

参赛学生姓名：_____黄麒超_____

中学：_____广东实验中学_____

省份：_____广东省_____

国家/地区：_____中华人民共和国_____

指导老师姓名：_____王剑、程天放_____

指导老师单位：_____广东实验中学_____

论文题目：_____百米短跑跑法类型测算的数学模型及其应用_____

百米短跑跑法类型测算的数学模型及其应用

作者：黄麒超

指导老师：王剑、程天放

单位：广东实验中学

摘要

100 米短跑运动员的跑法类型是田径体育领域一项重要且实用的科学指标，虽可依据“60+40 模型”分为前程型、均衡型或后程型，但仍缺乏准确的量化测算标准。针对跑法类型的量化难题，本研究以男/女运动员最均衡跑法下的前后程用时比值作为切入点，基于微分方程建立了其与全程用时之间的复合函数模型，从而推导出偏离度计算公式，并提出跑法类型的测算方法。为进一步提升测算方法的实用性与精度，本研究引入国际公认的 Mureika 公式，融入了风速及海拔因素改进了数学模型与偏离度计算公式，并分析了这些因素对男女运动员偏离度的影响。最后，本研究通过国际大赛真实数据的计算实验验证了数学模型的合理性、准确性与可解释性，并基于国家队运动员与个人训练案例，将测算方法应用于短跑运动员个性化训练与 4×100 米接力排棒决策。综上，本研究提出的数学模型构建了百米跑法类型的精确测算方法，为运动员科学训练与接力战术优化提供了理论依据与实践指南。

关键词：百米短跑；跑法类型；均衡程度；偏离度；微分方程

Abstract

The running style of 100-meter sprinters is an important and practical scientific metric in track and field. Although it can be classified into start-focused, balanced, or end-focused based on the “60+40 model”, precise quantitative measurement standards are still lacking. To address this challenge, this study started with calculating the ratio of split time under the most balanced running style as a starting point, and based on which established a composite function model linking this ratio to the total runtime using differential equations, and concluded with the derivation of a deviation index formula and a method for determining running styles. To enhance the practicality and accuracy of the method, two crucial influential factors, wind speed and altitude, were taken into account, by incorporating the internationally recognized Mureika formula to improve the mathematical model and deviation index calculation, based on which the influence of these factors on the deviation index of male and female athletes was analyzed. Finally, the rationality, accuracy, and interpretability of the mathematical model were verified through computational experiments using real data from international competitions. This method was applied to training for sprinters and baton placement decisions in 4×100-meter relays, using case studies from national team athletes and individual training routines. In summary, the mathematical model proposed by this study provides an accurate quantitative method for determining 100-meter running styles, offering a theoretical basis and practical guidance for scientific athlete training and relay strategy optimization.

Keywords: 100-meter sprint; running style; degree of balance; deviation index; differential equations

目 录

1 引言	4
2 问题陈述	4
2.1 相关变量与参数	4
2.2 相关数学公式	5
2.3 问题假设	5
3. 数学模型	6
3.1 前后程用时比值与百米全程用时之间的函数关系	6
3.2 偏离度计算公式与跑法类型测算	8
4 实验结果与应用案例	11
4.1 数学模型选型的验证	11
4.2 数学模型的准确性验证	13
4.3 数学模型的应用案例	14
5 总结	16
致谢	18

1 引言

田径自古以来被誉为“运动之母”，而百米短跑“飞人大战”则是田径项目中知名度最高、观赏性最强、最受欢迎的项目之一。每一个优秀的百米运动员，往往离不开教练的针对性培养。要做好针对性培养的科学决策，则需基于运动员百米跑的跑法类型做相应分析。

关于百米短跑的分段划分，最通用的标准是“60+40”模型，即前 60 米为“前程”，后 40 米为“后程”。这一划分标准主要来自于百米跑人类身体的供能原理[1]。百米跑过程中，前 6-8 秒依赖磷酸原系统（ATP-CP）供能，这正好对应前 60 米区间；而这一阶段过后，人体需调动糖酵解系统，抵抗乳酸堆积导致的减速，这则对应了后 40 米区间。若运动员百米跑中前程有优势，则为前程型选手；后程有优势，则为后程型选手；前后程无明显优势，则为均衡型跑法。因此，田径训练需基于对运动员百米跑的跑法，来制定运动员专属训练方式。对于我国田径突破的重要项目—— 4×100 米接力，运动员百米跑法类型也是教练组做出排棒决策的主要根据。

自高速摄像机被应用于短跑比赛以来，有关百米分段的量化研究[2][3]开始涌现。这些研究主要基于步幅、步频、最大速度与速度保持能力等指标[4]进行分析，较少直接从分段数据定量研究跑法的偏离度，即分段“偏前程”或“偏后程”的程度，更没有提出关于“均衡跑法”的标准。笔者结合世界田联提供的积分对应表数据[5]及个人练习短跑的经验发现，跑法类型难以从分段数据直接判断，其原因可能在于百米前后程用时比值与百米用时之间存在较为复杂的数量关系。因此，本文旨在通过数学建模揭示这个数量关系，从而实现跑法类型的准确测算。这一现状造成了专业体育团队难以准确根据运动员跑法类型进行针对性训练；重要赛事中的 4×100 接力棒次安排也缺少一大重要的数据依据。

下文共分五部分：第 2 节介绍了问题的基本信息与数学模型的符号、公式。第 3 节建立了最均衡百米前后程比值与百米用时的微分方程模型，结合函数拟合推导出在理想情况与实际情况下（考虑风速和海拔等条件）的偏离度计算公式，得到相应的男女运动员跑法类型测算方法。在第 4 节，笔者将用真实数据对模型进行验证与应用举例。第 5 节是全文研究工作的总结。

2 问题陈述

根据国际通用的“60+40”模型，百米全程分为前程（前 60 米）及后程（后 40 米）。据此，百米运动员的跑法可以分为三类：前程型（优势在于前 60 米，即起跑加速与衔接有优势）、均衡型（前程与后程表现较为均衡，无明显突出）以及后程型（优势在后 40 米，即极速与速度耐力有优势）。

本文所研究的男女运动员百米短跑跑法类型的测算问题，本质上是一个前后程用时比值与百米全程用时之间函数关系的数学建模问题。具体而言，本研究基于采集数据集在直角坐标系上的分布特性，建立一个上述数据量的微分方程模型，通过数据拟合出具体的函数解析式，再推导出关键指标“偏离度”的计算公式，实现跑法类型的量化判断标准。

在实验部分，研究根据国际田联的积分表，制定出每一个成绩对应的“均衡标准”，即最均衡跑法的前 60 米与后 40 米用时，并给出如何根据实际分段成绩与比赛时的风速、海拔计算偏离度并测算跑法类型。

