

心率训练区间划分的研究与应用综述

引言

在耐力运动（如自行车、跑步）训练中，**根据心率划分训练强度区间**是常用的方法，可以帮助运动员精确控制训练负荷并监测体能变化。不同划分方法依据不同的生理指标和算法，包括简便的公式估算和精细的个体化阈值测定。本文将综述几种常见的心率区间划分方法及其原理、计算方式、优缺点，并比较它们在有氧耐力训练、阈值强度训练、恢复训练等方面的应用差异。此外，我们将介绍近三年相关研究的新进展，包括新的心率分区算法和模型，以及这些前沿研究在训练指导中的意义。

常见心率区间划分方法

最大心率百分比法（%HRmax）

原理与算法：最大心率百分比法是最简单的心率分区方法，以个人的最大心率（HRmax）为基准，将训练强度定义为最大心率的一定百分比范围。例如，传统上常将心率分为5个区间：**恢复区**约为最大心率的50–60%，**有氧耐力区**60–70%，**中等强度区**70–80%，**无氧阈值区**80–90%，**高强度区**90–100%^{1 2}。这些百分比范围可用公式估计最大心率后计算得到。例如经典公式“**220 - 年龄**”可用于粗略估算HRmax，但因个体差异较大，其准确性有限³。近年来常用的改进公式如Tanaka公式： $208 - 0.7 \times \text{年龄}$ ，被认为稍更准确³。一旦估计出HRmax，就可按上述百分比区间计算各心率区间阈值⁴。

所需参数：年龄（用于估算HRmax）或直接测得的个人最大心率值。无需其他生理参数，计算非常简单。

优点：方法直观简单，易于大多数人使用。只需知道年龄或经过一次最大努力测试后得出HRmax，即可快速划分出训练区间。这种方法常用于大众健身和入门耐力训练，因为操作方便，成本为零。许多健身手表和App内置的“五区心率法”即采用此原理。

缺点：**个体差异较大，准确性有限。**“220-年龄”仅是统计平均，个体最大心率可能偏差达10拍以上。此外，不同个体在相同%HRmax下的生理反应差异显著：有研究发现，以固定%HRmax划定的训练区间往往不能精确反映个体的代谢强度^{5 6}。例如，某些训练有素者的**第一阈值**(VT1，即有氧阈)可能高达其最大心率的85–90%，远高于一般假设的约70%HRmax^{7 8}。因此，用统一百分比标准划分区间可能导致有的人训练强度被高估或低估^{9 10}。总体而言，最大心率百分比法适合作为入门指导，但精确度和个体适配性不佳，需要结合自身感觉和调整^{11 12}。

储备心率法（Karvonen公式）

原理与算法：储备心率法通过考虑静息心率（Resting HR, RHR）来修正训练强度区间。其核心是计算**心率储备**（Heart Rate Reserve, HRR）：即 $HRR = HR_{max} - RHR$ ¹³。训练目标心率 = $RHR + HRR \times \text{强度百分比}$ 。例如，一名40岁运动员，HRmax估计180，静息心率60，则 $HRR=120$ 拍；若希望进行70%强度训练，则目标心率 = $60 + 120 \times 0.7 = 144$ 拍。实际使用中一般划分5个区间，如50–60%HRR对应恢复，60–70%HRR有氧耐力，70–80%HRR中等强度，80–90%HRR无氧阈值，90–100%HRR极限强度¹⁴。可以看到，同样利用百分比，但这里的百分比是相对于心率储备而非最大心率。

所需参数：年龄或测试得到的最大心率，以及安静状态下测得的静息心率。静息心率通常清晨静卧测量多日取平均。

优点： 更加个体化，生理相关性更好。由于加入了静息心率，HRR法能反映不同体能水平的心脏状况：静息心率越低（往往代表训练水平较高），同样强度百分比下计算出的目标心率就越高，避免了低静息心率者按%HRmax法训练强度偏低的问题^{15 16}。研究表明，相比直接%HRmax，%HRR与**最大摄氧量储备**(%VO2 Reserve)呈线性关系，更准确对应相同相对运动强度¹⁷。例如，**医学运动协会(ACSM)**等机构的运动处方推荐正是基于%HRR与%VO2max对应关系：如中等强度为40–59%HRR，大致相当于40–59%%VO2max^{18 19}。因此HRR法在理论上比单纯%HRmax能更好匹配机体代谢负荷。

