



# 数字化体能训练的理念、进展与实践

## Digital-Based Performance Training: Concepts, Advances and Applications

闫琪<sup>1</sup>, 廖婷<sup>2</sup>, 张雨佳<sup>3</sup>

YAN Qi<sup>1</sup>, LIAO Ting<sup>2</sup>, ZHANG Yu-jia

**摘要:** 数字化体能训练是目前国际运动科学领域关注的一个新热点,也越来越引起国内体育科研机构的重视。数字化体能训练是应用现代科技方法在运动员进行体能训练的过程中通过实时测量的数据来监控训练质量,并根据数据对体能训练过程实施调整的一种训练方式。数字化体能训练是一个双向调控的过程,对于提高单位时间内的训练效率,提升运动员训练动机,实现精英运动员的精确个性化体能训练都具有非常重要的意义。对数字化体能训练理念、国内外研究进展进行了梳理,对一些主要的数字化体能训练方法进行了探讨,并列举了大量精英运动员的真实案例,阐述数字化体能训练对于精英运动员提高体能训练质量的重要作用,同时也预测数字化体能训练将成为体能训练发展的一个重要方向。

**关键词:** 数字化体能训练; 训练监控; 理念

**Abstract:** Digital-based performance training (DBPT) is recent trends in the field of exercise science around the world, which attracts more and more attention from domestic research institutions. DBPT is the use of digital monitoring devices to provide instant performance feedback during strength training, while supporting the timely adjustment during the training process. Basically, it is a bidirectional control mechanism. DBPT is of great importance not only to optimize the training efficiency in unit time, but also to enhance athletes' motivation and to achieve personal accurate strength training for elite athletes. This paper have covered the following aspects: a systematic review of the concepts and advances of DBPT in national and international literature; an exploration of main methods applied on DBPT; case reports of a large number of elite athletes in practical applications; a discussion on the effectiveness of DBPT for improving the training quality for elite athletes. We predict that DBPT will become an important direction of the development of strength training in the near future.

**Key words:** Digital-based performance training; strength training; training monitoring

中图分类号: G000 文献标识码: A

运动训练过程监控已成为运动训练中不可或缺的组成部分<sup>[18,21,40]</sup>。随着科技的发展和对训练规律的深刻认识,在体能训练过程中进行数字化监控越来越受到重视。国际上一些高水平运动队和精英运动员已经率先实现或部分实现了体能训练的数字化<sup>[18,21,23,37,40,54]</sup>。数字化体能训练(Digital-based Performance Training, DBPT)目前已经成为国际运动科学关注的热点,许多国外运动科学研究人员都在致力于此方面的研究。在我国一些体育科研机构也开始关注此领域的发展,北京市体育科学研究所于2016年备战里约奥运会期间建立了国内第一个“数字化体能训练实验室”,并将数字化的理念应用于部分精英运动员的体能训练。整体来看,不论国际还是国内,此方面的研究与实践都刚刚起步,需要不断完善理念和思路。众多学者认为,数字化体能训练将推动体能训练的数据化、客观化和精细化,将是

体能训练未来发展的趋势<sup>[18,21,40,54]</sup>。

### 1 数字化体能训练理念

体能训练可以深度挖掘人类运动的潜能,随着数字化科技技术的发展,数字化体能训练已成为可能。数字化体能训练是传统体能训练的延伸,是一种训练的理念和具体表现方式,并不能取代传统体能训练的体系、理论和方

收稿日期: 2018-00-00; 修订日期: 2018-00-00

第一作者简介: 闫琪,男,研究员,博士,主要研究方向为高水平运动员体能训练, E-mail: 13501302943@126.com。

作者单位: 1.国家体育总局体育科学研究所,北京 100061; 2.武汉体育学院,湖北 武汉 430079; 3.北京体育大学,北京 100084

1.China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China;  
2.Wuhan Sports University, Wuhan 430079, China;  
3.Beijing Sport University, Beijing 100084, China.

法。数字化体能训练是应用现代科技方法在运动员进行体能训练的过程中通过实时测量的数据来监控训练质量,并根据数据对体能训练过程实施调整的一种训练方式。数字化体能训练是一个双向调控的过程,对于提高单位时间内的训练效率,实现精英运动员的精确个性化体能训练,都具有非常重要的意义。

体能训练的数字化呈现并不是新鲜事物,运动科学一部分功能就是将训练的过程通过数据进行量化,并归纳总结为规律。在竞技体育中,人体运动数据的采集与分析是所有运动项目分析中不可或缺的核心。运动生理学和生物化学是对运动员的内在负荷进行量化,实现对运动员机能状态、疲劳程度的把控;而运动训练学和运动生物力学是对训练过程中运动员的外在表现进行量化,实现对运动员竞技表现的管理。由于仪器设备的限制和科技水平的局限,以前很难在训练过程中进行实时监测,并即刻根据反馈信息对运动员的训练内容进行调整。相对而言,周期性运动的规律性更强,较容易实现训练过程中的监控,如中长跑运动员利用心率表就可以准确监控运动员的训练负荷,自行车运动员可以利用心率表和功率计来监控运动员的训练负荷。但体能训练涉及到不同的运动形式和复杂的技术动作,因此,实现数字化监控更加困难。

随着科技水平的飞速发展,测量设备越来越小型化和精密化,也为在体能训练过程中实现数字化监控提供了硬件条件。全球卫星定位系统、压力传感器、加速度计、陀螺仪、无线传输、云计算等技术已经从军事和工业转化成运动测量设备,可以便捷、精确地对运动员的各种运动形式、运动数据进行捕捉和采集,并通过高度集成的软件系统对海量的数据进行快速处理和分析,实现实时反馈。这种数字化体能训练的理念,可以对教练员和运动员双方都产生增强反馈机制。一方面,教练员可以利用实时监控的数据来更精确地指导运动员,甚至更合理地调整训练计划,提高训练效果<sup>[18,21,40]</sup>;另一方面,运动员也可以通过这些直观的数据进一步激发自身的潜能,提高运动表现<sup>[40]</sup>。这种增强反馈的形式有可能会提高运动员的内在动机和产生更佳的神经肌肉适应性。有研究表明,采用实时反馈的数字化训练方法,在训练负重深蹲跳的过程中提供即时反馈,可以显著地增强运动员跳跃和冲刺的运动表现<sup>[23,37]</sup>。

## 2 我国当前数字化体能训练发展现状

国内的一些科研机构 and 学者也已经关注数字化体能训练的进展和实践。目前,国家体育总局体育科学研究所、上海体育学院、国家体育总局训练局、国家体育总局奥林匹克体育中心等众多体育机构都在关注和筹划“数字化体能训练中心”或“数字化体能训练实验室”的建设。北京市体育科学研究所2016年6月建立了国内第一个“数字化体能训练实验室”,应用世界先进的运动科学与体能训练理

念,通过自主研发的体能训练管理平台可以实现运动员在体能训练中的状态评估、训练质量实时监控、关键数据采集、训练信息分析等功能。数字化体能实验室应用 Omegawave 竞技状态综合评价系统、EliteForm 爆发力监控系统、Gymaware 爆发力测试和监控系统、Firstbeat 心率监控系统等多种先进的数字化体能训练设备,实现了对体能训练质量的精确量化分析和评价。这些仪器设备都是国际新近应用的主流数字化体能训练设备,目前国际上发表的很多相关论文均是应用这些设备进行的研究。

在备战2016年里约奥运会和2017年全运会期间,多名精英运动员在数字化体能训练实验室进行了体能训练。通过数字化设备的应用与数字化体能训练方法的实践,提高了体能训练的效率,大多数运动员均取得不错的训练效果,在奥运会和全运会上取得优异成绩。与此同时,实验室工作团队发表了多篇数字化体能训练的相关论文。樊云彩和闫琪利用心率变异性分析和疲劳监测系统对花样游泳运动员体能训练负荷进行了监控研究<sup>[7]</sup>;李晓彤和闫琪对 First beat 心率变异性监控系统在优秀摔跤运动员赛前训练及恢复中的应用进行了研究<sup>[3]</sup>;樊云彩和王晓坤对花样游泳运动员间歇性无氧耐力专项体能训练负荷的实时监控进行了研究<sup>[4]</sup>。

2018年5月,北京市体育科学学会主办的第八届北京体能大会的主题是“数字化体能训练”,邀请国内外多名专家围绕数字化体能训练进行研讨,参会学者达到500人,在国内推动了数字化体能训练的发展,这充分说明数字化体能训练已成为众多体能从业人员重点关注的一个发展方向。

## 3 国际数字化体能训练发展现状及主要技术应用

近年来,国际上许多学者都致力于数字化体能训练的研究,认为使用数字化的技术手段对运动队或个体运动员实施监控,可有助于观察运动员对训练课的反应,确定运动员疲劳程度,从而对训练计划进行适时的调整,以减少过度训练和损伤风险<sup>[40]</sup>。数字化体能训练能够监控运动员在一次训练课中的急性反应和长期训练过程中的慢性适应,密切关注运动疲劳的产生以避免出现过度训练,保证根据预期训练目标设置的训练负荷不超过运动员所能承受的范围,并将训练实况及时反馈给教练员和运动员,促进运动员训练的积极性,从而提升训练效率。早在19世纪,就已经有田径和游泳教练员通过手动记录训练日记的方式对运动员日常训练和竞技比赛的情况进行实施监控,并以此对运动员身体状态和竞技水平进行量化和分析<sup>[15]</sup>,这为日后数字化体能训练的发展奠定了基础。目前,应用数字化技术对运动员体能训练过程实施监控已逐渐成为运动员竞技训练中不可或缺的重要组成部分,特别是在精英运动员的体能训练过程中,不进行数字化体能监控的现象十分罕见,并且精英运动员体能监控系统的复杂性和投入成本

