

跳台跳水体型校正系数的建模分析

杜沛霖¹, 杨卓媛², 张靖婷³

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

(2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

(3. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 201100)

摘要: 针对运动员的体型对跳台跳水动作完成时间的影响, 在原有跳水难度系数计算规则的基础上, 提出一种新的体型校正系数的计算方法。首先分析了影响跳水难度系数的主要因素, 建立了难度系数与影响因素之间的多元线性回归模型。其次基于动量矩定理和角动量守恒原理, 对跳水动作进行分类并分别进行分析, 建立人体在空中绕旋转轴运动的动力学方程, 得到完成各跳水动作的时间与运动员体型之间的关系。最后建立体型校正系数计算模型, 对原难度系数进行修正。修正后的难度系数在保证一定合理性的情况下, 能够更加准确地反应不同体型运动员完成跳水动作的真实难度。

关键词: 数据分析; 多元线性回归; 角动量守恒; 体型校正系数

1 问题重述与分析

国际泳联在跳水竞赛规则中规定了不同跳水动作的代码及难度系数, 裁判员根据动作完成表现及入水效果, 给出从 10 到 0 的动作评分并计算动作完成分, 乘以该动作的难度系数即为最终得分。因此, 出于公平性考虑, 难度系数应充分反映跳水动作的真实难度。有人认为, 瘦小体型的运动员在做翻腾及转体动作时有体型优势, 应当设置体型系数予以校正。围绕跳台跳水体型系数设置的建模分析, 本文依次解决如下问题: 首先研究分析国际泳联十米跳台跳水难度系数的确定规则; 其次, 应用物理学方法, 建立模型描述完成跳水动作的时间与运动员体型间的关系。最后, 基于上述模型说明, 在 10 米跳台跳水比赛中体型校正系数应如何设置。给出部分动作的新难度系数, 比较与原难度系数的区别, 并给出解释。

为了便于问题的求解, 对某些条件做出以下简化及合理的假设: (1) 假设使运动员进行翻腾、转体的角动量仅由起跳时的弹跳力对人体重心的力矩产生。空气阻力对人体旋转的影响可以忽略不计; (2) 假设在身高方面, 男性与女性的人体比例差距可以忽略。在体重方面, 男性和女性的人体各部分占总体重的比例相同; (3) 假设 10 米跳台跳水时, 不同运动员的起跳高度近似相等。即所有运动员从起跳到入水所经历的时间近似相同; (4) 假设在空中翻腾、转体的过程中, 人体可视为转动惯量不变的刚体。仅在从起跳到抱膝(或屈体)的阶段, 以及入水前身体展开的阶段, 运动员所做的动作会导致人体转动惯量随时间连续变化。

2 模型建立与求解

2.1 问题一的建模与求解

国际跳水竞赛规则为每一个跳水动作确定了相应的难度系数, 根据动作组别、竞赛项目、器械高度、动作姿势和翻腾转体的周数等方面的差异来确定。根据《国际泳联跳水规则》, 由运动员起跳前站立的方向和起跳后身体运动的方向, 跳水动作分为以下 6 个组别: 第 1 组—面朝水池, 向外翻腾; 第 2 组—背向水池, 向外翻腾; 第 3 组—面朝水池, 向内翻腾; 第 4 组—背向水池, 向内翻腾; 第 5 组—转体跳水; 第 6 组—臂立跳水。跳水运动员的空中动作有以下几种类型: A = Strait (直体); B = Pike (屈体); C = Tuck (抱膝); D = Free

(翻腾兼转体的任意姿势); E = Fly (飞身)。通过对规则中计分方式的分析,初步得出对跳水难度系数有影响的因素包括: (1) 起跳方式 (面朝/背向水池、向外/向内翻腾、臂立起跳); (2) 翻腾圈数及转体圈数; (3) 空中动作 (直体、屈体、抱膝及自由姿势); (4) 是否有飞身动作; (5) 非正常入水 (入水前无法看到水面的动作, 难度系数更高)。

由于难度系数的影响因素较为复杂, 因此首先采取了控制部分因素不变的方式, 对《国际泳联跳水规则》的附录进行分析。通过 Forward Group 中的数据, 可以得到起跳方式为“面朝水池, 向外翻腾”的动作, 其难度系数随翻腾圈数与空中动作的变化情况。如图 1(a), 随翻腾圈数的增加, 难度系数显著提高。在其他条件一致的情况下, 空中动作的难度系数大小依次为“直体>屈体>抱膝”。在加入飞身动作时, 难度系数会略有增加。

