

11-20-2019

## No-collision Curling Trajectory Simulation System

Tian Yu

*1. Shenyang Sport University, Shenyang 110102, China;;3. School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;*

Xu Ming

*2. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## No-collision Curling Trajectory Simulation System

### Abstract

**Abstract:** In just a few decades, China's curling accomplished splendid work. But it's scientific research falling behind a lot. Applying computer simulation technology in sports training can effectively help the athletes to understand the problems that exist in the training. When curling stone slides on the ice, it can be regarded as two-dimensional motion of rigid body, which can be decomposed into two parts: translation of the center of mass and rotation of a fixed axis around the center of mass. *Using computer simulation technology to simulate the curling trajectory, and with the help of this system, the athletes can clearly understand how to throw a certain one, by how much of the beginning of horizontal velocity, angular spin rate and the start and ending time of brush the surface of ice during the slide.*

### Keywords

curling, trajectory, no-collision, simulation

### Recommended Citation

Tian Yu, Xu Ming. No-collision Curling Trajectory Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 494-501.

## 无碰撞冰壶运动轨迹仿真系统的研制

田雨<sup>1,3</sup>, 许明<sup>2</sup>

(1. 沈阳体育学院, 辽宁 沈阳 110102; 2. 清华大学信息技术研究院, 北京 100084; 3. 北京邮电大学计算机学院, 北京 100876)

**摘要:** 中国冰壶在短短几十年中取得了斐然的成绩, 但与之相对应的科学研究却相对落后。将计算机仿真技术应用于体育训练中可以有效地帮助运动员了解训练中存在的问题。冰壶在冰面上滑行可以视为刚体的平面运动, 可分解为质心的平动和绕过质心的定轴旋转两部分。运用计算机仿真技术模拟冰壶的运动轨迹, 通过设置初速度、角速度和刷冰起止时间绘制出冰壶滑行轨迹。通过该系统可以帮助运动员分析投掷冰壶时应施以冰壶水平初速度、旋转角速度, 冰壶滑行时刷冰的起止时间对冰壶滑行轨迹的影响。

**关键词:** 冰壶; 轨迹; 无碰撞; 仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2019)03-0494-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17WJP-008

## No-collision Curling Trajectory Simulation System

Tian Yu<sup>1,3</sup>, Xu Ming<sup>2</sup>

(1. Shenyang Sport University, Shenyang 110102, China; 2. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

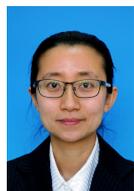
**Abstract:** In just a few decades, China's curling accomplished splendid work. But it's scientific research falling behind a lot. Applying computer simulation technology in sports training can effectively help the athletes to understand the problems that exist in the training. When curling stone slides on the ice, it can be regarded as two-dimensional motion of rigid body, which can be decomposed into two parts: translation of the center of mass and rotation of a fixed axis around the center of mass. Using computer simulation technology to simulate the curling trajectory, and with the help of this system, the athletes can clearly understand how to throw a certain one, by how much of the beginning of horizontal velocity, angular spin rate and the start and ending time of brush the surface of ice during the slide.

**Keywords:** curling; trajectory; no-collision; simulation

## 引言

马来西亚吉隆坡于 2015-07-31 举行的国际奥委会第 128 次全会上, 经过投票北京获得 2022 年冬奥会的举办权。相对于夏季运动, 我国的冬季运

动基础薄弱、实力有限, 但是发展已经初具规模, 部分项目已具备较高运动水平和国际竞争力。从 1980 年普莱西德湖第 13 届冬奥会到今天, 我国共获得金牌 12 枚、银牌 22 枚, 铜牌 19 枚。从 2002 年盐湖城冬奥会, 中国短道速滑选手杨扬为中国冰雪军团赢得第一枚奥运金牌, 实现冬奥会金牌“零的突破”开始, 到都灵冬奥会韩晓鹏获得男子自由式滑雪空中技巧项目金牌, 成为中国奥运雪上项目加冕第一人, 再到 2010 年温哥华冬奥会中国军团



收稿日期: 2016-07-26 修回日期: 2017-01-04;  
基金项目: 沈阳体育学院青年基金(SK2015049);  
作者简介: 田雨(1982-), 女, 辽宁沈阳, 博士生, 讲师, 研究方向为体育仿真等; 许明(1980-), 男, 辽宁沈阳, 博士, 助理研究员, 研究方向为系统仿真等。

