356	0.561
	近端	16.9±9.7*	15.6±12.1*	16.4±15.9*	24.0±11.7	24.4±12.1	24.7±12.2	<b>0.018</b>	0.883	0.896
	远端	41.4±14.0	44.5±12.8	40.7±20.0	38.5±12.1	36.5±12.8	37.8±10.0	0.215	0.783	0.114
支撑腿膝-踝	同相	19.6±8.0*	19.5±7.0*	19.6±9.4*	14.5±6.1	15.0±8.1	14.5±8.4	<b>0.026</b>	0.963	0.934
	异相	35.0±14.8 <sup>b</sup>	35.4±16.3 <sup>b</sup>	40.5±16.9 <sup>a</sup>	36.6±12.5 <sup>b</sup>	35.8±13.5 <sup>b</sup>	40.1±13.3 <sup>a</sup>	0.901	<b>0.039</b>	0.876
	近端	29.3±13.9	30.5±16.9	26.8±17.0	26.8±9.5	26.4±12.2	26.1±10.9	0.513	0.243	0.464
	远端	16.1±13.3*	14.5±11.9*	13.1±8.4*	22.2±12.5	22.9±11.0	19.3±8.7	<b>0.027</b>	0.224	0.717

注: \* 与普通大学生比有显著性差异.a 与有时间限制定位球比有显著性差异.b 与滚动物球比有显著性差异.

表 5 加速阶段各环节协调特征占时比例

Tab. 5 The time rates of each coordination pattern in leg acceleration phase

%

环节	协调特征	专项大学生(14名)			普通大学生(32名)			p 值 (运动水平)	p 值 (踢球条件)	p 值(运 动水平×踢 球条件)
		无时间限制定位球	有时间限制定位球	滚动物球	无时间限制定位球	有时间限制定位球	滚动物球			
踢球腿髌-膝	同相	38.3±14.8	38.2±15.3	38.3±13.4	38.7±12.3	41.9±14.6	42.4±15.5	0.533	0.174	0.144
	异相	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.2±0.7	0.2±0.8	0.0±0.0	0.155	0.368	0.368
	近端	3.8±5.5	4.6±5.9	5.2±4.9	6.4±5.6	7.4±5.7	7.5±5.0	0.118	0.091	0.958
	远端	57.8±19.6 <sup>b</sup>	57.1±20	56.5±17.3	54.7±15.5 <sup>b</sup>	50.5±17.4	50.1±18.4	0.322	<b>0.050</b>	0.248
踢球腿膝-踝	同相	13.1±10.1	14.2±11.8	14.4±10.1	18.1±12.0	16.9±12.3	15.0±11.0	0.414	0.786	0.219
	异相	1.4±4.2* <sup>ab</sup>	3.1±7.3*	3.7±7.7*	8.4±8.9 <sup>ab</sup>	12.3±9.9	11.3±9.4	<b>0.003</b>	<b>0.017</b>	0.462
	近端	85.6±9.6* <sup>a</sup>	82.4±13.1*	81.6±12.8*	70.2±18.7 <sup>a</sup>	67.3±19.9	70.4±19.3	<b>0.013</b>	<b>0.044</b>	0.411
	远端	0.0±0.0	0.4±0.8	0.3±1.1	1.1±2.8	1.2±2.3	0.6±0.9	0.127	0.315	0.483
支撑腿髌-膝	同相	4.6±6.6*	8.5±11.1*	10.5±17.8*	14.6±19.6	10.8±11.9	13.2±17.1	<b>0.012</b>	0.585	0.215
	异相	24.3±18.7*	26.8±19.8*	30.2±18.7*	19.5±22.1	20.2±23.2	26.9±24.5	<b>0.006</b>	0.107	0.751
	近端	66.4±18.7	63.8±16.3	57.8±22.8	61.3±24.9	58.7±26.7	55.3±22.6	0.528	0.149	0.916
	远端	2.2±3.8	0.9±2.5	1.4±2.5	4.6±6.8	5.5±10.7	5.7±9.9	0.110	0.929	0.421
支撑腿膝-踝	同相	14.3±10.3	11.2±5.8	10.2±7.2	13.9±12.2	10.6±8.5	13.9±11.3	0.720	0.121	0.340
	异相	33.2±20.4	35.8±22.3	42.4±19.6	41.2±22.4	44.8±25.8	43.4±22.0	0.351	0.215	0.364
	近端	32.6±26.5*	38.2±22.2*	31.8±23.0*	25.1±23.1	23.5±23.5	25.3±19.2	<b>0.005</b>	0.598	0.195
	远端	19.9±16.5	14.9±12.7	15.6±12.0	19.8±15.7	21.1±19.1	17.4±13.3	0.541	0.382	0.204

