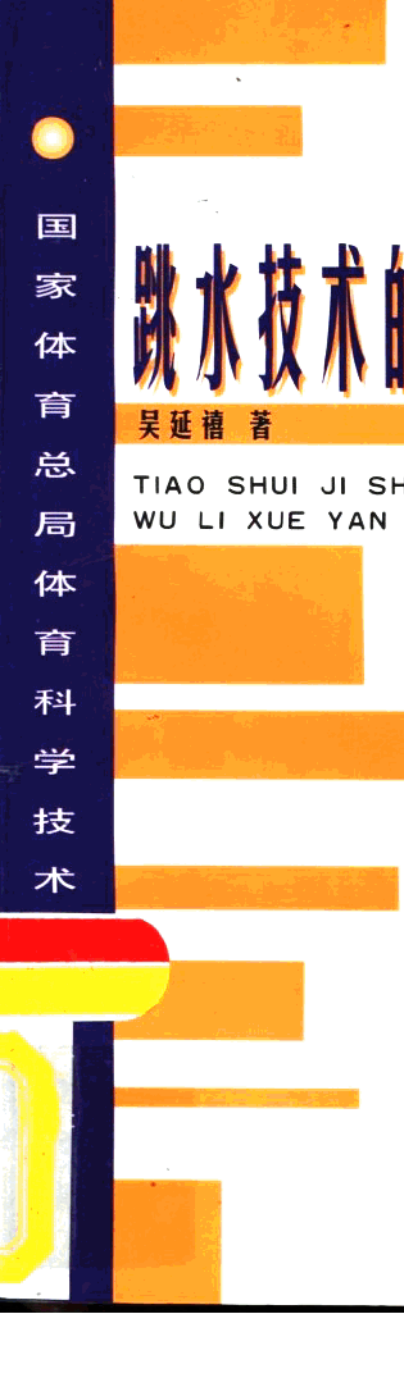




国家体育总局
体育科学
技术

跳水技术的生物力学研究

吴延禧 著

TIAO SHUI JI SHU DE SHENG
WU LI XUE YAN JIU

人民体育出版社

总 序

我和大家一样,怀着十分兴奋的心情,祝贺《国家体育总局体育科学研究所建所40周年科研成果系列丛书》的出版。这套体育科学系列丛书有代表性地汇集了我所科研人员40年来辛勤劳动的部分成果。它的出版不仅标志着我国体育科学研究已进入“不惑之年”并已结出丰硕的科研成果,而且标志着我国已形成了一支从事体育科学研究的高水平的科研队伍。我们借研究所40年所庆之机,把这些科研成果中的精品奉献给亲爱的祖国和人民。

体育是社会主义现代化事业的重要组成部分,要真正实现体育持续、稳定、健康的发展,必须依靠科技的支持。要把依靠科技进步和提高劳动者素质为主要内容的“科技兴体”方针摆到体育发展战略的重要位置。尤其是随着现代科技的发展、群众体育的实际需要和竞技体育水平的不断提高,体育科技在体育事业发展中发挥着越来越重要的作用。“科技兴体,先兴科技”,这才是真正抓住了体育事业发展的关键。

体育科技是人们在探索体育运动规律过程中所获取的知识以及人们在体育运动实践中取得的经验并使之上升到理论的总和。体育科研是探索体育运动与体育活动规律的过程,也是获取和积累体育科学知识的创造性劳动。我们组织科研人员把我们几十年的科研成果,重新加工,精心雕琢,写成专著。我们认为这是一件有意义的工作。希望这套体育科技学术丛书能对体育科技人员、体育院校的师生、运动员、教练员及关注体育科学技术的朋友们有所裨益,并在体育实践中实现其价值。愿它成为建构 21 世纪人类体育大厦的一砖一瓦。

在此,我们感谢国家体育总局科教司对编辑出版这套体育科技丛书给予的大力支持,感谢人民体育出版社高品质地出版印制这套丛书,特别感谢这套丛书著者们以及所有体育科研人员长期的辛勤劳动。

