

基于水平生命线系统的人体坠落的动态模拟

方亚明, 常宗瑜, 郑中强, 隋吉盛

(中国海洋大学工程学院, 青岛 266100)

摘要: 水平生命线系统 (Horizontal Lifeline System, HLLS) 是广泛地应用于超高层建筑水平施工作业时的一种锚固装置, 与安全绳、缓冲器、安全带等装置共同构成一套完整的坠落防护系统 (Fall Arrest System, FAS), 以减少高处作业的风险。本文基于能量分析方法对水平生命线系统在模拟人体坠落过程中的锚线最大张力以及人体所承受的最大冲击载荷进行数值分析, 并计算锚线的最大挠度, 评估人体坠落的安全高度; 基于 ADAMS 虚拟样机技术建立人体与水平生命线系统的工作环境结构模型, 模拟人体在一定的高度突然坠落, 分析人体在坠落过程中的动态响应, 包括人体的运动姿态、系统作用在人体的冲击力等, 评估人员的安全状态。本文对防坠落水平生命线系统和坠落防护系统人机工程学方面的设计具有指导意义。

关键词: 坠落防护系统; 水平生命线系统; 人体坠落; 动态模拟; 冲击力; ADAMS

中图分类号: X9;TH16

Dynamic Simulation of Human Body Falling Based on Horizontal Lifeline System

FANG Yaming, CHANG Zongyu, ZHENG Zhongqiang, SUI Jisheng

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract: Horizontal lifeline system (HLLS) is a kind of anchoring device which is widely used in the high-rise building industry, together with safety lanyard, energy absorbers, safety harnesses, etc. constituting a complete fall arrest system (FAS) for mitigating the risk of work-at-height. In this paper, the maximum of tension force and the maximum load crew endured are achieved based on the energy analysis method, thus the safety height of falling down can be assessed. Based on the ADAMS software, a HLLS and human body model are built to simulate the human body falling from a certain height. In addition, the dynamic responses of the system including motion of human body, impact force on human body are obtained to evaluate the safety state of crew. This article has a guiding significance for improving the performance of HLLS as well as ergonomic design of FAS.

Key words: Fall arrest system; horizontal lifeline system; human body falling; dynamic simulation; impact force; ADAMS

0 引言

在建筑等行业中, 高处坠落是造成员工死亡伤害的最主要因素。根据我国住房和城乡建设部通报的房屋市政工程生产安全事故情况数据显示: 2010 年至 2014 年, 在主要的房屋市政工程生产安全事故中, 高处坠落事故发生的比例就高达 52.36%^[1]。即使在工业发达、劳动保护水平高的欧洲, 高处坠落事故所占的比例也是最高的, 据 Health and Safety Executive (HSE) 统计数据^[2], 在 1999-2007 年间, 统计出的 580 起主要伤亡事故中, 坠落事故就有 258 起, 占事故总数的 44.48%。

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-12-0500)

作者简介: 方亚明 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 人机系统动态模拟

通信联系人: 常宗瑜 (1973-), 男, 教授, 主要研究方向: 人机工程学与 HSE. E-mail: zongyuchang@qq.com

国内外数据表明, 坠落事故是导致人员伤亡的最主要因素, 而导致高处坠落事故的一个重要原因就是物的不安全状态, 表现为防护装备和设施的缺陷^[3]。高层建筑等行业中, 坠落防护系统 (FAS) ^[4] 是避免高处坠落事故发生的关键, 当前水平生命线系统 (HLLS) 可以使一名或多名高空作业人员能自由地水平移动且进行连续作业, 是 FAS 的一个重要组成部分^[5]。

HLLS 的设计不仅要确保坠落时产生的冲击载荷不会伤害人员以及损坏锚线支撑结构, 而且还要保证人员坠落的安全高度, 避免与地面发生碰撞而造成人员的二次伤害。目前国内对水平生命线设计、使用标准尚不完善, 开展 HLLS 的分析是非常重要的, 其设计常用的分析方法有静力学、动力学和能量分析方法。