注: \* 与普通大学生比有显著性差异.a 与有时间限制定位球比有显著性差异.b 与滚动物球比有显著性差异.

### 3 讨论

研究结果部分支持假设 1.后摆阶段,专项大学生具有更多的踢球腿髌-膝同相(伸髌、屈膝)协调,表明其踢球腿髌、膝活动范围均更大<sup>[11-12]</sup>.后摆阶段以伸髌、屈膝为主,目的是在踢球前形成张力弧,从而在加速阶段产生更大的伸膝力矩<sup>[18]</sup>.前摆阶段,专项大学生有更多的踢球腿膝-踝近端(屈膝主导)协调,表明踢球腿以屈膝为主导是其这一阶段的主要协调特征.Li 等<sup>[19]</sup>同样发现有训练经验的运动员踢球腿髌-膝在前摆初期以异相协调为主,主要作用仍是充分拉伸伸膝肌群,为小腿加速前摆储存能量.加速阶段,专项大学生有更多的踢球腿膝-踝近端(伸膝主导)协调和更少的异相(伸膝、踝背屈)协调,表明其在这一阶段踢球腿以伸膝为主导.研究表明高水平运动员伸膝力矩在触球前达到最大,这是获得更大脚速度和球速的关键<sup>[15]</sup>.此外,前摆和加速阶段,专项大学生支撑腿分别为屈膝主导和伸膝主导,而普通大学生为伸髌主导和屈膝主导.前者能通过屈膝产生更大的伸膝力矩,提升支撑腿以及踢球腿髌、膝关节垂直位移,在触球时刻增加踢球腿小腿加速度<sup>[20]</sup>.综上,专项大学生具有更高效的神经肌肉动作控制机制,有利于提高踢球表现<sup>[20-21]</sup>.

专项大学生表现出更经济和安全的肌肉协调特征.一方面,专项大学生小腿环节屈/伸肌协调激活率显著小于普通大学生,表明在整个踢球周期内腓肠肌激活程度较高,有利于维持踢球腿踝关节跖屈,减少肌肉活动.有研究发现无训练经验运动员踢球时肌肉活动更多,但踢球距离却较小<sup>[22]</sup>.也有研究发现与业余运动员相比,精英运动员在前摆阶段肌肉激活较少,说明其可以有效利用肌肉系统,提高动作经济性<sup>[15]</sup>.

专项大学生在 3 种踢球方式下,踢球腿膝-踝耦合角变异性均较大,说明其具有更高的灵活性.运动中的变异性可分为终点变异性 and 协调变异性,分别指目标水平和各环节间协调特征的变异性,均与运动表现相关<sup>[23]</sup>.终点变异性曾用于评价动作稳定性,但动态系统理论强调适度的协调变异性反映运动自由度的灵活性,使高水平运动员能灵活应对干扰<sup>[23]</sup>.

研究结果部分支持假设 2.无论运动水平,动作控制策略均随踢球条件变化而改变,但时间限制对各环节协调占时比例的影响较小,而滚动物球影响较大,表明球的移动是更强烈的条件刺激.此外,不同水平受试者面对不同条件约束时表现出不同的应对策略.当增加时间限制和踢滚动物球时,专项大学生倾向于调节后摆阶段支撑腿的环节间耦合.由于该阶段包含了支撑腿落地时刻,而支撑脚的方向在很大程度上决定了球的运动方向<sup>[15]</sup>,因此这种策略可能在条件变化时保证踢球准确性.本研究同样发现专项大学生踢球准确性显著优于初学者.该结果表明专项大学生神经系统功能对条件变化的适应性更高,能够在不同要求约束下采取不同的动作控制策略<sup>[24]</sup>.