对抱膝翻腾时不同的起跳方式的难度系数进行分析, 可以得到难度系数与起跳方式之间的关系。如图 1(b), 起跳方式中, 向外或向内翻腾对难度系数无明显影响, 背向水池时的难度系数略高于面向水池时的难度系数, 但差距较小, 可以认为背向水池的起跳难度较高主要是因视野的影响。从物理分析的角度, 由于人体近似是前后对称的, 因此也符合面向或背向水池, 向外或向内翻腾的起跳方式对难度影响较小的规律。

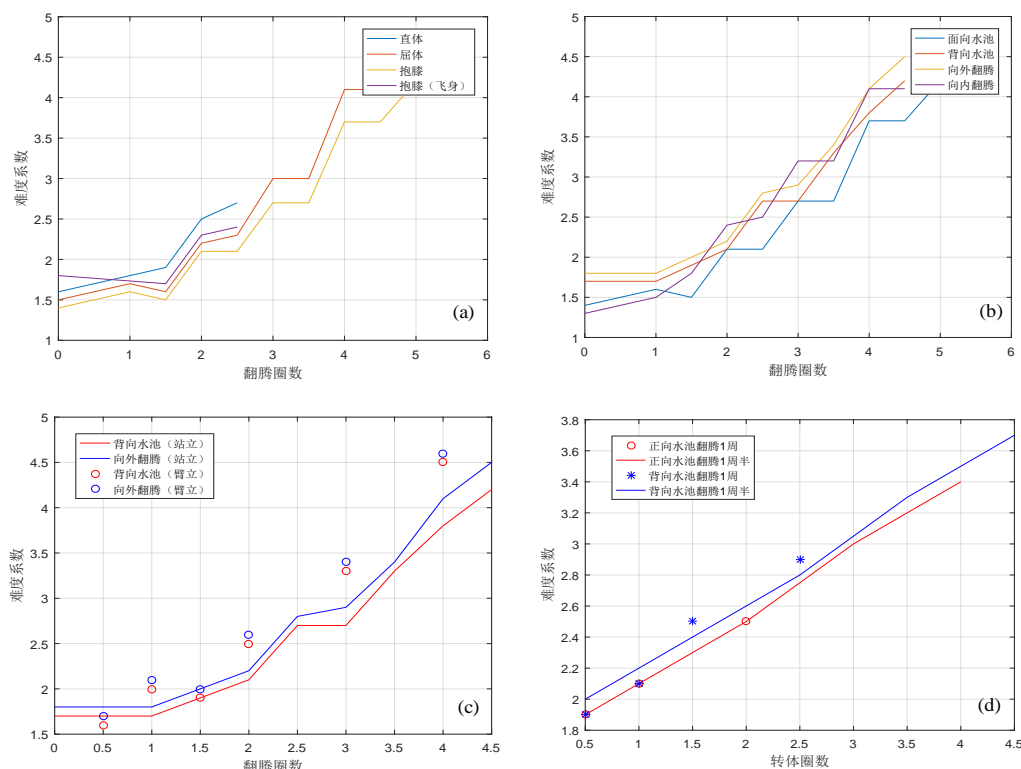


图 1 难度系数随不同控制因素变化的变化情况: (a)起跳方式为“面朝水池, 向外翻腾”时翻腾圈数及空中动作对难度系数的影响; (b)空中动作为抱膝时翻腾圈数及起跳方式对难度系数的影响; (c)臂立起跳时翻腾圈数及起跳方向对于难度系数的影响; (d)翻腾的基础上附加转体对于难度系数的影响

对抱膝翻腾时站立及臂立起跳的难度系数进行分析, 如图 1(c), 可以得到在翻腾圈低于 2 圈时, 臂立起跳与站立起跳的难度系数相近; 高于 2 圈时, 臂立起跳的难度系数明显高于站立起跳的难度系数。当翻腾圈数相同时, 臂立起跳时手臂的作用力应与站立起跳时腿部的作用力相同。但手臂力量相对较小, 因此在翻腾圈数更大时, 臂立起跳的难度更高。