静力学分析方法只是对装置在静态载荷下的最大张力、伸长率进行分析, 却忽略了装置在实际坠落过程中的动态载荷; 能量分析方法是基于能量守恒的原理得出在坠落最低处时的锚线最大张力以及人体所受的最大冲击载荷, 和静力学方法相比更接近实际情况; 动力学分析方法是建立动力学方程, 分析人体在坠落过程中, 位移、速度、加速度以及所受冲击载荷随时间变化的关系, 与能量分析方法相比, 动力学分析方法可以分析较为复杂的系统。黄泽明等^[6]基于静力学分析方法, 按照抛物线理论, 对水平生命线在静态载荷下的最大张力进行计算。Wang 和 Yang 等^[7-8]运用能量分析方法, 结合一些实际案例分析, 指出现在的水平锚固装置在设计上存在的问题, 并提出一套基于案例分析系统 (Case Based Reasoning System, CBRS) 来提高水平锚固装置设计的可靠性。基于动力学的分析方法, Baszczyński^[9]建立了坠落过程中的动力学方程, 利用计算机程序进行数值求解, 并与实验数据进行比较得出该方法的可行性。Drabble^[10]采用类似于有限元分析方法, 将锚线简化成若干个弹簧-集中质量模型, 建立了非线性的动力学微分方程, 并进行了数值求解。

本文是基于能量分析方法对 HLLS 设计中的可靠性进行研究; 并利用 ADAMS 虚拟样机技术建立了人体和 HLLS 的动力学仿真模型, 对佩戴 FAS 的人在坠落过程中的动力学响应进行模拟分析。

1 水平生命线系统设计的能量分析方法

坠落防护系统的设计和安装必须遵循“高挂抵用”的原则, 即安全绳挂点要高于人员作业位置。图 1 是典型的水平生命线系统和坠落防护系统, 其中包含两个锚点、水平锚线、安全绳、安全绳卡环以及全身式安全带等防护装置, 图中: B 是人体坠落在最低点时锚线的最大挠度; C 是安全绳伸展后的长度; D 是系统安全安装高度。

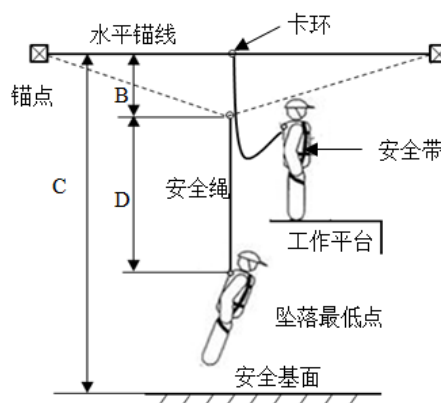


图 1 典型的水平生命线系统

Fig.1 Typical horizontal lifeline system

75 由于安全绳卡环可以在水平锚线上自由滑动, 计算时可以近似认为荷载作用点为锚线的中点, 图 2 是水平生命线上力的分布示意图。

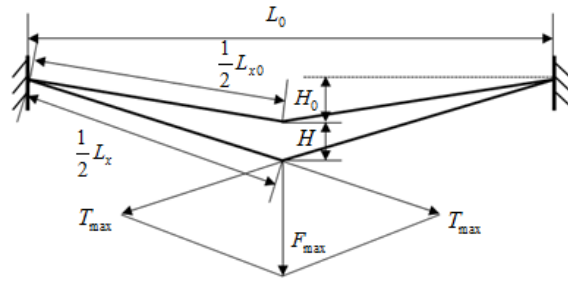


图 2 水平生命线上力的分布

Fig.2 Distribution of the force on horizontal lifeline

80 图 2 中, L_0 是水平锚线的跨度; L_{x0} 是锚线不受力的初始长度; L_x 是受张力时的长度; H 是锚线受力时坠落的最大挠度, H_0 是锚绳不受张力时的初始挠度。

由于锚线的自重相对于冲击力较小, 因此这里忽略锚线自身的重力, 即 $H_0 = 0$ 。假设模拟人体自由坠落的高度为 h , 那么在人体坠落至最低点过程中, 系统减少的重力势能为:

$$W = mg(H + h) \quad (1-1)$$

其中: m 是模拟人体的质量; g 是重力加速度。

85 这个过程中, 系统吸收的能量可表示为:

$$U = \frac{1}{2} K (\Delta L_x)^2 \quad (1-2)$$

这里仅考虑水平锚线吸收的能量, 对安全绳吸收的能量未做考虑。式 (1-2) 中, ΔL_x 是水平锚绳的伸长量, $\Delta L_x = L_x - L_{x0}$; K 为绳子的刚度, $K = EA / L_{x0}$, E 为绳子的伸长模量; A 为绳子的横截面积。

