

基于足-地接触力的滑跌概率预测模型研究^①张峻霞^② 曹琳 苏海龙 王新亭

(天津科技大学机械工程学院 天津 300222)

摘 要 针对传统的滑跌判定条件预测行走滑跌概率不准确的问题,进行了滑跌实验,建立了新的滑跌概率预测模型。为了建立新的滑跌判定条件,提出了利用摩擦系数(UCDF)这一概念;通过止滑性能实验测得了几种常见鞋底材质、地面材质及污染介质组合下的可得摩擦系数(ACOF),通过滑跌实验中测得的足-地接触力,计算出了相应的必要摩擦系数(RCOF)以及 UCOF。修正了传统的滑跌判定条件,最终建立了包含滑动和滑倒两种情况的滑跌概率预测模型。试验分析结果表明:与现有的滑跌预测模型相比,此模型提高了对滑跌概率预测的准确度。

关键词 滑跌,滑跌概率,预测模型,足-地接触力,摩擦系数

0 引言

滑跌事故会造成人体损伤,严重时危及人的生命。统计资料显示:年龄高于 75 岁的老年人,滑跌是导致意外死亡的主要原因;45-75 岁的人群,滑跌是导致意外死亡的第二大因素^[1]。统计表明,美国 2002 年死于滑跌的成年人超过 12900 名,因滑跌损伤接受急诊处理的超过 1016700 名,其中 388000 名需要住院治疗^[2]。可见,滑跌的问题应引起足够的重视。研究表明,预测滑跌概率对于预防滑跌事故有重要意义,并且可以为防滑策略的制定以及防滑装置的设计提供理论依据。本研究通过滑跌试验,研究了外在因素对摩擦系数的影响,分析了行走时的足-地接触力,在此基础上建立了基于足-地接触力的滑跌概率预测模型,该模型提高了滑跌概率预测的准确度。

1 相关研究

不少学者对人体滑跌概率进行了研究。Hanson 等人提出了一个用来评估滑跌事故发生的可能性的模型^[3],如式

$$y = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x}} \quad (1)$$

所示,式中 y 表示滑跌概率, x 表示动摩擦系数平均值与必要摩擦系数平均值的差; β_0 和 β_1 为逻辑回归参数。Barnett 等人通过使用平拉滑动器测得静态摩擦系数,分析得出鞋材-地面之间的摩擦系数 μ 服从三参数的威布尔分布^[4]。假设 μ_c 为临界摩擦系数, $\mu \leq \mu_c$ 为滑跌临界条件,由于每一步发生滑跌事故为独立事件,则行走 n 步的滑跌概率 F_n 可用式

$$F_n(\mu_c) = 1 - e^{-n \left[\frac{\mu_c - \mu_0}{\mu_0} \right]^m}, \mu_c \geq \mu_0 \quad (2)$$

表示,其中,威布尔参数 m 、 μ_0 和 μ_c 分别表示摩擦系数分布的集中量数、分布和不对称性。Chang 等人通过实验,得出必要摩擦系数(required coefficient of friction, RCOF)大致服从正态分布、对数分布或威布尔分布^[5]、可得摩擦系数(available coefficient of friction, ACOF)服从随机分布^[6]。因此 Chang 假设 ACOF 和 RCOF 服从同一分布^[7],以此为基础得出人体行走滑跌概率模型

$$P(\mu_0 \leq \mu_c) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_c(x) \int_0^{+\infty} p_r(y) dy dx \quad (3)$$

其中 P_c 、 P_r 分别为 ACOF、RCOF 的概率密度函数。

通过比较分析三种模型我们发现:Hanson 模型用 ACOF 和 RCOF 的平均值代替其各自的随机分布;Barnett 模型将 0.36 作为临界值,从而忽略了高于此临界值的 RCOF 值;Chang 虽然假设 RCOF 和 ACOF 都服从随机分布,但具体哪种随机分布未做

① 国家自然科学基金(50975204)和天津市自然科学基金(11JCYBJC005700)资助项目。

② 女,1968 年生,博士,教授;研究方向:人机工程;联系人,E-mail: xjx@tust.edu.cn

(收稿日期:2011-10-25)

