

TY

中华人民共和国体育行业标准

TY/T XXXX—XXXX

运动负荷熵测定方法

Determination of exercise load entropy

（征求意见稿）

（2025 年 12 月 8 日）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

国家体育总局 发布

目 次

前言 II

引言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 测定原理 1

5 测试环境 1

6 测试设备 2

7 受试者 2

8 测试步骤 2

 8.1 测试准备 2

 8.2 正式测试 2

9 数据处理 2

10 测定报告 3

附录 A（规范性） 运动负荷熵计算方法..... 4

附录 B（资料性） 知情同意书模版..... 6

附录 C（资料性） 运动负荷熵测定报告模版..... 7

参考文献 10

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由国家体育总局体育科学研究所提出。

本文件由国家体育总局归口。

本文件起草单位：国家体育总局体育科学研究所、北师大香港浸会大学、重庆大学、国体智慧体育技术创新中心（北京）有限公司、北京体育大学、四川大学、四川大学华西第二医院、中国康复研究中心、中科院合肥物质研究院、中国人民解放军第一医院、中国体育科学学会、昆山杜克大学。

本文件主要起草人：曹景伟、李祥臣、彭小令、贺巧、黄希发、钟代笛、肖雪、韩术、白银川、任志强、黄华雄、徐士鑫、王家宏、陈焱焱、许寿生、杨召阳、白鹏、高林波、吴世彩、李祥武、吴惠群、杜晓霞、杨玮、尚晓群、张学谦、洪扬、郎杰夫、黄智勇、仲元红、王路遥、李鑫、王丁丁、林昌盛、战军、曾思远、毕海燕、邹娟、郑雯月、李露莹。

引 言

随着体育科学研究和运动健康监测的深入发展，运动负荷测度技术正向非线性和个体化的方向演进。运动负荷熵作为原创性理论，将人体感知与生理响应系统视为一个内在的不确定性系统，通过引入信息熵量化其混沌与有序程度，为科学表征与测定有效运动强度奠定了全新的方法论基础。为规范基于该理论的测定方法，确保结果准确、可比，特制定本文件。本文件的制定，旨在为运动训练、健康促进、康复医学等领域的个性化运动处方制定、竞技能力监控及大众健康管理，提供统一、可靠的技术支撑，推动运动科学实践从“经验化”向“精准化”标准应用迈进。

运动负荷熵测定方法

1 范围

本文件规定了运动负荷熵测定的原理、环境、设备、受试者、步骤、数据处理和测定报告。
本文件适用于对具备运动感知和判断能力的人群进行觉差感知测定。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

运动负荷觉差 differential perception of exercise load

受试者对运动负荷变化是否有差异进行判定的结果。

注：结果用“有”或“无”表示。

3.2

运动负荷熵 exercise load entropy

基于给定参考刺激对比较刺激感知结果的度量。

3.3

觉差感知 perception of difference

人体接受两个刺激实体时，对刺激实体差异性的判断行为。

3.4

参考刺激 reference stimulus

受试者进行差异感知判断时，作为基准且固定的运动负荷强度值。

3.5

比较刺激 comparison stimulus

给定的范围内随机施加的运动负荷强度值。

3.6

最小有效刺激 minimal effective stimulus

运动负荷觉差序列所计算得到的最大熵所对应的比较刺激为相对于参考刺激可被感知到的刺激阈值。

4 测定原理

基于信息熵的觉差感知模型，将人体对运动负荷变化的感知过程视为一个信息处理系统。通过受试者依据主观感受对“参考刺激”与指定“比较刺激”之间做出“有感”或“无感”的二项判断，引入信息论中的“熵”作为关键测度，用以量化感知不确定性，并依据熵值最大时所对应的刺激值作为该级的“最小有效刺激”来确定感知的阈限，后经逐级递增试验形成的最小有效刺激序列（计算方式应符合附录A），该序列刺激共同构成了个体化的运动负荷-感知阈值曲线。

5 测试环境

5.1 测试场所应保持明亮、安静、清洁、舒适的室内，地面应确保稳固。

5.2 测试场所应具备稳定的 WIFI 或者有线网络。

5.3 应保证室内空气流通。

- 5.4 应利用隔板或者其他装置隔离安静、安全空间。
- 5.5 测试设备工作电源应为交流 220V、频率 50Hz。
- 5.6 室内电源插座以及接线应确保稳定与安全，且其位置排布不应干扰测试正常进行。
- 5.7 宜具备充足饮水、消毒用品等必备药品以及其他安全保障措施。

6 测试设备

恒功率自行车:在恒定功率模式下，能够根据实际转速自动、实时调节阻力大小，从而将脚踏端输出功率维持在设定目标值附近，并集成运动负荷自适应控制、人车状态感知、人机交互等多种功能，专门用于运动负荷熵测定的标准化设备。