<http://www.china-simulation.com>

取得 5 金 2 银 4 铜的傲人战绩, 创造了单届冬奥会中国代表团最佳成绩。2008 年在世界冰壶锦标赛上, 中国女子冰壶队和男子冰壶队分别获得第二名和第四名的好成绩, 得益于中央电视台体育频道的全程转播, 中国人再一次通过银幕认识了一项新的冬季运动项目。次年中国女子冰壶队更是夺得了冰壶世界锦标赛的金牌, 这也是我国第一个冬季集体竞技项目的世锦赛金牌。随着新闻媒体对于该项目报道的增加, 冰壶运动开始被越来越多的人熟知。

从陌生到了解再到熟悉, 中国冰壶仅仅用了十几年的时间。虽然中国冰壶队的成绩十分令人欣喜, 但中国冰壶运动的整体水平却不十分乐观。2012 年世界女子冰壶世锦赛上, 中国女队以三胜八负的成绩位居第十一位。匮乏的运动场地、昂贵的运动器材、有限的教练员水平、严重不足的后备人才和滞后的科学研究等因素都制约了中国冰壶运动的良性发展。借助 2022 年北京冬奥会的东风, 我国冬季运动项目迎来了新的春天。各项比赛场地和场馆的建设, 为该项运动的发展提供了充足的运动场地, 国家和各级政府的地方投入为冬季项目发展注入了大量的资金, 普通民众高涨的参与热情为冬季项目的开展提供了广泛的群众基础。作为科研工作者, 也应积极将最先进的科学技术融入到每个冬季运动项目中, 以帮助教练员和运动员更加科学的从事这些运动。

体育系统仿真就是通过计算机模拟技术再现体育教师的教学经验、教练员的训练意图、管理者的组织方案和运动员的训练过程, 从而达到对体育系统的解释、分析、预测、评价的一种实验技术科。近些年来, 体育系统仿真中应的研究热点主要有可视化仿真、多媒体仿真、基于 VR(虚拟现实)的仿真和智能化的仿真等, 这其中基于 VR 的仿真可谓是热点中的热点。但由于竞技体育训练对 VR 系统各项性能指标的要求比较高, 加之受虚拟现实软件、硬件技术等条件的限制, 制约了 VR 技术在竞技体育仿真训练领域的应用和推广。故此现阶段竞技体育中的系统仿真还多集中在可视化的仿真阶

段。如 Cooke 对羽毛球运行轨迹模拟<sup>[1]</sup>; Joydeep 对保龄球运动轨迹的仿真<sup>[2]</sup>; 三维可视化系统对运动姿态的模拟<sup>[3]</sup>; 在国际体育工程杂志和国际体育工程学学术会议上还有许多类似的研究: 利用计算机模拟检验高尔夫球运行轨迹, 模拟帆船和赛艇的比赛航行, 滑雪板力学特性和雪上效果的模拟等等。国内有王奇志等对乒乓球轨迹预测的研究与仿真<sup>[4]</sup>; 张晶华对羽毛球飞行运动模型的仿真<sup>[5]</sup>; 李艳波、杨宏伟对网球的运动轨迹进行仿真<sup>[6-7]</sup>; 张典华等对篮球的运动轨迹的仿真<sup>[8]</sup>等。国外对于冰壶项目的研究已经非常成熟, 而我国在冰壶方面的研究略显不足, 仅有的研究方向主要集中在体育人文方面, 这还远远不够。

本研究对冰壶的运动轨迹进行分析, 分别就冰壶任意滑行轨迹、刷冰轨迹两个方面进行运动分析, 建立运动学方程使其可以较真实的模拟出冰壶的运动轨迹, 并以直观图像展示出不同初速度、角速度、刷冰等情况下对冰壶运动轨迹的影响, 以期能找出投壶质量的关键因素, 从而指导冰壶运动训练。

## 1 冰壶项目简介

冰壶运动是一项传统的、古老的运动, 迄今为止有约 500 年的历史。最早起源于欧洲, 随着欧洲殖民者传入北美, 进而被传入世界其他大洲。冰壶比赛时, 两队 4 名球员交替掷壶, 一名队员掷壶时, 另外两名球员持毛刷在冰壶滑行的前方快速擦冰面以使冰壶能准确到达指定位置。投壶前投壶手一只脚的前脚掌置于起滑器上, 反方向的手持壶握住壶柄, 将冰壶向后牵拉至起滑器前, 对准投掷目标。开始投壶运动员用力后蹬起滑器, 持壶手向前引壶。滑行阶段上身持续前倾保持平衡, 持壶手送壶前探。在滑行的过程中, 运动员根据战术需求逐渐的调整滑行路线, 逐渐向出手动作过渡。出手时运动员依靠手腕给予冰壶中轴其回转力, 逐渐完成整个投壶动作。在冰壶滑行的过程中, 两名队友持刷, 通过刷冰改变冰面的物理状况, 已达到延长冰壶滑

