

竞速滑冰运动中摩擦力的动态影响、特征分析及优化策略研究

魏公博 赵明元* 杨涵麟 梁诗涵 司佳敏
哈尔滨体育学院, 黑龙江 哈尔滨 150000

[摘要]为进一步梳理竞速类滑冰运动中摩擦力的相关问题,通过文献研究等方法,探究摩擦力对运动员表现的影响、特征以及如何利用计算机技术进行方法优化。研究结果表明,摩擦力竞速类滑冰运动中对运动员表现产生影响,需要采取相应的优化方法来提高表现。首先,在竞速滑冰运动中,摩擦力主要来自于滑冰鞋与冰面的接触。在冰刀与冰面作用中,通过水膜效用减少摩擦阻力。冰刀与冰面之间产生水膜效应的主要原因由压力融化理论转变为摩擦融化理论。其次,摩擦力在竞速类滑冰运动中作用特征主要体现为动态性,在侧蹬冰时,摩擦力是一种动力;而在自由滑行时,摩擦力则成为一种制动力,可以帮助运动员减速和控制速度或。最后,根据速滑中产生的摩擦力是速度和冰刀倾斜角度的函数,基于计算机模拟和数学模型,通过计算机技术优化滑冰刀口角度的算法可以优化摩擦力,进而可以提高竞速滑冰运动员的表现和竞争力。

[关键词]竞速滑冰; 摩擦力; 影响; 优化方法

DOI: 10.33142/jscs.v4i4.13562

中图分类号: G862

文献标识码: A

Research on the Dynamic Effects, Characteristics Analysis, and Optimization Strategies of Friction in Speed Skating

WEI Gongbo, ZHAO Mingyuan*, YANG Hanlin, LIANG Shihan, SI Jiamin
Harbin Sports University, Harbin, Heilongjiang, 150000, China

Abstract: In order to further clarify the relevant issues of friction in speed skating, this study explores the impact and characteristics of friction on athlete performance through literature research and other methods, as well as how to use computer technology for method optimization. The research results indicate that frictional force has an impact on the performance of athletes in speed skating, and corresponding optimization methods need to be adopted to improve performance. Firstly, in speed skating, friction mainly comes from the contact between the skating shoes and the ice surface. In the interaction between the ice blade and the ice surface, the friction resistance is reduced through the water film effect. The main reason for the water film effect between the ice blade and the ice surface has shifted from the pressure melting theory to the friction melting theory. Secondly, the characteristic of friction in speed skating is mainly reflected in its dynamic nature. When kicking on the side, friction is a driving force; During free gliding, friction becomes a braking force that can help athletes slow down and control speed. Finally, based on the fact that the frictional force generated in speed skating is a function of speed and the tilt angle of the ice skate, using computer simulation and mathematical models, the algorithm for optimizing the angle of the ice skate blade through computer technology can optimize frictional force, thereby improving the performance and competitiveness of speed skaters.

Keywords: speed skating; friction; influence; optimization method

引言

竞速滑冰是一项高速运动,运动员需要在冰面上滑行,并在尽可能短的时间内达到最高速度,主要包括速度滑冰与短道速滑。竞速滑冰以其独特的技术与体能要求、周期特性、环境敏感性、装备创新以及战术灵活性展现了其作为一项高度竞技性运动的特征。运动员的成功取决于他们在技术细节、体能储备、环境适应、装备选择以及战术智慧等方面的全面优化和精准执行过程。竞速滑冰是一项极其注重速度和时间的运动,摩擦力的大小和优化对于运动员的成绩有着至关重要的影响。竞速滑冰中,滑行周期(cycle)特征对速度至关重要。优秀运动员通常展现出更大的滑行周期长度,同时保持与较慢选手相似的周期频率。这意味着他们每周期能滑行更远的距离,从

而提高总体速度。摩擦力可以分为静摩擦力和动摩擦力,它们对运动员的速度有着不同的影响。在竞速类滑冰运动中,摩擦力是影响选手滑行速度的一个重要因素。因此,研究竞速类滑冰运动中的摩擦力可以帮助我们更好地理解该种类型运动的基本原理。此外,随着计算机技术在运动科学中的广泛应用,可以帮助我们更好地理解运动的基本原理,同时也可以为运动员训练和比赛提供方法优化策略。

