



体育科学杂志

ISSN: 0264-0414 (Print) 1466-447X (Online) 期刊主页: <https://www.tandfonline.com/loi/rjsp20>

## 感知羽毛球运动中球弦张力对力量击球的影响：专业技能允许有效利用所有球弦张力

**Qin Zhu**

引用本文: Qin Zhu (2013) Perceiving the affordance of string tension for power strokes in badminton : 专业技能允许有效使用所有线张力, 《体育科学杂志》, 31:11, 1187-1196, DOI: [10.1080/02640414.2013.771818](https://doi.org/10.1080/02640414.2013.771818)

本文链接: <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.771818>



在线发表于: 2013 年 2 月 18 日。

向本刊投稿 [↗](#)

文章浏览量586

查看相关文章 [↗](#)引用文章: 2 查看引用文章 [↗](#)

有关访问和使用的完整条款和条件，请访问

<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=rjsp20>。

## 感知羽毛球运动中球弦张力对力量击球的影响：专业技能允许有效利用所有球弦张力

秦柱

美国怀俄明州拉莱米 82071 怀俄明大学运动与健康系

(2013 年 1 月 28 日接受)

### 摘要

能力意味着行动的机会。这些可承受性对运动成绩非常重要，与技术娴熟的运动员所培养的能力息息相关。在羽毛球等球拍类运动中，不同运动员对球拍弦张力的偏好大相径庭，因为人们相信，不同的弦张力能提供有效击球的机会。本研究探讨了羽毛球运动员能否感知到球弦张力对发力击球的影响，以及对影响的感知本身是否会随着技术水平的提高而改变。结果表明，球弦张力对新手和业余选手的击球表现有制约作用，但对专业选手没有影响。在评估感知能力时，感知模式并不影响对最佳球弦张力的感知。技术型选手成功地感知到了球弦张力的承受能力，但只有专家才会关注节省能量。我们的研究表明，羽毛球运动中对球弦张力承受能力的感知是由动作能力决定的。此外，高手可以根据对承受能力的感知来调整动作，以保持高水平的表现。

关键词：承受力、限制、运动专长、羽毛球

### 引言

球拍类运动运动员普遍认为，如果为球拍选择了 "正确" 的球线张力，就能提高比赛成绩。我们经常听说，网球精英选手喜欢特定的球线张力，在比赛中必须经常检查。在羽毛球竞技中，经常有报道称，经验丰富的选手更喜欢不同的球线张力来提高成绩，而新手选手则会在初次安装球拍时要求推荐理想的球线张力。但是，目前还不清楚球线张力对不同技术水平的球员的表现有什么影响。

科学家们研究了网球运动中球拍弦张力的影响。Elliott (1982 年) 使用刚性夹紧法报告说，如果球拍是易折的，较低的球线张力会导致较高的反弹速度。Bower 和 Sinclair (1999 年) 发现，在

斜向冲击时，反弹角度受球拍弦张力的影响。虽然较低的球弦张力会产生较大的反弹冲力（因此速度较大），但反弹角更接近正常值。反弹角的变化将直接影响击球的准确性。Brody 和 Knudson (2000 年) 模拟了

他们通过研究撞击动态来确定球线张力对击球准确性的影响。根据他们的模型，当球拍弦张力降低时，停留时间延长，加上球拍在后坐力作用下大幅度旋转，导致球入射角（球撞击球拍弦床的角度）和反弹角之间的偏差增大，从而使击球难以控制。这些结果表明，球线张力的变化会产生速度与准确性之间的权衡，即降低球线张力有助于提高球速，但代价是降低准确性。

上述结论有其局限性，因为它只是基于对撞击动态的测试，而不包括对人体特征的分析或测试。在这些研究中，球员都没有与球拍和球进行互动。问题是，在实验室中发现的球线张力的影响是否会在比赛中出现在赛场上。Bower 和 Cross（2005 年）使用投球机对此进行了研究。他们要求具有一般水平的网球运动员使用三种不同弦力的球拍回球。对回球速度和准确性进行了记录。结果与之前实验室报告的结果一致。

---

通讯地址：Qin Zhu, Division of Kinesiology and Health, University of Wyoming, Dept: Qin Zhu, Division of Kinesiology and Health, University of Wyoming, Dept. 3196, 1000 E. University Ave, Laramie, WY 82071, USA。电子邮件：qzhu1@uwyo.edu

研究结果表明,低球弦张力会产生更大的反弹速度,但球弦张力似乎会影响球的位置,从而影响准确性。在同一研究人员进行的后续研究中(鲍尔和罗斯,2008年),使用相同的程序对精英网球运动员进行了测试,但结果却相互矛盾。高球弦张力比低球弦张力产生更高的反弹速度,而球的位置似乎与球弦张力无关。这两项研究的矛盾结果表明,在决定球弦张力对成绩的影响时,运动员的专业知识可能起着重要作用。专家可能更能适应不断变化的琴弦张力,从而保持优异的成绩。Bower 和 Cross (2003 年,2008 年)也测试了网球运动员对球拍弦张力变化的敏感度,结果表明精英网球运动员似乎对球拍弦张力的变化不敏感。然而,精英网球运动员在检测球弦张力变化方面表现出的能力有限,这可能是因为球弦张力对他们的比赛成绩影响有限,尽管目前仍不清楚球弦张力未能影响他们比赛成绩的原因。自然而然产生的问题是,专家级选手是否能检测到球线张力,并利用这种感知来调整击球方式,从而获得稳定的优异成绩。

