

● 研究报告

影响等长大腿中部拉测试信效度的方法学因素综述

路 恒¹, 许贻林², 王 然¹

摘要 等长大腿中部拉(Isometric Mid-thigh Pull, IMTP)测试近年来在国际竞技体育的应用越发广泛。通过分析 IMTP 测试力—时间曲线得到的峰值力、发力率和冲量等指标具有较高的信度,并与力量、爆发力、冲刺和变向等动态运动表现之间呈中度至高度相关关系。然而,相关研究中模棱两可或相互矛盾的研究结果在一定程度上影响了 IMTP 测试的应用。对国外相关文献的梳理与总结表明,采样频率、身体姿势、语言提示、基线测量、信号处理、力—时间曲线分析等方法学因素均会影响 IMTP 测试和分析过程,进而影响测试的准确性和研究的可重复性。因此,在进行 IMTP 测试时应选择信效度较高的测试方法,并在研究中报道所使用的具体方法以确保后续研究的可重复性。此外,对于一些具有争议的方法学因素仍需进一步研究加以证实,为更准确地评估与监控运动员并提高其运动成绩奠定基础。

关键词 等长大腿中部拉;神经肌肉功能;最大力量;发力率;冲量

中图分类号:G804 文献标识码:A 文章编号:1004-4590(2020)06-0075-13

DOI:10.13598/j.issn1004-4590.2020.06.012

A Review of Methodological Factors Influencing Reliability and Validity of Isometric Mid-thigh Pull Test

LU Heng¹, XU Yilin², WANG Ran¹

(1. School of Physical Education and Sport Training, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2. Sports Biomechanics Laboratory, Jiangsu Research Institute of Sports Science, Nanjing 210033, China)

Abstract Isometric mid-thigh pull (IMTP) testing gained its popularity in high-performance sports worldwide. Peak force, rate of force development, and impulse derived from the IMTP force-time curve are highly reliable and correlated with strength, power, sprint, and change-of-direction. However, ambiguity and contraindication between studies impaired the application of IMTP testing. Current literature shows that methodological factors such as sampling frequency, body posture, verbal instruction, baseline measurement, signal processing and force-time curve analysis all affect IMTP testing. Thus affect testing accuracy and study replication. Therefore, practitioners and researchers should select testing methods with high reliability and validity, and report in details in the literature to ensure repeatability for future studies. Additionally, future studies need to address some controversial methodological factors to improve evaluation and monitoring accuracy and set up a foundation for performance enhancement.

Key words isometric mid-thigh pull; neuromuscular function; maximum strength; rate of force development; impulse

1 前言

肌肉力量指肌肉收缩产生力以克服外部负荷的能力^[1],其

与运动员的运动表现之间具有较高的相关性^[2],在体育运动中肌肉力量的大小奠定了大部分运动项目成功与否的基础。运动员的最大力量常用动态测试或等长肌肉收缩进行评价^[2-3],

收稿日期:2020-08-17

基金项目:国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项课题,项目号:2018YFF0300903;上海市科委“扬帆计划”研究项目,项目号:19YF1445800;上海市海外高层次人才计划,项目号:TP2018057;江苏省体育局重大体育科研课题,项目号:ST191102;上海市人类运动能力开发与保障重点实验室,项目号:11DZ2261100。

作者简介:路 恒(1994—),男,江苏盐城人,实验员,硕士,研究方向为体能训练和运动能力测试与评估。

通讯作者:王 然

作者单位:1. 上海体育学院 体育教育训练学院,上海 200438;2. 江苏省体育科学研究所 运动生物力学实验室,南京 210033。

动态测试常使用一次最大重复(One Repetition Maximum, 1RM)或多次最大重复(nRM)重量^[4-6],虽然1RM测试在评价肌肉力量时重测信度较高,但需要受试者具备较高的技术和力量水平^[6],否则会增加潜在的损伤风险,经常进行1RM测试容易产生疲劳,甚至有可能出现过度训练^[7]。相比之下,等长大腿中部拉(Isometric Mid-thigh Pull, IMTP)测试是一种较为安全的评价神经肌肉系统功能水平与疲劳程度、监控训练应激与适应的方法^[8]。与传统的单关节等长测试相比,IMTP测试省时高效、易于管理,而且具有较高的重测信度^[9-14],仅需要在几秒时间内进行一次最大程度自主用力收缩便可完成测试,该测试所产生的疲劳程度和损伤风险非常低。通过分析IMTP测试过程中获取的力-时间曲线可以得到峰值力(Peak Force, PF)、发力率(Rate of Force Development, RFD)和冲量(Impulse, IMP)等多种评价指标^[15],这些指标与深蹲最大力量^[16-18]、短距离冲刺^[13, 19]、垂直纵跳^[3, 9, 10, 20, 21]、变向能力^[13, 22-24]等常见运动表现指标之间具有较高的相关性。此外,与传统的力量^[25]与爆发力^[26]等动态测试相比,IMTP测试可以为训练刺激产生的短期应激和长期适应提供更准确的评估^[7, 27-29]。目前,IMTP测试已广泛用于评价举重^[2-3, 30]、橄榄球^[18, 31-32]、摔跤^[16]、场地自行车^[1]、田径^[27, 33]、高尔夫^[34-35]、综合格斗^[36]、足球^[37-38]、网球^[39]、篮球^[19, 22]以及网球^[39]等运动项目。虽然IMTP测试总体上与众多运动表现指标之间具有较高的相关性,但仍有一些研究得出了相关性较低甚至不相关等结论。例如West等人^[31]和Nuzzo等人^[40]的研究报道了峰值力与冲刺表现和纵跳高度之间的相关性非常低。此外,IMTP测试中常使用不同的采样窗口(2ms-40ms)通过平均平滑后计算峰值发力率(Peak RFD, pRFD)^[14],但使用此方法得到的峰值发力率与运动表现指标之间的相关性也不一致。一部分研究报道峰值发力率与运动表现指标之间高度相关^[3, 10, 13, 18, 41],而另一些研究中则与之相反^[1, 2, 9, 31, 33, 42]。

考虑到IMTP测试与运动表现之间的关系取决于测试方法的准确性,尤其是测试时的身体姿势以及对力-时间曲线分析方法的信效度,因此本文的目的在于探讨IMTP测试过程中包括测试设备、测试方法以及数据处理等各环节的影响。通过总结前人研究,在便于科研人员与教练员更好地理解IMTP测试和分析方法的同时提出具有较高重测信度的标准化测试和分析方法,通过更好地评估运动员的运动状态以及监控运动员的训练过程,为提升运动员的运动表现打下基础。

本文通过中国知网、万方数据资源系统、Web of Science、PubMed、EBSCO等数据库进行检索,文献发表时间为1990年1月-2020年5月。其中英文关键词为:isometric mid-thigh pull, mid-thigh pull, mid-thigh clean pull, force-time curve, reliability, sampling frequency, position, angle, posture, instruction, warm up, familiarization, baseline, filter, smoothing, ratio scaling, allometric scaling, onset, peak force, rate of force development, impulse, 中文关键词为:等长大腿中部拉、力-时间曲线、采样频率、身体姿势、熟悉测试、基线、滤波、平滑、动作开始、峰值力、发力率、冲量。通过布尔运算符“and”和“or”连接进行检索,共检索到175篇文献。纳入的文献为IMTP测试过程中的方法学,不限制受试者的性别、年龄和运动水平等。将检索到的文献进行筛选,排除重复、综述类以及与IMTP测试方法学无关的文献,最终纳入文献46篇(中文0篇,英文46篇)。

2 IMTP 测试过程中的方法学

IMTP测试过程中,测试设备的采样频率、受试者的身体姿势、对测试过程的熟悉程度、基线的测量以及力学信号的处理等因素常会对力-时间曲线的准确获取及分析产生影响,因此在IMTP测试过程中需要选择信度较高的测试方法以确保力-时间曲线的准确性。

2.1 测试设备及其采样频率

如图1A所示,IMTP测试设备原型为加装横杆固定装置的力量训练架,通过放置在横杆下方地面的测力台收集测试过程中的垂直地面反作用力^[9]。测试架上的横杆通常由高碳钢锻造,通过插孔或液压系统可以上下调节并固定到特定高度^[12, 43],这种设计不仅可以防止在发力时由于关节角度发生改变或横杆左右滑动而产生危险,同时也可以避免动作不标准而对力-时间曲线的影响^[44, 45]。图1B为近年来衍生出的便携式测试架^[12, 46],减少了训练场地和训练环境的限制,可以随时随地进行IMTP测试。

