

中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 43202.1—2024/ISO/TR 23482-1:2020

机器人 GB/T 36530 的应用 第 1 部分：安全相关试验方法

Robotics—Application of GB/T 36530—
Part 1: Safety-related test methods

(ISO/TR 23482-1:2020, Robotics—Application of ISO 13482—
Part 1: Safety-related test methods, IDT)

2024-08-23 发布

2025-03-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 试验条件 2

 4.1 概述 2

 4.2 环境条件 2

 4.3 试验行走面 2

 4.4 试验人员的安全 2

5 试验样品的选择 3

6 物理危险特性试验(通用) 3

 6.1 用户可触及部件的电压 3

 6.2 声学噪声 5

 6.3 表面温度 6

7 物理危险特性试验(用于移动机器人) 7

 7.1 碰撞中的伤害参数 7

 7.2 测试与机器人有意/无意接触的力的控制 9

8 物理危险特性试验(用于约束型身体辅助机器人) 10

 8.1 原则 10

 8.2 仪器 11

 8.3 步骤 13

 8.4 通过/失败准则 14

9 耐力特性试验(通用) 14

 9.1 承受环境温度/湿度波动及其相结合的振动 14

 9.2 运动的耐用性(用于移动机器人) 16

10 耐力特性试验(用于移动机器人) 18

 10.1 耐碰撞冲击 18

11 静态稳定性试验 18

 11.1 原则 18

 11.2 仪器 19

 11.3 步骤 19

 11.4 通过/失败准则 19

12 运动部件的动态稳定性试验(用于移动机器人) 19

12.1 原则 19

12.2 仪器 19

12.3 步骤 20

13 行走的动态稳定性特性试验(用于移动机器人) 20

13.1 概述 20

13.2 平坦表面上的稳定性试验 21

13.3 倾斜表面的稳定性试验 22

13.4 台阶和间隙的稳定性试验 26

13.5 通过/失败准则 30

14 安全相关控制功能的试验(通用) 30

14.1 电敏防护设备(ESPE)集成试验 30

14.2 湿滑环境下的运行试验 33

14.3 电磁抗扰度 33

15 对地面上与安全相关的障碍物的响应(用于移动机器人) 34

15.1 保护性停止距离 34

15.2 安全相关速度控制中的距离和速度 36

15.3 凸面地形前停车距离 37

15.4 凹面地形前停车距离 39

16 安全相关定位和导航试验 41

16.1 原则 41

16.2 仪器 41

16.3 步骤 42

17 自主决策和动作的可靠性试验(通用) 42

17.1 概述 42

17.2 对象识别 42

18 命令装置(通用) 43

18.1 命令装置连接、断开或重新连接时的安全操作 43

18.2 对多个或意外命令装置的响应 43

18.3 当无线或可拆卸的命令设备失去通讯时的安全操作 44

19 试验报告 45

附录 A (资料性) 评估试验结果的信息 46

附录 B (资料性) 人造真皮及皮下组织的机械特性 56

附录 C (资料性) 用于自平衡载人机器人的无人驾驶试验的假人 57

附录 D (资料性) 试验报告格式示例 59

附录 E (资料性) 替代皮肤片上的测量试验和损伤观察 62

参考文献 64

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/Z 43202《机器人 GB/T 36530 的应用》的第1部分。GB/Z 43202 已经发布了以下部分：

- 第1部分：安全相关试验方法；
- 第2部分：应用指南。

本文件等同采用 ISO/TR 23482-1:2020《机器人 ISO 13482 的应用 第1部分：安全相关试验方法》。文件类型由 ISO 的技术报告调整为我国的国家标准化指导性技术文件。

本文件做了以下最小限度的编辑性改动：

- 标准名称中，用 GB/T 36530 代替“ISO 13482”，以便与现有标准化文件协调。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国机器人标准化技术委员会(SAC/TC 591)归口。

本文件起草单位：北京机械工业自动化研究所有限公司、北京联合大学、河北工业大学、中国科学院沈阳自动化研究所、遨博(江苏)机器人有限公司、苏州大学、北京邮电大学、哈尔滨思哲睿智能医疗设备股份有限公司、中国软件评测中心(工业和信息化部软件与集成电路促进中心)、纳恩博(北京)科技有限公司、浙江大学、重庆鲁班机器人技术研究院有限公司。

本文件主要起草人：杨书评、邹莹、韩旭、李志海、王嘉、宋仲康、王振华、郭士杰、李海源、杜志江、陈淦萍、袁望坦、庄琳、王恒之、杨灿军、何国田。

引 言

本文件描述了用于验证个人助理机器人安全标准的试验方法。GB/T 36530—2018(ISO 13482:2016)总结了个人助理机器人的安全要求,本文件旨在促进 GB/T 36530—2018 的应用。本文件提供了检验是否符合 GB/T 36530—2018 要求的试验方法的指导,与 GB/T 36530—2018 中描述的其他验证和确认方法一起,用户可根据机器人的设计和使用情况有选择性地使用。

本文件发布时,本文件中描述的试验方法尚未得到实施或广泛评估。由于全球范围缺乏能够进行此类试验的试验设施,因此无法进行正式的循环测试。因此,建议本文件的用户谨慎地进行测试。

GB/Z 43202 旨在指导个人助理机器人安全标准 GB/T 36530—2018 的实施,由两个部分组成。

- 第 1 部分:安全相关试验方法。旨在提供验证是否符合 GB/T 36530—2018 要求的试验方法。
- 第 2 部分:应用指南。旨在为风险评估和风险减小经验有限的用户提供附加的指导。

机器人 GB/T 36530 的应用

第 1 部分:安全相关试验方法

1 范围

本文件描述了能够用于测试个人助理机器人的试验方法,以满足 ISO 13482 中定义的个人助理机器人的安全要求。本文件适用的机器人与 ISO 13482 中描述的目标机器人完全相同。

制造商依据机器人设计和使用时的风险评估来确定所需的测试和适当的测试参数,该风险评估能确定除本文件中包含的测试和测试参数外,其他哪些测试和测试参数也是可以接受的。

本文件中,并非所有试验方法都适用于所有类型的机器人。标记为“通用”的试验方法适用于所有个人助理机器人。对于其他试验,标题表明该试验能够适用于哪些类型的机器人(例如“适用于可穿戴机器人”或“适用于移动机器人”)。

一些试验方法也能够通过使用其他适用的标准来代替,即使这些标准未在本文件中列出。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 36530—2018 机器人和机器人装备 个人助理机器人的安全要求(ISO 13482:2014,IDT)

3 术语和定义

GB/T 36530—2018 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

自主能力 autonomy

基于当前状态和感知信息,无人为干预地执行预期任务的能力。

[来源:GB/T 12643—2013,2.2]

3.2

操作员 operator

指定从事个人助理机器人的参数和程序更改,并且启动、监控和停止等预期操作的人员。

[来源:GB/T 12643—2013,2.17,有修改——增加了“从事参数和程序更改,并将“和机器人或机器人系统”替换为“个人助理机器人的”。]

3.3

电敏保护设备 electro-sensitive protective equipment; ESPE

一起工作时可起到保护跳闸或存在感应作用的装置和/或元件的集成,其组成至少包括:

——一个感应装置;

——控制/监视装置;

——输出信号开关装置和/或安全相关的数据接口。

注 1：与 ESPE 或 ESPE 本身相关的安全控制系统还可能包括辅助开关装置、静音功能、停止性能监视器等。

注 2：与安全相关的通信接口可能与 ESPE 集成在同一机柜中。

[来源:GB/T 19876—2012,3.1.4,有修改——增加“和/或与安全相关的数据接口”,并且原来的注由注 1 和注 2 代替。]

4 试验条件

4.1 概述

本章描述在室内使用的机器人的典型操作条件。如适用,所有试验均在最坏的操作条件下进行。

除非另有规定,否则机器人为完全组装、充满电,并且所有的试验都按照制造商的测试规范操作,所有自诊断试验均圆满完成。

4.2 环境条件

以下环境条件适用于所有试验:

——环境温度:10℃~30℃;

——相对湿度:0%~80%。

如果制造商规定的环境条件超出了给定条件,则在试验报告中声明。

4.3 试验行走面

除非制造商另有规定,否则测试行走面的摩擦系数在 0.75~1.0 之间(见 ISO 7176-13)。

4.4 试验人员的安全

4.4.1 概述

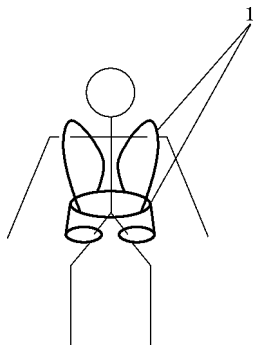
在准备和进行验证和确认测试的过程中,尽可能保护参与试验的人员,免受来自机器人和试验仪器引起的任何风险。当试验引发碰撞和不稳定等危险状态时要特别注意。

如果可能,在机器人附近无人的情况下进行远程测试。如适用,使用假人模拟人员的存在和干预。

如果不能用假人或自动装置代替测试人员,则要进行风险评估,以识别试验过程中可能发生的危险。如必要,建议试验人员穿戴保护设备,以减小碰撞和跌落的风险。

4.4.2 安全带

载人机器人和身体辅助机器人的试验操作员面临跌落的风险。因此,除了常规安全装置如头盔、护膝和护肘之外,若预期的风险是不可容忍的,则通过悬挂在试验行走面上方的支撑结构上的安全带保护试验操作员(见图 1)。

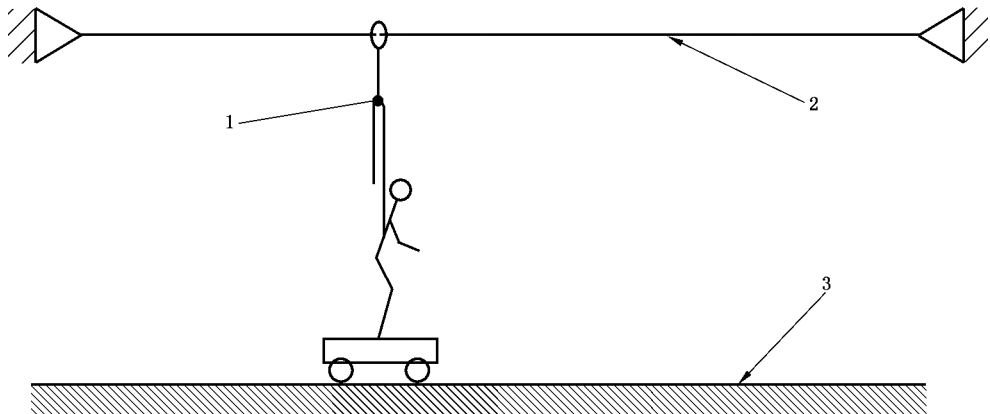


标引序号说明：
1——安全夹克。

图 1 安全带示例

安全带具有足够的可靠性,相当于防坠落的保护带。与支撑结构连接的缆绳具有足够的弹性。另外,其长度调整到防止试验操作员掉落到行走面。支撑上部结构可能是刚性轨道或柔性线,滑轮组在上面运行。滑轮组能被驱动以跟随试验操作员的运动(见图 2)。

注: ISO 16024 规定了用于防止高空跌落的个人防护设备的设计和性能。



标引序号说明：
1——运动装置；
2——导轨；
3——试验行走面。

图 2 支撑上部结构和滑轮组的示例

5 试验样品的选择

试验样品,无论是一个机器人系统还是一个机器人组件,都是机器人目标设计的代表。

注 1: 如果样品损坏,则在试验序列之间需要修理或更换。

注 2: 当试验要求非正常条件时,可能需要有意禁用或调整样品的某些功能。例如,在碰撞冲击试验中,移动类型机器人的障碍物检测传感器被断开。

6 物理危险特性试验(通用)

6.1 用户可触及部件的电压

6.1.1 原则

此试验测量提供给用户可触及部件的电压,以验证设计是否具有防止“与机器人带电部件接触”的

保护功能(见 GB/T 36530—2018 中的 5.3.1.1)。

该试验适用于所有通过电力驱动的机器人。

该试验包括两个步骤:

- a) 检查可触及部件;
- b) 测量可触及部件的供电电压。

该试验使用三种不同的仪器:

- 测试手指;
- 安装在测试手指上的负载传感器或限力器;
- 电压表。

该试验对全新的机器人进行一次,对已经运行多个使用周期(代表机器人的寿命)的测试样品进行一次,仔细检查测试过的样品是否有磨损迹象,这可能产生以下影响之一:

- 电缆断裂导致部件带电;
- 防护破损导致更多部件可触及。

如果本文件中所述的其他试验导致机器人或其某些部件受到严重损坏(例如,碰撞试验),如果新的危险可能已经产生,建议重复此试验。

6.1.2 仪器

该试验所需仪器如下。

- a) 测试手指(根据 IEC 61032 的测试试具代码)

使用铰接试指(试具代码 B)和非铰接试指(试具代码 11),如果需要考虑儿童则使用小试指(试具代码 18 或 19)。

- b) 负载传感器或定制夹具

一种能测量压力的负载传感器或者一种夹具,例如限制器,能够在施加指定的压力后从试件上移除。

- c) 电压表

6.1.3 步骤

该试验的试验步骤如下。

- a) 可触及部件的检查

以下步骤用于识别导电区域中可触及的部件。这些是机器人用户可触及部件。它们在正常使用、维护和检查等过程中都可能被触及(制造商在用户手册中规定用户维护和检查的工作范围)。

- 1) 无需工具、钥匙等即能打开机器人的盖子和门;
- 2) 目视检查可触及区域;
- 3) 通过铰接试指识别可触及性。将试指以不超过 1 N 的力作用到机器人的开口处,通过开口,将试指施加到试指允许的任何深度,并在插入前、插入中和插入后旋转或倾斜到任何位置。如果开口不允许试指进入,则在垂直位置上施加给试指的力增加到 20 N。如果试指随后进入开口,则在角度倾斜的情况下重复试验。

必要时,如果制造商规定,使用非铰接试指,并施加 $10\text{ N} \pm 1\text{ N}$ 或更高的力。

- b) 测量电势

在机器人通电的正常操作条件下(如果需要,在操作过程中),测量依据 a)判定的可触及部件与参考点之间的电压。如果机器人配备了一个保护性接地系统,电位参考点就是保护性接地点或一个等电位点,否则就是功能性接地点或等电位点或一个电源负极端子的电位点。在有电势的地方,在参考点之间施加一个 $2\text{ k}\Omega$ 的标准电阻,如果机器人预期在高湿度下工作,则施加一个 $500\text{ }\Omega$ 的电阻,测量通过该电阻的电流或电压。

如果操作模式影响机器人部件的带电情况,则针对每一种潜在危害的操作模式都进行测量。

c) 试验数据报告

记录试验区域的图表或照片结果。

6.2 声学噪声

6.2.1 原则

该试验测量传递给间距 1 m 通过的人员的声学噪声的最大声级,以及传递给机器人载乘/穿戴用户的噪声,以验证机器人的设计是否防止“危险噪声”(见 GB/T 36530—2018 中的 5.7.1.1)。

该试验适用于所有产生声音的机器人。

该试验包括三个步骤:

- a) 选择行走模式;
- b) 测量通过噪声;
- c) 使用声级计测量在载乘/穿戴时的噪声(如适用)。

测量采用 A 计(加)权声压级,允许存在背景噪声,不一定需要将其消除以进行测量。

6.2.2 仪器

该试验所需仪器如下。

a) 试验行走面

该试验行走面由 10 m 的直线测量区和足够长度的加速区组成,用于将目标机器人加速至其额定速度,行走面的选择模拟机器人最坏的行走环境,行走面的背景噪声被隔离并且至少要比被测量的噪声等级低 10 dB(例如,符合 ISO 11202:2010 附录 B 的 3 级)。从行走面周围物体反射的次级噪声被充分抑制。

b) 精密声级计(1 类)(IEC 61672-1)用于测量经过噪声

按照 6.2.3 b) 描述,通过放置传声器来进行测试。声级计配备连接到频率分析功能的数据记录仪上的传声器。

c) 精密声级计(1 类)用于测量载乘人员听到的噪声

声级计是便携式的,以便在试验过程中由机器人携带。它配备有防风罩,并固定在正常操作情况下机器人的载乘/穿戴用户的耳朵所在的位置。

6.2.3 步骤

该试验的试验步骤如下。

a) 选择机器人行走模式

两种机器人采样声级的行走模式如下:

- 1) 在直线测量区沿直线路径并保持额定速度;
- 2) 沿直线路径,在测量区的起点以额定速度开始运行,然后以最大减速度减速并在测量区的中点停止 1 s,最后以最大加速度加速返回到额定值,直到测量区的终点为止。

当测试移动仆从机器人时,对机器人进行编程以执行以上模式。如果不能对机器人进行编程,则准备手动控制。当测试载人机器人或身体辅助机器人时,载乘或穿戴机器人的试验人员被指示操纵机器人执行这些模式。在后一种情况下,额定速度被认为是制造商规定的最快行走速度。

在测量过程中,检查机器人是否达到规定的测试速度。

b) 为测量通过噪声的声级计安装传声器

在测试行走面的测量区的中间位置放置通过噪声声级计四个传声器,其中两个传声器位于行走面 0.2 m 高度处,间距为 1 m,另外两个传声器固定在 1.6 m 的高度处,间距为 1 m。所有传声器的方向均垂直于机器人的行走路径,并位于距离机器人表面最近点 0.5 m 的垂直平面上。

c) 测量通过噪声

目标机器人执行两种行走模式 a)1) 和 a)2), 每种模式最少重复四次。在试验期间, 记录由四个传声器测量的快速 A 加权的声压级, 每次重复测量的通过噪声由距行走面每个高度水平处的两个传声器采样的最大总体值的平均值确定。每种行走模式的通过噪声按所有重复测量的平均值计算。两种行走模式和两种传声器高度的通过噪声的最大值记录为试验结果。

d) 测量机器人的载乘/穿戴用户听到的噪声

目标机器人执行两种行走模式 a)1) 和 a)2), 每种模式最少重复四次。快速 A 加权的声压级通过传声器测定, 在试验正常操作期间, 该传声器放置固定在机器人的载乘/穿戴用户耳朵所在的位置。在每种机器人模式下, 机器人的载乘/穿戴用户所听到的噪声按所记录的声压最大总值的平均值计算。两种行走模式的较高噪声记录为试验结果。

注: 声压级按公式(1)平均。

$$L_m = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

L_m —— 声压级的平均值单位为分贝(dB);

L_i —— 测量为第 i 个数据的声压级单位为分贝(dB);

N —— 数据编号。

6.2.4 通过/失败准则

能参考附录 A 中 A.2 描述的数据定义该试验通过/失败的准则。

6.3 表面温度

6.3.1 原则

该试验测量机器人的表面温度, 以验证防止“极端温度”的设计(请参阅 GB/T 36530—2018 中的 5.7.4.1)。

该试验适用于所有机器人。

试验过程包括三个步骤:

- a) 检查可触及部件;
- b) 使机器人在最大额定功率下运行;
- c) 使用热成像仪或热电偶测量机器人部件的表面温度。

6.3.2 仪器

该试验所需仪器如下。

- a) 测试指(按照 IEC 61032 的测试探针代码分类)

使用铰接试指(试具代码 B)和非铰接试指(试具代码 11), 如果需要考虑儿童则使用小试指(试具代码 18 或 19)。

- b) 温度测量装置

——如果事先不知道最高/最低温度点, 或在短时间内要测量多个温度点, 则使用热成像仪;

——如果要测量的区域较小, 则能使用点温度计。

如果事先确定了测量点, 则能够使用热电偶。最好使用较薄的规格, 以避免热量通过热电偶传递。

6.3.3 步骤

为了确定最高温度, 需要在制造商规定的最高允许环境温度下进行试验。如果还需要低温, 则需要在最低允许环境温度下重复试验。该试验的步骤如下。

a) 检查可触及部件

在用户正常使用、维护或检查等过程中,目标机器人的用户可触及部件通过以下步骤进行识别(制造商的用户手册规定用户正常使用范围、维护、检查等信息)。

- 1) 无需工具、钥匙等工具即能打开机器人的盖子和门;
- 2) 目视检查可触及区域;
- 3) 通过铰接试指判断可及性。

必要时,使用非铰接试指施加制造商规定的或 $10\text{ N} \pm 1\text{ N}$ 的压力。

b) 目标机器人在负载下的连续运行

在最坏的通风条件下进行该试验。可拆卸的盖子安装在机器人上,并且门关闭。当机器人上的负载或乘客可能会干扰散热时,则负载或乘客要在场,或以其他方式达到等效条件。选择最坏通风条件下测试危险的低温。

根据机器人的类型,执行以下设置和操作。

- 1) 移动仆从机器人或载人机器人:以最大额定负载连续运行,直到满足以下条件之一:
 - 达到规定的连续运行时长;
 - 温度上升或下降后达到平衡;
 - 机器人充满电的电池耗尽。
- 2) 身体辅助机器人:在无任何特殊附加装置的情况下,重复制造商规定的、用户正常使用的动作,并且温度达到热平衡。或者使机器人连续运行,直到机器人上已充满电的电池耗尽为止。

c) 表面温度测量

测量可触及部件表面温度的最高/最低点。在机器人达到热平衡条件或停止移动后,测量立即进行,特别对于封闭部件,在打开盖子或门后 1 s 内开始测量。在温度发生明显变化之前,测量读数在短时间内是稳定的。当使用热成像仪时,连续采样在 5 s 内完成。

如果主动通风停止后机器人变得更热,则在关闭机器人的电源之后要连续监测温度。

6.3.4 通过/失败准则

能参考 A.3 描述的数据定义试验通过/失败的准则。

7 物理危险特性试验(用于移动机器人)

7.1 碰撞中的伤害参数

7.1.1 原则

该试验测量替代载乘人员和行人的人体测试用假人与机器人碰撞过程中所受的力、位移、速度和加速度,以验证设计是否能够防止“与安全相关的障碍物碰撞”引起的风险(请参阅 GB/T 36530—2018 中的 5.10.8),可能测量压力和其他相关的物理量。

注:能采用 GB/T 36008—2018 中 A.3 的疼痛阈值。

该试验适用于所有可移动的机器人。

该试验包括三个步骤:

- a) 预处理和设置;
- b) 碰撞和测量;
- c) 数据处理。

该试验使用三种仪器:

——防撞护栏;

- 行走面；
- 测试用假人。

机器人撞击一个假人,如适用,另一个假人被安装在机器人上作为乘客。

在测试中,需要在风险评估中规定机器人和行人之间发生碰撞的可预期的最高危险情况。

7.1.2 仪器

该试验所需仪器如下:

a) 防撞护栏

该障碍物是一面墙,被搭建成能抵挡机器人的碰撞并保持与机器人行进方向垂直的平面。碰撞表面足够坚固,能够忽略由于碰撞而产生的变形,并且其固定在地板上足够牢固,使得碰撞过程中的移动可以忽略不计。

b) 行走面

该路径是水平且平坦的,长度和宽度足以使机器人达到最大速度。机器人在碰撞时与接触行走面部分的摩擦系数基于 ISO 7176-13。

c) 人体测试用假人

人体的生物力学特征(尺寸、重量等)要尽可能地反映出来,以便能够正确测量估算伤害所需的力、压力、力矩、位移、速度、加速度和其他相关物理量。

注:选择假人的类型根据指定使用环境中预期的人员尺寸和体重。例如,能够在试验中使用以下测试用假人。

——乘客假人:选择符合美国联邦法规第 49 章第 572 部分第 E 小节所规定的 Hybrid III 测试用假人,代表成年男性第 50 百分位。如有必要,在手臂中添加力传感器。

——行人假人:对于成年人来说,选择符合美国联邦法规第 49 章第 572 部分第 O 小节中规定的 Hybrid III 测试假人,代表成年女性的第 5 百分位,如有必要,在手臂中添加力传感器。对于儿童,选择符合联合国法规第 44 号附录 8 中规定的 Q6 测试假人。