缺点： 仍需要准确测定**HRmax**，否则计算基础不可靠。如果HRmax采用公式估计而误差较大，%HRR计算同样偏离实际。此外，静息心率受疲劳、睡眠、疾病等影响有日间波动，需定期测量更新。相对%HRmax法，HRR公式稍繁琐，但计算难度并不高（现代很多运动设备已支持HRR区间设定）。总的来说，Karvonen法对业余爱好者而言在易用性和准确性上是一个折衷：比纯%HRmax个性化，但又不像阈值法需复杂测试。因此常用于健身指导和大众耐力训练计划，帮助更合理地控制有氧区间强度^{20 21}。

乳酸阈值法 (Lactate Threshold, 阈值心率划分)

原理与算法： 乳酸阈值指运动中乳酸生成开始明显快于清除的强度拐点。通常根据生理学，将乳酸阈值分为**第一阈值**(LT1，通常对应有氧阈、通气阈1)和**第二阈值**(LT2，对应无氧阈、临界阈值)，其中LT2常被简称为“乳酸阈”并用作训练分区的重要参考^{22 23}。乳酸阈值法即通过确定个体的阈值心率，将训练区间围绕阈值划分。实用中多以**乳酸阈心率**(LTHR，通常指LT2时心率)来设定区间：低于阈值心率的是中低强度区，高于阈值的是高强度区。例如**Joe Friel**等教练的划分方法：首先通过场地测试估计LTHR——经典方法是**30分钟全力测试**，取最后20分钟的平均心率作为近似LTHR^{24 25}。得到LTHR后，可计算各区间：如**恢复区**低于约80% LTHR，**耐力区**约81–89% LTHR，**节奏区**90–94% LTHR，**阈值区**95–99% LTHR，**VO₂max区**100%以上^{26 27}。这种5区模型下，LTHR基本相当于区3/区4的分界点（即无氧阈）；有时进一步将阈值以上细分为5a、5b、5c区，用以区分不同程度的超阈强度^{28 29}（详见下文intervals.icu七区划分）。

值得注意的是，一些训练体系也关注**LT1（第一阈值）**用于划分更细的低强度区。例如三域模型中：Zone1低于LT1，Zone2介于LT1~LT2，Zone3高于LT2²²。但传统“乳酸阈值法”在大众应用中主要是指利用LT2（无氧阈）来锚定阈值强度。

所需参数： 需要通过测试获得个体阈值强度下的心率。可以是实验室乳酸检测（精确但成本高），或现场替代测试（如30分钟全力跑/骑，或20分钟全力平均心率的95%作为阈值心率²⁴）。还需要日常记录最大心率以确定阈值相对位置（有时也用最大心率辅助校验阈值心率是否合理）。

优点： 针对个人生理指标，强度划分精确。阈值心率反映了个人的耐力能力上限，用其划分训练区能确保训练强度相对于个人能力的准确性^{30 31}。在阈值以下训练主要发展有氧代谢，接近阈值训练可提高乳酸清除和耐受能力，超过阈值的小段训练刺激无氧代谢适应。因此，以LTHR为基础能有效指导耐力运动的**节奏训练和阈值训练**。研究和实践表明，不同个体的阈值心率占最大心率比例差异大，用阈值法更能抓住“临界强度”这个关键点，而非平均百分比^{5 6}。另外，阈值法的区间随着训练提升可动态更新（阈值心率提高则区间上移），能反映训练进步。

缺点： 获取阈值需要测试，有一定门槛。场地测试需要运动员能完成稳定的全力测试，并配备心率监测，初学者可能难以pacing；实验室测乳酸阈值则费用高且需专业人员。阈值心率受疲劳和环境影响也有波动，因此需定期复测校准^{32 33}。同时，对业余爱好者来说完全按阈值心率训练略显复杂，一般需要一定经验或教练指导才能有效应用。不过，目前很多高阶运动手表和平台（如Garmin、TrainingPeaks等）已支持根据检测到的乳酸阈值自动设置心率区间。总体而言，乳酸阈值法适合有一定训练基础、追求提升竞技表现的运动人群，用于精准把握**有氧区**和**无氧区**的分界，指导阈值跑、节奏骑行等关键训练。

