### 差分进化算法在减肥平台期优化中的应用

### 一 减肥平台期问题的形式化

#### 1. 核心挑战与研究视角

减肥平台期是人体新陈代谢系统为适应新的饮食与运动模式而达到的一种生理稳定状态。从最优化理论的视角审视，该状态可被视为系统陷入了一个局部最优解 (Local Optimum)。本研究的创新之处在于，提出了一种超越传统直觉或试错方法的路径，即将此生理问题建模为一个复杂的黑箱优化问题，并运用高效的全局优化算法——差分进化 (Differential Evolution, DE)——对解空间进行系统性探索，以期识别出能够打破当前僵局的全局最优解 (Global Optimum)。

#### 2. 问题建模：将生理问题转化为数学表述

a. 决策向量 (Decision Vector) 决策向量是算法可调控的变量集合，其在模型中代表一个完整周期的体重管理方案。一个具体的方案 X 可被定义为：

X = [C, P, H, F, Cardio\_Freq, Cardio\_Dur, Strength\_Freq, Sleep\_Dur]

1）日均热量摄入 (C): 连续变量，其取值范围被设定为例 [1500, 2200] kcal。

2）宏量营养素供能比 (Macronutrient Ratios):

蛋白质比例 (P): [25%, 45%]

碳水化合物比例 (H): [30%, 50%]

脂肪比例 (F): [20%, 35%]

约束条件: P + H + F = 100%

3）有氧训练参数 (Cardio Training Parameters):

每周训练频率 (Cardio\_Freq): 离散变量，可选集合为 {2, 3, 4, 5} 次。

单次训练时长 (Cardio\_Dur): 离散变量，可选集合为 {30, 45, 60} 分钟。

4）力量训练参数 (Strength Training Parameters):

每周训练频率 (Strength\_Freq): 离散变量，可选集合为 {2, 3, 4, 5} 次。

5）睡眠参数 (Sleep Parameters):

每晚平均睡眠时长 (Sleep\_Dur): 连续变量，取值范围为 [6.5, 8.5] 小时。

b. 适应度函数 (Fitness Function) 适应度函数是评估任一方案有效性的量化标准。本研究的目标是最小化该函数值。一个科学构建的适应度函数 f(X) 应整合多元化的评估维度： f(X) = w1 \* (肌肉流失率) - w2 \* (体脂下降率) + w3 \* (主观可持续性评分)。这是用来评估一个“减肥方案”好坏的标准。算法的目标就是找到使这个函数值最优（通常是最小化或最大化）的决策变量组合。

1）肌肉流失率: 该指标可通过体脂分析设备进行估算，其值越小表明方案越优。

2）体脂下降率: 该指标反映了减脂效果，其值越大表明方案越优，故在函数中以负号表示。

3）主观可持续性评分: 此为用户根据方案执行过程中的疲劳感、饥饿感及整体幸福感给出的综合评分（范围1-10），分值越高代表方案越难长期坚持，因此其目标是最小化。分数越高代表越疲劳、越难坚持。我们希望这个分数越低越好。

4）权重系数 (w1, w2, w3): 这些系数分别代表研究者或用户对于不同优化目标的重视程度。例如，若首要目标为最大化保留肌肉质量，则可为 w1 分配一个相对较高的值。

#### 约束条件（确保生成的方案是可行和健康的）

* 1500 <= C <= 2200 (热量不应过低或过高)
* P + H + F = 100 (宏量素比例之和为100%)
* 每日蛋白质摄入量 > 1.2 \* 体重(kg) 克 (保证基本需求)
* 每周总运动时间 < 15 小时 (防止过度训练)

算法流程

#### 1. 初始化（第0周）

* **种群规模 (NP)**: 设定一个种群规模，例如 NP = 10。同时构思和准备10个不同的“减肥周计划”。
* **生成初始种群**: 在你的决策变量范围内，随机生成 NP 个初始方案。