2.1 相关变量与参数

本问题中，涉及到下列相关变量：

h ：比赛场地海拔，单位为 m（米），一般取 0m~2000m。

k : 前后程用时比值, 无量纲。

k_s (s : *Standard*, 标准情况, 即最均衡情况): 均衡跑法下的前后程用时比值, 无量纲。

k_c (c : *Corrected*, 修正后的值): 考虑风速与海拔影响时的前后程用时比值, 无量纲。

t : 百米全程用时, 单位为 s (秒), 一般为男子 9.50s~16.50s、女子 10.40s~18.40s。

t_s : 均衡跑法下百米全程用时, 单位为 s , 范围同 t 。

t_c : 全程硬实力成绩, 即考虑风速及海拔后的百米全程用时, 单位为 s , 范围同 t 。

t_1 : 百米前 60 米分段用时, 单位为 s , 一般为男子 6.20s~10.40s、女子 6.68s~11.73s。

t_{1s} : 最均衡跑法下百米前 60 米分段用时, 单位为 s , 范围同(6)。

t_{1c} : 前程硬实力成绩, 即考虑风速及海拔后的百米前 60 米分段用时, 单位为 s , 范围同 t_c 。

v : 比赛时风速 v , 单位为 m/s , 一般为 -5.0m/s 至 5.0m/s。

α : 偏离度, 即跑法偏离最均衡跑法的程度, 单位为 %。

2.2 相关数学公式

根据田径数据网站上显示的历史上的真实比赛分段数据, 以及网站中各平台知名田径数据分析专家对这些分段数据有关前后程的分析与评论 [6], 5 个不同的偏离度 α 取值范围分别对应 5 类跑法类型: 当 $\alpha < -15\%$ 时, 则称此分段为“前程型分段”; 当 $\alpha > 15\%$ 时, 则称此分段为“后程型分段”; 当 $\alpha \in [-7.5\%, 7.5\%]$ 时, 则称此分段为“均衡型分段”; 当 $\alpha \in [-15\%, -7.5\%) \cup (7.5\%, 15\%]$ 时, 则称此分段为“均衡偏前(或后)分段”。其中, “均衡偏前(或后)分段”为两类跑法类型——“均衡偏前分段”与“均衡偏后分段”的合称。

对于一个百米成绩及其分段成绩的偏离度 α 计算, 需考虑风速及海拔这两个对短跑成绩影响最大的环境因素。针对这两个因素, 目前国际公认的计算方法是 Mureika 公式 [7]: 当运动员在风速为 $v m/s$ 、海拔为 $h m$ 的条件下能跑出的百米用时为 t , 其在 0 风速 0 海拔条件下(理想情况下)能跑出的百米用时(硬实力成绩)为 t_c , 则两者之间的关系满足:

$$t_c = t[1.028 - 0.028e^{-0.000125h}(1 - \frac{vt}{100})^2]$$

在统计学中, 确定系数 (Coefficient of Determination) R^2 是衡量回归模型拟合优度的重要指标, 用于评估自变量对因变量变异的解释程度。 R^2 越接近 1, 模型越拟合数据, 因变量的所有变异越能被自变量解释, 越多的观测点落在回归线上。

2.3 问题假设

假设 1: 在世界田联规定的积分表中 [5], 假设相同积分的 60 米成绩与百米成绩处于同一水平。在积分表列出的百米短跑成绩范围(男子: 9.46s~16.79s, 女子: 10.12s~21.68s)内, 每一个百米成绩都有一个相应的 60 米成绩与之积分相同。

假设 2: 根据假设 1, 假设某位运动员的百米成绩的前程分段成绩恰好为相同积分的 60 米成绩, 则这样的分段对应跑法最为均衡。

假设 3: 本问题中, 假设运动员跑法类型仅与其身体素质特征这一个内部因素有关, 不考虑伤病、训练方式大改等意外因素。

假设 4: 考虑专业选手与普通跑者跑法类型可测算的前提下, 假设男子百米成绩的研究范围为 9.500s~16.500s, 对应 60 米成绩范围为 6.206s~10.400s [5]。该取值范围主要是兼顾职业男运动员与中学男生短跑两种情境。其中, 百米成绩研究范围的最小值取值源于男子百米世界纪录 9.58s (牙买加运动员 Usain Bolt 创造), 最大值取值源于我国初中男生 100 米短跑及格标准为 16.000s [8]; 男子 60 米成绩的取值范围最小值参考世界纪录 6.34s (美国运

动员 Christian Coleman 创造) 以及男子百米前程分段世界纪录 6.29s (我国运动员苏炳添创造), 最大值取值参考我国初中男生 100 米短跑及格标准在世界田联积分表上对应的 60 米成绩, 即 10.095s [5]。

假设 5: 考虑专业选手与普通跑者跑法类型可测算的前提下, 假设女子百米成绩的研究范围为 10.400s~18.400s, 对应 60 米成绩范围为 6.680s~11.730s [5]。该取值范围主要兼顾职业女运动员与中学女生短跑两种情况。其中, 百米成绩研究范围的最小值取值源于女子百米世界纪录 10.49s (美国运动员 Florence Griffith-Joyner 创造) 的, 最大值取值源于初中女生 100 米短跑及格标准为 17.000s [9]; 60 米跑成绩的取值范围最小值参考了女子 60 米世界纪录 6.92s (为俄罗斯运动员 Irina Privalova 创造) 以及女子百米前程分段 (60 米) 世界纪录 6.81s; (牙买加运动员 Shelly-Ann Fraser-Pryce 创造的), 最大值取值参考我国初中女生 100 米短跑及格标准在世界田联积分表上对应的 60 米成绩, 即 10.840s [5]。

假设 6: 考虑风速的情况下, 风速在短跑全程中作用在运动员身上的面积基本相同, 且风速全程不变。

3. 数学模型

本节主要通过建立微分方程模型刻画均衡跑法下前后程用时比值 k_s 与全程用时 t 的曲线变化关系 (见 3.1)。男子运动员的 k_s 与 t 表现为类反比例复合函数关系 (见 3.1.1), 而女子情形的 k_s 与 t 表现为二次函数关系 (见 3.1.2)。本研究借助 Mathematica 软件用世界田联积分表的数据拟合出上述函数的具体表达式。基于 3.1 得到的函数关系, 研究进一步推导出了对应百米短跑成绩的偏离度 α 计算公式 (见 3.2.1)。为了让数学模型更符合实际情况, 研究考虑了比赛时的风速与海拔因素, 改进了偏离度计算公式 (见 3.2.2), 进而根据 2.1.(2) 测算出跑法类型。