对承受力的研究为弦张力效应的研究提供了一个新的框架。承载力是物体和事件的环境属性,与动物执行特定任务的行动能力相关(Gibson, 1979/1986; Turvey, 1992)。根据观察者的尺度及其相关肢体(分别为手、臂和腿),人们能够感知诸如物体是否可以被抓住(Newell, Scully, Tenenbaum, & Hardiman, 1989)、够到(Mark 等人, 1997)或攀爬(Mark, 1987)等情境。在体育运动中,感知和使用负担能力对于成功完成比赛至关重要。Oudejans、Michaels、Bakker 和 Dolne (1996 年)对飞行球的接球稳定性进行了研究,结果表明,感知能力需要运动,如开始接近未来着陆位置。同样,Hove、Riley 和 Shockley (2006 年)的研究表明,曲棍球运动员能够通过挥动不同重量的球棍来选择最佳的曲棍球杆,以完成力量和精确度任务。Carello、Thuot、Anderson 和

Turvey (1999 年)研究发现,网球新手和专家都能判断网球拍的"甜点"位置。作为球拍的一个基本特性,球弦张力可为有效和成功的比赛提供机会。不过,在这种情况下,这一特性的作用可能取决于需要判断其承受能力的球员的技术水平。

对能力的感知涉及环境属性与行为者行动能力之间的关系。正如 Fajen、Riley 和 Turvey (2008 年)所指出的,由于环境和行动者都发生了变化,对承受能力的感知可能是动态的。行动者会以多种方式发生变化(如生长发育、受伤、疲劳),但与体育运动中的行动能力最相关的可能是获得有效的技能。行为者行动系统中的这种变化将改变环境属性与行为者行动能力之间的关系,从而决定一种承受能力。人们发现,面对这些关系的变化,行为者的感知也会随之调整。例如,Mark (1987 年)研究了当坐者被要求在脚上绑上木块,从而改变其与可使用座位高度的关系时,他们对最大座位高度的感知。结果发现,观察者表现出逐渐适应,直到判断再次准确为止,而这是在没有佩戴木块时的坐姿经验的情况下发生的。同样,Bingham、Schmidt 和 Rosenblum (1989 年)发现,投掷者可以通过掂量不同的手持物体来感知和选择最佳重量的物体,以便投掷到最大距离。然而,Zhu 和 Bingham (2010 年)想知道这种感知投掷能力是否必须通过学习长距离投掷技能来获得。不熟练的投掷者无法选择最佳投掷物体,但经过一个月的练习并掌握了长距离投掷能力后,他们就能完成这项任务。研究结束时,他们选择的物体与训练时不同,但仍然准确。这项研究表明,感知能力与执行相关动作的能力是相辅相成的。

利用 "可承受性" 框架,我们现在来研究羽毛球运动中对球线张力的感知和使用。羽毛球被认为是世界上速度最快的球拍类运动。根据美国羽毛球协会(美国科罗拉多州科罗拉多斯普林斯)的记录,毬子撞击后的速度可达每小时 206 英里,是网球最快球速的 1.6 倍。虽然羽毛球使用的球线相对较细,可以在击球时获得更大的反弹速度,但羽毛球场地的尺寸明显小于网球场。为了使击球保持在一定范围内,同时又能产生最大速度,运动员在选择球线张力时既要考虑准确性,又要考虑速度。羽毛球运动对球拍弦张力的这种

本研究旨在回答两个研究问题。首先,最佳字符串

不同专业水平的运动员在击球时是否存在不同的张力？假设不同的球弦张力会导致不同的 毬球撞击后速度，而最佳的球弦张力应能产生最大的毬球撞击后速度。不过，预计运动员的专业水平会影响如何使用不同的线张力。因此，根据运动员的专业水平，可能会发现不同的球弦张力是最佳的。其次，不同专业水平的运动员能否感知到球弦张力对力量击球的影响？根据假设，专业水平越高的运动员越能感知到这种能力，因为这是他们专业水平的一部分（感知专业水平）。然而，是否有一种感知模式是感知这种能力的最佳方式呢？羽毛球运动员判断球线张力的方式多种多样：直接按压线床、听手跟敲击线床的声音、观看毬子从球拍上弹起，最后是简单地击打几下。根据 Shaw 和 Bransford（1977 年）的观点，视觉、听觉和触觉信息应同样明确地说明与动作相关的特性。因此，使用不同的感官模式也能同样有效地感知能力。Warren、Kim 和 Husney（1987 年）的研究表明，用于弹跳传球的球的弹性可以通过视觉和听觉信息得到同样好的感知。同样，Fitzpatrick、Carello、Schmidt 和 Corey（1994 年）的研究表明，一个倾斜的表面是否能支撑直立的站姿，可以通过视觉和听觉来感知。这两项研究都表明，在不同的感知模式下，对琴弦张力的承受能力的感知效果是相同的。

## 方法

### 与会者

我们在怀俄明大学（UW）校园内招募了 12 名成年参与者。他们被选中的参与者代表了羽毛球运动的三种技能水平：专家级、休闲级和新手级。要成为羽毛球高手，参与者必须在过去 5 年内积极参加过羽毛球比赛，并在一生中积累了约 10,000 小时的刻意练习（Ericsson、Krampe 和 Tesch-Römer，1993 年）。参加者必须偶尔参加过羽毛球或其他球拍类

他们接受了关于以往羽毛球运动经验的访谈，以确定他们的技术水平。我们从华盛顿大学羽毛球俱乐部招募了四名专业选手（3 男 1 女）和四名业余选手（3 男 1 女）。四名新手（1 男 3 女）从普通学生中招募。参与者均为右撇子，年龄在 20 岁至 40 岁之间，无任何运动或感官障碍。根据华盛顿大学机构审查委员会（IRB）的规定，已获得知情同意。

### 仪器

使用穿线机（Eagnas Combo 910，加利福尼亚州加登纳市）为八支相同型号的羽毛球拍（Yonex Nanospeed 9000，加利福尼亚州托兰斯市）穿上同一种球弦（Yonex BG 65），张力分别为 16 磅、18 磅、20 磅、22 磅、24 磅、26 磅、28 磅和 30 磅。

