

机器人 - 人碰撞中人体头部损伤研究

于震¹, 王国勋^{1*}, 冯港², 孙宝龙², 戢一凡²

¹沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

²沈阳新松机器人自动化股份有限公司, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年6月30日; 录用日期: 2026年7月23日; 发布日期: 2026年7月29日

摘要

随着机器人技术在服务和工业领域的广泛应用, 机器人与人碰撞碰撞引发人体损伤的问题日益凸显。头部作为人体最脆弱部位之一, 其人机交互环境下损伤风险评估成为人机安全领域的关键。本文聚焦于机器人 - 人碰撞场景中的头部损伤, 通过LS-DYNA软件进行碰撞仿真分析, 探究不同碰撞参数对头部损伤的影响。实验设置不同碰撞速度, 选取四个不同碰撞方向, 以头部损伤指标HIC等为评价核心依据, 分析碰撞速度与碰撞位置对头部损伤的影响; 通过采取包裹粘弹性材料来降低机器人对人体的伤害。研究结果表明, 碰撞速度与头部损伤程度呈正相关关系, 速度越大, 风险越高; 不同碰撞位置对头部伤害存在显著差异, 头部前后侧碰撞的危害要显著高于两侧。针对本文采用的SN10A型号10 kg负载机器人, 其速度限制为0.5 m/s时不会对人体造成过大伤害。此外, 还验证了在机器人外层包裹粘弹性材料能够有效降低机器人对人的伤害。本文研究可为机器人安全设计、碰撞风险防控以及人机交互安全标准制定提供理论支撑与数据参考, 同时丰富机器人 - 人碰撞的相关研究成果。

关键词

机器人, 人机碰撞, LS-DYNA, 头部损伤评价

Study on Human Head Injury in Robot-Human Collision

Zhen Yu¹, Guoxun Wang^{1*}, Gang Feng², Baolong Sun², Yifan Ji²

¹School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

²SIASUN Robot & Automation Co., Ltd., Shenyang Liaoning

Received: June 30, 2026; accepted: July 23, 2026; published: July 29, 2026

Abstract

With the widespread application of robot technology in service and industrial fields, the issue of

*通讯作者。

文章引用: 于震, 王国勋, 冯港, 孙宝龙, 戢一凡. 机器人-人碰撞中人体头部损伤研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(7): 141-150. DOI: 10.12677/mos.2026.157115

human injury caused by collisions between robots and humans has become increasingly prominent. The head, as one of the most vulnerable parts of the human body, poses a significant risk of injury in human-machine interaction environments, making its injury risk assessment a crucial aspect in the field of human-machine safety. This article focuses on head injuries in robot-human collision scenarios. Through collision simulation analysis using LS-DYNA software, it explores the impact of different collision parameters on head injuries. The experiment set different collision speeds and selected four different collision directions. Using head injury criteria such as HIC as the core evaluation basis, the impact of collision speed and collision location on head injury was analyzed. Reducing the harm of robots to humans by covering them with viscoelastic materials. The research results indicate that there is a positive correlation between collision speed and the severity of head injuries, with higher speeds posing greater risks. Significant differences exist in head injuries caused by collisions at different locations, the hazards of frontal and rear collisions are significantly higher than those of side collisions. For the SN10A 10 kg payload robot used in this article, its speed limit of 0.5 m/s will not cause excessive harm to the human body. In addition, it was also verified that wrapping the robot in viscoelastic materials can effectively reduce the harm the robot may cause to humans. This study provides theoretical support and data reference for robot safety design, collision risk prevention and control, as well as the formulation of human-robot interaction safety standards. It also enriches the research findings related to robot-human collision.

