Biotechnology Frontier
April 2015, Volume 4, Issue 1, PP.44-49

Research on Elderly's Maximal Oxygen Uptake by Modified Bruce Treadmill Method

Chensha Wang [1], Zhihong Liu [1#], Yang Su [2], Hang Yu [1]

1. Chendu University of Information Technology, Chengdu 610225, P.R China

2. Xidian University, Xi'an 710071, P.R China

[#]Email: lzhh@cuit.edu.cn

Abstract

Purpose: Aiming at the old people put forward a more reasonable and safe method to test the maximal oxygen uptake (VO_2max) based on the Bruce Treadmill method. Methods: According to the Bruce method, 25 old people run with the cardiopulmonary to monitor changes of heart rate and calculate the VO_2max. Result: Exhausted at the end of the reference rate threshold of 150b/min, the deduced VO_2max value is closest to the cardiopulmonary instrument results. Conclusion: Considering the characteristics of the elder and improve this method. Standard: Heart rate is greater than 150b/min, the growth rate of heart rate ranges from 0.78 to 1.06b/min/s, and the constants compensation formula is 2.3677 ml/kg/min.

Keywords: Elderly; Vo2 Max; Cardiopulmonary Function; Bruce Treadmill Test

改进型Bruce跑台法测定老年人最大摄氧量的研究

王晨莎 [1]，刘志宏 [1#]，苏阳 [2]，余杭 [1#]

1. 成都信息工程学院，四川 成都 610225

2. 西安电子科技大学，陕西 西安 710071

摘　要：目的：通过对 Bruce 跑台法进行改进研究，提出了更为合理全面的测定老年人最大摄氧量的力竭标准和对应公式，并通过实验进行验证。方法：25 名年龄 55-65 岁的老年志愿者按照 Bruce 法的跑台负荷标准跑步，佩戴心肺功能测试仪进行跑台测试，监测受试者的心率变化，计算对应的最大摄氧量。结果：力竭终点参考心率阈值 150b/min，推导的最大摄氧量最接近直接法测得的结果。结论：需考虑老年人的特点，完善该方法。标准：心率满足大于 150b/min、心率增长速度在 0.78 至 1.06b/min/s 范围内；公式常量补偿：2.3677ml/kg/min。

关键词：老年人运动；最大摄氧量；心肺功能；Bruce 跑台法

前言

最大摄氧量(Maximal oxygen intake,VO_2max)是指人体在进行由大肌肉群参加的力竭性运动过程中，当氧运输系统的心泵功能和肌肉的氧利用能力达到本人的极限水平时，单位时间内所能摄取的最大氧量[1]。测量老年人最大摄氧量可评定其运动能力、表征心肺功能并衡量运动强度，有助于量化考核老年人的身体素质，为其科学体育锻炼提供重要参考标准，达到延年益寿的效果。测定方法有直接法和间接法。直接测量方法是利用仪器收集受试者运动过程呼出的气体，经过气体分析仪分析的方法。但该方法必须配备贵重的仪器设备，测定时间较长，并且受试者需全力配合，不利于广泛普及。

以往对最大摄氧量测试的研究中，涉及最多的是探寻准确有效的间接测定方法。间接测量方法依据人体的耗氧量与完成的功率、运动时的心率密切相关，借助心率等易测生理参数推算最大摄氧量的方法。Bruce 跑台法是间接测量方法中最广泛认可的，受试者以规定速度在跑台上跑步，直到疲劳状态后结束测试，记录运动的时间，推导最大摄氧量，分析运动强度和身体素质。该方法是由国际公认的“运动心脏病学之父”、

华盛顿大学罗伯特.阿瑟.布鲁斯教授于 1963 提出的，研究的初衷是检测有潜在心绞痛、心室动脉瘤疾病却看似健康的早期心脏病患者。自提出以来，Bruce 跑台法逐渐发展，现将其应用在最大摄氧量的测试中。典型的做法是以最高心率超过 180b/min 作为机体达到力竭的判断标准，由持续运动的时间推导最大摄氧量[2]。该方法相较于其他测试方法有更科学的医学背景。

