

基于数据驱动与生物力学的立定跳远成绩 建模及优化策略研究

摘要

对于问题一，我们发现了位置信息噪声明显，于是采用了 Savitzky-Golay 滤波器减少关键点检测的噪声和抖动。主要追踪脚尖、脚踝、脚跟这三个节点。将脚尖离地判断为起跳，将脚跟触地判断为落地，并结合脚踝的垂直速度与垂直加速度辅助判断，用 Python 实现判断程序。最后进行人工逐帧对比验证，对于运动者一，算法确定的起跳帧号为 121、落地帧号为 136，与人工确定的起跳帧号 125、落地帧号 137 接近；对于运动者二，算法确定的起跳帧号为 161、落地帧号为 182，与人工确定的起跳帧号 165、落地帧号 178 基本一致，模型误差在 4 帧（0.13s）之内。

对于问题二，我们采用 Savitzky-Golay 滤波器对于数据进行清洗，去掉了 AI 人体姿态估计错误的噪声，再结合问题 1 的判断程序和 premier 的逐帧播放功能逐个确认，得到每个视频的四个关键帧：下蹲最深点帧、起跳帧、落地帧和稳定帧，并将整个跳远过程分为预备姿势与预摆、起跳蹬伸、空中飞行和落地缓冲四个阶段，并找到最大下蹲深度、躯干前倾角度、质心起跳角度、质心离地速度、蹬伸角速度峰值顺序、肩关节角速度、空中折叠程度、落地有效性和伸腿前探距离 9 个具体因素，根据题目给出的附件信息计算姿势调整前后每个因素的变化值，并利用线性回归分析方法对 9 个姿势因素的变化值和体质方面的因素数据与跳远成绩进行权重的求解，并选择权重系数在前 10 名的因素作为影响跳远成绩的主要因素，具体包括：躯干前倾角度、体重控制量 (kg)、落地有效性、质心离地速度、蛋白质率 (%)、身体得分、质心起跳角度、蹬伸角速度峰值顺序、髋角度和骨骼肌重量 (kg)。

对于问题三，我们先从网上搜索获得上述 9 个因素的理想值，然后从运动者 11 的位置信息表中提取该运动者的 9 个因素的实际值，然后求实际值与理想值之间的差值，后利用问题二中每一因素的权重构建一个基于特征加权的线性模型根据模型公式：预测跳远成绩 = \sum (特征权重 \times 特征值) 来预测运动者 11 的跳远成绩为 6.3170 分米。

对于问题四，为了给运动者 11 最合适的训练建议，使其能优先补齐最大劣势，我们结合问题二的权重，计算了姿态特征的优先级分数。然后我们结合文献，制定了适合低年龄段的姿势训练目标。通过替换参数（将训练后的替代训练前的）算出训练后理想跳远成绩为 0.77 米，比之前提升了 0.14 米，增长了 21.6%。制定训练计划时选择了游戏性质的训练计划，降低了在低年龄段运动者身上的实施阻力，提高其训练兴趣。

本参赛队主要使用 AI 完成 Python 代码编写和修改语法错误^[45]，支撑材料中的 PDF 文件“AI 工具使用详情”中以使用 AI 编写输入计算肩关节的平均/峰值角速度的程序为例展示了使用目的和环节、关键交互记录、采纳和人工修改情况，其他的代码编写与之类似。

关键词：Savitzky-Golay 滤波器 线性回归分析方法 基于特征加权线性模型 运动姿态分析

一、模型假设与符号说明

1.1 模型假设

对于问题一，我们假设每个学生都可以双脚同时落地，将每一帧学生将左右脚的关键点合并为单一特征点进行分析计算。

对于问题二，假设在姿势方面的十二个因素中只有最大下蹲深度、躯干前倾角度、质心起跳角度、质心离地速度、蹬伸角速度峰值顺序、肩关节角速度、空中折叠程度、落地有效性和伸腿前探距离九个因素会影响跳远成绩，而抛弃了臂腿协调性、滞空时间和落地缓冲角度三个因素，并没有对其进行线性回归分析；而在体质因素中我们假设有营养状态和体型两个文字类型因素对跳远成绩没有影响，以免影响跳远成绩。

对于问题三，由于运动者 11 的位置信息只有一次姿势修改前的数据，所以根据文献假设这九个因素有合理值，利用合理值去减运动者 11 的数据得到差值，再进行基于特征加权的线性模型去预测运动者 11 的实际跳远成绩。

