中国体育科技
2021年（第57卷）第11期
CHINA SPORT SCIENCE AND TECHNOLOGY
Vol.57, No.11, 38-44, 2021

文章编号：1002-9826（2021）11-0038-07
DOI：10. 16470/j. csst. 2021011

离心超负荷飞轮抗阻训练综述
Summary of Eccentric Overload Flywheel Resistance Training

翁盈盈，魏宏文*
WENG Yingying，WEI Hongwen*

摘　要：对离心超负荷飞轮抗阻训练相关研究进行综述，厘清离心超负荷飞轮抗阻训练的起源、发展以及利弊，探究其改善神经肌肉功能，提高肌肉内、肌肉间协调和运动单元募集能力的机制。离心超负荷飞轮抗阻训练源于预防航天员在太空失重环境下的肌肉萎缩问题，后来被运用到康复领域，再逐渐被运用到高水平竞技体育。离心超负荷飞轮抗阻训练受两种生理机制影响：1）离心阶段增加负载使肌肉牵张反射的刺激更强大。2）提高神经肌肉募集能力。离心超负荷飞轮抗阻训练在改善肌肉萎缩和老年人生活表现方面效果明显，在预防运动损伤、促进康复恢复和中枢神经系统的适应性方面具有优越性。离心超负荷飞轮抗阻训练在发展最大力量、增加肌肉肥大以及提高神经适应上优于传统力量训练。

关键词：离心训练；超负荷；飞轮；抗阻训练；神经肌肉系统

Abstract: By summarizing the research on eccentric overload flywheel resistance training, this study aims to clarify the origin and development of eccentric overload flywheel resistance training as well as its advantages and disadvantages, explore the mechanism and its abilities of improving neuromuscular function, increasing inter-muscular coordination and the recruitment of motor neuron units. The eccentric overload flywheel resistance training originated from the training of astronauts, tackling the muscular atrophy problem of the astronauts in the weightless environment in the aerospace, and it was gradually applied to the field of rehabilitation and then to the field of high-level competitive sports. The eccentric overload flywheel resistance training is affected by two physiological mechanisms: 1) The increased load in the eccentric stage stimulates the muscle stretch reflex. 2) Improve the ability of motor neuron recruitment. The eccentric overload flywheel resistance training has obvious effects in improving muscle atrophy and daily life performance in elderly people, and it has superiorities in injury prevention, rehabilitation and adaptability of the central nervous system. Furthermore, the eccentric overload flywheel resistance training is better than the traditional resistance training in the aspects of the development of maximum strength, the increase of muscle hypertrophy and improvement of neuronal plasticity.

Keywords: *eccentric training; overload; flywheel; resistance training; neuromuscular system*
中图分类号：G804.6　　**文献标识码**：A

随着竞技水平和比赛密度的不断提高，对运动员身体素质的要求也越来越高。力量素质是运动员体能训练发展水平的重要标志之一，近年备受认同，并广泛应用于各项运动训练中，以实现既定目标（Lloyd et al.，2014）。力量训练有许多模式和方法，通过调整多种变量来提高运动成绩和机体的生理适应能力。传统力量训练大多使用自由重量和固定机械进行训练。由于受到人体生物力学中力臂的影响，在传统力量训练过程中，肌肉在不同关节角度下所克服阻力的大小不同，肌肉在粘滞点所克服的最大阻力是肌肉向心收缩的最大负荷（Norrbarand et al.，2010）。因此，在传统力量训练模式中，肌肉的最大募集只发生在练习者即将完成不了动作的那一刻，在其余的收缩环节中只激活了少量的肌纤维。由于向心阶段的力量限制离心阶段的负荷强度的大小（Moritani et al.，

基金项目：
河北省创新能力提升计划项目（19245709D）；国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项（2018YFF0300801）

第一作者简介：
翁盈盈（1993-），女，硕士，主要研究方向为体能训练的理论与实践，E-mail：869413775@qq.com。

***通信作者简介**：
魏宏文（1972-），男，副教授，博士，硕士研究生导师，主要研究方向为体能训练的生物学机制，E-mail：weihw@bsu.edu.cn。

作者单位：
北京体育大学，北京 100084
Beijing Sport University, Beijing 100084, China.

1987），肌肉离心收缩可产生比向心收缩更大的力量（Alkner et al.，2003）。离心训练相比于向心训练具有能耗少、负荷大、训练效果好等优点。离心训练在增强肌腱刚度、促进膝关节的前交叉韧带（anterior cruciate ligament，ACL）重建后恢复和增强心血管机能等方面也具有较好效果。相比于小负荷的离心训练，大负荷强度的离心训练在发展肌肉力量和肌肉围度方面有更显著的效果（English et al.，2014；Damasceno et al.，2015）。但是，传统力量训练在离心训练阶段无法提供较大的负荷强度，只能激活最大离心负荷的40%～50%（Dudley et al.，1991）。为此，科研人员和教练员不断地探索新的训练方法，以发现提高运动员最大力量和运动表现的“最佳”训练方式。