临界功率/功能阈值功率对应的心率划分（FTP心率法）

原理与算法：临界功率（Critical Power）或功能阈值功率（FTP）是指运动员在较长时间内（如60分钟）可维持的最大功率输出，是自行车训练中常用的强度指标。FTP概念对应的生理强度实际上接近乳酸阈值强度，因此**FTP时的心率大致等同于前述的阈值心率(LTHR)**。FTP心率划分法即是利用运动员在FTP强度下的心率作为锚点来划分区间^{34 35}。一般做法是通过FTP测试（如20分钟全力功率测试乘以0.95估计FTP，同时记录这期间的平均心率作为阈值心率）^{34 36}。然后按照功率区间的比例，将心率区间与之对应。例如著名的Coggan功率七区模型：Zone1恢复(<55%FTP)、Zone2耐力(55–75%FTP).....Zone5 VO₂max(105–120%FTP)、Zone6无氧(>120%FTP)³⁷。为了让心率与功率训练分析一致，Intervals.icu等平台采用了Joe Friel提出的心率7区分，使心率各区间与功率区间尽可能对齐^{38 39}。其具体比例（以阈值心率计）如：Zone1主动恢复:<~81% 阈值HR, Zone2耐力:81–89%, Zone3节奏:90–93%, Zone4阈值:94–99%, Zone5 VO₂max:100–102%, Zone6无氧:103–106%, Zone7神经肌肉冲刺:>106%^{40 41}。此种划分确保了当有功率数据时，心率和功率的“时域分布”具有可比性⁴²。

所需参数：需要通过功率测试确定FTP（自行车）或功能阈值速度（跑步中的临界速度），以及测试时对应的平均心率。简化情况下，如果没有功率计，也可以直接采用阈值心率值作为上述Zone4中心，然后按照经验百分比划分心率区间。

优点：结合外部负荷与内部反应，划分全面。对自行车训练者而言，功率是直接客观的外部负荷指标，而心率是身体内部的生理反应。用FTP心率划分方法，可以将没有功率计的数据（比如纯心率记录的跑步、骑行）转化为与功率训练同标度的强度区间，以便分析**训练分布和疲劳负荷**^{38 43}。例如，Intervals.icu平台就是希望“纯心率的训练时长分布”能与“有功率计骑行时长分布”相匹配，因此采用了与功率区间对应的心率区间划分³⁸。这种方法对于自行车和铁三运动员非常实用：可以在骑行有功率计时建立阈值，然后在跑步或无功率骑行时用心率保持相似的强度控制。另外，FTP/LTHR为基础的7区模型提供了比5区模型更细的高强度分类，有助于设计**无氧冲刺**（Zone6/7）等训练。

缺点：心率作为间接指标，在与功率对应时存在**时滞和上限**问题：短时间的冲刺功率（Zone6以上）往往心率来不及上升或接近极限值，因而高区间的心率意义有限（Zone6、7心率接近最大心率，区间宽度很窄）。因此在实践中，心率法对**中低强度持续训练**指导价值高，但对于**短时间无氧间歇**，心率难以及时反映强度变化。此外，FTP测试本身需要高水平努力，和乳酸阈测试类似具有挑战性，需要定期更新。总的来说，FTP对应心率划分更多用于**自行车领域**，对跑步者而言，常用等效概念是**临界速度/阈值配速**和**阈值心率**，一样可以应用类似划分方法。由于其与乳酸阈值法实质相近（都以阈值强度为基准），两者优缺点也较类似：精准但依赖测试、需个体校准，在高性能训练中价值突出。

心率变异性（HRV）划分模型

原理与算法：心率变异性(HRV)指连续心搏间期（R-R间期）的微小波动，反映自主神经对心脏的调节状态。HRV模型主要有两种思路应用于训练分区：一是**利用HRV确定生理阈值**，二是**以HRV监控状态指导日常训练**。

1. **HRV阈值法(HRVT)：**通过分析渐增运动试验中HRV指标的变化来推断运动阈值。当运动强度从低到高，副交感神经逐渐退出、交感神经占主导，心率变异性会明显降低。研究者发现，在某一强度附近，HRV的若干指标会出现突变，可作为阈值的客观标志。例如，**DFAa1指数**（R-R间期去趋势波动分析的短标尺度指数）在低强度时约接近1.0（高度变异，呈有序相关），随着强度增加而下降，当DFAa1降至~0.75时常对应第一通气阈/乳酸阈(LT1)，降至~0.5时接近第二阈值(LT2)⁴⁴。通过检测DFAa1随强度的变化，可自动判定有氧阈心率和无氧阈心率。这类HRV阈值与传统乳酸、通气阈高度相关：一项系统综述汇总了27项研究，发现用HRV法测得的“低强度阈”（HRVT_low）与传统通气阈1和乳酸阈1的平均差异不到1%HR，偏差仅约1–2拍/分⁴⁵；高强度阈（HRVT_high）与通气阈2/乳酸4mmol阈值的平均差异也在3%HR以内^{46 47}。这提示HRV分析法有望成为无需采血、气体分析的简便阈值测定手段⁴⁸⁴⁹。算法上，除了DFAa1，学者们也尝试了**高频段功率(HF)**、**样本熵**等HRV指标来定位阈值⁵⁰⁵¹。一些研究开发了自动化算法，如基于**心率递归图分析(RQA)**检测有氧阈：通过对心率时间序列做