由于琴弦张力在穿线后通常需要一段时间才能稳定下来，因此所有穿线后的球拍都要进行测量并监测张力变化。每个球拍上的实际球弦张力是通过测量球弦的振动频率确定的（Cross 和 Bower，2001 年；Röttig，2010 年）。实验者快速挥动球拍，用手掌的后跟撞击球拍的弦床。由此产生的撞击声通过设置在碰撞点旁边的麦克风直接录入电脑。使用音频分析软件（Audacity）确定基频。然后用以下公式计算出实际的琴弦张力：

$$S = 8.82 A \mu \frac{(0.988f)^2}{9.81 \times 10^7} \quad (1)$$

其中

运动，但只是为了娱乐，才能被视为娱乐型选手。新手可能以前在体育课上打过，但没有在其他场合打过。所有参赛者均

$A$  = 球拍头部的面积 (以  $\text{win}^2$  计)

$\mu$  = 琴弦的质量密度 (密度  $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$ )  $f$  = 琴弦的基频, 单位  $\text{Hz}$   $S$  = 琴弦张力, 单位磅。

结果发现, 每支球拍的球线张力在穿线后都明显下降了约6磅, 但这些变化在一个月后就停止了, 这与Cross和Bower (2001年) 的研究结果相似。将一个月后的测量张力与预期张力进行比较, 发现两者之间存在显著的相关性 ( $F(1, 7) = 1688.7, P < 0.001, R^2 = 0.99$ )、  
这表明, 尽管平均拉力显著下降, 但拉力间隔仍然保持不变。



当琴弦张力稳定后,相应的撞击声被保存并编辑为听觉刺激,用于稍后的判断测试。八个张力等级分别保存了八个音轨。然后将每个音轨编辑为在五秒钟内均匀重复五次相同的撞击声。

球弦张力也被目测记录下来。每只球拍都固定在穿线机上,线床朝上。用一个市售的球枪(Nerf Atom Balster)从同一高度、同一角度将一个直径为2英寸的小反弹球从球拍上方垂直投射出去。用垂直于运动方向的高速摄像机(Fastec Imaging公司生产的SportsCam 500,加利福尼亚州圣迭戈)以每秒250帧的速度记录球在撞击前后的运动。八个拉力分别制作了八个视频片段。然后将每个片段剪辑为5秒钟长,仅包含以每秒30帧的速度播放的弹跳球事件的视觉显示。

使用同一台高速摄像机(SportsCam)记录运动员使用不同球拍的击球动作。摄像机安装在三脚架上,垂直于主运动平面,距离五米。这样的距离可以最大限度地提高整个运动范围的空间分辨率。使用兼容软件(MaxTRAQ 2D)控制摄像机,以每秒250帧、1/2500秒的快门速度记录运动。受试者身后有一块黑色幕布,由两盏演播室灯光(伊利诺伊州巴特利特市Smith Victor公司的Q60SG/1200瓦)照亮。使用附加软件(MaxMATE)进行二维(2-D)运动分析,使用截止频率为15 Hz的三阶低通滤波器恢复撞击后毬子的速度和运动方向(Winter, 1990年; Yu, 1988年)。

### 程序

首先,向参与者描述了力量型击球,即击球后毬子速度最大的击球。然后,参与者被告知,他们的任务是确定球拍上球线张力的差异,并选择能够实现最有力击球的张力。我们鼓励他们根据自己的直觉作出判断,而不要进行任何主观推理。首先对参与者进行感知判断测试,要求他们在三种感知模式下判断最佳球弦张力,然后进行性能

测试,要求他们使用不同球弦张力的球拍进行力量击球。在

在性能测试中，参赛者被要求再次判断最佳琴弦张力。

*演奏前的判断。*八种弦乐张力以视觉、听觉和触觉模式呈现给参与者。感知模式的顺序是随机的。在视觉模式下，参与者观看八个无声视频片段，片段中的球分别从不同的弦床上弹起。在听觉模式中，受试者听到实验者用手击打弦床的八声音轨。在触觉模式下，参与者闭上眼睛，塞住耳朵，用手指按压每个球拍的弦床。在每种条件下，张力最初都是按递增或递减的顺序呈现的。这些顺序在参与者之间进行平衡。然后，让参与者尽可能多次地组合不同的球弦张力，依次选出最佳的三个球弦张力，即第一、第二和第三首选张力。

*性能测试。*感知判断之后进行的是表现测试。测试前，我们鼓励受试者对肩膀和手臂进行热身。然后，要求他们以最大速度挥拍三次。接着，要求参与者使用不同张力的球拍进行击球。在典型的比赛中，运动员需要在移动过程中击打飞行中的毽子，然而，在毽子下方定位和移动以准备击打的能力可能会影响使用不同张力的球拍进行发力击球的能力。因此，我们修改了击打条件，要求运动员击打头顶上方的静态悬挂毽子。羽毛球通过尼龙钓鱼线悬挂在天花板上，钓鱼线的一端固定在天花板上，另一端折叠后钩住羽毛球的裙边。毽子斜着悬挂，软木球头首先被球拍击中。参与者被要求尽可能舒适地握住球拍，并将手臂完全向上伸展，以便能够将球拍高高地举过头顶。然后，将悬挂的毽子调整到参赛者喜欢的击球高度，在击球过程中，线床将与毽子充分接触。参赛者以最大力量挥动球拍击打毽子，使毽子脱离钓鱼线，发射并落在前墙上的垫子区域，该区域距离悬挂毽子的地方约 3 米远。他们被要求用每个球拍做三次这样的动作，总共进行了 24 次试验。所有参赛者都成功地将毽子击打到垫子上。

区域。为了防止疲劳，试验之间有两分钟的休息时间。琴弦张力的测试顺序是按张力的增加或减小顺序进行的，这在所有参与者之间进行了平衡，但顺序与知觉判断测试中的顺序不同。所有试验均使用高速摄像机以每秒 250 帧的速度进行记录。