近年，将离心收缩和抗阻训练相结合的离心超负荷飞轮抗阻训练成为力量训练的热点，这种能在离心阶段提供负荷刺激阻力的训练已被广泛应用于各个领域。离心超负荷飞轮抗阻训练利用飞轮片进行抗阻训练，不涉及生物力学的杠杆问题，飞轮片旋转的惯性使绳索在突然加速和控制减速中让肌肉迅速充分抵抗阻力，使机体始终保持最大力量，加大离心力量的刺激，对不同程度力量的适应性强。由于不涉及生物力学的杠杆问题，因而既能保证最大力量，又能最大限度地发展肌肉离心收缩力，增加了抗阻训练的多样性。

1　离心超负荷飞轮抗阻训练的概念

飞轮抗阻训练器主要利用飞轮转动产生阻力来进行训练，其原理是系绳以Yo-Yo TM相似的方式缠绕在飞轮体上，通过肌肉做向心运动使绳子解开（绳子被拉直），绳子通过轴承连接飞轮，使其开始转动并同时储存能量，产生的动能会随着转动速度的增加而增加（Berg et al.，1994）。飞轮自身转动的惯性会将绳索绕回于飞轮上，向心阶段结束肌肉即刻做离心运动，随即产生向心-离心的循环。在绳索重绕的离心阶段负荷强度大于向心阶段，即离心超负荷。

Francis Landes于1796年发明了全身运动悠悠球装置（Yo-Yo™，飞轮抗阻训练器的前身）。此装置类似将悠悠球的底部固定，悠悠球的绳索不间歇地上下运动，利用惯性产生快速的加速、减速动力。August Krogh等在20世纪上半叶使用这一原理进行了一系列实验探索，其主要方向是研究骨骼肌的生物力学。20世纪80年代，航天航空事业迅速崛起，但航天员在太空失重环境下造成的肌肉萎缩问题一直困扰着医学界。传统的杠铃和哑铃都不适用于太空失重环境，亟需一种能代替传统杠铃、哑铃的抗阻训练器械在太空失重环境下进行抗阻训练，预防航天员肌肉萎缩问题。Berg等（1994）介绍了利用飞轮抗阻训练器的惯性原理进行抗阻训练，因其不依靠重力作用产生阻力，可使航天员在太空中进行力量训练，防止航天员肌肉萎缩或力量下降，有效解决失重环境下对航天员骨骼肌产生的消极影响。Berg等（1994）在对飞轮抗阻训练产生的肌肉变化的研究中，利用肌电图分析发现该装置能产生更大的离心收缩力，对增加肌肉力量效果更好。这项研究成果为航天航空事业提供了巨大的支持，为航天员太空飞行中的训练提供了帮助，解决了航天员太空飞行的肌肉萎缩问题。

在此基础上，科研人员又设计出了Inertial Training and Measurement System（ITMS）、Kbox（Exentric，Sweden）和Versapully（VP，Costa Mesa，CA，USA）等器械，使飞轮抗阻训练器更方便地应用于各种运动平台。这种训练设备不仅适用于航天员训练，还适用于各个领域。离心超负荷飞轮抗阻训练在康复和损伤预防计划中已成为较受欢迎的抗阻训练模式（Askling et al.，2003；Fernandez-Gonzalo et al.，2014a；Romero-Rodriguez et al.，2011），同时，也被广泛应用于竞技运动项目（Hoyo et al.，2015a，2015b；Tous-Fajardo et al.，2016）的训练中，弥补了传统抗阻训练向心阶段和离心阶段无法刺激肌肉最大化激活（Norrbrand et al.，2011；Yoshida et al.，2016）的弊端。现在的飞轮抗阻训练设备加入了生物电阻装置和蓝牙传输程序，能对训练数据进行实时监控，给予教练员实时反馈帮助，也可根据训练需求和计划有目的和针对性地发展向心或离心收缩力的大小，使运动训练更科学。

2　离心超负荷飞轮抗阻训练的作用机制

离心超负荷训练能使机体承受更大的负荷，募集更多的运动单元。主要是因为使用飞轮抗阻训练器进行训练时，向心阶段与离心阶段产生的冲量是由力和时间两个因素决定，即$I=F\times t$。如果离心时用较短的时间（即较小动作范围内）去抵抗向心阶段产生的冲量，就会在离心阶段产生更大的负荷（Berg et al.，1994；Tous-Fajardo et al.，2006）。也有学者认为，飞轮抗阻训练产生离心超负荷是因为飞轮器械以惯性能量守恒的形式提供阻力，当练习者结束向心收缩即刻做离心收缩时，由于其迅速释放向心阶段储存的能量，要尽可能快地回到原始状态，所以在离心阶段初期有着超大的角加速度和更大的力矩，需要练习者克服更大的阻力完成离心超负荷训练（Tinwala et al.，2017）。

飞轮抗阻训练器能在离心阶段提供大约125%的向心负荷，并在每组训练的每一个循环都能维持该比例，同时飞轮抗阻训练器可产生动态变化的适应性阻力（Norrbrand et al.，2008）。飞轮抗阻训练器所产生的阻力与练习者的发力程度正相关（Chiu et al.，2006），即在向心收缩时飞轮产生的转动速度越大，飞轮储存的能量越大，离心阶段承受的负荷就越大，离心超负荷的训练效果也更好（Sabido et al.，2017）。这要求练习者在每一次动作中都