7 受试者

- 7.1 应具有运动感知和判断能力。
- 7.2 测试前 7d 内应无发烧、咳嗽、腹泻或其他急性感染性疾病症状。

8 测试步骤

8.1 测试准备

8.1.1 受试者准备

- 8.1.1.1 受试者应充分理解试验内容和目的。
- 8.1.1.2 受试者应充分理解和熟练操作测试设备。
- 8.1.1.3 确认自身身体状况适宜参与本次测试。
- 8.1.1.4 在测试前签订知情同意书，见附录 B。

8.1.2 预测试准备

- 8.1.2.1 受试者应完成体验试验，并确认知晓试验目的。具体流程为：
 - a) 受试者仔细听取或阅读测试介绍；
 - b) 在工作人员协助下调节座椅高度与脚踏松紧；
 - c) 熟悉手柄判断按钮及具体的操作方法；
 - d) 开始体验骑行，测试人员提供口头提示与判断引导，帮助受试者理解判断依据与注意事项。
- 8.1.2.2 测试人员确认受试者已充分理解试验目的、内容，且骑行无任何不适，方可结束体验环节。
- 8.1.2.3 在受试者自我报告已掌握测试方法后，应在测试人员监督下，连续至少 10 次判断均无误后参与正式测试。

8.2 正式测试

- 8.2.1 测试开始，受试者应始终保持蹬踏频率为 $60\text{ r/min} \pm 5\text{ r/min}$ 。首先在参考刺激下持续骑行 10s~15s 范围内的随机时长，随后设备自动切换为比较刺激，再持续骑行 10s~15s 范围内的随机时长。受试者应通过比较前后两类负荷刺激，判断感知到的负荷是否存在差异。
- 8.2.2 在比较刺激阶段结束后，测试装置自动为受试者提供觉差判断提示。受试者须依据第一觉差感知，按压设备手柄上的物理按键来作出“有”或“无”的选择。设备自动记录判断结果，本次比较试验随即结束，并进入下一次试验。
- 8.2.3 重复 8.2.2 操作 100 次。
- 8.2.4 根据附录 A 方式进行计算。
- 8.2.5 从第 2 级开始，参考刺激设定为上一级所测得的最小有效刺激值，该级的比较刺激则在其参考值至参考值+50W 的范围内。每级开始前应校验负荷参数，确认无误后继续测试，受试者应至少完成 6 级测试，方可结束试验。
- 8.2.6 受试者可在测试过程中根据自身疲劳情况随时自行暂停和继续试验。

9 数据处理

对测试数据进行系统性整理与有效性核查，设别异常值并进行根源处理，依据数据质量综合评估是否需要进行补测或复测。

10 测定报告

报告包括基本信息、受试者信息、测定信息和测定结果。报告的具体内容见附录 C。

附录 A (规范性) 运动负荷熵计算方法

A.1 建立运动负荷觉差感知模型

根据本级测试中记录的觉差感知数据集，建立如式 (A.1) 所示的个体运动负荷觉差感知模型。

$$p(s^R, s) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta s)}} \quad (\text{A. 1})$$

式中：

$p(s^R, s)$ ——受试者对比较刺激 s 的有感概率；

s^R ——参考刺激，单位为瓦特 (W)；

s ——比较刺激，单位为瓦特 (W)；

e ——自然对数的底；

α 、 β ——Logistic模型参数，由单级试验数据通过极大似然估计所确定。

A.2 运动负荷熵计算

基于上述感知模型，在给定的参考刺激 s^R 下施加比较刺激 s 时，大脑对刺激变化的感知响应结果 (Y) 存在两种可能，无感为0，有感为1，其中有感概率为 $P_1 = P(Y = 1 | s^R, s)$ ，则无感概率为 $P_2 = 1 - P_1$ 。此时比较刺激对应的 ELE 按式 (A.2) 计算。

$$ELE = - \sum_{i=1}^2 P_i \ln P_i \quad (\text{A. 2})$$

式中：

ELE ——运动负荷熵；

P_i ——受试者对第 i 种感知结果 (有感或无感) 的发生概率；

$\ln(\cdot)$ ——自然对数函数。

A.3 最小有效刺激计算

A.3.1 单级试验对应的 MES 定义为：在该级所有比较刺激中，使 ELE 取得最大值对应的刺激量。按式 (A.3) 确定。

$$MES = \underset{s}{\operatorname{argmax}} ELE = \underset{s}{\operatorname{argmax}} [p(s^R, s) \ln p(s^R, s) + (1 - p(s^R, s)) \ln (1 - p(s^R, s))] \quad (\text{A. 3})$$