Keywords

Robot, Human-Robot Collision, LS-DYNA, Head Injury Assessment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科技的发展,机器人的应用领域逐渐拓宽,上至军事航天,下至民用民生。科技是一把双刃剑,工业机器人给人们带来生产便利的同时,也存在一些安全隐患问题。国际标准化组织 ISO [1]规定,相关人员需要远离工业机器人,但对于人机协同机器人,无法在根源上分离相关人员和机器人。因此,研究人机交互安全这一领域已经成为机器人领域的一个热点。2023 年 7 月,特斯拉加州弗里蒙特工厂的技术员亨特多布勒在协助拆卸机器人时,机械臂突然且毫无警告似的释放,以相当于 8000 磅配重的巨大力量击中他的身体,导致其失去意识,造成其多处骨折、脑震荡及神经损伤。机器人与人之间的碰撞可能带来不容忽视的伤害,在力量和速度的作用下,机器人坚硬的外壳、快速移动的部件都可能成为伤人的利器。

针对人机交互安全领域的一些问题,国内外学者取得了一定的进展。Park [2]等构建了由 5 自由度人体质量-弹簧-阻尼模型与 n 连杆机器人模型组成的耦合碰撞模型,并与 Hybrid III 假人实验数据完成对比验证。陈震宇[3]提出利用 ABAQUS 来建立出一个人机有限元模型来分析人体损伤。吴海彬[4]系统地梳理了人机交互场景下机器人安全性提升的三类核心技术路径,即事前预防主动控制、关节柔顺设计及连杆黏弹性材料包裹,并明确了各类路径对应的安全性评价核心性能指标。福州大学陈建华[5]通过在机械臂上包覆粘弹性材料抑制工业机器人臂与人发生碰撞时的撞击力。赵志向[6]研究在包覆粘弹性材料的机械臂连杆中,选取的粘弹性材料的粘性、弹性系数如何影响碰撞力。孟得山[7]提出基于一种机械臂安全指数和梯度投影法的柔性关节机械臂构型优化方法。目前相关成果主要集中在被动防护结构设计、碰撞检测等方向,为人机交互安全体系搭建奠定了一定基础,但现有研究仍存在明显短

板, 多数研究侧重于防护方案优化, 针对动态撞击工况下人体生物力学响应的定量研究较为匮乏。既往人体碰撞模型过于简化, 难以真实复现碰撞生物力学响应, 且尚未明确可保障人体免受损伤的机器人临界碰撞速度阈值, 无法为机器人运行参数标定、安全管控策略制定提供量化支撑。针对上述问题, 本文旨在探究人机交互环境下的安全速度阈值并采取一定的措施降低对人的伤害, 为人机交互安全领域提供一定参考。

2. 头部生物力学损伤

2.1. 头部损伤形式

作为生物力学的分支, 碰撞人体生物力学致力于研究在高速、短时冲击或者碰撞条件下, 人体在承受力的冲击作用下的真实反应以及自身受伤机理[8], 从统计学角度以及大量实例总结出致使人体受伤标准的指标和危险阈值[9]。通过前人的不懈努力, 进行的大量碰撞实验研究, 以及许许多多的志愿者试验, 才创造出被广泛承认并应用的人体损伤生物力学标准。本文以汽车碰撞领域中人员损伤评价指标为基准, 应用到机器人-人碰撞领域中, 这其中核心逻辑以头部加速度、颅内应力来预估致伤风险, 不受撞击载体类型约束, 为人机碰撞仿真提供标准化评价基准。

人体头部损伤[10]主要类型包含颅骨损伤、脑外伤以及血管与颅内出血。颅骨损伤即为颅骨骨折, 颅骨骨折主要包含颅底骨折和颅盖骨骨折, 由局部高压或者高速冲击造成。脑外伤分为局灶性脑外伤和弥漫性脑外伤。弥漫性脑损伤是脑部组织受到的损伤, 包含两种受伤形式, 分别为脑震荡和弥漫性轴索损伤 DAI。局灶性损伤是较为常见的头部损伤形式, 包含脑挫伤和颅内血肿。

2.2. 头部损伤指标

头部损伤指标最早起源于汽车碰撞安全领域, 早期仅依靠撞击加速度来直观判定损伤程度, 这种头部损伤评判方式经常发生误判并且精度不高。随着生物力学与碰撞试验技术进步, 头部损伤准则 HIC 逐步发展完善并成为在人体头部安全领域核心评价指标, 先后衍生出 HIC36、HIC15 等分段判定标准[11], 被广泛纳入人体头部安全规范体系。后续相关研究人员发现, 仅依靠加速度参数难以表征颅脑内部组织的损伤详细状况, 通过引入脑组织压力、剪切应力与冯米塞斯应力等脑组织损伤参数, 判定脑震荡、颅内出血等隐性损伤。