需要尽最大努力完成，才能产生最好的训练效果。飞轮抗阻训练器在训练过程中从第一次训练动作到最后一次动作都能发挥出最大力量（Norrbarand et al.，2010），随着训练的进行和练习者的身体机能疲劳情况变化，阻力的不断变化为练习者的每一次训练都提供了机体能够完成的最大负荷（Berg et al.，1994）。

现有研究表明，离心超负荷飞轮抗阻训练的优势主要表现在以下两方面：肌肉牵拉产生牵张反射和神经肌肉募集能力。

2.1 牵张反射

肌肉在被拉长的同时会产生较大的张力，称为牵张反射。随着离心收缩力的增加，肌肉会产生较大的张力，同时可显著增加肌肉围度。

Norrbrand等（2008）对17名健康男性进行5周飞轮抗阻训练与传统抗阻训练，发现飞轮抗阻训练使肌肉产生较大的离心收缩力，更好地提高肌肉运动能力，使肌肉围度增加程度更大。Chiu等（2006）也认为，使用飞轮进行爆发力推举训练的效果优于传统杠铃训练。Friedmann-Bette等（2010）发现，飞轮抗阻训练器可更有效地发展II型肌纤维，一个循环的飞轮动作通常会在一个非常短的时间内完成，产生动能消耗的时间被压缩，因此会产生更大的离心峰值力和功率。Maroto-Izquierdo等（2017a）发现，飞轮抗阻训练时较大的离心收缩产生牵张反射，刺激肌肉产生更大的张力，能更好地提高跳跃能力、跑步速度和爆发力。Maroto-Izquierdo等（2017b）将29名专业手球运动员随机分成实验组和对照组，进行为期6周的训练，实验组1 RM、反向纵跳（countermovement jump，CMJ）、静蹲跳（static jump，SJ）显著改善。

2.2 神经肌肉募集

神经肌肉募集可用离心利用率（eccentric utilization ratio，EUR）和力量发展速率（rate of force development，RFD）来评价。EUR表示各种运动项目和不同阶段训练中的拉长缩短周期（stretch-shortening cycle，SSC）运动表现，SSC反映下肢肌肉的拉长-缩短运动（杨麒，2019）。RFD表示单位时间内发力的速率，主要用以反映神经的募集功能（侯世伦 等，2015）。李志远等（2019）发现，短时间的SSC运动可改善神经系统提高肌肉的肌群RFD，并提高肌肉的快速发力能力。Fernandez-Gonzalo等（2014c）发现，离心超负荷飞轮抗阻训练和传统深蹲训练后下肢肌群RFD的变化存在差异，离心超负荷飞轮抗阻训练的RFD显著优于传统深蹲组。Stasinaki等（2019）对离心超负荷飞轮抗阻训练进行快速和慢速的分组干预，发现快速下蹲组的RFD提高显著。离心超负荷飞轮抗阻训练的RFD在训练后会显著提高，神经系统募集肌肉能力、肌肉内、肌肉间协调能力也会提高，肌肉力量和收缩速度会增加。Fernandez-Gonzalo等（2014c）还发现，慢性中风患者进行飞轮抗阻训练后，其步态、平衡等得到了提高，这可能是因为提高了神经系统对肌肉的动员和控制能力。

Taipale等（2010）发现，飞轮抗阻训练对力量的提升并非源于肌肉结构的改变，而是源自对神经系统的适应，通过力量训练激活神经及肌肉，更有效地募集运动单元，保持运动神经元兴奋，减少对高尔基（Golgi）腱器官的抑制，显著增强神经的适应性。换言之，飞轮抗阻训练增加了对弹性肌肉能量的储存和再利用的能力，对防止肌肉损伤有保护作用。飞轮抗阻训练在离心收缩的后1/3发力，可在腘绳肌拉长的情况下承受更多的负荷刺激（Tous-Fajardo et al.，2006），这对预防肌肉拉伤有更好的训练效果。

3 离心超负荷飞轮抗阻训练的优势利弊

骨骼肌通过收缩产生动作，肌肉收缩产生力，传递到肌腱，再传递到骨，最终使关节运动。肌肉运动反映在肌肉长度的改变可分为两类：1）等长收缩，肌肉输出力量但其长度不改变。2）动力性收缩，肌肉产生力量，使关节产生位移并改变肌肉长度。肌肉收缩时，长度变短的收缩称为向心收缩，肌肉在收缩产生张力的同时被拉长的收缩，被称为离心收缩（王瑞元 等，2017）。离心收缩被证明在促进神经肌肉适应性等各方面具有一定的优越性（Nardone et al.，1989；Reeves et al.，2009）。使用飞轮设备进行训练时，肌肉为了抵抗飞轮绳索转动产生的力，不断地进行向心-离心-向心-离心收缩的循环模式，肌肉先做离心式拉长，然后做向心式收缩，这种肌肉周期运动被称为拉长缩短周期（stretch-shortening cycle，SSC）（Komi et al.，1987）。