复杂性分析，自动寻找HRV突变点，据报道其检测结果与通气阈吻合良好⁵²。总体来看，HRV阈值法作为前沿技术，具有**个体化、无创、实时**的优势，有望应用于运动员自行测试阈值。但目前个体一致性仍有限，研究指出不同方法间一致性差异较大，且女性运动员数据不足，需要更多验证^{53 54}。

2. **HRV指导训练**：这不是直接划分心率区间，而是利用每天的HRV状态（通常清晨测量的**慢波段HRV**指标，如rMSSD）来调整训练计划。当HRV显著低于个体基线时，往往意味着疲劳或压力增大，此时若安排高强度训练可能风险提高，教练通常会改为低强度恢复日；当HRV处于正常或高于平常水平时，则认为机体恢复良好，可以进行高强度训练。这种**HRV指导的个体日负荷调整**已被研究证明效果良好。例如2025年的一项随机对照研究中，久坐成年人分别采用HRV自适应训练和固定计划训练11周，结果两组有氧适能提升相近，而HRV指导组在家自主训练的依从性和效果与教练指导组类似，显著优于对照组⁵⁵⁵⁶。在竞技体育中，HRV指导常用于监控恢复：若连续数日HRV低迷，则意味着需要降低训练量或加强恢复。这一模型的优势在于充分考虑个体每日状态差异，避免“一刀切”的训练处方，提高训练的**灵活性与安全性**。劣势是HRV易受睡眠、温度、测量时间等干扰，且个体日间波动大，需要较长时间收集基线才能做出可靠判断。因此HRV指导通常与传统区间划分结合使用：如确定基础心率区间（通过HRmax或阈值法），再根据每天HRV决定采用哪个区间进行训练。越来越多专业团队和软件（如HRV4Training等）在采用此理念以优化训练负荷。

Intervals.icu 平台的7区间划分法

Intervals.icu是近年流行的线上训练数据分析平台，其中内置了一套**7区间心率划分模型**，具有代表性。实际上，该模型源自Joe Friel提出的心率区间，与Coggan功率七区对应，被许多训练软件（TrainingPeaks等）沿用³⁸。其特点是在传统5区基础上增加细分，特别是将高强度区细化为三个子区，以刻画无氧与冲刺强度。具体划分规则为：平台要求用户输入阈值心率（Threshold HR，通常为乳酸阈LTHR）和最大心率，然后提供若干预设方案，如Friel 7区、80/20五区等^{57 25}。以Friel七区为例，其默认比例（以阈值HR计）如下：

- **Zone1** – Active Recovery（积极恢复）：低于约阈值HR的81%⁴⁰（跑步运动则<85%²⁷）。这对应非常轻松的活动，用于恢复和热身。
- **Zone2** – Endurance（有氧耐力）：约阈值HR的81%–89%（跑步85%–89%）⁵⁸。这是典型的长距离有氧区，用于提升基础耐力。
- **Zone3** – Tempo（节奏耐力）：约阈值HR的90%–93%（跑步90%–94%）^{29 59}。介于有氧与阈值之间，常用于节奏跑/骑，提高长时间维持次阈强度的能力。
- **Zone4** – Threshold（乳酸阈）：约阈值HR的94%–99%^{60 61}。接近个人阈值强度，用于**阈值训练**，提升乳酸清除和耐受能力。
- **Zone5** – VO₂max（最大摄氧）：约阈值HR的100%–102%（跑步100%–102%）²⁸。略高于阈值，接近VO₂max强度的区间，用于3~8分钟左右的高强度间歇训练。
- **Zone6** – Anaerobic（无氧）：约阈值HR的103%–106%²⁸。对应无氧功率区，用于更短时间（1~3分钟）的剧烈间歇冲刺。
- **Zone7** – Neuromuscular（神经肌肉冲刺）：阈值HR的106%以上⁶²。已接近HRmax，多用于几秒到几十秒的全力冲刺。