国家体育总局体育科学研究所所长 赵炳璞

1998 年 9 月

前 言

竞技跳水由于支撑物的不同,分为跳台跳水和跳板跳水。跳台跳水在刚度很大的钢筋混凝土台面上助跑和起跳,而跳板跳水则在大挠度富有弹性的跳板上助跑和起跳。由于跳板在运动员的动作作用下产生形变,运动员必须根据跳板的弹性性能,熟练地驾驭跳板,才能充分有效地挖掘和利用跳板的弹力能,借以提高跳板跳水的运动技术水平。因此,跳板跳水的动作技术要比跳台跳水复杂得多。为此,本研究以跳板跳水的动作技术作为研究重点。

本研究对国际比赛普遍采用的 Maxiflex 跳水板进行了不同支点和力点的应力应变计测,利用所得结果计算分析研究国际高水平跳板跳水运动员在大型比赛中的技术动作与跳板弹性性能的相互关系,目的在于从技术和理论方面更深入地探索跳板跳水的技术规律。在跳水板弹力计测的基础上,对参加 1988 年济南和 1989 年广州跳水公开赛、1990 年第 11 届亚运会和第 25 届奥运会的优秀三米跳板跳水运动员的动作进行三维摄影测量,从理论和实践上揭示了提高助跑稳定性的重要内涵,助跑与起跳、起跳与腾空的衔接技术与理论;揭示了起跳过程中运动员的动作与跳板振动节奏协调配合的实质,使“合板”理论科学化、具体化;揭示了充分地利用跳水板弹力能的技术、动力和体能因素,腾空技术动作规律和高质量完成腾空及入水动作的技术与体能因素,以及选定适合个人特点的适宜板支点的科学依据等。

在 10 米跳台跳水技术研究中,重点对我国最优秀的男女运动员参加济南跳水公开赛、第 11 届亚运会和第 25 届奥

运会的最佳动作进行分析研究。通过技术影片分析,计算人体重心加速度和起跳过程中的支撑反力,揭示了跳台跳水助跑和起跳的技术特点,高质量动作的素质基础和技术成因,以及起跳过程中对转动动能、水平动能和垂直动能的合理调控。当今在国际比赛中 10 米跳台跳水的自选动作,男运动员已普遍选用翻腾、转体三周半的高难动作,女运动员也已有许多人选用了这类动作,如第 25 届奥运会上参加 10 米跳台跳水决赛的男、女各 12 名选手中,选用 107b 的男子 12 人,女子 6 人;选用 207c 的男子 12 人,女子 2 人;选用 307c 的男子 7 人;选用 407c 的男子 11 人,女子 4 人;选用 5237d 的男子 12 人,女子 3 人。基于以上情况,本研究以翻腾、转体三周半的优秀动作为重点进行分析研究。



吴延禧

研究员，博士生导师，国务院特贡津贴领取者，全国教练员岗位培训先进工作者。祖籍福建泉州市。

1955年从印尼回国。1959年大学毕业后到原国家体委科研所从事运动生物力学科研工作至今。先后深入田径、体操、跳水等十个运动项目开展科研、科技攻关和科技服务工作，并有诸多著述。

国家体育总局体育科学研究所建所40周年科研成果系列丛书

主 编

赵炳璞

副主编

李岳生

编 委

高大安

王 清

李福田

李国平

卢德明

钱金华

谨以此书献给

建国五十周年暨

国家体育总局体育科学研究所

建所四十周年

目 录

前 言

第一章 跳水板的弹力计测及弹性性能分析 ————— (1)

第一节 跳水板的弹力计测…………… (1)

一、方法…………… (2)

二、结果与讨论…………… (3)

第二节 跳水板的弹性性能分析…………… (14)

一、作用力与板尖下降量的关系…………… (14)

二、不同支点,作用力与板尖下降量的关系… (15)

三、不同力点,作用力与板尖下降量的关系… (17)

四、板下降过程中,板尖的水平位移…………… (18)

五、跳水板的弹性性能对跳板跳水技术动作的影响 …………… (19)

第二章 跳板跳水适宜板支点的选定 ————— (23)

第一节 板支点的调节对跳板弹性性能的影响…………… (24)

第二节 人体肌肉工作的个性特点…………… (24)

一、运动员超等长能力与板支点的关系…………… (25)

二、作用力与板支点的关系…………… (25)

三、膝关节最大用力区间与板支点的关系…………… (27)

四、跨步跳的腾空高度和腾空时间与板支点的关系 …………… (28)

五、运动技术水平与板支点的关系…………… (28)

第三节 对国内外几次大比赛中优秀运动员选取板支点情况的分析…………… (30)