基于以上分析,本文收集整理了摩擦力对竞速滑冰运动员速度影响特征,以及利用计算机技术研究速度滑冰中的摩擦力相关文献。旨在可以进一步明确竞速类滑冰运动中的摩擦力影响、特征及其优化方法,帮助选手提高滑行速度和比赛成绩,并为运动员提供更好的训练和比赛建议。

1 研究方法

本文采用的文本数据分为中文文献和英文文献,这些文献数据来源于中国高校常用的两个数据库,分别是中国知网(CNKI)和 Springer 数据库。本文使用关键词“计算机技术”“速度滑冰”“短道速滑”和“摩擦力”来进行检索。通过检索,本文获取了有关于“计算机技术”“速度滑冰”“短道速滑”和“摩擦力”的中英文文献,以便进行后续的分析研究。

2 研究结果

2.1 竞速滑冰中摩擦力的动态影响

2.1.1 竞速滑冰中摩擦力的动态影响

竞速类冰上项目包括短道速滑和速度滑冰两个项目,空气阻力和冰面摩擦力是运动员需要克服的主要阻力。滑冰的速度可以依靠运动员输出的能量与空气阻力和冰面摩擦力之间的平衡来提高。其中,冰面摩擦是指冰面上物体相互空气阻力是高速滑行时的主要阻力来源,运动员通常被教导保持尽可能水平的躯干姿态和最小化的膝角以降低风阻。

接触时,由于接触面之间的不平整度或者物体表面的微小凸起,导致在运动过程中相互抵抗的力。在研究竞速类滑冰运动的动力学问题时,必须考虑冰面摩擦所产生的影响。冰面摩擦研究是理解速度滑冰冰上运动性能的关键领域之一。为此,冰面摩擦研究包括以下五个系数指标:冰面摩擦系数、摩擦力生成机制、冰面特性与摩擦、动态测量与模型、摩擦力对性能影响。使用高速摄影和加速度计来记录物体在冰面上滑动时的速度和加速度变化,从而分析摩擦系数。以及通过改变施加在冰面上的压力,并测量相应的摩擦力,来分析压力变化对摩擦系数的影响。再使用落球法或其他方法来测量冰的硬度,因为冰的硬度是影响摩擦系数的关键因素。总的来说冰面摩擦研究涉及宏观的冰刀-冰面相互作用、微观的表面物理化学过程以及运动员技术、装备与环境因素的综合影响。通过深入研究和精准测量,有助于揭示冰面摩擦的内在机理,为优化冰上运动装备设计、提高运动表现提供科学依据。

研究显示,滑冰较低摩擦力源于冰面液态水薄膜,从现有文献研究结果来看,冰面类液态特性能够比较合理地解释速滑低摩擦力。冰刀在滑行过程中会形成微小的熔水层,其厚度与冰面摩擦系数之间存在非线性关系,适度的熔水层有助于降低摩擦,而过厚或过薄都可能导致摩擦力增加(Colbeck, 1992)。

在 19 世纪,Michael Faraday 首先通过实验观察到在冰面存在这种水膜。其后的一百年间,压力融化是关于冰刀与冰面之间水膜效应的经典解释理论。例如, Joly 和 Reynolds 长期引用 Michael Faraday 关于冰面之间形成的水膜起到了润滑作用的学说(Rosenberg, R., 2005)^[1]。研究指出速度滑冰面摩擦力的起始润滑现象。分析表

明,在冰鞋刀片与冰面接触的非常短的接触长度上,边界摩擦只起到非常小的作用,但其产生的热足以融化冰,使滑冰者能够在薄的一层熔水上平滑滑动。

但是,在竞速类滑冰运动中压力融化还不足以解释冰刀与水膜的关系。例如,人体重量作用到较薄冰刀刃刃上,将产生高压。根据压力导致温度变化公式

$$\frac{dT}{dp} = \frac{-\Delta V}{\Delta S} = 0.0074^{\circ}\text{C}/10^5\text{Nm}^{-2} \quad (1)$$

例如对于 75kg 体重的运动员,产生压力导致温度变化约为 1.1°C,但这不能使刀刃下部的冰面融化。运动员的体重与滑行速度和摩擦力有因果联系,较大的体重和较快速度会增大摩擦力,因此会增加冰刀对冰面的压力,从而改变冰刀接触面积和摩擦特性。虽然高压可以使冰面融化,但是运动员在冰面上产生的压力,仅仅可以使接触面温度升高 1°C 左右,这样温升不足以使较低冰面上温度升高冰面冰的熔点以上。压力融化只能发生在 -2~0°C 的温度范围内。因此,普遍认为,压熔理论在解释滑冰过程摩擦力减少的贡献比较少。