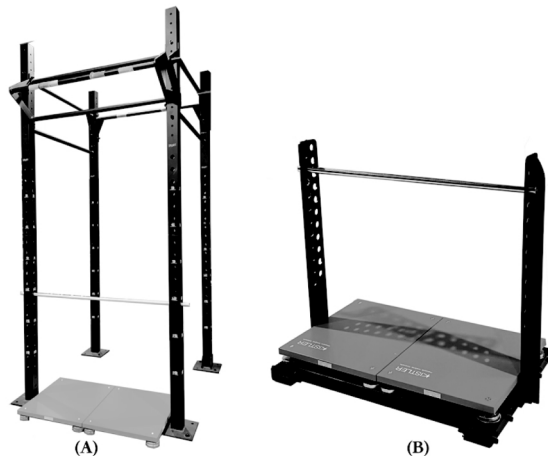


图1 常用的IMTP测试设备

Fig. 1 IMTP testing equipment

在回顾关于IMTP测试的文献时发现研究人员曾使用不同品牌的测力台,采样频率从早期的500Hz-600Hz^[3, 13, 21, 33, 41]到近年来的1000Hz-2000Hz^[14, 31, 45, 47]不等。McMaster等人^[8]建议IMTP测试的采样频率定在500Hz-2500Hz之间,而在分析发力率指标时推荐将采样频率提升至1000-2500Hz。根据Nyquist-Shannon采样定理,为了保证原始模拟信号不丢失,信号的采样频率应大于原始模拟信号最高频率的两倍,而低于此临界频率的采样频率可能会在转换到数字信号的过程中发生混叠失真,从而使原始模拟信号中所包含的重要数据和关键信息丢失^[48]。在等长测试时确定肌肉收缩起始时刻和分析力-时间曲线指标时尤其要注意采样频率,例如肌肉开始收缩后早期阶段的发力率(RFD0-100ms)与冲量(IMP0-100ms)^[44]。目前的研究一致认为500Hz-1000Hz采样频率下获得的峰值力值具有较高的信度($ICC > 0.9$, $CV < 6.4\%$),而对500Hz-2000Hz采样频率下获得的发力率的信度存在分歧。Haff等人^[14]、Beckham等人^[2]和Brady等人^[49]的研究均表明1000Hz采样频率下不同时间段的发力率具有较高的信度($ICC > 0.89$, $CV < 10\%$)。Dos' Santos等人^[47]研究了不同采样频率对IMTP测试指标的影响,首先以2000Hz的高采样频率进行了IMTP测试并分析了峰值力、特

定时间力(F100,150,200ms)、特定时间段发力率(RFD0-100, 0-150,0-200ms),随后将力学信号降频至1500Hz、1000Hz和500Hz后再次计算上述指标,结果表明IMTP测试指标在500Hz-2000Hz采样频率下均具有较高的信度($ICC=0.80-0.97$, $CV<14.2\%$),表明在IMTP测试中即便采用相对较低的采样频率(500Hz)也可以得到较为准确和可靠的峰值力、特定时间力值(F100,150,200ms)以及特定时间段发力率(RFD0-200ms)。值得注意的是,该研究报道的IMTP测试力-时间曲线早期阶段发力率(RFD0-100ms,0-150ms)在500-2000Hz采样频率下的变异系数(Coefficient of Variation, CV)均超过了可接受的范围($ICC=0.8-0.81$, $CV>18\%$)。这表明除采样频率外,早期阶段发力率还可能受基线测量、信号处理和数据分析等其他因素的影响^[47],因此需要在更为可控的环境下进一步研究不同采样频率对早期阶段(100ms以内)发力率的影响。

此外,考虑到用于诊断分析肌肉募集程度的表面肌电设备的采样频率至少为1000Hz^[50],因此使用低于1000Hz采样频率的测力台可能会影响力学信号与表面肌电信号之间的同步^[44]。尽管IMTP测试可以使用低至500Hz采样频率的测力台,但是在有条件的情况下应优先选择高于1000Hz的测力台,以便于准确测量峰值发力率^[51]、准确识别肌肉收缩起始时刻^[52,53]、精确同步力学信号与表面肌电信号以准确测量电-机械延迟等指标^[50]。

2.2 杠铃位置和身体姿势

IMTP测试的身体姿势最初由Haff和Stone等人^[9]在科学研究中所报道,该身体姿势(膝关节 $144\pm5^\circ$;髋关节 $145\pm3^\circ$)与高翻动作第二次提拉时的身体姿势相似,此时杠铃杆的加速度达到峰值^[54]。然而,随着IMTP测试在运动表现领域中越来越流行,很多研究者使用的测试方法与Haff等人^[9]的最初报道有很大差异,有些研究中所用的身体姿势无法准确代表高翻动作第二次提拉时的身体姿势^[45]。大多数研究报道的膝关节角度在 $120^\circ-135^\circ$ 之间^[2-3,11,27],但报道的髋关节角度存在很大差异,部分文献甚至未报道髋关节角度^[16,55,56]。

Comfort等人^[12]对常见的髋关节(125° 和 145°)、膝关节(120° 、 130° 、 140° 、 150°)角度以及习惯性选择的高翻第二次提拉角度(髋 $138\pm4^\circ$,膝 $133\pm3^\circ$)下的垂直地面反作用力差异进行了研究。结果表明杠铃位于大腿中上部(髌骨中点和髂嵴连线的中间位置)时无论髋、膝角度如何变化,峰值力、峰值发力率、冲量等大部分力-时间曲线指标均表现出了较高的信度($ICC>0.82$),仅在髋关节 125° 和膝关节 130° 时的冲量表现出中等程度的信度($ICC=0.73-0.74$)。上述结果提示只要确保测试用横杆位于大腿中上部,一定范围内的髋、膝角度变化并不会导致IMTP测试指标发生显著差异,该方法与Mcguigan等人^[16-17,56]和Wang等人^[18]的研究中所使用的方法一致。因此,Comfort等人^[12]建议研究人员在IMTP测试时使横杆位于大腿中上部并让受试者选择习惯发力的髋、膝角度即可,这样可以避免在横杆位置选择上耗费过多时间,从而提高测试效率。

Beckham等人^[11]的研究发现举重运动员在相同杠铃高度下进行IMTP测试时,躯干垂直姿势比前倾姿势产生的峰值力更大,这与Mcguigan等人^[55]所报道的躯干直立位置是最佳的发力姿势的结论一致。此外,与Comfort等人^[12]和Wang等

人^[18]所使用的位置相比,Beckham等人^[45]发现对于举重运动员IMTP测试来说,当膝关节固定在 125° 时,躯干直立时(此时髋关节约为 145°)产生的峰值力高于躯干前倾时(脊柱中立位时屈髋更多,约 125°)的峰值力,表明熟悉举重动作的人群可能更适合使用躯干直立姿势。Beckham等人^[45]建议膝关节角度应为 $120^\circ-135^\circ$ 、髋关节角度应为 $140^\circ-150^\circ$,这与Haff等人^[9]所描述的位置相类似。此外,Dos'Santos等人^[43]最近的研究也表明,当膝关节处于 145° 时,髋关节 145° 时的特定时间力值与发力率均高于髋关节 175° 时的特定时间力值与发力率,原因是膝关节 145° 、髋关节 175° 时会导致躯干后倾,进而影响受试者发力。事实上,在进一步查阅Dos'Santos等人^[43]的研究时发现,其参考的前人研究中^[11,20]所表述的髋关节 175° 是指躯干相对于地面垂直轴有 5° 的夹角,并非将髋关节伸展至 175° 。

虽然在IMTP测试时采用标准的膝关节和髋关节角度看似合理,但是受试者人体测量学因素的差异可能导致横杆无法位于最佳发力位置^[57],因此需要先将横位置调到合适的高翻第二次提拉高度后再测量髋、膝角度,以保证受试者膝关节微屈后躯干处于直立位置,并与Beckham等人^[45]所推荐的关节角度范围(即膝关节 $120^\circ-145^\circ$ 、髋关节 $140^\circ-150^\circ$)相一致(见图2)。同时在进行IMTP测试时还需要确保大腿始终贴住横杆,双脚开立大约与髋同宽,双手握距与高翻握距一致^[9,14,45,58],测试人员需要记录受试者的横杆高度、关节角度以及抓握位置以保证后续测试的可重复性^[57],这样可以将关节角度变化对力-时间曲线的影响降至最低^[44-45]。

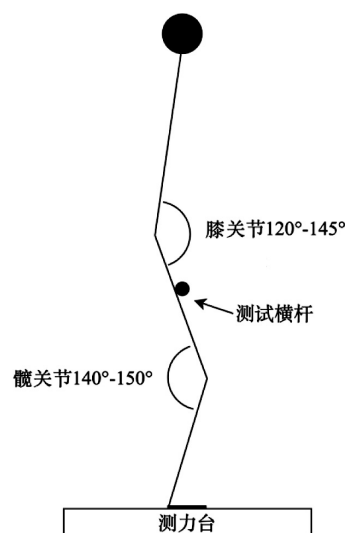


图2 IMTP测试推荐关节角度范围

Fig. 2 Recommended joint angle ranges for IMTP testing

2.3 测试前讲解、熟悉测试与热身过程

语言指令在动作学习方面发挥着重要的作用,受试者进行最大自主收缩时接收到的语言指令是神经肌肉功能评估的影响因素之一^[59]。Christ等人^[59]在研究不同人群等长发力率时使用不同的语言指令,发现使用“快速(fast)”指令所产生的发力率要高于使用“用力(hard)”指令。同样,Sahaly等人^[60]的研究证明,相较于简单提示受试者用力,给予受试者“尽可能快速用力发力(push as hard and fast as possible)”的语言指令能使其在IMTP测试中产生更高的峰值力和发力率。此外,内部与外部注意焦点指令也会产生不同的结果。Halperin等人^[61]的研究表明,使用外部注意焦点指令“尽可能快速用力蹬地(push

the ground as hard and as fast as possibly)”产生的峰值力明显高于使用内部注意焦点指令“尽可能快速用力收缩你的腿部肌肉(contract your leg muscles as hard and as fast as possible)”,提示研究者需要在受试者熟悉测试流程时给予合适的语言指令以便使其了解如何发力,进而提高正式测试的效果。