一、第6届全运会…………… (31)

二、第 11 届亚运会	(33)
三、1988 年济南国际跳水公开赛	(36)
四、第 25 届奥运会	(37)
五、讨论	(38)
第三章 助跑技术的生物力学研究	(41)
第一节 跳板跳水助跑稳定性的生物力学分析	(41)
一、我国优秀跳板跳水运动员助跑结构(支撑与腾空 时间)分析	(43)
二、确保助跑稳定性的其它因素	(46)
三、前跨步——走板与跨步跳的连接技术	(49)
四、跨步跳——助跑与起跳的连接技术	(54)
五、结论	(67)
第二节 跳台跳水助跑的技术特点	(68)
第四章 起跳技术的生物力学研究	(73)
第一节 跳板跳水起跳技术研究	(73)
一、跳板跳水起跳过程中动作结构的时相分析	(76)
(一) 对象和方法	(76)
(二) 结果和讨论	(76)
(三) 结论	(82)
二、压板阶段充分发掘跳板弹力能的生物力学分析	(83)
(一) 压板的动力源	(84)
(二) “合板”	(85)
(三) 脚着板时的人体姿位和着板点	(97)
(四) 蹬伸压板过程中人体环节的协调配合	(108)
(五) 结论	(133)

三、反弹阶段有效利用跳板弹力能的生物力学分析	(134)
(一) 跳板弹力能利用的现状	(134)
(二) 影响垂直动能利用率的主要因素	(144)
(三) 具体动作分析	(163)
(四) 结论	(179)
第二节 跳台跳水起跳技术特点	(180)
一、双脚纵跳能力与跳台跳水的关系	(182)
二、多周翻腾、转体跳水的垂直动能与转动动能	(183)
三、起跳的正确用力时机和方法	(185)
(一) 创造适宜起跳角动量的途径和方法	(185)
(二) 起跳过程中垂直动能、水平动能、转动动能的调控	(195)
第五章 起跳与腾空连接技术	(199)
第一节 “连接”动作的开始时机	(199)
第二节 “连接”动作的结束时机	(202)
第六章 腾空技术的生物力学分析	(205)
第一节 人体对动作的控制	(205)
第二节 多周翻腾技术的生物力学分析	(206)
一、腾空高度与腾空时间	(206)
二、起跳动量矩(角动量)	(211)
三、腾空阶段的时相分析	(217)
(一) 急剧加速翻腾时相	(217)
(二) 保持最高翻腾速度时相	(220)
(三) 急剧减速翻腾时相	(224)
第三节 多周翻腾转体技术的生物力学分析	(226)

一、多周翻腾转体的动力源	(226)
(一) 相对于人体横轴的起跳角动量	(227)
(二) 绕身体纵轴转体的产生	(227)
(三) 在腾空过程中增强绕身体纵轴转体效果的方法	(232)
二、优秀运动员的多周翻腾转体技术	(233)
(一) 腾空初始的人体姿态	(233)
(二) 多周翻腾转体的腾空时相与分析	(234)
第七章 准备入水和入水	(239)
第一节 准备入水	(239)
第二节 入水压水花技术的流体力学分析	(242)
一、水花形成的几个流体力学因素	(242)
(一) 运动员身体的体积大小	(242)
(二) 入水速度	(242)
(三) 击水面积	(243)
(四) 身体形状	(243)
二、压水花的身体姿态	(243)
(一) 运动员的体型	(243)
(二) 入水时的身体姿态与手势	(244)
(三) 入水动作与入水路线	(245)
三、压水花的流体力学分析	(247)
主要参考文献	(249)
致谢	(252)

第一章

跳水板的弹力计测及弹性性能分析

跳板跳水技术的复杂性和难度就在于跳水板是大挠度的弹性板。运动员在跳板上助跑起跳必须解决好技术动作和跳板弹性性能之间的相互关系。在人—板关系中运动员是起主导作用的。要迅速掌握跳板跳水技术，提高运动技术水平，教练员、运动员需要对跳水板的弹性性能有比较深刻的了解，才能在训练中掌握主动性，提高自觉性，迅速提高驾驭弹性板的能力，提高训练效果。