直到 Bowden and Hughes (1939)^[2]提出了摩擦加热替代压力融化的解释。滑冰时产生冰的表面与冰刀金属之间的摩擦力,摩擦力会转化为热,冰的表明的温度将升高,引起冰的融化。而冰的融化形成水膜,进一步减小摩擦力。根据摩擦产生功率公式计算:

$$P = \mu Nv \quad (2)$$

公式中, μ 为滑动摩擦系数, N 为正压力, v 为滑行速度。例如,当滑动摩擦系数为 0.005,压力为 750N,滑行速度为 10ms⁻¹ 时,产生 37.5W 的能量。这些能量可以产生的温升可通过以下计算公式来计算:

$$dT = \frac{0.31P}{ka} \sqrt{\frac{k}{rcva}} \quad (3)$$

在此公式中, a 为接触面半径, k 为热导率, r 为比热, c 为密度, v 为滑行速度。通过上式计算可知, $dT=7^{\circ}\text{C}$ 。这足以融化冰面,使之成为液态水。另外, Colbeck (1995)^[3]等实验结果显示,冰面摩擦系数随着冰刀下部温度的增加而减少。在实验中控制环境条件,如温度和湿度,以确保实验结果的准确性和可重复性。这些方法的结合使用,可以帮助研究者更全面地理解冰面摩擦力的物理机制,并为优化冰面运动性能提供科学依据。他认为摩擦生热是冰面形成类水膜,降低滑动摩擦系数起到主要作用。目前,研究结果显示摩擦生热熔化理论形成类水层理论被广泛接受(Van Dongen et al., 2021)^[4]。因此,冰刀在冰表面的滑动摩擦力主要是由产生的摩擦热和润滑类水膜的形成所决定的。温度对冰面摩擦力也呈显著影响趋势。研究发现低温下冰面摩擦力较大,而较高的温度下冰面摩擦力较小,此时由于冰面微熔现象产生润滑液膜,造成摩擦力

相应降低。同时，雪的温度也会影响雪晶体与冰刀表面的相互作用，进而影响滑行性能的发挥。

2.2 竞速滑冰中摩擦力的特征分析

竞速滑冰中，摩擦力作为决定运动员速度、能耗及整体表现的关键因素，它具有如下的一些特征：1 冰面摩擦与滑行技术密切相关 2 空气阻力的复杂性 3 冰面摩擦力的测定与分析 4 摩擦力对功率输出的影响 5 滑行阶段摩擦力特点 6 冰刀设计与摩擦。总之，竞速滑冰中摩擦力特征体现在其与运动员滑行技术、运动员体态、滑行速度及冰刀设计的密切关系上。研究发现新型 CT Edge 冰球鞋刀（具有不同角度的刀片）与传统刀片的摩擦特性。结果显示，新型刀片的摩擦系数比标准刀片低约 13%至 22%，且摩擦系数随负载增加而降低。通过精确测量和模型模拟，可以深入挖掘摩擦力对运动员功率输出、滑行速度及整体表现的影响，为训练方法、装备改良提供科学依据。在竞速类滑冰运动中，摩擦力的作用或影响具有动态性的特征。当运动员进行侧蹬冰时，摩擦力是一种动力，可以帮助他们加速。而在自由滑行时，摩擦力则成为一种制动力，可以帮助运动员减速和控制速度，也成为运动员必须克服的阻力（程国庆，1985）^[5]。

竞速类滑冰运动起跑阶段，冰面的摩擦力是需要克服重要的阻力因素。研究表明，在通常滑冰过程中冰刀与冰面的摩擦力在 2-10 牛顿之间，最大摩擦力出现在冰刀与冰面刚开始接触时和蹬冰的时候（李波，2003）^[6]。不同的滑冰姿势会影响冰鞋与冰面的接触方式，从而影响摩擦力。当滑跑速度达到最高阶段，或接近最高阶段，摩擦力保持相对稳定，而随着速度的提升，需要克服空气阻力开始加大。速度滑冰运动员需通过保持低重心的姿势、水平躯干姿态和缩小膝关节角度来最小化空气阻力和冰面摩擦。正确的滑行姿势能够显著降低阻力系数，提高滑行速度。根据研究实验测量实际速度滑冰过程中的冰面摩擦力，直道和弯道的摩擦系数略有不同，直道和弯道的平均摩擦系数分别为 0.0046 和 0.0059。并且，实根据现有验测试研究还发现摩擦系数随着速度的增加而增加（JJdeKoning, et al., 1992）^[7]。但是，滑行速度对冰面摩擦系数的影响，随着滑行速度的增加，冰面摩擦系数先减小而后在增大，在 15m/s 左右出现最小值，约为 0.004。但是，摩擦系数再增大的趋势不显著。