与在离心和向心阶段运动负荷相等的常规阻力训练相比，飞轮抗阻训练在离心阶段的离心负载、阻力负荷以及适应动态变化的刺激下能更好地发挥自身优势。飞轮抗阻训练不仅能在向心收缩阶段最大限度地激活运动单元，而且还能在离心收缩阶段产生比传统训练方式更大的肌肉刺激。有研究指出，传统训练方式在离心阶段只能提供最大离心负荷的40%～50%（Dudley et al.，1991），因此，传统训练方式无论在向心阶段还是离心阶段都无法对肌肉造成最大化刺激。而飞轮训练器可以在离心阶段提供约125%的向心负荷，并且每次肌肉收缩都可以维持该比例，相较传统的慢速离心训练也产生了更大的峰值力量（Norrbrand et al.，2008）。

此外，飞轮抗阻训练还可有效降低运动员在激烈比赛中腘绳肌和股四头肌拉伤的发生率（Askling et al.，2003）。Hoyo等（2015a）进一步证明，经过飞轮抗阻训练后的足球运动员总受伤率下降，反向纵跳和20 m短跑能力也得到显著提高。Gual等（2016）对4支篮球和4支排球队伍中的43名男性和38名女性运动员随机分为实验组和对照组，进行为期24周的飞轮干预，发现飞轮抗阻训练能够增强个体下肢力量和跳跃能力，降低髌骨肌腱炎

的症状。Owerkowicz 等（2016）、Núñez 等（2017）发现，同期进行飞轮抗阻与有氧训练，在提高肌肉围度和力量发展的同时可有效提高有氧能力，不仅能产生良好的神经适应性，还可更有效地提高糖酵解供能时的功率输出。

离心超负荷飞轮抗阻训练利用飞轮片和绳索进行阻力训练，方位上可以在三维空间中任意运用，拥有执行更复杂或特定动作的可能性，还可改变力/速度的比值进而增加抗阻训练的多样性。

飞轮抗阻训练的主要优点包括：1）预防肌肉拉伤；2）增强韧带的强度和防止软组织损伤；3）发展肌肉力量、促进肌肉肥大；4）显著增强神经适应；5）有利于运动表现提高；6）基于现有研究表明训练效果优于传统训练方法。

飞轮离心训练器除了对运动机能的优势外，还有其自身独有的优势：1）设备设计简单，利用物理定律实现有效的离心超负荷训练；2）在任何环境下（占地面积小）提供短时高强度的训练；3）在三维空间中任意运用；4）集训练和测试于一体，既可进行训练，也可进行测试，还可实时观测数据给予实时反馈。

但飞轮抗阻训练也伴随一些缺陷：1）器械训练操作不够灵活（一次只能一人训练），对于集体项目来说较为繁琐，需要耗费大量的时间成本；2）飞轮抗阻训练的动态变化适应使强度不易控制，负荷方案仍有待建立；3）对于初期基础薄弱学者容易发生安全问题（后翻现象），需要在专业人员监督下执行；4）器械费用昂贵，设备易损毁。

4 离心超负荷飞轮抗阻训练的应用前景

相关研究强调提高离心力量的优点，离心训练与向心训练相比，在促进肌肉肥大和力量发展方面有更好的效果（Mendez-Villanueva et al.，2016）。离心收缩比向心收缩需要更低的代谢成本（Dudley et al.，1991），并且能诱发更高的II型纤维（Duchateau et al.，2014）。离心训练还可使高水平运动员的训练效果提高（即在更短的时间内更好地适应）（Tesch et al.，2010）。在离心训练的安排中，离心收缩和抗阻训练相结合的离心阻力训练成为研究热点（Tesch et al.，2017），能提供离心负载的飞轮等惯性阻力训练是众多离心训练中最广为人知的一种，经常被应用于航天航空、人民健康和竞技体育领域。其训练作用已被研究证实（Croisier et al.，2002；Naczk et al.，2016；Onambélé et al.，2008；Ueno et al.，2020）。

4.1 离心超负荷飞轮抗阻训练预防肌肉萎缩

飞轮抗阻训练最初应用于预防航天员的肌肉萎缩。研究表明，飞轮抗阻训练的独特离心负载能增加磷酸果糖激酶的表现。Fernandez-Gonzalo 等（2014b）指出，飞轮抗阻训练能起到预防肌肉萎缩的作用，飞轮抗阻可激活更多的运动单元，还可在离心阶段对机体产生更大的负荷强度，能很好地促使蛋白质合成、增加肌纤维长度和羽状角大小。Fang 等（2001）发现，利用飞轮进行阻力训练可引起骨骼肌肥大，有益于肌肉力量发展和肌电活动募集。Fernandez-Gonzalo 等（2014c）、Norrbrand 等（2008）和 Seynnes 等（2007）同样证明了飞轮抗阻训练与传统的抗阻训练相比在引起肌肉肥大方面效果更佳，并可在训练早期（3 周）实现肌肉横截面积的增加。Irimia 等（2017）研究表明，飞轮抗阻训练能抵消 84 天卧床所导致的肌肉代谢紊乱造成的肌肉萎缩问题。