说明。此外,他们在实验中运用了不同的测量手段和计算方法,但均未区分滑动和滑倒,故得到的滑跌概率值偏大。

正常行走时,脚底与地面之间也存在微小滑动,但这种微观意义上的滑动不影响人体的平衡。本文根据滑跌领域普遍认可的方法^[8,9],认定当垂直向上的地面支反力大于受试者体重 5% 时,便认为受试者已经脚跟触地,开始进入步态周期中的支撑相,此时,如果受试者脚跟上的标志点与测力台参考标志点之间在受试者前进方向上发生大于 1cm 的相对位移,即发生了滑动。而当保护装置中的安全带呈绷紧受力状态或者滑动脚持续前滑,滑行距离超过 10cm 时,人通过肢体调节很难恢复平衡,故判定为滑倒。

在研究滑跌问题时,各国学者普遍采用摩擦系数作为滑跌危险性的判断标准^[10,11]。Chang 等人指出鞋与地面间的摩擦系数是评估地面防滑性能的一个简单方法^[12]。Redfern 等人指出当 RCOF 大于 ACOF 时,滑跌就会发生^[13]。其中 ACOF 是指不发生滑动时,鞋与地面间所能提供的最大摩擦系数,也称为过渡摩擦系数。RCOF 是人在干燥地面行走时,由测力台测得的足-地接触力的水平合力与垂直力的最大比值^[7],如式

$$RCOF = \left(\frac{F_D}{F_N} \right)_{\max} = \left(\frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z} \right)_{\max} \quad (4)$$

所示。其中 F_D 和 F_N 分别为足-地接触力的水平合力和垂直合力, F_x 和 F_y 分别为水平合力在行走方向以及与行走方向垂直方向上的分力, F_z 同样为垂直合力。另外,国立台湾科技大学的 Liu 等人研究了不同条件组合下,鞋底纹理对 ACOF 的影响^[14]。佛罗里达大学的 Copper 等人研究了步长与 RCOF 的关系^[15]。

文献中的 RCOF 均是在地面干燥的情况下测得,而实际上,地面上有油、水等污染介质时,更容易发生滑跌,故本文基于有污染介质的情况提出了利用摩擦系数(utilized coefficient of friction,UCOF)的概念,即在有污染介质的地面上行走时,足-地接触力的水平合力与垂直力的最大比值,即在有污染介质地面上行走时的 ACOF。

本文通过滑跌实验研究了外在因素对摩擦系数的影响,分析了行走时的足-地接触力,分别建立了滑动概率模型和滑跌概率模型,以提高滑跌概率预测模型的正确性及有效性。

2 滑跌实验

2.1 实验人员及设备

本研究的实验对象为 5 名 24 岁健康男性和 5 名 24 岁健康女性。测量 ACOF 所用的实验仪器为 Brungraber Mark II 止滑测试仪,其依据的标准为 ASTM-F1677。

人体步态实验台总长 5m,宽 1m。测力台嵌入实验台内部,保证测力台上铺设地面材质时,通过调整测力台地角水平使其高度与实验台表面齐平。

为了防止人在行走过程中发生滑跌意外事故,设计了随行保护装置(图 1)。在实验开始之前,将安全带调整到合适的长度,在不干扰人体行走的前提下,发生滑跌危险时可以有效地保护实验人员。

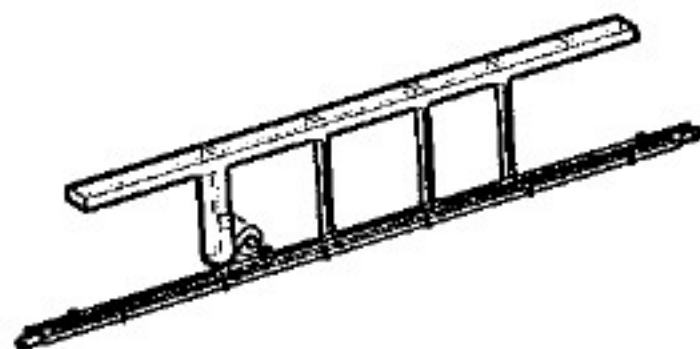


图 1 随行保护装置

数据采集系统由 2 块测力台、6 个 MX 红外摄像机、Vicon Vegas 转换器、PC 主机、Vicon Datastation ADC Patch Panel 信息转换盒组成。测力台采集频率为 1000Hz,通过 Vicon Vegas 转换器与计算机连接。MX 摄像机用来记录人体行走时下肢的三维数据,摄像机均匀分布在行走轨道的两侧,且均在测力台的上方。