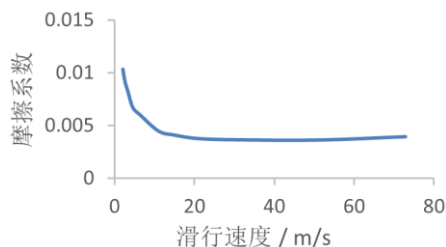


图 1 冰面摩擦系数图

另外，对于竞速类冰上项目而言，在滑冰过程中，冰刀是运动员与冰面之间的接触面，承受着运动员蹬冰力 F 和摩擦力 f 的共同作用。（米靖，2014）^[8]。具体来说，运动员通过蹬冰的方式将腿部肌肉的能量传递给冰刀，使其产生向后的推力，从而向前推进身体。也证实滑冰者如何使用腿部肌肉和脚踝来推进，这也会影响摩擦力。这个推力就是运动员蹬冰力 F ，它是通过冰刀与冰面之间的摩擦力来产生的。同时，冰刀在与冰面接触的过程中也会产生摩擦力 f ，这个摩擦力是由于冰刀和冰面之间存在微小的表面不平整而产生的。这个摩擦力 f 的作用是阻碍冰刀在冰面上的滑动，从而使得冰刀能够提供足够的支撑力，使得运动员能够保持稳定的姿势。因此，冰刀在滑冰过程中承受着运动员蹬冰力 F 和冰面摩擦力 f 的共同作用，这两种力的大小和方向都会影响着运动员的滑行速度和姿势的稳定性。因而，冰面的硬度也是重要的产生摩擦力的边界条件。为了在冰面上获得更大的动力，减少阻力，刀刃与冰面的相互作用至关重要。如果冰面过硬，会使得冰面非常光滑，通常物体在冰面上没有办法获得足够的侧向摩擦力，支撑不住，但因为刀刃在冰面上，可以插入到冰面之中，从而既可以获得一个竖直方向的支撑力，也可以获得水平方向的阻力。那么如何保证合适的硬度，根据冰面温度和冰面硬度之间呈现的反向线性关系表达式为： $\bar{p}_s = 3.76 - 0.18T$ 。因此可以通过冰面温度来控制。也就是说，冰温的影响冰面硬度，冰面硬度影响冰面摩擦力，而冰面的摩擦力也最终在滑行速度方面得以体现。

2.3 竞速滑冰中摩擦力的优化策略

在认识到了摩擦力在竞速类滑冰运动中的影响与作用特征之后，包括摩擦和冰层融化变形影响的分析模型研究也逐渐展开。使用计算机模拟来研究冰面上滑动的原子级光滑基板，分析不同温度下冰摩擦的原子行为。并且，随着计算机技术的发展，优化研究也得到了重要的技术支持。在竞速滑冰运动项目中，摩擦力优化是提高运动员速度、能量效率以及比赛成绩的核心问题，通过对冰面摩擦的研究中，再结合实验测量和仿真模型，给出多种科学的优化方法，并旨在帮助运动员在竞速滑冰时减少摩擦损失并增强运动的推进力。例如，提出速滑中产生的摩擦力是速度和冰刀倾斜角度的函数，在直行滑冰过程中摩擦力与速度关联性较小。通过实验测量不同运动表面上冰面摩擦系数，并分析其对运动员冲刺时间的影响。刀口角度越小，摩擦力越小，但是在转弯时需要较大的刀口角度以提供足够的支撑力。速度滑冰的冰刀与冰面接触的面积比较小，只在边缘产生垂直于冰面的反作用力，无法产生其他方向的力，为此冰刀边缘抵抗垂直于冰面的力，因为这些力的作用只会压缩冰刀下方的冰块。其中冰面摩擦主要由于冰刀与冰面间的剪切力和压力所引起，其中压力阻力占据主