在IMTP测试前,应给予受试者时间熟悉测试流程,目前关于IMTP学习效应的研究非常有限,有研究指出受试者进行多次熟悉性练习后才能获得较为稳定的发力率和冲量等测试指标^[44]。Maffiuletti等人^[44]建议受试者在测试前24小时至少进行一次次最大强度的熟悉性练习以提高峰值力指标的信度,而在使用发力率和冲量指标评价骨骼肌功能时则需要多次熟悉性练习。

受试者在IMTP测试前应先使用自自动作进行3min—5min的动态热身,随后根据预估高翻最大力量的百分比(40%、60%、80%)进行3—5组递增负荷的动态大腿中部提拉(Dynamic Mid—thigh Pulls, DMTP)^[12]。DMTP热身后进行IMTP热身,在正式IMTP测试前应进行几次次最大程度用力的尝试(如分别以主观最大用力的50%和75%强度拉3秒,每次休息60秒)^[9, 12, 41]。若进行IMTP测试的受试者不熟悉高翻动作或没有IMTP测试经验,则建议动态热身后进行次最大用力IMTP热身^[38, 62]。

2.4 基线测量

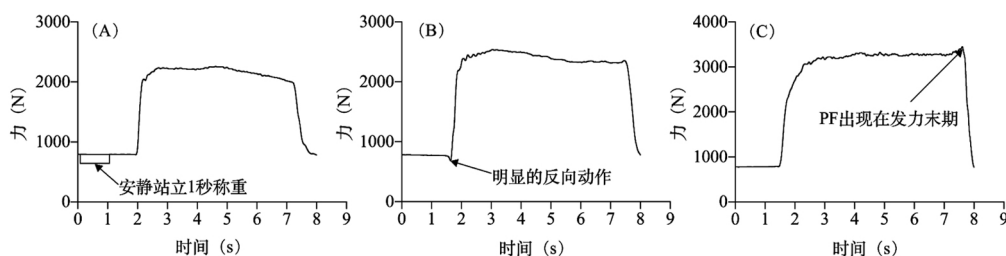


图3 IMTP测试力—时间曲线(A:稳定站立情况;B:反向动作情况;C:峰值力过晚出现情况)

Fig. 3 IMTP force—time curves (A: Stable standing; B: counter movement; C: peak force at end of pull)

2.5 信号处理

信号滤波是影响IMTP力—时间曲线指标准确性的因素之一,滤波是为了在去除噪声的同时保留尽可能多的信号^[64]。如表1所示,现有研究中报道了巴特沃斯低通滤波(Butterworth low—pass filters)等不同的滤波方法^[11, 13, 41],其所使用的截止频率(Cut—off frequency, COF)包括100Hz^[2, 11]、20Hz^[31, 65]、16Hz^[13, 41]、10Hz^[45, 66]等,还有一些研究使用了半宽为12的移动方波进行平滑滤波^[14, 34]。此外有一些文献使用了未经处理的原始信号^[37, 42, 43, 63],也有部分文献未报道是否使用滤波^[12, 18, 32],上述原因导致研究者在重复前人研究时无法使用一致的滤波方法。

Street等人^[67]报道使用截止频率为6Hz和14Hz的二阶巴特沃斯低通滤波处理反向纵跳中力—时间信号会对反向纵跳高度产生26%和31%的低估,据此建议在分析力—时间曲线时应使用未经滤波的数据。Dos'Santos等人^[68]发现与未经滤波的力—时间数据相比,使用截止频率分别为10Hz和100Hz的四阶巴特沃斯低通滤波分析IMTP测试力—时间曲线导致识别的肌肉收缩起始时刻显著提前,造成了对特定时间力值的低估。因为发力率和冲量的计算均受到IMTP测试肌肉收缩起始时刻的影响^[63],所以分析IMTP测试力—时间曲线时要尽量

Haff等人^[14]建议受试者在进行IMTP测试时使用硬拉带或举重带以免抓握力量不足或手掌打滑影响测试结果,同时应要求受试者进行最小程度的肌肉预先收缩以确保身体处于轻微紧绷状态,以避免肌肉从完全松弛状态开始收缩时可能导致的身体姿势变化及其对力—时间曲线分析的影响。Dos'Santos等人^[43]的研究表明肌肉预先收缩保持身体轻微紧绷会使地面反作用力超过人体重力,可能会影响特定时间力值与发力率的计算,Maffiuletti等人^[44]也建议在评价等长测试发力率时避免肌肉预先收缩。因此在IMTP测试时需要关注受试者身体姿势和力—时间曲线的变化,测试开始前力—时间曲线出现明显波动(变化超过50N)或明显反向动作时应重新进行测试^[63]。

当受试者静止站立达到稳定状态时,研究者应给出“3、2、1、开始”的倒计时语言指令以使受试者做好最大程度用力的准备。有研究建议倒计时前的稳定状态至少需要保持1秒(如图3A),以便于正确识别发力动作起始时刻^[63]。测试者在发出倒计时语言指令后应立刻给予运动员强烈的口头鼓励以保证其最大程度用力^[61]。在力—时间曲线无异常情况(如图3B所示的明显反向动作等)时至少应进行两次持续时间为5秒的测试,若两次测试的峰值力相差超过250N则应继续进行测试,以确保两次最佳测试的峰值力相差不超过250N,此外,如图3C所示,若峰值力出现在IMTP测试最后1至2秒时也需要重新进行测试^[3, 9]。

避免滤波和平滑^[68],在力—时间信号噪声过大影响分析时,应选用零滞后、低振幅的数字滤波器(截止频率设置为较高值的四阶巴特沃斯低通滤波器)以避免信号失真^[44]。综上所述,对IMTP测试力—时间信号进行分析时应尽量避免滤波,若在纵向研究中使用了滤波,则应明确报道滤波方式,并保证滤波方式一致以确保研究的信度。

3 IMTP测试力—时间曲线分析

IMTP测试的结果常取决于力—时间曲线中对动作的起始时刻、力值、发力率、冲量的准确分析,因此需要使用准确的分析方法以确保IMTP测试结果的准确性。

3.1 肌肉收缩起始时刻确定

IMTP测试力—时间曲线指标的计算取决于能否准确判定肌肉收缩起始时刻^[74],倒计时语言指令结束前的任何姿势改变和无关动作都可能影响肌肉收缩起始时刻的识别^[44],因此若在倒计时语言指令结束前出现预先收缩或反向动作等影响力—时间曲线稳定性的干扰时应重新进行测试^[44]。如表1所示,现有文献报道了手动识别和自动识别在内的多种识别方法确定肌肉收缩起始时刻,不同的识别方法可能会对力—时间曲线的分析产生不同的影响,肌肉收缩起始时刻的延后或提前会直接

表 1 IMTP 测试中所报道的测试和数据分析过程
Table1 Reported IMTP testing and data analysis procedures

作者	采样 频率	膝关节 角度	髌关节 角度	起始阈值	滤波处理	力值	pRFD 采样窗口	IMTP 测试指标的 ICC 与 CV
Haff 等人 1997 ^[9]	500Hz	144°±5°	145°±3°	/	/	净力	pRFD _{2ms}	ICC: PF=0.93, pRFD=0.92
Stone 等人 2003 ^[1]	500Hz	135°—145°	155°—165°	/	/	/	/	ICC: PF=0.98, pRFD=0.81
Stone 等人 2004 ^[33]	600Hz	140°—145°	躯干接近垂直	/	/	净力	pRFD _{1.7ms}	ICC: PF>0.98, pRFD>0.80
Haff 等人 2005 ^[3]	600Hz	127°—145°	/	/	/	净力	pRFD _{1.7ms}	ICC: PF=0.98, pRFD=0.81
Kawamori 等人 2006 ^[10]	500Hz	141°±10°	124°±11°	/	/	净力	pRFD _{2ms}	ICC: PF=0.97, pRFD=0.96
McGuigan 等人 2006 ^[16]	500Hz	130°	/	/	/	净力	pRFD _{2ms}	ICC: PF&RFD≥0.96
Nuzzo 等人 2008 ^[40]	1000Hz	140°	/	/	/	/	avgRFD	ICC: PF≥0.98
Kraska 等人 2009 ^[20]	1000Hz	120°—135°	170°—175°	/	/	/	/	ICC: PF=0.99, RFD=0.86, F _{50/90/250ms} ≥0.79
McGuigan 等人 2010 ^[17]	960Hz	130°	/	/	/	/	/	/
West 等人 2011 ^[31]	1000Hz	120°—130°	/	Mean+ 5SD	20Hz 二阶 巴特沃斯 低通滤波	净力	pRFD _{1ms}	ICC: PF=0.98, pRFD=0.89
Khamoui 等人 2011 ^[42]	1000Hz	127°—145°		/	未滤波	净力	/	ICC: PF&RFD=0.94
Leary 等人 2012 ^[34]	1000Hz	142°±5°	146°±11°	/	半宽为 12 的 移动方波进 行平滑滤波	/	pRFD _{10ms}	ICC: PF≥0.98, RFD≥0.81
Beckham 等人 2013 ^[2]	1000Hz	125°—135°	约 175°	/	100Hz 四阶 巴特沃斯低 通滤波	净力	pRFD _{5ms}	ICC: PF=0.94, F _{100/150/200/250ms} ≥0.84, RFD _{0—100/150/200/250ms} ≥0.86, pRFD _{5ms} = 0.97
Beckham 等人 2014 ^[69]	1000Hz	125°±5°	/	/	10Hz 巴特 沃斯低通 滤波	/	/	ICC: PF=0.98, RFD _{0—200ms} =0.90, PF _{Allo} =0.97, F _{200ms} =0.94, IMP _{200ms} = 0.93; CV: PF=4.1%, RFD _{0—200ms} =16. 9%, PF _{Allo} =4.1%, F _{200ms} =9.4%, IMP _{200ms} =8.4%
Secomb 等人 2015 ^[21]	600Hz	125°—140°	/	/	/	净力	/	ICC: PF=0.98
Thomas 等人 2015 ^[13]	600Hz	自选		/	16Hz 四阶 巴特沃斯低 通滤波	净力	/	ICC: PF=0.96, pRFD=0.93, IMP _{100/300ms} ≥0.96; CV: PF=4.3%, pRFD=11.1%, IMP _{100/300ms} ≤3.2%
Spiteri 等人 2015 ^[70]	2000Hz	140°	140°	/	/	/	/	/
Thomas 等人 2015 ^[41]	600Hz	自选		/	16Hz 四阶 巴特沃斯低 通滤波	净力	pRFD _{1.7ms}	ICC: PF=0.97, pRFD=0.81, IMP _{100/200/300ms} ≥0.86; CV: PF=4.2%, pRFD=15.1%, IMP _{100/200/300ms} ≤7.1%
Dos' Santos 等人 2015 ^[47]	500Hz 1000Hz 1500Hz 2000Hz	/	/	75N	/	/	avgRFD	ICC: PF≥0.97, F _{100/150/200ms} ≥0.8, RFD _{0—100/150/200ms} ≥0.81; CV: PF≤3.2%, F _{100/150/200ms} ≤10.1%, RFD _{0—100/150/200ms} ≤23.9%;