3.1 前后程用时比值与百米全程用时之间的函数关系

根据假设 1 与假设 2, 研究以均衡跑法下前后程用时比值 k_s 作为切入点, 通过观察其与均衡跑法下百米全程用时 t_s 的曲线变化关系进行数学建模。

3.1.1 男子运动员跑法的类反比例复合函数模型

研究先通过观察男子运动员对应的 k_s 、 t_s 与百米前 60 米分段用时 t_{1s} 的曲线变化关系。

根据假设 4, 从世界田联积分表中数据 [5] 中男子百米 [9.500s, 16.500s] 范围内, 每隔 0.1s 逐个均匀抽样数据 (例如: 9.500s、9.600s、9.700s……) 及其对应的 60 米成绩, 共采集 71 组数据 (见附件 1)。根据公式 (1) 算出这些数据对应的前后程用时比值 k_s :

$$k_s = \frac{t_{1s}}{t_s - t_{1s}} \quad (1)$$

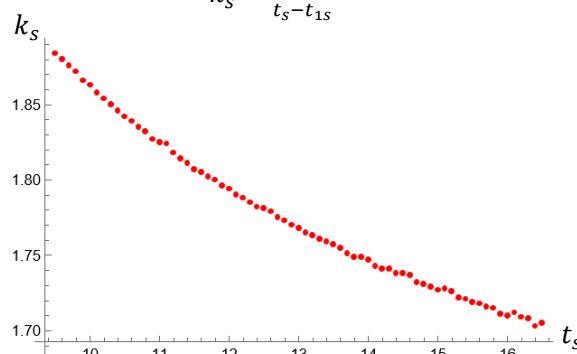


图 1: 男子最均衡跑法下百米全程用时 t_s 与前后程用时比值 k_s 的点集

用 Mathematica 软件绘制出所有 (t_s, k_s) 点, 所得点集在坐标系上的位置如图 1 所示。

由图 1 知, 在假设 4 提及的研究范围内, (t_s, k_s) 图像可以视为斜率为负且其绝对值单调递减的曲线。不妨假设该斜率是均匀变化的, 即曲线平滑, 函数可微。由此, 研究建立了该函数关系的微分方程模型, 如公式 (2) 所示:

$$\frac{dk_s}{dt_s} = \frac{a_1}{t_s^2} + b_1 \quad (2)$$

根据微分的性质, 公式 (2) 对应原函数为:

$$k_s = \frac{p_1}{t_s} + q_1$$

其中, a_1 、 b_1 、 p_1 、 q_1 均为待定系数, 可以通过具体数据确定。经 Mathematica 软件对该 71 组 (t_s, k_s) 数据 (见附件 1) 进行拟合, 得到更具体的表达式:

$$k_s = \frac{4.0202}{t_s} + 1.4594 \quad (3)$$

公式 (3) 的函数图像与原数据点位置关系如图 2 所示, 可直观看得到拟合的曲线效果良好。4.1 小节的实验结果将验证这一拟合的准确性与图 1 的平滑函数假设。

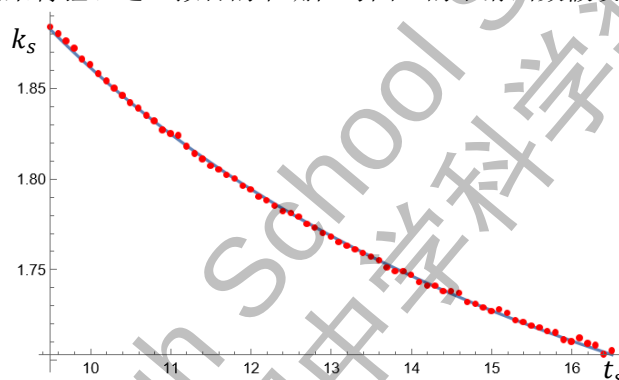


图 2: 图 1 加入公式 (3) 函数图像后的结果

3.1.2 女子运动员跑法的二次函数模型

同理, 研究还观察了女子运动员 k_s 、 t_s 与百米前 60 米分段用时 t_{1s} 的曲线变化关系, 进行类似的数学建模, 得到了与男子运动员不同的函数关系。

根据假设 4, 从世界田联积分表中数据 [5] 中女子百米 [10.400s, 18.400s] 范围内, 采用和男子模型相同的采样方法, 每隔 0.1s 逐个均匀抽样数据 (例如: 10.400s、10.500s、10.600s、……) 及其对应的 60 米成绩。由于女子运动员的采集范围与 3.1.1 的男子运动员不同, 此次共采集了 81 组数据 (见附件 2)。同样根据公式 (1) 算出这些数据对应的前后程比值 k_s , 用 Mathematica 软件绘制出所有 (t_s, k_s) 点, 所得点集在坐标系上的位置如图 3 所示。

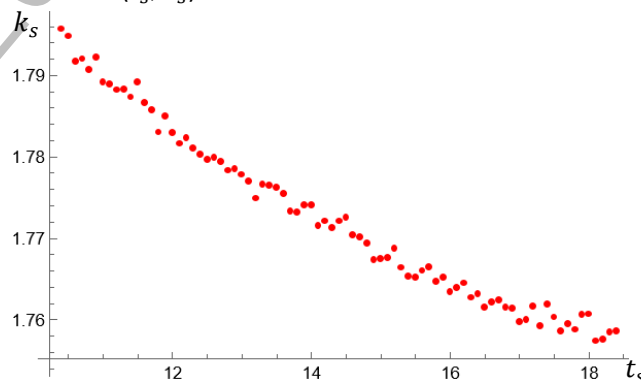


图 3: 女子运动员均衡跑法下百米全程用时 t_s 与的前后程用时比值 k_s 的点集

由图 3 知，在研究范围内（假设 4）， (t_s, k_s) 图像可以视为斜率为负且其绝对值单调递减的曲线，相对图 1 男子运动员的数据，女子运动员的数据点集更接近于直线分布。

因此，可以假设上述斜率是均匀变化的，即点集对应的曲线平滑，函数可微。由此，研究建立了该点集分布形态对应函数关系的微分方程模型，如公式（4）所示：

$$\frac{dk_s}{dt_s} = a_2 t_s + b_2 \quad (4)$$

根据微分的性质，公式（4）对应原函数为：

$$k_s = p_2 t_s^2 + q_2 t_s + r_1$$

其中， a_2 、 b_2 、 p_2 、 q_2 、 r_1 均为待定系数，可以通过具体数据来确定。经 Mathematica 软件对该 81 组 (t_s, k_s) 数据（见附件 2）进行拟合，得到更具体的表达式：

$$k_s = 0.0004244 t_s^2 - 0.01677 t_s + 1.92334 \quad (5)$$

公式（5）的函数图像与原数据点位置关系如图 4 所示，可直观看到拟合的二次函数效果高度吻合。4.1 小节的实验结果将验证这一拟合的准确性与图 3 的平滑函数假设。

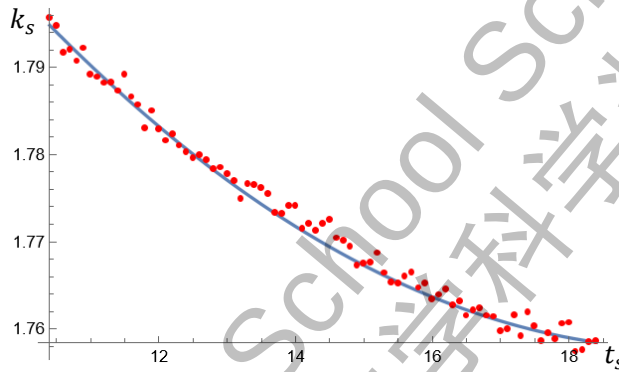


图 4：图 3 加入公式（5）函数图像后的结果

3.2 偏离度计算公式与跑法类型测算

在 3.1 得到的 k_s 与 t_s 函数关系的基础上，研究将推导出对应百米成绩偏离度 α 的计算公式，分理想情况与考虑风速、海拔因素的真实情况两种类型。

3.2.1 理想情况下的偏离度计算公式

根据假设 3，运动员的前后程用时比值 k 仅与运动员的体质与训练方式有关，在理想情况下，不考虑跑步时的风速与海拔等条件影响时，百米全程用时原始成绩就是均衡跑法下百米全程用时，即：