测试用假人能穿鞋,也能穿棉衬衫和裤子。调整测试假肢的关节的刚度,使其在水平放置时能够维持其自重。

Hybrid III 测试假人是为高能碰撞而开发的,GB/T 36008 中描述的具有生物力学特性的测试设备与试验方法可能考虑一起使用。

7.1.3 步骤

该试验的试验步骤如下。

- a) 假人在规定的室温下放置,以稳定其温度,使其达到假人的生物保真度所需的温度。
- b) 接通电源时,试验在机器人正常的运行条件下进行,或者在关闭电源的情况下,通过外部驱动力模拟机器人的正常运行。
- c) 机器人的负载设置为最大。如果是载人机器人,则根据制造商规定的安装方法装载假人。对于携带负载的机器人,按照制造商规定装载负载。
- d) 机器人在加速区被加速到规定速度,并与模拟行人的假人发生碰撞。碰撞要求如下。
 - 1) 在以下每种情况下,至少进行四次试验:第一种情况是在碰撞期间和碰撞后,除行走面和机器人外,没有护栏障碍物约束假人运动;第二种情况是假人在碰撞前与护栏障碍物接触;第三种情况是没有约束的假人在碰撞期间和/或碰撞后被压靠在护栏障碍物上。
 - 2) 模拟行人的测试用假人直立放置在机器人行走路径的中心,与机器人碰撞之前需要保持直立的姿态。针对假人和机器人碰撞的每个方向进行测试,即面对机器人碰撞、背对机器人碰撞以及侧面碰撞。碰撞后,假人的移动不受护栏、行走面和机器人以外任何东西的约束。
 - 3) 机器人的总行走方向为前进方向。但是,对于能够沿除前进方向以外的方向移动的机器人,尤其是如果存在一种碰撞方向,对行人的预期伤害严重程度大于或等于前进方向。

那么针对此类方向进行测试,要特别注意机器人的结构和形状、行走速度和人员载乘的负载状况。

- e) 如果机器人上有人,则进行与护栏障碍物碰撞的测试。机器人在加速区加速到规定速度并与护栏障碍物碰撞。对于能够沿除前进方向以外的其他方向移动的机器人,如果存在碰撞方向,在该方向上车载人员的载荷大于等于前进方向,则对此类方向进行测试。要特别注意机器人的结构和形状、行走速度和人员载乘的负载状况。
- f) 根据 SAE J211-1 测量碰撞中的假人各部分的机械参数。测量的物理量如下:
 - 1) 头部的加速度(纵向、横向和垂直方向);
 - 2) 头的角速度(大致重心);
 - 3) 颈部轴向力;
 - 4) 颈部弯矩;
 - 5) 胸部移位;
 - 6) 骨盆上的负载;
 - 7) 在腿上的负载;
 - 8) 在手臂上的负载。
- g) 检查是否达到规定的试验速度。
- h) 为了防止假人的滞后效应,需要遵守由假人制造商规定的每次测试之间的时间间隔。

7.1.4 通过/失败准则

能参考 A.4 描述的数据定义试验通过/失败的准则。

7.2 测试与机器人有意/无意接触的力的控制

7.2.1 原则

此试验测量安全相关障碍物与机器人之间的有意/无意物理交互过程中的接触力/冲击力,接触力/冲击力通过风险评估来确定,以验证接触力/冲击力的量不超过通过安全性验证所适当选择的值。安全验证数据能够由 GB/T 36008 提供,如适用,也能够从其他来源的一些数值提供,包括正在进行的人机交互安全数据相关研究活动的结果(请参阅 GB/T 36530—2018 中的 4.3 和 5.10.9.1)。

该试验适用于所有使用力控制来减小风险的个人助理机器人。

7.2.2 仪器

该试验所需仪器如下:

a) 接触片

代表安全相关障碍物并模拟安全相关障碍物柔顺性的接触件(例如,对于人体而言,是 GB/T 36008—2018 附录 A 中规定的某个弹性系数)。

b) 测力传感器

用于测量接触力的传感器,作用在接触件上。它的响应速度足够快,以测量接触过程中的脉冲。

c) 压力传感器

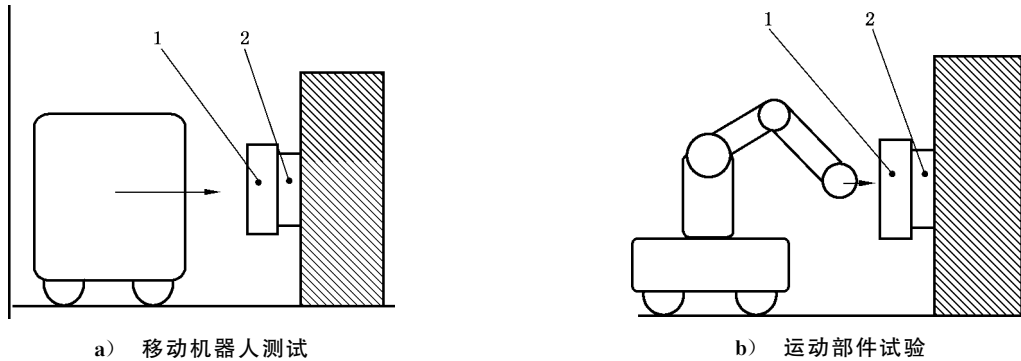
用于测量接触区域上压力分布的传感器。如果测量接触压力,则使用它,并且它的响应速度足够快,以测量接触过程中的脉冲。

7.2.3 步骤

该试验的试验步骤如下。

- a) 接触片固定在坚硬的墙体上。压力传感器固定在测试件的接触面上或者固定在机器人上。
- b) 激活机器人的力控制。

- c) 为了测量移动机器人的行走力,将机器人沿朝向接触片方向线路放置,并留有足够的距离,以使机器人加速到其最大速度,见图 3a)。在对机器人的运动部件进行力控制的情况下,将机器人放置在接触片的前面,见图 3b)。
- d) 为了测量机器人运动部件的力,使该部件冲着接触片运动,见图 3b)。
- e) 为了测量移动机器人的行走力,由机器人接触接触片。为了测量机器人运动部件的力,则由部件接触接触片。
- f) 记录接触力。
- g) 将步骤 c)~f)至少重复四次。



标引序号说明:

- 1——测力传感器;
- 2——接触片。

图 3 力控制测试

7.2.4 通过/失败准则

能参考 A.4 描述的数据定义该试验通过/失败的准则。

8 物理危险特性试验(用于约束型身体辅助机器人)

8.1 原则

此试验旨在测量约束型物理辅助机器人与人体皮肤的接触表面所产生的相互作用力、压力和位移/速度,以确保机器人正常操作过程中对“用户的身体压力或拉力”降至最低(见 GB/T 36530—2018 中的 5.9.2.1)。

此试验适用于穿戴在人体上的机器人,与人体有一个或多个接触表面,并且在这些皮肤区域上存在应力集中的可能。

试验过程包括以下步骤。

- a) 定义人体最大负载的接触状态和模式。在此试验期间,穿戴好机器人,操作员会遵循预定的周期性运动模式。
- b) 准备一个模拟人体皮下组织的测试片,将该测试片放置在身体辅助机器人的袖带(例如上/下肢,腰部等)的下方,必要时,将猪皮固定在袖带和模拟测试片的表面之间。
- c) 如必要,以与步骤 a)中定义的相同接触状态来复制施加在模拟试件上的最大/平均负载模式。

上述试验过程的说明见图 4,其中试验流程分为两种情况:

- 如果压力集中区域能被识别和监视,则测量力/压力;
- 如果压力集中不能被很好地监控,则在 b)中观察模拟测试片的损坏。

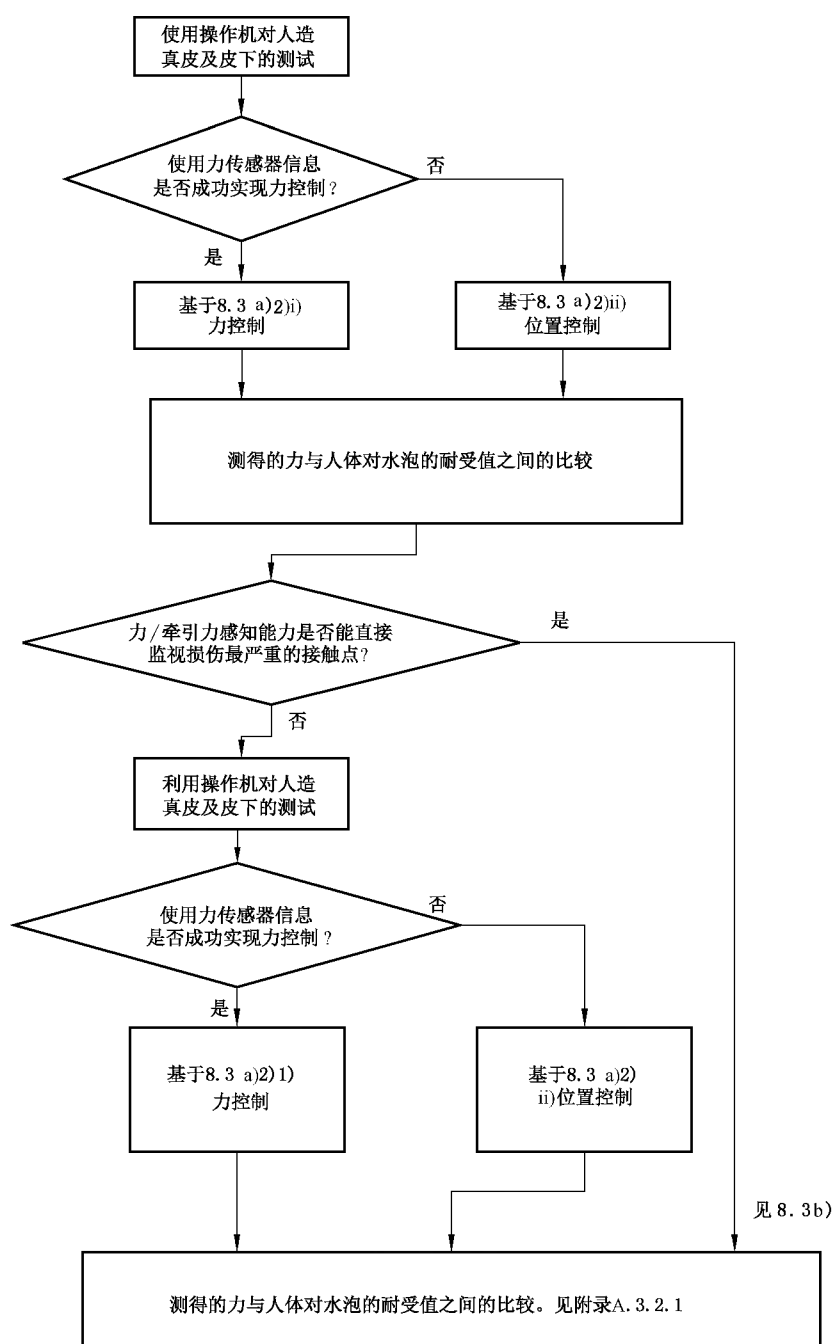


图 4 试验流程

8.2 仪器

该试验的仪器如下：

a) 力传感器

使用一个足够小的力传感器来测量接触力/牵引力，以便观察最大牵引力，例如：力传感器的尺寸为 $10 \times 10 \text{ mm}^2 \sim 20 \times 20 \text{ mm}^2$ 。

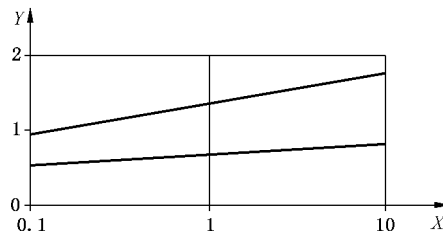
b) 具有真皮和皮下组织的人造皮肤的假人

所关注假人的身体部位的形状设计旨在复现机器人的典型用户该部位的形状。假人由金属、木材

和塑料等刚性材料制成。假人的表面以这样的方式构建,其形状被模拟为连接身体辅助机器人袖带的人体部位的表面轮廓。如果将袖带附接到大腿等光滑的人体部位,则能使用线性插值简化假人的形状以填充人体的顶部和底部形状之间的间隙。

在假人表面上安装一层与人体皮肤真皮和皮下组织(以下简称“人造真皮和皮下组织”)机械特性相似的人造皮肤。评估其机械特性以验证剪切存储模量 $G'(f)$ 和剪切损耗模量 $G''(f)$ 及其可接受的变化,如图 5 和图 6 所示。模量是频率的函数,范围从 0.1 Hz 到 10 Hz,具有这种特性的人造真皮和皮下组织的假人,能够通过使用聚氨酯凝胶材料、丙烯酸胶带和伤口敷料来获得。附录 B 列举了多层构造的人造真皮和皮下组织的例子。