90 由能量守恒定律可知, 当人体坠落到最低点的过程中, 系统减少的重力势能等于系统吸收的能量, 即有:

$$mg\left(\frac{1}{2}\sqrt{L_x^2 - L_0^2} - H_0 + h\right) = \frac{1}{2} K (L_x - L_{x0})^2 \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中仅有一个未知量 L_x , 可以用非线性方程求根的数值计算方法求解, 然后求得锚线所受的最大张力:

$$T_{\max} = K \Delta L_x \quad (1-4)$$

人体所受的最大冲击载荷:

$$F_{\max} = \frac{4T_{\max}(H + H_0)}{L_x} \quad (1-5)$$

水平锚线的最大挠度:

$$H_{\max} = H + H_0 \quad (1-6)$$

95 水平锚线的安全系数:

$$k = \frac{\mu F_g}{T_{\max}} \quad (1-7)$$

式 (1-7) 中, F_g 为水平锚线的最小破断拉力; μ 为破断拉力换算系数, 取 $\mu = 1.283$ 。选取水平锚线为 6×37 (b) 类钢芯钢丝绳^[11], 公称抗拉强度为 1870MPa, 伸长模量取为 6.5×10^4 MPa。

表 1 和表 2 表示的是，当水平锚线直径分别为 12mm 和 14mm，质量为 100kg 的模拟人
体在 1m 处坠落时，不同跨度的锚线的计算结果。

表 1 直径为 12mm 时不同跨度的锚线的计算结果

Tab. 1 Results of Anchor Lines with Different Spans in Diameter 12mm

L_0 /m	ΔL_x /mm	H_{max} /m	T_{max} /kN	F_{max} /kN	k
3	31.2	0.22	76.42	22.42	1.7
4	36.8	0.27	64.60	18.26	1.9
5	42.0	0.32	61.72	15.80	2.1
6	46.9	0.38	57.44	14.56	2.2

注：直径为 14mm 的钢芯钢丝绳最小破断拉力 $F_g = 95.9$ kN。

表 2 直径为 14mm 时不同跨度的锚线的计算结果

Tab. 2 Results of Anchor Lines with Different Spans in Diameter 14mm

L_0 /m	ΔL_x /mm	H_{max} /m	T_{max} /kN	F_{max} /kN	k
3	26.6	0.20	88.68	23.64	1.9
4	31.3	0.25	78.26	19.56	2.2
5	35.7	0.30	71.40	17.14	2.3
6	39.8	0.35	66.34	15.48	2.6

注：直径为 12mm 的钢芯钢丝绳最小破断拉力 $F_g = 130$ kN。

从表 1 和表 2 的数据可以看出，随着锚线的跨度 L_0 越大，锚线所受的最大张力 T_{max} 也就
越小，锚线的安全系数 k 也就越高，然而锚线的最大挠度却在增加，人员与地面的安全高度
会有所下降，这样就增加了人体与地面碰撞而产生的二次伤害的风险；当锚线强度不能达到
工作要求时，可以在一定的安全高度的前提下用增加锚线跨度或直径的方法来提高系统的可
靠度，从而降低安全事故的风险。

2 人体及水平生命线系统仿真模型的建立

图 3 是根据中国成年男性的人体惯性参数^[12]，利用 Solidworks 三维建模软件建立的人
体三维刚体模型，其主要参数如表 3 所示：

表 3 人体模型的主要参数

Tab. 3 Main Parameters of Human Body Model

质量/kg	身高/mm	人体质心	质心绕各轴的转动惯量(kg.mm ²)
60.48	1685	$L_{cx}=56.2$	$I_x=9922809$; $I_y=9479466$; $I_z=637993$