续表 1

作者	采样频率	膝关节角度	髋关节角度	起始阈值	滤波处理	力值	pRFD 采样窗口	IMTP 测试指标的 ICC 与 CV
Haff 等人 2015 ^[14]	1000Hz	137.6°±12.9°	140°±6.6°	/	半宽为 12 的 移动方波进 行平滑滤波	/	pRFD _{2.5,10,20,30,50ms}	ICC: PF≥0.99, F _{30/50/90/100/150/200/250ms} ≥0.99, avgRFD<0.7, RFD _{0-30/50/90/100/150/200/250ms} >0.99 pRFD _{2.5,10,30,50ms} <0.8, pRFD _{20ms} >0.9; CV:PF<1.7%, F _{30/50/90/100/150/200/250ms} ≤2.7%, avgRFD>20%, RFD _{0-30/50/90/100/150/200/250ms} ≤10%, pRFD _{2.5,10,30,50ms} >15%, pRFD _{20ms} <15%
Comfort 等人 2015 ^[12]	600Hz	120°、130°、 140°、150°、 133°±3°	125°、145°、 138°±4°	/	/	/	/	组内 ICC: PF ≥ 0.98, pRFD ≥ 0.85, IMP _{100/200/300ms} ≥0.87(除膝关节 130°、髋 关节 125° IMP _{100/200/300ms} <0.8); 组间 ICC: PF ≥ 0.98, pRFD ≥ 0.8, IMP _{100/200/300ms} ≥0.82
Halperin 等人 2015 ^[61]	1000Hz	130°—145°	/	/	/	/	/	/
Wang 等人 2016 ^[18]	1000Hz	自选	/	/	/	净力	pRFD _{20ms}	/
De Witt 等人 2016 ^[71]	1000Hz	144°±3°	137°±3°	/	/	/	pRFD _{20ms}	ICC: PF _{相同测试者} =0.97, PF _{不同测试者} =0.89, F _{250ms} =0.80
Thomas 等人 2016 ^[23]	600Hz	自选	/	/	16Hz 四阶 巴特沃斯低 通滤波	/	/	ICC: PF=0.9, PF _R =0.92, PF _L =0.95; CV: PF=6.4%, PF _R =6.1%, PF _L =4.5%
Dos' Santos 等人 2016 ^[63]	1000Hz	/	/	BW _{5SD} 、 BW _{2.5%/5%} /10%、75N	/	/	/	ICC: PF≥0.97, F _{100/150/200ms} >0.79; CV: PF≤3.3%, F _{100/150/200ms} ≤9.4%
Thomas 等人 2017 ^[24]	600Hz	自选	/	/	/	/	/	ICC: PF=0.91; CV: PF=5.3%
Townsend 等人 2017 ^[19]	1000Hz	自选	自选	/	/	净力	/	/
Dos' Santos 等人 2017 ^[46]	1000Hz	135°—145°	140°—150°	/	/	净力	/	ICC: PF=0.99, F _{100/150/200/250ms} ≥0.96; CV: PF=3.7%, F _{100/150/200/250ms} ≤8%
Dos' Santos 等人 2017 ^[43]	1000Hz	145°	145°、175°	Mean+ 5SD	/	净力	/	ICC: PF≥0.99, F _{100/150/200ms} >0.83, RFD _{100/150/200ms} ≥0.86; CV: PF≤2.8%, F _{100/150/200ms} <6.2%, RFD _{100/150/200ms} <18.1%
Brady 等人 2017 ^[62]	1000Hz	136°±3°	137°±2°	Mean+ 5SD	/	净力	/	/
Hornsby 等人 2017 ^[7]	1000Hz	125°±5°	145°	/	/	/	/	/
Dos' Santos 等人 2018 ^[37]	1000Hz	137°—146°	140°—149°	40N	/	/	/	ICC: PF≥0.97, F _{30/50/90//100150/200/250ms} >0.84; CV: PF<4.3%, F _{30/50/90//100150/200/250ms} ≤10%
Dos' Santos 等人 2018 ^[68]	1000Hz	/	145°	Mean+ 5SD	10/100Hz 四阶巴特沃 斯低通滤波	/	/	/
Beckham 等人 2018 ^[45]	1000Hz	125°	125°、145°	/	10Hz 二阶 巴特沃斯低 通滤波	/	/	/

续表 1

作者	采样频率	膝关节角度	髋关节角度	起始阈值	滤波处理	力值	pRFD 采样窗口	IMTP 测试指标的 ICC 与 CV
Guppy 等人 2018 ^[72]	1000Hz	145°、120°	120°、125°、 145°	Mean+ 5SD	/	/	pRFD _{20ms}	ICC: PF≥0.9, F _{50/90/150/200/250ms} >0.8, pRFD _{20ms} >0.7; CV: PF≤5%, F _{50/90/150/200/250ms} <15%, pRFD _{20ms} >15%
Guppy 等人 2018 ^[73]	1000Hz	125°±5°	145°±5°	/	10Hz 四阶 巴特沃斯低 通滤波	/	/	ICC: PF≥0.95, F _{50/90/150/200/250ms} >0.9, pRFD _{20ms} >0.8; CV: PF≤5%, F _{50/90/150/200/250ms} <15%, pRFD _{20ms} <20%
Brady 等人 2019 ^[49]	1000Hz	141°±4°	138°±2°	Mean+ 5SD	/	净力	/	ICC: PF=0.98, RPF=0.98, F _{100/150/200ms} ≥0.92, RFD _{0-150/200ms} ≥0.92, IMP _{0-200ms} =0.96; CV: PF=4.7%, RPF=4.7%, F _{100/150/200ms} ≤9.1%, RFD _{0-150/200ms} ≤8.8%, IMP _{0-200ms} =6.1%

注: ICC: 组内相关系数; CV: 变异系数; /: 未提及; pRFD: 峰值发力率; avgRFD: 平均发力率; Mean: 平均值; SD: 标准差; PF: 峰值力; pRFD: 峰值发力率; RFD_{30/50/100/150/200/250/0-200ms/0-250ms}: 50/100/150/200/250/0-200ms/0-250ms 发力率; F_{30/50/90/100/150/250ms}: 50/90/100/150/250ms 处力; avgRFD: 平均发力率; IMP_{100/200/300/0-200ms}: 100/200/300/0-200ms 冲量。

导致发力率等力一时间曲线指标产生高估或低估^[44, 75-77]。

肌肉收缩起始时刻的确定常见于分析垂直纵跳力一时间曲线的研究中^[74], 这些研究使用的判定阈值包括特定力值^[78]、体重的相对值^[75]、力值增加幅度超过称重时体重波动标准差的 5 倍^[31, 79]。Eagles 等人^[74]比较了前人研究中使用不同起始时刻判定阈值测得的垂直纵跳动力学和运动学指标, 推荐使用力值增加幅度超过称重期体重波动标准差的 5 倍作为识别垂直纵跳起始时刻的标准^[79]。最近, Dos' Santos 等人^[63]比较了包括力值增加幅度超过称重期体重波动标准差的 5 倍 (BW5SD)^[31, 79]、超过体重的百分比 (2.5%、5%、10%, BW 2.5%, 5%, 10%)^[75]、超过体重 75N (BW75N)^[47] 三种起始时刻判定阈值对 IMTP 测试力一时间曲线指标的影响, 结果表明 BW5SD 因排除了称重期力学信号的噪声影响而能够较为准确地确定特定时间力值和发力率, 且具有较高的信度^[63]。因此, 进行 IMTP 测试时推荐使用 BW5SD 确定肌肉收缩的起始时刻以便测试指标的横向与纵向对比^[63]。需要注意的是, 无论使用手动识别或自动识别, 最重要的是确保倒计时语言指令前身体姿态稳定且无明显反向动作。