注:粘弹性材料中的剪切存储模量和剪切损耗模量测量值分别代表弹性部分的存储能量和代表粘性部分热量耗散的能量。

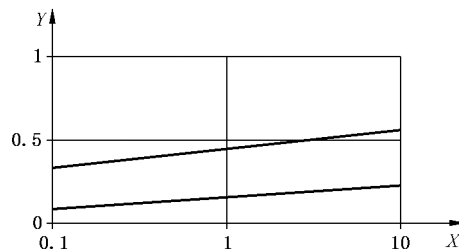


标引符号说明:

X —— 频率(Hz);

Y —— G' (损耗模量)(MPa)。

图 5 存储与损耗模量 $G'(f)$



标引符号说明:

X —— 频率(Hz);

Y —— G'' (损耗模量)(MPa)。

图 6 存储与损耗模量 $G''(f)$

另外,通过在人造真皮表面附上替代皮肤片,该试验方法(见附录 E)能够用作皮肤由于压力而产生水泡的验证试验。

假人被固定在基座上,以便在操作机施加力时不移动。

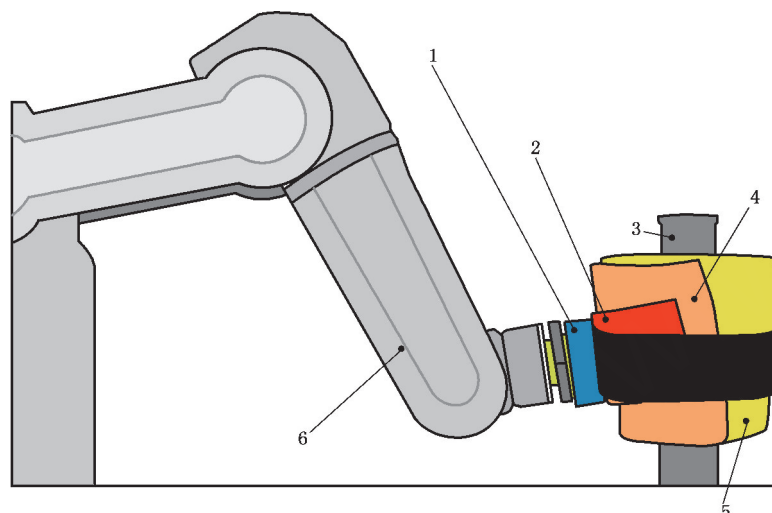
c) 具有力/压力感应功能的袖带

构造具有力感应能力的袖带,该袖带的形状模拟身体辅助机器人的原始袖带,至少要测量接触表面的剪切力/压力。建议还要测量与皮肤损伤有关的法向力/牵引力。使用配备有分布在袖带内部的多个力传感器的袖带。

d) 具有袖带移动能力的操作机

一个能够再现袖带单轴/多轴运动的操作机抓住通过 a)中所述的具有力感应能力的袖带(见图 7),根据先前确定的位移数据相对于皮肤反复移动,操作机的自由度可能少于 6 个,只要能再现必要的运动。

多轴力传感器安装在机器人的机械接口和袖带之间。



标引序号说明：

- 1——力传感器[如果未嵌入袖带中(见 8.3b)]；
- 2——袖带配有力传感器；
- 3——基座；
- 4——如有需要,插入替代的皮肤片；
- 5——覆盖着人造真皮和皮下组织假人；
- 6——具有袖带移动能力的操作机。

图 7 操作机抓住覆盖上/下肢的袖带

e) 袖带运动模式设计

预先按机器人的预定用途(例如,站立和坐下,步行或抬起物体)设计运动模式。通过将 c)描述的袖带应用于机器人的测试用户,并按 8.3a)所述的监控力模式,能获得典型交互作用力模式。

8.3 步骤

该试验的步骤如下。

a) 人体部位与袖带之间的力模式的获取

通过 b)2)中描述的过程获取力模式,以备以后用作参考输入数据。在人体部位和袖带之间的接触表面处获得该模式的步骤如下描述。

1) 可穿戴机器人

一个用户穿戴机器人,其袖带已更改为 8.2c)中所述的仪器式袖带。该试验将基于以下假设进行:假设用户拥有典型用户的平均身体尺寸,按照 ISO 7250-1 或制造商的规定。如果对目标机器人使用者的身体大小施加了限制,则能与制造商协商条件的情况下进行修改。

2) 监视机器人袖带上的运动模式

用户穿戴机器人,机器人以典型的使用模式和用户一起移动。当用户移动时,记录仪器式袖带作用于用户皮肤的力/牵引力或相对运动。在这种情况下,使用人体监控装置,如运动捕捉系统记录相对运动,按照制造商规定选择最大值或者平均值进行监视。

b) 测试

选择两个测试用例中的任何一个进行机器人袖带的安全验证。试验流程见图 4。如果力/牵引感知能力能直接在接触点检测,且在该点损伤变的严重时,则不需要此测试,见图 4。以下试验顺序仅适

用于测量人造真皮及皮下组织的剪切力/牵引力,见 b)2)。替代皮肤的试验在附录 E 中进行了描述。

1) 准备

假人的身体部位覆盖一层人造真皮和皮下组织,下面牢固地固定在底座上。假人按原样进行试验。

附着区域的复制:具有力/牵引感知能力的机器人袖带安装在操作机的机械接口上,并附着在人造真皮及皮下组织的表面和下面。

2) 测量

袖带在覆盖的人造真皮及皮下组织上摩擦,直到最大值/平均值的变化变得足够小,以显示统计上稳定的接触运动状态。

c) 数据记录

按照以下步骤进行处理和记录数据:

记录交互作用力模式数据,如 b)2)或可能在 a)2)中所述,在 8.2e)中定义的规定运动下,以便稍后与安全验证数据进行比较。耐水泡特性的示例见图 A.1。

8.4 通过/失败准则

能参考 A.4.3.1 描述的数据定义该试验通过/失败的准则。

9 耐力特性试验(通用)

9.1 承受环境温度/湿度波动及其相结合的振动

9.1.1 概述

该试验检查机器人在暴露于环境条件后的可见损坏(例如侵蚀或腐蚀)和功能损失(例如控制系统的异常),以验证“在其整个设计寿命中的耐用性”(见 GB/T 36530—2018 中的 5.11.1)。

该试验适用于所有机器人,但是振动试验只能小心地应用于身体辅助机器人,因为它们会受到用户生物力学的影响,很难测量。

该试验包括两个步骤:

- a) 将机器人置于模拟环境中;
- b) 记录损坏和功能损失。

能够测试的环境条件包括温度、相对湿度、振动及其任意组合。能够使用单个要素或组合要素进行试验。通过组合试验的机器人被视为分别通过了每个要素的试验。

9.1.2 温度/湿度试验

9.1.2.1 在一定的高/低温下进行测试

该试验旨在测试机器人在高/低温下的操作和贮存能力。所使用的两种试验方法是温度突变法和温度渐变法。详细信息见 IEC 60068-2-2。

试验条件:

- 温度;
- 暴露时间;
- 温度变化率;
- 试验公差。

试验条件的参数见 IEC 60068-2-2。

试验仪器见 IEC 60068-2-2。

9.1.2.2 温度变化试验

该试验旨在测试机器人在温度一直变化的环境中的操作和贮存能力。

有两种试验方法。

——温度在一定时间内迅速变化

试验步骤、条件和注释的详细信息见 IEC 60068-2-14:2009(方法 Na)。

——温度以预定速率变化

试验步骤、条件和注释的详细信息见 IEC 60068-2-14:2009(方法 Nb)。

9.1.2.3 在高温高湿环境中进行试验

该试验旨在测试机器人在相对较高的湿度和恒定温度下的操作、贮存和运输能力。

试验步骤、条件、设备和注意事项见 IEC 60068-2-3。

9.1.2.4 在有明显水的环境下进行试验

该试验旨在测试机器人在明显有水(滴水、冲水和浸水)情况下的操作、贮存和运输能力。

——滴水试验

该试验适用于在使用过程中暴露于降水的机器人。试验步骤、条件、设备和注意事项见 IEC 60068-2-18:2017(试验 Ra)。

——冲水试验

试验步骤、条件、设备和注释的详细信息见 IEC 60068-2-18:2017(试验 Rb)。

——浸水试验

机器人全部或部分浸入水中。试验步骤、条件、设备和注意事项的详细信息见 IEC 60068-2-18:2017(试验 Rc)。

9.1.3 密封试验

试验步骤、条件和注意事项见 IEC 60068-2-17:1994(试验 Qd)。

9.1.4 稳健性试验

9.1.4.1 碰撞和冲击

该试验适用于机器人经受重复性或非重复性冲击的条件。试验步骤、条件、设备和注意事项见 IEC 60068-2-27。

9.1.4.2 粗率操作造成的冲击

该试验旨在评估机器人对由于搬运和操作不当引起的碰撞的抵抗力。试验方法能分为倾跌与翻倒和自由跌落。试验步骤、条件、设备和注意事项的详细信息在 IEC 60068-2-31 中进行了说明。

9.1.5 压力试验

9.1.5.1 常温低压试验

该试验旨在测试机器人在低压和常温下的操作和贮存能力。

试验步骤、条件、设备和注意事项见 IEC 60068-2-13。

9.1.5.2 低温低压试验

该试验旨在测试机器人在低压和逐渐变化的低温下的操作和贮存能力。

试验步骤、条件、设备和注意事项见 IEC 60068-2-40。

9.1.5.3 高温低压试验

该试验旨在测试机器人在低压和高温下的操作和贮存能力。

试验步骤、条件、设备和注意事项见 IEC 60068-2-41。

9.1.6 通过/失败准则

能参考 A.5 描述的数据定义该试验通过/失败的准则。

9.2 运动的耐用性(用于移动机器人)

9.2.1 原则

此试验在连续运动过程中检查机器人的可见损坏(例如,部件的断裂、变形或脱开)和功能损失(例如,控制系统的异常),以评估“其整个设计寿命中的耐用性”(见 GB/T 36530—2018 中的 5.11.1)。

该试验适用于移动机器人,该机器人在运动过程中可能因机械或功能损坏对用户造成伤害。

该试验包括三个步骤:

- a) 设置;
- b) 运动试验;
- c) 检查。

该试验使用三种设备:

- 测试行走面;
- 一个测试假人;
- 一个支撑装置(如必要)。

测试行走面模拟了机器人的预定使用环境,通常使用测试辊或跑步机。

试验假人的规格被确定为最大允许负载或根据预定用户的重量。

9.2.2 仪器

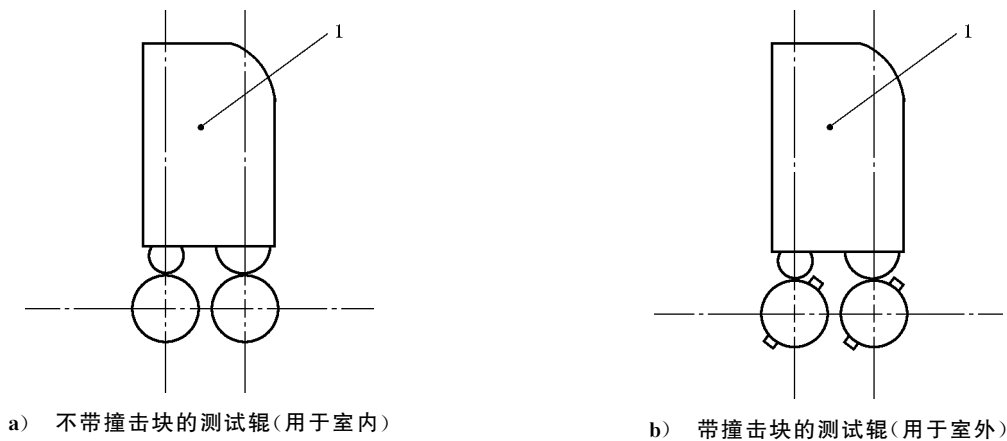
该试验仪器如下:

- a) 试验行走面:用于模拟预定使用环境的无限长的模拟平坦行走面

下列选项模拟无限长的平坦行走面。

- 测试辊

如果机器人接触行走面小的区域不受辊的圆度影响,则测试辊适用。测试辊的结构是指 ISO 7176-8 中规定的耐用性测试机。对于预定在户外使用的机器人,在上述标准中定义的撞击块的转辊上进行测试[见图 8b)]。对于仅预期用于室内使用的机器人,将在没有撞击块的表面上对其进行测试[见图 8a)]。