$$t_s = t \quad (6)$$

前后程用时比可以直接根据前程用时计算得到，如公式（7）所示：

$$k = \frac{t_1}{t - t_1} \quad (7)$$

考虑实际跑法与均衡跑法在前后程用时比上存在偏差，研究定义了偏离度的计算方式，如定义 1 所示。

定义 1（偏离度）：实际跑法与均衡跑法的偏离度 α 按公式（8）计算得到，

$$\alpha = \frac{k - k_s}{k_s} \quad (8)$$

对于理想情况下男子运动员跑法，综合公式（3）与公式（6）可得其用时比，

$$k_s = \frac{4.0202}{t} + 1.4594 \quad (9)$$

再将公式（7）和公式（9）代入公式（8）可得男子运动员的偏离度 α ，

$$\alpha = \frac{t \cdot t_1}{(t - t_1)(1.4594t + 4.0202)} - 1 \quad (10)$$

公式（10）的函数图像是一个曲面而非平面，如图 5 所示：

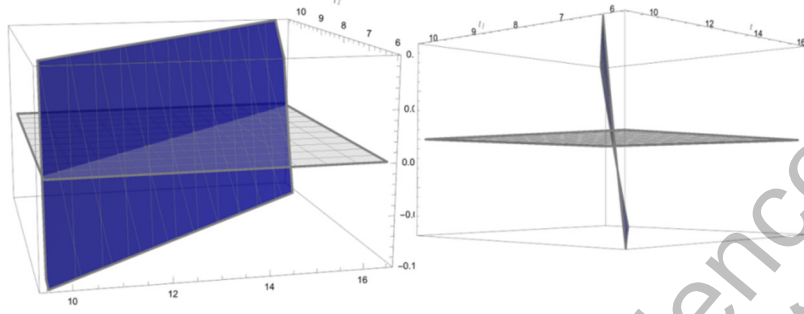


图 5：公式（10）两个视角的函数图像

同理，对于理想情况下女子运动员跑法，综合公式（5）与公式（6）可得其用时比，

$$k_s = 0.0004244t^2 - 0.01677t + 1.92334 \quad (11)$$

再将公式（7）和公式（11）代入公式（8）可得女子运动员的偏离度，

$$\alpha = \frac{t_1}{(t - t_1)(0.0004244t^2 - 0.01677t + 1.92334)} - 1 \quad (12)$$

公式（12）函数图像也是一个曲面而非平面，如图 6 所示：

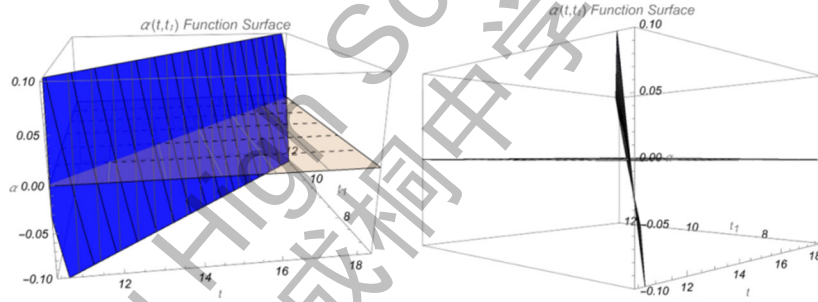


图 6：公式（12）两个视角的函数图像

根据 2.2.(1) 关于跑法类型的定义，不同的偏离度对应不同的跑法类型。因此，在实际应用（见 4.2 小节）中，可以将运动员全程用时 t 与前程用时 t_1 代入公式（10）或者公式（12），算出理想情况下男/女子运动员的偏离度，从而测算出对应的跑法类型。

3.2.2 考虑风速与海拔因素的偏离度计算公式

考虑跑步时的风速与海拔等条件影响时，研究将 2.2.(2) 硬实力百米全程用时视为均衡跑法下百米全程用时，即：

$$t_s = t_c \quad (13)$$

根据 2.2.(2) 的 Mureika 公式 [5] 定义函数如公式（14）所示：

$$m(x, y, z) = x[1.028 - 0.028e^{-0.000125y}(1 - \frac{zx}{100})^2] \quad (14)$$

因此，百米短跑运动员的硬实力成绩可以表示为：

$$t_c = m(t, h, v) \quad (15)$$

其中，原始成绩为 t 是运动员在风速 v m/s、海拔 h m 条件下能跑出的百米全程用时，而 t_c 则

是该运动员在 0 风速 0 海拔条件下（理想情况下）能跑出的百米全程用时，即硬实力成绩。

根据假设 6，风在前程与全程作用在运动员身上的面积基本相同，则有：

$$t_{1c} = m(t_1, h, v) \quad (16)$$

考虑风速与海拔影响时的前后程用时比值 k_c ，可以直接根据硬实力成绩 t_c 及其前程用时 t_{1c} 计算得到，如公式（17）所示：

$$k_c = \frac{t_{1c}}{t_c - t_{1c}} \quad (17)$$

在考虑风速与海拔影响的实际情况下，前后程用时比值 k_c 与均衡跑法的前后程用时比值 k_s 存在偏差，类似定义 1 的计算方式，公式（18）给出了这种情况下的偏离度计算方式。

$$\alpha = \frac{k_c - k_s}{k_s} \quad (18)$$

考虑风速与海拔影响情况下，男子运动员前后程用时比可以由公式（3）与公式（13）联立计算得到，如公式（19）所示：

$$k_s = \frac{4.0202}{t_c} + 1.4594 \quad (19)$$

再将公式（16）、（17）和（19）代入公式（18）可得风速为 v 和海拔为 h 前提下男子运动员的偏离度 α ，

$$\alpha = \frac{m(t, h, v)m(t_1, h, v)}{[m(t, h, v) - m(t_1, h, v)][1.4594m(t, h, v) + 4.0202]} - 1 \quad (20)$$

同理，考虑风速与海拔影响情况下，女子运动员前后程用时比可以由公式（5）与公式（13）联立计算得到，如公式（21）所示：

$$k_s = 0.0004244t_c^2 - 0.01677t_c + 1.92334 \quad (21)$$

再将公式（17）和公式（21）代入公式（18）可得风速为 v 和海拔为 h 前提下女子运动员的偏离度，

$$\alpha = \frac{m(t_1, h, v)}{[m(t, h, v) - m(t_1, h, v)][0.0004244m^2(t, h, v) - 0.01677m(t, h, v) + 1.92334]} - 1 \quad (22)$$