2.2.1. HIC

HIC [12]是在头部损伤力学里使用最广泛的评价标准之一, 二十世纪 50 年代开始, 研究人员在头部损伤生物力学领域, 选择使用从半空中降落尸体, 使头部撞击钢板来研究损伤, 测量加速度并观察是否出现头骨骨折的状况, 最终建立了 Wayne State 耐受性曲线。Versace 利用任意时刻 t_1 和 t_2 ($t_1 < t_2$) 之间的更新了头部损伤标准 HIC, 更进一步加大了上述耐受曲线的适用范围。

t_1 和 t_2 是能够使 HIC 达到最大值的两个时间节点, 在短时间高速碰撞时一般取 15 ms 作为基准。在汽车碰撞领域, 一般将 $HIC = 1000$ 作为头部碰撞致伤的极限值, 当 HIC 超过 1750 时会对人体造成不可逆转的伤害, 直接威胁伤者生命安全。在 C-NCAP 中规定, 当时间间隔取 15 ms 时, 高性能阈值为 500, 低性能阈值则为 700。

2.2.2. 线加速度峰值

测评头部损伤的指标之一是头部加速度峰值[13], 这个指标不需要通过时间来计算, 测量方式较为直接, 对头部的伤害大小只与加速度瞬时峰值有关, 当头部加速度峰值超过 200 g 时, 有可能会造成重度脑损伤。

2.2.3. 最大主应变

脑组织的最大主应变 MPS 解释为在拉伸方向上的应变[14],它能够表现出挫伤和轴索损伤的程度,应变超过最大允许值的占比越大,脑组织发生损伤的风险越大。Erik 等人的研究指出[15],当应变处于 0.15 到 0.25 之间时,可能出现弥漫性轴索损伤 DAI。

2.2.4. 颅内压力

颅脑内部产生的压力也是衡量头部损伤的应力之一[16],相关研究表明,当颅内正压力超过 173 kPa 时,大脑会出现中度损伤,超过 235 kPa 时,极大概率头部出现较重损伤。

2.2.5. Von Mises 应力

脑组织中产生的 Von Mises 应力与承受的应力旋转载荷有关,是剪切应变能的一种形式。当承受的 Von Mises 应力达到了 6 kPa 时,大脑会产生脑挫伤,当承受的 Von Mises 应力大于等于 15 kPa 时,有概率导致脑震荡。

3. 碰撞模型建立

3.1. 人机碰撞模型的建立

分析机器人最有可能撞击人的位置,基本位于机器人的末端,尤其是负载端,因此将碰撞位置定于机器人的负载位置。人体最容易受伤部位为头部,通过机器人和人的相对位置来分析,将人的碰撞位置定为人的头部。在机器人-人碰撞时,人员姿势为站立,无需通过姿态约束来调整假人姿势,通过平移旋转将机器人调整为合适的工况,为缩短仿真时间,机器人模型和假人模型之间的距离应适当调近些,这是为了使仿真时二者的模型可以迅速发生碰撞。调整后的模型如图 1 所示。

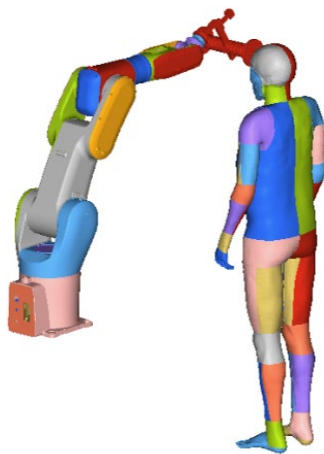


Figure 1. Robot-human collision model
图 1. 机器人-人碰撞模型

机器人模型选用新松机器人有限公司的 SN10A 型号机器人。由于机器人几何模型中包含的零件数量比较多,如果对机器人自身的所有微小的零件都进行网格划分会极大的增大工作量和计算时间,极其影响效率,因此在网格划分时对机器人主要质量集中部位进行网格划分。移除各电机、减速器实体结构及全部连接螺栓、垫片等特征,保留主要承载构件作为仿真主体。电机、减速器采用集中质量点等效替代。根据机器人的结构特点对机器人底座、腰座、大臂、小臂、负载端等主要部位进行网格划分。机器人采用四面体网格划分,经检查,翘曲度和雅可比不满足要求的单元网格占比均小于 0.1%,符合有限元计算