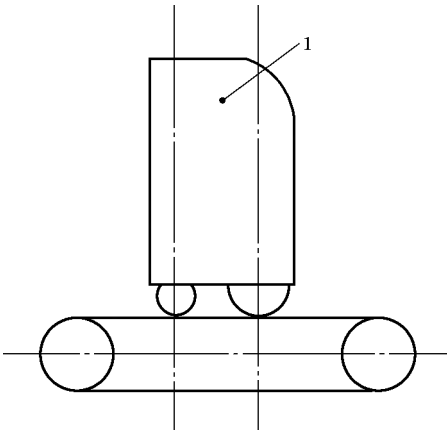
标引序号说明:

1——机器人。

图 8 辊式测试机

——跑步机(其他类型)(见图 9)

跑步机适用于所有机器人,重型机器人或预定在粗糙行走面上使用的机器人除外(见图 9)。



标引序号说明:

1——机器人。

图 9 跑步机式测试机

b) 测试重量

——测试用假人

假人的重量模拟了载乘人员或穿戴机器人用户的重量。如果适用,总重量是预定用户的最大重量。根据机器人的运动机制,模拟用户的重量分布和运动学。

——重量

其重量模拟规定要加载到机器人上的最大重量。

注 1: ISO 7176-11 描述了用于轮椅测试的假人重量。

注 2: 《美国联邦法规》第 49 篇第 572 部分的 E 和 O 子部分描述了代表成年男性第 50 百分位和成年女性第 5 百分位的假人。

注 3: ISO 10535:2006 的 4.10.2.7 描述了运送用升降架耐用性试验的载荷位置。

c) 支撑装置(可选)

如果机器人(例如外骨骼或两轮机器人)自身无法保持其姿势,则使用支撑装置来保持其姿势。支撑装置保持机器人或与机器人连接的假人。重要的是,装置不得阻碍机器人的运动和负载条件。

9.2.3 步骤

该试验的步骤如下。

- a) 将机器人放置在测试行走面上。如果机器人能够运载乘客或由用户穿戴,则测试用假人与机器人一起进行测试。
- b) 机器人以制造商规定的速度在测试行走面上移动一段时间或一段距离(制造商限制的)。外部电源能够用作动力。
- c) 记录可见的损坏,例如破裂、变形、摆动、部件松动或脱离以及机器人功能的变化。

9.2.4 通过/失败准则

能参考 A.6 描述的数据定义该试验通过/失败的准则。

10 耐力特性试验(用于移动机器人)

10.1 耐碰撞冲击

10.1.1 原则

该试验旨在检查机器人在发生碰撞后的可见损坏(例如,部件的断裂、变形或脱落)和功能损失(例如,控制系统的异常),以验证“在整个设计寿命内的耐久性”,考虑“在极端情况下的运行中得出的机器人的最大工作条件”(见 GB/T 36530—2018 中的 5.11.1)。

该试验适用于所有可移动机器人。

该试验包括三个步骤:

- a) 设置;
- b) 碰撞;
- c) 检查。

碰撞试验采用与 7.1 相同的方法。

10.1.2 仪器和步骤

该试验所需仪器和步骤如下。

- a) 按照 7.1 所述进行本次试验,与 7.1 不同的只是在没有测试假人的情况下,机器人直接与障碍物碰撞。
- b) 碰撞后,观察机器人的结构,以记录损坏、变形、摆动或部件松动/掉落的情况。
- c) 碰撞后,检查并记录可见的和功能上的损坏。

11 静态稳定性试验

11.1 原则

该试验通过确认机器人是否摔倒、其负载是否会掉落或以潜在危险的方式移动,以检查机器人在静态倾斜条件下的稳定性,以验证机器人设计“最小化机械不稳定性”(参见 GB/T 36530—2018 的 5.10.2.1)。

该试验适用于所有需要机械静态稳定性以避免伤害的机器人。

该试验包括两个步骤：

- a) 将机器人放在斜坡上；
- b) 检查。

该试验使用两种仪器：

- 斜坡；
- 代表载乘人员的测试用假人(如有必要)。

11.2 仪器

该试验仪器如下：

- 斜坡；
- 试验平面足够大,能在试验期间容纳机器人和负载(如果有)。

11.3 步骤

该试验步骤如下。

- a) 机器人被稳定地放置,并始终保持其位置垂直于斜坡(无论机器人电源是否接通或断开),然后将其放置在坡度的顶部,坡度由制造商规定。确认机器人的放置面与斜坡接触,并且机器人上的负载稳定。

注 1: 某些自平衡机器人需要打开电源。

- b) 记录机器人放置面的任何部分是否远离斜坡,机器人是否跌落,负载是否掉落,或是否以潜在危险的方式移动。

注 2: ISO 7176-1:2014 的 3.2 描述了确定上坡车轮下的力何时变为零的方法。这些方法包括但不限于从轮子下方拖动纸张、通过目视觉识别轮子何时离开测试平面或使用力感知仪器。

- c) 重复步骤 a) 和 b), 其中机器人方向的变化代表稳定性的最坏情况,例如前进/后退和左/右。

机器人所携带负载的重量是制造商规定的最大重量。模拟负载的物体按照制造商的规定放置平坦行驶表面。对于载人机器人,加载物体模拟负载,模拟载乘人员的最大重量和重量分布。对于有坐着用户(有座椅)的载人机器人,能使用 ISO 7176-11 中规定的假人。

11.4 通过/失败准则

能参考 A.7 中描述的数据定义该试验通过/失败的准则。

12 运动部件的动态稳定性试验(用于移动机器人)

12.1 原则

此试验检查机器人的运动部件和负载对机器人稳定性的影响,以验证其能够“抵抗来自个人助理机器人运动部件和负载产生的静态和动态力”并保持稳定性(见 GB/T 36530—2018 中的 5.10.2.1)。

该试验适用于所有带有操作机或其他运动组件的机器人,以及能够承载负载的机器人。该试验不适用于约束型物理辅助机器人。

把机器人放置在斜坡上,测量移动的组件和负载对稳定性的影响。建议仅在静态稳定性试验通过后再执行此试验。

12.2 仪器

该试验的仪器如下：

a) 斜坡

斜坡与 11.2 中描述的相同。斜面具有固定机器人的装置,以防止其滑动或掉落,例如系在机器人上方稳定钩上的绳索。倾斜角等于制造商规定的最大倾斜角。

b) 虚拟负载

尺寸和重量模拟机器人承载的典型负载的物体,如有必要,还包括一个代表载乘人员的假人。

注:附录 C 描述了一种能用于模拟移动负载的装置。

12.3 步骤

该试验的步骤如下。

- a) 机器人沿代表稳定性最坏情况的方向放置在斜坡上,例如向前、向后和侧向,依次执行 b)~e)。对于每个方向,确认机器人放置的表面与斜坡接触,并且机器人上的负载稳定。
- b) 在每个方向上,机器人的运动部件以这样的方式移动,即在最严苛的稳定性条件下,运动质量产生最大动态力,例如,通过以下方式:
 - 沿斜坡下端方向移动;
 - 尽可能快地加速和停止;
 - 施加最大有效载荷到末端执行器和其他能够承载负载的装置上。
- c) 如果机器人被指定携带有效载荷,则宜施加有效载荷,以便通过在最严苛的条件下移动有效载荷的质量,以产生最大动态力,例如,通过以下方式:
 - 意外地将负载移至斜坡下端的方向;
 - 仅在斜坡下端方向的位置施加载荷;
 - 施加最大负载。
- d) 如果机器人被指定来运载乘客(例如,载人机器人)或支撑人员的重量(例如,非约束型身体辅助机器人),在最严苛的稳定条件下,通过模拟(例如,使用测试用假人),施加能预期从乘客或被支撑的人员的重量产生的最大的动态力:
 - 一位乘客突然坐在机器人的座位或脚凳上;
 - 一个人的全部重量几乎压在或移开机器人的支撑结构。
- e) 对于所有测试,记录机器人放置面的任何部分是否远离斜坡、机器人是否掉落、负载是否掉落,或是否以潜在危险的方式移动。

13 行走的动态稳定性特性试验(用于移动机器人)

13.1 概述

13.1.1 原则

此试验检查在典型不利条件下机器人及其负载的运动稳定性,以验证机器人的设计不会导致“在行进过程中发生任何危险的翻滚、失控,或其部件或所载负载跌落”(见 GB/T 36530—2018 中的 5.10.3.1)。

该试验适用于移动机器人。

该试验包括在四种类型的行走面几何形状上的 15 种行走模式,行进面类型包括平坦表面、倾斜表面、阶梯表面和间隙表面。最大速度试验旨在验证制造商设置的速度限制。

13.1.2 仪器

该试验的仪器如下:

a) 测试行走面

试验行走面的条件见 4.3。

b) 测试用假人

附录 C 中所述的测试用假人能用于试验,但涉及刹车和转弯或瞬态操纵的试验除外。

13.1.3 步骤

如果机器人使用充气轮胎,则内部压力将调节至制造商规定的压力。

承载重量是制造商规定的最大负载。对于载人机器人,载乘人员的体重通过具有适当重量分布的假人体重模拟。如果需要有人亲自在机器人上操作(即无法进行编程运动或远程控制),则需要采取所有必要的预防措施,以确保 4.4 所述试验过程中载乘人员的安全。如果将物体装载到机器人的装载区域,则将按照制造商规定的方法装载。

13.2 平坦表面上的稳定性试验

13.2.1 不同摩擦系数行进面上的刹车试验

该试验的步骤如下:

- 试验行走面右半部分的摩擦系数保持在 0.75 以上。试验行走面左半部分的摩擦系数保持不大于 0.30,摩擦系数按照 4.3 测量;
- 机器人从开始位置沿行走面的中心线行进,并在加速部分加速到最大速度,见图 10a);
- 保持最大速度经过刹车开始位置后,机器人以最大刹车力制动并停止,如果机器人具有多种刹车方法,则对每种方法均进行测试;
- 检查机器人通过刹车开始位置时是否达到规定的测试速度;
- 从测试开始到停止,记录机器人是否翻倒、载乘人员或负载是否掉落。

注:摩擦系数不大于 0.30 能用婴儿爽身粉等与水混合物来表示。测试后,轮胎能够容易清洗。如果需要,能够更换受污染的轮胎。

13.2.2 不同摩擦系数行进面上加速试验

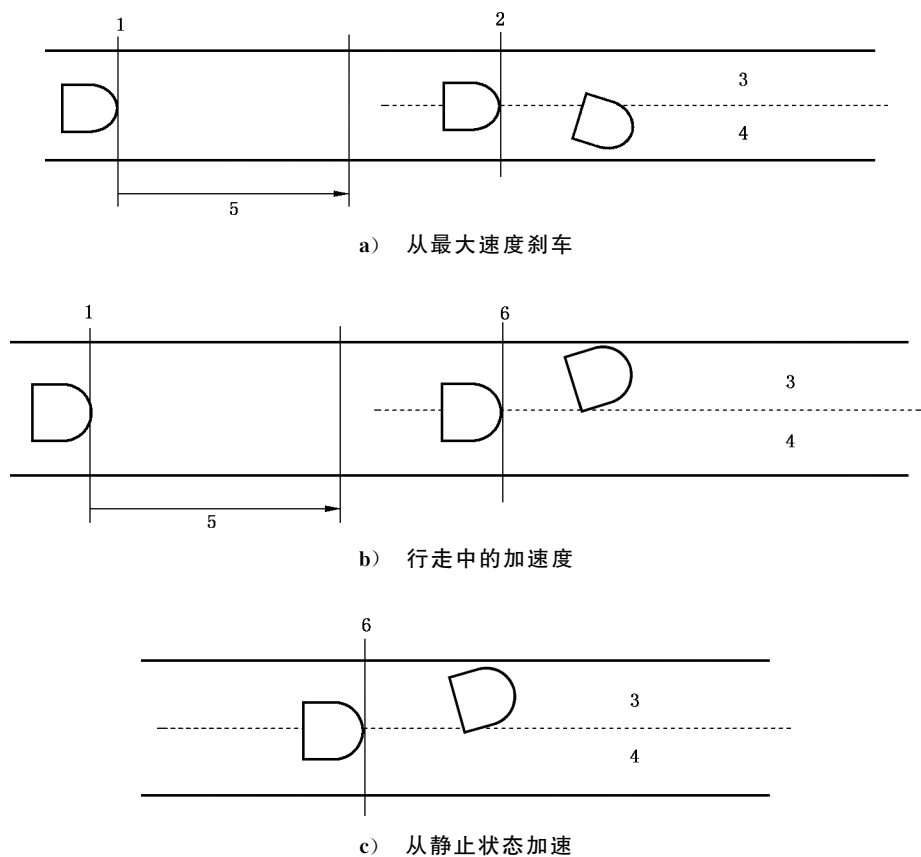
该试验的步骤如下:

- 机器人从开始位置沿着行走面的中心线行走,并在加速部分中加速到最大速度的 80% ± 10%,见图 10b);
- 通过全加速开始位置后,机器人将以最大速率加速;
- 检查加速部分是否达到规定速度。从测试开始到停止,记录机器人是否翻倒、载乘人员或负载是否掉落。

13.2.3 从静止状态进行的加速试验

该试验的步骤如下:

- 机器人沿行走面的中心线置于全加速开始位置,见图 10c);
- 从静止状态开始,机器人以最大速率加速;
- 记录机器人是否翻倒、载乘人员或负载是否掉落。



标引序号说明：

- 1——开始位置；
- 2——刹车开始位置；
- 3——低摩擦表面；
- 4——高摩擦表面；
- 5——加速段；
- 6——全加速开始位置。

图 10 劈裂面上的刹车和加速试验

13.3 倾斜表面的稳定性试验

13.3.1 概述

在机器人使用环境中,如果预期有倾斜的表面,则进行此试验。
测试行走面的倾斜角是制造商规定的机器人运行的最大角度。

13.3.2 下坡最大速度试验

该试验的步骤如下：

- a) 机器人沿着倾斜行走面的中心线行走,并在加速段最大程度地加速,见图 11；
- b) 机器人保持最大速度通过测量段,然后停止,设定测量段的长度,使通过测量距离的时间不少于 1 s；
- c) 测量通过测量段的时间。
- d) 至少重复四次,以确定整个测量段的平均时间(T)；

e) 通过公式(2)计算最大速度(V):

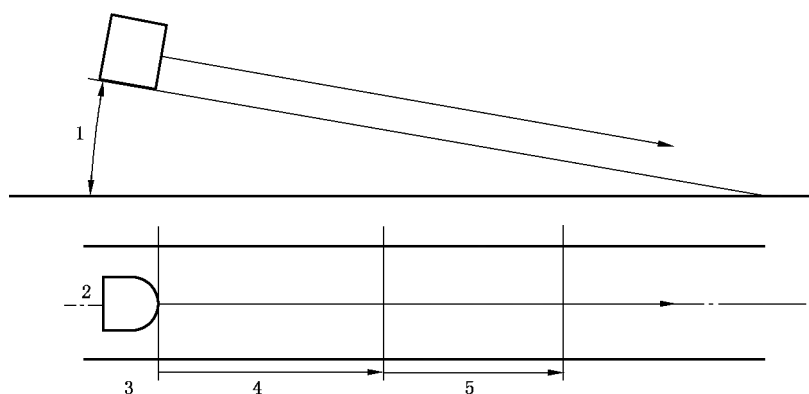
$$V = \frac{L}{T} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

V——最大速度,单位为米每秒(m/s);

L——测量段的长度,单位为米(m);

T——通过测量段的平均时间,单位为秒(s)。



标引序号说明:

- 1——倾斜角;
- 2——机器人;
- 3——开始位置;
- 4——加速段;
- 5——速度测量段。

图 11 下坡最大速度试验的测试方法

13.3.3 下坡加速和刹车试验

该试验的步骤如下:

- a) 将机器人放置在倾斜表面的开始位置,见图 12;
- b) 机器人以最大加速度开始下坡;
- c) 机器人沿着测试行走面的中心线加速行进,在加速段达到最大速度;
- d) 经过刹车开始位置后,机器人以最大刹车力刹车并停止,如果机器人具有多种刹车方法,则对每种方法均进行试验;

示例:在正常运行时刹车;保护性停止刹车;紧急刹车。

- e) 记录机器人的一部分是否偏离其说明书中规定的停止距离;
- f) 从刹车开始位置到刹车停止位置,记录机器人的一部分是否偏离其说明书里允许宽度;
- g) 从刹车开始到停止,记录机器人是否翻倒、机器人上的人或机器人的负载是否跌落;
- h) 检查机器人在刹车开始位置是否达到规定的测试速度。

注:该试验的目的不是测量刹车距离,而是要确认机器人从未偏离允许距离或允许宽度,并确认机器人的刹车稳定性。

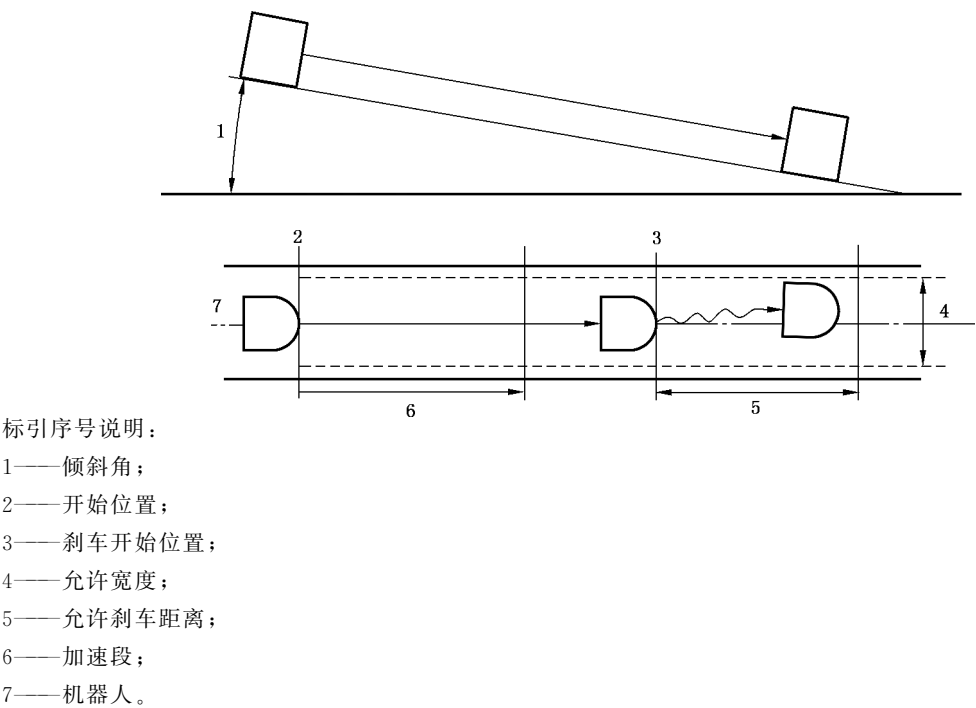


图 12 下坡加速和刹车试验的测试方法

13.3.4 上坡加速度试验

该试验的步骤如下：

- a) 将机器人放置在倾斜表面的开始位置,见图 13；
- b) 机器人以最大加速度开始上坡；
- c) 机器人沿着测试行走面的中心线行走,加速到加速段中的最大速度；
- d) 记录机器人是否翻倒、载乘人员或机器人的负载是否掉落。

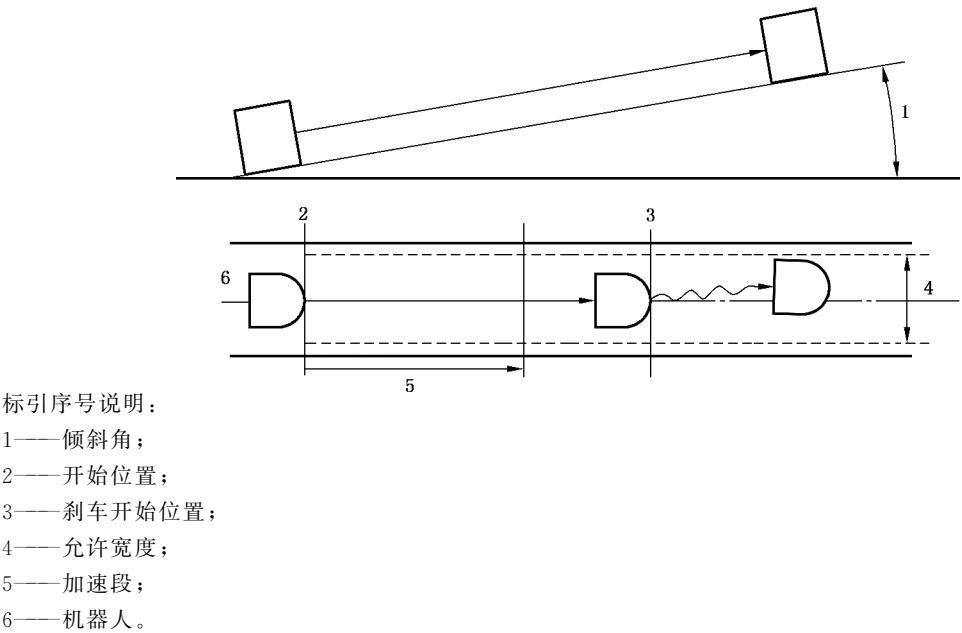


图 13 上坡加速和刹车试验的测试方法

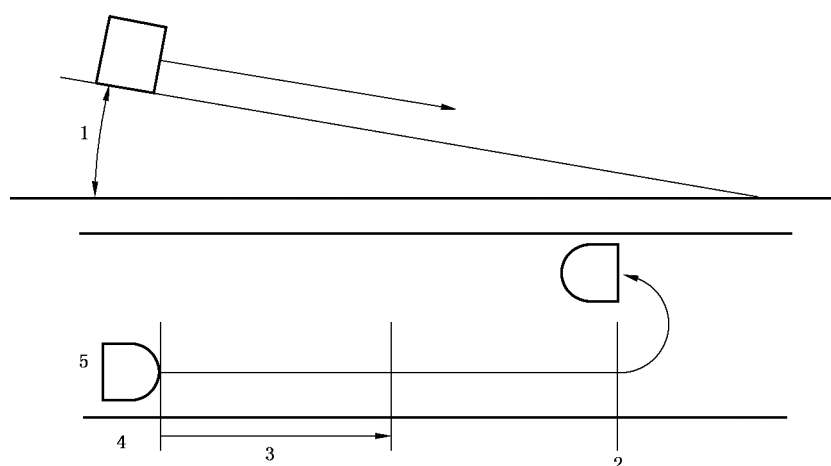
13.3.5 下坡全转试验

该试验适用于在巡航时能够转向的机器人。

该试验的步骤如下：

- 机器人在加速段达到规定的转向机动的最大速度，见图 14；
- 机器人在保持最大速度的同时，经过转弯开始位置后立即以最小半径进行全转，直到大约转过 180° ；
- 如果机器人能够进行枢转，它会停止行走并进行枢转直到旋转不小于 360° ；
- 检查机器人是否在转弯开始位置达到规定的测试速度；
- 记录机器人是否翻倒、载乘人员或机器人的负载是否掉落；
- 试验在顺时针和逆时针方向上进行；

注：通过修改机器人的最大转向角，能够在保持最大横向加速度的情况下降低此试验中的速度，前提是加速段没有足够的长度使机器人达到最大速度。



标引序号说明：

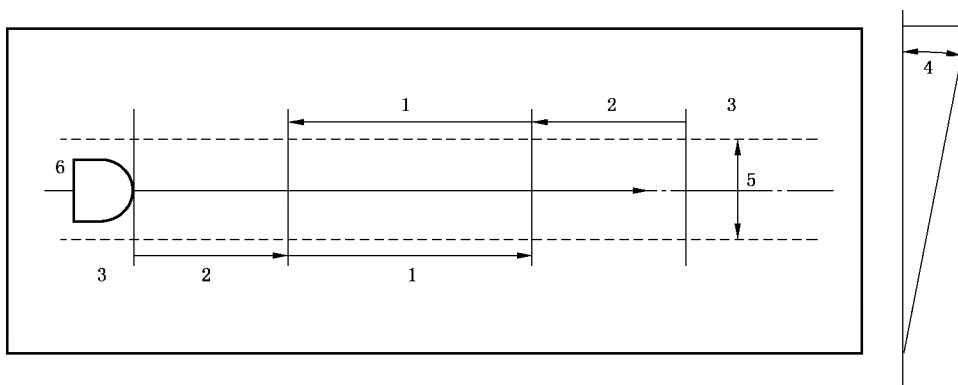
- 1——倾斜角；
- 2——转弯位置；
- 3——加速段；
- 4——开始位置；
- 5——机器人。