对转体组的难度系数变化规律进行分析, 以及与非转体组难度系数的对比, 可以得到在翻腾基础上附加转体对难度系数的影响。如图 1(d), 附加转体动作后, 翻腾兼转体的难度系数远高于单纯翻腾动作的难度系数。另外, 在转体圈数相同时, 翻腾一周与一周半的难度系

数基本相等。即在做翻腾兼转体动作时，难度系数主要受转体圈数的影响。

通过多元线性回归分析可以得到难度系数与各影响因素间的相关系数^[7]。由难度系数的计算方式 $DD=A+B+C+D+E$ ，假设起跳方式、翻腾圈数及转体圈数、空中动作和非正常入水对难度系数影响为线性正相关关系。由前述分析可知，翻腾圈数对难度系数具有显著影响，而起跳方式的影响较小。因此选取难度系数 y 的影响因素翻腾圈数 x_1 、空中动作 x_2 、转体圈数 x_3 和起跳方式 x_4 ，建立多元线性回归关系式。

建立多元线性回归关系式的重要一环是对空中动作 x_2 和起跳方式 x_4 进行量化，这个过程也即表现不同的空中动作、不同起跳方式对难度的相对影响的过程。通过对《国际泳联跳水规则》附录中的数据进行整理，将总分 DD 与 A 、 B 、 C 、 D 、 E 一一对应。根据假设中上述影响因素对难度系数影响为线性正相关关系。取得使相关关系尽量高的 x_2 、 x_4 的量化值， x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 均进行归一化处理，取值与实际对照见表 1。

表 1 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 的取值与实际对照表

翻腾圈数	x_1	空中动作	x_2	转体圈数	x_3	起跳方式	x_4
0	0	D	0	0.5	0	FWD	0
0.5	0.0909	C	0.1667	1	0.125	BACK	0.2564
1	0.1818	B	0.3333	1.5	0.25	REV	0.3846
1.5	0.2727	E+C	0.35	2	0.375	INW	0.1667
2	0.3636	A	0.9333	2.5	0.5	TWI+ FWD	0.6667
2.5	0.4545	E+B	1	3	0.625	TWI+ BACK	0.6923
3	0.5455			3.5	0.75	TWI+ REV	0.8077
3.5	0.6364			4	0.875	TWI+ INW	0.5385
4	0.7273			4.5	1	ARM+ FWD	0.4103
4.5	0.8182					ARM+ BACK	0.6410
5.5	1					ARM+ REV	0.6795
						ARM+FWD+TWI	0.8974
						ARM+BACK+TWI	1

最后得到多元线性回归关系式：

$$y = -0.8803 + 0.6747x_1 + 1.6462x_2 + 0.2753x_3 + 0.0076x_4 \quad (1)$$

相关系数 $R^2=0.907$ ，说明具有强相关关系。且可得到以下结论：（1）由分项系数可知，难度系数影响：翻腾圈数>转体圈数>起跳方式>空中动作；（2）转体圈数、翻腾圈数对难度系数影响显著，起跳方式、空中动作对难度系数影响小。

2.2 问题二的建模与求解

在跳水运动项目中，运动员空中跳水动作一般包括翻腾和转体两种基本运作形式。若要建立人体在空中运动的物理模型须基于角动量守恒原理。在空中无支撑的状态下，跳水运动员可以通过改变身体姿势来影响转动速度，身体对转动轴的转动惯量一般表示为^[6]：

$$J = \sum m_i r_i^2 \quad (2)$$

式中： m_i 、 r_i 分别表示身体的第 i 部分和身体与转动轴线的距离。

描述转动状态变化与外力矩的关系，可用动量矩定理，即：

$$J\beta = M \quad (3)$$

式中： β 为身体绕轴转动角加速度； M 为绕转轴外力矩。

由于运动员离开跳板后，翻腾或转体的转动轴均通过重心，因此在空中无法受到外力矩作用，即 $M=0$ ，从而 $\beta=0$ ，对任意时间 t 恒有动量矩 $L_t=L_0$ ，即：

$$J_t \omega_t = J_0 \omega_0 \quad (4)$$

式中： ω_t 、 ω_0 分别为经过 t 时间的角速度和初始角速度。

从上式可以看出，转动惯量 J 与角速度 ω 成反比，结合跳水的翻腾与转体动作可以认为：对于翻腾动作，团身越紧，翻腾速度越快，若打开身体，翻腾速度变慢；同样对于转体动作，身体越直、两臂挥动越快且贴身越紧转体越快^[2]。在以下分析中，将跳水动作分为直体翻腾、屈体翻腾、抱膝翻腾及翻腾兼转体动作，根据处于关键阶段的人体姿态分别进行讨论，以描述完成各个跳水动作的时间与运动员体型之间的关系。