上述心率区间的划定使得**不同运动类型的一致性**提高：例如自行车骑行主要根据功率训练，但使用该心率区划可以在没有功率计时用心率评估训练强度分布，且保证时长分布和功率分析一致^{38 39}。Intervals.icu允许用户在设置中选择基于最大心率或基于阈值心率划分。如果选择基于阈值（默认方式），则如上所述Zone1约为65–80%阈值HR（对应一般人的50–60%HRmax左右），Zone4围绕阈值设定，Zone7逼近HRmax^{63 64}。如果用户改为基于最大心率，平台也提供传统5区百分比方案供选⁶³。总的来说，Intervals.icu的7区划分法体现了当前训练实践中**精细分区**的趋势：低强度区域确保充足有氧训练量（如80/20法则强调Zone1-2占80%以上时间^{65 66}），中高强度区域细分则用于有针对性地安排阈值、VO₂max和冲刺训练。其劣势在于区间较多对新手略显复杂，但对于高水平耐力运动员，这种精细划分有助于全面发展不同能量系统能力。正如Intervals论坛上所言，不同教练/体系采用的区间模型如同“不同语言”，核心是围绕**两个乳酸阈值**划分区域^{67 68}；七区模型无非是在**重度强度域**（高于LT2）和**中等强度域**（LT1~LT2之间）再细分，以便更清楚地区分**无氧功率**和**最大氧耗**训练^{69 70}。

不同划分方法的应用比较

不同心率区间划分方法各有适用场景和针对人群，在**耐力、有氧、阈值和恢复训练**中的指导效果也有所区别。下表总结了上述方法的特点并比较其应用：

方法	主要依据	典型计算方式 (以某运动员最大心率180, 静息60为例)	优点	局限性及应用建议
最大心率百分比	人群平均生理经验, HRmax百分比	区1: 50–60%HRmax (90–108bpm) 区2: 60–70%HRmax (108–126bpm) 等 1 71	简单易行, 无需测试 大众健身常用, 快速估算锻炼强度范围	个体差异大, 误差可达±10拍 无法准确对应个人阈值 5 10 适合入门指导, 需结合自我感觉调整
储备心率法 (Karvonen)	HRmax和静息HR个体差异	目标HR = 60 + (180–60)强度% 如70%强度: 60+1200.7=144 bpm	考虑静息HR, 个体化更佳 强度%与VO2%更匹配 17	需测静息HR和HRmax 公式稍复杂 较适合普适运动处方, 精度中等
乳酸阈值法	个体有氧/无氧阈值	阈值HR假定=160 bpm (如测试得) 区1: <80%阈值HR (<128) 区4: ~95%阈值HR (~152) 等 26	直接基于生理阈值, 强度精准 适用于提升耐力性能的训练指导	阈值测定需测试 (场地或实验室) 参数需定期更新 经验指导下效果最佳
FTP/临界功率心率	功率阈值及对应HR	FTP测试得阈值HR=160 区2 HR对应55–75%FTP功率 需经验换算 (平台已内置) 41	与功率训练接轨, 内外负荷结合 自行车训练分析一致性好	需功率测试或场地测试 高强度HR滞后, Zone6+参考价值低 主要用于竞技耐力项目
HRV阈值法	HRV剧变点反映LT1/LT2	记录渐增试验R-R间期 计算DFAα1随强度曲线 如α1降至0.75对应HR=140 (LT1)	无创自动检测阈值 高度个体化, 新技术前沿	需精准心电/RR记录与计算 算法标准未统一 科研探索阶段, 应用需谨慎
HRV指导训练	日常HRV状态	如rMSSD低于基线-20%, 当天避免高强度 恢复日安排Zone1跑	动态调整训练负荷, 防过度训练 55 提高个性化和安全性	HRV受多因素影响 需长期监测个体基线 常与其他区间法结合使用
Intervals 7区	阈值HR + 经验比例	阈值HR=160, HRmax=180 Zone1:<134 (≤83%阈值) Zone7:>171 (>107%阈值) 41	细分强度类型全面 (恢复、有氧、阈值、无氧皆涵盖) 分析和交流有统一标准	区间多新手易混淆 须准确阈值HR输入 高阶训练/数据分析常用