2.2 试验设计

在止滑性能实验中,通过 Brungraber Mark II 测得不同条件组合下的可得摩擦系数(ACOF)。实验所用到的四种鞋底材质:热塑弹性橡胶、天然橡胶、合成橡胶和皮革,尺寸均为 76mm × 76mm × 20mm。地面材质:大理石、瓷砖、玻璃和木质地板,尺寸均为 220mm × 250mm × 20mm。污染介质为水、1:1 浓度的肥皂水及植物油。首先进行三因子四水平的正交试验,进行 ACOF 与鞋底材质、地面材质以及污染介质之间的相关度分析,然后以天然橡胶-瓷砖-水为例进行多次重复实验,确定 ACOF 的分布。

人体行走实验的目的是确定同一条件组合下的必要摩擦系数(RCOF)及利用摩擦系数(UCOF)的

分布情况,实验条件如下:鞋底材质为天然橡胶;地面材质为大理石;地面情况为干燥、植物油。

实验开始前,告知受试者在整个实验中眼睛注视前方,尽量以自然步态沿实验台中心轴线行走。首先要求受试者在实验台上自由行走数次,以适应实验环境和调整随行保护装置。受试者踩在测力台上,才能得到有效的实验数据,所以要确定行走实验的起步点,以保证得到有效的实验数据。反复采集同一种鞋底材质、地面材质和污染介质组合下的足-地接触力、RCOF 以及 UCOF,并记录数据。两次组合实验之间受试者休息片刻,以消除疲劳和紧张对实验结果带来的影响。

3 实验结果及分析

3.1 摩擦系数

对测得的 ACOF 进行直观分析(图 2 中因子 A 代表鞋底材质,因子 B 代表地面材质,因子 C 代表污染介质)。从图 2 可以看出,因子 C 的极差最大,因子 B 次之,因子 A 最小,由此可得:地面上的污染介质对 ACOF 的影响最为显著,地面材质对其影响次之,鞋底材质的影响最小。

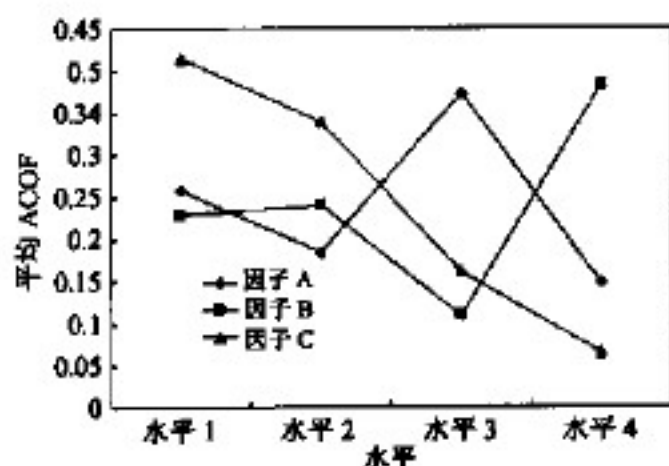


图 2 ACOF 直观分析图

同样对 ACOF 进行方差分析(表 1 中因子 A 代表鞋底材质,因子 B 代表地面材质,因子 C 代表污染介质)。由表 1 可得:污染介质对 ACOF 的影响最显著,地面材质次之,鞋底材质的影响最小,该结果与直观分析法所得一致。