注：表 3 中 L_{cx} 为质心下部尺寸占人体身高的百分比； I_x 为质心绕横轴的转动惯量； I_y 为质心绕纵轴的
转动惯量； I_z 为质心绕垂直轴的转动惯量。

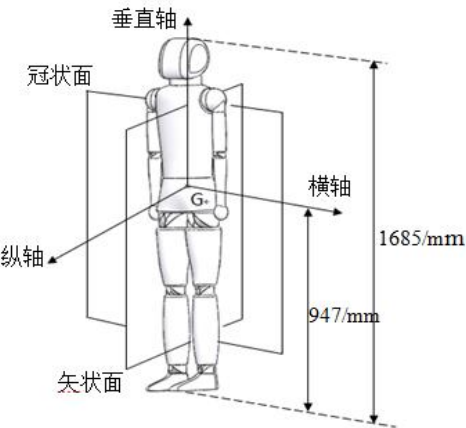


图 3 人体模型
Fig.3 Human model

图 4 是利用 ADAMS 虚拟样机技术建立的人体与水平生命线系统的工作场景模型。由于 ADAMS 软件对于绳索类等大变形物体无法实现直接建模, 因此采用 ADAMS 二次开发功能宏命令, 利用有限段法将绳索离散成有限多个小圆柱体, 中间用轴套力连接的方法^[13], 建立水平生命线和安全绳的仿真模型。建模时选取水平生命线是直径为 12mm 的钢丝绳, 其跨度为 4m, 安全绳长度为 2m, 水平锚线两端锚点、安全绳挂点以及安全绳与人体的连接点简化成铰接的形式。

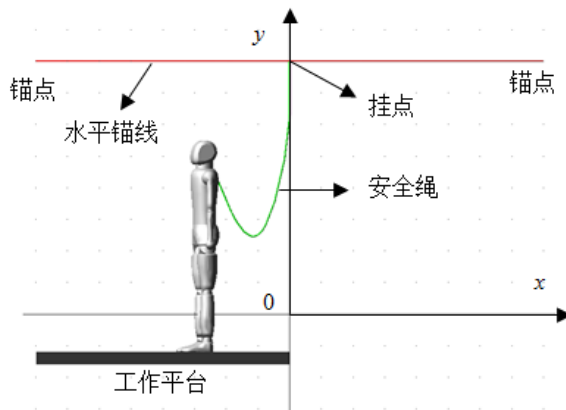
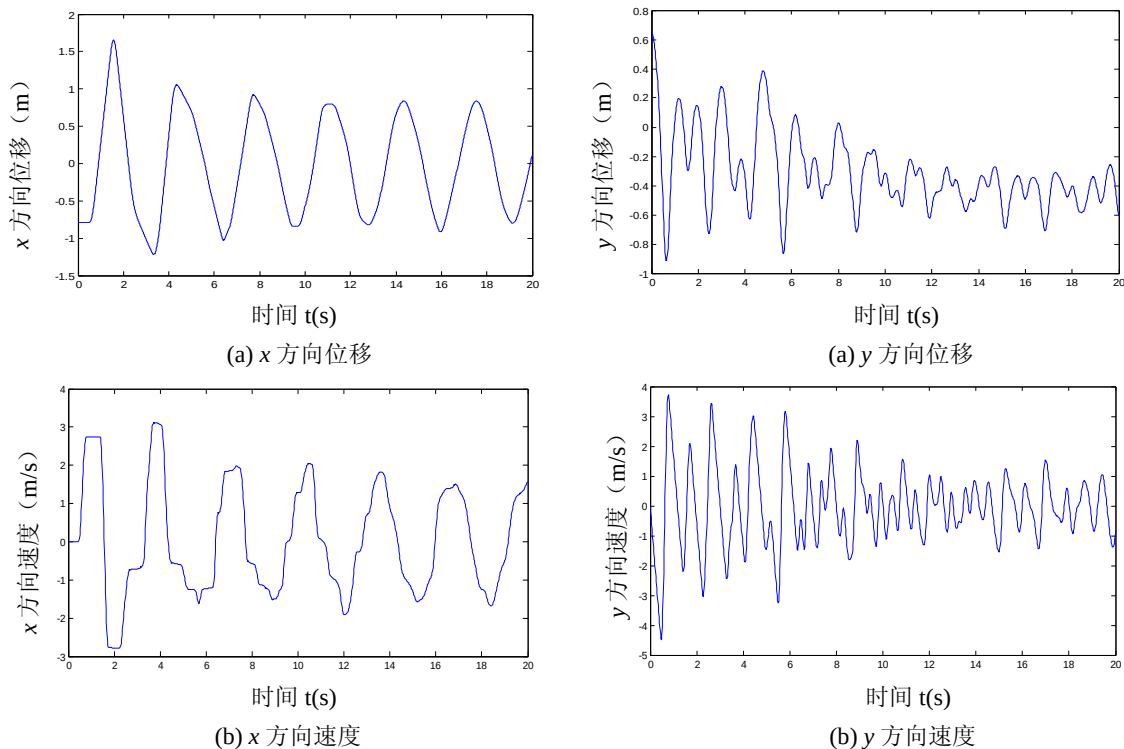