1.2 符号说明

符号	含义	备注
$\theta_{\text{膝}}$	膝盖角度，单位：度 ($^{\circ}$)	计算左膝和右膝角度后的平均值，用于最大下蹲深度
θ_1	躯干前倾角度，单位：度 ($^{\circ}$)	躯干上部（肩/头）与下部（髋）之间的夹角
θ_2	质心起跳角度，单位：度 ($^{\circ}$)	基于质心位置变化计算的发射角度，合理值约 45°
θ_3	肩关节角度，单位：度 ($^{\circ}$)	肩、肘、腕点之间的夹角，用于计算角速度
θ_4	髋关节角度，单位：度 ($^{\circ}$)	髋关节弯曲角度，合理值约 90°
X_{heel}	脚跟平均 x 坐标（左右脚跟平均值）	计算距离的参考点
X_{hip}	髋部平均 x 坐标（左右髋平均值）	计算距离的参考点
ΔX	落地有效性，单位：距离单位（例如像素）	正值表示髋部在脚跟后方，用于评估落地稳定性
t	视频帧号	
X_i	关节点的横坐标	
Y_i	关节点的纵坐标	

二、问题的分析与求解

2.1 问题一的分析与求解

2.1.1 问题一分析

针对问题一，难点在于起跳或落地的判断逻辑。根据提供的人体节点图，我们发现可以对足踝部进行重点追踪。由此来得到起跳与落地都准确时刻。通过观看视频可以发现，由于 ai 工具的局限性，识别得到的位置数据并不准确，有许多噪点，并且发现有丢失的帧（如运动者一的 124 帧），因此数据的清洗也显得尤为重要。

2.1.2 问题一模型建立与求解

首先发现判断起跳落地滞空的关键指标是脚的运动轨迹，于是我们主要分析脚踝，前脚掌，脚跟的数据。经观察，在问题一的两个视频中，前 3 秒运动员处于站立状态，于是我们取此时的脚部高度作为地面高度。通过观看视频易发现视频中存在许多噪点，于是我们使用了 Savitzky-Golay 滤波器平滑坐标曲线，消除噪声。

视频中，受现阶段 AI 识别技术的限制，两脚位置多数时间并未重合，为简化模型，对此问题我们假设每个学生都可以双脚同时落地，将每一帧学生将左右脚的关键点合并为单一特征点进行分析计算。为提高关键帧检测的准确性，我们脚踝的垂直速度和加速度作为辅助判断，公式如下。

脚踝垂直速度公式：

$$v_y[n] = \frac{y[n] - y[n-1]}{\Delta t}$$

脚踝垂直加速度公式：

$$a_y[n] = \frac{v_y[n] - v_y[n-1]}{\Delta t}$$

符号定义：

- $v_y[n]$: 第 n 帧的脚踝垂直速度（像素/秒）
- $y[n]$: 第 n 帧的脚踝 Y 坐标（像素）
- $a_y[n]$: 第 n 帧的脚踝垂直加速度（像素/秒²）
- Δt : 帧间隔时间（秒），在代码中为 $\Delta t = \frac{1}{30}$ 秒（30 fps）

我们将起跳的判断条件设定为脚尖离开地面，同时脚踝水平向前移动。将落地的判断逻辑设定为脚跟接触地面，伴随强烈的垂直加速度。

为了便于描述运动者的运动过程，我们将质点定为两个髌关节的中心点，把运动轨迹抽象为抛物线，得到跳跃过程中最高点位置。将结果进行整合后，我们得到了运动者一与运动者二的起跳帧，落地帧，起跳时间，落地时间，滞空时间，最大滞空高度的数据（代码详见支撑文件“第一问.ipynb”）。

	起跳帧	落地帧	起跳时间	落地时间	滞空时间	最高点帧	最高点时间
运动者一	121	136	4.033s	4.533s	0.500s	128	4.267s
运动者二	161	182	5.367s	6.067s	0.700s	171	5.700s