2.2.1 直体翻腾动作模型

对于空中动作为直体翻腾的跳水方式，由于人体在运动过程中没有较大幅度的动作，因此可以简化为刚体的转动模型。假设人体各部分质量均匀，并忽略男性与女性之间的人体比例差距。由人体结构各部分的几何比例，以及质量（ m ）占比为：头部重量约占总体重的 8%，躯干重量约占 68%，手臂约 10%，腿部约 14%。做直体翻腾动作时，转动轴为与人体腰部平行的直线，计算得到人体对该轴的转动惯量为：

$$Mt_0 = 0.053mh^2\omega \quad (5)$$

将跳水运动的过程分为起跳和空中运动两部分。在起跳阶段，由刚体动力学公式，有：

$$Mt_0 = 0.053mh^2\omega \quad (6)$$

在人体提供的合外力矩相等，起跳阶段用时（ t_0 ）的情况下，对时间积分，有：

$$Mt_0 = 0.053mh^2\omega \quad (7)$$

忽略空气阻力，人体在空中的角速度恒为： $\omega = \frac{Mt_0}{0.053mh^2}$ ，当翻腾周数为 n 时，有：

$$2\pi n = \omega t = \frac{Mt_0 t}{0.053mh^2} \quad (8)$$

直体翻腾 n 周所需要的时间 t 为：

$$t = 0.106n\pi \frac{mh^2}{Mt_0} \quad (9)$$

2.2.2 屈体翻腾与抱膝翻腾动作模型

对于整套屈体翻腾动作在空中可分解为“起跳”、“起跳→屈体”、“屈体翻腾”、“屈体→展开”、“入水”共 5 个阶段。其中，在阶段 1 与阶段 5，可以将人体视作转动惯量不变的刚体，其转动惯量的值与直体翻腾动作的转动惯量计算值相同，恒有

$$J_1 = J_5 = 0.053mh^2 \quad (10)$$

在阶段 3 中，可以认为在翻腾过程人体无较大动作，因此转动惯量也为定值。可计算得：

$$J_3 = \sum_i m_i r_i^2 = 0.033mh^2 \quad (11)$$

当屈体翻腾周数为 n 时，前 1/4 周处于阶段 2 “起跳→屈体”，后 1/4 周处于阶段 4 “屈体→展开”。对阶段 3，由刚体动力学公式，有：

$$2\pi(n - \frac{1}{2}) = \omega_3 t_3 = \frac{Mt_0 t_3}{0.033mt^2} \quad (12)$$

翻腾 n 周所需要的时间 t_3 为:

$$t_3 = 0.066(n - \frac{1}{2})\pi \frac{mh^2}{Mt_0} \quad (13)$$

在阶段 2 与阶段 4 的过程中, 人体的转动惯量是随着动作的改变而变化的。假设人在做动作时肢体运动导致转动惯量变化的过程是均匀的, 即随时间线性变化。且在阶段 2 与阶段 4 均翻腾了 1/4 周, 其动作也为对称的, 故有 $t_2=t_4$ 。设阶段 2 的初始时刻为 0 时刻, 则在阶段 2 中转动惯量随时间的变化为:

$$J_2(t) = [0.053 - (0.053 - 0.033)\frac{t}{t_2}]mh^2 \quad (14)$$

由角动量守恒定律, 有:

$$J_2(t)\omega_2(t) = J_3\omega_3 \quad (15)$$

$$\left(0.053 - 0.02\frac{t}{t_2}\right)mh^2 \cdot \omega_2(t) = 0.033mh^2\omega_3 \quad (16)$$