要求。机器人模型主要为金属结构，材料设置为 24#钢材。表 1 为 24#钢的具体参数，在 LS-DYNA 中采用 MAT24 号材料来设置。

Table 1. Robot material parameters

表 1. 机器人材料参数

材料	密度 kg/m^3	弹性模量 GPa	泊松比	屈服强度 MPa
24#钢	7800	210	0.3	275

假人选用由丰田汽车公司研发的有限元假人模型 THUMS，这是一款专门用于人体碰撞安全领域的有限元模型假人，已经经过尸体验证。将 THUMS 假人模型和经过前处理过的机器人模型同时导入 Hypermesh 中。

3.2. 关键参数设置

使用软件环境中的单位，定义重力加速度 $g = 9800 \text{ mm/s}$ ，在本次设置中，机器人速度的方向是沿着 Z 轴转动，赋予机器人不同的初始速度。在人机碰撞中接触能够影响人机接触模型中力的传递，因此定义碰撞中的人机接触也是十分重要的，这一操作能避免 LS-DYNA 计算时出现网格穿透或者负体积报错。定义机器人和假人的接触为面与面接触，从接触面设置为假人模型的表面皮肤单元，主接触面则为机器人碰撞的部件。除了面与面接触，还需要分别设置机器人和假人各自的自接触，自接触可以在机器人或者假人的内部中传递力。机器人的速度由关键字设置，将转动的机器人部件设置单元集合，在此基础上对机器人施加沿着 Z 轴转动的速度。

4. 人机碰撞结果分析

4.1. 碰撞过程分析

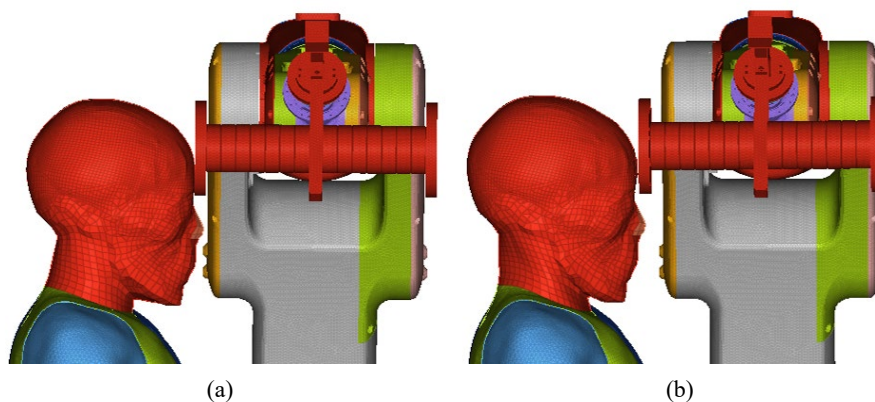


Figure 2. Collision process. (a) 2 ms; (b) 17 ms

图 2. 碰撞过程。(a) 2 ms; (b) 17 ms

设置机器人的初始转动速度为 2.09 rad/s ，即每秒转动 120 度。使机器人在人体头部正前方撞击假人头部，将仿真后结果导入 Hyperview 中进行后处理和数据分析。由于机器人和人体头骨都具有一定的刚性，受撞击时二者形变程度较为微弱，缓冲变形量小，使得碰撞相互作用的持续时间很短，机器人与假人头部不再发生挤压后，人机就开始分离。从 0 ms 开始，假人保持不动，使机器人开始沿着 Z 轴转动，图 2(a)为在第 2 ms 时碰撞开始发生，机器人负载端撞击头部，负载端和人头发生接触，机器人速度逐