通过对正脚背踢球动作的下肢各关节协调特征进行分析,揭示了多关节运动在神经动作控制层面的协调特征与运动表现之间的内在联系.从神经动作控制的角度来看,踢球动作的协调不仅涉及肌肉与关节的相互配合,更体现了中枢神经系统在多层次控制中的整合能力.根据运动协调理论与动态系统理论,中枢神经系统通过高层协调控制对底层运动器官进行调控,形成稳定而灵活的运动模式<sup>[25]</sup>.高水平运动员踢球过程中踢球腿在后摆和前摆阶段以屈膝控制为主、在加速阶段以伸膝控制为主的协调特征,正是这种“自上而下”神经控制策略的具体体现.这种协调特征能确保动量从近端向远端依次传递,最终提高脚速度和球速<sup>[26]</sup>.高水平运动员还表现出较低的胫骨前肌和腓肠肌协调激活率,表明良好的协调特征有助于减少能量损耗并提高发力效率<sup>[27]</sup>.

此外,协调特征反映了神经系统在面对环境变化干扰时的动作控制优化能力.根据动态系统理论,动作协调特征的形成与变化具有动态系统的特性.当源自机体内外的约束条件发生变化时,动作协调特征也将受到影响,到一定程度时将会导致新的协调方式产生.而在各项体育动作中,基本上都存在比较多的任务变量,不同任务变量之间的交替也将引起动作协调特征稳定性的变化<sup>[28]</sup>.因此,面对体育运动中突然变化的环境时,灵活的动作协调特征是保证动作技术和运动表现的关键.本研究中,高水平运动员在任务变量改变,如增加时间限制或者发生球的滚动时,能及时调整支撑腿的各环节协调特征,保证踢球准确性,表明其神经控制系统在面对复杂任务时能够通过调节各关节间的时空关系,实现运动目标的最优解.

本研究从神经肌肉动作控制视角对运动时关节间的时空协调特征的深入阐述,为足球运动员踢球技术

动作的评估和训练提供了新的理论视角。然而,本研究中的高水平受试者为足球专项大学生,由于其运动水平有限,且动作协调特征对运动水平的变化非常敏感,因此需要进一步明确更高水平运动员正脚背踢球动作的协调特征及变异性与运动表现的关系,并考虑个体感知觉差异和环境影响。

## 4 结论

1)与初学者相比,专业运动员通过踢球腿膝关节屈伸控制主导和小腿肌群(胫骨前肌与腓肠肌)较低协调激活率的动作控制机制,完成更快速和省力的正脚背踢球动作。建议足球运动员通过膝关节屈伸动态稳定性练习,结合小腿肌群激活与放松控制等训练,优化踢球动作的发力模式。2)不同人群在应对不同踢球条件变化时采用调整策略不同,较高水平运动员通过调整支撑腿各环节间协调特征来保证踢球准确性。建议实践中通过滚动球训练提高运动员抗环境变化干扰的能力。