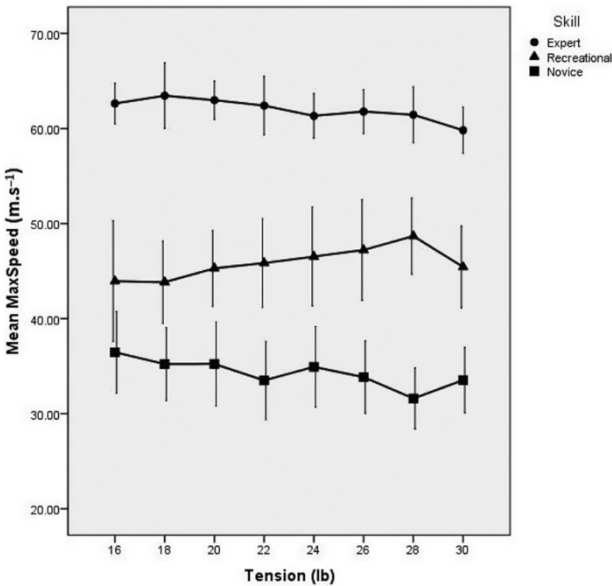
*演奏后的判断。*演奏测试结束后，参赛者被要求再次判断首选的琴弦张力（再次按顺序选择前三名）。他们被告知，他们的判断应基于他们在击球时和击球后对每种张力的直接感受。参与者的首选张力会被记录下来，以便与之前判断的张力进行比较。

成果

琴弦张力对击球性能的影响

我们研究了琴弦张力对击球性能的影响。如图 1 所示，平均最大速度随琴弦张力的变化而变化，但不同技术水平的变化方式不同：新手的速度降低，业余选手的速度提高，但专家级选手的速度保持稳定，这表明琴弦张力对击球力量的影响取决于选手的技术水平。速度也随着专业水平的不同而变化：专业选手的速度最大，而新手的速度最小。

图 1. 毬子撞击后的平均最大速度与毬弦张力和技术水平的关系。新手（填充方形）、休闲选手（填充三角形）和高手（填充圆形）。误差条为标准误差。



三向（技能、张力、试验）混合设计方差分析（ANOVA）得出了技能的主效应（ $F(2, 9) = 21.45, P < 0.001, \eta^2 = 0.83$ ）。

Tukey 事后检验表明，专家级选手的最大速度（ $M = 62.0 \pm 4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）明显高于休闲选手（ $M = 45.8 \pm 8.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）或新手（ $M = 34.3 \pm 6.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）（ $P < 0.05$ ）。由于技能和紧张度之间也存在明显的交互作用（ $F(14, 63) = 2.90, P < 0.01, \eta^2 = 0.80$ ），因此，一个简单的方法可以对紧张度和技能之间的交互作用进行分析。

进行了主效应分析，以确定张力对各技能水平的影响。张力对新手（ $F(7, 189) = 2.12, P < 0.05, \eta^2 = 0.07$ ）和业余选手（ $F(7, 189) = 2.55, P < 0.05, \eta^2 = 0.09$ ）有显著影响，但对专家级选手（ $F(7, 189) = 2.55, P < 0.05, \eta^2 = 0.09$ ）没有显著影响。

专家级选手（ $F(7, 189) = 1.26, P > 0.1$ ）。通过 Tukey-B 事后检验，找出了速度明显高于其他速度的张力，即最佳张力。在新手或业余选手使用所有拉力产生的平均速度中，可以发现一个平均速度峰值。我们将这一峰值平均速度与其他速度进行比较，直到发现显著差异。结果显示，对于新手来说，16、18 和 20 磅的张力所产生的速度明显高于其他张力所产生的速度，而对于业余选手来说，24、26 和 28 磅的张力所产生的速度也明显高于其他张力所产生的速度（ $P < 0.05$ ）。因此，低至 16 磅的张力对新手来说是最佳的，而高至 20 磅的张力对休闲运动员来说也是如此（ $P < 0.05$ ）。

28 磅对于娱乐型选手来说是最佳的，而专家型选手在使用所有弦张力时都能打出同样快的击球。此外，还发现技巧、张力和试验之间存在明显的相互影响（ $F(28, 126) = 1.60, P < 0.05, \eta^2 = 0.26$ ）。在这两个因素之间存在着明显的相互影响。

结果表明，只有休闲运动员的试验效应显著（ $F(2, 144) = 17.11, P < 0.001, \eta^2 = 0.19$ ），因为他们在第三轮产生的速度明显较低，这表明他们在进

行力量训练的最后一组时可能会感到疲劳。

### 对最佳琴弦张力的感性判断

鉴于演奏结果显示，休闲和新手演奏者的琴弦张力为最佳，而专家演奏者的琴弦张力并非最佳，下一个问题是，当琴弦张力以不同的感官模式呈现在演奏者面前时，他们是否会判断各自的张力为最佳？为了在离散选择的基础上更好地解决这一连续性问题，我们计算了每种情况下的平均首选张力，将首选张力乘以 0.5，第二首选张力乘以 0.33，第三首选张力乘以 0.17，然后计算出平均首选张力。

表 I.判定的动力划水首选张力的变异系数 (CV)。

判决类型	专家	娱乐	新手	平均值
音频	0.05	0.06	0.11	0.07
视频	0.06	0.16	0.06	0.09
触觉	0.13	0.10	0.16	0.13*
击球后	0.16	0.07	0.09	0.11
平均值	0.11	0.09	0.14*	

注: 星号代表最高平均 CV 值。

然后求和。然后，将计算出的平均首选张力作为因变量，研究判断类型和运动专长对判断动力划水最佳张力的影响。

双向（技能与判断类型）混合设计方差分析显示，技能有显著影响 ( $F(2, 9) = 11.81, P < 0.01, \eta^2 = 0.72$ )。显示通过事后 Tukey 检验，新手选择的张力明显较低 ( $P < 0.05$ ) ( $M = 22.5$  与专家 ( $M = 25.3 \pm 2.8$  磅) 和业余选手 ( $M = 26.5 \pm 2.6$  磅) 相比，新手 ( $M = 25.3 \pm 3.2$  磅) 和业余选手 ( $M = 26.5 \pm 2.6$  磅) 对琴弦张力的偏好为  $\pm 3.2$  磅，而后两者之间没有差异。这些判断对新手和业余选手来说相当合理，但对专家来说却不尽合理，因为专家在他们的成绩数据中没有表现出最佳的琴弦张力，但他们似乎表现出了对较高琴弦张力的偏好。