解得:

$$\omega_2(t) = \frac{0.033\omega_3 t_2}{0.053t_2 - 0.02t} \quad (17)$$

即在“起跳→屈体”阶段, 随着 t 的增大, 运动员翻腾的角速度不断增加, 至 $t=t_2$ 时达到最大值, 之后进入阶段 3。由阶段 2 翻腾了 1/4 周, 有:

$$\int_0^{t_2} \omega_2(t)dt = 2\pi \cdot \frac{1}{4} \quad (18)$$

$$1.65\omega_3 t_2 \left[\ln \frac{0.053}{0.033\omega_3} - \ln \frac{1}{\omega_3} \right] = \frac{\pi}{2} \quad (19)$$

代入 $\omega_3 = \frac{Mt_0}{0.033mh^2}$, 解得:

$$t_2 = t_4 = \frac{0.067mh^2}{Mt_0} \quad (20)$$

由此可得, 完成 n 周屈体翻腾动作的总用时:

$$t = t_2 + t_3 + t_4 = 0.066\left(n - \frac{1}{2}\right)\pi \frac{mh^2}{Mt_0} + \frac{0.134mh^2}{Mt_0} \quad (21)$$

同理, 将抱膝翻腾动作分解为“起跳”、“起跳→抱膝”、“抱膝翻腾”、“抱膝→展开”、“入水”共 5 个阶段。通过类似推导可以得到, 完成 n 周抱膝翻腾动作的总用时:

$$t = 0.042\left(n - \frac{1}{2}\right)\pi \frac{mh^2}{Mt_0} + 0.108 \frac{mh^2}{Mt_0} \quad (22)$$

综上可知完成直体、屈体与抱膝翻腾动作的总用时与运动员的体重成正比, 与运动员高的平方成正比。在翻腾圈数相同时, 动作完成时间的大小始终符合“直体>屈体>抱膝”。

2.2.3 翻腾兼转体动作模型

翻腾兼转体动作的形成主要是外力矩的作用，运动员需使身体重心逐渐超出支撑面，支撑力反作用力不通过身体重心时，便围绕重心形成外力矩，使人体产生转动。转体动作类型可分为力矩转体与角动量转体，即先转体后翻腾与先翻腾后转体。研究表明，先转体后翻腾会使运动员转体时转轴不正，难以控制入水，且过早转体会影响翻腾速度，故该模型仅考虑先翻腾后转体的动作。结合视频资料^[4]可以将该动作简化为如下 5 个阶段^[5]：起跳；直体翻腾过渡到翻腾兼转体；翻腾兼转体动作；恢复直体翻腾动作；入水；

运动员转体时身体需要作不对称肢体运动，躯干有一定的倾斜运动，完成后躯体倾斜应当随之消失， J_y 是与人体转体有关的转动惯量， J_x 和 J_a 是与翻腾和倾斜相关的转动惯量，由参考文献可知翻腾所获转动惯量 J_x 是转体转动惯量 J_y 的 11.3 倍^[1]，故可估算转体转动惯量为：

$$J_y = 0.0047mh^2 \quad (23)$$

其中，在阶段 1 与阶段 5，人体转动惯量恒定，且与直体翻腾动作的转动惯量计算值相同。在阶段 3 中，绕身体纵轴转体的角速度可以表示为^[2]：

$$\omega_y = \frac{J_{xy}}{J_x J_y - J_{xy}^2} J_x^0 \omega_x^0 \quad (24)$$

式中： $J_x^0 \omega_x^0$ 为绕横轴翻腾的初始动量矩，有 $J_x^0 \omega_x^0 = Mt_0$ ； J_{xy} 为身体对横轴与纵轴的惯量积； ω_y 正比于 $J_x^0 \omega_x^0$ ，即绕横轴翻腾的初始动量矩越大，绕纵轴转体的角速度越大。由文献可知转体角速度约是翻腾角速度的 3 倍^[2]，因此可得：

$$\omega_y = \frac{3Mt_0}{0.053mh^2} \quad (25)$$

设转体圈数为 n' ，阶段 3 的总用时 t_3 以转体所用时间进行计算，可得：

$$2\pi n' = \omega_3 t_3 = \omega_y t_3 \quad (26)$$

$$t_3 = 0.353n'\pi \frac{mh^2}{Mt_0} \quad (27)$$

在阶段 2→3 与阶段 3→4 均翻腾了 1/4 周，动作对称，故有 $t_{2 \rightarrow 3} = t_{3 \rightarrow 4}$ 。假设转动惯量随时间线性变化，由角动量守恒，有：

$$(0.053 - 0.0483 \frac{t}{t_{2 \rightarrow 3}})mh^2 \cdot \omega_2(t) = 0.0047mh^2 \omega_y \quad (28)$$