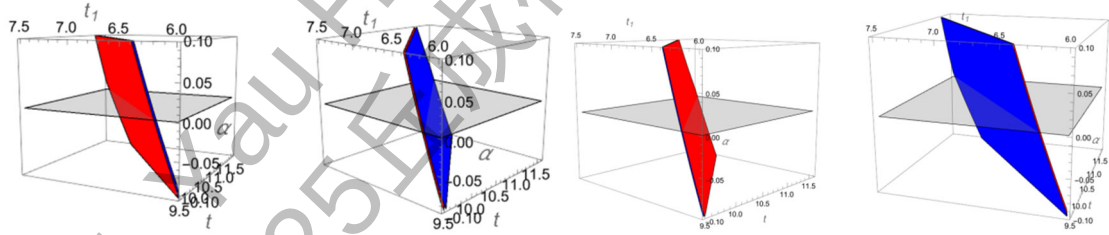


图 7：男子运动员情况：不利条件与有利条件偏离度函数图像的两个视角，红色是理想情况下公式（10）的函数图像，蓝色是实际情况下公式（20）的函数图像

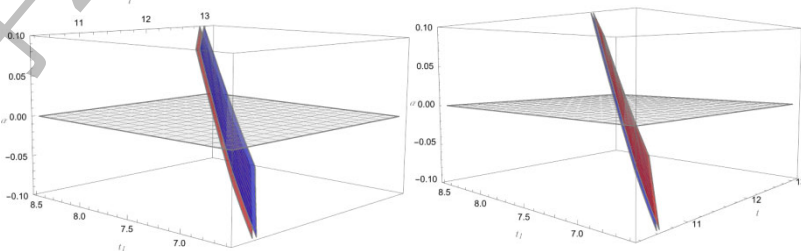


图 8：女子运动员情况：不利条件与有利条件偏离度函数图像，红色是理想情况下公式（12）的函数图像，蓝色是实际情况下公式（22）的函数图像

根据 2025 年专业级运动员最新等级标准，以二级运动员成绩作为下限，男子成绩为 9.500s~11.600s（二级线 11.540s），女子成绩为 10.400s~13.100s（二级线 13.040s）；考虑 0m 海拔、2.0m/s 逆风的不利条件与 1000m 海拔、2.0m/s 顺风的有利条件，男子运动员与女子运动员的偏离度函数图像相对理想情况下函数图像的差异如图 7 与图 8 所示。

综上所述，根据 2.2.(1)的跑法判断方式，在实际应用（见 4.2 小节）中，可以将运动员全程用时 t 、前程用时 t_1 、比赛时的风速为 v 和海拔为 h 代入公式（20）或者公式（22），计算得到实际情况下男/女子运动员的偏离度，从而测算出对应的跑法类型。由此，研究得到了基于偏离度计算公式的跑法类型量化判断标准。

4 实验结果与应用案例

本节主要包含 3 部分，分别是陈述了 2 组实验与 1 组应用案例。4.1 小节将阐述第一组实验结果以验证 3.1 小节微分方程模型的建模假设与函数拟合的准确性。4.2 小节则用 3.2 小节得到的偏离度计算公式对真实比赛中运动员的跑法类型进行了测算，并以公开的第三方评价（如媒体报道、比赛电视解说等）对测算结果进行了验证。4.3 小节介绍了研究提出的数学模型在百米运动员针对性培养与 4×100 米接力排棒策略中的应用案例。

4.1 数学模型选型的验证

本小节将用数据拟合实验为 3.1 选择的微分方程模型进行准确性验证，为模型选型提供实验依据。

由 3.1.1 知，男子的 (t_s, k_s) 图像可视为在研究范围内负斜率且其绝对值单调递减的曲线。由此考虑这样的曲线对应的 $\frac{dk_s}{dt_s}$ 计算有五种情况，如表 1 所示。

表 1 男子运动员跑法的函数模型选型依据

序号	微分方程	拟合后的函数模型	R ²	图 9 中 曲线颜色
1	$\frac{dk_s}{dt_s} = a_1 t_s + b_1$	$k_s = 0.00216t_s^2 - 0.08095t_s + 2.4553$	0.9980	蓝
2	$\frac{dk_s}{dt_s} = \frac{a_1}{t_s} + b_1$	$k_s = -0.32024\ln t_s + 2.594$	0.9986	红
3	$\frac{dk_s}{dt_s} = a_1 e^{t_s} + b_1$	$k_s = 2.1287e^{-0.01394t_s}$	0.9972	绿
4	$\frac{dk_s}{dt_s} = a_1 t_s^{b_1}$	$k_s = 2.80734t_s^{-0.1794}$	0.9976	紫
5	$\frac{dk_s}{dt_s} = \frac{a_1}{t_s^2} + b_1$	$k_s = \frac{4.0202}{t_s} + 1.4594$	0.9994	橙

由 3.1.1 中的 71 组数据（见附件 1），研究使用 Mathematica 软件拟合得到表 1 的“拟合后的函数模型”。根据 2.2.(3)，R²是确定系数，越接近 1 代表精确度越高。笔者还绘制出上述五条函数曲线与所有样本点，表 1 的“颜色”为对应样本点在图 9 的颜色。

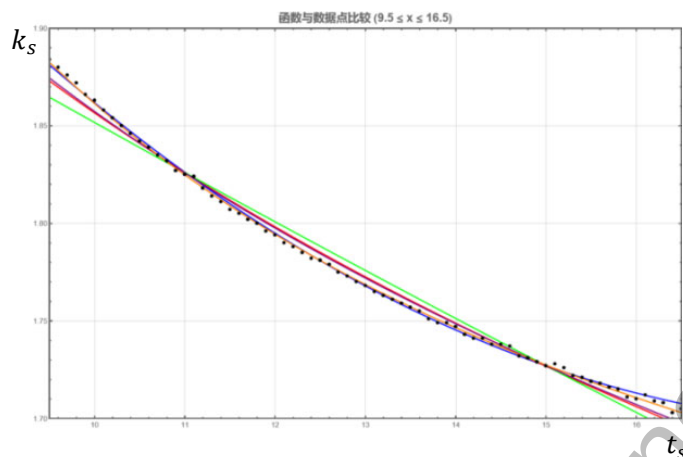


图 9：男子运动员跑法的函数模型选型依据图示

由表 1 和图 9 可知，方程 5 的确定系数最接近 1，其拟合后原函数对应的橙色曲线与原数据吻合程度最高。因此，最均衡跑法下男子运动员的前后程比值 k_s 随着百米用时 t_s 变化的函数模型为表 1 的方程 5，即 3.1.1 中公式（3）。

同理，由 3.1.2 知，女子的 $t_s - k_s$ 图像可近似为在研究范围内负斜率且其绝对值单调递减的曲线。由此考虑这样的曲线对应的 $\frac{dk_s}{dt_s}$ 计算有五种情况，如表 2 所示。

表 2 女子运动员跑法的函数模型选型依据

序号	微分方程	拟合后的函数模型	R^2	图 10 中 曲线颜色
1	$\frac{dk_s}{dt_s} = at_s + b$	$k_s = 0.0004244t_s^2 - 0.01677t_s + 1.92334$	0.9683	蓝
2	$\frac{dk_s}{dt_s} = \frac{a}{t_s} + b$	精度不足，拟合失败	无	无
3	$\frac{dk_s}{dt_s} = ae^{t_s} + b$	$k_s = -0.5847e^{0.007t_s} + 2.419$	0.8968	红
4	$\frac{dk_s}{dt_s} = at_s^b$	$k_s = 1.9534t_s^{-0.0367}$	0.9339	绿
5	$\frac{dk_s}{dt_s} = \frac{a}{t_s^2} + b$	$k_s = \frac{0.9039}{t_s} + 1.7076$	0.9444	紫