导地位，而黏滞阻力相对小。因此，运动员需要根据比赛需要选择适当的刀口角度和形状。

优化滑冰刀口角度的算法可以基于计算机模拟和数学模型。以下是一种常用的滑冰刀口角度优化算法。

第一，建立模型。使用数学模型建立刀口角度与摩擦力之间的关系。模型基于物理学原理，考虑冰面和刀刃之间的摩擦和力学特性。

第二，确定参数。模型中的参数包括冰面和刀刃的几何特性、运动员的体重和速度等。这些参数可以通过测量和试验来确定，或者根据已知的数据进行估计。

第三，进行模拟。使用模型进行计算机模拟。在模拟过程中，可以调整刀口角度，并记录下不同角度下的摩擦力和速度数据。

第四，分析结果。分析模拟结果，找出最佳的刀口角度。可以通过计算机程序自动化分析，或者手动查看数据并确定最佳角度。

第五，验证实验。验证模拟结果，通过实验验证最佳刀口角度是否真的可以提高运动员的表现。

以上算法可以基于不同的数学模型和计算机软件进行实现，如有限元分析和计算流体力学等。这些方法可以帮助运动员和教练在优化刀口角度时更加准确和科学。

3 结论

综上所述，为了优化竞速滑冰运动表现，运动员需要注意减少静摩擦力和动摩擦力的影响。在刀口设计方面，应该采用抛物线式的设计，以减少静摩擦力。在滑行姿势和技术方面，应该采用高弓度的动作和有效的技术来减小动摩擦力。研究表明，冰面摩擦力和空气阻力是运动员在滑行过程中需要克服的主要阻力。通过优化摩擦力，可以显著提高运动员的滑行速度和比赛成绩。通过深入研究冰面摩擦力的生成机制，可以为运动员的训练和比赛提供科学依据。摩擦力在竞速滑冰运动中扮演着关键角色。通过科学的方法优化摩擦力，不仅可以提高运动员的滑行速度和比赛成绩，还可以为运动员的训练和比赛提供更科学、更系统的指导。未来的研究应继续关注摩擦力的优化方法，并探索其在不同条件下的变化规律，以进一步提升竞速滑冰运动的科学性和竞技水平。

基金项目：哈尔滨体育学院引进人才科研启动项目《国家文化记忆下北京冬奥遗产的数字化保护与民族共同体价值开显》（批准号 RC21-20224）。

【参考文献】

- [1]Rosenberg R. Why Is Ice Slippery?[J]. Physics Today, 2005, 58(12): 50.
 - [2]Bowden F P, Hughes T P. The mechanism of sliding on ice and snow[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1939, 172(949): 280-298.
 - [3]Colbeck, S. C. Pressure melting and ice skating. [J]. American Journal of Physics, 1995, 63(10): 888-888.
 - [4]Van Dongen M E H, Smeulders D M J. Ice speed skating: Onset of lubrication by frictional heating[J]. Europhysics Letters, 2021, 134(3): 34005.
 - [5]程国庆. 关于《运动生物力学》的学科体系和教学内容的探讨(下)[J]. 山东体育科技, 1985(1): 3.
 - [6]李波, 田宝林. 速滑冰刀器材的创新促进了速滑运动的发展[J]. 哈尔滨体育学院学报, 2003(2): 2.
 - [7]De Koning J J, De Groot G, van Ingen Schenau G J. Ice friction during speed skating[J]. Journal of biomechanics, 1992, 25(6): 565-571.
 - [8]米靖. 物理气相沉积技术在冰刀上的应用[J]. 金属热处理, 2014(4): 3.
- 作者简介：魏公博（1998—），男，汉族，贵州毕节人，硕士在读，哈尔滨体育学院，研究方向：健康促进；*通讯作者：赵明元（1976—），男，汉族，黑龙江齐齐哈尔人，博士研究生，讲师，研究方向：学校体育学；杨涵麟（2000—），男，汉族，四川成都人，硕士在读，哈尔滨体育学院，民族传统体育学专业，研究方向：武术理论与方法；梁诗涵（2000—），女，汉族，重庆九龙坡人，硕士在读，哈尔滨体育学院，体育教育专业，研究方向：体育教学；司佳敏（2000—），女，汉族，山西吕梁人，硕士在读，哈尔滨体育学院，体育教育训练学，研究方向：体育教学。