表 1 ACOF 方差分析表

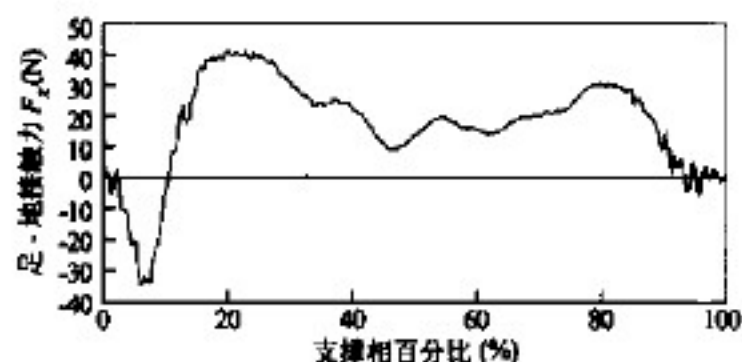
来源	离差	自由度	均方离差	F 值	显著性
因子 A	0.121	3	0.040	1.053	*
因子 B	0.152	3	0.051	1.342	**
因子 C	0.298	3	0.099	2.605	***

SPSS 的分析结果表明,同一条件组合下的 ACOF、RCOF 以及 UCOF 均服从正态分布。

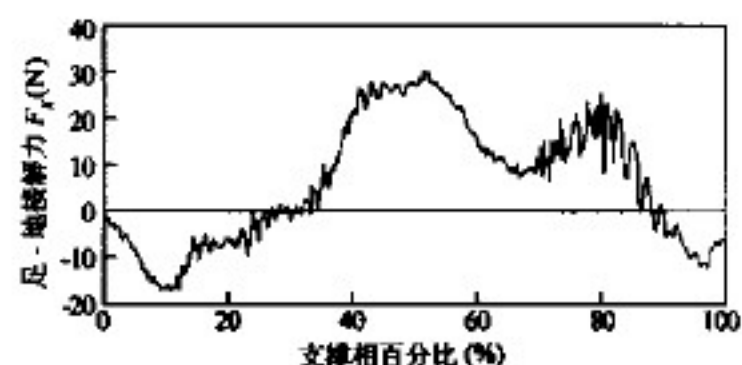
3.2 足-地接触力

图 3 - 图 5 均为 1 号受试者行走时典型足-地接触力变化曲线。

F_x 是人行走过程中足-地接触力在冠状面内的水平分力,相同的步态时相内,左右脚上的该力大小相等,方向相反。正常行走时, F_x 按照方向大致分为三个阶段,其中第一和第三阶段所占比例较小,