由 3.1.2 中的 81 组数据（见附件 2），研究使用 Mathematica 软件拟合得到表 2 的“拟合后的函数模型”。笔者还绘制出上述四条函数曲线与所有样本点，表 2 的“颜色”为对应样本点在图 10 的颜色。

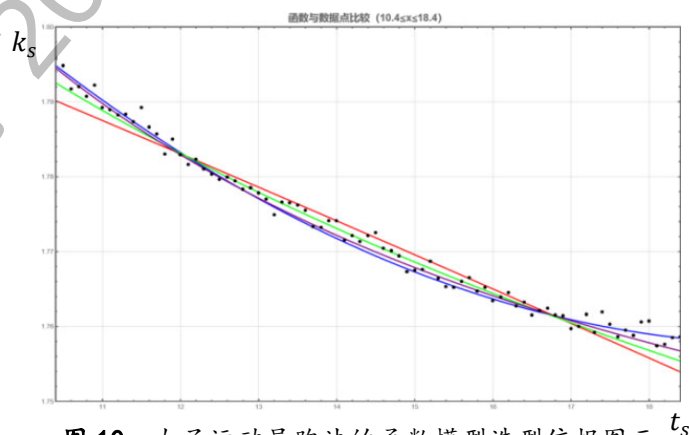


图 10：女子运动员跑法的函数模型选型依据图示

由表 2 和图 10 可知, 方程 1 的确定系数最接近 1, 其拟合后原函数对应的蓝色曲线与原数据吻合程度最高。因此, 均衡跑法下男子运动员的前后程比值 k_s 随着百米用时 t_s 变化的函数模型为表 1 的方程 5, 即 3.1.2 中公式 (6)。

4.2 数学模型的准确性验证

本小节将用真实比赛数据对 3.2 小节提出的跑法类型测算方法进行准确性验证。
表 3 中的运动员信息、比赛名称、百米用时、前程用时、风速与海拔等信息均数据来源于田径数据网站 www.sprintdata.cn [5]。进一步, 可以将百米用时 t 和前程用时 t_1 根据公式 (10) 计算得到理想情况下男子运动员的偏离度值; 同理, 可以根据公式 (12) 计算得到理想情况下女子运动员的偏离度值。对于实际情况下的偏离度计算, 需要将百米用时 t 、风速 v 与海拔 h 代入公式 (15) 计算得到全程硬实力用时, 再结合前程用时 t_1 根据公式 (20) 与 (22) 分别计算得到男子运动员与女子运动员的偏离度值。在得到偏离度值的前提下, 可以根据 2.2.(2) 的判断公式测算出理想情况与实际情况下的跑法类型。

表 3 运动员实际数据的跑法类型测算

性别	基本信息					理想情况 不考虑 v 、 h				实际情况 考虑 v 、 h		
	运动员姓名	国籍	比赛名称	百米用时 t (s)	前 60 米 用时 t_1 (s)	风速 v (m/s)	海拔 h (m)	偏离度 α (%)	跑法 类型	全程硬实 力用时 t_c (s)	偏离度 α (%)	跑法 类型
男子	Usain Bolt	牙买加	2009 柏林世锦赛 决赛	9.58	6.31	+0.9	34	27.1	后程型	9.625	23.4	后程型
	Yohan Blake	牙买加	2012 洛桑钻石联 赛	9.69	6.33	-0.1	600	5.19	均衡型	9.705	6.08	均衡型
	Kenneth Bednarek	美国	2025 费城大满 贯	9.86	6.42	+0.8	30	-0.43	均衡型	9.903	-3.52	均衡型
	Christian Coleman	美国	2019 多哈世锦 赛决赛	9.76	6.32	+0.6	18	-18.2	前程型	9.792	-20.5	前程型
	Shelly-Ann Fraser-Pryce	牙买加	2019 多哈世锦 赛决赛	10.71	6.81	+0.1	18	-25.8	前程型	10.717	-26.4	前程型
女子	Julien Alfred	圣卢西亚	2025 摩纳哥钻 石联赛	10.79	6.91	-1.4	6	-6.08	均衡型	10.692	3.12	均衡型
	Melissa Jefferson-Wooden	美国	2025 费城大满 贯	10.73	6.94	+1.4	30	21.7	后程型	10.814	14.9	均衡偏后型
	Sha' Carri Richardson	美国	2024 全美选 拔赛	10.71	6.94	+0.8	135	27.0	后程型	10.763	21.8	后程型

考虑现有相关的研究文献 [10]较少提及短跑运动员跑法类型的量化判断标准, 表 3 中实际情况下的跑法类型测算结果可以在公开的体育报道信息中得到验证。
例如, 有报道 [11]宣称了牙买加运动员 Usain Bolt 跑法属于后程型的结论。又如, 据新浪体育的报道 [12], 另一位牙买加男子运动员 Yohan Blake 在起跑后的前 30 米就能够迅速建立领先优势, 与此同时, 报道也提到他后半程能力强, 足以体现其均衡型跑法的特点。不仅如此, 在 2016 年里约奥运会上, Yohan Blake 也因其跑法为均衡型被安排在 4x100 的第二棒。由短跑传奇巨星迈克尔·约翰逊 (Michael Johnson) 创办的 Grand Slam Track™ 官方站

点 [13]在美国男子运动员 Kenneth Bednarek 介绍中评价其在起跑、加速、冲刺等各个阶段都有较为出色的表现，为均衡型选手。另外，美国 NBC 电视台解说员 Lewis Johnson 在 2019 年多哈世锦赛上的解说中评价另一位美国运动员 Christian Coleman: “We know he is an excellent starter and accelerator” (译为: 我们知道他 [Coleman]是一位优秀的起跑者和加速者)，即评价 Christian Coleman 为典型的前程型选手。以上公开报道均验证了表 2 中男子运动员跑法类型测算结果的准确性。

类似地，根据新浪体育的报道 [14]，从数据统计分析，牙买加女子运动员 Shelly-Ann Fraser-Pryce 的步频指数明显高于标准门槛，而步长指数则略低，是一名偏于步频型的选手，其跑法更倾向于前程型。根据 2025 年世界田联钻石联赛摩纳哥站女子 100 米的比赛报道，Julien Alfred 在该场比赛中以 10 秒 79 的成绩夺得冠军，其跑法的前程或者后程特征不明显。根据报道 [15]，在 2024 年巴黎奥运会女子 100 米决赛中，美国女子运动员 Melissa Jefferson-Wooden 以 10.92 秒的成绩获得铜牌，虽然起跑阶段没有绝对优势，但在途中跑和冲刺阶段她也能持续发力，展现出了较强的综合能力。可以推知报道对其评价倾向于均衡偏后型跑法。此外，美国《芝加哥论坛报》曾报道 [16]，在 2024 年美国奥运田径选拔赛女子 100 米比赛中，另一位美国女子运动员 Sha'Carri Richardson 在三轮比赛中起跑都不太稳定，但在起跑后的短时间内能迅速提升速度，占据领先位置。因此，可以从报道内容推知其后期跑法的特点。以上内容佐证了表 2 中女子运动员跑法类型测算结果的准确性。