式中：

MES ——单级试验测定的最小有效刺激，单位为瓦特 (W)；

$\max(\cdot)$ ——求最大值函数；

$p(s^R, s)$ ——受试者对比较刺激 s 的有感概率；

s^R ——参考刺激，单位为瓦特 (W)；

s ——比较刺激，单位为瓦特 (W)；

$\ln(\cdot)$ ——自然对数函数。

A.3.2 联合求解式 (A.1)、式 (A.2) 和式 (A.3)，可推得：当 $p(s^R, s) = 0.5$ 时， ELE 取得最大值 $\ln 2$ ，对应的比较刺激即为最小有效刺激 MES 。因此， MES 可通过求解感知概率函数的逆函数在0.5处的值获得，即判定为该参考刺激水平下的个体最小可觉差，具体按式 (A.4) 计算。

$$MES = \underset{s}{\operatorname{argmax}} ELE = p^{-1}(0.5) = -\frac{\alpha}{\beta} \quad (\text{A. 4})$$

式中：

MES ——单级试验测定的最小有效刺激，单位为瓦特（W）；

$p^{-1}(\cdot)$ ——受试者对比较刺激 s 有感的概率函数的逆函数；

α 、 β ——由式（A.1）确定Logistic模型参数。

A.4 个体化负荷感知曲线构建

在完成多级负荷实验后，根据各级参考刺激与计算得到的有效刺激，可按式（A.5）求得各级韦伯分数：

$$C = \frac{MES - S^R}{S^R} \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

C ——反映个体在不同参考刺激下的感知敏感度变化，并且随负荷增大而逐渐减少，代表机体对刺激差异的感知能力逐渐强化；

MES ——单级试验测定的最小有效刺激，单位为瓦特（W）；

S^R ——参考刺激，单位为瓦特（W）；

以为 S^R 横轴，分别绘制有效刺激曲线（ $MES - S^R$ ）和韦伯分数曲线（ $C - S^R$ ）。

在 $C - S^R$ 曲线上，第一个显著峰值（ C_{max} ）至第一个显著谷值（ C_{min} ）之间的区段，对应机体的负荷感知范围，见式（A.6）：

$$I_{eff} = [MES(C_{max}), MES(C_{min})] \dots\dots\dots (A.6)$$

式中：

I_{eff} ——该区间表示机体对负荷变化最敏感、最能引发有效适应的强度范围；

$ES(C_{max})$ ——当韦伯分数为 C_{max} 时对应的最小有效刺激值；

$ES(C_{min})$ ——当韦伯分数为 C_{min} 时对应的最小有效刺激值。

附 录 B
(资料性)
知情同意书模版

知情同意书

尊敬的受试者：

为确保本次试验顺利进行并充分保障您的权益，在您同意参加之前，您需要清楚知道以下相关信息。

B.1 可能出现的风险与不适

我们会通过测试前对健康和体适能相关信息的评价和测试中的仔细观察，最大限度地降低风险。如在运动过程中发现有指标异常或身体异样和不适，请立即告知试验员或场地管理员并停止运动。

B.2 参与者的责任

作为受试者，您有以下职责：非常了解自己的身体状况及清楚地知道相关身体状况可能影响测试的安全，同时您应及时报告在运动测试过程中出现的不良症状和异常感觉。您有义务提供真实的个人信息、病史、药物治疗记录(尤其在最近和当天)。严格按照要求进行符合规范的运动。

B.3 隐私问题

如果您决定参加本项研究，您参加试验及在试验中的个人资料均属保密信息，为确保研究按照规定进行，必要时可以查阅您的个人数据。对采集过程记录可以用于对您个人身份进行识别的数据将进行为期2年的保存。

B.4 自愿参加、中止或退出

数据采集前请您对采集环境和场景、指定运动或携带物品做详细的了解，然后由您自愿决定是否参与本次数据采集，您有权在受测试验的任何阶段中止或退出。

B.5 受益

研究对受试者运动感知能力的精确测量与量化分析，将有助于科学评估其个体化运动负荷感知特性，为制定个性化、精准化的运动训练方案提供依据。

B.6 知情同意签字

我已经阅读了本知情同意书，并对此项研究的目的、内容、风险和受益情况已经了解，我自愿参加本项研究。

受试者签名：_____

日期：____年____月____日

附 录 C
(资料性)
运动负荷熵测定报告模版

运动负荷熵测定报告

测试单位：_____

报告编号：_____

测试日期：_____

测试人员：_____

受试者编号：_____

1. 基本信息

- 报告编号: _____
- 测试日期: _____
- 测试地点: _____ (环境温度: ____; 相对湿度: ____)
- 测试人员: _____
- 设备型号: _____