运动者 1 质点抛物线方程: $y = 0.001402x^2 - 1.368780x + 724.008847$

运动者 2 质点抛物线方程: $y = 0.001523x^2 - 1.486055x + 806.318007$

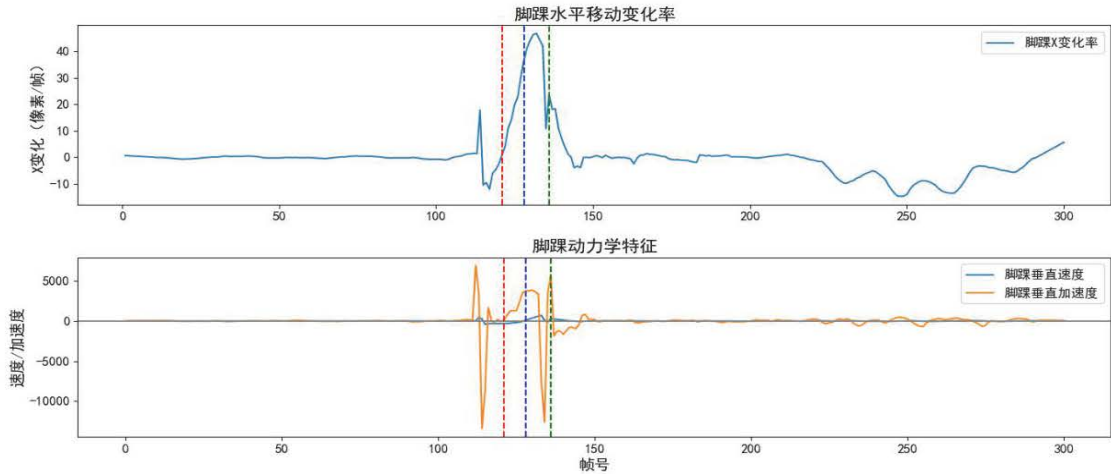


表 1 运动者一

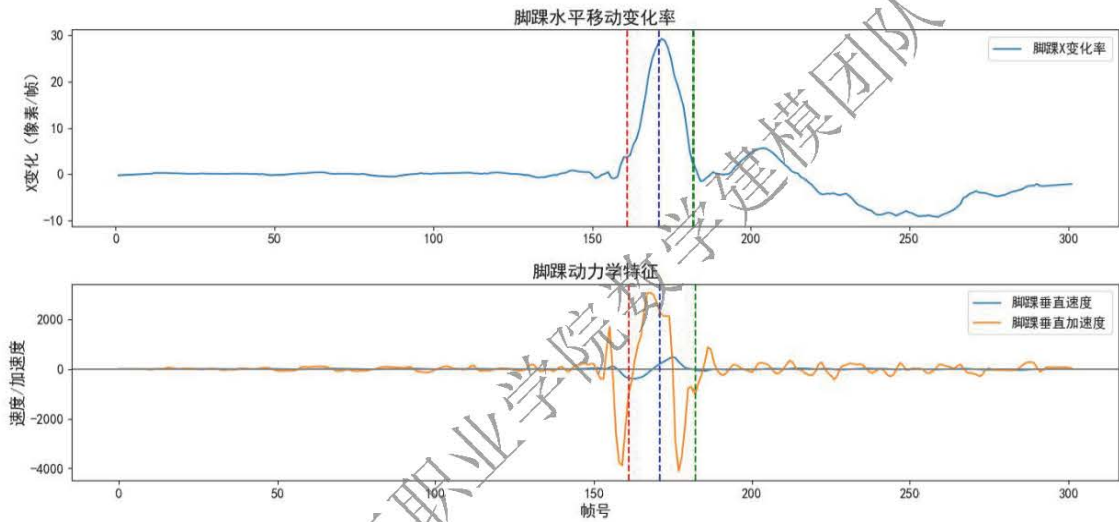


表 2 运动者二

通过表一表二，我们可以直观地看出脚踝的水平移动变化率，垂直加速度的波动变化与起跳落地时刻具有强烈的相关性。对问题一的帧数检测精度的提高有明显的正向作用。

2.2 问题二的分析与求解

2.2.1 问题二分析

针对问题二，我们得出影响运动者跳远成绩的主要因素分为两大方面，分别为姿势因素和体质因素。要想知道主要因素是其中的哪一些因素，我们针对姿势因素首先进行过程分析。

我们从运动生物力学、运动训练学的角度出发，利用下蹲最深点帧（起跳前质点最低时刻）、起跳帧（脚尖离地的时刻）、落地帧（脚跟着地的时刻）和稳定帧（落地后质点）四帧将立定跳远分为四个阶段，分别为预备姿势与预摆、起跳蹬伸、空中飞行和落地缓冲阶段，并计算四个阶段中九个具体因素数值：最大下蹲深度、躯干前倾角度、质心起跳角度、质心离地速度、蹬伸角速度峰值顺序、肩关节角速度、空中折叠程度、落地有效性和伸腿前探距离，随后，将姿势调整前和姿势调整后数据进行作差，求得差值，将差值与体质因素放在同一表格中，利用线性回归分析计算每一个因素与跳远成绩的权重系数来判断哪些是主要因素。

2.2.2 问题二模型的建立与求解

我们从运动生物力学、运动训练学的角度出发，分析立定跳远的过程，根据下蹲最深点帧、起跳帧、落地帧和稳定帧四个关键帧并将其分为预备姿势与预摆、起跳蹬伸、空中飞行和落地缓冲四个阶段，并在这四个阶段中找出十二个影响跳远成绩的因素，分别为最大下蹲深度、躯干前倾角度、臂腿协调性，质心起跳角度、质心离地速度、蹬伸角速度峰值顺序、肩关节角速度、滞空时间、空中折叠程度、落地有效性、落地缓冲角度和伸腿前探距离，但是在实际计算过程中我只选取了其中九个因素进行计算，臂腿协调性由于手臂摆至最后点帧与身体蹲至最低点帧平均相差很小在 2 帧左右，它的差值数据影响太小，所以不选取此数据；滞空时间无法准确判定时间越长成绩越好，可控性太弱，所以不选取此数据；对于落地缓冲角度来说，他与落地有效性是同一问题，所以我们采取数据更稳定的落地有效性数据进行计算。