3.2 力值计算

IMTP 测试最常用的指标是峰值力, 即力一时间曲线中的最高值 (如图 4A 所示)。峰值力可反映受试者的最大力生成能力, IMTP 测试峰值力与深蹲 ($r=0.87-0.97$)^[16-18]、垂直纵跳 ($r=0.36-0.82$)^[10, 17, 19-21, 33]、冲刺时间 ($r=-0.37-0.67$)^[13, 31, 49]、变向时间 ($r=-0.57$)^[13] 等运动表现之间具有较强的相关关系。此外, 峰值力还具有较高的信度 (ICC = 0.97-0.99, CV = 1.7-3.7)^[14, 37, 46]。运动员产生的峰值力直接决定了其冲刺、跳跃和变向等能力^[13, 31], 因此可用峰值力代替下肢深蹲最大重量 (1RM) 测试评估运动员的运动表现。

在描述 IMTP 测试峰值力时需要注意净力 (net force) 和毛力 (gross force) 的区别, Haff 等人^[9]最早进行的 IMTP 测试研究中使用的峰值力为净力, 即实际测得的峰值力减去受试者体重的重力。然而, 有很多 IMTP 测试研究并未报道使用的是净力还是包含体重重力在内的毛力^[1, 16, 33], 也有部分研究直接使

用了包含体重的毛力^[2] (如表 1 所示)。因此研究人员在报道 IMTP 测试峰值力时应阐明是否考虑了受试者体重的影响。

一般而言, 运动员体重越大则绝对力量越高^[80], 因此在不同运动员或不同人群之间进行峰值力比较时需要考虑体重和体型的影响。通常会根据运动员的身体形态进行标准化处理。最常见的标准化处理方法是用力值除以体重得到相对峰值力, 但需要注意的是这种相对比例调整法 (Ratio Scaling, RS) 假设体重大小与测量指标增长之间存在线性相关关系^[81]; 另一种标准化处理方法是异速比例调整法 (Allometric Scaling, AS), 该方法遵循几何对称理论, 认为测量指标随着体重的 2/3 次方的增加而增加^[82]。虽然使用上述标准化方法处理 IMTP 峰值力都有其局限性^[80, 81], 但考虑到力量增长速率总是慢于体重增长速率^[83], 因此异速比例调整法比相对值调整法更适用于力量和爆发力指标的标准化处理^[44, 84]。

特定时间力作为 IMTP 测试的另一个常用指标, 对于需要在有限时间 (例如 100ms 或 200ms) 内完成关键技术动作的运动员至关重要 (如表 2 所示和图 4B 所示)。特定时间力值具有较高的信度 (ICC > 0.92, CV < 8.0%)^[14, 46], 其中 100ms、150ms、200ms、250ms 时的力值与深蹲 1RM ($r=0.76-0.82$)^[66]、垂直纵跳 ($r=0.42-0.43$)^[20, 46]、高翻 1RM ($r=0.57-0.66$)^[46] 之间呈中度至高度相关关系, 表明特定时间力也可以用于评价运动员的运动表现。

3.3 发力率

对于大多数运动项目来说, 运动员快速产生力的能力 (即发力率) 比产生最大力的能力更重要, 发力率是指肌肉从安静状态下开始的快速自主收缩提高力或力矩时所记录的力一时间曲线的斜率, 可以通过力的变化 (ΔF) 除以时间的变化 (Δt) 计算得出 (即 $RFD = \Delta F / \Delta t$)^[14]。发力率是神经肌肉系统激活的速率, 常用于描述运动员的爆发力, 对于高水平精英运动员来说, 发力率在爆发式动作中具有重要作用^[1, 85]。此外, 发力率对于诊断神经肌肉功能的急性和长期变化以及监控干预训练效果都十分敏感^[44, 86]。

表2 IMTP测试力—时间曲线分析中常用的力变量

Table2 Commonly quantified force variables during analysis of the IMTP force—time curve

力学特征		缩写	单位	计算方法
峰值力		PF	N	净力—时间曲线的最大值
峰值力	相对于体重的峰值力	RPF	N/kg	PF/体重
	按身体形态学标准化的峰值力	PF _a	N/kg ^{0.67}	PF/体重的0.67次方
	N ms 力	F _N	N	N ms 处净力
特定时间力	N ms 力, 相对于体重	RF _N	N/kg	N ms 处净力/体重
	N ms 力, 按身体形态学标准化	F _{Na}	N/kg ^{0.67}	N ms 处净力/体重的0.67次方

注: N 为特定时间力, 常为 50/100/150/200/250ms。

平均发力率(average RFD, avgRFD)指力—时间曲线中从起点上升到峰值力的斜率(即 $\text{avgRFD} = \text{PF}/\text{达到 PF 的时间}$)^[14], 但由于在不同时间段测试时达到峰值力的时间不一致, 因此该指标常表现出较低的信度 ($\text{ICC} > 0.74$, $\text{CV} > 10\%$)^[14, 42]。峰值发力率(peak RFD, pRFD)指力—时间曲线中力值升高速率最快的点, 需要通过平均平滑进行计算。目前相关研究中选择的平均平滑的采样窗口存在差异, 常用的采样窗口为 1ms^[2, 31]、1.7ms^[3, 12, 13, 33, 41]、2ms^[9, 10, 16]、5ms^[2]、20ms^[18, 60]等, 也有一些研究并未报道使用何种采样窗口^[17, 20, 56](如表1所示)。现有研究使用该方法分析力—时间曲线得到的结果也不一致, 一些研究表明峰值发力率与运动表现之间具有明显的相关关系^[3, 9, 13, 18, 20, 31], 但也有一些研究认为峰值发力率与深蹲 1RM^[2, 16, 17, 56]、垂直纵跳^[40-42]等运动表现之间的相关性较低, 这种差异可能是由于不同的采样窗口导致的。Haff 等人^[14]比较了不同采样窗口(2ms、5ms、10ms、20ms、30ms、50ms)下的峰值发力率, 发现 20ms 采样窗口 ($\text{ICC} = 0.9$, $\text{CV} < 15\%$) 相比于其他的采样窗口 ($\text{ICC} > 0.77$, $\text{CV} > 15\%$) 具有较高的信度, 但需要注意其 CV 超过了可接受的范围 ($> 15\%$)。因此在使用不同采样窗口下的峰值发力率作为运动表现诊断工具时需要谨慎, 应确保所使用的采样窗口处于可接受的信度范围之内, 且在纵向研究前后应使用一致的采样窗口以保证测试的信度。Haff 等人^[14]的研究还表明特定时间段(如 0—30ms、0—50ms、0—90ms、0—100ms、0—150ms、0—

200ms 和 0—250ms 等)的发力率具有较高的信度 ($\text{ICC} > 0.9$, $\text{CV} < 5\%$), 且特定时间段的发力率与深蹲 1RM ($r = 0.6 - 0.74$)^[18]、举重 ($r = 0.65 - 0.78$)^[2]、短跑冲刺 ($r = 0.55$)^[49] 等运动表现之间具有较高的相关性。与之相反, 也有一些研究报道了不同时间段发力率与动态表现之间相关性较低甚至缺乏相关性^[19, 41], 产生这种分歧的原因可能在于采集和分析 IMTP 测试力—时间曲线时所使用的方法学差异。因此, 当使用发力率作为运动表现诊断工具来描述运动员发力能力时, 应选用具有较高信效度的测试方法以及发力率指标, 表3和图4B为IMTP测试力—时间曲线分析中常用的发力率指标。

3.4 冲量

冲量(Impulse, IMP, 即力乘以时间或力—时间曲线包络的面积), 在运动表现评价中是一个非常重要的指标^[62], 因为冲量决定了动量的变化(即 $F_{\Delta t} = m \cdot \Delta v$, 其中 F 为力, t 为时间, m 为质量, v 为速度)(如图4B阴影部分所示)。在体重不变的情况下, 特定时间内的冲量越大, 运动员所能获得的动作速度就越大^[13, 49]。教练员和科研人员可以通过运动员在等长测试中所产生的作用力及其作用时间了解其加速能力。特定的冲量既可以在短时间高力值条件下, 也可以在长时间低力值条件下获得。例如在短跑等动作时间限制较高的项目中, 运动员应该通过在更短的时间内施加更高的力而产生更大的冲量, 而在投掷等动作时间限制较低的项目中, 运动员应该充分利用动作时间以增加冲量。

表3 IMTP测试力—时间曲线分析中常用的发力率指标

Table3 Commonly quantified RFD variables during analysis of the IMTP force—time curve

发力率特征		缩写	单位	计算方法
发力率	发力率	RFD	N/s	$\Delta \text{力} / \Delta \text{时间}$
	平均发力率	avgRFD	N/s	PF/从发力起点到 PF 的时间
	峰值发力率	pRFD	N/s	力—时间曲线函数一阶导数最大值
	0—50ms 发力率	RFD _{0-50ms}	N/s	$F_{50ms} / 0.05s$
	0—100ms 发力率	RFD _{0-100ms}	N/s	$F_{100ms} / 0.1s$
	0—150ms 发力率	RFD _{0-150ms}	N/s	$F_{150ms} / 0.15s$
特定时间发力率	0—200ms 发力率	RFD _{0-200ms}	N/s	$F_{200ms} / 0.2s$
	0—250ms 发力率	RFD _{0-250ms}	N/s	$F_{250ms} / 0.25s$
	50—100ms 发力率	RFD _{50-100ms}	N/s	$(F_{100ms} - F_{50ms}) / 0.05s$
	100—200ms 发力率	RFD _{100-200ms}	N/s	$(F_{200ms} - F_{100ms}) / 0.1s$
	200—250ms 发力率	RFD _{200-250ms}	N/s	$(F_{250ms} - F_{200ms}) / 0.05s$