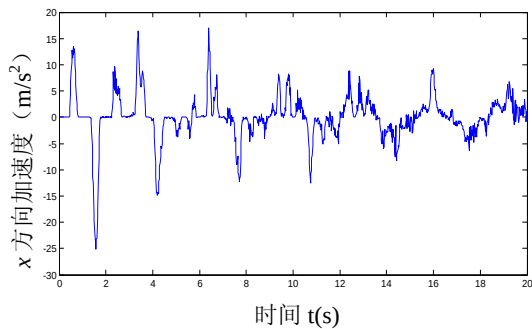
图 4 人体及坠落防护系统的三维模型

Fig.4 3D illustration of human body and FAS

3 人体坠落过程中的动态仿真

运用 ADAMS 动力学仿真软件对佩戴坠落防护系统装置的人员在坠落高度为 1m 时的坠落过程进行模拟, 得到人体质心在水平方向和垂直方向的动态响应曲线, 如图 5 和图 6 所示。

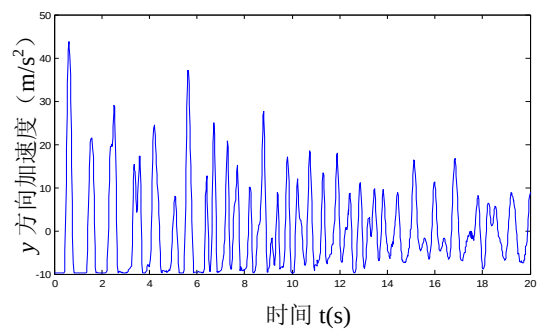




(c) x 方向加速度

图 5 人体质心在 x 方向上的响应

Fig.5 Response of human body's mass center in x direction



(c) y 方向加速度

图 6 人体质心在 y 方向上的响应

Fig.6 Response of human body's mass center in y direction

从图 5 可以看出人体坠落过程中的摆动现象比较明显,人体质心摆动速率最大达到 3m/s,最大加速度接近 2.5g,因此存在着人体与周围障碍物发生碰撞而产生二次伤害的风险,这是由于安全绳挂点与人体工作位置在水平方向上在存在一定的偏斜,这一点在工作时应尽量避免,尽可能安排挂点在作业点的正上方;此外,由于水平生命线系统能自动吸收能量,人体摆动的幅度会随时间越来越小,但效率不太明显,存在着一定的周期性。

图 7、图 8 分别显示的是人体在坠落过程中,安全绳作用在人体的力以及水平锚线作用在锚点上的力随时间的变化。可得到安全绳作用在人体的最大冲击力接近 3.5kN,而且水平锚线作用在锚点上的最大冲击力也达到 20kN。从图 5(c)、图 6(c)、图 7 和图 8 可以看出在坠落过程中,人体质心加速度、安全绳作用在人体上的力以及水平锚线作用在锚点上的力是非常大的,而且出现非常明显的冲击现象,这些对人体以及水平锚线的支撑装置都是不利的,会大大降低水平生命线系统的可靠性。在 HLLS 设计时,可以在锚点与水平锚线之间或者是在安全绳上添加缓冲器装置来提高 HLLS 的缓冲性能,进而提高 FAS 的防护性能。