根据表 3 的结果，理想情况下与实际情况下测算的跑法类型只有一个例子（美国运动员 Melissa Jefferson-Wooden）存在差异，其他例子无差异。但是，两者之间的偏离度却有显著的差异，体现了研究提出的偏离度计算公式对于跑法类型量化测算的准确优势。这种偏离度的差异充分体现了风速与海拔条件对运动员跑法影响的量化程度，这是现有关于跑法类型定性分析方法所不具备的优势。例如，从两种情况下的偏离度值差异可看出，女子运动员相对男子运动员受风速与海拔因素影响更大，这与 3.2.2 小节中图 7 与图 8 展现的结果一致，也与文献 [17]中女子短跑运动员比赛表现对风速、海拔因素更加敏感的结论一致。

4.3 数学模型的应用案例

本小节同样用真实的数据展示数学模型在短跑运动员针对性训练与 4x100 米接力赛排棒两个场景的应用。

表 4 中的运动员信息、比赛名称、百米用时、前程用时、风速与海拔等信息数据来源于网站 [5]。类似表 3 的结果，可以将百米用时 t 和前程用时 t_1 根据公式 (20) 计算得到实际情况下男子运动员的偏离度值，并测算出跑法类型。

表 4 国内运动员实际数据的跑法类型测算

运动员姓名	比赛名称	百米用时 t (s)	前 60 米用时 t_1 (s)	风速 v (m/s)	海拔 h (m)	偏离度 α (%)	跑法类型
苏炳添	2021 东京奥运会半决赛	9.83	6.29	+0.9	23	-52.2	前程型
	2018 雅加达亚运会决赛	9.92	6.38	+0.8	8	-36.6	前程型
谢震业	2024 汤姆琼斯纪念赛	10.06	6.58	+0.5	46	15.1	后程型
	2018 法国蒙特勒伊田径赛	9.97	6.47	+0.9	22	-10.9	均衡偏前型
许周政	2018 肇庆全国大奖赛	10.21	6.57	+0.2	110	-26.8	前程型
吴智强	2021 全锦赛	10.11	6.59	+0.1	286	8.08	均衡偏后型
汤星强	2021 全国田径奥运选拔赛预赛	10.22	6.61	-0.5	10	-9.17	均衡偏前型

4.3.1 跑法类型测算在短跑运动员针对性训练中的应用

“亚洲飞人”苏炳添巅峰时期的外籍教练 Randy Huntington 在 2017~2022 年期间曾指导过多位我国短跑运动员，并取得了不凡的成绩。在运动员的针对性培养这一方面，Randy 充分分析了运动员的分段，以获得针对性培养更好的依据。例如，根据其分段特征，苏炳添被认为是一位典型的前程型选手 [18]（与表 4 计算结果一致），加速阶段非常优秀。Randy 据此得出的方案是：在改善起跑及加速这方面精益求精，把前程发挥到极致。换句话说，起跑与力量成为了苏炳添之后训练的主要内容。这造就了起跑技术大改后不久、刚闯进十秒大关的苏炳添在之后五六年内不断突破自我甚至人种的极限，从平卡塔尔归化选手 Femi Ogunode 9.91s 的亚洲纪录，再到东京奥运会上震撼世界的 9.83s。从东京奥运会半决赛 $6.29s+3.54s=9.83s$ 的分段尤其可以看出苏炳添把自己的优势——前程加速发挥到了登峰造极的地步。

除了解释知名运动员训练方案的应用案例，我还结合个人的短跑练习做了应用的尝试。作为一名业余短跑爱好者，我在自己备战校运会时的训练也融入了跑法类型的策略。在初三校运会时，我的 100 米成绩为 12.58s，60 米成绩为 7.70s，根据假设 2，我的 60 米成绩可对应百米的前程分段，则用公式（10）可以测算出我当时的跑法是前程型。另外，我在百米比赛中也出现了后程体力难以维持的问题。据此，我制定的训练策略是：让自己的后程不再是短板，即使自己的跑法更加均衡。于是，我借练习中考项目——1000 米中长跑的机会，把训练重心放在对短跑后程和中长跑都有利的速耐训练上，如多组 400 米练习。由于高一没有了练习中长跑的任务，我开始在较长距离训练中融入短距离的速耐训练，既保持自己前程的优势又增强自己后程的耐力。最终，在高一校运会男子百米短跑决赛上，我的成绩突破 12 秒大关，以 11.89s 的成绩仅次于体育特长生获得银牌，取得了业余运动员的最好成绩。再结合赛后的视频分析，我的前 60 米用时为 7.60s，可以根据研究提出的计算公式测算出我的跑法比之前更均衡。我在前 30 米仅仅处于第四位，50 米过后才开始逐渐与对手拉开差距并保持优势，并且后程并无明显乏力。因此，均衡型的跑法让我在这次比赛中收效显著。

4.3.2 跑法类型测算在 4×100 米接力赛排棒策略中的应用

运动员的跑法类型与 4×100 米接力的第一、二、四棒的安排有着极为关键性联系。在 2019 年多哈世锦赛就男子 4×100 米接力预赛中，中国队在“带头大哥”苏炳添受伤病困扰、状态低迷，仅谢震业一人处于巅峰期却后程拉伤的不利条件下，奇迹般地以 37.79s 打破全国纪录。这很大程度上归功于 Randy Huntington 教练根据运动员跑法的排棒策略：第一棒是前程型的苏炳添，第二棒是前程型的许周政（见表 4），第三棒均衡偏后型、弯道经验丰富的吴智强（见表 4），第四棒分段形式较多但总体较为均衡、200 米主项、正在巅峰的谢震业（见表 4）。苏炳添 2019 年的赛季最佳表现为 10.05s（平原，风速+0.9m/s），硬实力仅约 10.10s，但却跑出了 10.20s 的第一棒分段，这足以体现把其安排在第一棒发挥出的前程优势之大。

而在 2021 年东京奥运会上，更强的中国队阵容却没有跑出目标成绩。当时，苏炳添、汤星强、吴智强三人处于巅峰期，苏炳添还刚打破亚洲百米纪录，而美国队预赛失误出局，且牙买加队群龙无首（指男子百米世界纪录保持者 Usain Bolt 已退役），对手实力青黄不接。中国队本来有望打破国家纪录，甚至争金夺银，但由于本次排棒没有充分考虑运动员跑法类型：第一棒百米均衡偏前型、200 米主项的汤星强（见表 4），第二棒谢震业，第三棒苏炳添，第四棒吴智强。苏炳添常年跑第三棒，弯道技术虽然不会差，但是第三棒无法发挥出其前程的巨大优势；汤星强作为 200 米选手，弯道水平足够，但第一棒一定程度上限制了这位 100 米为均衡偏前型的选手的发挥。不合理的排棒策略导致中国队仅以平 37.79s 国家纪录的