然而，现阶段 Bruce 跑台法并不适用于老年人跑步的最大摄氧量测量。原因在于老年人的心脏变时能力明显低于青年人[3]，纵向年龄趋势所呈现的心率变化是不容忽视的问题[4]。鉴于此，本文在 Bruce 跑台法的基础上，通过对心率等参数的实验测试，改进研究老年人最大摄氧量的测定。

1 研究目的

本文将基于前人研究的最大摄氧量的 Bruce 跑台检测法，结合老年人的生理特点，研究改进型的并确保老年人安全的最大摄氧量的检测方法。

2 研究内容

2.1 Bruce 跑台法的提出和发展

Bruce 教授 1963 年提出的原始 Bruce 跑台测试是用来检测患者的心脏功能。解决医生单纯依靠病人主诉病情的状况，Bruce 博士和 Paul 博士开发了一个跑步机测试[5]。患者在跑步机上测试，调整跑步机速度和倾斜角度，记录患者的心电信号，分析心电信号可得到有效的信息。目前用其标准化评估健康人员心血管水平，即最大摄氧量的测试[6]。测试速度、坡度参照表 1。

表 1 Bruce 跑台法的运动负荷

级别	时间（min）	速度（km/hr）	坡度（%）
1	0	2.74	10
2	3	4.02	12
3	6	5.47	14
4	9	6.76	16
5	12	8.05	18
6	15	8.85	20
7	18	9.65	22

按照表 1 标准进行测试，至少 3 个条件则判断为力竭：1，递增运动过程中，摄氧量达到峰值，随负荷增加，摄氧量不变或小幅度上升 2，呼吸商≥1.10；3，最高心率≥180b/min；4，受试者不能继续运动，虽经鼓励仍不能坚持或本人伸手示意停止。记录测试者持续运动的时间，求得最大摄氧量。如公式（1）所示

$$Vo_{2\max} = 6.70 - 2.28 * g + 0.056 * t \text{ (s)} \quad (1)$$

其中，g 为性别：男=1，女=2，t 为测量时间。

2.2 对 Bruce 跑台法建议

2.2.1 力竭标准的建议

根据文献资料[7]，我国平均年龄为 55 岁、60 岁、65 岁的老年人预测最大心率分别是 165，159，153。身体素质较弱的老年人，运动心率达到个人最大心率 40%是科学安全的。即使已有锻炼习惯的老年人最多放宽不超过 60%。Bruce 跑台法中 180b/min 远远超过老年人心率的安全范围，180b/min 是本不应该达到但测量时又需要的。所以，该测试方法涉及心率阈值的力竭标准应相对降低，降低的幅度可先设置多等级，分别为：140b/min、150b/min、160b/min 和 170b/min，待实验验证选择其中最优的。

2.2.2 计算公式的建议

为老年人设置的较低的心率阈值能保证测量的安全性，但如果还采用公式(1)计算会引起较大偏差。原因在于，心率阈值的降低使运动终点提前到来，引入最大摄氧量计算的时间将缩短。维持运动的时间和最大摄氧量之间呈线性关系，则最大摄氧量将线性的缩小。为了克服这个问题，我们将当前心率阈值到本该上升到180b/min 的阶段进行模拟计算。在该阶段内，假设心率上升的速度不同，花费的时间也不同。在实验的基础上分段进行统计分析，得到每段对应的平均时间，与系数相乘，调整公式(1)的常数，从而实现对建议的力竭标准对应公式的调整。

3 研究对象及方法

3.1 测试对象

在成都市双流县久居福社区选取未经系统体育锻炼、身体健康无病史、近 5 年没有骨折或慢性病的老年志愿者，男女分别为 18 人、7 人。实验前对受试者进行培训，熟悉实验流程和各类检测仪器。测试对象的身体情况统计如表 2：

表 2 受试者身体情况

年龄(岁)	身高(cm)	体重（kg）	安静心率（b/min）
55-65	165±3.7	57±5.8	61.3±7.5

3.2 实验场地与仪器

场地：实验室

仪器包括：秒表、德国 h/p/cosmos Pular4. 0 运动跑台，MAX- II 运动心肺功能测试系统与软件和美国 MIO Alpha 迈欧阿尔法心率表。