行距离和增大或减小偏移角度的需要。由此可以看出冰壶属于对技、战术要求较高的集体性运动项目,该项目在比赛中虽然对体能没有过高要求,但要求参赛者实时对冰壶的运行路线进行计算和设计,这些特点都非常适合中国人,因为我国运动员在从事技巧性竞技项目上有较高天赋,由此可以推断出冰壶这项运动十分适合中国人。

冰壶比赛场的标准地长 44.5 m,宽 4.32 m,场地周围设有 2 英寸高、4 英寸宽的黑色橡胶围护墙。场地两端由四个半径分别为 0.15 m、0.61 m、1.22 m 以及 1.83 m 的同心圆组成,称为大本营或营垒。外面的两圆之间涂为蓝色,里面的两圆之间涂为红色。在场地两端各装有一个斜面橡胶起蹬器,运动员由这里开始投掷冰壶。在冰壶场地前后两端各有一条蓝色的实线称为“前卫线”和“后卫线”。冰壶掷出后,如果未进前卫线或越过后卫线都视作无效,将被清出场外。当双方队员掷完所有冰壶后,以场地上冰壶距离营垒圆心的远近决定胜负,每石 1 分,积分多的队为胜<sup>[9]</sup>。

比赛中用的冰壶是由苏格兰特有的一种石头打磨而成的,壶身表面圆滑呈圆壶状,顶部安有壶柄。壶身直径 29.19 cm,高 11.43 cm,重 19.96 kg。冰壶的底部是弯曲且中空的凹陷面,其与冰面的接触面是一个直径为约为 12.5 cm 的环状薄面,宽度仅 3~6 mm。冰壶比赛最为特殊的冰面,与其他冰上运动光滑的冰面不同,冰壶比赛场地的冰面是在光滑的冰面上,由专业制冰师用喷洒器向冰面均匀地喷洒水珠,以使冰面形成带有露状小颗粒的麻面。这样做的目的是减少冰壶与冰面的摩擦,让冰壶可以滑行更远的距离。特殊的冰面和薄环状接触面,使得该项运动时时刻刻都充满了智慧的较量,具有非常高的观赏性。

## 2 冰壶运行轨迹分析

从科学的视角下,冰壶是一项关于摩擦的运动。冰壶与冰面、刷子与冰场、甚至运动员脚上的鞋子,都使得这项运动得以存在。冰壶运动员一只

脚上的鞋与冰面的摩擦系数小,而另一只脚上的鞋与冰面的摩擦系数大,这样两只鞋的配合可以给运动员一个滑行的动力。整个运动的中心就是围绕如何提升或降低摩擦而让自己有利。

通过观察比赛视频发现,冰壶运动员投壶时通过后蹬的力量将自己的身体和手中的冰壶同时向前,这样就保证了冰壶的初始动能的获得。在滑行的过程中运动员会紧盯着目标位置,做出细微的调整。在冰壶出手的瞬间,运动员在向前送出冰壶的同时,会施以一定的旋转角度。这样的投壶动作使得每个投出的冰壶都具有一定的水平初速度外和一定初始角速度。在冰湖的滑行过程中同组的两名队员会依据冰壶的速度,在冰面上刷冰帮冰壶修正运动轨迹。

由此无碰撞发生的冰壶的运动轨迹按时间上可以分为 3 个阶段:第一阶段自由滑行,该阶段的特点是冰壶滑行速度较快,但旋转较慢,运行轨迹近乎于直线;第二阶段刷冰,该阶段冰壶在刷过的冰面滑行,滑行速度较没有刷过的冰面速度快,而且旋转更加缓慢,运行轨迹更加笔直,但通过刷冰可以修改冰壶的滑行方向;第三阶段自由滑行冲向营垒,这阶段冰壶的速度明显降低,但旋转速度提升,这阶段的运行轨迹出现明显的偏转。