判断类型没有主效应 ( $F(3, 27) = 0.27, P > 0.5$ )，这表明无论感知模式如何（视觉、听觉或触觉），在进行力量击球之前，以及在球员尝试了所有张力击球之后，都会选择相同的张力。变异系数 (CV) 用于评估这些判断的变异性。如表 I 所示，在选择最佳张力方面，新手比熟练玩家的变异性更大，而使用触觉模式的判断比使用其他模式的判断变异性更大。后一种结果意味着，按压弦床来判断最佳张力对所有演奏者来说都是一种挑战。此外，如表 I 所示，不同水平的演奏者之间也存在一些差异。高手在进行力量击球后的判断差异最大。这一结果表明，在实际使用弦张力

击打毬子后，他们对较高张力的偏好变得不那么可靠。

感知琴弦张力的承受力

为了更好地确定琴弦张力的承受能力是否被准确感知，我们还进行了两项分析。首先，根据参与者的判断数据对其表现数据进行加权处理，具体如下。每位参与者的平均最大

可以求出每种拉力下毬子撞击后的速度。这些平均最大速度可根据参赛者的选择进行加权，即最喜欢的张力对应的速度乘以 0.5，第二喜欢的张力对应的速度乘以 0.33，第三喜欢的张力对应的速度乘以 0.17，然后求和得出加权平均速度。对于那些被剔除的速度，为了避免可能出现的上限和下限效应，我们在计算平均速度时剔除了最高分和最低分。这样，就产生了两组平均速度分数：一组与选定的张力相对应，另一组与舍弃的张力相对应。我们进行了方差分析，以检验选择及其与技能水平和判断类型的潜在交互作用。如果我们发现与选定张力相对应的速度高于与舍弃张力相对应的速度，则表明演奏者能够感知琴弦张力的承受能力。我们发现，只有娱乐型演奏者的加权平均最高速度一直高于舍弃的张力。三方（技能-判断类型-选择）混合设计方差分析显示，技能有显著影响（ $F(2, 9) = 21.91, P < 0.001, \eta^2 = 0.83$ ，与成绩数据分析中的结果相同），技能-选择交互作用有边际效应（ $F(2, 9) = 4.15, P = 0.05, \eta^2 = 0.48$ ）。由于我们已经发现较高的速度对应较高的技能水平，而且判断类型并不影响最佳张力的选择，因此只对技能与选择的交互作用进行了事后检验。简单的主效应分析表明，选择效应只对娱乐型选手有显著影响（ $F(1, 36) = 7.91, P < 0.01, \eta^2 = 0.18$ ），这说明结果表明，只有业余选手能准确地选择最佳张力，以产生有力的划水动作。

为了证实这一发现，我们进行了另一项分析。Zhu 和 Bingham（2008，2010）曾使用过这种分析方法。对于每位参与者，所有张力均以参与者的平均预想张力（实际张力/平均预想张力）加权，所有速度均以峰值速度加权。

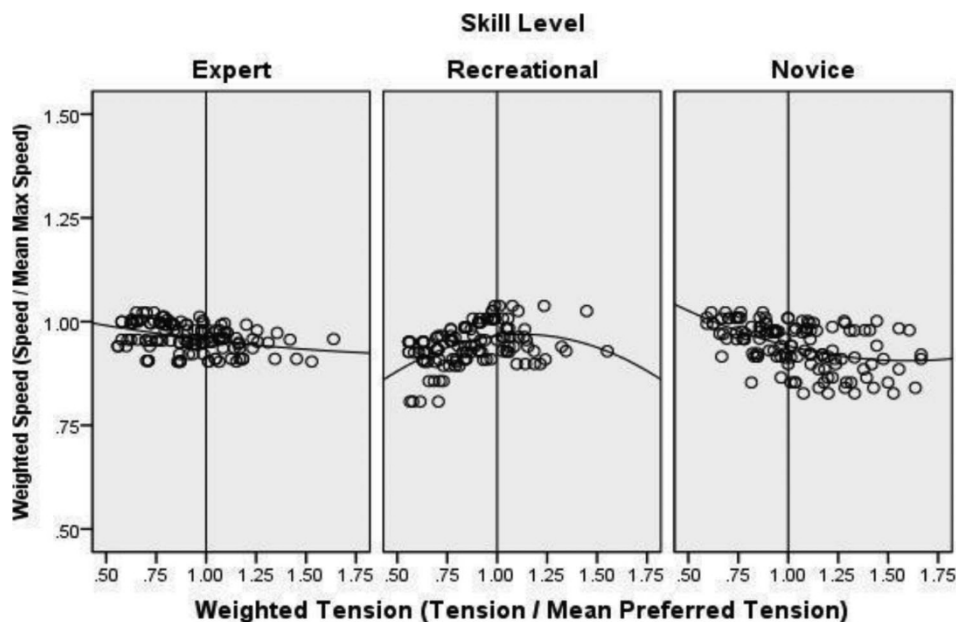


图 2.按技术水平分列的加权张力对加权速度的二次回归。垂直线指的是实际张力等于平均首选张力的情况。如果这条线与二次回归曲线的峰值相交,也相当于 Y 轴上接近 1 的值,则可以确定对张力承受能力的准确感知。不过,这只能在娱乐层面上看到。