3.3 实验方案

随机将志愿者进行编号和分组，编号为 1-25，每组 5 人，1-5 组。要求志愿者在本组测试来临前，穿着运动衣及运动鞋进行 1 小时户外热身练习。实验人员设置跑台的运动负荷，熟悉心肺系统的软件操作。

3.3.1 实验一 探究最大摄氧量补偿量

实验人员吹哨示意测试开始，并按下秒表从 0 时刻开始计时。受试者按 Bruce 法递增速度和坡度的运动负荷进行在 Pular4.0 运动跑台上测试，迈欧阿尔法心率表实时记录和保存心率，一旦达到 140b/min、150b/min、160b/min 和 170b/min，记录当前时刻分别 t1、t2、t3、t4。

3.3.2 实验二 选取、验证调整方案

在实验一的基础上，按照同样的方法和步骤测试，同时采用心肺功能测试系统直接测最大摄氧量，作为对改进建议的进一步选取和验证标准。

4 结果分析与讨论

4.1 传统方法的弊端

传统意义下，180b/min 的心率阈值是有氧运动和无氧运动的分界线，这是 Bruce 跑台法力竭标准的参考来源。相关文献[8]显示，不同年龄人群的心率有较大差别。如表 3 所示，60 岁以上的人群，24h 平均心率、醒时最高心率和睡时最低心率分别 72±9.1，112±18，52.6±0.6 次/min[9]。与 45-59 岁人群相比，分别低 8.8%，20.5%，2.7%；与 28-44 岁人群相比，分别低 5.4%，18.5%，5.1%。Bruce 传统测试方法并不适用老年人。

4.2 改进型方法

从保健安全的角度考虑，老年人运动强度需远远低于中年人和青年人，不适当的锻炼对老年人的身体无益甚至有害[10]。检测老年人最大摄氧量是为老年人造福和引导用的，应尽可能的安全舒适、避免对老年人造成危害。实验在传统方案的基础上相对降低心率阈值，分等级测试。出于安全的考虑，Bruce 传统的 180b/min 的心率力竭方案测得的结果将不作为参考依据，而采用有“黄金标准”著称的直接法（气体分析法）测试最大摄氧量，验证改进建议的有效与否。

表 3 Bruce 跑台法运动负荷

年龄	24h 总心搏数	24h 平均心率	醒时最高心率	醒时最低心率	睡时最高心率	睡时最低心率
1~3 天 4~10 天 10~13 岁 23~27 岁		 73±7	173±19 179±16 （100~200） 141±17	 （40~80） 53±6	 （60~110） 89±9	 （30~70） 43±5
平均 44.2 岁		75.9±0.6	132.7±1.5	64.2±0.7	90.9±0.9	55.3±0.6
45~59 岁 男 女	107573 ±13548 109822 ±11474	77.4±8.2 79.3±7.0	132.3±14.8 138.4±14.2	61.4±7.6 61.4±6.9	73.9±10.9 77.0±8.7	52.9±6.4 55.0±5.9
≥60 岁		72±9.1	112±18			52.6±7.4

4.3 新标准的提出

降低心率阈值，虽保证老年人测试的安全，但会使所测时间减少，推导的最大摄氧量相对减少，需补偿推导的最大摄氧量。

表 4 受试者心率上升不同阶段的平均时间

	a 阶段（s）	b 阶段（s）	c 阶段（s）
平均时间	9.43	12.68	14.79

表 4 是对所有受试者求心率增长不同阶段的平均时间。心率在 a 阶段（140b/min 上升到 150b/min）、b 阶段（150b/min 上升到 160b/min）、c 阶段（160b/min 上升到 170b/min）的平均时间分别是 9.43s、12.68s、14.8s。绘制老年人平均心率变化趋势如图 1 所示。