有研究证明在一个光滑的冰面上,几乎没有弯曲发生。而在一个干燥的表面上,摩擦系数恒定的情况下,冰壶的运动偏移方向刚好与冰面上相反。冰壶在冰面上特殊的运行轨迹得益于冰壶底部的凹陷、运动员的刷冰和冰面特殊的小冰晶。关于冰壶、冰面和冰刷之间的摩擦对于这项运动的影响一直是科学家们争论的热点,Marmo 等<sup>[10]</sup>认为冰壶在冰面上滑行时,刷冰动作会使得冰面升温,使冰融化成水,形成的薄水层起到润滑的作用,降低了摩擦系数。Denny<sup>[11]</sup>则认为薄水润滑层不可能支撑冰壶,因为冰面上布满了小冰粒,冰壶不可能与薄水层直接基础。Shegelski<sup>[12]</sup>则认为由于冰壶在有突起冰晶的冰面滑过,每个凸起会接受更多的压力,压力使冰面融化形成润滑层更加容易<sup>[13]</sup>。

对于运行轨迹的弯曲本文认为是由于冰壶在整个的滑行过程中, 受惯性的作用重心前倾, 冰壶底面接触圆环前半部分(下面简称前环, 后半部分简称后环)将会在压力的作用下压碎一些冰粒产生冰屑, 部分冰屑会吸附在冰壶的壶身上随着冰壶继续向前滑行, 同时由于运动摩擦而产生的温度会让冰面上的冰粒和冰屑溶化, 这样在第一阶段时前环作用形成的润滑层会作用于后环, 所以这个阶段前环和粗糙的冰面相接触, 后环和较光滑的冰面相接触, 形成滑行速度快, 旋转较慢的特点。到达第二阶段时, 队友持刷在冰面上刷冰, 其作用既可以将原有的细小的冰屑从现有位置上清除, 又可以将冰面上的冰粒表面打磨光滑, 同时快速反复运动的刷冰配以运动员身体自身的体温会将周围温度的冰面融化冰屑和冰粒, 形成薄的润滑层和较光滑的冰面, 这个阶段冰壶前环和后环都和光滑的冰面相接触所以该阶段的冰壶会运动轨迹笔直, 没有明显旋转的原因。第三阶段冰壶的速度逐渐降低, 低速滑行而溶化的冰屑和冰粒所形成的一层非常薄的液体薄膜, 这个液体薄膜会在冰壶和冰面之间产生一种粘滞力, 这种粘滞力会随着速度的降低而逐渐增大。而且液体会在旋转的作用下被带到后环, 故此合力偏移, 所以该阶段直线速度明显下降、偏移轨迹明显而且旋转加剧<sup>[14]</sup>。

### 3 运动方程

通过以上对冰壶运动轨迹的分析, 在没有碰撞发生的冰壶的运动可以分为平动和转动两部分, 所以可以运用刚体运动力学的相关原理对冰壶运行轨迹进行分析, 本文则选取逆时针旋转的冰壶作为研究对象, 构建运动方程。

#### 3.1 平动方程

以冰壶初始速度  $v_0$  的方向为  $x$  轴, 垂直于  $y$  轴平行于冰面的方向为  $x$  轴建立直角坐标系。初始时  $x=y=0$ , 初始速度可以分解为  $v_x=0$ ,  $v_y=v_{y0}$ , 此时的角速度  $\omega=\omega_0$ 。

图 1 中冰壶在滑行时随机选取冰壶底环上的任意一点 A, 对其进行受力分析, 如图 1 所示。 $\omega$  为此时 A 点上的旋转角速度,  $\theta$  是 A 点与轴的夹角, 则此时 A 点处的速度可以表示为

$$v(\theta) = (v_x - \omega R \sin \theta)i + (v_y + \omega R \cos \theta)j \quad (1)$$

该点上所受到的摩擦力为

$$f_a = -\mu F_a(\theta)e_v \quad (2)$$

式中:  $F_a(\theta)$  表示 A 点上受力之和,  $e_v$  表示 A 点速度  $v(\theta)$  的单位向量。

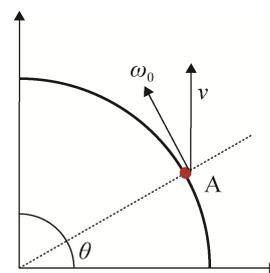


图 1 冰壶底面圆环任意一点 A 的速度情况

Fig. 1 A point speed, which represents the random point on the curling bottom race