正在与日俱增<sup>[40]</sup>。数字化训练趋势已经促使当代教练员将制定训练计划的主要依据从个人记忆、经验和观点等主观判断逐渐转变为真实训练负荷数据的客观分析结论<sup>[54]</sup>。许多现代化训练理论与监控技术也因“数字化”技术应运而生,如训练窗理论、基于速度的力量训练法、高强度间歇耐力训练的实时训练负荷分析、基于心率变异性(HRV)的竞技状态监控、基于神经肌肉功能的竞技状态监控等。

数字化体能训练的实现离不开精密的数字化技术和设备,通过对国内外相关理论研究与实际应用的整理,以及数字化体能实验室在训练实践中的应用经验,本研究认为,目前已经得到广泛认可的数字化体能训练技术主要集中在运动能力测量和力量与爆发力训练、神经反应速度训练、高强度间歇耐力训练等训练方法的实时监控,以及运动员竞技状态评价和大数据平台管理等方面。

### 3.1 力量训练的数字化监控

力量训练是体能训练的重要内容之一。由于力量和速度之间呈显著的负相关关系,因此,通过在训练过程中对速度的测量,可以实现最大力量的预测,也可以监控基础力量训练、爆发力训练和离心力量训练的质量,明显提高力量训练的效果<sup>[20,22,30,31,32,44,48,49]</sup>。

随着数字化体能训练理念和测试技术的发展,一些学者提出了基于速度的力量训练方法(VBT),这种方法是在训练中利用实时监控的杠铃移动速度来更加精确地控制运动员的训练负荷,是一种更优于传统基于最大力量的训练负荷调节方式。Mladen Jovanovic等<sup>[23]</sup>在一篇研究中指出了关于VBT在实际中应用的领域:为运动员建立速度-负荷的训练原则、预测和监控运动员最大力量的变化、控制疲劳对力量训练效果的影响、描述训练负荷以及在特定训练中提供实时的运动表现反馈等。并得出结论:线性传感器是帮助体能教练监测和优化力量训练计划的可靠而有效的工具。VBT凭借其独特的优势,在一些运动项目训练中的应用已经取得了积极的效果。Mann, Bryan J等<sup>[37]</sup>在一项关于大学橄榄球运动的研究中发现,VBT可在日常训练中识别出运动员肌肉能力的波动情况,将训练负荷与相应的训练目标相匹配,同时作为训练质量的激励工具,可使橄榄球运动员的力量得到明显改善,这对于提高运动员的场上表现具有重要意义。还有研究指出,力量训练中动作平均速度的下降表明神经肌肉疲劳的产生,可看作是运动疲劳的“指示标”<sup>[28,35]</sup>。另外,对某一项力量练习的重复监测还可用于评估运动员的代谢压力,这可以通过血氨或是血乳酸的浓度进行测定<sup>[40]</sup>。可便携穿戴并基于智能手机平台的高新技术更使得力量训练的数字化监控在可靠、可信且准确度高的基础上增加了实用性与便利性<sup>[12]</sup>。

#### 3.1.1 基于力速曲线的递增负荷最大力量测试

最大肌力数据是竞技体育中常用的体能指标。如果应用增加负荷的方式直接测量运动员的最大肌力,会存在较

高的风险,特别是对于存在伤病或者有身体功能障碍的运动员,而精英运动员往往都存在伤病问题。基于力速曲线的递增负荷最大力量测试则很好地规避了损伤风险,用4~6次递增负荷的动作速度就可以较为准确地预测出运动员的最大力量。Izquierdoetal<sup>[31]</sup>的研究表明,平均速度是个非常稳定的测量方法,而且杠铃平均速度与1RM的百分比有着高度的相关性。由于负荷和速度有高度的负相关关系,因此,可以用线性回归的统计方法预测出运动员的最大肌力。

图1是一名古典式摔跤运动员基于力速曲线的递增负荷最大卧推力量测试的数据与曲线。运动员进行了40 kg、60 kg、80 kg、90 kg和100 kg 5个重量的递增负荷测试,在40 kg时杠铃平均移动速度为1.09 m/s (>1 m/s),随杠铃重量增加平均速度逐渐下降,当杠铃重量达到100 kg时,平均移动速度为0.37 m/s (<0.5 m/s)。此时,通过力速曲线就可以较为准确地预测出这名运动员的1 RM负荷为124.2 ± 3.9 kg,同时还可以推算出运动员进行卧推爆发力练习的最佳负荷是67.5 kg,在这个负荷下,运动员的力量与速度的乘积达到峰值534 W。相较于用杠铃直接进行1RM的测试方法,通过递增负荷力量测试教练员可以获得大量重要的直观训练信息,更为安全、高效。

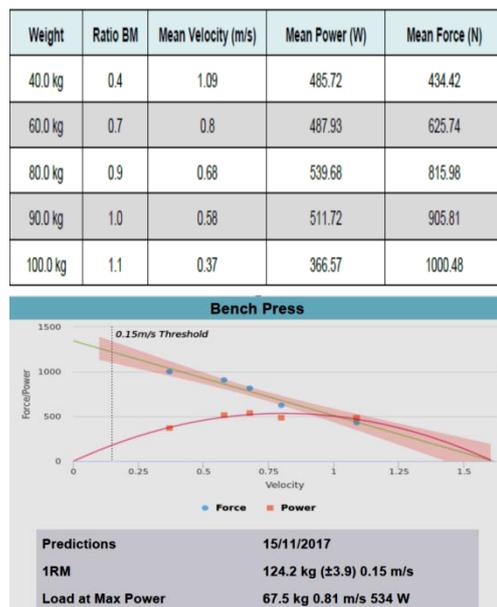


图1 一名古典式摔跤运动员基于力速曲线的递增负荷最大卧推力量测试

Figure 1. Progressive 1RM Bench Press Test Based on the Force Velocity Curve for a Greco-roman Wrestler

#### 3.1.2 基于平均速度 (Mean Speed) 的力量训练

深蹲、卧推、卧拉都是竞技体育非常重要的基础力量练习,在确定练习的负荷时一般采用最大肌力(1RM)的百分比方式。有研究证明<sup>[23]</sup>,运动员的1RM经常会出现波动,波动的范围会达到1RM数值的±18%。那么,按照最

初测试的1RM来进行百分推算就存在较大误差，选择的负荷会不准确。图2是一名橄榄球运动员在一周内卧推1RM数值的变化示意图<sup>[4]</sup>。

正因如此，基于速度的力量训练是基于速度与负荷之间始终保持的严格负相关关系，显然更加合理。教练员可以通过线性位置传感器装置在每节训练课的关键练习中测量杠铃杆的平均速度来监控运动员的训练质量<sup>[23,37]</sup>。图3是不同目的力量练习与速度之间的对应关系<sup>[23]</sup>。

在基于速度的力量训练中，运动员每一次推起杠铃的速度都要以自身能够完成的最大速度去进行，直到力竭，一般最后一次推起的平均速度应低于0.3 m/s<sup>[23]</sup>。表1是一名篮球运动员以基于速度的力量训练方式实际完成3组90 kg卧推的平均速度，每组最后一次推起的平均速度在0.2~0.24 m/s之间。这种训练每次都能引导运动员达到当前状态下的最大速度能力，直到把极限能力逐渐发挥出来。而且运动

员始终能够看到自己完成的推起速度，通过增强反馈的方式来激发自身的潜能，从而提高训练效率。

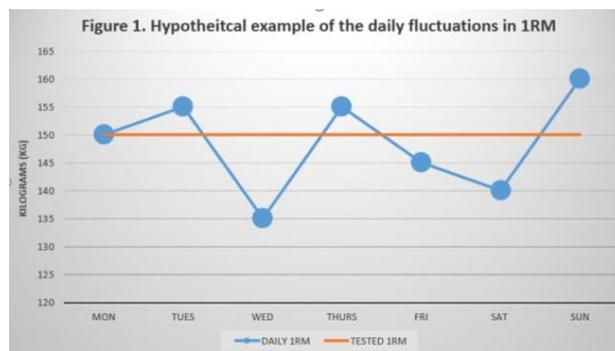


图2 1RM随运动员状态出现波动的案例  
Figure 2. A Case of the fluctuation of 1RM Test Results

Percentage of 1-RM (%)										
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
None	Starting Strength	Speed-Strength	Strength-Speed	Accelerative Strength	Absolute Strength					
Original and arbitrary velocity ranges (m/s; [40])										
	>1.3	1.3-1	1-0.75	0.75-0.5	<0.5					
Research Supported Velocity Ranges (m/s)										
Back Squat [26]	-	-	-	-	<0.54					
Bench Press [10, 41]	>1.3	1.3-0.9	0.95-0.63	0.63-0.32	<0.32					
Prone Pull [41]	>1.52	1.52-1.23	1.23-0.94	0.94-0.67	<0.67					