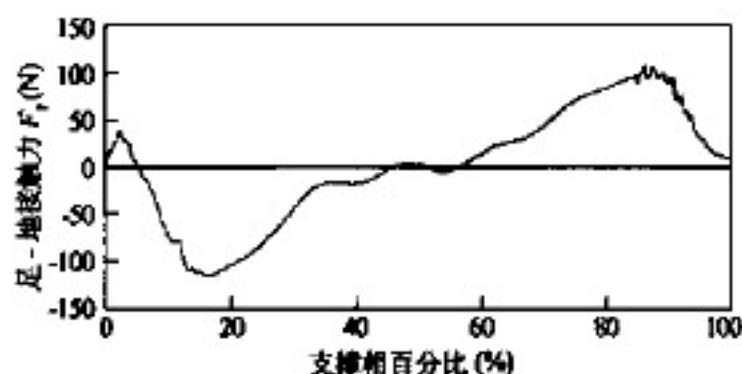


(a) 未滑动时

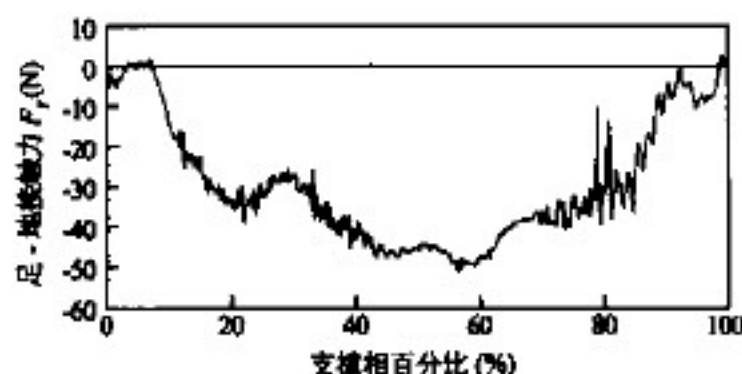


(b) 滑动时

图 3 足-地接触力分力 F_x 变化情况



(a) 未滑动时



(b) 滑动时

图 4 足-地接触力分力 F_y 变化情况

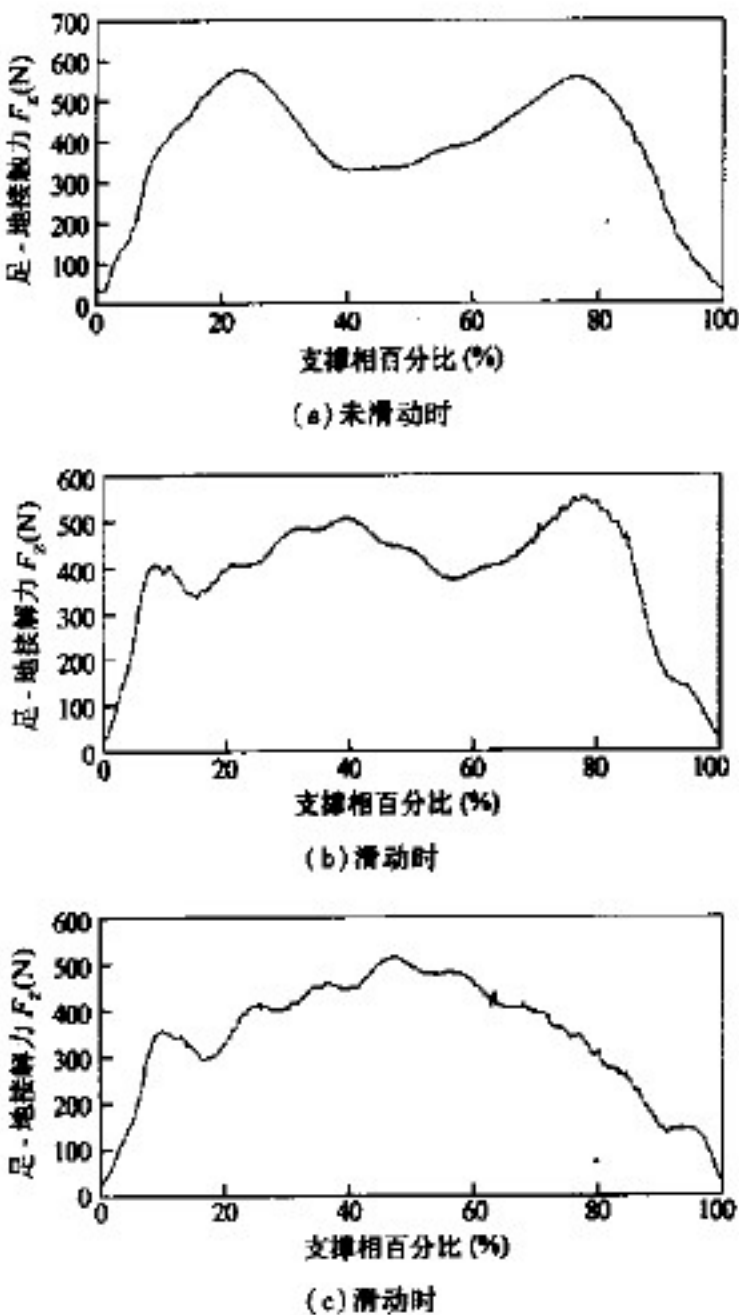


图 5 足-地接触力分力 F_z 变化情况

分别为 10% 和 5% 左右 (图 3(a)); 发生滑动时 (图 3(b)), 第一和第三阶段所占比例增加, 分别增

加到 35% 和 20% 左右, 即脚跟着地和脚尖离地所用时间的比例增加。另外, 发生滑动时, F_x 的图像锯齿较多, 这是由于人在发生滑动时对步态进行了调整。当脚发生滑动的瞬间, 受试者失去平衡, 身体左右晃动, 从而导致脚底的 F_x 变化增多。但是受试者本能地通过上肢以及下肢的运动来调节, 所以两种情况下的峰值, 滑动时比未发生滑动时要小。