例如，随机生成的两个方案可能像这样：

* 方案1: [1800大卡, P=40, H=40, F=20, 有氧3次\*45分, 力量3次, 睡眠7小时]
* 方案2: [2000大卡, P=30, H=50, F=20, 有氧5次\*30分, 力量2次, 睡眠8小时]

作为唯一的减肥者，需要一个起点。从这10个方案中选择任何一个认为最合理、最容易开始的方案来执行。假设选择了 X10，X10 成为了“当前最佳方案”。

#### 2. 迭代 - “进化”减肥方案

对于每一代（例如，每一周或每两周为一个迭代周期）：

1）执行: 在第1周，严格按照方案 X10 来饮食和运动。

2）评估: 在第1周末，测量体重、体脂等数据，并计算出方案 X10 的“适应度分数” f(X10)。

**a. 变异 (Mutation)** 对于种群中的每一个方案 X\_i (目标向量)，从种群中随机选择三个**不同**的其它方案 X\_r1, X\_r2, X\_r3。 生成一个“变异”方案 V： V=Xr1​+F⋅(Xr2​−Xr3​)

F 是**缩放因子**（通常在 [0.4, 1.0] 之间），它控制着变异的幅度。F 越大，算法的探索能力越强，越容易跳出局部最优。在平台期，可以适当调高 F。

**b. 交叉 (Crossover)** 将变异方案 V 与原始方案 X\_i 进行“杂交”，生成一个“试验”方案 U。

* + CR 是**交叉概率**（通常在 [0.5, 1.0] 之间）。决定新试验方案在多大程度上继承自变异方案。CR 越高，方案的变化越大。
  + 这个过程可以认为是：“我的新计划，热量摄入部分采用变异方案的，但运动部分保留我原来的计划。”

**c. 选择 (Selection)**

* 1. 当前的最佳方案 X\_i。
  2. 通过变异和交叉，得到了一个新的试验方案 U。
  3. **执行这个试验方案** U (例如，接下来的一周就按照 U 的参数来饮食和运动)。
  4. 在周期结束时（周末），测量你的体重、体脂率等数据，并评估主观感受，然后计算出试验方案 U 的**适应度值** f(U)。
  5. 比较 f(U) 和你原始方案 X\_i 的适应度值 f(X\_i)。
  6. 如果 f(U) 更优（在我们的例子中是值更小），那么就用 U 替换 X\_i 作为下一代的新方案。否则，保留原来的方案 X\_i。

**d. 重复**: 对种群中所有的个体都执行完 a, b, c 后，一代迭代就完成了。然后开始新的一代（新的一周），不断重复，直到对结果满意或者达到最大迭代次数。

### 二 研究路径

**1.“理论框架构建”与“计算仿真实验”相结合**

一项提出新型个性化健康优化框架，并通过仿真实验对其概念可行性进行初步验证的学术工作。

#### 2. 核心策略：构建“虚拟人”计算仿真模型

鉴于在真实人体上进行干预性实验的客观限制，本研究采用构建计算仿真模型的方法，即创建一个“虚拟人”作为实验代理。该仿真模型旨在模拟人体的核心代谢机制，特别是平台期的生理形成过程。

1）基础代谢率 (BMR): 模型的构建基于公认的生理学公式，如Mifflin-St Jeor方程。

2）每日总能量消耗 (TDEE): TDEE = BMR \* 活动系数 + 运动消耗。

3）核心机制——新陈代谢适应: 此为仿真模型的关键部分。模型将模拟当体重下降或能量缺口长期存在时，BMR会发生动态下调的生理现象，从而引致平台期的出现。其数学表达可简化为例：当前BMR = 初始BMR \* (当前体重 / 初始体重)^0.75 \* 适应因子。

4）体重变化模型: 基于能量平衡基本原理，例如，设定累计能量赤字达到约7700千卡时，体重将减少1公斤。