表：常见心率区间划分方法特点汇总（括号内示例数值为假设最大心率180、阈值心率160情况下各区间心率）。

从应用角度来看：

- **恢复与有氧基础训练（Zone1-2）**：初学者和大众健身人群常采用简单的%HRmax或%HRR方法即可大致控制强度在较低范围，例如以60-70%HRmax慢跑来发展有氧基础¹。然而对于竞技选手，更精确的LT1阈值划分更能保证真正处于**纯有氧区**。如**MAF180公式**（180-年龄）就是经验法估计接近LT1的心率，用于指导慢跑不超此值以确保燃脂供能^{72 73}。HRV指导在恢复训练中也发挥作用：当天若HRV显示状态不佳，即使计划是有氧跑也可能进一步下调强度或缩短时间，以促进恢复。
- **阈值强度训练（Zone4附近）**：这类训练旨在提高乳酸门槛，要求强度精准踩在或略低于个人阈值。采用乳酸阈值法或FTP心率法效果最佳，因为能直接基于个人阈值心率制定目标强度（如保持心率接近阈值心率±几拍）。相比之下，百分比法误差较大——有人在用%HRmax训练时可能以为达到了阈值强度，其实可能偏离阈值10%以上^{7 8}。因此，高水平耐力运动员做阈值跑一般都会事先测定自己的阈值心率/LTHR，再据此训练。HRV阈值法如成熟应用，也可辅助找到更准确的阈值点。
- **高强度间歇训练（Zone5以上）**：包括VO₂max间歇和无氧冲刺。这类训练时长短、强度剧烈。心率由于上升滞后，往往无法成为实时控强指标，但可用于**事后分析**累积负荷。训练指导上更常依赖配速/功率或主观感觉来控制间歇强度。不过，在安排总体计划时，不同划分模型对高强度训练量的统计有所不同：七区模型细分了Zone5（有氧耐力极限）、Zone6（无氧）、Zone7（冲刺），能更清楚地量化无氧工作量；而简单五区模型则把一切阈值以上统称Zone5。在这方面，Intervals.icu等精细模型有助于**竞技训练**中避免忽视某些强度类型的培养。但对于一般爱好者，过于细的高强度区分实际意义不大。
- **训练分布与监控**：在耐力训练中，一个重要话题是**强度分布策略**（如**极化训练80/20**或**时段化训练**）。无论采用何种划分方法，保证低强度训练占足够比重都是共识^{65 74}。但不同模型下“低强度”的定义略异：三分法里低强度=LT1以下，五区法里通常Zone1-2算低强度。如果用%HRmax粗略法，容易误把偏高的强度当作有氧区。例如Zone2训练在某些人实际已接近LT2却不自知^{7 8}。因此高水平运动中，更倾向基于阈值来统计训练分布，以确保真正80%的时间在低于LT1的强度完成，从而避免“中间强度过多”的陷阱。总之，在训练监控应用上，越高级的方法提供越精细和个性化的数据，但基础方法仍可用于一般健身追踪，只是要谨慎解读。

心率分区算法的最新进展（近三年研究）

近三年的研究在心率分区与强度控制领域有不少新进展，聚焦于**提高个体化准确度**和**引入技术手段自动识别阈值**等方向：

- **强调个体差异的重要性**：2025年发表在Translational Sports Medicine的一项研究对比了多种划定Zone2（低强度有氧区）的标准，发现**统一的固定指标难以适用于所有人**^{75 10}。例如，用HR_max的某固定百分比（如72%或82%）来定义Zone2边界，在不同个体上对应的实际代谢强度差异巨大，有些人75%HR_max已经超过LT1，而另一些人到85%HR_max仍处于纯有氧供能^{8 76}。相比之下，采用个体的VT1（通气阈1）或测得的FatMax（最大脂肪氧化强度）来定义Zone2，则能较一致地反映真实的有氧区^{75 9}。该研究呼吁未来采用**个体生理指标**（如通气阈、乳酸基线+0.5mmol提升点等）来定制训练区间，而非依赖“一刀切”的百分比法^{9 77}。这进一步从科学角度支持了阈值划分和HRV划分等个性化方法，相较传统经验公式将更优化训练效果。
- **HRV阈值方法的验证与改进**：针对利用HRV寻找运动阈值，2023年的一篇系统综述（Sports Medicine – Open）汇总了数十项研究，整体结论是**HRV低强度阈值(HRVT_low)与传统LT1/VT1高度接近**，平均偏差不到1%心率，相关性强^{45 48}。这证明了HRV方法的可行性，特别是DFAα1=0.75作为有氧阈判断已被多项研究反复支持⁴⁴。不过对于高强度阈值(HRVT_high)的可靠性，该综述认为尚需更多数据验