姿势因素方面，分为九个因素一一进行模型的建立，其目的是为了进行差值的计算，为线性回归分析提供数据。我们先利用 Savitzky-Golay 滤波器对每一个运动者每一次的数据进行清洗并给出四个帧数，但由于每一个运动者的噪点太多，数据太过杂乱，而滤波器又无法完美进行数据的筛选和噪点的删除，所以在此同时借助 premier 的逐帧播放功能对其一帧帧进行分析找到合适的帧数并且把这一帧数的噪点进行手动删除，找到合适的帧数。以下表格是最终处理好的帧数结果（只展示部分，详情请见附录问题二）。

文件名	下蹲最低点帧	起跳帧	落地帧	站稳点帧
运动者 3 第 1 次的跳远位置信息.xlsx	50	58	70	97
运动者 3 第 2 次的跳远位置信息.xlsx	103	109	123	134
运动者 3 第 3 次的跳远位置信息.xlsx	110	120	128	147
运动者 3 第 4 次的跳远位置信息.xlsx	63	70	80	90
运动者 3 第 5 次的跳远位置信息.xlsx	104	110	124	127
运动者 3 调整后第 1 次的跳远位置信息.xlsx	114	121	136	152

根据以上表格中的帧数去进行九个因素的计算：

①最大下蹲深度：关键点为膝角角度，计算公式：

$$\theta_{\text{膝}} = \cos^{-1} \left(\frac{(x_{24} - x_{26})(x_{28} - x_{26}) + (y_{24} - y_{26})(y_{28} - y_{26})}{\sqrt{(x_{24} - x_{26})^2 + (y_{24} - y_{26})^2} \times \sqrt{(x_{28} - x_{26})^2 + (y_{28} - y_{26})^2}} \right) \times \frac{180}{\pi}$$

注： x_i ：第 i 个关键节点的横坐标

y_i ：第 i 个关键节点的纵坐标

分别求出左膝与右膝的角度再进行平均，可以得出一个运动者一次的数据，需要将其姿势修改后与姿势修改前的数据分别进行求平均，再将其进行减法计算，得出差值。

②躯干前倾角度：计算公式：

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{-\left(\frac{y_{11} + y_{12}}{2} - \frac{y_{23} + y_{24}}{2} \right)}{\sqrt{\left(\frac{x_{11} + x_{12}}{2} - \frac{x_{23} + x_{24}}{2} \right)^2 + \left(\frac{y_{11} + y_{12}}{2} - \frac{y_{23} + y_{24}}{2} \right)^2}} \right) \times \frac{180}{\pi}$$

求得的值，将每一个运动者的每一次数据进行求平均，得到姿势调整后与姿势调整前的数据进行减法计算，得到差值。

③质心起跳角度：计算公式：

$$\theta_2 = \arctan \left(\frac{\left(\frac{y_{23}^{(t+1)} + y_{24}^{(t+1)}}{2} \right) - \left(\frac{y_{23}^{(t-1)} + y_{24}^{(t-1)}}{2} \right)}{\left(\frac{x_{23}^{(t+1)} + x_{24}^{(t+1)}}{2} \right) - \left(\frac{x_{23}^{(t-1)} + x_{24}^{(t-1)}}{2} \right)} \right) \times \frac{180}{\pi}$$

注：t+1:帧数加一

t-1:帧数减一

求得角度，将每一个运动者的每一次数据进行求平均，得到姿势调整后与姿势调整前的数据进行减法计算，再利用度数 45 的合理值减去差值得到最终差。

④质心离地速度：计算公式：

$$v = \sqrt{\left(\left(\frac{x_{23} + x_{24}}{2} \right)^t - \left(\frac{x_{23} + x_{24}}{2} \right)^{t-1} \times 90 \right)^2 + \left(\left(\frac{y_{23} + y_{24}}{2} \right)^t - \left(\frac{y_{23} + y_{24}}{2} \right)^{t-1} \times 90 \right)^2}$$