渐减小, 头部质心加速度和速度逐渐增大, 脑组织受到碰撞挤压, 因此承受的各项应力也开始逐渐增大, 由于承受了惯性冲击, 头部承受突如其来的冲击力驱动, 脖颈难以瞬间抵消惯性作用, 此时躯干保持原有姿势, 头部承受惯性牵引迅速被迫向后偏转, 进而出现明显的头部后仰现象, 人体重心瞬间向后偏移, 地面给与脚部的支撑力也随之减小, 在惯性与重心变化的双重作用之下, 双脚会由出现轻微抬离地面, 微微腾起的状态。随后机器人速度开始小于假人头部的速度, 随后二者开始逐渐分离, 此时头部已经具备一定的在 X 方向的速度, 图 2(b) 为 17 ms 时机器人和人体头部彻底分离, 后续发展由于头部速度大于机器人速度, 头部和机器人之间的距离越来越大, 至此整个碰撞过程完全结束。

4.2. 头部损伤分析

HIC 和头部质心峰值加速度直观体现头部受到的冲击强度, 颅内压力与最大主应变则直接关联颅脑损伤程度, 因此分别提取这两部分指标来从两个角度来分析人机交互下的人员头部损伤。

图 3 测量假人头部质心的加速度, 进而得到合成加速度和 HIC。可以看到, 在碰撞开始发生之后, 头部质心的加速度迅速上升并达到峰值, 从头部加速度峰值来看, 碰撞后处理得到的 HIC 达到了 1385, 这远远超过了 C-NCAP 对于 HIC 的低限能要求的指标 700, 头部已经达到重度损伤。头部质心合成加速度峰值达到了 222 g, 远超低限能指标 80 g, 过高的瞬时冲击载荷会对颅骨产生极大的机械挤压与冲击作用, 存在明显的颅骨骨折隐患。

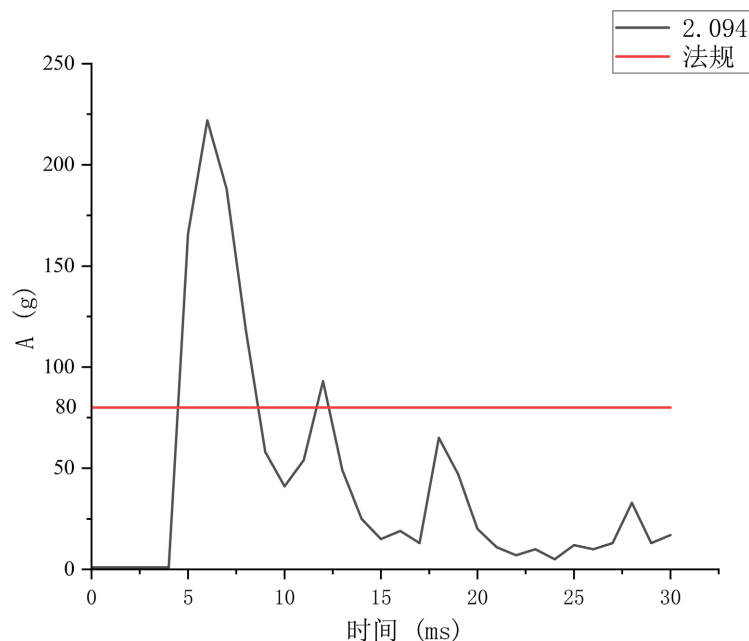


Figure 3. Head centroid acceleration curve

图 3. 头部质心加速度曲线

图 4 通过在有限元后处理软件 Hyperview 中提取 THUMS 人体有限元模型的各项仿真结果, 并进行数据分析, 提取脑组织的应力, 分别输出脑组织颅内压力、最大主应变、Von Mises 应力的云图。得到头部脑组织受力情况。

由颅内压力图 4(a)可知, 颅内压力整体分布呈现由前向后逐渐变小的梯度分布特征, 最大值位于大脑额叶前部, 压力数值沿着脑组织由前往后逐步衰减。通过运动学分析, 由于机器人负载端与人头前侧发生猛烈碰撞, 瞬时冲击载荷经由颅骨快速传导至颅内脑脊液与脑组织, 冲击力会在颅内产生瞬间的压