证⁴⁸。近期也有研究致力于改进实时计算的可靠性，例如过滤掉运动中的干扰信号、优化R-R间期采集等，以使DFA α 1曲线更平滑、阈值识别更稳健。一些开源或商用软件插件（如Fatmaxxer等）已经实现了基于运动手表心率带的数据来实时计算DFA α 1，帮助教练和运动员尝试在训练中定位Aerobic Threshold。当下来看，HRV阈值检测已成为运动生理和数理统计交叉的新热点，“用算法取代乳酸检测”具有吸引力，但学界也提醒要注意个体差异和算法参数敏感性，在广泛应用前需进一步标准化和验证^{53 54}。

- **人工智能与自动阈值预测：**随着穿戴设备和大数据的发展，新近有研究尝试用机器学习模型从日常运动数据中**自动估计乳酸阈值心率**。2025年一项研究提出利用**迁移学习的深度神经网络**，先在实验室收集配对的心率与乳酸数据训练模型，再应用于户外跑步心率数据，成功将模型预测的乳酸阈心率平均误差控制在约 $\pm 4-9$ bpm^{78 79}。该方法通过RNN网络融合心率曲线形态特征，实现对阈值的自动判断，初步展示了AI在耐力训练监测中的潜力^{80 81}。类似地，早些研究也探索了利用心肺运动测试数据训练算法自动识别通气阈的可行性⁵²。这些AI模型未来若成熟嵌入运动手表或App中，或可在日常训练中无缝识别强度区间、追踪阈值变化，无需频繁实验室检测。中国科研团队也参与了这方面工作（如上文迁移学习模型即由北体大研究者开发⁸²），表明这一领域具有国际关注度。不过，目前AI预测仍受限于训练数据质量，对不同人群的泛化能力也有限，短期内更可能作为教练辅助工具，而非完全取代传统测量。
- **训练负荷与心率区间的新指标：**传统上训练负荷有TRIMP等基于心率区间时间加权计算的指标。近期研究者提出一些改良指标，将心率区间分布与个体最大能力相关系数结合，试图更准确地量化训练刺激。例如，有论文讨论了结合心率区间与**心率恢复速度**来表征训练疲劳的新方法。但总体而言，负荷计量不是本文重点，且相关进展多为Incremental的改进，这里不作展开。

总的来说，当前的前沿研究体现出两个趋势：**（1）更精细和个性化的区间确定**——通过HRV、AI等技术获取每个人更准确的生理阈值；**（2）更动态的训练强度管理**——利用每日HRV等指标实时调整训练。而经典的基于HRmax百分比的简单模型正被证实存在个体适配性上存在明显不足^{9 5}。未来我们可能看到运动设备和平台整合这些新算法，例如自动分析日常训练数据给出个性化心率区间建议，或者在训练中实时提示“您已进入无氧区/恢复区”等。这些进展最终服务的目标，是让训练强度划分从**经验平均**走向**科学个体定制**，帮助运动员在安全范围内更有效地提升表现。

参考文献：

- 【1】 Intervals.icu论坛 – “About different HR zone models”，讨论乳酸阈在不同模型中的作用^{67 69}。
- 【4】 Kaufmann et al. 2023, Sports Medicine - Open – “Heart Rate Variability-Derived Thresholds...”：系统综述HRV阈值与传统阈值的吻合度^{45 48}。
- 【5】 TrainingTilt教练博客 – “How to Calculate Heart Rate Zones”：介绍HRmax%、Karvonen、LTHR等多种心率区间算法^{1 26}。
- 【10】 Intervals.icu论坛 – “Heart Rate Zones...not matching power zones”：给出Intervals.icu默认7区心率划分及其与Strava等的平台区别^{41 38}。
- 【12】 Joe Friel, TrainingPeaks 教程 – “Quick Guide to Setting Zones”：提供跑步和自行车的阈值心率分区百分比表^{27 29}。
- 【13】 Casanova-Lizón et al. 2025, Frontiers in Sports and Active Living – HRV指导自主训练对久坐人群健身效果的研究⁵⁵。
- 【17】 Intervals.icu论坛 – “Zone 2 Intensity: ... Variability Research”：总结2025年Zone2强度个体差异研究的要点^{75 9}。
- 【32】 Meixner et al. 2025, Transl Sports Med – “Zone 2 Intensity...”：Zone2划分指标变异性的研究摘要^{5 6}。
- 【33】 Kaufmann et al. 2023 – 文中提到DFA α 1=0.75和0.5与阈值的对应关系⁴⁴。
- 【34】 Swain et al. 1997, Med Sci Sports Exerc – 心率储备与VO₂储备等同关系的经典研究，证明%HRR \approx %VO₂R¹⁷。
- 【35】 Runner’s World 跑者世界 – “Heart Rate Training”：阐述Tanaka公式和NASM五区HRmax划分³