求得角度，将每一个运动者的每一次数据进行求平均，得到姿势调整后与姿势调整前的数据进行减法计算。

⑤肩关节角速度：

$$\theta_3 = \arccos \left(\frac{((x_{13} - x_{11}) \times (x_{15} - x_{11}) + (y_{13} - y_{11}) \times (y_{15} - y_{11}))}{\left(\sqrt{(x_{13} - x_{11})^2 + (x_{15} - x_{11})^2} \times \sqrt{(y_{13} - y_{11})^2 + (y_{15} - y_{11})^2} \right)} \right) \times \left(\frac{180}{\pi} \right)$$

求得角度，将每一个运动者的每一次数据进行求平均，得到姿势调整后与姿势调整前的数据进行减法计算。

⑥空中折叠程度：关键点在髌关节角度

$$\theta_4 = \arccos \left(\frac{[(x_{11} - x_{23}) \times (x_{25} - x_{23}) + (y_{11} - y_{23}) \times (y_{25} - y_{23})]}{\left[\sqrt{(x_{11} - x_{23})^2 + (y_{11} - y_{23})^2} \times \sqrt{(x_{25} - x_{23})^2 + (y_{25} - y_{23})^2} \right]} \right) \times \left(\frac{180}{\pi} \right)$$

求得角度，先将起跳和落地两帧的左右髌角度进行平均，再对每一个运动者的次数进行平均，得到姿势调整后与姿势调整前的数据进行减法计算。

⑦落地有效性：计算公式：

$$X_{\text{heel}} = \frac{X_{31} + X_{32}}{2}$$

$$X_{\text{hip}} = \frac{X_{23} + X_{24}}{2}$$

$$\Delta X = X_{\text{hip}} - X_{\text{heel}}$$

注： X_{heel} ：脚跟平均 x 坐标

X_{hip} ：髌部平均 x 坐标

ΔX ：落地有效性

求得的值，将每一个运动者的每一次数据进行求平均，得到姿势调整后与姿势调整前的数据进行减法计算，得到差值。

⑧伸腿前探距离：计算公式

$$\text{伸腿前探距离} = \frac{1}{2}(x_{31} + x_{32}) - \frac{1}{2}(x_{23} + x_{24})$$

求得的值，将每一个运动者的每一次数据进行求平均，得到姿势调整后与姿势调整前的数据进行减法计算，得到差值。

⑨蹬伸角速度峰值顺序:

对于此数据,我们对于运动者每一次的合理顺序次数的占比,将其转化为小数,用姿势调整后的数据与姿势调整前的数据作差,得出差值。

所有数据计算完成,将其整理至一个 Excle 表格中,同时也要将体质因素放入表格中,但在此我们不考虑文字信息因素,只进行数字信息因素的计算。以下是最终成绩差值因素表格的部分内容展示:(只展示部分结果,具体结果见支撑材料问题二权重系数分析数据源头.xlsx)

运动者	成绩差	最大下蹲深度差值	躯干前倾角度差值	落地有效性差值	伸腿前探距离差值	质心起跳角度差值	质心离地速度差值
运动者 3	0.13	1.12	6.22	22.389	-3.8	8.527822669	101.6571428
运动者 4	0.16	2.575	-12.46	-25.295	-75.67	115.1257743	-863.9400598
运动者 5	0.105	3.795	7.095	80.355	-19.355	1.400156215	-8067.2256
运动者 6	0.165	22.885	8.415	32.28	-8.395	-10.13197506	437.3602206
运动者 7	0.19	13.415	-0.535	-30.43	-19.655	-3.092272065	-116.4377488
运动者 8	0.04	22.1775	-36.67	-3.59	3.51	30.15593407	85.83197527
运动者 9	0.04	5.1675	12.885	30.71	2.61	3.212869968	-105.4323263
运动者 10	0.1	-3.6525	-7.36	38.655	-1.225	61.87364945	-60.55606003

最后我们利用线性回归分析对这些影响因素与跳远成绩进行对比,并计算其所在的权重系数,得到以下结果:(只展示部分结果,具体结果见支撑材料问题二权重系数.ipynb)

特征	权重	绝对权重
躯干前倾角度差值	0.013488684	0.013488684
体重控制量 (kg)	0.012814613	0.012814613
落地有效性差值	-0.012099517	0.012099517
质心离地速度差值	0.009976807	0.009976807
蛋白质率 (%)	0.007754946	0.007754946
身体得分	-0.006810696	0.006810696
质心起跳角度差值	-0.006633266	0.006633266
蹬伸角速度峰值顺序百分比差值	0.006066727	0.006066727
髋角度差值	0.005453922	0.005453922
骨骼肌重量 (kg)	0.0053346	0.0053346
基础代谢 (kcal)	0.005166818	0.005166818
肌肉率 (%)	0.00503316	0.00503316
肩关节角速度差值	0.004902975	0.004902975
内脏脂肪 (等级)	0.004673273	0.004673273