参与者产生的平均最高速度（实际速度/平均最高速度峰值）。然后，将加权速度与加权张力作图。如果对承受能力的判断是正确的，那么该图在加权张力轴上的值为 1 时（即实际张力 = 平均预设张力）应出现一个峰值，而该峰值在加权速度轴上的值应为 1（即实际速度 = 峰值平均最高速度）。这一预期可以通过对各技术水平球员的综合数据进行二次函数拟合来评估。不过，考虑到图 1 所示的速度数据模式，这种分析方法预计只适用于娱乐选手。如图 2 所示，对于新手来说，速度在琴弦张力最低时达到峰值。对于专业选手来说，速度在不同的琴弦张力下没有明显的变化。因此，在这两种情况下都不可能有很好的二次拟合。该分析只适用于娱乐型选手。回归分析仅对休闲演奏者产生了显著的二次项（ $P < 0.05$  或更好）（ $R^2 = 0.21$ ， $F(2, 127) = 16.56$ ， $P < 0.001$ 、

表明所选张力确实产生了最大速度。

$y = -0.23x^2 + 0.51x + 0.68$ ）。可以通过对该函数求导，然后将导数设为 0 来求解 X： $X = 1.11$ 。因此，最大值出现在加权十次方轴上接近 1 的位置。在此 X 值上求得的函数值为  $Y = 0.96$ ，



## 讨论

据传闻，在球拍类运动中，球弦张力会影响击球成绩。虽然对网球运动中球拍弦张力的影响进行了研究，但很少有人关注运动技能对这种影响的决定作用。本研究在负担能力的框架内，对羽毛球运动中不同专业水平的球拍弦张力效应进行了研究。

我们的结果和分析表明，休闲选手对琴弦张力的承受能力非常敏感。他们选择的张力（ $\approx 26$  磅）能为他们带来最有效的击球，也就是能产生最大峰值速度的击球。新手选择的张力（ $\approx 22$  磅）大于使他们产生最大速度的张力（ $\approx 16$  磅），尽管他们选择的张力低于休闲或专业选手。此外，考虑到新手的技术水平，他们在选择时会表现出更大的不稳定性。最后，专家选手可靠地选择了接近休闲选手偏好的较高张力（ $\approx 25$  磅），尽管这种张力并不是唯一能产生最佳性能的张力。专家们在使用所有张力的琴弦时都产生了相等的最高速度。正如预期的那样，这些速度都高于非专业选手的速度。因此，根据这些分析，专家级演奏者似乎并不擅长感知琴弦的张力。



弦张力的承受能力。这是真的吗？要回答这个问题，我们需要弄清为什么高手在使用所有张力的琴弦都能产生同样有效的击球效果时，却偏爱较高的琴弦张力？

首先，我们必须考虑毬子弦张力对撞击后毬子动态的影响。在我们显示毬子线张力视觉信息的方法中，我们将一个实心球从同一高度扔到每组毬子线上，这样观察者就能看到反弹高度。这与 Warren 等人（1987 年）研究弹性感知的方法类似。弹跳高度随琴弦张力的降低而增加，这是因为琴弦张力越低，重置系数（ $V/V_{\text{outin}}$ ）越高（Elliott, 1982 年报告）。这种张力效应直接体现在新手的击球性能上，我们注意到，张力越低，毬子击球后的速度越快。这意味着，新手成绩的变化完全是由球绳张力的弹性决定的。

在发力击球时，新手只是使用肘部的外展和伸展，击球后几乎没有后续动作。高水平运动员与低水平运动员的击球动作截然不同。业余选手和专业选手都采用全身动作，从侧身站立开始，然后挥动球拍，从踝关节和膝关节开始，一直到球拍近端的腕关节和手指关节，在主要关节处进行一系列动作。这些动作与长距离过臂投掷中的动作类似，都需要沿着这些相邻关节进行一连串适时的动作（Jöris、van Muyen、van Ingen Schenau 和 Kemper, 1985 年；Zhu、Dapena 和 Bingham, 2009 年）。这种时机是通过大量练习获得的，最终会产生专家级的表现。通过加快挥拍速度，业余选手能够增加发力击球的冲力（或总冲击力）。这也缩短了球拍和毬子之间的接触时间，从而将最大能量传递到毬子上。而较硬的线床反过来又促进了能量的传递。因此，对于休闲球手来说，较高的球线张力能带来更好的表现。

专家级选手也能像业余选手一样打出更快的球拍速度，但很明显，他们做了更多的事情，使他们能在球线张力变化的情况下保持较高的穿梭速度。据推测，专家级选手能够利用手腕和手指的

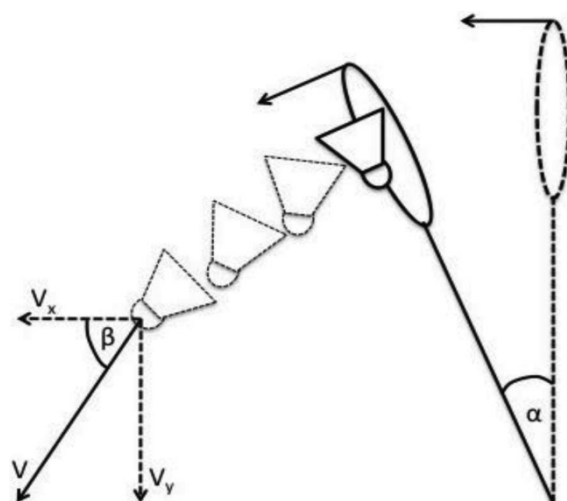
发力来提高拍头的速度，以弥补在使用较低张力的球线时能量的损失。虽然时间

在快速挥拍过程中，允许拉伸弦床的时间极短，高手必须利用较低的弦张力所提供的较长的停留时间（Brody 和 Knudson，2000 年），以额外的加速度挥拍。熟练的人类动作通常会表现出运动等效性，这是指运动系统重新组织可用运动参数以达到相同运动效果的能力（Hebb, 1949; Newell & Corcos, 1993）。在我们的案例中，高手对较低球弦张力的感知刺激了高手的运动系统，使其通过增加击球时手腕和手指的伸展来改变击球动作，从而产生额外的速度，使毬子在击球后保持较高的速度。然而，这种产生额外速度的方法是有代价的：需要消耗更多的能量，并可能导致疲劳。因此，专家们更倾向于使用较高的线张力。