在不同的阶段  $\mu$  的取值不同, 第一阶段前环为粗糙冰面的摩擦系数  $\mu_r$ , 后环为较光滑冰面的摩擦系数  $\mu_h$ 。

第一阶段冰壶底前环某一点受到的摩擦力可以表示成:

$$f_f(\theta) = -\mu_r mg \frac{d\theta}{2\pi} e_v \quad (3)$$

而冰壶底后环的某一点受到摩擦力可以表示成:

$$f_b(\theta) = -\mu_h mg \frac{d\theta}{2\pi} e_v \quad (4)$$

故此第一阶段整个冰壶在任意时刻所受到的力的总和为:

$$\begin{aligned} F &= \sum f = \int_0^\pi f_f(\theta) d\theta + \int_\pi^{2\pi} f_b(\theta) d\theta = \\ &= \int_0^\pi -\mu_r mg \frac{d\theta}{2\pi} e_v d\theta + \int_\pi^{2\pi} -\mu_h mg \frac{d\theta}{2\pi} e_v d\theta = \\ &= ma_x i + ma_y j \end{aligned} \quad (5)$$

则

$$v_x(t) = v_{x_0}(t) + \int_0^t a_x(t) dt = \int_0^t a_x(t) dt \quad (6)$$

$$v_y(t) = v_{y_0}(t) + \int_0^t a_y(t)dt \quad (7)$$

那么

$$x(t) = x_0 + \int_0^t v_x(t)dt \quad (8)$$

$$y(t) = y_0 + \int_0^t v_y(t)dt \quad (9)$$

第二阶段光滑冰面的摩擦系数  $\mu_s$  较第一阶段前环粗糙冰面的摩擦系数  $\mu_r$  和后环较光滑冰面的摩擦系数  $\mu_h$  小,  $\mu_r > \mu_h > \mu_s$ , 过查阅资料  $\mu_r$  大小为 0.0127,  $\mu_h$  为 0.0116,  $\mu_s$  为 0.01<sup>[15]</sup>。

设第二阶段的起始时刻为  $t_b$ , 终止时间  $t_e$ 。若此刻 A 点的角速度为  $\omega_b$ , 偏移角度为  $\theta_s$ , 则此时 A 点处的速度则变为

$$v'(\theta) = (v'_x - \omega_s R \sin \theta)i + (v'_y + \omega_s R \cos \theta)j \quad (10)$$

该点上所受到的摩擦力变为:

$$f'_a(\theta) = -\mu_s F(\theta)e_v \quad (11)$$

这个阶段的冰壶底部前环和后环所受到的摩擦力则应表示为:

$$f'_s(\theta) = -\mu_s mg \frac{d\theta}{2\pi} e_v \quad (12)$$

则第二阶段的的速度为:

$$v'_{x'}(t) = v_{x'}(t) + \int_{t_b}^{t_e} a'_{x'}(t)dt \quad (13)$$

$$v'_{y'}(t) = v_{y'}(t) + \int_{t_b}^{t_e} a'_{y'}(t)dt \quad (14)$$

此刻整个冰壶底部圆环的受力总和变为:

$$F' = \sum f' = \int_0^{2\pi} f'_s(\theta)d\theta = ma'_{x'}i + ma'_{y'}j \quad (15)$$

则

$$v'_{x_b}(t) = v_{x_b}(t) + \int_{t_b}^{t_e} a'_{x_b}(t)dt \quad (16)$$

$$v'_{y_b}(t) = v_{y_b}(t) + \int_{t_b}^{t_e} a'_{y_b}(t)dt \quad (17)$$

那么

$$x(t) = x'_0 + \int_{t_b}^{t_e} v'_{x_b}(t)dt \quad (18)$$

$$y(t) = y'_0 + \int_{t_b}^{t_e} v'_{y_b}(t)dt \quad (19)$$

$x'_0$  和  $y'_0$  分别代表表示第一阶段结束时, 冰壶所在位置。

通过视频观察发现第三阶段冰壶的速度慢下来的同时, 旋转增加。旋转速度越快粘滞力越小,

旋转速度越慢粘滞力越大。故第三阶段的粘滞力可以表示成

$$F_n = k[v(\theta)]^{-n} \quad (20)$$

通过之前的研究可以知道:  $k=0.008$ ,  $n=1/2$ 。

故此第三阶段整个冰壶在任意时刻所受到的力的总和为

$$F = \sum f + F_n = ma \quad (21)$$

且由于第三阶段的冰壶滑行速度较慢, 旋转速度较高。

### 3.2 转动方程

由于圆环周围点的受力不同, 作用于圆心产生不同的力矩使得冰壶旋转, 在第一阶段, 时刻  $t$  受到转动力矩:

$$\begin{aligned} \sum M &= \sum_f M + \sum_b M = \int_0^\pi f_f(\theta) \times r + \\ &\int_\pi^{2\pi} f_b(\theta) \times r = \int_0^\pi -\mu_r mg \frac{d\theta}{2\pi} e_v d\theta \times r + \\ &\int_\pi^{2\pi} -\mu_h mg \frac{d\theta}{2\pi} e_v d\theta \times r = J\alpha \end{aligned} \quad (22)$$

$J$  是冰壶的转动惯量,  $\alpha$  是时刻  $t$  的瞬时角加速度, 若初始旋转角速度为  $\omega_0$ , 则第一阶段角速度的变化可以表示成:

$$\omega(t) = \omega_0 + \int_0^t \alpha dt \quad (23)$$

第二阶段的由于前后环所接触的冰面相对一致, 则该阶段时刻  $t'$  受到的转动力矩变为:

$$\omega'(t) = \omega_b + \int_{t_b}^{t_e} \alpha(t)dt \quad (24)$$

第三阶段由于速度的降低加速了冰壶的旋转和运动轨迹的偏移。这个阶段的前环和后环所受到的摩擦力不同, 由于这个阶段的冰壶旋转的速度加快了, 故此会有更多的底环接触粗糙的冰面, 而只有少部分的底环接触光滑的冰面。这样冰壶底环粗糙与光滑的范围随着水平速度和旋转速度的变化而发生改变。在本模型中假设有 3/4 的底环接触到的是粗糙的冰面, 而另外 1/4 底环接触到的是光滑的冰面。故此第三阶段的时刻  $t$  的受到的转动力矩变为:

$$\begin{aligned} \sum M &= \sum_f M + \sum_b M = \int_0^{3\pi} f_f(\theta) \times r + \\ &\int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} f_b(\theta) \times r = \int_0^{\frac{3\pi}{2}} -\mu_r mg \frac{d\theta}{2\pi} e_v d\theta \times r + \\ &\int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} -\mu_h mg \frac{d\theta}{2\pi} e_v d\theta \times r = J\alpha \end{aligned} \quad (25)$$

## 4 仿真系统设计

该仿真系统主要向运动员和教练员展现, 在没有碰撞发生时的冰壶运动轨迹, 这样可以帮助运动员和教练员找寻投壶手训练中的投壶动作的有效性以及刷冰手刷冰时间对于冰壶轨迹的影响。

### 4.1 仿真系统地结构

冰壶运动轨迹仿真系统由 3 部分组成, 如图 2 所示。在该系统中, 使用者可以先以投壶手的角度对投壶时的水平初速度和初始角速度, 两个基础参数进行设置。其次, 再以刷冰手的角度, 对刷冰的起始时间和终止时间进行设置。第三步动画演示, 演示动画中可以分别展示自由滑行和刷冰后的运行轨迹, 同时对比两种情况的运动轨迹的差别。



图 2 仿真系统结构图

Fig. 2 Structure of simulation system

### 4.2 仿真系统的功能

为了能更加直观的向运动员和教练员展示冰壶的运动轨迹, 系统应呈现更加直观的可视化。为此本仿真系统采用 Visual C++ 结合 Matlab 的方式进行设计开发。因为 Visual C++ 具有良好的交互性和跨平台性, 而 Matlab 的优势是强大的数据处理能力和仿真能力。仿真系统界操作面如图 3 所示。