4.2 离心超负荷飞轮抗阻训练改善老年人生活质量

飞轮抗阻训练在提高老年人的生活表现上有一定的优势，在加强肌腱刚度、平衡能力的同时防止肌肉萎缩，对预防老年人摔倒有较大的帮助。Onambele 等（2008）对年龄在 70 岁左右的受试者进行为期 12 周的飞轮干预，老年人的肌力、腓肠肌含量和伸肌功率有所增加，平衡性和肌腱刚度显著提高。Brzenczek-Owczarzak 等（2013）发现，飞轮抗阻训练相比传统训练能更有效地改善老年人平衡能力，在短期范围内有效提高女性老年人肩外展肌群的肌肉力量。Sarmiento 等（2014）发现，飞轮干预有益于女性老年痴呆患者改善步态质量，提高踝关节伸肌和足底屈肌肌力。Lepley 等（2015）的研究也得到类似的结论，研究将健康男性（70 岁）分为两组，同时进行飞轮抗阻训练和高强度有氧训练的干预，受试者 8 周后的肌肉张力和体积分别提高 10% 和 5%。因此，对老年人进行飞轮干预不仅有效提高下肢肌肉力量和肌腱刚度，还能增强其神经肌肉适应性以及抵抗疲劳的能力。

4.3 离心超负荷飞轮抗阻训练预防运动损伤

离心超负荷飞轮抗阻训练可促进肌肉和肌腱适应，有利于提高运动表现并防止损伤。Askling 等（2003）对瑞典超级足球联赛的 30 名足球运动员中的一半球员在常规训练基础之上增加飞轮抗阻训练干预，发现在整个赛季中飞轮干预组运动员的腘绳肌拉伤率显著低于未接受训练的球员。Coratella 等（2016）研究发现，肌肉损伤一般有肌酸激酶（creatine kinase，CK）活性升高、股四头肌等长峰值扭矩降低以及肌肉酸痛等特征。其对 13 名健康男性开展了为期 4 周的飞轮干预，结果发现，个体的肌肉酸痛感降低，股四头肌峰值力矩和 CK 降低，这在一定程度上降低了运动损伤的发生。Monajati 等（2021）进行了为期 6 周的干预实验，比较了飞轮抗阻训练和自重训练对腘绳肌和 ACL 拉伤发生率的影响，结果表明，6 周的飞轮抗阻训练能更好地保护运动员免受腘绳肌和 ACL 的损伤，提高短距离冲刺能力。

离心超负荷飞轮抗阻训练在肌腱损伤后恢复方面也显示了有效性（Romero-Rodriguez et al.，2011）。飞轮抗阻训练通过高强度离心负荷，短期、低量的训练模式能有效提高肌肉-肌腱功能并降低主观疼痛感（Niewiadomski et al.，2008）。

4.4　离心超负荷飞轮抗阻训练提高运动能力

力量素质是运动员体能训练发展水平的重要指标之一，是决定运动表现的关键因素，并在一定程度上决定着其他身体素质的发展。传统的抗阻力量只能在向心收缩过程中的某一点才能出现力量最大激活（Niewiadomski et al.，2008），飞轮训练利用旋转飞轮的惯性，在耦合向心和离心肌肉动作过程中提供了离心过载和无限的阻力。因此，与传统抗阻相比，飞轮抗阻训练的效果更优。有研究证明，飞轮抗阻训练在力量、爆发力、肌肉质量的增加和神经激活的提高等方面均优于常规抗阻的训练效果（Fernandez-Gonzalo et al.，2014b；Lundberg et al.，2014；Norrbarand et al.，2010；Onambélé et al.，2008）。

飞轮装置的使用在优化运动性能与提高竞技运动表现方面也具有实际意义。Norrbrand等（2008）发现，在飞轮抗阻训练5周后肌肉体积增加了6%，而传统的重心训练5周后，肌肉体积仅增加了3%。Gual等（2016）发现，在经过一段时间的飞轮抗阻训练后，个体的下肢力量输出会有所提高。Sarmiento等（2014）发现，一些与运动成绩相关的参数，如线性冲刺、改变方向、反动作跳跃和单侧三级跳远的能力在一定程度上也得到了提升。

Naczk等（2016）对14名年轻的健将级游泳运动员进行持续4周的训练，训练安排为在常规游泳训练的基础上每周增加3次上臂肌群的飞轮干预。结果表明，经过4周的干预，实验组的肌力增加了12.8%，爆发力增加了14.2%，运动员在100 m蝶泳和50 m自由泳的游泳速度显著提高（Naczk et al.，2016）。Owerkowicz等（2016）对8名男性和9名女性运动员进行为期5周的飞轮抗阻干预，结果表明，3 RM强度提高18%，股四头肌横截面积提高10%。Hoyo等（2015a）对U17～U19青少年足球精英运动员进行为期10周、每周1～2次、每次3～6组、重复6次的飞轮半蹲干预研究，结果进一步证明了经过飞轮抗阻训练后的足球运动员损伤缺席天数和总受伤率会降低；此外，反向纵跳和20 m短跑能力也得到了显著提高。