图3 不同目的力量练习与速度之间的对应关系

Figure 3. Corresponding Relation between the Strength and Velocity Exercise with Different Aims

表1 基于速度训练的3组90 kg卧推的平均速度

Table 1 The Mean Speed of the 3-sets 90kg Bench Press with Velocity-based Training (m/s)

推起次数	第1组	第2组	第3组
1	0.5	0.51	0.47
2	0.48	0.47	0.44
3	0.4	0.41	0.4
4	0.35	0.33	0.34
5	0.3	0.29	0.3
6	0.21	0.23	0.24
7	0.2	—	—

### 3.1.3 基于最大速度 (Peak Speed) 的爆发力训练

爆发力训练是力量训练中的重点，奥林匹克举及其变形练习方式（高抓、高翻等）是发展全身爆发力的最佳练习方式。爆发力训练主要监控动作过程中的最大速度。每次完成练习后，都可以通过显示屏直接看到此次练习的最

大速度，体能教练可以给运动员每次训练确定一个目标值，观察运动员每次练习质量。这样的增强反馈方式可以不断激励运动员挖掘自身潜能，提高每次爆发力动作的最大输出功率。

图4是一名男子自由式摔跤运动员在备战第十三届全运会期间高翻练习最大爆发力的监控数据。在为期6周的爆发力训练阶段，应用基于最大速度的爆发力训练方式，每次监控和反馈运动员的最大功率，并以运动员之前达到的最大功率为目标值，激励运动员达到甚至超过目标值。目标值随着运动员能力提高也不断提高，引导运动员充分调动身体各系统，发射更强的神经冲动来完成爆发力动作。实践表明，通过这种训练方式在6周内使运动员的高抓功率得到了持续提高。

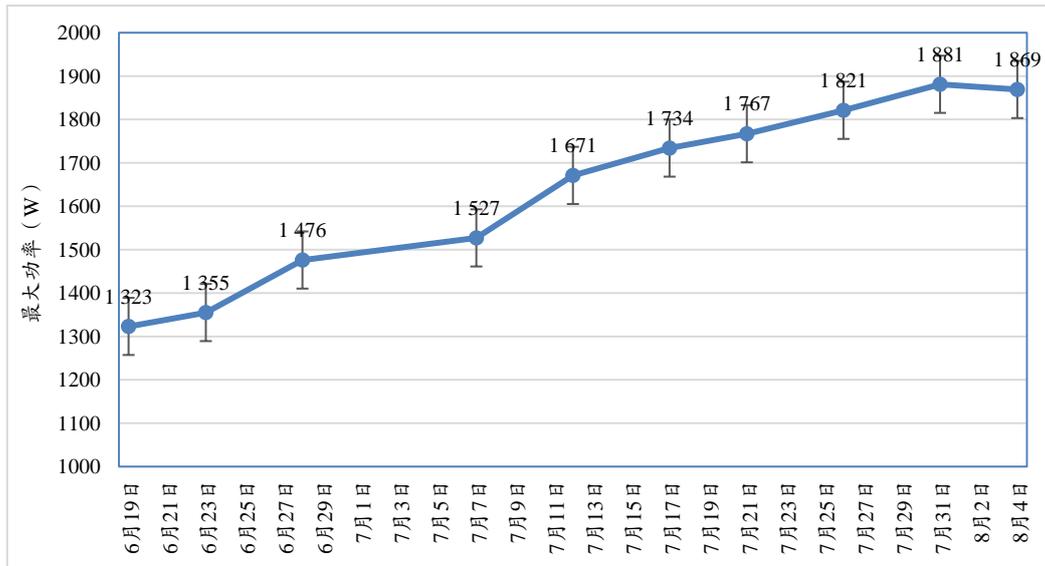


图4 摔跤运动员张\*\*高抓最大功率变化趋势

Figure 4. The Max Power Trend of Change for the Wrestler "Zhang"

### 3.1.4 离心力量训练监控

离心力量不仅可以提升运动员的运动表现,而且可以防止运动损伤<sup>[16,26,52,57]</sup>。采用飞轮训练器进行离心训练,并配合蓝牙传输的应用程序对训练效果进行实时监控,也逐渐在数字化体能训练中占据重要地位。Marotoizquierdo S等<sup>[38]</sup>在一篇研究中已经证实,与进行传统力量训练相比,使用飞轮训练器进行离心力量训练后,运动员的肌肉围度和功能性力量出现明显改善,具体表现在向心与离心力量、肌肉爆发力、肌肉围度、纵跳高度和奔跑速度等方面。这在另一篇Norrbrand L等<sup>[46]</sup>所做的研究中也得到了类似的结论,他们同时还发现,进行飞轮训练器离心负荷训练时与进行传统力量训练时,前者的目标训练肌群肌电图活跃程度远高于后者。另外,也有研究指出,肌肉的发力率和最大自主收缩能力在经过离心训练后也获得显著改善,这可能与离心力量训练相比于传统力量训练能够带来更多的机械压力有关<sup>[9]</sup>。最重要的是,在使用飞轮训练器进行离心训练的过程中,可通过显示器对实时的训练效果数据进行直接反馈,使教练员和运动员能在第一时间掌握训练实况,从而激励运动员更好地完成训练。

研究证明,应用飞轮式离心训练台可以对运动员进行多种动作的离心练习,运动员在进行向心用力收缩后,立即转化为离心收缩,让目标肌肉逐渐适应离心的用力方式,从而提高肌肉离心能力<sup>[28,35]</sup>。如果运动员能够很好地进行离心方式用力,离心力量可以高出向心力量20%~30%<sup>[28]</sup>。利用离心训练台,在一组练习中运动员目标肌肉的向心和离心用力方式都可以得到充分练习。

图5和图6是两名运动员在离心训练台上完成的深蹲力量练习数据和图示,褐色柱条显示的是向心力量,褐色柱条显示的离心力量。图5显示这名运动员最大向心功率为789 w,最大离心功率为1 061 w,最大离心功率超过最大向心功率34%,很好地达到了训练要求。反之,图6显示另外一名运动员最大向心功率为695 w,最大离心功率为608 w,最大离心功率低于最大向心功率13%,因此可判断这名运动员目标肌肉的离心能力不足,需要进行更多的离心练习。

### 3.1.5 基于速度的力量训练应用案例

2017年冬训期间,对10名古典式摔跤运动员随机进行分组,5名运动员在北京市体育科学研究所的数字化体能训练实验室应用数字化设备和监控方法进行力量训练,在进行力量训练时应用基于平均速度的力量训练方法,在进行爆发力训练时应用基于最大速度的监控与反馈。另外5名运动员进行传统力量训练,训练计划一致。在8周训练前后进行重复测试,观察运动员训练效果。同组训练前后应用配对 $t$ 检验进行统计分析,组间应用独立样本 $t$ 检验进行统计分析。表2中的数据 displays: 8周训练前后进行数字化训练组各项测试数据均存在显著性差异( $P < 0.05$ )和非常显著性差异( $P < 0.01$ );而传统力量训练组只在卧推和深蹲测试数据中出现显著性差异;数字化训练组与传统训练组在1RM深蹲、1RM高抓和优势侧单臂爆发力下拉测试数据方面存在非常显著性差异( $P < 0.01$ )。从统计结果可以看出,应用数字化体能训练相比传统体能训练有明显优势,特别是在爆发力训练方面优势更加明显。



图5 离心能力明显高出向心功率的示例

Figure 5. A Case of Eccentric Ability is Definitely Higher than Concentric Ability

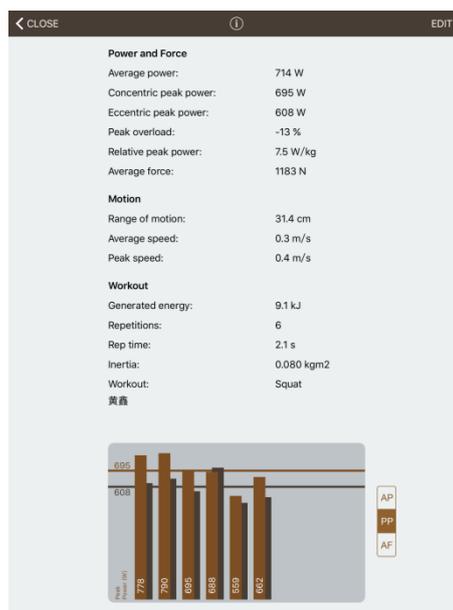


图6 离心能力明显低于向心功率的示例

Figure 6. A Case of Eccentric Ability is Definitely Lower than Concentric Ability

表2 古典式摔跤运动员8周数字化体能训练后效果对比

Table 2 The Comparison of Pretest with Post-test Results with 8-weeks Digital-Based Performance Training for the Wrestlers

	总高度 (feet)	CMJ纵跳 (cm)	1RM卧推 (kg)	1RM深蹲 (kg)	1RM高抓 (kg)	优势侧单臂 爆发力下拉 (W)
传统	训练前	42.2±2.9	65.6±8.9	126.2±5.8	62.6±13.6	290.8±12.0
训练组 (n=5)	训练后	42.7±3.7	78.2±12.7**	132.2±10.1*	67.4±8.8	296.4±11.2
数字化	训练前	39.8±2.4	73.2±5.4	128.6±15.9	64.0±3.7	283.2±14.9
训练组 (n=5)	训练后	42.3±3.1*	88.4±11.3**	148.8±15.4***	88.2±6.5***	318.2±4.8***