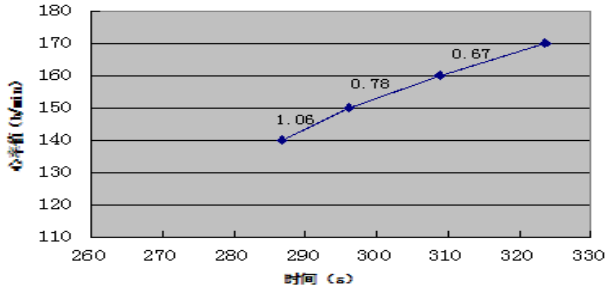


图 1 Bruce 跑台负荷下老年人平均心率变化趋势

按照变化趋势，老年人在运动负荷逐步加大的过程中，心率上升，上升的速度趋于平缓。这验证了提出公式的假设条件，即心率在不同阶段的上升速度不同。为了计算补偿量，除了 a，b，c 阶段的平均时间，还需要知道 d 阶段的平均时间，但为了受试者安全考虑，实验没有涉及到心率 170b/min 到 180b/min 的过程。

心率趋势图可推测，在 d 阶段（170b/min 上升到 180b/min）所需的时间比 c 阶段更长，该阶段暂定参考 c 阶段的增长时间。分别和系数 0.056 相乘，a、b、c、d 阶段补偿最大摄氧量为 0.5281、0.7101、0.8288 和 0.8288（ml/kg/min）。所以，改进型公式为：

$$Vo_{2\max} = 6.70 - 2.28 * g + 0.056 * t + \mathrm{x} \quad (2)$$

其中，g 为性别：男=1，女=2，t 为测量时间。心率阈值为 140 时，x=2.8958；心率阈值为 150 时，x=2.3677；心率阈值为 160 时，x=1.6576；心率阈值为 170 时，x=0.8288。

4.4 选取并验证新标准及对应公式

选取和验证最佳的心率阈值标准，按照公式(2)，从实验二的结果中随机抽取 10 名受试者的测试数据，得到如表 5 所示的结果。

表 5 不同心率阈值推导与直接法测定的最大摄氧量数值比较

VO_2max (ml/kg/min)	140b/min	150b/min	160b/min	170b/min	心肺仪
编号 1	23.35	23.11	23.01	23.03	29.83
编号 3	25.37	27.63	27.77	28.05	31.84
编号 4	22.48	22.60	22.66	22.58	27.40
编号 7	28.38	28.67	28.60	28.74	33.90
编号 9	23.80	23.67	23.55	23.15	24.61
编号 12	24.23	24.40	24.71	25.08	19.67
编号 16(女)	17.85	17.70	17.90	18.11	20.85
编号 19(女)	19.79	19.79	19.68	19.42	25.09
编号 22	20.74	20.73	20.60	20.50	18.17
编号 23(女)	18.85	18.58	18.42	18.19	20.84

相关系数是衡量两个变量之间的线性相关程度的指标，取值范围是[-1,1]。通常大于 0.8 时，认为两个变量有很强的线性相关性；越接近 1，说明两个变量越密切相关。因此采用相关系数检验改进方法的正确与否。

本实验选定分析心率阈值分别为 140b/min、150b/min、160b/min、170b/min 推导的最大摄氧量和心肺仪测得的最大摄氧量的相关系数，分别为 0.7263、0.7367、0.7255 和 0.7139。以 150b/min 为心率阈值推导的最大摄氧量和直接法测得的相关系数 0.7367 最大且接近 0.8，故这个标准最接近直接法测量结果。调查老年人测试的感受，其中 18 人认为达到 170b/min 结束测试的过程很艰巨，非常疲惫。所以，心率终点相对降低到 150b/min 是最优的。

4.5 改进方案的确定和补充

力竭标准的改进意见包含心率终点设置为 150b/min，还应包含心率变化的判断。从所测数据可知，心率从 140b/min 上升到 150b/min 所需平均时间为 9.43s，则心率在这段时间内的平均增长速度为 1.06b/min/s。同理，从 150b/min 上升到 160b/min 的心率平均增长速度为 0.78b/min/s。在测量过程中，引入一个新指标—心率变化率，指单位时间内心率上升或下降的速度。老年人在 Bruce 跑台负荷运动下，当心率达到 150b/min, 且当前心率变化率在 0.78-1.06b/min/s 范围内，认为心率是以预测的趋势和速度上升到 180b/min，可由公式(3)推导老年人的最大摄氧量，替代其参与不安全不舒适的测试。