F_y 是人在行走过程中, 足-地接触力在矢状面内的水平分力。正常行走时, F_y 按照方向大致分为两个阶段, 各占 50% (如图 4(a)); 发生滑动时, 第一阶段所占比例增大, 且滑动脚 F_y 变小, 锯齿较多, 瞬间变化较明显 (如图 4(b) 所示)。

F_z 是行走过程中足-地接触力竖直方向的分力。正常行走时, F_z 呈现典型的平滑的双峰状态 (图 5(a)); 发生滑动时, F_z 呈现出双峰多锯齿 (图 5(b)) 或者多峰 (图 5(c)) 状态。这就说明 F_z 不再是连续的变化, 其瞬间变化比较明显, 但变化的幅度比正常行走时要小, 峰值也比未发生滑动时小。这是由于发生滑动时, 身体晃动较大, 人对步态做出适当调整, 脚跟接触时间或支撑相变长。

3.3 滑跌判定条件

传统的滑跌判定条件是比较 RCOF 和 ACOF 的值, 即当接触面的 $RCOF > ACOF$ 时, 就会发生滑跌。

实验结果和按照传统判定条件所得结论基本一致 (见表 2), 但其中个别发生滑动但未滑倒的情况也判定为滑倒。

表 2 传统判定条件判定滑跌实验结果

实验组合	RCOF 与 ACOF 比较	理论	实际	结论
NR-大理石-干燥	$RCOF < ACOF$	不滑	不滑	一致
NR-大理石-湿润	$RCOF > ACOF$	滑跌	滑跌	一致
NR-大理石-肥皂水	$RCOF > ACOF$	滑跌	滑跌	一致
NR-大理石-植物油	$RCOF > ACOF$	滑跌	滑跌	一致
NR-瓷砖-干燥	$RCOF < ACOF$	不滑	不滑	一致
NR-瓷砖-湿润	$RCOF < ACOF$	不滑	不滑	一致
NR-瓷砖-肥皂水	$RCOF > ACOF$	滑跌	滑跌	一致
NR-瓷砖-植物油	$RCOF > ACOF$	滑跌	滑跌	一致
NR-玻璃-干燥	$RCOF < ACOF$	不滑	不滑	一致
NR-玻璃-湿润	$RCOF > ACOF$	滑跌	滑跌	一致
NR-玻璃-肥皂水	$RCOF > ACOF$	滑跌	滑跌	一致
NR-玻璃-植物油	$RCOF > ACOF$	滑跌	滑跌	一致
NR-木质地板-干燥	$RCOF < ACOF$	不滑	不滑	一致
NR-木质地板-湿润	$RCOF < ACOF$	不滑	不滑	一致
NR-木质地板-肥皂水	$RCOF > ACOF$	滑动	未滑倒	不一致
NR-木质地板-植物油	$RCOF > ACOF$	滑跌	滑跌	一致

注: NR 为天然橡胶, RCOF 为必要摩擦系数, ACOF 为可得摩擦系数。

实际上,人们在日常生活中有些情况下是可以避免滑倒的,很多时候人体向前滑动了但却不会发生滑倒,这是由于当人在行走过程中发生滑动时会自觉地调整步态和上身姿势以防止滑倒^[16]。传统