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.08.22.0001)。

## 参 考 文 献

- [1] Bernshtein N A. The Co-ordination and Regulation of Movements[M]. [1st English ed.]. Oxford: Pergamon Press, 1967.
- [2] Chang R, Van Emmerik R, Hamill J. Quantifying rearfoot-forefoot coordination in human walking[J]. *Journal of Biomechanics*, 2008, 41(14): 3101-3105.
- [3] 魏勇, 刘宇. 肌肉共同收缩研究进展[J]. *中国体育科技*, 2009, 45(5): 54-59.  
Wei Y, Liu Y. Research advancement on co-contraction of agonist and antagonist[J]. *China Sport Science and Technology*, 2009, 45(5): 54-59.
- [4] Chardonnes J, Favre J, Cuendet F, et al. Characterization of lower-limbs inter-segment coordination during the take-off extension in ski jumping[J]. *Human Movement Science*, 2013, 32(4): 741-752.
- [5] Seifert L, Leblanc H, Hérault R, et al. Inter-individual variability in the upper-lower limb breaststroke coordination[J]. *Human Movement Science*, 2011, 30(3): 550-565.
- [6] 包蕾, 李秋捷, 刘卉. 我国男子越野滑雪运动员双杖推进技术的协调性特征分析[J]. *北京体育大学学报*, 2021, 44(12): 45-55.  
Bao L, Li Q J, Liu H. Coordination features of using double poling by Chinese male cross-country skiers[J]. *Journal of Beijing Sport University*, 2021, 44(12): 45-55.
- [7] Heiderscheit B C. Movement variability as a clinical measure for locomotion[J]. *Journal of Applied Biomechanics*, 2000, 16(4): 419-427.
- [8] Ducharme S W, van Emmerik R E A. Fractal dynamics, variability, and coordination in human locomotion[J]. *Kinesiology Review*, 2018, 7(1): 26-35.
- [9] Kellis E, Katis A. Biomechanical characteristics and determinants of instep soccer kick[J]. *Journal of Sports Science & Medicine*, 2007, 6(2): 154-165.
- [10] da Silva Carvalho D, Ocarino J M, de Freitas L V, et al. Kinetic and kinematic strategies integrating the trunk and lower limbs for a powerful soccer kick in amateur players[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2024, 42(20): 1967-1976.
- [11] Anderson D L, Sidaway B. Coordination changes associated with practice of a soccer kick[J]. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 1994, 65(2): 93-99.
- [12] Egan C D, Verheul M H G, Savelsbergh G J P. Effects of experience on the coordination of internally and externally timed soccer kicks[J]. *Journal of Motor Behavior*, 2007, 39(5): 423-432.
- [13] Chow J Y, Davids K, Button C, et al. Variation in coordination of a discrete multiarticular action as a function of skill level[J]. *Journal of Motor Behavior*, 2007, 39(6): 463-479.
- [14] Monfort-Torres G, García-Massó X, Skypala J, et al. Coordination and coordination variability during single-leg drop jump landing in children[J]. *Human Movement Science*, 2024, 96: 103251.
- [15] Barfield W R. The biomechanics of kicking in soccer[J]. *Clinics in Sports Medicine*, 1998, 17(4): 711-728.
- [16] Brophy R H, Backus S, Kraszewski A P, et al. Differences between sexes in lower extremity alignment and muscle activation during soccer kick[J]. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 2010, 92(11): 2050-2058.
- [17] Brophy R H, Backus S I, Pansy B S, et al. Lower extremity muscle activation and alignment during the soccer instep and side-foot kicks[J]. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 2007, 37(5): 260-268.
- [18] Shan G B, Westerhoff P. Soccer: Full-body kinematic characteristics of the maximal instep Soccer kick by male soccer players and parameters related to kick quality[J]. *Sports Biomechanics*, 2005, 4(1): 59-72.

- [19] Li Y M, Alexander M, Glazebrook C, et al. Quantifying inter-segmental coordination during the instep soccer kicks[J]. *International Journal of Exercise Science*, 2016, 9(5): 646-656.
- [20] Augustus S, Mundy P, Smith N. Support leg action can contribute to maximal instep soccer kick performance: an intervention study[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2017, 35(1): 89-98.
- [21] Zhou Z Y, Gao Z X, Li F P, et al. Comparison of interlimb coordination during soccer instep kicking between elite and amateur players[J]. *European Journal of Sport Science*, 2025, 25(9): e70041.
- [22] Reilly T, Lees A, Davids K, et al. Science and football[M]. New York: E & FN Spon, 1988: 434-440.
- [23] van Emmerik R E A, Ducharme S W, Amado A C, et al. Comparing dynamical systems concepts and techniques for biomechanical analysis[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2016, 5(1): 3-13.
- [24] Ford P, Hodges N J, Huys R, et al. The role of external action-effects in the execution of a soccer kick: a comparison across skill level[J]. *Motor Control*, 2006, 10(4): 386-404.
- [25] Dubois O, Roby-Brami A, Parry R, et al. A guide to inter-joint coordination characterization for discrete movements: a comparative study[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2023, 20: 132.
- [26] Hatsopoulos N G, Olmedo L, Takahashi K. Proximal-to-distal sequencing behavior and motor cortex[M]// *Motor Control*. Oxford: Oxford University Press, 2010: 159-176.
- [27] Rabello R, Bertozzi F, Galli M, et al. Lower limbs muscle activation during instep kick in soccer: effects of dominance and ball condition[J]. *Science and Medicine in Football*, 2022, 6(1): 40-48.
- [28] 林辉杰, 严波涛, 刘占锋, 等. 运动协调的定量方法以及在专项技术分析领域的研究进展[J]. *体育科学*, 2012, 32(3): 81-91.  
Lin H J, Yan B T, Liu Z F, et al. Quantitative methods and research status of motor coordination in sport skills[J]. *China Sport Science*, 2012, 32(3): 81-91.