所以我们据文献判定躯干前倾角度、体重控制量 (kg)、落地有效性、质心离地速度、蛋白质率 (%)、身体得分、质心起跳角度、蹬伸角速度峰值顺序、髌角度和骨骼肌重量 (kg) 为影响跳远成绩的主要原因。

2.3 问题三的分析与求解

2.3.1 问题三的分析

针对问题三，根据问题二结果中每一个因素所占的权重系数，我们对于运动者 11 的位置信息进行数据提取并利用问题二中每一个因素的数学模型进行计算因素的数值，通过标准数值与实际数值作差在带入预测模型利用权重系数得到运动者 11 的实际跳远成绩。

2.3.2 问题三模型的建立与求解

根据问题二中每一个因素对于立定跳远成绩的影响，每一个因素所占的权重，采用构建一个基于特征加权的线性模型来预测运动者 11 的跳远成绩。

首先，问题二中的数据是每一个因素的差值与跳远成绩之间的关系，但是运动者 11 只有一次的位 置信息，所以我们应该先提取四个不同帧，下蹲最低点帧 169，起跳帧 178，落地帧 189，稳定帧 195；其次利用问题二模型计算出每一个因素的数据，而其中差值的计算采用文献给出不同的合理数据去与计算结果进行作差最大下蹲深度为 105 度^[1]，躯干前倾角度为 180 度^[2]，质心起跳角度在理论最优为 45 度^[3]，质心离地速度取 900 为衡量标准^[4]，肩关节角速度 1100^[5]，空中折叠程度理想状态里髌关节角度为 90 度^[6]，伸腿前探距离 1 米 5^[7]。

以下是整理后的文件的部分数据：（只展示部分结果，具体结果见支撑材料问题三运动者 11 数据.xlsx）

运动者	最大下蹲深度 差值	躯干前倾角度 差值	落地有效性 差值	伸腿前探距离 差值	质心起跳角度 差值
运动者 11	26.595	12.34	-55.79	47.18	21.76

然后，我们利用模型公式：预测跳远成绩= $\sum(\text{特征权重} \times \text{特征值})$ 来预测运动者 11 的实际跳远成绩为：运动者 11 的预测跳远成绩为：6.3170 分米。

2.4 问题四的分析与求解

2.4.1 问题四分析

针对问题四，通过问题二和问题三，我们已经得到了影响运动者跳远成绩的主要因素 的权重。本问题要求让运动者 11 通过短期训练使成绩得到提升，所以只挑部分最重要的动作 进行调整。需要结合运动者 11 的具体情况与动作权重进行分析，以得到最佳方案。另外， 运动者 11 的年龄只有 6 岁，训练方案应该将复杂的运动概念转化为儿童易懂的游戏，在乐 趣中提高其运动能力。

2.4.2 问题四模型建立与求解

首先我们将所有的姿势特征及其绝对权重，与运动者 11 这些姿势的实际值绝对值整理 到一个表格中。随后我们计算这些特征的优先级分数，具体计算方法为：

$$\text{优先级分数} = |\text{权重}| \times |\text{实际值}|$$

然后我们便可得到下面的表格，排序后取优先级分数前五的特征，分别为肩关节角速度差值、质心离地速度差值、落地有效性差值、伸腿前探距离差值、躯干前倾角度差值。

特征	绝对权重	实际值绝对值	优先级分数	排序
躯干前倾角度差值	0.013488684	12.34	0.166450365	5
落地有效性差值	0.012099517	55.79	0.675032046	3
质心离地速度差值	0.009976807	111.3	1.110418665	2
质心起跳角度差值	0.006633266	21.76	0.144339872	6
蹬伸角速度峰值顺序百分比差值	0.006066727	0	0	9
髌角度差值	0.005453922	26	0.141801972	7
肩关节角速度差值	0.004902975	300	1.470892546	1
最大下蹲深度差值	0.004083955	26.595	0.108612794	8
伸腿前探距离差值	0.004073743	47.18	0.192199194	4

针对各个姿势特征参数，我们设立以下目标：

特征	当前值	目标值
躯干前倾角度差值	12.34°	10.0° [8]
质心离地速度差值	111.3 cm/s	75.0 cm/s ^[9]
髌角度差值	-26°	-10.0° [10]
肩关节角速度差值	-300 ° /s	25.0 ° /s ^[11]
质心起跳角度差值	21.76°	10.0° [12]

运动员 11 的年龄较小，仅有 6 岁，于是我们将设置一个游戏化训练方案设计：

	目的	内容
干预练习一	彻底纠正反向摆臂模式，建立向前上的爆发性摆臂动作定型，	引导儿童想象自己是一枚火箭，双臂向后伸展是“正在加注燃料”。教练口令“发射！”一出，儿童需以最大速度用力将“火箭”（双臂）向前上方推出去，用胳膊带着身体往前冲。
干预练习二	优化起跳角度，将发力方向由垂直主导转为水平主导，减小躯干前倾角度差值	指令儿童扮演“小青蛙”，目标是“一口气跳到河对岸”，而不是“跳得高碰到天上的树叶”。