成绩获得全场第四（后来因英国运动员 Chijindu Ujah 服用禁药才得以递补铜牌）。如果把苏炳添与汤星强的棒次互换，成绩以及荣誉将极可能有一定的提升。

除了国际接力赛事的应用案例，我还结合个人组织 4×100 米接力的经历做了应用尝试。在高一时，我曾作为体育委员组织过班级选手参加学校运动会 4×100 米接力。由于其余三人与我短跑实力较为悬殊，我将我自己安排在对速耐、后程等综合能力要求最高的第四棒。为了完成余下选手的排棒，我让其余三人分别测试了一次 60 米与一次 100 米，运用公式(10)测算出每个人的跑法类型。最终，我选取了前程型的同学跑第一棒，取跑法前程型但相对均衡的同学跑第二棒，余下跑法为均衡型的一人跑第三棒。虽然我班因为整体实力问题没能获得前三名，但通过跑法类型优化的排棒策略，让我们与前一名的差距从 20 米追至 5 米，达到了历史最好成绩。

5 总结

我是一名业余短跑运动员，也是一名资深田径迷。无论是在跑步训练中，还是在观看比赛过程中，我发现百米短跑的运动员都有自己独特的跑法，具体表现为前 60 米用时与全程用时比值差异。然而，我又发现了这种跑法类型并非一个简单的比例阈值就可以准确区分，而且体育运动研究领域至今尚未有跑法类型的量化判定标准。于是，我带着个人兴趣特长和好奇心开始了本研究的探索。

针对百米短跑中跑法类型测算的量化问题，研究建立了一种基于微分方程的数学模型，并基于世界田联积分表数据，通过回归分析分别拟合出男女运动员关于百米用时与前后程分段比值的函数模型：男子模型为反比例函数，女子模型为二次函数。为了让模型更接近实际情况，研究进一步引入 Mureika 公式结合风速与海拔的因素修正了理想情况下的数学模型，提出偏离度计算公式，从而得到了跑法类型的测算方法。实验结果验证了微分方程模型选型的合理性，并通过 Yohan Blake、Christian Coleman 等顶尖运动员的实际比赛数据验证了模型对跑法类型测算的准确性。最后，我从运动资讯与个人真实经历探讨了模型在短跑运动员针对性训练和 4×100 接力排棒策略的应用。

参考文献

- [1] 薛晓旭. 短跑运动的能量供应特点浅析[J]. 当代体育科技, 2015, 5(14): 21+23. DOI: 10.16655/j.cnki.2095-2813.2015.14.043.
- [2] 刘海涛. 北京体育学院优秀男子短跑运动员百米跑全程步长、步频和分段速度的研究[D]. 苏州大学, 2009.
- [3] 谢慧松. 中外优秀男子百米分段速度的研究[J]. 北京体育大学学报, 2005, (03): 407-409. DOI: 10.19582/j.cnki.11-3785/g8.2005.03.041.
- [4] 谢慧松. 中、外优秀男子百米途中跑运动学研究及模型的构建[J]. 体育科学, 2007, (06): 17-23. DOI: 10.16469/j.css.2007.06.004.
- [5] Bojidar Spiriev. Scoring Table of Athletics (2025 Revised Edition). *World Athletics*, 2025
- [6] <http://www.sprintdata.cn>
- [7] Mureika, J. The Effect of Wind and Altitude on 100m Sprint Times. *Journal of Applied Biomechanics*, 2001
- [8] <https://easylearn.baidu.com/edu-page/tiangong/questiondetail?id=1830608442258601037&fr=search>
- [9] <https://easylearn.baidu.com/edu-page/tiangong/questiondetail?id=1830608442258601037&fr=search>
- [10] 刘慧. 里约奥运会中外优秀男子百米技术的对比分析——以博尔特, 加特林, 德格拉西, 苏炳添, 谢震业为例[D]. 扬州大学, 2017.
- [11] Slawinski J, Termoz N, Rabita G, Guilhem G, Dorel S, Morin JB, Samozino P. How 100-m event analyses improve our understanding of world-class men's and women's sprint performance. *Scand J Med Sci Sports*. 2017 Jan; 27(1): 45-54. doi: 10.1111/sms.12627. Epub 2015 Dec 8. PMID: 26644061
- [12] <https://sports.sina.com.cn/o/2012-08-24/04096199999.shtml>
- [13] <https://www.grandslamtrack.com/competitors/Kenny-Bednarek>
- [14] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1596196651759307426&wfr=spider&for=pc>
- [15] Melissa Jefferson-Wooden, Kenny Bednarek win U.S. 100m titles in personal best times, *NBC Sports*, Aug 1, 2025
- [16] Chicago Tribune. Sha' Carri Richardson overcomes wobbly start for win in first heat at Olympic track and field trials, <https://chicagotribune.com/>, June 22, 2024
- [17] Linthorne NP. Improvement in 100-m Sprint Performance at an Altitude of 2250 m. *Sports (Basel)*. 2016 May 12; 4(2): 29. doi: 10.3390/sports4020029. PMID: 29910277; PMCID: PMC5968922.
- [18] 吴东州. 从 2015 年北京田径世锦赛中对苏炳添短跑技术特征分析[D]. 哈尔滨体育学院, 2017.

致谢

作为一名热爱短跑的业余田径爱好者，我从小便对田径运动抱有浓厚兴趣。个人在短跑项目上略有成绩——百米最佳 11.89 秒，二百米达 24.03 秒，已达国家三级运动员水平，并接近二级标准——这让我不仅享受奔跑的快感，更开始深入思考短跑背后的科学机制。平日观看比赛时，我热衷于收集与分析运动员的分段数据，试图辨析不同跑法对成绩的影响。也正是这些日常中的观察与积累，让我逐渐意识到“前后程用时比值”与“跑法均衡性”之间可能存在的数理关联，从而萌生了本研究的初步构想。本研究从初步构思到最终完稿，得益于许多人的支持与帮助，在此谨致以由衷的感谢。

首先，我衷心感谢我的指导老师——广东实验中学的王剑老师和程天放老师。从论文选题、模型构建，到细节推敲与结构优化，两位老师始终给予我耐心而深刻的指导：王剑老师建议我加入风速与海拔等环境影响因素的考虑，并为论文的实验部分提供了撰写思路；程天放老师则建议在实验部分加入自己练习短跑的经验加以论证模型的适用性。没有他们持续的鼓励与专业的点拨，本研究难以顺利完成。

其次，我还要感谢田径群的各位田径爱好者热心提供的资讯线索。每当我不知道从何处获得资讯时，总有小伙伴向我提供线索，从而帮助我按图索骥，找到可靠的信息源和文献出处。

此外，我还要感谢我的父母一直尊重并支持我的兴趣发展，使我能够在学业与热爱之间找到平衡；也感谢学校为我提供了开放、包容的成长环境，鼓励每一位学生勇敢探索未知。由于研究水平有限，本论文必然存在一些不足之处，恳请各位老师和专家提出宝贵的批评与建议。

奔跑永不止步，思考从未停歇。谨以此文，向所有陪伴、帮助与启发我的人，表达最诚挚的谢意。