## Effects of sports level and kicking condition on the inter-segmental coordination and variability of instep kicking

Zhang Liwen<sup>1</sup>, Zhang Meizhen<sup>1</sup>, Liu Hui<sup>2</sup>

(1. College of Physical Education and Health Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

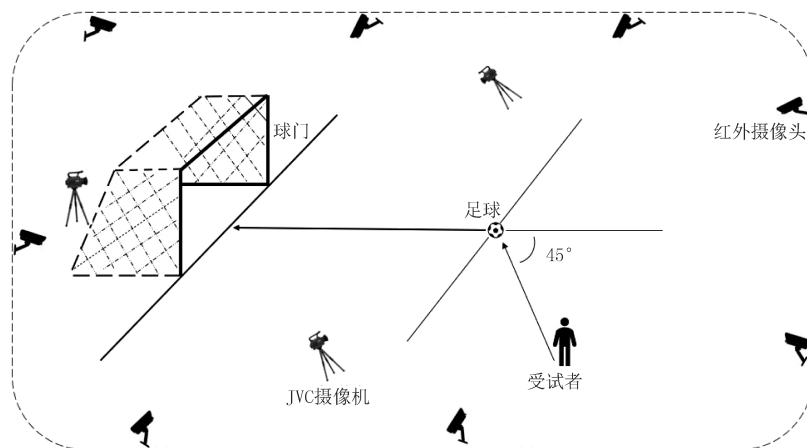
2. School of Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** [Objective] To examine the effect of sports level and kicking condition on the inter-segmental coordination and coordination variability of instep kicking. [Methods] Kinematic and electromyographic data were collected for 14 soccer-majored college students and 32 general college students performing three instep kicking tasks. Differences of the time spent percentage of each inter-segmental coordination pattern, the activation rate of muscle coordination, and the standard deviation of coupling angle among sports levels and conditions were identified. [Results] The kicking leg hip-knee in-phase and knee-ankle proximal percentage of soccer-majored students was significantly greater than that of general students in the back swing phase under the three kicking conditions. The support leg hip-knee distal percentage in the timeless condition of general students was significantly lower than that in the time-limited condition, while there was no significant difference between the kicking conditions for soccer-majored college students in the back swing phase. The kicking leg knee-ankle proximal percentage of soccer-majored students was significantly greater than that of the general students, but support leg hip-knee anti-phase and proximal percentage were lower in the leg-cocking phase. The kicking leg knee-ankle proximal, support leg hip-knee anti-phase, and knee-ankle proximal percentage of soccer-majored students were significantly greater than that of the general students in the leg acceleration phase. The tibia-gastrocnemius co-activation rate of soccer-majored students was significantly lower, while the standard deviation of coupling angle was greater than that of the general students under the three kicking conditions. [Conclusions] High-level athletes achieve faster and more economical instep kicking through the knee flexion-extension dominant inter-segmental coordination and lower co-activation of lower leg muscles. The dynamic stability exercises involving knee flexion and extension, as well as activation and relaxation control exercises of the lower leg muscles, may be effective ways to enhance instep kicking motor control ability and performance for soccer athletes. Rolling ball drills should be incorporated in soccer practice to enhance the resistance to environmental interference via adjusting the inter-segmental coordination of support leg.