	目的	内容
干预练习三	强化在最佳髋角下的蹬伸感觉和臀部发力意识	让孩子手扶栏杆或墙面以保持平衡，引导其单腿站立，另一条腿的膝盖弯曲，向后抬起，模仿小马准备蹬腿的姿势(此时髋关节自然处于微屈状态,约-10°至-20°)。口令“蹬!”,让孩子想象用抬起的脚向后下方用力蹬地,感受臀部肌肉的收缩。

这些练习可以充分解决运动者 11 的问题，同时趣味化的训练可以提起低年龄段运动者的兴趣，效果好于严肃的训练内容。

我们将姿势特征参数调整成目标值，由此求得训练后的理想跳远成绩，利用问题三的模型求出修改动作后可以达到的理想成绩。我们得到了以下结果（代码详见“第四问.ipynb”）：

预测成绩	训练后理想跳远成绩	提升幅度	提升百分比
0.63 米	0.77 米	0.14 米	21.60%

三、模型的结果

3.1 所有问题的结果与代码

3.1.1 问题一：

运动者 1 起跳帧：121, 起跳时间：4.033 秒。落地帧：136, 落地时间：4.533 秒，滞空时间：0.500 秒，髋关节质点抛物线方程： $y = 0.001402x^2 + -1.368780x + 724.008847$

运动者 2 起跳帧：161, 起跳时间：5.367 秒。落地帧：182, 落地时间：6.067 秒，滞空时间：0.700 秒，髋关节质点抛物线方程： $y = 0.001523x^2 + -1.486055x + 806.318007$ （具体代码详见支撑材料问题一第一问.ipynb）

3.1.2 问题二：

躯干前倾角度、体重控制量 (kg)、落地有效性、质心离地速度、蛋白质率 (%)、身体得分、质心起跳角度、蹬伸角速度峰值顺序、髋角度和骨骼肌重量 (kg)为影响跳远成绩的主要原因。（具体代码详见支撑材料问题二第二问.ipynb）

3.1.3 问题三：

运动者 11 的预测跳远成绩为: 6.3170 分米。（具体代码详见支撑材料问题三第三问.ipynb）

3.1.4 问题四：

运动者 11 当前预测成绩: 0.63 米

经过短期训练后，预计可达到 0.79 米

提升幅度: 0.15 米

提升百分比: +24.3% （具体代码详见支撑材料问题四第四问.ipynb）

四、模型的评价与改进

4.1 问题一：

我们借助 premier 的逐帧播放功能对运动者一和运动者二的起跳落地时刻的帧数进行了对比，发现问题一模型的精度非常高，均在 5 帧(0.16 秒)内。

	起跳帧	人工确定起跳帧	人工确定落地帧	落地帧
运动者一	121	125	137	136
运动者二	161	165	178	182

但是问题一代码可迁移性与抗噪声干扰能力较差，对地面高度的判断固定使用前三秒的数据导致其可迁移性较差，需根据具体问题进行调整。遇到三秒前起跳的数据，判断精度会急剧下降。另外仅依靠足踝判断起跳在遇到位置数据噪声大，数据清洗不到位的情况下，会出现判断失误的情况。

4.2 问题二：

我们为了简化模型的权重系数，忽略了臂腿协调性、滞空时间和落地缓冲角度三个因素，使得结果有一定的误差，关键帧识别代码在面对部分噪声非常大的数据时，识别误差会非常大。问题二中我们采用了两种方法对数据进行处理，但是由于 Savitzky-Golay 滤波器对于噪声太大的数据处理不彻底，而 premier 的逐帧播放是人工进行处理，精确度没有很高，所以可以改进滤波器的使用次数，多次使用，便于减少噪声影响，也可以通过改进 AI 识别技术，优化噪声处理功能解决。

4.3 问题三：

权重文件与运动者文件的特征名称必须完全一致，否则将无法识别，使用较为繁琐。且不能进行批量处理，在学校之类的场景使用时效率较低。可以为其增添批量处理的功能。

4.4 问题四：

本题模型可以得出运动者当前问题最大的姿态特征，可以针对问题进行训练计划的制定。输出结果可以直观的看出姿势纠正后的理论最优成绩。缺陷是计算优先级分数，制定训练计划仍依赖人工。后续可以根据运动者的不同年龄段，最大姿态问题推荐最合适的方案，减轻人工计算量，降低模型的使用难度。