解得：

$$\omega_2(t) = \frac{0.0047\omega_y t_{2 \rightarrow 3}}{0.053t_{2 \rightarrow 3} - 0.0483t} \quad (29)$$

即在“直体翻腾过渡到翻腾兼转体”阶段，随着 t 的增大，运动员翻腾的角速度不断增加，至 $t=t_2$ 时达到最大值。由阶段 2 翻腾了 1/4 周，有：

$$\int_0^{t_2} \omega_2(t) dt = 2\pi(n-1) \cdot \frac{1}{4} \quad (30)$$

带入式 (25)、(29)，解得：

$$t_{2 \rightarrow 3} = t_{3 \rightarrow 4} = 0.0375\pi(n-1) \frac{mh^2}{Mt_0} \quad (31)$$

完成 n 周翻腾转体动作的总用时:

$$t = t_2 + t_{2 \rightarrow 3} + t_3 + t_{3 \rightarrow 4} + t_4 = 0.353n\pi \frac{mh^2}{Mt_0} + (0.855n - 0.749)\pi \frac{mh^2}{Mt_0} \quad (32)$$

与前一节所得公式对比分析可知, 完成翻腾兼转体所用总时间远高于单纯的翻腾动作。且转体角速度为翻腾角速度的 3 倍, 则转体圈数应为同阶段翻腾圈数的三倍, 故在做翻腾兼转体动作时, 难度系数主要受转体圈数的影响。

2.3 问题三的建模与求解

通过前一章分析可以得出, 在一般情况下, 完成各个跳水动作的总用时与运动员的体重成正比, 与运动员身高的平方成正比。因此为使比赛更加公平, 对不同体型的运动员设置体型校正系数显然是有必要的。通过查阅《青少年跳水运动员初级选材研究》^[3], 可以取跳水运动员身高的范围如表 2 所示。根据体质指数 (BMI) 的定义:

$$\text{体质指数 (BMI)} = \text{体重 (kg)} \div \text{身高}^2 \text{ (m)} \quad (33)$$

考虑到一般跳水运动员的体质指数应在正常范围内 (18.5-23.9), 计算可得运动员的体重范围, 见表 2。

表 2 运动员的体重范围表

体型 /性别	身高 (cm)			体重 (kg)		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
男性	170	177	163	62	74	49
女性	160	167	153	54	66	43

对体型校正系数的设置方法, 可以对《国际泳联跳水规则》的难度系数 DD 的计算方式修改为 $DD = A + B + C + D + E + F$ 。其中, 体型校正系数 F 的值应根据完成各个跳水动作的时间与运动员体型之间的关系来确定。对身高、体重处于平均值 (以下称为“标准体型”) 的运动员, 其体型校正系数为 0。在探究难度系数与体型的关系时, 考虑到完成不同动作总用时的计算方式是不同的。在此以抱膝翻腾动作为例计算体型系数, 抱膝翻腾 n 周的总用时为:

$$t = 0.042(n - \frac{1}{2})\pi \frac{mh^2}{Mt_0} + 0.108 \frac{mh^2}{Mt_0} \quad (34)$$

显然, 如果不考虑起跳时弹跳力产生的力矩 M , 及该力矩的作用时间 t_0 , 则身高、体重较小的女运动员完成动作的总用时更短。但因为男运动员的弹跳力更强, 因此实际完成动作时, 男女运动员所用时间是近似相等的。

对动作 307 “面向水池, 向内翻腾 3 周半” 及 309 “面向水池, 向内翻腾 4 周半”, 参考《国际泳联跳水规则》中的 APPENDIX 3, 可得上述两个动作的难度系数如表 3。

表 3 典型动作的难度系数

Dive	Pos	Hght	A	B	C	D	E	DD
307	C	10	2.7	0.0	0.0	0.3	0.4	3.4
309	C	10	3.5	0.3	0.0	0.3	0.4	4.5