1987年5月9日和1988年11月16日我们先后两次对国内外普遍采用的Duraflex公司生产的Maxiflex跳水板进行了静载荷测试，目的在于具体了解跳水板的弹性性能，探索一种能在跳水过程中对跳水板进行弹力计测的简便方法，以利于在比赛条件下对跳板跳水技术进行深入研究。

第一节 跳水板的弹力计测

由于跳板跳水以跳水板的反弹力为主要腾空动力，而板反弹力的大小又主要取决于运动员起跳技术的好坏，所以起跳技术是跳板跳水最关键的技术。对起跳技术的研究一直是跳水技术研究的重点。但从国内外已发表的资料来看，过去

对起跳的研究多半是根据影片数据进行运动学分析和一些动力学模拟计算。我们认为只有结合板的受力状况，尤其是起跳过程中板反弹力的数据，才能较为全面地对起跳技术进行分析研究。因此，我们在板的力学测试和计算分析方面进行了一些尝试，初步总结出一些有关板的反弹力的定量关系，为跳板跳水起跳技术的研究提供了新的指标。

一、方法

要获得跳板跳水起跳过程中板反弹力大小的数据，首先必须对跳板进行某些力学测定，从而确定计算反弹力的必要参数。国内部分生产厂家和教学科研部门曾对跳水板做过一些力学测试和分析，但未见有公开发表的文章和数据。一般来讲，跳水板力学分析的方法有：(1) 实测方法：有静态测定和动态测定。在动态测定中又有应变测试和加速度计测定。(2) 计算方法：有材料力学方法和弹性理论方法（有限元分析等）。

采用上述方法，一般可得到相当全面的有关跳板性能的材料。但除静态测定外，其它方法都要花费较多的人力或物力，测试和计算方法都比较复杂，因而实用性受到较大限制。鉴于这一点，并考虑到在比赛条件下能方便迅速地进行技术诊断的实际需要，以及跳板跳水起跳动作较慢、板的频响较低的特点，我们决定先不做动态测定和计算，而采用比较简便易行的静态测定和计算分析相结合的方法。具体做法是，将一钢管焊接在一钢板上，然后用螺钉将钢板固定在跳板的前部，使钢管的中轴线距板尖5厘米，相当于起跳压板时踝趾关节所在的位置。接着进行逐级加载，每次加载都是在伸出板尖两端的钢管上分别套入相同重量的杠铃片，以免产生扭矩，损坏跳板。当跳板处于各级载荷时，按3、4、

5、6、7、8、9的顺序依次改变支点指针的位置，并分别测量不同支点指针位置时板尖的垂直座标和水平座标，如图1所示。实测得的数据列于表1。

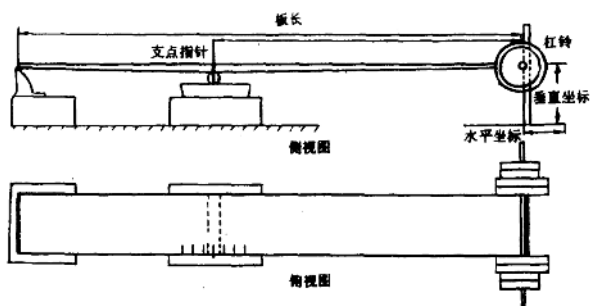


图1 跳板静态测定示意图

表1 实测数据

支点指针 位移 cm 载荷 kg	3		4		5		6		7		8		9	
	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平
16	105.2	10.0												
56	97.7	10.2	97.5	10.4	96.7	10.4	95.9	10.3	95.3	10.1	94.4	10.3	94	10.5
116	88.0	10.8	86.9	10.1	85.6	11.2	84.7	11.1	83.4	11.2	82.3	11.2	81.5	11.2
156	81.6	11.5	80.0	11.6	78.6	11.6	77.5	11.9	75.8	11.9	74.1	12.2	73.1	12.3
216	71.8	13.0	70.2	12.9	68.5	13.3	66.4	13.7	64.5	13.7	62.5	14.0	61.2	14.0
256	65.5	14.1	63.2	14.2	61.5	14.5	59.0	14.9	56.8	15.2	54.5	15.5	52.7	16.0
316	55.9	16.0	53.9	16.2	51.2	16.7	49.0	17.1	46.0	17.4	43.2	17.9	41.5	18.2
366	48.2	17.5	45.6	18.0	43.8	18.6	40.6	19.1	36.8	19.8	33.8	20.4	32.0	21.0