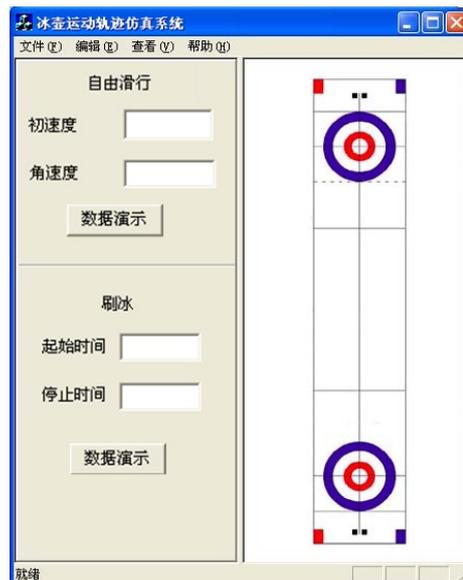


图 3 仿真系统操作界面

Fig. 3 Interface of simulation system

在窗口左侧的对话框中输入冰壶水平初始速度及初始角速度, 系统默认的水平初速度  $v_0$  为 3 m/s, 角速度  $\omega_0$  为  $(2\pi/3)$ /s。单击“数据演示”按钮, 在窗口的右侧可以绘制出相应的运行轨迹。

使用刷冰模块时需输入刷冰的起止时间, 时间应设置在合理的范围内, 再点击“数据演示”按钮, 便可以绘制出刷冰后的冰壶运行轨迹。系统默认的刷冰起始时间为 10 s, 终止时间为 20 s。

## 5 实验数据

为了验证系统模型的有效性, 通过获取到的一些冰壶运动中的关键数据, 包括水平初速度、初始角速度和刷冰的时间。

### 5.1 模拟条件设置

实验一水平初速度 2 m/s, 初始角速度  $(2\pi/3)$ /s; 实验二水平初速度 3 m/s, 初始角速度  $(2\pi/3)$ /s; 实验三水平初速度 3 m/s, 初始角速度  $\pi$ /s。实验四水平初速度 3 m/s, 初始角速度  $(2\pi/3)$ /s, 刷冰的起始时间为 5 s, 结束时间为 15 s。

### 5.2 模拟结果

在系统中输入实验一、二、三、四中设定的基

基础参数,图4所示的为系统实验的动画演示。图中:a为实验一的冰壶运动轨迹,b为实验二的冰壶运动轨迹,c为实验三的冰壶运动轨迹,d为实验四的冰壶运动轨迹;其中虚线是自由滑行轨迹,实线为有刷冰的滑行轨迹。

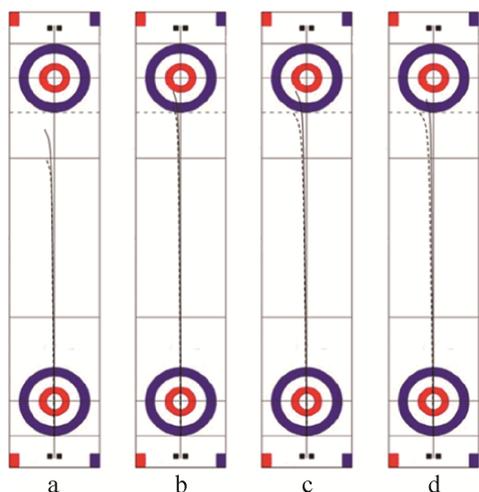


图4 冰壶运动轨迹

Fig. 4 Figure a shows curling track

### 5.3 分析与讨论

1) 模拟实验表明冰壶的水平初速度对冰壶的滑行距离有较大的影响。实验一中设置的水平初速度为2 m/s时,如果不刷冰冰壶将无法到达后卫线,那就是无效壶,而在刷冰后可以到达后卫线,成为有效壶。而水平初速度为3 m/s时,在初始角速度为 $\frac{2\pi}{3}$ /s时,可以到的大本营。

2) 模拟实验表明冰壶的初始角速度对冰壶的滑行轨迹的偏移有较大的影响。以逆时针旋转为例,初始角速度越大越向左偏移。

3) 模拟实验表明刷冰对冰壶的滑行距离和滑行轨迹的弯曲都有较大的影响。刷冰可以有效地延长冰壶的滑行距离,同时延迟了冰壶轨迹的弯曲。

## 6 结论

将计算机仿真技术应用于体育训练中成功案例颇丰,本研究将计算机仿真技术应用于冰壶运动轨迹的模拟,通过设置初速度、角速度和刷冰起止

时间,绘制出冰壶滑行轨迹。

1) 以理论力学为依据,运用计算机仿真技术,建立此冰壶运动轨迹仿真系统,使其具备显示冰壶滑行的模拟场景的能力,为研究分析冰壶运动中多种重要因素对冰壶滑行轨迹的影响提供了省时省力的有效途径。