的判定条件高估了人滑倒的概率,所以本文用UCOF与ACOF比较,作为人是否发生滑跌的判定条件,该判定方法所得结论与实验结果全部一致(见表3)。

表3 新判定条件判定滑跌实验结果

实验组合	UCOF与ACOF比较	理论	实际	结论
NR-大理石-水	UCOF > ACOF	滑并持续	滑倒	一致
NR-大理石-肥皂水	UCOF > ACOF	滑并持续	滑倒	一致
NR-大理石-植物油	UCOF > ACOF	滑并持续	滑倒	一致
NR-瓷砖-肥皂水	UCOF > ACOF	滑并持续	滑倒	一致
NR-瓷砖-植物油	UCOF > ACOF	滑并持续	滑倒	一致
NR-玻璃-水	UCOF > ACOF	滑并持续	滑倒	一致
NR-玻璃-肥皂水	UCOF > ACOF	滑并持续	滑倒	一致
NR-玻璃-植物油	UCOF > ACOF	滑并持续	滑倒	一致
NR-木质复合板-肥皂水	UCOF < ACOF	恢复平衡	未滑倒	一致
NR-木质复合板-植物油	UCOF > ACOF	滑并持续	滑倒	一致

注:NR为天然橡胶,RCOF为必要摩擦系数,UCOF为利用摩擦系数

通过以上实验和结论可以得出新的滑跌判定条件:

(1) 当RCOF > ACOF时,受试者行走发生滑动但不一定滑倒;

(2) 当UCOF > ACOF,滑动持续并滑倒。

3.4 滑跌概率预测模型

上文提到由于人在行走过程中发生滑动时会通过步态调整和肢体平衡策略来调整行走姿态,以防止滑倒,故当RCOF大于ACOF时,人体会发生滑动,但并不一定会滑倒。但当UCOF大于ACOF时,滑动持续并滑倒。故滑跌概率模型可以分为两部分,即滑动概率模型和滑倒概率模型。

前期证明了RCOF和ACOF均服从正态分布,故根据传统的滑跌判定条件可得到滑动概率模型

$$P(\mu_{\xi} \geq 0) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\xi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\mu_{\xi}}{\sigma_{\xi}})^2} d\mu_{\xi} \quad (5)$$

其中, $\mu_{\xi} = \mu_r - \mu_a$, $\bar{\mu}_{\xi} = \bar{\mu}_r - \bar{\mu}_a$, $\sigma_{\xi} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_r^2}$; $\bar{\mu}_r$ 和 $\bar{\sigma}_r$ 分别表示RCOF的期望和标准差; $\bar{\mu}_a$ 和 $\bar{\sigma}_a$ 分别表示ACOF的期望和标准差。

同理,得出人体行走滑倒概率模型

$$P(\mu_{\xi_s} \geq 0) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\xi_s}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\mu_{\xi_s}}{\sigma_{\xi_s}})^2} d\mu_{\xi_s} \quad (6)$$

其中, $\mu_{\xi_s} = \mu_u - \mu_a$, $\bar{\mu}_{\xi_s} = \bar{\mu}_u - \bar{\mu}_a$, $\sigma_{\xi_s} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_u^2}$; $\bar{\mu}_u$ 和 $\bar{\sigma}_u$ 分别表示UCOF的期望和标准差, $\bar{\mu}_a$ 和 $\bar{\sigma}_a$ 分别表示ACOF的期望和标准差。

4 结论

(1) 影响ACOF的众多外在因素中,地面上污染介质的影响最大,地面材质次之,鞋底材质的影响最小。同一地面材质-鞋底材质-污染介质条件下的ACOF、RCOF以及UCOF均服从正态分布。

(2) 发生滑动时,足-地接触力 F_z 不再呈现典型的双峰性质,而是呈双峰多锯齿或多峰状态; F_y 在第一阶段所占比例增大,且滑动脚 F_y 变小,锯齿较多,瞬间变化较明显; F_x 在第一和第三阶段所占比例增加,且锯齿增多。

(3) 按照传统的滑跌判定条件来计算滑跌概率,原始的滑跌概率为现在的滑动概率,其值略大于实际的滑倒概率,即高估了人体行走滑跌概率,而新的滑跌判定条件能够更加准确地判定滑跌。

(4) 通过模型可知,滑跌概率的大小取决于RCOF与ACOF以及UCOF和ACOF之间的差值,而同一鞋底材质-地面材质-污染介质组合下的ACOF是确定值,当某一时刻RCOF或UCOF越大,人在行走过程中发生滑跌的概率越大。换句话说,为了减少日常滑跌事故的发生,要尽可能地减小RCOF或UCOF值,同时增大ACOF值。