注: 在 0—50/100/150/200/250 ms 发力率中, 由于使用的是净力, 因此 $F_0 = 0$ 。

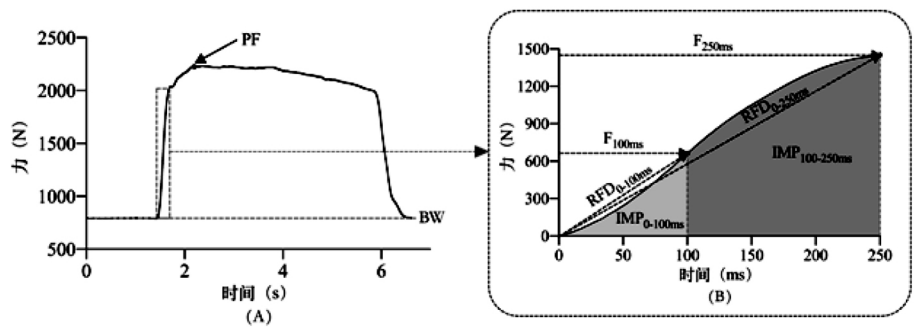


图 4 IMTP 测试力—时间曲线及部分变量

Fig. 4 Commonly quantified variables during analysis of the IMTP force—time curve

注:图 4A 为完整的力—时间曲线,PF 指峰值力,BW 指体重;图 4B 为动作开始后 0—250ms 的净力—时间曲线,其中虚线部分的 RFD0—100/250ms 是指 0—100ms、0—250ms 的发力率,力—时间曲线中 F100, 250ms 指 100ms、250ms 时的力值输出,力—时间曲线下的阴影面积代表冲量,即特定时间段内力的累积,IMP0—100ms,100—250ms 指 0—100ms、100—250ms 内的冲量。

在单关节等长测试的研究中,冲量与发力率的信度相似,即在发力早期(0—50ms)信度较低(ICC=0.80—0.77, CV=16.6%—18.7%),而在 0—100ms(ICC=0.90—0.82, CV=6.8%—9.8%)和 100—150ms(ICC=0.62—0.77, CV=10.5%—8.4%)阶段信度相对较高^[87]。对于 IMTP 测试来说,50ms 以内阶段冲量信度较低的原因可能在于电—机械延迟^[88],即肌肉收缩与力量产生之间存在时间差。Folland 等人^[88]对比了股四头肌自主等长收缩和电刺激诱发等长收缩,结果表明早期发力率(RFD_{0-50ms})在自主等长收缩时变异性较高(CV=48%),而在诱发等长收缩时变异性相对较低(CV=19%

—22%)。Guppy 等人^[73]的研究报道 IMTP 测试中不同关节角度下测得的不同时间段的冲量均具有较高的信度(ICC=0.89—0.97, CV=4.3%—8.70%)。此外,Thomas 等人^[13, 41]、Brady 等人^[49]的研究表明不同时间段的冲量与冲刺时间(r=—0.58——0.75)、纵跳(r=0.49—0.63)、变向时间(r=—0.58——0.62)等动态运动表现之间具有较高的相关性。因此,通过分析 IMTP 测试力—时间曲线得到的冲量也能够提供有用的信息,但是目前对于冲量的研究较少,还需要进一步研究才能确定如何更好地在运动表现监控和评价中使用该指标,表 4 为 IMTP 测试力—时间曲线分析中常用的冲量指标。

表 4 IMTP 测试力—时间曲线分析中常用的冲量指标

Table4 Commonly quantified impulse variables during analysis of the IMTP force—time curve

冲量特征	缩写	单位	计算公式
0—50ms 冲量	IMP _{50ms}	N·s	$\sum F_{0-50ms} \times 50ms$
0—100ms 冲量	IMP _{100ms}	N·s	$\sum F_{0-100ms} \times 100ms$
0—200ms 冲量	IMP _{200ms}	N·s	$\sum F_{0-200ms} \times 200ms$
特定时间冲量	0—300ms 冲量	IMP _{300ms}	$\sum F_{0-300ms} \times 300ms$
	50—100ms 冲量	IMP _{50-100ms}	$\sum F_{50-100ms} \times 50ms$
	100—200ms 冲量	IMP _{100-200ms}	$\sum F_{100-200ms} \times 100ms$
	200—300ms 冲量	IMP _{200-300ms}	$\sum F_{200-300ms} \times 100ms$

4 总结与展望

等长大腿中部拉测试可以有效评价运动员下肢神经肌肉功能且具有较高的信度,其中峰值力、发力率、冲量等指标与下肢力量、爆发力、冲刺和变向等动态运动表现之间具有较高的相关性。然而,IMTP 测试指标受到测试过程中测试设备、身体姿势、基线测量、信号处理以及力—时间曲线分析等方法学因素的影响。因此,在进行 IMTP 测试时应选择信效度较高的测试方法,并在研究中报道所使用的具体方法以确保后续研究的可重复性。推荐:1.在做一般的测试评估时可选用≥500Hz 的测力台;2.测试时站立姿势确保与高翻二拉位置相一致并保持躯干直立(此时膝关节 120°—145°、髋关节 140°—150°);3.测试前应给予受试者充分的讲解与熟悉性测试;4.基线测量时应保证至少 1 秒的稳定站立且在动作开始时避免反向动作,测试结束后若力—时间曲线有异常情况则应重新进行测试;5.尽量避免对力—时间曲线信号进行滤波,如若因信号噪声过大影响后续分析则应报道滤波方式;6.肌肉收缩起始阈值的确定常使用

力值增加幅度超过称重期体重波动标准差的 5 倍来确定;7.峰值力为 IMTP 测试力—时间曲线中净力的最高值;8.峰值发力率应使用 20ms 采样窗口进行平均平滑。此外,对于一些具有争议的方法学因素仍需进一步研究加以证实,如语言提示、基线测量时的肌肉激活特征、反向动作时的肌肉激活特征、采用更准确的测试方法时的采样窗口分析等,为更准确地评估与监控运动员并提高其运动成绩奠定基础。

参考文献:

[1] Stone M, Sanborn K, O’ Bryant H, et al. Maximum Strength—Power—Performance Relationships in Collegiate Throwers [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2003, 17(4): 739—745.

[2] Beckham G, Mizuguchi S, Carter C, et al. Relationships of isometric mid—thigh pull variables to weightlifting performance [J]. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 2013, 53(5): 573—581.

- [3] Haff G G, CARLOCK J M, HARTMAN M J, et al. Force—time curve characteristics of dynamic and isometric muscle actions of elite women olympic weightlifters [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2005, 19(4): 741—748.
- [4] Appleby B, Newton R U, Cormie P. Changes in strength over a 2—year period in professional rugby union players [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2012, 26(9): 2538—2546.
- [5] Loturco I, Pereira L A, Abad C C C, et al. Using the bar—velocity to predict the maximum dynamic strength in the half—squat exercise [J]. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 2016, 11(5): 697—700.
- [6] Buckner S L, Jessee M B, Mattocks K T, et al. Determining Strength: A Case for Multiple Methods of Measurement [J]. *Sports Medicine*, 2017, 47(2): 193—195.
- [7] Hornsby W G, Gentles J, Macdonald C, et al. Maximum Strength, Rate of Force Development, Jump Height, and Peak Power Alterations in Weightlifters across Five Months of Training [J]. *Sports*, 2017, 5(4): 78.
- [8] McMaster D T, Gill N, Cronin J, et al. A Brief Review of Strength and Ballistic Assessment Methodologies in Sport [J]. *Sports Medicine*, 2014, 44(5): 603—623.
- [9] Haff G, Stone M, O'Bryant H, et al. Force—Time Dependent Characteristics of Dynamic and Isometric Muscle Actions [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 1997, 11(4): 269—272.
- [10] Kawamori N, Rossi S J, Justice B D, et al. Peak force and rate of force development during isometric and dynamic mid—thigh clean pulls performed at various intensities [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2006, 20(3): 483—491.
- [11] Beckham G, Lamont H, Sato K, et al. Isometric Strength of Powerlifters in Key Position of the Conventional Deadlift [J]. *Journal of Trainology*, 2012, 1(2): 32—35.
- [12] Comfort P, Jones P A, McMahon J J, et al. Effect of knee and trunk angle on kinetic variables during the isometric midthigh pull; test—retest reliability [J]. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 2015, 10(1): 58—63.
- [13] Thomas C, Comfort P, Chiang C—Y, et al. Relationship between isometric mid—thigh pull variables and sprint and change of direction performance in collegiate athletes [J]. *Journal of Trainology*, 2015, 4(1): 6—10.
- [14] Haff G G, Ruben R P, Lider J, et al. A Comparison of Methods for Determining the Rate of Force Development During Isometric Midthigh Clean Pulls [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2015, 29(2): 386—395.
- [15] Stone M H, Moir G, Glaister M, et al. How much strength is necessary?—Physical Therapy in Sport [J]. *Physical Therapy in Sport*, 2002, 3(2): 88—96.
- [16] McGuigan M, Winchester J, Erickson T. The Importance Of Isometric Maximum Strength In College Wrestlers [J]. *Journal of Sports Science & Medicine*, 2006, 5(CS—SD): 108—113.
- [17] McGuigan M R, Newton M J, Winchester J B, et al. Relationship between isometric and dynamic strength in recreationally trained men [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2010, 24(9): 2570—2573.
- [18] Wang R, Hoffman J R, Tanigawa S, et al. Isometric Mid—Thigh Pull Correlates With Strength, Sprint, and Agility Performance in Collegiate Rugby Union Players [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2016, 30(11): 3051—3056.
- [19] Townsend J R, Bender D, Vantrease W, et al. Isometric Mid—Thigh Pull Performance Is Associated With Athletic Performance And Sprinting Kinetics In Division I Men And Women ' s Basketball Players [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2017, 33(10): 2665—2673.
- [20] Kraska J M, Ramsey M W, Haff G G, et al. Relationship between strength characteristics and unweighted and weighted vertical jump height [J]. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 2009, 4(4): 461—473.
- [21] Secomb J L, Lundgren L E, Farley O R L, et al. Relationships Between Lower—Body Muscle Structure and Lower—Body Strength, Power, and Muscle—Tendon Complex Stiffness [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2015, 29(8): 2221—2228.
- [22] Spiteri T, Nimphius S, Hart N, et al. Contribution of strength characteristics to change of direction and agility performance in female basketball athletes [J]. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 2014, 28(9): 2415—2423.
- [23] Thomas C, Dos'Santos T, Comfort P, et al. Relationship between Isometric Strength, Sprint, and Change of Direction Speed in Male Academy Cricketers [J]. *Journal of Trainology*, 2016, 5(2): 18—23.
- [24] Thomas C, Comfort P, Jones P A, et al. A Comparison of Isometric Mid—Thigh Pull Strength, Vertical Jump, Sprint Speed, and Change of Direction Speed in Academy Netball Players [J]. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 2017, 12(1): 916—921.
- [25] Comfort P, McMahon J J. Reliability of Maximal Back Squat and Power Clean Performances in Inexperienced Athletes [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2014, 29(11): 3089—3096.
- [26] McGuigan M, Cormack S, Gill N. Strength and Power Profiling of Athletes; Selecting Tests and How to Use the Information for Program Design [J]. *Strength and Conditioning Journal*, 2013, 35(6): 7—14.
- [27] Hornsby G, Haff G, Sands W, et al. Alterations in strength characteristics for isometric and dynamic mid—thigh pulls in collegiate throwers across 11 weeks of train-