力波,从撞击点向对侧逐层传播。颅内高压区会直接造成局部脑组织挤压载荷,极易造成脑组织挫伤和局部出血;而颅脑后侧形成的低压区,则会驱使脑组织在惯性作用下反向撞击颅骨内壁,进而形成颅内对冲伤。在本工况下,脑组织的颅内正压力峰值达到了 182 kPa,此数值已经大于生物力学中大脑中度损伤阈值 173 kPa,满足中度创伤性脑损伤的判定条件。

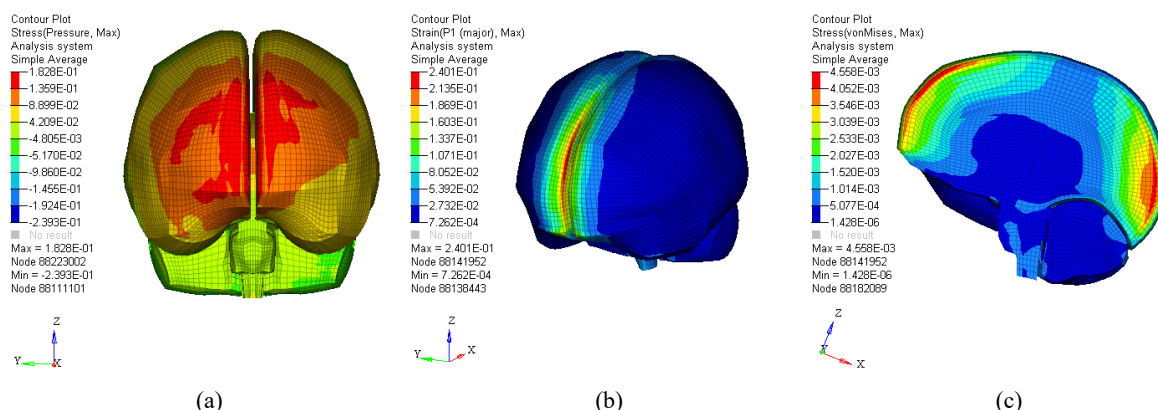


Figure 4. Stress nephogram of brain tissue. (a) Pressure; (b) P1; (c) Von Mises.

图 4. 脑组织应力云图。(a) 颅内压力; (b) 最大主应变; (c) Von Mises 应力

图 4(b)为脑组织主应变云图,头部受撞击时,颅骨的运动与脑组织的惯性运动不同步,脑组织会因为自身惯性滞后于颅骨运动,会在脑组织内产生剪切力和拉伸力,不同于承受颅内压力而导致的局部挤压挫伤,这些拉伸剪切作用力会导致神经轴索被牵拉断裂,进而引发弥漫性轴索损伤(DAI),DAI 特点是发病隐蔽,难以判定,这是创伤性脑损伤中最致命的类型之一。应变集中在大脑中线,该部位神经轴索密集分布,极容易出现损伤,脑组织的最大主应变为 0.27,这项数值要大于该项损伤阈值 0.1,说明大脑中线区域存在显著的轴索损伤风险。

图 4(c)是脑组织承受的 Von Mises 应力,集中发生在脑部前侧和后侧的凹陷区域,其余部分应力较低,主要反映脑组织在与颅骨内表面接触区域的综合应力水平。在承受撞击后,脑组织会因受惯性的影响,在颅骨内壁发生反复碰撞,二者的运动不同步性,会导致在接触界面产生挤压应力和摩擦剪切应力。承受的最大的 Von Mises 应力要小于损伤阈值 6 kPa,因此从承受的等效应力的角度判断,脑组织发生脑挫伤的概率较低。

综合三项力学指标结果:该无防护机器人撞击工况下,人体头部主要损伤风险来自脑组织局部高压诱发的脑挫伤与高应变导致的弥漫性轴索损伤,颅骨挤压带来的脑组织挫伤风险较低,这些颅内损伤也验证了前文从 HIC 和加速度峰值角度判断出的人头部损伤。

4.3. 碰撞转速对损伤影响

为探究碰撞速度的影响,将机器人转动速度分别设置为 2.09 rad/s、1.57 rad/s、1.05 rad/s 和 0.52 rad/s 来进行仿真。由表 2 可知,随着机器人撞击速度的增加,人体的头部加速度、Von Mises 应力、颅内压力均升高,人体头部受到的损伤普遍增大,表明碰撞瞬间传递至人体头部的冲击能量与瞬时载荷就越大,头部整体的力学响应显著加剧,颅脑损伤的发生概率与严重程度随之明显上升。四个速度下人体运动学相应均表现出同速度为 2.09 rad/s 时的运动学相应,不同的是由于冲击载荷的大小不同,人机分离的时间也会不同,具体表现为当速度降低时,人机接触的时间会逐渐增加。