滑跌概率预测模型为双足机器人以及助行器的稳定性设计提供了参考并为其评价提供了依据,为防滑策略的制定以及防滑装置的设计提供了更加可靠的理论基础。

参考文献

- [1] Lockhart T E, Smith J L, Woldstad J C. Effect of aging on the biomechanics of slip and falls. *Human Factors*, 2005, 47(4):708-729
- [2] Stevens J A, Corso P S, Finkelstein E A, et al. The costs of fatal and non-fatal falls among older adults. *Injury Prevention*, 2006, 12:290-295
- [3] Hanson J P, Redfern M S, Mazumdar M. Predicting slips and falls considering required and available friction. *Ergonomics*, 1999, 42(12):1619-1633
- [4] Barnett R L. Slip and fall theory-extreme order statistics. *JOSE*, 2002, 8(2):135-159
- [5] Chang W R, Chang C C, Matz S, et al. A methodology to quantify the stochastic distribution of friction coefficient required for level walking. *Applied Ergonomics*, 2008, 39:766-771
- [6] Chang W R, Matz S. The slip resistance of common footwear materials measured with two slipmeters. *Applied Ergonomics*, 2001, 32(6):549-558
- [7] Chang W R. A statistical model to estimate the probability of slip and fall incidents. *Safety Science*, 2004, 42(9):779-789
- [8] Burnfield J M, Tsai Y J, Powers C M. Comparison of utilized coefficient of friction during different walking tasks in persons with and without a disability. *Gait and Posture*, 2005, 22(1):82-88
- [9] Cham R, Redfern M S. Lower extremity corrective reactions to slip events. *Journal of Biomechanics*, 2001, 34(11):1439-1445
- [10] Redfern M S. Changes in gait when anticipating slippery floors. *Gait and Posture*, 2002, 15(2):159-171
- [11] Love A C, Boswick D S. Slips and falls during manual handling activities. In: *Proceedings of the 21st Annual Meeting of the Human Factors Society of Canada*, Edmonton, Canada, 1988, 9:133-135
- [12] Chang W R, Grönqvist R, Leclercq S, et al. The role of friction in the measurement of slipperiness, Part 2: Survey of friction measurement devices. *Ergonomics*, 2001, 44(13):1233-1261
- [13] Redfern M S, Cham R, Perczak G K, et al. Biomechanics of slips. *Ergonomics*, 2001, 44(13):1138-1166
- [14] Liu L W, Li K W. Friction measurements on "anti-slip" floors under shoe sole, contamination, and inclination conditions. *Safety Science*, 2010, 48(10):1321-1326
- [15] Cooper R C, Prebeau L M. Step length and required friction in walking. *Gait & Posture*, 2008, 27:547-551
- [16] Siegmund G P, Heiden T L, Sanderson D J, et al. The effect of subject awareness and prior slip experience on tribometer-based predictions of slip probability. *Gait & Posture*, 2006, 24:110-119

Research on the model for predicting the probability of slips and falls based on foot-floor force

Zhang Junxia, Cao Lin, Su Hailong, Wang Xinting

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222)

Abstract

In this study, the experiment on investigating the inaccurate prediction of the probability of slip and fall incidents using traditional decision conditions for slips and falls was carried out, and a new model for predicting the slip and fall probability was constructed. To establish new decision conditions for slips and falls, the concept of utilized coefficient of friction (UCOF) was defined. The slip-resistance experiments were conducted to give the available coefficient of friction (ACOF) on combination of several common sole materials, ground material and pollution medium. The relevant required coefficient of friction (RCOF) and UCOF were calculated by using the foot-floor force measured in the walking slip and fall experiments. Based on correcting the traditional decision conditions for slips and falls, a new model for predicting the probability of slip and fall incidents was finally established, which contains the aspects of slide and slip. The experimental results indicate that compared with existing models the proposed model has the higher prediction accuracy.

Key words: slips and falls, slips and falls probability, prediction model, foot-floor force, coefficient of friction