4。

【37】 Runner' s World – 同上, 介绍Karvonen公式计算和五区划分 (引用克利夫兰诊所建议) ¹⁴ ; 介绍MAF方法 ⁷² 。

【38】 Zhu等 (北体大) 预印本 2025 – “Automatic Estimation of Lactate Threshold HR and Pace...” : 提出迁移学习模型预测LTHR, 摘要结果 ⁷⁸ ⁷⁹ 。

¹ ² ¹³ ²⁴ ²⁶ ³² ³³ ⁷¹ How to Calculate Heart Rate Zones

<https://trainingtilt.com/how-to-calculate-heart-rate-zones>

³ ⁴ ¹⁴ ¹⁵ ¹⁶ ²⁰ ²¹ ⁷² ⁷³ ⁷⁴ Heart Rate Training: Benefits of Heart Rate to Boost Performance

<https://www.runnersworld.com/training/a62370801/heart-rate-training/>

⁵ ⁶ Zone 2 Intensity: A Critical Comparison of Individual Variability in Different Submaximal Exercise Intensity Boundaries - Consensus

<https://consensus.app/papers/zone-2-intensity-a-critical-comparison-of-individual-meixner-filipas/ea8497c1a27156f38d9ef380706b641b/>

⁷ ⁸ ⁹ ¹⁰ ¹¹ ¹² ⁷⁵ ⁷⁶ ⁷⁷ Zone 2 Intensity: Comparison of Individual Variability Research - Training - Intervals.icu Forum

<https://forum.intervals.icu/t/zone-2-intensity-comparison-of-individual-variability-research/96432>

¹⁷ ¹⁸ ¹⁹ Heart rate reserve is equivalent to %VO2 reserve, not to %VO2max - PubMed

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9139182/>

²² ²³ ⁶⁷ ⁶⁸ ⁶⁹ ⁷⁰ About different HR zone models - Training - Intervals.icu Forum

<https://forum.intervals.icu/t/about-different-hr-zone-models/97977>

²⁵ ⁵⁷ ⁶⁵ ⁶⁶ Guide to Setting Up HR Zones - Intervals.icu Forum

<https://forum.intervals.icu/t/guide-to-setting-up-hr-zones/19622>

²⁷ ²⁸ ²⁹ ³⁰ ³¹ ³⁷ ⁴⁰ ⁵⁸ ⁵⁹ ⁶⁰ ⁶¹ ⁶² Joe Friel's Quick Guide to Setting Zones | TrainingPeaks

<https://www.trainingpeaks.com/learn/articles/joe-friel-s-quick-guide-to-setting-zones/>

³⁴ ³⁵ ³⁶ Setting Lactate Threshold HR/Power - Feature Requests - Intervals.icu Forum

<https://forum.intervals.icu/t/setting-lactate-threshold-hr-power/5803>

³⁸ ³⁹ ⁴¹ ⁴² ⁴³ ⁶⁴ Heart Rate Zones range settings in i.icu (was: "different from Strava"; now: "not matching power zones") - Training - Intervals.icu Forum

<https://forum.intervals.icu/t/heart-rate-zones-range-settings-in-i-icu-was-different-from-strava-now-not-matching-power-zones/1094>

⁴⁴ ⁴⁵ ⁴⁶ ⁴⁷ ⁴⁸ ⁴⁹ ⁵⁰ ⁵¹ ⁵³ ⁵⁴ Heart Rate Variability-Derived Thresholds for Exercise Intensity Prescription in Endurance Sports: A Systematic Review of Interrelations and Agreement with Different Ventilatory and Blood Lactate Thresholds | Sports Medicine - Open | Full Text

<https://sportsmedicine-open.springeropen.com/articles/10.1186/s40798-023-00607-2>

⁵² Automatic Detection of Aerobic Threshold through Recurrence ...

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9916349/>

⁵⁵ ⁵⁶ Frontiers | Impact of heart rate variability-based exercise prescription: self-guided by technology and trainer-guided exercise in sedentary adults

<https://www.frontiersin.org/journals/sports-and-active-living/articles/10.3389/fspor.2025.1578478/full>

⁶³ Heart Rate Zones - Training - Intervals.icu Forum

<https://forum.intervals.icu/t/heart-rate-zones/76615>

78 79 80 81 82 Automatic Estimation of Lactate Threshold Heart Rate and Pace in Real-
World Running Based on Transfer Learning by Zheng Zhu, Wei Cui, Changda Lu, Yanfei Shen, Bingyu Pan ::
SSRN
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5417016