为了研究高手是否真的采用了这种策略，从而在球弦张力变化的情况下获得一致的穿梭速度，我们进行了额外的分析。如果挥动球拍与悬挂的毬子以恒定的角度接触，那么在撞击过程中增加手腕和手指的张力将导致毬子在撞击后的移动方向发生改变（更多地向下移动）。对高手的击球进行了两个角度的分析：接触瞬间球拍的角度（图 3 中的 " $\alpha$ "）和撞击后毬子的角度（图 3 中的 " $\beta$ "），反映了飞行的方向变化。

该分析仅使用了琴弦张力的极端变化：最低（16 和 18 磅）和最高（28 和 30 磅）的琴弦张力。

图 3 击球时球拍角度（ $\alpha$ ）和击球后毬子角度（ $\beta$ ）的示意图



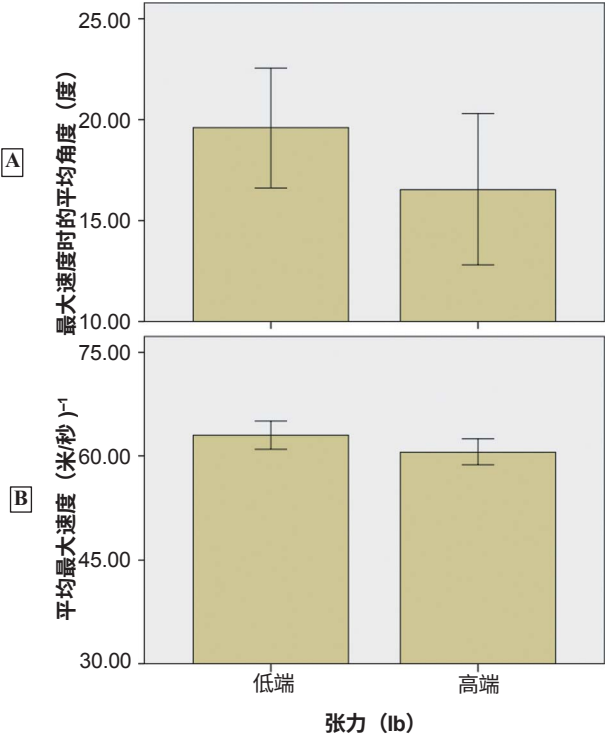


图 4.高手击球时，毬子撞击后的平均角度和平均最大速度与绷绳张力的函数关系。误差条代表平均值的标准误差。

张力。单因子重复方差分析显示，球弦张力对球拍接触瞬间的角度 $\alpha$ 没有影响 ( $F(1, 3) = 0.86, P > 0.05$ )。平均 $\alpha$ 为 21.5 度 ( $\pm 7.7$ )。然而，在较低的琴弦张力下， $\beta$ 向下倾斜角度的变化是显著的，( $F(1, 3) = 14.07, P < 0.05, \eta^2 = 0.82$ )。

如图 4A 所示，琴弦张力越低，平均角度越大，这表明专家级演奏者的手腕和手指更灵活。如图 4B 所示，对速度进行同样的方差分析，结果没有张力效应 ( $F(1, 3) = 8.90, P > 0.05$ )。这证实，为适应较低的弦张力而额外放松手腕和手指，能有效地产生与较高弦张力同样快的毬球速度。这一分析表明，高手应被视为成功地感知到了球弦张力的承受能力，因为通过选择较高的球弦张力，他们不必增加手腕和手指的伸展量（以更大的能量为代价）来产生有效的击球力量。

值得注意的是，在不同的感知模式下，对最佳

琴弦张力的选择是相同的。虽然不同的运动技能所选择的平均张力不同，但不同的感知模式所选择的平均张力却没有变化。

听撞击声、观看弹跳过程或按压弦床。沃伦等人（1987 年）比较了视觉和听觉对弹跳球弹力的感知，发现人类观察者可以准确判断弹力，然后利用这一信息来控制弹跳球的传球。我们的研究结果重复了这一发现，并表明弹性也可以通过触觉感知。随后，在击球后选择了相同的张力，三种模式可以结合。然而，判断的差异性表明，触觉感知琴弦张力的可靠性较低。球员在听和看球弦张力对发力击球的影响方面都更有经验，我们的结果可能只是反映了这一事实。研究结果也与全局阵列规范的假设相一致。根据 Stoffregen 和 Bardy（2001 年）的观点，知觉信息只在全局阵列中被指定，在全局阵列中，高阶关系存在于不同形式的能量中。从这个意义上说，关于最佳琴弦张力的感知信息必须从视觉、听觉、触觉或混合阵列中流出，并且可以通过呈现给感知者的每个感知事件中所表现出的能量模式来确定。感知者必须从不同的阵列中获取相同的信息，才能检测到相同的最佳琴弦张力。然而，根据感知者的经验，他们可能会使用不同的参照系，从而导致不同专业水平的演奏者选择不同的最佳张力。

最后，我们的研究结果表明，球弦张力对羽毛球运动员的意义取决于他们的运动专长。对于新手来说，球弦张力越小越好，但他们却不能很好地理解这一点。据推测，随着新手运动技能的提高，球弦张力对发力击球的影响会变得更加突出，也更容易被感知。从较低的张力到较高的张力，它也相应地发生了变化，这也是休闲选手和专业选手共同选择的张力。承受力本身是技术水平的一个函数，感知承受力的能力也是如此。从业余选手到专业选手，随着技能的不断发展，承受力的性质也在不断变化。真正的专业技能是指能够感知琴弦张力的承受力变化，并适当调整自己的动作，但这需要付出代价。不过，要证实最后这个结论，还需要更多的研究。

总之，我们的研究表明，羽毛球线的张力限制了新手和业余选手的发力击球表现，但对专

在不同的感知模式下, 琴弦张力是相同的。对发力击球时琴弦张力承受能力的感知是动态的, 因为随着运动技能的发展, 这种承受能力特性对演奏者来说变得更加突出, 但同时自身也发生了变化。当运动技能得到提高, 使动作有更多可能性时, 能效就成为决定琴弦张力承受能力的一个重要因素。