图 14 下坡全转试验的测试方法

13.3.6 斜面穿越试验

该试验的步骤如下：

- 机器人在横向倾斜的表面上沿着测试行走面的中心线行进，见图 15，并在加速段加速到最大速度；
- 在保持最大速度的同时，机器人经过观察段并停止；
- 在观察段中，记录机器人的一部分是否偏离其说明书中规定的行走面的允许宽度；
- 检查观察段是否达到规定的测试速度；
- 从测试开始到停止，记录机器人是否翻倒、载乘人员或负载是否掉落；
- 在相同的测试行走面上，沿相反的行走方向重复执行步骤 a)～e)。



标引序号说明:

- 1——观察段；
2——加速段；
3——开始位置；
4——倾斜角；
5——允许宽度；
6——机器人。

图 15 斜面穿越试验的测试方法

13.3.7 枢转斜面试验

该试验适用于通过稳定性控制系统保持平衡的机器人。

该试验的步骤如下:

- 机器人放置在倾斜的表面上,并在静止状态下保持平衡;
- 机器人绕枢轴旋转一圈,直到失去平衡或完成十圈,以较小者为准;
- 在相反的旋转方向上重复步骤 b);
- 记录机器人是否翻倒、载乘人员或负载是否掉落。

13.4 台阶和间隙的稳定性试验

13.4.1 概述

在机器人的使用环境中,如果预期会出现台阶和间隙,则进行此试验。

台阶的高度是机器人说明书中向上和向下移动的可操作最大高度。如果说明书中未规定,对于室外运行的机器人,高度能设置为 50 mm;对于室内运行的机器人,高度能设置为 20 mm。

间隙的宽度和深度是机器人说明书中规定的可操作最大值。台阶和间隙的上方边缘圆弧倒角的半径为 3 mm~5 mm, 见 ISO 7176-10 的规定。

13.4.2 从停止位置向上移动

该试验的步骤如下。

- a) 放置机器人,使其前轮与台阶接触,见图 16a)。台阶与机器人行走方向的角度选取机器人说明书中规定的可操作但对稳定性影响最大的角度。如果说明书中未规定与台阶的角度,则能够将其设置为 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 。机器人的轮子位于向前方向。
- b) 机器人以最大功率输出启动,上台阶并停止。
- c) 记录机器人越过台阶时是否摔倒、载乘人员或负载是否掉落或机器人是否损坏。

13.4.3 以最大速度向上移动

该试验的步骤如下。

- 机器人从开始位置开始行走,并在加速段加速到最大速度,见图 16b)。
- 机器人移动上台阶并停止。在执行此操作时,台阶的进入角度选取机器人说明书中规定的可操作但对稳定性影响最大的角度。如果在说明书中未规定进入角度,则能够将角度设置为 $90^\circ \pm 5^\circ$ 和 $10^\circ \pm 5^\circ$ 。
- 检查是否达到规定的测试速度。
- 记录机器人越过台阶时是否摔倒、载乘人员或负载是否掉落、机器人是否损坏。

13.4.4 加速时向上移动

以下步骤适用于通过车轮扭矩保持平衡的机器人,并且在上台阶后,当机器人失去车轮与地面之间的接触时,可能变得不稳定。该试验的步骤如下:

- 机器人从起始位置开始移动,并在加速段加速到最大速度的 $80\% \pm 10\%$,见图 16c);
- 机器人移动上台阶,并且车轮刚通过台阶时加速;
- 记录机器人越过台阶时是否摔倒、载乘人员或负载是否掉落或机器人是否损坏。

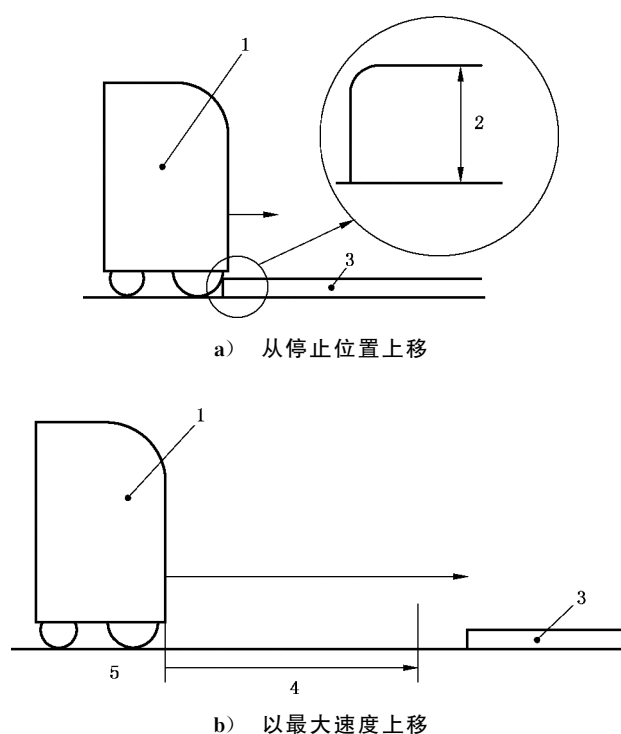
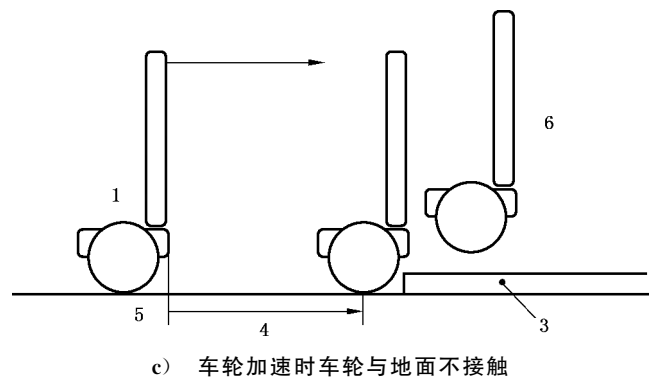


图 16 上台阶试验的测试方法



标引序号说明：

- 1——机器人；
- 2——台阶高度；
- 3——台阶；
- 4——加速段；
- 5——开始位置；
- 6——车轮加速。

图 16 上台阶试验的测试方法（续）

13.4.5 低速下台阶

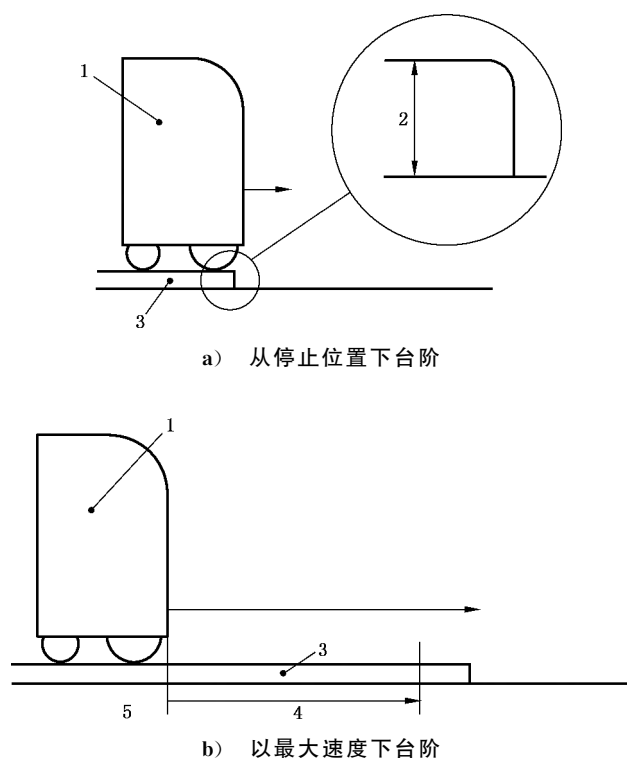
该试验的步骤如下。

- a) 放置机器人,使其前轮在台阶末端,见图 17a)。台阶相对于机器人行走方向的角度是根据机器人说明书中规定的可操作,但对稳定性影响最大的角度。如果说明书中未规定与台阶的角度,则能够将其设置为 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 。机器人的轮子位于向前方向。
- b) 机器人以非常慢的速度行走,然后下台阶并停止。
- c) 记录机器人越过台阶时是否摔倒、载乘人员或负载是否掉落或机器人是否损坏。

13.4.6 以最大速度下台阶

该试验的步骤如下。

- a) 机器人从开始位置行走,在加速部分加速到最大速度,见图 17b)。
- b) 机器人保持最大速度下台阶并停止。台阶沿机器人行走方向的角度是根据机器人说明书中规定的可操作,但对稳定性影响最大的角度。如果说明书中未规定台阶角度,则能够将其设置为 $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 和 $10^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 。
- c) 检查是否达到规定的测试速度。
- d) 记录机器人通过台阶时是否摔倒、载乘人员或负载是否掉落或机器人是否损坏。



标引序号说明：

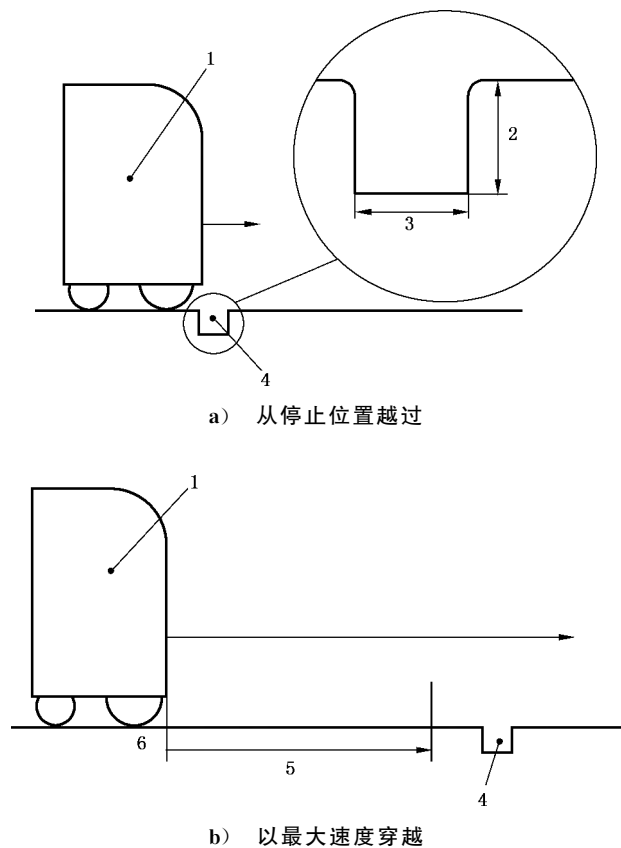
- 1——机器人；
- 2——台阶高度；
- 3——台阶；
- 4——加速段；
- 5——开始位置。

图 17 下台阶试验的测试方法

13.4.7 间隙穿越试验

该试验的步骤如下。

- a) 将机器人放置在靠近间隙的位置，见 18a)。间隙在机器人行走方向上的角度是根据机器人说明书中规定的可操作，但对稳定性影响最大的角度。如果说明书中未规定与间隙的角度，则能够将其设置为 $90^\circ \pm 5^\circ$ 。机器人的轮子位于向前方向。
- b) 机器人以非常慢的速度行走，越过间隙并停止。
- c) 记录机器人越过台阶时是否摔倒、载乘人员或负载是否掉落或机器人是否损坏。
- d) 机器人从开始位置行走，并在加速段加速到最大速度，见图 18b)。
- e) 机器人越过间隙，保持最大速度并停止。台阶相对于机器人行走方向的角度是根据机器人说明书中规定的可操作，但对稳定性的影响最大的角度。如果说明书中未规定与台阶的角度，则能够将其设置为 $90^\circ \pm 5^\circ$ 和 $10^\circ \pm 5^\circ$ 。
- f) 检查是否达到规定的测试速度。
- g) 记录机器人越过间隙时是否翻倒、载乘人员或负载是否掉落。



标引序号说明：
1——机器人；
2——间隙深度；
3——间隙宽度；
4——间隙；
5——加速段；
6——开始位置。

图 18 间隙穿越试验的测试方法

13.5 通过/失败准则

能参考 A.8 描述的数据定义该试验通过/失败的准则。

14 安全相关控制功能的试验(通用)