注：\* 表示与本组冬训前数据相比有显著性差异 ( $P < 0.05$ )，\*\*与本组冬训前数据相比有非常显著性差异 ( $P < 0.01$ )，\*\*\*与传统训练组训练后数据相比有非常显著性差异 ( $P < 0.01$ )。

### 3.2 速度相关的数字化监控

#### 3.2.1 反应式动作速度训练监控

在许多运动项目中，动作速度都是获胜的关键。动作速度是由神经系统和肌肉系统的功能共同决定的。在体能训练中可以通过视觉、听觉等信号刺激，配合设定好的或随机的动作来对运动员反应式动作速度能力进行训练。有研究应用视觉频闪技术对提高冰球运动员的动作速度和技巧都产生积极影响<sup>[42]</sup>。有学者用Fitlight Trainer反应灯系统对跆拳道运动员进行精确的快速踢腿动作测试和训练<sup>[17]</sup>。

应用Fitlight Trainer反应灯系统对4名拳击运动员进行4周的反应式动作速度训练，将8盏灵敏灯固定在墙上，每2盏灯之间闪烁的间隔为1 s，每周训练2次，每次要求运动员在60 s内完成60次出拳的快速反应动作，如果判断正确并动作速度能够达到要求，则指示灯熄灭，记为正确次数，如果在规定时间内没有达到要求的动作速度，记为漏掉一次，系统自动记录完成情况。图7是4周训练效果示意图，通过对拳击运动员专项出拳动作的反应和速度训练，运动员的成功率逐步提升，错过或漏掉的次数明显减少，说明运动员的神经反应速度能力得到提高。

#### 3.2.2 Plyometric训练监控

在Plyometric训练中，触地时间是非常重要的一个监测指标<sup>[2,14,25,39,45,58]</sup>。许多爆发式的运动项目脚触地的时间非常短，一般在180 ms以内，因此，在进行Plyometric训练时要重点关注运动员从跳箱落地的触地时间<sup>[2,18,45,58]</sup>。以往测量运动员触地时间只能在实验室利用测力台进行，目前应用带有压力传感器的纵跳垫或光学设备都可以方便地进行测量，显示运动员每次触地时间。对于运动员调动自身潜能、提高动作质量都有积极作用，并可以明显地提高运动员的训练质量。

一名女子跳台跳水运动员进行了为期4周的跳深训练，每周进行2次练习，跳台高度为45 cm，每次4组，每组6次，过程应用Newton纵跳垫进行触地时间的实时监控，让运动员每次都可以观察到自己的触地时间，教练员同时对运动员进行技术指导。图8和表3显示的是进行4周的Plyometric训练时每次触地时间的示意图和均值数据，可以看出，通过数字化监控和增强反馈的方式，运动员触地时间逐渐下降，第4周的触地时间与第1周相比有非常显著性的变化 ( $P < 0.01$ )。

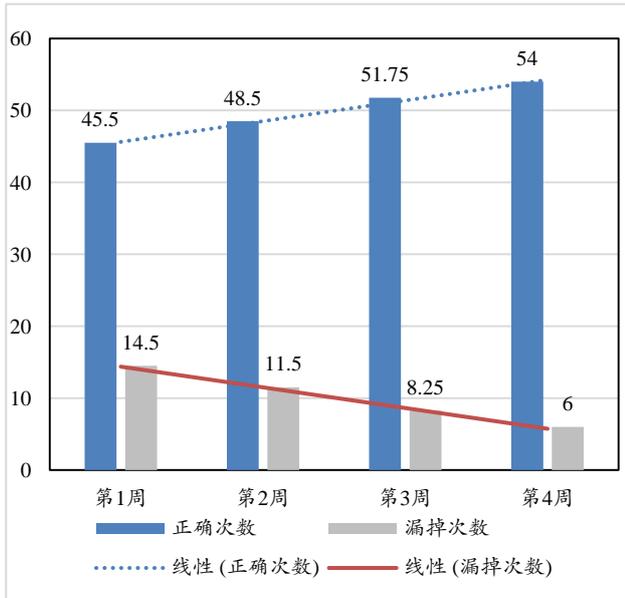


图7 拳击运动员4周反应式动作速度训练效果

Figure 7. The Effect of 4-weeks Reaction Speed Training for the Boxer

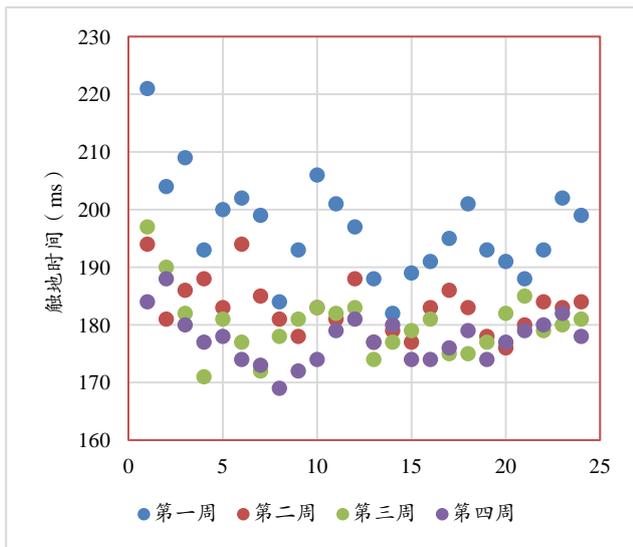


图8 一名女子跳水运动员4周Plyometric训练触地时间分布示意图

Figure 8. The Time Distribution of the Ground Contact during 4-weeks Plyometric Training for A Female Diver

表3 一名女子跳水运动员4周Plyometric训练触地时间

Table 3 The Results of the Ground Contact during 4-weeks

	Plyometric Training for A Female Diver (ms)			
	第1周	第2周	第3周	第4周
M	196.71	183.00	180.08	177.46**
SD	8.61	4.77	5.56	4.16

注: \*\*与第1周相比有非常显著性差异,  $P < 0.01$ 。

### 3.3 耐力训练的数字化监控

耐力训练分为基础有氧耐力、无氧耐力和高强度间歇

耐力。不论哪种耐力训练都会对机体带来刺激,从而产生一定的生理反应。对这些生理反应进行监控通常能够反应个体的训练负荷强度和量度。进行有氧耐力训练可以采用跑步机、功率自行车、攀爬机等周期性练习方式,也可以通过力量循环的非周期性方式来进行。在无氧耐力和高强度间歇耐力训练时,运动员身体内会产生大量乳酸,因此,除了对距离、速度、心率监控以外,还可以通过训练后血乳酸的测试来监控训练强度<sup>[40]</sup>。高强度间歇耐力训练是格斗项目和同场竞技球类项目的主要耐力表现方式,也是这些项目运动员体能训练中进行数字化监控的重点<sup>[11,19,34,36,53,56]</sup>。

周期性练习方式可以监控运动员的完成距离、速度和过程中的心率及其衍生指标训练冲量(Training Impulse, TRIMP)、训练效果(Training Effect, TE)、运动后过量氧耗(Excess Post-exercise Oxygen Consumption, EPOC),非周期性的练习方式主要监控运动员过程中的心率及其衍生指标,有助于教练员和运动员在训练过程中随时观察训练效果并实时进行调控,尽可能将心率控制在目标心率区间内,有效增强对训练过程的掌控,提高训练质量。

Banister提出了基于训练期间平均心率占心率储备百分比来量化训练负荷的方法,即训练冲量的概念。训练冲量能够反映运动过程中心率反应的总体情况,训练冲量值随着运动时间的增加而增加,其增长速度则由运动强度决定,并且随着运动强度的增加呈指数型增长,是分析特定练习的训练负荷较为理想的方法<sup>[10,55]</sup>。

运动后过量氧耗值能够在一定程度上反映运动对机体内环境稳态所造成的影响。过量氧耗是由于运动后能量代谢率未恢复到运动前水平造成的,是指恢复期机体的耗氧量水平高于运动前耗氧量水平的现象。过量氧耗值随着运动强度的增加而呈指数型增长,当运动强度低于无氧阈时不再增长,并且随着运动强度的降低而呈下降趋势<sup>[53]</sup>。

训练效果是由过量氧耗值衍生而来的评分指标,其评分代表训练对有氧能力产生的影响。评分数值介于1~5:分值1.0~1.9代表较轻松的恢复性运动;2.0~2.9代表训练能够起到保持运动能力的作用;3.0~3.9代表训练能够使有氧运动能力得到改善;4.0~4.9代表有氧运动能力能够得到很大改善;5.0则表明训练负荷超出可承受范围,有导致过度训练的风险。

图9是对一名奥林匹克级的女子拳击运动员高强度间歇训练课的心率监控数据图,红色区域代表运动员心率超过自身最大心率90%的时间段,心率数据同步投射到墙壁上的显示屏上,教练员和运动员随时可以看到自己的心率,如果运动员的主观努力程度下降,会反映出心率降低,教练员可以用语言激励或者提高练习强度来调控运动员的心率,使运动员的心率能够更多地出现在靶心率区,达到更好的训练效果。