## 致谢

作者感谢 USA Badminton (科罗拉多州科罗拉多斯普林斯) 和 Yonex USA (加利福尼亚州托兰斯) 赞助实验中使用的球拍和球线。此外, 还要感谢怀俄明大学艺术与科学研究支持中心电子车间的比尔-贝克尔 (Bill Becker)。本研究项目还得到了怀俄明大学 NIH INBRE 设备资助和运动与健康部设备资助的部分支持。

## 参考资料

- Bingham, G.P., Schmidt, R., & Rosenblum, L. (1989)。最大投掷距离的 掷远: 一种聪明的知觉机制。《实验心理学杂志: 人类感知与表现》, 15 (3), 507-528 页。
- Bower, R., & Cross, R. (2003)。运动员对网球拍弦张力变化的敏感性。《体育科学与医学杂志》, 6 (1), 120-131。
- Bower, R., & Cross, R. (2005)。球弦张力对网球回弹速度和准确性的影响。《体育科学杂志》, 23 (7), 765-777。
- Bower, R., & Cross, R. (2008)。精英网球运动员对球拍弦张力变化的敏感性及其对球动态的影响。《体育工程》, 11, 31-36。
- Bower, R., & Sinclair, P. (1999)。网球拍硬度和球线张力对斜向冲击的反弹速度和角度的影响。《人类运动研究杂志》, 37, 271-286。
- Brody, H., & Knudson, D. (2000)。网球击球准确性与球线张力相关的模型。《国际体育杂志》, 4 (1), 38-45。
- Carello, C., Thuot, S., Anderson, K. L., & Turvey, M. T. (1999)。感知甜蜜点。《知觉》, 28 (3), 307-320。
- Cross, R., & Bower, R. (2001)。网球拍弦张力测量。《体育工程》, 4, 165-175。
- Elliott, B. (1982)。网球拍的弹性和球弦张力对动态冲击后反弹速度的影响。《运动与体育研究季刊》, 53 (4), 277-281。

- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993)。The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance.《Psychological Review》, 100, 363-406。
- Fajen, B. R., Riley, M. A., & Turvey, M. T. (2008)。体育运动中的信息、承受能力和行动控制。《国际体育心理学杂志》, 40, 79-107。
- Fitzpatrick, P. A., Carello, C., Schmidt, R. C., & Corey, D. (1994)。直立姿势承受能力的触觉和视觉感知。《生态心理学》, 6, 265-287。

- Gibson, J. J. (1986). *The ecological approach to visual perception*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. (原著出版于 1979 年)。
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. New York, NY: Wiley.
- Hove, P., Riley, M. A., & Shockley, K. (2006)。通过动态触摸感知曲棍球杆的亲合力。《生态心理学》, 18 (3), 163-189 页。
- Jöris, H. J. J., van Muyen, A. J. E., van Ingen Schenau, G. J., & Kemper, H. C. G. (1985). 女子手球运动员上臂投掷时的力量、速度和能量流。《生物力学杂志》, 18, 409-414。
- Mark, L. S. (1987). 眼高标度的舒适度信息: 对坐姿和爬楼梯的研究。 *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, 360-370.
- Mark, L. S., Nemeth, K., Gardner, D., Dainoff, M. J., Paasche, J., Duffy, M., & Grandt, K. (1997). 姿势动力学与视觉引导下伸手的首选临界边界。《实验心理学杂志: 人类感知与表现》, 23, 1-15。
- Newell, K. M., & Corcos, D. M. (1993). Variability and motor control In K. M. Newell & D.M. Corcos (Eds.), *Issues in variability and motor control* (pp. 1-12). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Newell K. M., Scully, D. M., Tenenbaum, F., & Hardiman, S. (1989). 身体尺度与预感的发展。《发育心理生物学》, 22, 1-13。
- Oudejans, R. R. D., Michaels, C. F., Bakker, F. C., & Dolne, M. A. (1996). 行动在感知可承受性中的相关性: 对飞球可捕捉性的感知。《实验心理学杂志: 人类感知与表现》, 22 (4), 879-891。
- Röttig, M. (2010). 测量琴弦张力。取自 <http://marc.roettig.org/tennis/freqmess.php>
- Shaw, R. E., & Bransford, J. D. (1977). 知识问题的心理学方法。In R. E. Shaw & J.D. Bransford (Eds.), *Perceiving, acting and knowing: Toward an ecological psychology* (pp. 1-39). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Stoffregen, T. A., & Bardy, B. G. (2001). On specification and the senses.《行为与脑科学》, 24, 195-261。
- Turvey, M. T. (1992). Affordances and prospective control: 本体论概要。《生态心理学》, 4, 173-187。
- Warren, W. H., Kim, E. E., & Husney, R. (1987). 球反弹的方式: 视觉和听觉对弹性的感知以及对反弹传球的控制。《Perception》, 16, 309-336.
- Winter, D. A., 1990. *人体运动的生物力学与运动控制*。Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Yu, B. (1988). 数字滤波数据平滑程序中最佳截止频率的确定 (未发表的硕士论文)。堪萨斯州立大学, 曼哈顿。
- Zhu, Q., & Bingham, G. P. (2008)。用 "掂" 来感知投掷的承受力是一种聪明的感知机制吗? 《实验心理学杂志: 人类表现与感知》, 34 (4), 929-943。
- Zhu, Q., & Bingham, G. P. (2010)。学习感知远距离投掷的承受力: 羽毛球运动中专门知识的意义。《实验心理学杂志: 人类感知与表现》, 36 (4), 862-875。
- Zhu, Q., Dapena, J., & Bingham, G. P. (2009)。学习最大投掷距离: 释放角度和速度的变化会影响投掷能力吗? 《人类运动科学》, 28 (6), 708-725。