二、结果与讨论

在进行测定之前，我们曾对跳水板做过一些简单的定性分析。严格来讲，跳水板是一个外形比较复杂的薄板结构，应采用弹性理论的某些理论来计算，但这些方法往往都较复

杂。如果我们将板简化为一端受集中载荷的简支梁来考虑，则可用材料力学的方法来进行分析。根据梁的挠曲线近似微分方程 $y''(x) = \frac{M(x)}{EJ}$ 和梁的弯矩方程 $M(x) = p \cdot x$ 可以推断，板外伸端各点的挠度与它所受载荷成线性关系。基于上述分析，我们对表 1 中的实测数据进行了最小二乘线性拟合。当支点取 3 时的拟合方程及误差数据如表 2 所示。

表 2 支点取 3 时的拟合方程和数据

$$f = a + b \times h \quad a = 665.867 \quad b = -6.249 \quad f = 665.867 - 6.249 \times h$$

次 序	实测挠度 $h(i)$ (cm)	实测载荷 $F(i)$ (kg)	计算载荷 $f(i) = a + b \times h$ (kg)	绝对误差 $F(i) - f(i)$ (kg)	百分误差 $(F(i) - f(i)) / F(i)$ (%)
(1)	97.7	56	55.3	0.699	1.249
(2)	88	116	115.919	0.08	0.069
(3)	81.6	156	155.915	0.084	0.053
(4)	71.8	216	217.16	-1.161	-0.538
(5)	65.5	256	256.531	-0.532	-0.208
(6)	55.9	316	316.525	-0.526	-0.167
(7)	48.2	366	364.646	1.353	0.369
最大值				1.353	1.249

从表 2 可见，拟合效果还是比较理想的，最大绝对误差和最大百分误差分别为 1.35kg 和 1.249%。用同样的方法，我们对支点为 4、5、6、7、8、9 时的实测数据分别进行了计算。结果表明，取上述所有支点位置时的拟合方程的拟合效果基本上都是理想的，最大百分误差为 6.607%。这说明测定前我们做的定性分析是正确的，即板尖挠度与载荷成线性关系。

在训练和比赛中，运动员有时并不是正好选择支点为整数的支点位置，而是将支点设在两整数之间，即 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 的位置上。显然，在这些情况下的定量关系也是需要的。根据前面的分析和计算，可以认为挠度与

载荷成线性关系的特性不随支点位置的不同有所改变。如果能得到取上述支点位置时各级载荷所对应的挠度值, 则用已有的方法即可求得相应的拟合方程。为此, 我们首先考虑改变支点位置对挠度的影响。结果发现, 各级载荷情况下, 从板尖挠度和极尖到支点的板长为座标绘出的曲线都接近为直线。对载荷为 56kg 时的数据进行最小二乘线性拟合, 并在支点为 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 和 8.5 处进行插值, 最后得出表 3 中的数据。从表 3 可以看出, 线性拟合效果比较好, 因此可以用同样的方法对其它几级载荷进行拟合和插值, 表 4 中列出了相应的拟合方程和数据。

表 3 载荷 56kg 时板尖挠度和板长的拟合方程及数据

$$h = a + b \times l \quad a = 125.333 \quad b = -0.096 \quad h = 125.333 - 0.096 \times l$$

支点指针	板长 $L(i)$ (cm)	实测挠度 $H(i)$ (cm)	计算挠度 $h = a + b \times l$ (cm)	绝对误差 $H(i) - h(i)$ (cm)	百分误差 $[H(i) - h(i)] / H(i)$ (%)
3	283.5	97.7	98.001	-0.302	-0.309
3.5	287.6		97.600		
4	291.7	97.5	97.210	0.289	0.296
4.5	294.9		96.900		
5	298.0	96.7	96.603	0.096	0.099
5.5	301.6		96.250		
6	305.2	95.9	95.909	-0.010	-0.010
6.5	308.8		95.560		
7	312.4	95.3	95.215	0.084	0.089
7.5	316.1		94.860		
8	319.7	94.4	94.511	-0.112	-0.118
8.5	322.1		94.270		
9	324.5	94.0	94.048	-0.049	-0.052
最大值				-0.302	-0.309

将用表 4 中所有方程插值得到的支点指针为 3.5 时的板尖挠度与载荷进行最小二乘线性拟合, 得到表 5 中的数据。