5　现有研究的不足与未来研究方向

5.1　未来设计和实施飞轮训练方法的系统指南

研究人员和实践者需要对具体的运动方面提出明确的建议，如训练周期、训练时间、运动类型（运动方向、离心运动时的肌肉长度）、运动强度、休息间隔，有助于提高运动成绩。这些方面可以通过设计良好的随机对照试验来解决，研究比较飞轮训练和传统阻力训练的效果。

5.2　鲜见以女性运动员为被试的飞轮训练研究

Maroto等（2017b）指出，鲜见招募专业女性运动员的研究，飞轮训练在该群体中提高运动成绩的有效性还有待验证。年龄、性别、力量水平、训练历史等方面都会影响飞轮力量训练的急性反应和慢性适应，这对运动员的训练有重要影响。

5.3　飞轮训练的优势有待进一步验证

飞轮训练是传统阻力训练的有效替代方法，但尚无明确证据表明飞轮训练在优秀运动员中的优越性。与其他阻力训练方式相比，飞轮训练提供了独特的生理反应，因此，练习者应将飞轮和传统阻力训练结合在日常训练中，以达到对运动员的最佳效果。未来的研究有必要确定健全的指导方针和构建关于飞轮训练方法的客观共识，以帮助研究人员、从业人员和运动员在日常实践中实施飞轮训练。

5.4　个性化训练与监测

Weakley等（2019）讨论了旋转编码器的负载量化问题，由于所用实验程序的不一致，以及飞轮机器和惯性负载的多样性，其可靠性存在疑问。在训练实践中，基于受试者的体能水平、运动员的专项，设计和实施个性化的飞轮训练，并且进行训练监控，能够进一步提高飞轮训练的效率，尤其是在损伤预防与康复方面，目前鲜见探索性的研究。

6　总结

离心超负荷飞轮抗阻训练为力量训练和预防损伤提供了新的思路和方法，其在激发运动员最大力量的同时能有效提高神经系统和肌肉功能，对高水运动员有很大帮助，并且在减少损伤和康复领域也有较好的成效。

我国对离心超负荷飞轮抗阻训练的研究尚处于起始阶段，仍需要不断探索。在未来的研究中，可以应用在更多领域，针对高水平不同项目的运动人群确立相对优化的运动方案，制定合理的运动处方，打破以往运动过度或负荷不足的限制。

参考文献：

侯世伦，张新，王安利，2015. 下肢力量与负荷后恢复时间对后激活增强效应的影响[J]. 北京体育大学学报，38(5)：57-62.

李志远，虞松坤，杨铁黎，2019. 肌肉“拉长–缩短周期”运动理论及其在爆发力训练中的应用研究进展[J]. 中国运动医学杂志，38(3)：64-70.

王瑞元，苏全生，2017. 运动生理学[M]. 北京：人民体育出版社.

杨麒，2019. 健康男性青年下肢肌肉离心利用率与位移速度的关系[D]. 北京：北京体育大学.

ALKNER B A，BERG H E，KOZLOVSKAYA I，et al.，2003. Effects of strength training，using a gravity-independent exercise system，performed during 110 days of simulated space station confinement[J]. Eur J Appl Physiol，90(1-2)：44-49.

ASKLING C，KARLSSON J，THORSTENSSON A，2003. Hamstring injury occurrence in elite soccer players after preseason strength training with eccentric overload[J]. Scand J Med Sci Sports，13(4)：244-250.

BERG H E，TESCH A，1994. A gravity-independent ergometer to be used for resistance training in space[J]. Aviat Space Environ Med，65(8)：752-756.

BRZENCZEK-OWCZARZAK W，NACZK M，ARLET J，et al.，2013. Estimation of the efficacy of inertial training in older women［J］. J Aging Phys Act，21(4)：433-443.

CHIU L Z F，SALEM G J，2006. Comparison of joint kinetics during free weight and flywheel resistance exercise［J］. J Strength Cond Res，20(3)：555-562.

CROISIER J L，FORTHOMME B，NAMUROIS M H，et al.，2002. Hamstring muscle strain recurrence and strength performance disorders［J］. Am J Sports Med，30(2)：199-203.

CORATELLA G，CHEMELLO A，SCHENA F，2016. Muscle damage and repeated bout effect induced by enhanced eccentric squats［J］. J Sports Med Phys Fit，56(12)：1540-1546.

DAMASCENO M V，LIMA-SILVA A E，PASQUA L A，et al.，2015. Effects of resistance training on neuromuscular characteristics and pacing during 10-km running time trial［J］. Eur J Appl Physiol，115(7)：1513-1522.

DUCHATEAU J，BAUDRY S，2014. Insights into the neural control of eccentric contractions［J］. J Appl Physiol（1985），116(11)：1418-1425.

DUDLEY G A，TESCH P A，HARRIS R T，et al.，1991. Influence of eccentric actions on the metabolic cost of resistance exercise［J］. Aviat Space Environ Med，62(7)：678-682.