设对于标准体型 ($h=1.70$, $m=62.0$) 的男运动员, 完成动作 307 动作 “面向水池, 向内

翻腾 3 周半” 的用时为 1 个单位时间。此时， $n=3.5$ ，由此可以计算得起跳时弹跳力产生的力矩对时间的积分为：

$$\int_0^{t_0} M dt = 90.31 \quad (35)$$

从而得到完成 307 动作所用总时间随着身高和体重的变化规律如图 2(a)所示，图中平面表示标准体型运动员完成 307 动作用时。同理可得，完成 309 动作所用总时间随着身高和体重的变化规律如图 2(b)所示。可见，上述两图的变化趋势基本相同，且对原难度系数越大的动作，体型对实际动作难度的影响越大。体型校正系数 F 应为无因次量，由此可以定义：

$$\text{体型校正系数} = \frac{\text{实际动作用时} - \text{标准体型用时}}{\text{标准体型用时}} \times \text{难度系数折减系数} \quad (36)$$

其中，考虑到因体型导致的动作完成用时不同只是体现动作难度的一个方面，为了使体型校正系数对难度系数的影响程度控制在合理的范围内，在公式中引入折减系数 $z=0.4$ 。对其他跳水动作采用同样的方法计算体型校正系数，动作完成时间均可按照前一章所得公式计算。

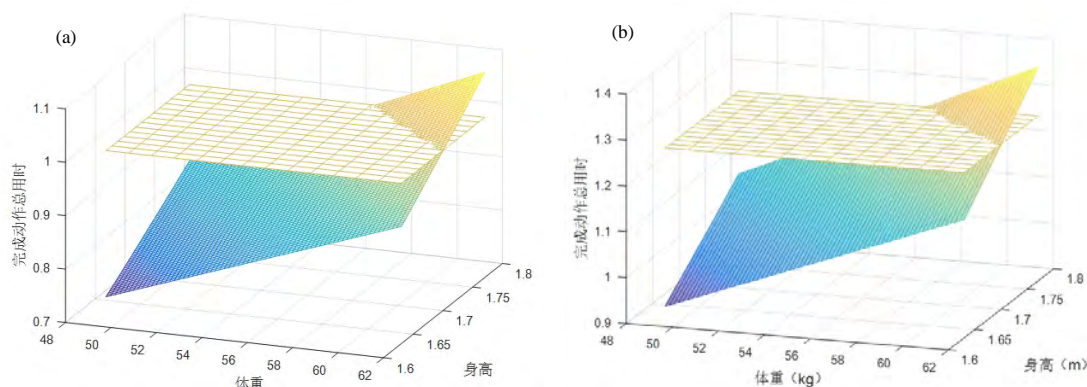


图 2 完成跳水动作所用总时间随着身高和体重的变化：(a)完成 307 动作所用总时间随着身高和体重的变化规律； (b)完成 309 动作所用总时间随着身高和体重的变化规律

3 新难度系数与原系数的对比分析

通过运动员完成不同空中动作所需时间与运动员体型之间的关系模型，以及基于该模型得到的体型校正系数，对《国际泳联跳水规则》中的难度系数进行修正可以得到新的难度系数。表 4 给出了部分跳水动作的新难度系数的取值范围。并以我国著名跳水运动员吴敏霞的体型参数（身高 1.67m，体重 53kg）为例，通过上述模型计算得到对应动作的新难度系数。

对新难度系数与原难度系数的区别可以总结如下：（1）对表中所有动作，算例所得到的新难度系数均大于原难度系数；（2）对表中所有动作，在动作代码相同时，屈体（PIKE）的新难度系数均大于抱膝（TUCK），且屈体对新难度系数与原系数差别的影响更大；（3）对比 105，107，109，1011 可以得到，对翻腾周数较小的动作，算例得到的新难度系数变化较小。而翻腾周数较大时，难度系数的增加更为明显；（4）对比 205 与 5255，207 与 5275 可以得到，在增加转体动作后，原难度系数与新难度系数的差别更大。

因吴敏霞的身高（1.67m）相比于标准值（1.60m）偏高，体重（53kg）与标准值（54kg）近似相等，且身高对动作完成时间的影响更大，因此会使得体型对动作的完成产生不利影响，难度系数更大是合理的。由问题二的结论可知，在体型相同时，屈体翻腾动作的完成时间大于抱膝翻腾，因此屈体翻腾的新难度系数更大。对翻腾周数较大的动作，体型对