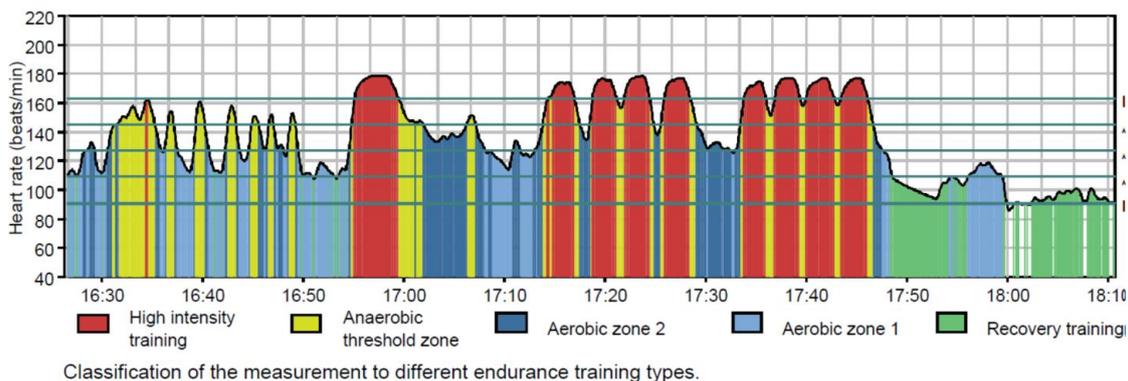


图9 一名女子拳击运动员体能训练课心率监控

Figure 9. The Heart Rate Monitoring of A Female Boxer on a Strength Training Program

表4是一名男子柔道运动员4周5×30 s高强度间歇攀爬机训练监控数据。随着运动员攀爬机总高度的提高，运动员的训练效果评价、训练冲量值、血乳酸等指标都成正

相关上升趋势。这些数据可以很好地反映运动员对高强度间歇能力的适应程度。

表4 一名柔道运动员4周5×30 s高强度间歇攀爬机耐力训练监控

Table 4 The Monitoring of 4-weeks 5\*30s HIIT on Climbing Endurance for a Judoka

训练日期	总高度 (feet)	训练效果	EPOC峰值 (ml/kg)	训练冲量 (Trimp值)	高强度心率时间 (hh:mm:ss)	血乳酸 mmol/L
2017-01-13	577	2.2	33.9	15	0:03:36	16.1
2017-01-20	561	2.2	34.43	15	0:03:52	16.7
2017-02-03	568	2	26.61	13	0:03:05	16.2
2017-02-10	603	2.5	40.82	19	0:05:07	18.1
2017-02-17	617	2.3	37.57	17	0:04:10	17.9

#### 4 体能状态的数字化监控与数据平台管理

##### 4.1 体能状态的数字化监控

##### 4.1.1 基于神经传导速度和心电图的体能状态监控

运动员的体能状态会受到中枢神经机能状况（CNS）、心脏功能（身体疲劳和恢复状况）能量代谢系统、植物神经系统等多因素的影响<sup>[5,13,15]</sup>。目前科技的发展已经支持通过无创的测量方式快速获取多项生物学参数，并对运动员的机能和体能状态作出实时的综合性诊断和评估，为教练员安排训练计划及赛前准备提供参考<sup>[40]</sup>。同时，测试结果可通过云储存和大数据分析等科技手段，实现团队成员通过移动终端进行测试和查看结果，并同时对多名运动员的体能状态数据进行管理。

这种无创、快捷的体能状态监控方法，为应用“训练窗”理论、实现精英运动员的个性化体能训练提供了可能<sup>[5,13,50]</sup>。图10是应用Omegawave竞技状态诊断系统对一名自由式摔跤运动员进行长期跟踪的监控界面，反映了运动员在一个训练阶段中竞技状态的变化。在体能训练或专项训练前首先对运动员进行竞技状态诊断，观察运动员目前的耐力、爆发力&速度、力量、协调能力&技巧4个训练窗口，如果某个窗口分值低于3分，那么应避免运动员进行此方面的训练。例如，运动员Omegawave评分中爆发力&速度窗口评分低于3分，此时如果对运动员进行高强度的爆发力

和速度训练，训练效果不仅不佳，而且存在较高的运动损伤风险。此时建议教练员暂停进行爆发力和速度的训练，对与爆发力和速度能力相关的生理系统进行主动的调节与恢复，改进此方面的竞技状态，然后再进行此窗口相关的运动能力训练。通过系统检测和数字化的直观呈现，可以精确把控运动员的竞技状态，提高训练效率，避免过度疲劳和运动损伤。



图10 一名自由式摔跤运动员阶段训练竞技状态监控

Figure 10 The Performance Monitoring of A Female Boxer on the Stage

图11是一名自由式摔跤运动员在进行150 s的-140°超低温冷疗前后, 应用Omegawave竞技状态诊断系统对其进行状态监控。从表5和图11中的数据可以看出, 冷疗后反映运动员的竞技状态的多项指标都有所提高, 安静心率由73次/min下降到58次/min, 心功能储备和适应程度评分都由3分恢复到7分(7分为满分), 压力恢复指数由2分恢复到6分(7分为满分)。通过这种直观的数字, 教练员可以实时、清晰地观察到运动员的恢复情况。这种动态监测运动员竞技状态的方式已经被越来越多地应用到精英运动员的体能训练中, 目前, 美国和欧洲许多自行车、铁人三项、综合格斗、篮球等项目的众多职业运动员都在采用这种竞技状

态监控方法进行系统评测, 在我国国家游泳队、国家摔跤队等优秀运动队中也在进行系统应用。

表5 一名自由式摔跤运动员通过150 s超低温冷冻恢复后 Omegawave相关指标的变化

**Table 5 The Related Index of Change by Omegawave Through 150s Cryotherapy Recovery for a Free-style Wrestler**

	安静心率 (次/min)	心功能储 备评分	恢复模式 评分	适应程度 评分	压力指数 评分
训练后	73	3	0.11	3	2
冷疗后	58	7	0.28	7	6

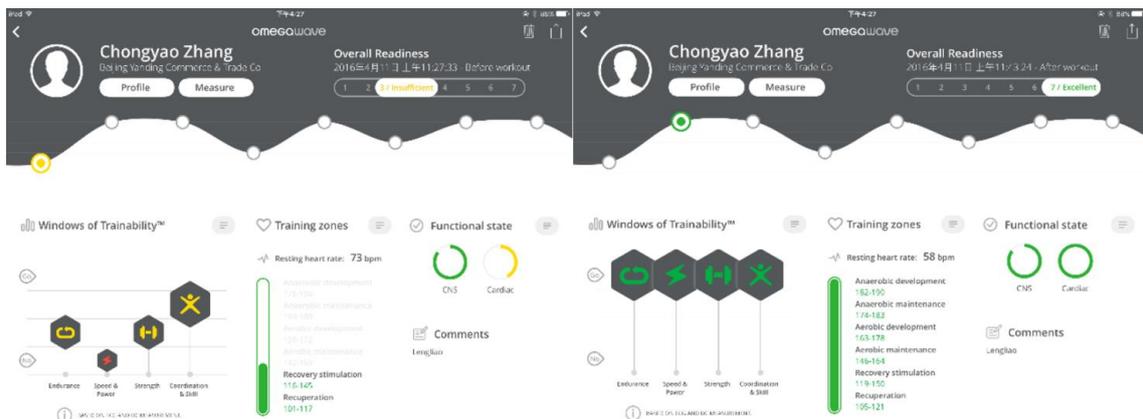


图11 一名自由式摔跤运动员通过150 s超低温冷冻恢复后Omegawave相关指标的变化

Figure 11. The Related Index of Change by Omegawave Through 150s Cryotherapy Recovery for a Free-style Wrestler

#### 4.1.2 基于心率变异性 (HRV) 的体能状态监控

心率变异性是指相邻两次心动周期之间的微小变化, 即窦性心律不齐的程度。目前, 心率变异性在竞技体育的训练监控中应用得越来越多, 在田径、游泳、铁人三项、柔道等项目中都有相关的研究<sup>[1,6,8,43,47]</sup>。心率变异性能够反映自主神经的活性, 定量评估心脏交感和迷走神经张力及其平衡性, 以及评价运动生理和心理的负荷状态<sup>[43]</sup>。体能训练包含大量抗阻训练和高强度无氧训练, 而无氧训练对自主神经系统的影响大于有氧训练, 因此, 在体能训练中通过心率变异性的相关测试指标的变化进行负荷监控具有可行性。快速恢复指数 (Quick Recovery Test Score) 是Firstbeat训练监测系统由心率变异性 (HRV) 推算出的一个衍生指标, 能够反映运动员的恢复状况, 数值越高代表恢复越好, 具有简便易测、直观易懂等优点, 在训练中非常实用<sup>[41]</sup>。测定一次训练课前后的心率变异性, 可对运动员的训练前恢复情况和训练后应激程度进行纵向跟踪和评估, 进一步提升了教练员对训练的科学掌控。