2. 受试者信息

- 受试者编号: _____
- 性别: _____
- 年龄: _____
- 健康状况:
 - 测试前 7 天内无发烧、咳嗽、腹泻等急性症状;
 - 无心血管、呼吸系统疾病史;
 - 非生理周期 (仅适用于女性)。
 - 对目前身体疲劳感知程度
- 知情同意书:
 - 已签署 (签署日期: _____) ;
 - 签署语言: _____;
 - 监护人签署 (若适用): _____。

3. 测试信息

3.1 测试设备与条件

- 设备配置:
 - 软件配置: IP 地址设置、测试系统当前版本号 _____。
 - 硬件配置: 心电带型号 _____ ; 恒功率自行车型号 _____。

3.2 测试流程

- 测试前准备:
 - 穿着轻便运动服及跑步鞋;
 - 完成 10 分钟标准热身 (包括动态拉伸及低强度骑行)。
- 运动负荷觉差等级与试验设置:
 - 本试验采用逐级递增的设计, 最少为 6 个等级 (LS1-LS6); 每级均需完成 100 次 “参考-比较” 刺激的觉差判断测试。
 - 在第二级后的试验中, 比较刺激在一个预先设定的动态范围内确定, 即从该等级的参考刺激值至 (参考刺激值 + 50W)。此处的 “50W” 是相对于本级参考刺激的变化量, 代表一个相对区间而非绝对阈值。系统基于受试者的实时感知反馈, 在此范围内智能选择下一次测试所使用的比较刺激值。在完成该等级全部 100 次测试后, 系统将基于运动负荷最大熵确定对应的本级最小有效刺激 (ES)。
 - 具体而言, LS1 级的参考刺激为 ES0; LS2 级的参考刺激为 LS1 级的结果 ES1, 以此类推。各等级具体的刺激序列与试验安排见表 1。

表 1 试验等级表

运动负荷觉差等级	参考刺激 (W)	比较刺激 (W)	测试次数
LS 1	根据受试者能力自行设定	ES0~(ES0+50W)范围内随机值	100
LS 2	ES1	ES1~(ES1+50W)范围内随机值	100
LS 3	ES2	ES2~(ES2+50W)范围内随机值	100
LS4	ES3	ES3~(ES3+50W)范围内随机值	100
LS 5	ES4	ES4~(ES4+50W)范围内随机值	100
LS 6	ES5	ES5~(ES5+50W)范围内随机值	100
...

- 测试过程:

1. 受试者通过手柄按键反馈“有/无”觉差感知;
2. 系统自动记录响应数据;
3. 受试者可根据自身疲劳情况随时暂停或继续试验。

3.3 数据处理与结果

- 最小有效刺激 (ES) 测定值:

- 根据公式 (《运动负荷熵测定方法》(TY/T XXXX—XXXX) 附录 A), 求得各等级 ES 值。

表 2 试验结果一览表

运动负荷觉差等级	参考刺激 (W)	最小有效刺激 ES (W)
LS 1	ES0	
LS 2	ES1	
LS 3	ES2	
LS 4	ES3	
LS 5	ES4	
LS 6	ES5	
...	...	

- 个体化负荷感知曲线:

- 根据附录 A 公式计算各级韦伯分数。

负荷等级	韦伯分数 (W)	韦伯分数最小值 (W)	韦伯分数最大值 (W)
LS 1			
LS 2			
LS 3			
LS 4			
LS 5			
LS 6			
...			

- 绘制 $C-S^R$ 曲线以观察其变化趋势, 确定个体 I_{eff} 区间值, 该区间即为个体负荷感知范围。

4 重要声明与建议

- 测定结果基于受试者测定当时的身体状态, 具有个体性和时效性。
- 建议在专业指导下使用本结果制定训练计划, 并定期复测以追踪机能变化。
- 本报告数据基于《运动负荷熵测定方法》(TY/T XXXX—XXXX) 生成;
- 试验中觉差感知原始数据集见电子附录。

受试者签名: _____

测定者签名: _____

审核者签名: _____

日期: 年 月 日

参 考 文 献

- [1] Verhulst, P. F. Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement. Correspondance Math'ematique et Physique, 1838, 10 (1): 113-121.
- [2] 李祥臣,彭小令,石磊,等.运动负荷熵:一种运动负荷测度新理论[J].体育科学, 2024, 44 (6): 3-14.
- [3] Dulay J, Poltoratski S, Hartmann T S, et al. Informing machine perception with psychophysics[J]. Proceedings of the IEEE, 2024, 112(2): 88-96.
- [4] Weber E H. De Pulsu, resorptione, auditu et tactu: Annotationes anatomicae et physiologicae..[M]. CF Koehler, 1834.
- [5] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell system technical journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [6] Clausius R. Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie: vorgetragen in der naturforsch. Gesellschaft den 24. April 1865[M]. Verlag nicht ermittelbar, 1865.
- [7] 李祥臣,俞梦孙.主动健康: 从理念到模式[J].体育科学,2020,40(02):83-89.
-