当机器人的转动速度降到 0.52 rad/s 时,所有评价指标均出现断崖式下降,各项指标均小于损伤阈值,

碰撞产生的冲击作用较为微弱，基本不会对人体头部造成实质性伤害，人机交互中的人员的安全性能够得到有效保障。因此人机安全防护领域要从速度设计角度进行考虑。

Table 2. The impact of collision velocity

表 2. 碰撞速度的影响

碰撞速度(rad/s)	HIC	加速度峰值(g)	Von Mises 应力(kPa)	颅内压力(kPa)	最大主应变
2.09	1385	222	4.56	182	0.24
1.57	328	146	3.82	139	0.19
1.05	132	117	2.19	57	0.11
0.52	1.4	17	0.44	11	0.02

4.4. 碰撞位置对损伤影响

为探究碰撞位置的影响，对于头部，以相同速度对假人的前后左右四个方向进行撞击，将计算后的仿真结果进行比较。

Table 3. The impact of collision location

表 3. 碰撞位置的影响

碰撞位置	HIC	加速度峰值(g)	Von Mises 应力(kPa)	颅内压力(kPa)	最大主应变
前	1385	222	4.56	182	0.27
后	1529	227	5.38	224	0.27
左	780	194	2.79	144	0.15
右	667	196	2.73	142	0.16

由表 3 可知，从前侧和后侧撞击头部损伤较为接近，从左侧和右侧撞击头部较为接近；四个方向的加速度峰值较为接近，但脑组织承受的应力及应变有着明显的差异，机器人从前侧和后侧撞击人体头部时，人体受伤害的各个指标都显著高于从左侧和右侧撞击人体头部，且机器人从后侧撞击头部时，对人体的伤害是最大的。在即将发生不可避免的机器人 - 人碰撞时，人员应该优先调整身体姿态，尽量避免在头部前后的方向发生碰撞，为机器人安全避障控制和人体安全防护规范提供数据分析和理论参考。

4.5. 粘弹性薄膜保护

粘弹性材料可以吸能减振，可有效缓解冲击，抑制机器人的碰撞力，能够有效耗散碰撞产生的冲击能量。基于该性质，因此决定在机器人的外层包裹一层粘弹性材料，通过这层粘弹性材料来降低机器人对人体头部的伤害。

Table 4. Parameters of viscoelastic rubber material

表 4. 粘弹性橡胶材料参数

材料	密度(kg/m ³)	弹性模量(kPa)	粘性系数(MPa·s)	泊松比
粘弹性橡胶	800	733	29	0.4

橡胶材料的吸能减振效果较好，因此决定采用这种材料包裹在机器人外层来进行仿真实验。粘弹性橡胶材料参数如表 4 所示。机器人的仿真速度设置为 2.09 rad/s，其余均按照此前仿真实验来进行设置。

当在机器人外层包裹的粘弹性材料过于厚重会影响机器人连杆的灵活性,因此这层粘弹性材料不能过厚,决定将保护层的厚度设置为 10 mm。为了减小碰撞区域的网格变形,对包裹的这层材料进行细致的网格划分,来提高计算精度,将粘弹性材料和机器人通过共节点的方式连接到一起。

Table 5. Calculation of viscoelastic outer layer of package

表 5. 包裹粘弹性外层

是否包裹	HIC	加速度峰值(g)	Von Mises 应力(kPa)	颅内压力(kPa)	最大主应变
否	1385	222	4.56	182	0.27
是	100	120	2.63	72	0.15

本次实验设置包裹粘弹性防护层与无防护层两组对照工况,比对两次生物力学损伤指标,具体数据如表 5 所示。包裹粘弹性材料后各个损伤指标数值均下降,说明包裹粘弹性材料能够有效地降低机器人对人体的伤害,降低机器人碰撞对人体带来的损伤程度。该防护方案具备良好的安全防护效果,可为机器人的外部安全防护设计提供参考依据。