**Keywords:** inter-segmental coordination; coupling angle; motor control; dynamic system theory; instep kicking

[责任编辑 杨浦 刘洋]

附录



图S1 测试场地示意图

Fig.S1 Experimental test diagram

表 S1 肌肉协调激活率

Tab. S1 The coordinated activation rates

肌肉	专项大学生(14名)			普通大学生(32名)			p 值 (运动 水平)	p 值 (踢球 条件)	p 值(运 动水平×踢 球条件)
	无时间限 制定位球	有时间限 制定位球	滚动球	无时间限 制定位球	有时间限 制定位球	滚动球			
股四头肌-腓绳肌	4.10±4.05 <sup>b</sup>	2.87±2.34	2.84±2.04	6.05±5.53 <sup>b</sup>	5.17±3.84	4.18±2.94	0.095	<b>0.017</b>	0.863
胫骨前肌-腓肠肌	1.42±0.94 <sup>*ab</sup>	1.70±1.29 <sup>*</sup>	1.66±1.26 <sup>*</sup>	2.50±1.41 <sup>ab</sup>	4.90±5.57	3.78±2.06	<b>0.005</b>	<b>0.024</b>	0.187

注：\* 与普通大学生比有显著性差异。a 与有时间限制定位球比有显著性差异。b 与滚动球比有显著性差异。

表 S2 耦合角标准差

Tab. S2 The standard deviations of coupling angle

(°)

环节	协调 特征	专项大学生(14名)			普通大学生(32名)			p 值 (运动 水平)	p 值 (踢球 条件)	p 值(运 动水平×踢 球条件)
		无时间限 制定位球	有时间限 制定位球	滚动球	无时间限 制定位球	有时间限 制定位球	滚动球			
后摆	踢球腿髌-膝	33.8±7.1	34.4±9.2	33.1±8.7	35.8±11.5	35.5±13.1	35.1±11.4	0.604	0.786	0.913
	踢球腿膝-踝	63.0±7.2 <sup>*</sup>	60.9±9.4 <sup>*</sup>	63.7±7.1 <sup>*</sup>	53.12±16.7	50.4±19.1	51.8±17.9	<b>0.030</b>	0.140	0.730
	支撑腿髌-膝	30.2±5.9	29.4±6.2	27.3±4.4	29.3±10.9	26.3±11.1	29.5±12.8	0.831	0.262	0.133
	支撑腿膝-踝	67.6±7.8	68.1±8.9	69.6±5.7	69.2±10.9	69.7±12.3	68.4±13.1	0.824	0.918	0.653
前摆	踢球腿髌-膝	34.0±5.3	35.9±6.1	36.5±5.3	36.6±7.9	36.2±7.2	35.8±7.5	0.663	0.770	0.429
	踢球腿膝-踝	67.4±8.3 <sup>*</sup>	65.6±7.9 <sup>*</sup>	64.4±10.7 <sup>*</sup>	58.0±9.4	59.9±7.7	59.6±8.2	<b>0.003</b>	0.847	0.269
	支撑腿髌-膝	38.5±9.4	37.3±10.0	35.5±11.8	43.9±10.2	42.0±11.1	42.4±8.1	0.054	0.183	0.648
	支撑腿膝-踝	55.9±6.1 <sup>*</sup>	56.6±9.1 <sup>*</sup>	56.2±7.6 <sup>*</sup>	50.2±6.1	50.3±6.9	50.6±6.3	<b>0.002</b>	0.936	0.935
加速	踢球腿髌-膝	34.8±11.6	34.1±11.4	34.9±10.4	39.2±11.5	37.6±10.0	38.1±11.9	0.200	0.849	0.944
	踢球腿膝-踝	66.4±9.7 <sup>*</sup>	65.8±8.6 <sup>*</sup>	66.8±9.2 <sup>*</sup>	58.9±12.5	61.1±10.0	61.3±12.3	<b>0.023</b>	0.818	0.809
	支撑腿髌-膝	64.8±10.5	66.8±7.8	67.0±6.2	60.5±13.2	63.7±13.5	63.6±10.9	0.250	0.255	0.930
	支撑腿膝-踝	44.6±14.3	46.9±10.3	46.3±12.3	42.6±13.8	41.2±14.2	41.4±13.5	0.231	0.975	0.690

注：\* 与普通大学生比有显著性差异。