DURAND R J，KRAEMER R R，HOLLANDER D B，et al.，2003. Different effects of concentric and eccentric muscle actions on plasma volume［J］. J Strength Cond Res，17(3)：541-548.

ENGLISH K L，LOEHR J A，LEE S M，et al.，2014. Early-phase musculoskeletal adaptations to different levels of eccentric resistance after 8 weeks of lower body training［J］. Eur J Appl Physiol，114(11)：2263-2280.

FANG Y，SIEMIONOW V，SAHGAL V，et al.，2001. Greater movement-related cortical potential during human eccentric versus concentric muscle contractions［J］. J Neurophysiol，86(4)：1764-1772.

FERNANDEZ-GONZALO R，IRIMIA J M，CUSSO R，et al.，2014a. Flywheel resistance exercise to maintain muscle oxidative potential during unloading［J］. Aviat Spcae Environ Med，85(7)：694-699.

FERNANDEZ-GONZALO R，LUNDBERG T R，ALVAREZ-ALVAREZ L，et al.，2014b. Muscle damage responses and adaptations to eccentric-overload resistance exercise in men and women［J］. Eur J Appl Physiol，114(5)：1075-1084.

FERNANDEZ-GONZALO R，NISSEMARK C，ÅSLUND B，et al.，2014c. Chronic stroke patients show early and robust improvements in muscle and functional performance in response to eccentric-overload flywheel resistance training：A pilot study［J］. J Neuroeng Rehabil，doi：10.1186/1743-0003-11-150.

FRIEDMANN-BETTE B，BAUER T，KINSCHERF R，et al.，2010. Effects of strength training with eccentric overload on muscle adaptation in male athletes［J］. Eur J Appl Physiol，108(4)：821-836.

GUAL G，FORT-VANMEERHAEGHE A，ROMERO-RODRÍGUEZ D，et al.，2016. Effects of in-season inertial resistance training with eccentric overload in a sports population at risk for patellar tendinopathy［J］. J Strength Cond Res，30(7)：1834-1842.

HOYO M D，POZZO M，SAÑUDO B，et al.，2015a. Effects of a 10-week in-season eccentric-overload training program on muscle-injury prevention and performance in junior elite soccer players［J］. Int J Sports Physiol Perform，10(1)：46-52.

HOYO M D，TORRE D L，PRADAS F，et al.，2015b. Effects of eccentric overload bout on change of direction and performance in soccer players［J］. Int J Sports Med，36(4)：308-314.

IRIMIA J M，GUERRERO M，RODRIGUEZ-MIGUELEZ P，et al.，2017. Metabolic adaptations in skeletal muscle after 84 days of bed rest with and without concurrent flywheel resistance exercise［J］. J Appl Physiol（1985），122(1)：96-103.

KOMI P V，1987. Neuromuscular factors related to physical performance［J］. Med Sport Sci，26(1)：48-66.

LEPLEY L K，WOJTYS E M，PALMIERI-SMITH R M，2015. Combination of eccentric exercise and neuromuscular electrical stimulation to improve quadriceps function post-ACL reconstruction［J］. Knee，22(3)：270-277.

LLOYD R S，FAIGENBAUM A D，STONE M H，et al.，2014. Position statement on youth resistance training：The 2014 International Consensus［J］. Br J Sports Med，48(7)：498-505.

LUNDBERG T R，FERNANDEZ-GONZALO R，TESCH P A，2014. Exercise-induced AMPK activation does not interfere with muscle hypertrophy in response to resistance training in men［J］. J Appl Physiol，116(6)：611-620.

MAROTO-IZQUIERDO S，GARCÍA-LÓPEZ D，FERNANDEZ-GONZALO R，et al.，2017a. Skeletal muscle functional and structural adaptations after eccentric overload flywheel resistance training：A systematic review and meta-analysis［J］. J Sci Med Sport，20(10)：943-951.

MAROTO-IZQUIERDO S，GARCÍA-LÓPEZ D，PAZ J A D，2017b. Functional and muscle-size effects of flywheel resistance training with eccentric-overload in professional handball players［J］. J Hum Kinet，60：133-143.

MENDEZ-VILLANUEVA A，SUAREZ-ARRONES L，RODAS G，et al.，2016. MRI-based regional muscle use during hamstring strengthening exercises in elite soccer players［J］. PLoS One，doi：10.1371/journal.pone.0161356.

MONAJATI A，LARUMBE-ZABALA E，GOSS-SAMPSON M，et al.，2021. Injury prevention programs based on flywheel vs. body weight resistance in recreational athletes［J］. J Strength Cond Res，35(Suppl 1)：S188-S196.

MORITANI T，MURAMATSU S，MURO M，1987. Activity of motor units during concentric and eccentric contractions［J］. Am J Phys Med，66(6)：338-350.

NACZK M，NACZK A，BRZENCZEK-OWCZARZAK W，et al.，2016. Impact of inertial training on strength and power performance in young active men［J］. J Strength Cond Res，30(8)：2107-2113.