五、参考文献

- [1]《运动与锻炼生物力学》，P·M·麦金尼斯，2005 年，美国伊利诺伊州，人体动力学出版社，280-290 页
- [2]《起始力量：基础杠铃训练》，马克·瑞比托，2011 年，美国德克萨斯州，The Aasgaard

Company, 65-69 页

[3] 《运动生物力学》，詹姆斯·海，2012年7月（中文翻译版），北京市，人民体育出版社，207-211 页

[4] 《高水平竞技体能训练》，威廉·J·克雷默、（美）史蒂文·普拉茨，2019年7月，北京市，北京体育大学出版社，第53、115-118 页

[5] 《运动生物力学：运动技术与优化》，刘卉，2021年，北京市，科学出版社，245-248 页

[6] 《生物力学基础》，苏珊·J·霍尔，2011年1月，北京市，人民体育出版社，第320-330 页和第360-370 页

[7] 《运动生物力学：运动技术与优化》，刘卉，2021年，北京市，科学出版社，228-230 页

[8]王琨, & 魏文仪. (2004). 对跳远起跳技术的生物力学研究. 上海体育学院学报, 28(3), 52-55.

[9]范洪彬, 孙有平, & 季浏. (2011). 体能测试与评价. 华东师范大学出版社.

[10]刘卉. (2004). 三维摄影解析中人体关节角度计算方法. 北京体育大学学报, 27(6), 767-769.

[11]李建英, & 王黎明. (2008). 青少年田径运动训练理论与方法. 人民体育出版社.

[12]张英波, & 孙南. (2006). 运动技能学习与控制. 北京体育大学出版社.

[13]阎智力, & 石岩. (2016). 我国儿童青少年体质健康现状及促进策略. 体育科学, 36(11), 3-11.

[14]国家体育总局. (2012). 青少年训练指导手册. 人民体育出版社.

[15] DeepSeek, DeepSeek-R1-0528, 深度求索 (DeepSeek), 2025-09-05

附录

问题二：

文件名	下蹲最低点帧	起跳帧	落地帧	站稳点帧
运动者3第1次的跳远位置信息.xlsx	50	58	70	97
运动者3第2次的跳远位置信息.xlsx	103	109	123	134
运动者3第3次的跳远位置信息.xlsx	110	120	128	147
运动者3第4次的跳远位置信息.xlsx	63	70	80	90
运动者3第5次的跳远位置信息.xlsx	104	110	124	127
运动者3调整后第1次的跳远位置信息.xlsx	114	121	136	152
运动者3调整后第2次的跳远位置信息.xlsx	130	137	147	152
运动者4第1次的跳远位置信息.xlsx	72	76	90	99
运动者4调整后第1次的跳远位置信息.xlsx	98	104	118	124
运动者4调整后第2次的跳远位置信息.xlsx	100	107	209	239
运动者5第1次的跳远位置信息.xlsx	62	69	83	100
运动者5第2次的跳远位置信息.xlsx	74	82	95	112
运动者5调整后第1次的跳远位置信息.xlsx	76	81	97	102

运动者 5 调整后第 2 次的跳远位置信息.xlsx	142	148	163	175
运动者 6 第 1 次的跳远位置信息.xlsx	118	127	137	150
运动者 6 第 2 次的跳远位置信息.xlsx	136	148	161	173
运动者 6 调整后第 1 次的跳远位置信息.xlsx	115	123	140	150
运动者 6 调整后第 2 次的跳远位置信息.xlsx	142	152	163	175
运动者 7 第 1 次的跳远位置信息.xlsx	81	90	100	111
运动者 7 第 2 次的跳远位置信息.xlsx	153	162	175	182
运动者 7 调整后第 1 次的跳远位置信息.xlsx	140	146	162	163
运动者 7 调整后第 2 次的跳远位置信息.xlsx	168	174	189	196
运动者 8 第 1 次的跳远位置信息.xlsx	111	119	127	135
运动者 8 第 2 次的跳远位置信息.xlsx	93	100	109	116
运动者 8 调整后第 1 次的跳远位置信息.xlsx	104	111	126	132
运动者 9 第 1 次的跳远位置信息.xlsx	253	267	279	286
运动者 9 调整后第 1 次的跳远位置信息.xlsx	84	91	105	113
运动者 9 调整后第 2 次的跳远位置信息.xlsx	125	136	150	163
运动者 10 第 1 次的跳远位置信息.xlsx	138	146	154	165
运动者 10 第 2 次的跳远位置信息.xlsx	167	176	187	286
运动者 10 调整后第 1 次的跳远位置信息.xlsx	212	220	237	243
运动者 10 调整后第 2 次的跳远位置信息.xlsx	178	186	197	210

山东轻工职业学院数字建模团队