- ing [J]. *Gazzetta Medica Italiana*, 2013, 172(1): 929—940.
- [28] Suarez D, Mizuguchi, Hornsby G, et al. Phase—Specific Changes in Rate of Force Development and Muscle Morphology Throughout a Block Periodized Training Cycle in Weightlifters [J]. *Sports*, 2019, 7(1): 129.
- [29] Hughes S, Chapman D W, Haff G G, et al. The use of a functional test battery as a non— invasive method of fatigue assessment [J]. *PloS One*, 2019, 14(2): e0212870.
- [30] Travis S, Jacob G, George B, et al. Identifying a Test to Monitor Weightlifting Performance in Competitive Male and Female Weightlifters [J]. *Sports*, 2018, 6(1): 46.
- [31] West D J, Owen N J, Jones M R, et al. Relationships Between Force— Time Characteristics of the Isometric Midthigh Pull and Dynamic Performance in Professional Rugby League Players [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2011, 25(11): 3070—3075.
- [32] Dobbin N, Hunwicks R, Jones B, et al. Criterion and Construct Validity of an Isometric Mid— Thigh Pull Dynamometer for Assessing Whole Body Strength in Professional Rugby League Players [J]. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 2017, 13(2): 1—19.
- [33] Stone M, Sands W, Carlock J, et al. The Importance of Isometric Maximum Strength and Peak Rate— of— Force Development in Sprint Cycling [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2004, 18(4): 878—884.
- [34] Leary B K, Statler J, Hopkins B, et al. The Relationship Between Isometric Force—time Curve Characteristics and Club Head Speed in Recreational Golfers [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2012, 26(10): 2685—2697.
- [35] Wells J, Charalambous L, Mitchell A, et al. Relationships between Challenge Tour golfers' clubhead velocity and force producing capabilities during a countermovement jump and isometric mid— thigh pull [J]. *Journal of Sports Sciences*, 2018, 37(12): 1381—1386.
- [36] James L, Beckman E, Kelly V, et al. The Neuromuscular Qualities of Higher and Lower— Level Mixed Martial Arts Competitors [J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2016, 12(5): 612—620.
- [37] Dos'Santos T, Thomas C, Comfort P, et al. Between— Session Reliability Of Isometric Mid— Thigh Pull Kinetics And Maximal Power Clean Performance In Male Youth Soccer Players [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2018, 32(12): 3364—3372.
- [38] Brownlee T E, Murtagh C F, Naughton R J, et al. Isometric maximal voluntary force evaluated using an isometric mid— thigh pull differentiates English Premier League youth soccer players from a maturity— matched control group [J]. *Science and Medicine in Football*, 2018, 2(3): 209—215.
- [39] Gescheit D T, Cormack S J, Reid M, et al. Consecutive days of prolonged tennis match play: performance, physical, and perceptual responses in trained players [J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2015, 22(1): 913—920.
- [40] Nuzzo J L, McBride J M, Cormie P, et al. Relationship between countermovement jump performance and multi-joint isometric and dynamic tests of strength [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2008, 22(3): 699—707.
- [41] Thomas C, Jones P, Rothwell J, et al. An Investigation Into the Relationship Between Maximum Isometric Strength and Vertical Jump Performance [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2015, 29(8): 2176—2185.
- [42] Khamoui A V, Brown L E, Nguyen D, et al. Relationship between force—time and velocity—time characteristics of dynamic and isometric muscle actions [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2011, 25(1): 198—204.
- [43] Dos Santos T, Thomas C, Jones P A, et al. The Effect of Hip Joint Angle on Isometric Midthigh Pull Kinetics [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2017, 31(10): 2748—2757.
- [44] Maffiuletti N A, Aagaard P, Blazevich A J, et al. Rate of force development: physiological and methodological considerations [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2016, 116(6): 1091—1116.
- [45] Beckham G K, Sato K, Mizuguchi S, et al. Effect of Body Position on Force Production During the Isometric Mid— Thigh Pull [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2018, 32(1): 48—56.
- [46] Dos'Santos T, Thomas C, Comfort P, et al. Relationships between Isometric Force— Time Characteristics and Dynamic Performance [J]. *Sports*, 2017, 5(3): 68.
- [47] Dos'Santos T, Jones P A, Kelly J, et al. Effect of Sampling Frequency on Isometric Mid— Thigh Pull Kinetics [J]. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 2015, 11(2): 255—260.
- [48] Nyquist, H. Certain topics in telegraph transmission theory [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1928, 90(2): 280—305.
- [49] Brady C, Harrison A, Flanagan E, et al. The Relationship Between Isometric Strength and Sprint Acceleration in Sprinters [J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2019, 15(5): 38—45.
- [50] Konrad P. The ABC of EMG: A Practical Introduction to Kinesiological Electromyography [J]. 2005:1—60.
- [51] Ruiter C J D, Jones D A, Sargeant A J, et al. Temperature Effect on the Rates of Isometric Force Development and Relaxation in the Fresh and Fatigued Human Adductor Pollicis Muscle [J]. *Experimental Physiology*, 1999, 84(6): 1137—1150.
- [52] Thompson B J, Ryan E D, Herda T J, et al. Consistency of rapid muscle force characteristics; Influence of muscle contraction onset detection methodology [J]. *Journal of*