图12是一名自由式摔跤运动员3周体能强化阶段的监控数据。通常情况下, 训练前后差值越大, 说明本次训练课

的负荷对运动员产生的刺激越深。5月10日和17日是2次高强度间歇训练为主的训练课, 运动员训练前与训练后的快速恢复指数的差值很大, 说明训练课对运动员产生了明显刺激, 5月20日和23日都是恢复再生训练, 以低强度练习为主, 运动员训练课前后的恢复指数差值就很小。

#### 4.1.3 基于神经肌肉功能的体能状态监控

运动员在长期系统训练过程中的体能状态会发生波动, 除了对运动员内在机制进行监控, 还可以通过对神经肌肉系统的监控更加直接地反映运动员的即刻体能状态<sup>[24,27,29,51]</sup>。Ratamess和同事<sup>[51]</sup>在超过一年的时间里对大学摔跤运动员的运动表现和生理变化进行了跟踪记录, 主要检测指标包括最大握力、Wingate功率自行车的峰值功率以及垂直纵跳的高度和相对功率, 通过对神经肌肉有规律地监控运动员的身体特征, 能够确定对摔跤运动员训练计划的身体适应程度。Halperin等<sup>[29]</sup>对澳大利亚备战冠军争夺战的职业拳击运动员进行了研究, 认为对神经肌肉系统的监控信息能够让教练员通过考虑个体的差异性来妥善安排重大比赛时的减量训练策略。有研究认为, 对运动员的纵跳能力进行定期监控可以帮助教练员更好地把控运动员对训练的适应程度<sup>[21]</sup>。

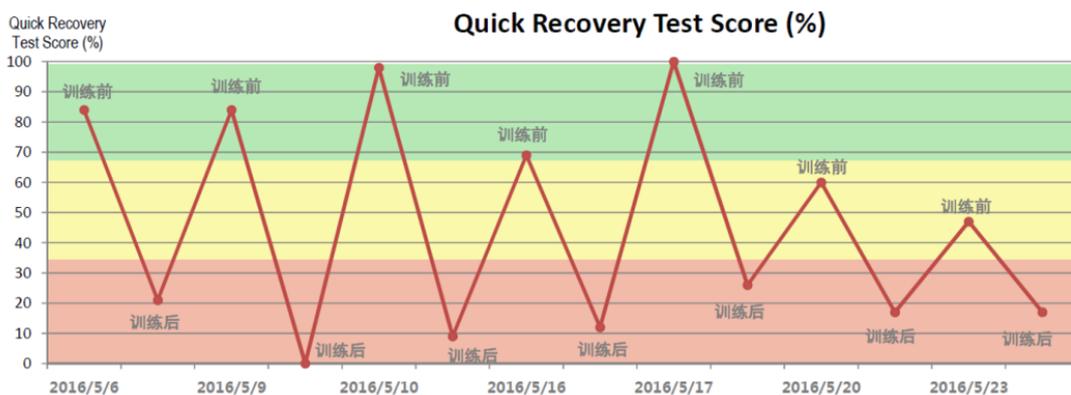


图12 一名自由式摔跤运动员3周强度训练课前后快速恢复指数监控

Figure 12. The Quick Recovery Test Score of Pre and Post 3-weeks Intensity Training for a Free-style Wrestler

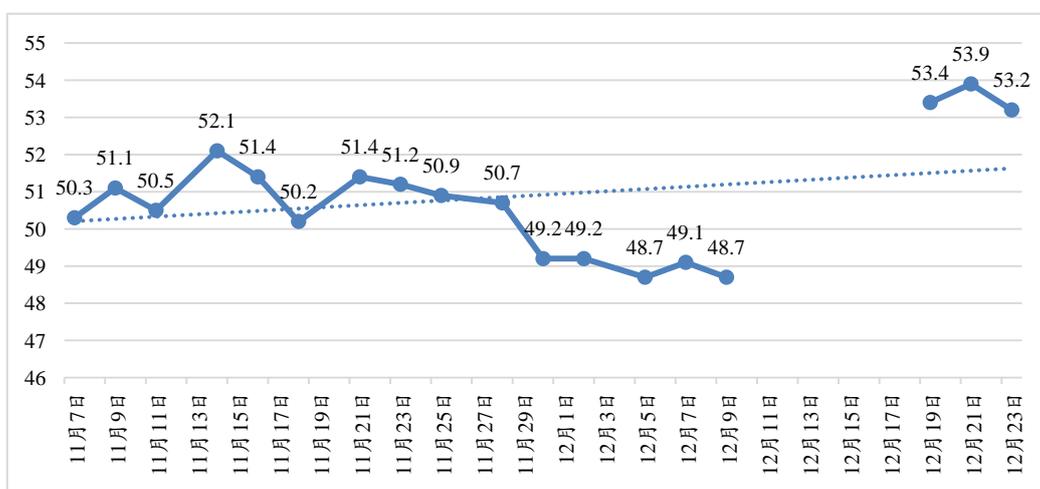


图13 一名跳水运动员冬训前期摆臂纵跳的数据监控

Figure 13. The Data-Monitoring of the Vertical Jump with Swing-arms for a Diver at the Beginning of the Winter Training

图13是一名跳水运动员在冬训前期每次训练课前进行摆臂纵跳监控的数据。可以看出，运动员前3周纵跳数据基本稳定，第4周后由于疲劳积累使数据开始下降。经过一周调整后，纵跳高度明显开始提高，反映出运动员竞技状态随疲劳积累所产生的相应变化。通过系统监测可以更好地把握运动员竞技状态的变化。如果指标出现持续性下降，教练员应积极进行训练负荷的调整，避免运动员出现过度疲劳和运动损伤风险。

4.2 体能大数据管理平台的应用现状

应用大数据平台对体能训练、测试与监控的数据进行管理是众多学者关注的一个研究热点。所有竞技体育的教练员、医务人员、科研人员和教育工作者都面对着一个共同的难题，即如何有效地储存和跟踪运动员的数据，获取准确、有价值的实用信息，进而有效地提高运动员的竞技表现。随着现代信息技术和网络大数据的发展，大数据成为竞技体育的核心竞争力。通过基于大数据和云处理技术的管理平台，可以将许多复杂多变的信息转变为可测量的

数据和数字化模型，并对运动员的竞技状态、损伤风险等进行预测。

一个优质的体能训练大数据管理平台可收集并整理的范围广泛且有针对性和系统性，可帮助教练员和科研人员对运动员全方位的数据和信息实现数字化、系统化。体能训练大数据管理平台应该具有技术成熟，用户体验友好，操作简单有效，便于每天数据输入和分析等特点。这将节省教练员和科研人员大量的时间和精力，而且可以短时间生成准确、有针对性的数据分析报告，令教练员对于运动员运动表现的变化做出准确的判断，同时，也可选择多样化的个性化定制方案来满足精英运动员的特殊需求。

一个优质的体能训练大数据平台的设计应兼具灵活性和自定义性，轻松设置不同级别管理者、教练员和运动员的操作权限。同时，大数据平台还应该支持目前主流数字化体能测试仪器的后台数据导入，可以通过直接上传或间接导入的方式进行数据传输，减少人工输入的环节，并实现一站式体能测试和训练数据的汇总、管理、存储和分

析, 生成简洁直观的分析报告。目前, 世界一些优秀的运动队已经应用Smartabase大数据平台率先实现了对运动员体能训练相关数据进行管理, 如NBA的一些球队、澳大利亚七人制橄榄球联盟、澳大利亚国家游泳队等。图14~16是Smartabase大数据管理平台的基础界面, 可以实现对团队、个体运动员的数据采集、管理、统计、建模、竞技状态预测和运动损伤风险预测等功能, 这种数字化技术的深度应用和进一步开发将是体能训练发展的一个重要方向。目前国内在体能数据系统管理方面的研究和应用还很少, 只有国家游泳队和赛艇队等少数运动队开始应用此技术进行运动员体能训练数据的系统管理。

数字化体能训练在国内外越来越引起关注, 目前, 国际数字化体能训练的发展优于国内。数字化体能训练的应用主要集中于运动员竞技状态的监控、各种力量训练的实时监控、神经反应速度的实时监控、高强度间歇训练的实时监控、大数据平台的管理与应用等方面。数字化体能训练对于提高单位时间内的训练效率, 提升运动员训练动机, 实现精英运动员的个性化体能管理都具有非常重要的意义。体能训练大数据管理平台已经在一些优秀运动队开始应用, 可以实现对团队、个体运动员的数据采集、管理、统计、建模、竞技状态预测和运动损伤风险预测等功能。数字化体能训练在理论与实践方面都需要更为深入的研究, 各种数字化技术的深度应用和进一步开发将成为体能训练发展的一个重要方向。