NARDONE A，ROMANO C，SCHIEPPATI M，et al.，1989. Selective recruitment of high-threshold human motor units during voluntary isotonic lengthening of active muscles［J］. J Physiol，409(1)：451-471.

NIEWIADOMSKI W，LASKOWSKA A D，GASIOROWSKA A，et al.，2008. Determination and prediction of one repetition maximum（1RM）：Safety considerations［J］. J Human Kinet，19(1)：109-120.

NORRBRAND L，FLUCKEY J D，POZZO M，et al.，2008. Resistance training using eccentric overload induces early adaptations in

skeletal muscle size[J]. Eur J Appl Physiol，102(3)：271-281.

NORRBARAND L，POZZO M，TESCH P A，2010. Flywheel resistance training calls for greater eccentric muscle activation than weight training[J]. Eur J Appl Physiol，110(5)：997-1005.

NORRBRAND L，TOUS-FAJARDO J，VARGAS R，et al.，2011. Quadriceps muscle use in the flywheel and barbell squat[J]. Aviat Space Environ Med，82(1)：13-19.

NÚÑEZ F J，SUAREZ-ARRONES L J，CATER P，et al.，2017. The high-pull exercise：A comparison between a versa pulley flywheel device and the free weight[J]. Int J Sports Physiol Perform，12(4)：527-532.

ONAMBÉLÉ G L，MAGANARIS C N，MIAN O S，et al.，2008. Neuromuscular and balance responses to flywheel inertial versus weight training in older persons[J]. J Biomech，41(15)：3133-3138.

OWERKOWICZ T，COTTER JA，HADDAD F，et al.，2016. Exercise responses to gravity-independent flywheel aerobic and resistance training[J]. Aerosp Med Hum Perform，87(2)：93-101.

REEVES N D，MAGANARIS C N，LONGO S，et al.，2009. Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance training in older human[J]. Exp Physiol，94(7)：825-833.

ROMERO-RODRIGUEZ D，GUAL G，TESCH P A，2011. Efficacy of an inertial resistance training paradigm in the treatment of patellar tendinopathy in athletes：A case-series study[J]. Phys Ther Sport，12(1)：43-48.

SABIDO R，HERNÁNDEZ-DAVÓJ L，PEREYRA-GERBER G T，et al.，2017. Influence of different inertial loads on basic training variables during the flywheel squat exercise[J]. Int J Sports Physiol Perform，13(4)：482-489.

SARMIENTO S，RODRIGUEZ-MATOSO D，HENRIQUEZ P Y，et al.，2014. Effects of flywheel resistance training for gait improvement in female Alzheimer's patients[J]. J Strength Cond Res，28(1)：48-52.

SEYNNES O R，DE BOER M，NARICI M V，2007. Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training[J]. J Appl Physiol（1985），102(1)：368-373.

STASINAKI A N，ZARAS N，METHENITIS S，et al.，2019. Rate of force development and muscle architecture after fast and slow velocity eccentric training[J]. Sports（Basel），doi：10.3390/sports7020041.

TAIPALE R S，MIKKOLA J，NUMMELA A，et al.，2010. Strength training in endurance runners[J]. Int J Sports Med，31(7)：468-476.

TESCH P A，EKBERG A，LINDQUIST D M，et al.，2010. Muscle hypertrophy following 5-week resistance training using a non-gravity-dependent exercise system[J]. Acta Physiol，180(1)：89-98.

TESCH P A，FERNANDEZ-GONZALO R，LUNDBERG T R，et al.，2017. Clinical applications of iso-inertial，eccentric-overload（YoYo™）resistance exercise[J]. Front Physiol，doi：10.3389/fphys.2017.00241.

TINWALA F，CRONIN J，HAEMMERLE E，et al.，2017. Eccentric strength training：A review of the available technology[J]. Strength Cond J，39(1)：32-47.

TOUS-FAJARDO J，GONZALO-SKOK O，ARJOL-SERRANO J L，et al.，2016. Enhancing change-of-direction speed in soccer players by functional inertial eccentric overload and vibration training[J]. Int J Sports Physiol Perform，11(1)：66-73.

TOUS-FAJARDO J，MALDONADO R A，QUINTANA J M，et al.，2006. The flywheel leg-curl machine：Offering eccentric overload for hamstring development[J]. Int J Sports Physiol Perform，1(3)：293-298.

UENO R，NAVACCHIA A，BATES N A，et al.，2020. Analysis of internal knee forces allows for the prediction of rupture events in a clinically relevant model of anterior cruciate ligament injuries[J]. Orthop J Sports Med，doi：10.1177/2325967119893758.

WEAKLEY J，FERNÁNDEZ-VALDÉS B，THOMAS L，et al.，2019. Criterion validity of force and power outputs for a commonly used flywheel resistance training device and bluetooth app[J]. J Strength Cond Res，33(5)：1180-1184.

YOSHIDA N，SATO K，BINGHAM G，et al.，2016. Influence of different inertial loadings on force Characteristics during squat with a flywheel loading device[C]. Johnson City，TN：11th Annual Coaches and Sport Science College.

（收稿日期：2020-06-02； 修订日期：2021-01-07； 编辑：尹航）