5. 结论

当机器人碰撞速度为每秒转动 120 度时,根据各项指标来看,人体头部达到损伤。随着碰撞速度的增大,机器人对人体的伤害也越来越大。从碰撞方向角度出发,机器人从前侧和后侧碰撞对人体头部的伤害要显著大于左右两侧对人体头部的伤害且后侧对人体头部的伤害最大。当机器人的转动速度为 0.523 rad/s 时,由于机器人转动半径为 1062.797 mm,对应线速度 $V = 1062.797 \times 0.5236 = 556 \text{ mm/s}$,取一定的安全系数,令机器人线速度为 0.5 m/s 每秒时,对人造成的伤害处于伤害阈值以下,人体不会出现损伤。针对 SN10A 型号的 10 kg 负载机器人,在本文设定的机器人姿态和碰撞工况下,当机器人检测到即将碰撞到人体时,至少需要将速度降至 0.5 m/s,能避免对人体造成过大损伤;在即将发生不可避免的碰撞时,人员应该优先调整身体姿态,尽量避免在头部前后的方向发生碰撞;此外,通过仿真证明了在机器人外层包裹一层粘弹性材料能够有效抑制碰撞力,减小冲击,降低了机器人对人体的伤害。为机器人避障和结构安全设计以及人机交互安全标准制定提供理论支撑与数据参考。

参考文献

- [1] 德国标准化学会. 操纵工业机器人. 安全性: DIN EN 775-1993 [S]. 柏林: 德国标准化学会, 1993.
- [2] Park, J., Song, J. and Haddadin, S. (2014) Collision Analysis and Safety Evaluation Using a Collision Model for the Frontal Robot-Human Impact. *Robotica*, **33**, 1536-1550. <https://doi.org/10.1017/s0263574714000137>
- [3] 陈震宇, 范荣妹. 基于有限元的人机碰撞中人体头颈部安全性研究[J]. 机械工程师, 2016(3): 211-213.
- [4] 吴海彬, 杨剑鸣. 机器人在人机交互过程中的安全性研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(11): 79-86.
- [5] 陈建华. 包覆粘弹性缓冲层的机械臂碰撞过程研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2015.
- [6] 赵志向, 吴海彬. 基于人机碰撞的粘弹性包覆层的参数研究[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(4): 157-160+204.
- [7] 孟得山, 王学谦, 梁斌, 等. 基于头部碰撞等效模型的柔性关节机械臂安全构型优化[J]. 机器人, 2017, 39(4): 523-531.
- [8] 王丽珍, 樊瑜波. 过载性损伤与防护生物力学[J]. 力学进展, 2020, 50(0): 124-168.
- [9] 刘炳坤. 冲击损伤生物力学研究进展[J]. 航天医学与医学工程, 1999(1): 65-69.
- [10] 李明旺. 整车正面碰撞中驾驶员不同姿态损伤分析与防护研究[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门理工学院, 2024.
- [11] 石蓬业. 汽车与摩托车碰撞事故中骑行人员损伤机理研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2023.

- [12] 冯成建. 基于典型交通事故的颅脑损伤力学机制研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 第三军医大学, 2013.
- [13] 英国标准学会. 头部和颈部碰撞, 烧伤以及噪声损伤标准. CEN 头盔指南标准委员会: BS PD CEN/TR 16148-2011 [S]. 布鲁塞尔: 欧洲地理信息标准化委员会, 2011.
- [14] Deck, C. and Willinger, R. (2008) Improved Head Injury Criteria Based on Head FE Model. *International Journal of Crashworthiness*, **13**, 667-678. <https://doi.org/10.1080/13588260802411523>
- [15] Takhounts, E.G., Eppinger, R.H., Campbell, J.Q., Tannous, R.E., Power, E.D. and Shook, L.S. (2003) On the Development of the SIMon Finite Element Head Model. *Stapp Car Crash Journal*, **47**, 107-133. <https://doi.org/10.4271/2003-22-0007>
- [16] 孔春玉. 车辆碰撞行人事故与损伤流行病学调查研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2010.