5 结论与展望

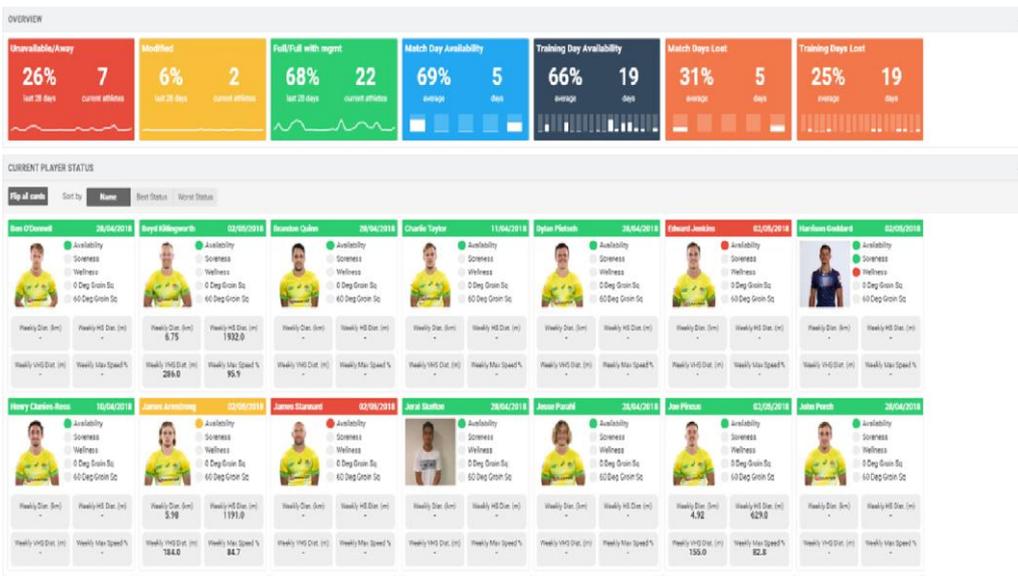


图14 体能训练大数据管理平台基础界面1: 团队管理

Figure 14. The Data Management Platform of Strength and Performance Training Basic Interface 1 - Team Management

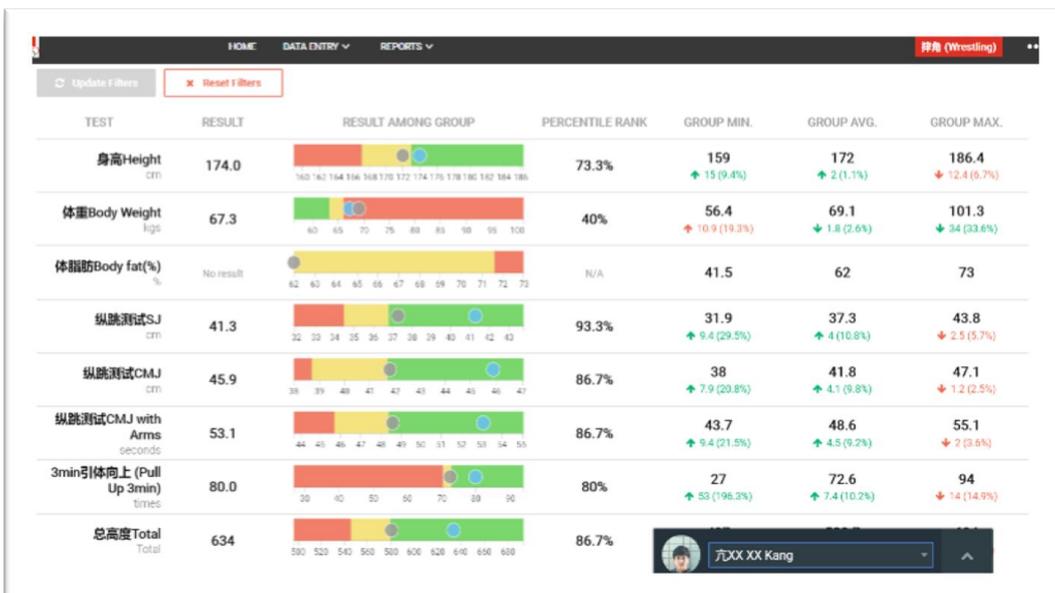


图15 体能训练大数据管理平台基础界面2: 个体管理

Figure 15. The Data Management Platform of Strength and Performance Training Basic Interface 2 - Individual Management

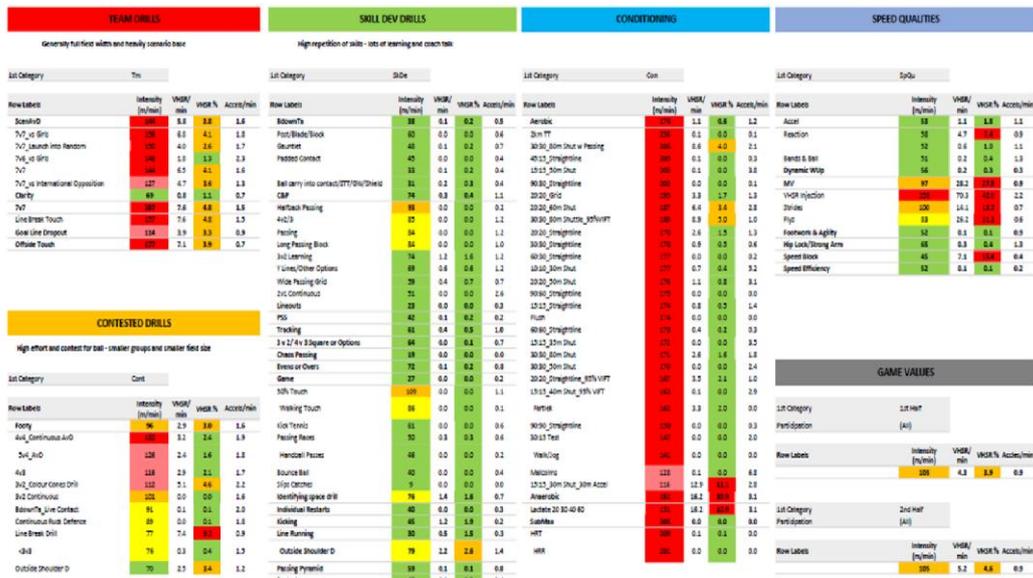


图 16 体能训练大数据管理平台基础界面 3: 数据管理

Figure 16. The Data Management Platform of Strength and Performance Training Basic Interface 3 - Data Management

数字化体能训练只是高水平运动员数字化和智能化训练的一个层次，数字化的理念还可以应用在个体项目的专项技术中和对抗性项目与集体球类项目的技战术训练中。国际上已出现数字化足球场、数字化篮球场及数字化田径场，目前的发展趋势是将数字化体能训练设备与数字化跑道、数字化球场等进行“联网”，共同形成综合的数字化训练系统，进一步应用卫星定位、人工智能、视频识别、云计算等高科技技术，对运动员多维度的训练数据进行采集、管理、综合分析和应用，实现对运动员长期训练负荷适应、竞技状态、运动损伤风险等方面的发展趋势预测和监控，这显然已经成为高水平运动队训练和管理的一种必然趋势，同时也提示广大科研人员只有通过不断的实践和探索才能够使数字化体能训练的理念和方法发挥更大的作用。

参考文献:

[1] 崔冬冬,王美. OmegaWave系统评价足球运动员身体机能的实验研究[J]. 山东体育学院学报, 2011, 27(4):45-48.  
 [2] 弗拉基米尔 M 扎齐奥尔斯基, 威廉 J 克雷默. 力量训练的科学和实践[M]. 北京: 北京体育大学出版社, 2011.  
 [3] 樊云彩, 闫琪. 利用心率变异性分析和疲劳监测系统对花样游泳运动员体能训练负荷的监控研究[C]//第四届(2016)全国运动生理与生物化学学术会议——运动·体质·健康论文汇编, 2016:36-37.  
 [4] 樊云彩, 王晓坤. 花样游泳运动员间歇性无氧耐力专项体能训练负荷的监控研究[C]//2017年全国竞技体育科学论文报告会汇编, 2017:88-89.  
 [5] 黄龙祥, 高炳宏. 运用OmegaWave Sport Technology System诊断优秀女子排球运动员中枢疲劳的初步研究[J]. 体育科研, 2016,

37(3):96-99.  
 [6] 何黎娴, 邱俊强, 王丽萍, 等. 采用心率变异性指标监控竞走运动员赛前状态的研究[J]. 北京体育大学学报, 2013, 136(11):66-69.  
 [7] 李晓彤, 闫琪, 等. First beat心率变异性监控系统在优秀摔跤运动员赛前训练及恢复中的应用[C]//2017年全国竞技体育科学论文报告会论文摘要汇编, 2017:196-197.  
 [8] 刘迅雷, 刘志强. 田径运动员心率变异性正常值及其重复性的研究[J]. 北京体育大学学报, 2005, 28(10):1364-1366.  
 [9] 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]. J Appl Physiol (1985), 2002, 93(4):1318-1326.  
 [10] ALEXIOUS H, COUTTS A J. A comparison of methods used for quantifying internal training load in women soccer players[J]. Int J Sports Physiol Perform, 2008, 3(3):320-330.  
 [11] AMTMANN J A, AMTMANN K A, SPATH W K. Lactate and rate of perceived exertion responses of athletes training for and competing in a mixed martial arts event[J]. J Strength Cond Res, 2008, 22(2):645.  
 [12] BALSALOBRE-FERNANDEZ C, MARCHANTE D, BAZ-VALLE E, et al. Analysis of wearable and smartphone-based technologies for the measurement of barbell velocity in different resistance training exercises[J]. Front physiol, 2017, 8: 649.  
 [13] BERKOFF D J, CAIRNS C B, SANCHEZ L D. Heart rate variability in elite American track-field athletes[J]. J Strength Cond Res, 2007, 21(1):227-231.  
 [14] BOBBERT M F. Drop jumping as a training method for jumping ability[J]. Sports Med, 1990, 9(1):7.  
 [15] BOURNE N D. Fast science: A history of training theory and methods for elite runners through 1975[D]. The University of Texas at Austin, 2008:1-484.