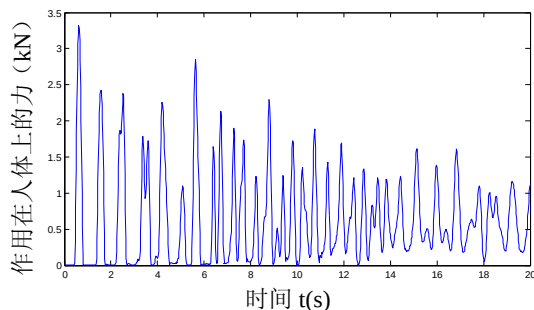


图 7 作用在人体上的力

Fig.7 Force on human body

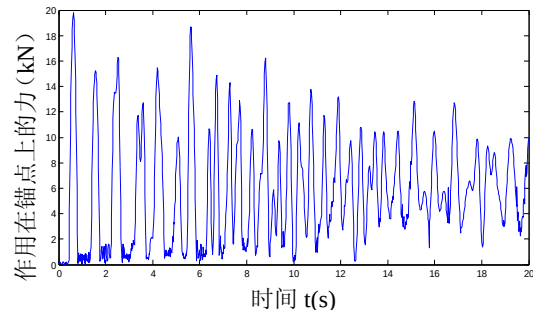


图 8 作用在锚点上的力

Fig.8 Force on anchor point

4 结论

本文是基于 HLLS 对人体坠落过程的动态进行模拟分析。首先,运用 HLLS 设计的能量分析方法,对不同直径、不同跨度的水平生命线在坠落过程中的受力进行了数值计算,并计算水平锚线的安全系数,以此评定系统的可靠性;其次,在 ADAMAS 虚拟样机中建立人体与 HLLS 模型,对佩戴安全绳装置的人体的坠落过程进行模拟。计算与模拟结果表明,在人体坠落过程中作用在锚点以及人体上的冲击力是非常大的,而且冲击现象比较明显,可以用添加缓冲器装置的方法来提高系统的缓冲性能。本文工作对防坠落水平生命线系统的设计,以及坠落防护系统的人机工程学方面的设计具有参考意义。

175 [参考文献] (References)

- [1] 樊超, 姜东民, 段美栋. 高层建筑施工主要事故类型及成因分析研究[J]. 山西建筑, 2015 (19) : 238-23.
- [2] Safety Squared HSE. Health and safety in roof work[M]. UK:HSE, 2012.
- [3] 杨少华. 谈建筑高处坠落事故特点、原因及预防对策[J]. 中国安全科学学报, 1995, 117 (7) : 44-46.
- 180 [4] Riches D. Analysis and evaluation of different types of test surrogate employed in the dynamic performance testing of fall-arrest equipment[M]. HSE Books, 2002.
- [5] Miura M, and Sulowski A C. "Introduction to Horizontal Lifelines." Fundamentals of Fall Protection[J]. International Society for Fall Protection, Canada, 1991, 217-283.
- [6] 黄泽明, 王政源. 高处作业水平安全钢丝绳的选用标准探讨[J]. 广东电力, 2010, 23 (2) : 27-29.
- 185 [7] Wang Q, Hoe Y P, Goh Y M, et al. Evaluating the inadequacies of horizontal lifeline design: case stuies in Singapore[A]. Wang Q. CIB W099 internationl conference on achieving sustainable construction health and safety[C].2014:660-670.
- [8] Yang M G, Wang Q. Investigating the adequacy of horizontal lifeline system design through case studies from Singapore[J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2015, 141(7).
- 190 [9] Baszczynski K, Zrobek Z. Dynamic performance of horizontal flexible anchor lines during fall arrest-a numerical method of simulation[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2000,6(4): 521-534.
- [10] Drabble F, Brookfield D J. Safety of fall arrest systems: a numerical and experimental study[J]. Proceedongs of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2000, 214(10) : 1221-1233.
- 195 [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. GB 8918-2006. 重要用途钢丝绳[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17254-2004. 成年人人体惯性参数[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- 200 [13] 周炜, 易建军, 郑建荣. ADAMS 软件中绳索类物体的一种建模方法[J]. 现代制造工程, 2004 (5) : 38-39.