动作完成时间的影响较大，由此计算得到的体型校正系数更大。在增加转体动作后，需要额外考虑身高、体重对于转体完成时间的影响。因此得到的翻腾兼转体的体型校正系数大于单纯的翻腾动作。通过体型校正系数对原难度系数进行修正，得到的新难度系数能够更加准确的反应不同体型运动员完成跳水动作的真实难度。

表 4 难度系数表

动作 代码	PIKE			TUCK		
	原	新		原	新	
	B	B		C	C	
		范围	算例		范围	算例
105	2.3	2.05-2.61	2.36	2.1	1.87-2.38	2.16
107	3.0	2.67-3.40	3.08	2.7	2.41-3.06	2.77
109	4.1	3.65-4.64	4.21	3.7	3.30-4.19	3.80
1011	--	--	--	4.7	4.19-5.32	4.83
205	2.9	2.58-3.28	2.98	2.7	2.41-3.06	2.77
207	3.6	3.21-4.08	3.70	3.3	2.94-3.74	3.39
209	4.5	4.01-5.10	4.62	4.2	3.74-4.76	4.32
5255	3.6	3.18-4.09	3.71	3.4	3.00-3.86	3.50
5257	4.1	3.61-4.66	4.23	3.9	3.45-4.43	4.02
5273	3.8	3.36-4.31	3.92	3.5	3.09-3.97	3.61
5275	4.2	3.70-4.78	4.34	3.9	3.45-4.43	4.02

4 总结与推广

本文首先采用数据分析法筛选出跳台跳水难度系数的主要影响因素，简化了回归分析的数据量，在此基础上建立难度系数的多元线性回归模型。主要采用动力学理论建立了各跳水动作完成时间与运动员体型之间的关系模型，能够直观地反映出动作所用时间与运动员身高和体重之间的关系，且能据此进一步计算体型校正系数。并结合算例说明了考虑体型影响后得到的新难度系数的合理性。另外，在跳水运动中，需要在动作完成后有足够时间打开身体。特别是在做翻腾转体较多的动作时，若入水前打开身体不充分会导致入水效果差。因此本文建立的跳水动作的时间与体型关系的物理模型可以运用到实际中，帮助运动员估算完成动作所需时间，以保证更好的入水效果。

参考文献

- [1] 郝卫亚, 王智, 艾康伟. 运动员空中翻腾和转体姿态控制过程中转动惯量的变化[J]. 中国运动医学杂志, 32(11):966-973, 2013.
- [2] 李连在, 成尔恒. 跳板跳水翻腾兼转体动作的力学原理和技术分析初探[C]// 中国运动生物力学学术会议. 1981.
- [3] 谭秀凤, 苏惠安. 青少年跳水运动员初级选材研究[J]. 广东职业技术教育与研究, 2016(5):141-143, 2016.
- [4] 凤凰网视频, 外国选手高难度跳水高空转体, http://v.ifeng.com/video_14728210.shtml, 2018.09.18.
- [5] Tong W, Dullin H R. A New Twisting Somersault: 513XD[J]. Journal of Nonlinear Science, 27(6):2037-2061, 2017.
- [6] 哈尔滨工业大学理论力学研究室. 理论力学.I[M]. 高等教育出版社, 2009.

[7] 多元线性回归分析理论详解及 SPSS 结果分析, http://blog.sina.com.cn/s/blog_13eaccf160102xscv.html, 2018.09.17.

Model and Analysis for Body Shape Correction Coefficient of Platform Diving

DU Pei-lin¹, YANG Zhuo-yuan², ZHANG Jing-ting³

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(3. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 201100, China)

Abstract: Aiming at the influence of athletes' body shape on the completion time of platform diving, a new calculation method of body shape correction coefficient was proposed based on the original calculation rules of diving difficulty coefficient. Firstly, the main factors affecting the difficulty coefficient were analyzed, and the multivariate linear regression model between the difficulty coefficient and the influencing factors was established. Then, based on the moment of momentum theorem and conservation principle of angular momentum, diving actions were classified and analyzed respectively, and the dynamic equation of the human body moving around the rotation axis was established. The relationship between the time to complete each diving action and the athlete's body shape was obtained. Finally, a model for calculating the body shape correction coefficient was established to correct the original difficulty coefficient. The corrected difficulty coefficient can reflect the true difficulty of diving action of athletes with different body types more accurately under the condition of certain rationality.

Keywords: data analysis; multiple linear regression; conservation of angular momentum; shape correction coefficient