- [16] BRIDGEMAN L, MCGUIGAN M, GILL N. Eccentric exercise as a training modality: A brief review[J]. *J Aust Strength Cond*, 2015,23(5):52 - 65.
- [17] CARAZO-VARGAS P J, MONCADA-JIMENEZ J. The effect of reduced training volume during tapering on kicking response in Taekwondo competitors[C]// *Acsm, Meeting, World Congress on Exercise Is Medicine® and World Congress on the Basic Science Exercise and the Brain*, 2017.
- [18] CARDINALE M, NEWTON R, NOSAKA K. *Strength and Conditioning: Biological Principles and Practical Applications* [M]. Hoboken: Wiley, 2011.
- [19] TACK C. Evidence-based guidelines for strength and conditioning in mixed martial arts[J]. *Strength Cond J*, 2013, 35(5):79-92.
- [20] CUADRADO-PENAFIEL V, ÁGUILA A D, CASTANO A, *et al*. Velocity-based VS. traditional strength training in professional soccer players[J]. *J Strength Cond Res*, 2014, 28(11):28-29.
- [21] DAN L. *High-Performance Training for Sports-Dan Lewindon* [M]. Champaign, IL: Human Kinetics Inc, 2014.
- [22] DOLEZAL S M, FRESE D L, LLEWELLYN T L. The effects of eccentric, velocity-based training on strength and power in collegiate athletes[J]. *Int J Exerc Sci*, 2016, 9(5):657-666.
- [23] FLANAGAN E P, JOVANOVIC M. Researched applications of velocity based strength training[J]. *J Aust Strength Cond*, 2014(2):58-69.
- [24] GASTIN P B, MEYER D, ROBINSON D. Perceptions of wellness to monitor adaptive responses to training and competition in elite Australian football[J]. *J Strength Cond Res*, 2013, 27(9): 2518-2526.
- [25] GEHRI D J, RICARD M D, KLEINER D M, *et al*. A comparison of plyometric training techniques for improving vertical jump ability and energy production[J]. *J Strength Cond Res*, 1998, 12 (2): 85-89.
- [26] GONZALO-SKOK O, TOUS-FAJARDO J, VALERO-CAMPO C, *et al*. Eccentric-overload training in team-sport functional performance: Constant bilateral vertical versus variable unilateral multidirectional movements[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 2016, 12(7):951.
- [27] GONZALEZ A M, HOFFMAN J R, ROGOWSKI J P, *et al*. Performance changes in NBA basketball players vary in starters vs. nonstarters over a competitive season[J]. *J Strength Cond Res*, 2013, 27(3):611.
- [28] GONZÁLEZ-BADILLO J J, SÁNCHEZ-MEDINA L. Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training[J]. *Int J Sports Med*, 2010, 31(05): 347-352.
- [29] HALPEIN I, HUGHES S, CHAPMAN D W. Physiological profile of a professional boxer preparing for Title Bout: A case study[J]. *J Sports Sci*, 2016, 34(5):1.
- [30] HIRSCH S M, FROST D M. Velocity-based training: exploring the potential implications of training with absolute versus relative velocities[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2017, 49:1053-1054.
- [31] IZQUIERDO M. Effect of loading on unintentional lifting velocity declines during single sets of repetitions to failure during upper and lower extremity muscle actions[J]. *Int J Sports Med*, 2006,27:718-724.
- [32] KAWAMORI N, NEWTON R U. Velocity specificity of resistance training[J]. *Strength Cond J*, 2006, 28(2):86-91.
- [33] LAFORGIA J, WITHERS R T, GORE C J. Effects of exercise intensity and duration on the excess post-exercise oxygen consumption[J]. *J Sports Sci*, 2006, 24(12):1247-1264.
- [34] LENETSKY S, HARRIS N. The mixed martial arts athlete: A physiological profile[J]. *Strength Cond J*, 2012, 21(34):32-47.
- [35] LIN C H, LIN S H, JANG F L. Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2011, 43(9): 1725.
- [36] LOVELL D I, BOUSSON M, MCLELLAN C. The use of performance tests for the physiological monitoring of training in combat sports: A case study of a world ranked mixed martial arts fighter[J]. *J Athl Enhanc*, 2012, 02(1).
- [37] MANN B, IVEY P A, SAYERS S P. Velocity-based training in football[J]. *Strength Cond J*, 2015,37(6):52-57.
- [38] MAROTOIZQUIERDO S, GARCIALOPEZ D, FERNANDEZGONZALO R, *et al*. Skeletal muscle functional and structural adaptations after eccentric overload flywheel resistance training: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Sci Med Sport*, 2017, 20:943-951.
- [39] MARSHALL B M, MORAN K A. Which drop jump technique is most effective at enhancing countermovement jump ability, "countermovement" drop jump or "bounce" drop jump?[J]. *J Sports Sci*, 2013, 31(12):1368-1374.
- [40] MCGUIGAN M. *Monitoring Training and Performance in Athletes*[M]. Champaign, IL: Human Kinetics Inc, 2017.
- [41] MORALES J, ALAMO J M, GARCIAMASSO X, *et al*. Use of heart rate variability in monitoring stress and recovery in judo athletes[J]. *J Strength Cond Res*, 2014, 28(7):1896.
- [42] MITROFF S R, FRIESEN P, BENNETT D, *et al*. Enhancing ice hockey skills through stroboscopic visual training: A pilot study[J]. *Athl Train Sports Health Care*, 2013, 5(6):261-264.
- [43] MORALES J, GARCIA V, GARCIAMASSO X, *et al*. The use of heart rate variability in assessing precompetitive stress in high-standard judo athletes[J]. *Int J Sports Med*, 2012, 34(02):144-151.
- [44] NEWTON R U. Application of strength diagnosis[J]. *Strength Cond J*, 2002, 24(5):50.
- [45] NEWTON R U, ROGERS R A, VOLEK J S, *et al*. Four weeks of optimal load ballistic resistance training at the end of season attenuates declining jump performance of women volleyball players[J]. *J Strength Cond Res*, 2006, 20(4):955-961.
- [46] NORRBRAND L, POZZO M, TESCH P A. Flywheel resistance training calls for greater eccentric muscle activation than weight training[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2010, 110(5):997.
- [47] NUMMELA A, HYNYNEN E, KAIKKONEN P, *et al*. Endurance

- performance and nocturnal HRV indices[J]. *Int J Sports Med*, 2010, 31(03):154-159.
- [48] PAREJA-BLANCO F, RODRIGUEZ-ROSELL D, SANCHEZ-MEDINA L, *et al.* Effect of movement velocity during resistance training on neuromuscular performance[J]. *Int J Sports Med*, 2014, 35(11): 916-924.
- [49] RAMIREZ J M, NUNEZ V M, LANCHO C, *et al.* Velocity based training of lower limb to improve absolute and relative power outputs in concentric phase of half-squat in soccer players[J]. *J Strength Cond Res*, 2014, 29(11): 3084-3088.
- [50] PARRADO E, GARCIA M A, RAMOS J, *et al.* Comparison of Omega Wave System and Polar S810i to detect R-R intervals at rest[J]. *Int J Sports Med*, 2010, 31(05):336-341.
- [51] RATAMESS N A, HOFFMAN J R, KRAEMER W J, *et al.* Effects of a competitive wrestling season on body composition, endocrine markers, and anaerobic exercise performance in NCAA collegiate wrestlers[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2013, 113(5):1157-1168.
- [52] RAYA-GONZALEZ J, SUAREZ-ARRONES L, RISQUEZ A, *et al.* Short-term effects of an eccentric-overload training program on the physical performance on U-16 elite soccer players (In Spanish)[J]. *Retos Nuevas Tendencias En Educación Física Deporte Y Recreación*, 2018, 33(33):106-111.
- [53] RUDDOCK A, WILSON D C, THOMPSON S W, *et al.* Strength and conditioning for professional boxing: Recommendations for physical preparation[J]. *Strength Cond J*, 2016, 38(3).
- [54] SANDS W A, KAVANAUGH A A, MURRAY S R, *et al.* Modern techniques and technologies applied to training and performance monitoring[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 2017, 12(Suppl 2):1-29.
- [55] SCOTT B R, LOCKIE R G, KNIGHT T J, *et al.* A comparison of methods to quantify the in-season training load of professional soccer players[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 2013, 8(2):195.
- [56] SLIMANI M, DAVIS P, FRANCHINI E, *et al.* Rating of perceived exertion for quantification of training and combat loads during combat sport-specific activities: A short review[J]. *J Strength Cond Res*, 2017, 31(10):2889.
- [57] VOGT M, HOPPELER H H. Eccentric exercise: mechanisms and effects when used as training regime or training adjunct[J]. *J Appl Physiol*, 2014, 116(11):1446-1454.
- [58] WALSH M, ARAMPATZIS A, SCHADE F, *et al.* The effect of drop jump starting height and contact time on power, work performed, and moment of force[J]. *J Strength Cond Res*, 2004, 18(3):561-566.