2) 模拟实验表明水平初速度和初始角速度对冰壶滑行有较大的影响。在其他条件相同的情况下,水平初速度越大,冰壶滑行的距离就越远;角速度越大,冰壶滑行的轨迹偏离更加明显。投占位壶时,投壶手应将壶投到营垒前干扰对手的壶;在清除占位壶时,投壶手需要施以冰壶较大的水平初速度和较小的旋转角速度。

3) 冰壶运行轨迹仿真系统是体育学与理论力学以及计算机仿真学交互相融合的结果,它将为提高有效掷壶水平开辟新的途径,同时也为进一步从事冰壶其他的研究奠定基础。

4) 但现有的系统模型绘制出的冰壶运行轨迹和真实情况还有偏差,这是因为冰壶场地的冰面每一寸都是不同的,所以任何一个忽略了冰面的变化的模型,都是不准确的。今后的工作应将冰面的变化也考虑其中,需要记录整个冰面上在哪些位置有运动员经过,哪些位置有冰壶经过,这样会得到更加准确的仿真模型。

### 参考文献:

- [1] A Cooke. Computer simulation of shuttlecock trajectories[J]. Journal of Sports Engineering (S1460-2687), 2002, 5(2): 93-105.
- [2] Joydeep Banerjee, John McPhee. A volumetric contact model to study the effect of lane friction and the radii of gyration on the "hook shot" in indoor bowling[J]. Procedia Engineering (S1877-7058), 2014, 72: 429-434.
- [3] 孔祥魁. 运动图像序列中关键关节点的跟踪优化仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(2): 423-426.  
KONG Xiang-kui. Key key Points in Motion Image Sequence Tracking Simulation Optimization[J]. Computer Simulation, 2016, 33(2): 423-426.
- [4] 王奇志, 杨晓晓. 乒乓球轨迹预测的研究与仿真[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(2): 164-168.

- WANG Qizhi, YANG Xiaoxiao. Simulation of trajectory prediction of ping-pong[J]. Computer Engineering and Science, 2013, 35(2): 164-168.
- [5] 张晶华, 汪仁煌, 岳洪伟. 四个坐标系下羽毛球飞行运动学模型与仿真[J]. 自动化与信息工程, 2013, 34(1): 6-10.  
Zhang Jinghua, Wang Renhuang, Yue Hongwei. Flight Kinematics Modeling and Simulation of Shuttlecock Badminton Based on Four-Coordinate Systems[J]. Automation & Information Engineering, 2013, 34(1): 6-10.
- [6] 李艳波. 网球比赛仿真系统的研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.  
Li Yanbo. Research and implementation of tennis competition simulation system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [7] 杨宏伟, 张云. 基于网球与台面相互作用的虚拟实验仿真[J]. 实验技术与管理, 2006, 23(4): 71-73.  
YANG Hongwei, ZHANG Yun. Experimental Simulation Based on the Reciprocity of Tennis Ball and Oscillatory Table board[J]. Experimental Technology and Management, 2006, 23(4): 71-73.
- [8] 张典华, 陈一民. 多平台三维篮球运动仿真系统的设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(10): 3568-3573.  
ZHANG Dianhua, CHEN Yimin. Design and implementation of multi-platform 3D basketball motion simulation system[J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(10): 3568-3573.
- [9] World Curling Rederation. The Rules of Curling [EB/OL]. [2016-10-01]. <http://www.worldcurling.org/rules-and-regulations-downloads>.
- [10] Jensen E T, M R A Shegelski. The motion of curling rocks: experimental investigation and semi-phenomenological description[J]. Canadian Journal of Physics (S0008-4204), 2004, 82(10): 791-809.
- [11] Marmo A A, I S Farrow, M-P Buckingham, et al. Frictional heat generated by sweeping in curling and its effects on ice friction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of materials: Design and Applications (S1464-4207), 2006, 220(4): 189-197.
- [12] Denny M. Curling rock dynamics: towards a realistic model[J]. Canadian Journal of Physics (S0008-4204), 2002, 80(9): 1005-1014.
- [13] Shegelski M R A, M Reid, R Niebergall. The motion of rotating cylinders sliding on pebbled ice[J]. Canadian Journal of Physics (S0008-4204), 1999, 77(11): 847-862.
- [14] John L Bradley. The sports science of curling: A practical review[J]. Canadian Journal of Sports Science and Medicine (S1303-2968), 2009, 8(4): 495-500.
- [15] Ivanov A P. Fundamentals of the Theory of Systems with Friction[Z]. Russian: MoscowIzhevsk: RCD, 2011.