- Electromyography and Kinesiology, 2012, 22(6): 893—900.
- [53] Tillin N A, Jimenez-Reyes P, Pain M T, et al. Neuromuscular performance of explosive power athletes versus untrained individuals [J]. Med Sci Sports Exerc, 2010, 42(4): 781—790.
- [54] HAKKINEN K, H K, Pv K. Biomechanical changes in the olympic weightlifting technique of the snatch and clean & jerk from submaximal to maximal loads [J]. Scandinavian Journal of Sports Sciences, 1984, 6(1): 57—66.
- [55] McGuigan M, Newton M, Winchester J. Use of isometric testing in soccer players [J]. Journal of Australian Strength & Conditioning, 2008, 16(1): 11—14.
- [56] McGuigan M, Winchester J. The Relationship Between Isometric and Dynamic Strength in College Football Players [J]. Journal of Sports Science & Medicine, 2008, 7(1): 101—105.
- [57] Comfort P, Dos'Santos T, Beckham G K, et al. Standardization and Methodological Considerations for the Isometric Midthigh Pull [J]. Strength and Conditioning Journal, 2018, 41(2): 57—79.
- [58] Deweese B H, Serrano A J, Scruggs S K, et al. The Midthigh Pull; Proper Application and Progressions of a Weightlifting Movement Derivative [J]. Strength and Conditioning Journal, 2013, 35(6): 54—58.
- [59] Christ C B, Boileau R A, Slaughter M H, et al. The Effect of Test Protocol Instructions on the Measurement of Muscle Function in Adult Women [J]. Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy, 1993, 18(3): 502—510.
- [60] Sahaly R, Vandewalle H, Driss T, et al. Maximal voluntary force and rate of force development in humans — importance of instruction [J]. European Journal of Applied Physiology, 2001, 85(3—4): 345—350.
- [61] Halperin I, Williams K J, Martin D T, et al. The Effects of Attentional Focusing Instructions on Force Production During the Isometric Midthigh Pull [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2015, 30(4): 919—923.
- [62] Brady C J, Harrison A J, Flanagan E P, et al. A Comparison of the Isometric Mid—Thigh Pull and Isometric Squat: Intraday Reliability, Usefulness and the Magnitude of Difference Between Tests [J]. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2017, 13(7): 1—25.
- [63] Dos'Santos T, Comfort P, Thomas C, et al. Effect of Different Onset Thresholds on Isometric Mid—Thigh Pull Force—Time Variables [J]. The Journal of Strength and Conditioning Research, 2016, 31(1): 3463—3473.
- [64] Robertson D G E. Research Methods in Biomechanics [M]. Windsor: Human Kinetic, 2015.
- [65] Oranchuk D, Robinson T, Switaj Z, et al. Comparison of the Hang High—Pull and Loaded Jump Squat for the Development of Vertical Jump and Isometric Force—Time Characteristics [J]. The Journal of Strength and Conditioning Research, 2019, 33(1): 17—24.
- [66] James L P, Roberts L A, Haff G G, et al. Validity and Reliability of a Portable Isometric Mid—Thigh Clean Pull [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2017, 31(5): 1378—1386.
- [67] Street G, Mcmillan S, Board W, et al. Sources of Error in Determining Countermovement Jump Height With the Impulse Method [J]. Journal of Applied Biomechanics, 2001, 17(1): 43—54.
- [68] Dos'Santos T, Lake J, Jones P A, et al. Effect of Low—Pass Filtering on Isometric Midthigh Pull Kinetics [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2018, 32(4): 1—18.
- [69] Beckham G K, Suchomel T J, Bailey C A, et al. The relationship of the reactive strength index—modified and measures of force development in the isometric mid—thigh pull; proceedings of the 32nd International Conference of Biomechanics in Sports, Johnson City, TN, USA, F, 2014 of Conference [C]. 2014.
- [70] Spiteri T, Newton R U, Binetti M, et al. Mechanical Determinants of Faster Change of Direction and Agility Performance in Female Basketball Athletes [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2015, 29(8): 2415—2423.
- [71] De Witt J K, English K L, Crowell J B, et al. Isometric Midthigh Pull Reliability and Relationship to Deadlift One Repetition Maximum [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2016, 32(2): 528—533.
- [72] Guppy S, Brady C, Kotani Y, et al. The Effect of Altering Body Posture and Barbell Position on the Between—Session Reliability of Force—Time Curve Characteristics in the Isometric Mid—Thigh Pull [J]. Sports, 2018, 6(4): 162.
- [73] Guppy S, Brady C, Kotani Y, et al. Effect of Altering Body Posture and Barbell Position on the Within—Session Reliability and Magnitude of Force—Time Curve Characteristics in the Isometric Midthigh Pull [J]. The Journal of Strength and Conditioning Research, 2018, 6(4): 3252—3262.
- [74] Eagles A N, Sayers M G L, Bousson M, et al. Current Methodologies and Implications of Phase Identification of the Vertical Jump: A Systematic Review and Meta—analysis [J]. Sports Medicine, 2015, 45(9): 1311—1323.
- [75] Meylan C M P, Nosaka K, Green J, et al. The Effect of Three Different Start Thresholds on the Kinematics and Kinetics of a Countermovement Jump [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2011, 25(4): 1164—1167.
- [76] Hansen K T, Cronin J B, Newton M J. Three Methods of Calculating Force—Time Variables in the Rebound Jump Squat [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2011, 25(3): 867—871.
- [77] Dotan R, Jenkins G, O'Brien T D, et al. Torque—Onset

Determination: Unintended Consequences of the Threshold Method [J]. Journal of Electromyography & Kinesiology Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology, 2016, 31(2): 7-13.

- [78] Suchomel T J, Sole C J, Bailey C A, et al. A comparison of reactive strength index — modified between six u. s. Collegiate athletic teams [J]. The Journal of Strength and Conditioning Research, 2015, 29(5): 1310-1316.
- [79] Owen N J, Watkins J, Kilduff L P, et al. Development of a Criterion Method to Determine Peak Mechanical Power Output in a Countermovement Jump [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2014, 28(6): 1552-1558.
- [80] Comfort P, Pearson S J. Scaling — Which methods best predict performance? [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2014, 28(6): 1565-1572.
- [81] Suchomel T J, Nimphius S, Stone M H. Scaling isometric mid-thigh pull maximum strength in division I Athletes: are we meeting the assumptions? [J]. Sports Biomechanics, 2018, 3(1): 1-15.
- [82] Jaric S, Mirkov D, Markovic G. Normalizing Physical Performance Tests for Body Size: A Proposal for Standardization [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2005, 19(2): 467-474.
- [83] Christopher T, Carroll K, DeWeese B, et al. Neuromus-

cular Adaptations Following Training and Protein Supplementation in a Group of Trained Weightlifters [J]. Sports, 2018, 6(2): 37.

- [84] Beckham G, Suchomel T, Sole C, et al. Influence of Sex and Maximum Strength on Reactive Strength Index — Modified [J]. Journal of Sports Science & Medicine, 2019, 18(1): 65-72.
- [85] Aagaard P, Simonsen E B, Andersen J L, et al. Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training [J]. Journal of Applied Physiology, 2003, 93(4): 1318-1326.
- [86] Tillin N, Pain M, Folland J. Explosive force production during isometric squats correlates with athletic performance in rugby union players [J]. Journal of Sports Sciences, 2012, 31(1): 66-76.
- [87] Buckthorpe M W, Hannah R, Pain T G, et al. Reliability of neuromuscular measurements during explosive isometric contractions, with special reference to electromyography normalization techniques [J]. Muscle & Nerve, 2012, 46(4): 566-576.
- [88] Folland J P, Buckthorpe M W, Hannah R. Human capacity for explosive force production: neural and contractile determinants [J]. Scand J Med Sci Sports, 2015, 24(6): 894-906.

(上接第 59 页)

化传播的解组与重构,体育文化将会在市场的主导下出现选择性失衡;5G 时代用户在场和沉浸式体验带来信息传播便捷化的同时,也会导致技术繁华之下呈现内容缺乏创新的弊端;作为社会变迁与现代性的延伸,5G 时代将会加剧传统体育边缘化危机。为此,建立与 5G 时代相适配的 IP 规则,规避体育短视频的制作、模仿、盗用等侵权行为;鼓励多元创新协同发展,充分利用体育短视频平台的技术应用,以多视角的方式呈现体育文化内容;树立文化自觉观念和文化主体性意识,对体育短视频创作与传播的价值进行正面引导将会是 5G 时代体育短视频生产与传播的媒介引导策略。

参考文献:

- [1] 胡泳,周凌云. 5G:互联网的又一个转折点——兼论移动通信技术迭代对文化传媒产业的影响[J]. 中国编辑,21: 10-15.
- [2] 中国电影网.《2019 中国网络视听发展研究报告》重磅发布 [EB/OL]. http://www.cssn.cn/yingshi/yingshi_gghy/201906/t20190613_4917143.html.
- [3] 中国网信网.第 45 次《中国互联网络发展状况统计报告》(全文) [EB/OL]. http://www.cac.gov.cn/2020-04/27/c_1589535470378587.htm.
- [4] 何梦祯.媒介情境论:梅罗维茨传播思想再研究[J]. 现代传播(中国传媒大学学报),2015(10):14-18.
- [5] 搜狐网.短视频数据分析:平昌冬奥会会秒拍播放量一骑绝尘 [EB/OL]. https://www.sohu.com/a/224864063_99903014.

- [6] Maria A Lema, Andres Laya, Toktam Mahmoodi, Maria Cuevas. Business Case and Technology Analysis for 5G Low Latency Applications[J]. IEEE Access,2017(5).
- [7] 徐敬宏,郭婧玉. 5G 时代中国传媒行业结构性变革四个转向[J]. 中国出版,2020(6):49-53.
- [8] 蒋东旭,胡正荣. 互动依赖:多元逻辑中的媒介制度变迁[J]. 新闻大学,2019(6):81-89+124.
- [9] 王孜. 5G 时代学术期刊短视频平台的发展现状与融合研究——以抖音短视频为例[J]. 出版发行研究,2020(2):61-66+60.
- [10] 严三九,刘峰. 5G 背景下短视频内容生态重构探析[J]. 中国编辑,2020(6):9-14.
- [11] 麦克卢汉. 理解媒介[M]. 何道宽,译. 南京:译林出版社,2011:83-84.
- [12] 王智慧. 文脉赓续与民族复兴:传统体育文化的基因传递与文化自觉——基于习近平总书记文化自信论的分析[J]. 西安体育学院学报,2019,35(1):1-9.
- [13] 王晓红,郭海威. 短视频新生态的建构与创新研究[J]. 中国编辑,2019(7):4-8.
- [14] 尼尔·波兹曼. 娱乐至死[M]. 章艳,译. 北京:中信出版社,2015:120.
- [15] 蔡盈洲. 从电视到短视频:一种演化的视角[J]. 中国电视,2020(9):74-78.
- [16] 王智慧. 文脉赓续与民族复兴:民族传统体育文化自信的生成机制[J]. 北京体育大学学报,2019,42(9):148-156.
- [17] 李欣. 新媒体视野下的“场景融合”研究——梅罗维茨传播理论评述[J]. 青年记者,2013(20):26-27.