$$Vo_{2\max} = 9.0677 - 2.28 * g + 0.056 * t \quad (3)$$

其中，g 为性别：男=1，女=2，t 为测量时间。

最大摄氧量受遗传、训练、营养等多方面的因素，用 Bruce 跑台法测老年人最大摄氧量时，力竭终点的

心率阈值需考虑到老年人的生理特点。非运动状态时老年人的心率低于青年人，运动后心率增加幅度和增加速度也远低于青年人[11]。力竭标准降低至 150b/min，降低的代价就是在公式中加入相应的补偿量。补偿的前提条件是老年人心率变化趋势需符合预测的规律达到 180b/min，所以加入心率增长率在 0.78-1.06b/min/s 范围的判断标准。如果心率变化率不是按照预测规律发展的，即不在 0.78-1.06b/min/s 范围，认为当前测量无效。

准确检测最大摄氧量能科学地指导老年人运动，反之，偏差较大的测量值不仅对老年人的锻炼没有帮助，甚至导致更大的危害。所以，本文提出对 Bruce 跑台法测老年人最大摄氧量的力竭标准和计算公式的建议方案为：心率上升至 150b/min 时且心率增长率在 0.78-1.06b/min/s 范围，按照公式(3)进行计算可得最大摄氧量。

5 结语

本文研究 Bruce 跑台法测试老年人最大摄氧量存在的安全隐患和解决办法。对原方法中提出改进意见，经实验结果显示，最大摄氧量测量时，尤其是针对老年人，参考新标准更安全。并通过实验验证改进意见有效可靠。

最大摄氧量的测试方法中，参考最多的是心率。但引起心率波动的因素复杂多变，仅参照心率变化容易引起误差从而影响评价结果[12]。在今后的研究中，可以尝试加入受试者体表发热温度和出汗状况等其他参考因素。

REFERENCES

[1] HOWLEY E T, BASSETT D R, WELCH H G. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary.[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1995, 27

[2] 李振, 吴卓锋. 对体育院校女大学生最大摄氧量测量方法的比较研究[J]. 吉林体育学院学报, 2011, (2)

[3] 潘文志, 宿燕岗, 李景霞, 等. 不同年龄和性别的正常人心率分布的初步观察[J]. 中国心脏起搏与心电生理杂志, 2006, (4)

[4] Voss A, Heitmann A, Schroeder R, et al. Short-term heart rate variability—age dependence in healthy subjects[J]. Physiological Measurement, 2012

[5] Linder S P, Wendelken S, Clayman J. Detecting Exercise Induced Stress using the Photoplethysmogram[C]. //Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS '06. 28th Annual International Conference of the IEEE. IEEE, 2006:5109-511

[6] 侯颖. Fox 和陈文堉最大摄氧量间接测定法比较[J]. 四川体育科学, 2007, (2)

[7] 郭继鸿. 心脏的变时性[J]. 临床心电学杂志, 2003, (4)

[8] 谢振武, 曹闽京, 李茗香, 等. 不同年龄健康人群心率分析[J]. 中国现代医学杂志, 1997, (7)

[9] 佚名. 不同年龄的正常心率[J]. 现代电生理学杂志, 2003, (3)

[10] Prawiro E A P J, Hu C, Chan Y, et al. A heart rate detection method for low power exercise intensity monitoring device[C]. //Bioelectronics and Bioinformatics (ISBB), 2014 IEEE International Symposium on. IEEE, 2014: 1- 4

[11] Daud H, Gulcharan N F I, Azhar M A M et al. Development and analysis of wireless heart rate monitoring device[C]. //Industrial Automation, Information and Communications Technology, International Conference on. IEEE, 2014:57-63

[12] 黄向东. 青少年中长跑运动员心率与血乳酸相关性及其在训练中的应用研究[D]. 武汉体育学院, 2007. DOI: 10.7666/d.y1196486

【作者简介】



[1] 王晨莎（1990-），女，汉，硕士，从事生物医学工程方面研究。
Email: wangchensha@126.com

[2] 刘志宏（1969-），女，汉，博士，教授，主要从事生物医学工程方面等研究。Email: lzhh@cuit.edu.cn

[3] 苏阳（1991-），男，汉，硕士，从事信息技术处理方面研究。Email: suyang5730@163.com

[4] 余杭（1990-），男，汉，硕士，从事生物医学工程方面研究。Email: yuhang6198@qq.com