14.1 电敏防护设备(ESPE)集成试验

14.1.1 原则

如果机器人仅用于 IEC 61496 适用部分所涵盖的环境,则无须进行此试验。

如果所应用的 ESPE 用于 IEC 61496 适用部分范围之外,则 ESPE 符合 EN 62998-721 并进行以下试验。

该试验包括三个可选的试验条件：

- a) 室外照明干扰(用于维护故障安全)；

- b) 低照度(用于维护故障安全);
- c) 室内照明干扰(用于维护故障安全)。

试验仪器包括:

- 试件(黑色、白色、灰色和逆反射);
- 背景(黑色、白色和灰色);
- 光源(白炽灯、荧光灯、频闪灯和人造日光)。

除非适合机器人特征,否则将选择适合的试验条件。

注: ISO 13482 可能需要参考 IEC 61496 进行其他试验,IEC 61496 是一个系列安全标准,适用于与安全相关的非接触式感应装置(ESPE)

14.1.2 抽样

样品是安装在机器人上的 ESPE。

14.1.3 仪器

该试验的所需仪器如下。

a) 试件

试件的尺寸为球形或圆柱形,是合理预见的 ESPE 将检测到的物体,或者为 ISO 13856-3 中定义的圆柱形试件。

示例 1: 为了模拟人体躯干,试件可能是高度为 0.6 m、直径为 0.2 m 的圆柱体。

示例 2: 为了模拟人的手臂或腿,试件可能是高度为 0.4 m、直径为 0.07 m 的圆柱体。

试件的光学表面状况模拟了 ESPE 预计难以检测到的物体中最难检测到的表面状况,或者其表面状况能够符合 IEC/TS 61496-4-3 中规定的以下四种类型:

- 1) 黑色表面(在传感器覆盖的波长范围内,漫反射率值小于 5%);
- 2) 灰色表面(漫反射率值为 27%~33%);
- 3) 白色表面(漫反射率值大于 70%);
- 4) 逆反射面。

b) 背景

在使用 ESPE 的环境中,背景颜色都会模拟环境中最坏的检测情况,或使用其他 IEC/TS 61496-4-3 规定的以下 3 种颜色中的任何一种:

- 1) 黑色;
- 2) 灰色;
- 3) 白色。

c) 光源

- 1) 人造日光;
- 2) 室内照明。

室内照明使用 ESPE 的光源。如果未规定,则使用 IEC 61496-3,IEC/TS 61496-4-2 或 IEC/TS 61496-4-3 中规定的以下任何类型的光源:

- 白炽灯;
- 荧光灯;
- 频闪灯。

14.1.4 步骤

14.1.4.1 概述

ESPE 通过安装在静态或等效条件下运行的机器人上进行试验。

对试件和背景的所有可能组合进行试验。试件的移动速度是可合理预见的最大值,否则为 1.6 m/s(请参阅 GB/T 19876—2012)。

14.1.4.2 室外环境试验

该试验的步骤如下:

- a) 人造日光被打开并沿着传感器的光轴定向;
- b) ESPE 已打开;
- c) 在检测区内无任何物体的情况下,观察 ESPE 的响应至少 5 s,除非制造商另有规定的时间;
- d) 试件被放入检测区域,观察 ESPE 的响应至少 5 s,除非制造商另有规定的时间;
- e) 试件被取出检测区域,观察 ESPE 的响应至少 5 s,除非制造商另有规定的时间;
- f) 关闭装置电源 5 s;
- g) 步骤 b)~f)至少重复四次;
- h) 人造日光由一块黑色面板定期遮蔽,以使光强度交替变化,每次间隔不大于 2 s;
- i) 步骤 b)~f)至少重复四次。

14.1.4.3 低照度试验

该试验的步骤如下:

- a) 以制造商规定的最低光强度的室内照明条件作为试验条件。如果未规定,则使用强度小于 50 lx 的白炽灯和荧光灯进行试验;
- b) ESPE 已打开;
- c) 在检测区内无任何物体的情况下,观察 ESPE 的响应至少 5 s,除非制造商另有规定时间;
- d) 试件被放入检测区域,并观察 ESPE 的响应至少 5 s,除非制造商另有规定的时间;
- e) 试件被取出检测区域中,并观察 ESPE 的响应至少 5 s,除非制造商另有规定的时间;
- f) 关闭 ESPE 的电源 5 s;
- g) 步骤 b)~f)至少重复四次;
- h) ESPE 已打开;
- i) 环境照明的强度降低到预期照明强度的第五十个百分位,并逐渐降低到最低限值,极限和下降速度由制造商规定。观察 ESPE 是否显示任何危险失效。

14.1.4.4 室内照明干扰试验

该试验的步骤如下。

- a) 以制造商规定的最低光强度的室内照明条件作为试验条件。如果未规定,则使用光强度在 100 lx 至 300 lx 之间的白炽灯和荧光灯进行试验。作为室内干涉灯,使用制造商规定的光源。如果未规定,则使用 14.1.3c)2)中的三种类型的光源进行试验。
- b) 打开室内干涉光源,并设置其方向以使传感器获得最高的光强度。
- c) ESPE 在正常运行中已打开。
- d) 在检测区内无任何物体的情况下,观察 ESPE 的响应至少 5 s,除非制造商另有规定的时间。
- e) 试件被放入检测区域,并观察 ESPE 的响应至少 5 s。除非制造商另有规定的时间。
- f) 试件被移出检测区域,并观察 ESPE 的响应至少 5 s。除非制造商另有规定的时间。
- g) 关闭 ESPE 的电源 5 s。
- h) 步骤 c)~g)至少重复四次。

14.2 湿滑环境下的运行试验

14.2.1 原则

此试验检查机器人在湿滑环境中安全运行的能力(见 GB/T 36530—2018 的 5.15)。

在风险评估中,假设机器人能够检测湿滑的地面条件,则评估检测能力和在湿滑表面上的适当反应。

14.2.2 仪器和步骤

该试验的所需仪器和步骤如下。

- a) 第一步测试机器人是否能够在制造商规定的最小摩擦系数设置下正常运行。因此,在具有设定摩擦力的表面上(例如,使用特殊的光滑材料)执行所有标准的刹车、转向和在最大允许坡度上的保持航向的安全试验。摩擦系数由机器人本身在多个方向上测量。

注:能通过阻止机器人的轮胎并拖动整个机器人来测量摩擦值。

- b) 第二步验证机器人自动检测摩擦系数何时低于制造商规定的临界值。在系数低于临界值 10% 的不同的光滑表面上进行试验,试验包括之前相同的操作。

14.3 电磁抗扰度

14.3.1 原则

该试验检查机器人的安全相关功能,以验证设计以保护其免受“所有合理可预见的电磁干扰”(见 GB/T 36530—2018 中的 5.8.1)。

该试验适用于其控制系统中具有安全功能的机器人。

14.3.2 仪器

该试验所需仪器如下。

- a) 通用设备和环境

用于测试电磁干扰的设备和环境符合预定使用和环境的适用标准(例如,IEC 61000-4-2, IEC 61000-4-3, IEC 61000-4-4, IEC 61000-4-5, IEC 61000-4-6, IEC 61000-4-8, IEC 61000-4-11 和 ISO 7176-21)。

- b) 每种类型机器人的仪器

——在正常操作情况下,支撑移动机器人而不移动其位置的仪器,例如:支撑机器人轮胎的滚轮;

——能远程操作与安全相关功能的仪器(例如,按下机器人停止按钮)。在电波暗室内手动控制机器人时,这些仪器必不可少(请参见 IEC 61000-4-3);

——适用于能够监测和记录机器人在电波暗室内运动(例如轮胎的停止或旋转)的仪器。如果被测安全相关功能的反应时间对其功能至关重要,则该仪器具有按时间序列记录数据的功能。

当这些仪器安装在机器人周围时,它们不能由金属或其他对电磁场有显著影响的材料制成。这些仪器不受施加的电磁干扰的影响。

14.3.3 步骤

该试验步骤如下。

- a) 电磁干扰的规格选自 IEC 61000-6-1, IEC 61000-6-2, IEC 60204-1, IEC 61326-3-1 等,使其适合机器人的使用环境。
- b) 按照标准规定,把机器人放置在电波暗室。如有必要,采用用于固定机器人位置的支撑工具。

- c) 准备激活机器人安全相关功能。该功能能通过其他仪器远程命令激活。
- d) 电磁干扰作用于机器人,足够的干扰持续时间由试验中与安全相关的功能的性质决定。
- e) 机器人被命令激活被测安全相关功能。
- f) 记录机器人的响应。
- g) 如果失去控制,机器人将重新启动。
- h) 对于被测的所有与安全相关的功能,在 a) 中选择的所有电磁干扰规格,重复步骤 c)~g)。
- i) 将记录的数据与安全相关功能的预期行为中的数据进行比较。

注:建议自动进行试验,因为标准中规定了大量检查的电磁干扰。

15 对地面上与安全相关的障碍物的响应(用于移动机器人)

15.1 保护性停止距离

15.1.1 原则

该试验测量机器人完成保护性停止时的瞬间,机器人与模拟的安全相关障碍物(例如,移动的人)之间的距离,以验证设计是否“充分降低与安全相关障碍物发生危险碰撞的风险”(见 GB/T 36530—2018 中的 5.10.8.1)。

该试验适用于所有通过非接触式传感器实现防撞功能,以执行保护性停止的可移动的机器人。

该试验包括三个步骤:

- a) 设置;
- b) 执行试验动作;
- c) 检测停止时刻并测量距离。

该试验使用运动跟踪装置、行走面和试件。

试验动作被配置为三个因素的组合:

- 机器人的行走方向(向前、向后、向右和向左,如果有能力);
- 障碍物的行走方向(向前、向后、向右和向左,如果可移动);
- 在代表性速度下,机器人与障碍物之间的横向相对位置(中心、右端、左端)。

试件有以下障碍物:一个站立的人、一面墙壁和一个直径 25 mm 的垂直柱。除非适合机器人的特性,否则选择适合的试验条件。

15.1.2 仪器

该试验所需仪器如下。

a) 试件

具有代表机器人安全相关障碍的表面条件和尺寸的对象,在制造商规定的使用条件下可能会遇到。如果与安全有关的障碍物预期会移动,则测试件要具备等效的移动能力。

如果制造商未规定预期的与安全相关的障碍,则使用以下三个对象。

1) 墙

- 木板,长 90 cm,宽 90 cm;
- 布,长 90 cm,宽 90 cm,反射率低于 10%;
- 镜面板,长 90 cm,宽 90 cm,反射率大于 90%;
- 透明板,长 90 cm,宽 90 cm,透光率大于 80%;
- 栅栏形墙,框架长 90 cm,宽 90 cm,中间的桩子是直径为 10 mm 的圆杆或圆管,间隔为 100 mm。网格是垂直排列,由钢或其他金属(如铝)制成,以模拟预定使用环境。墙的面

色或图案以及地板的颜色与预定使用环境相对应。

2) 垂直圆柱

由金属、树脂或木材制成的直径 25 mm、长度超过 90 cm 的圆杆或圆管,经选择模拟预定使用环境。

3) 测试用假人

选择尺寸从婴儿到成人的全身型人体模型来模拟预定使用。

如果规定为黑色,则人体模型的衣服的最低漫反射率值为官方漫反射率的 1.8%。

人体模型的材料即使在碰撞中也不会损坏机器人或周围的设备等。

对于下半身人体模型,建议使用一种模拟步行运动的机制。

注:人体模型能够用 ISO 13856-3 中定义的圆柱形试件代替。

b) 测试行走面

使用代表预期机器人使用环境的行走面。如果制动距离因表面而异,则使用导致最长制动距离的表面。

它还具有足够的长度和宽度,以使机器人在加速至正常行走速度后减速并停止。

c) 运动跟踪装置(用于移动障碍物的测试)

一种能够以与机器人的行走速度相对应的帧速率,拍摄固定在机器人和/或移动测试件上目标标记(反射性材料球体或闪烁的标记等)的装置。运动跟踪装置能够以 ± 5 mm 的精度确定机器人和试件的位置,并以 $\pm 2^\circ$ 的精度确定机器人和试件的方向。

15.1.3 步骤

该试验所需步骤如下。

a) 将机器人和试件放置在测试行走面上,其距离大于机器人最大感应范围。测试以下条件的所有组合。

1) 机器人的行走方向

- i) 正常行走方向。
- ii) 如果适用,与正常行走方向成 90° 。
- iii) 如果适用,与正常行走方向成 180° 。
- iv) 如果适用,与正常行走方向成 270° 。

2) 试件的面对角[见图 19a)]

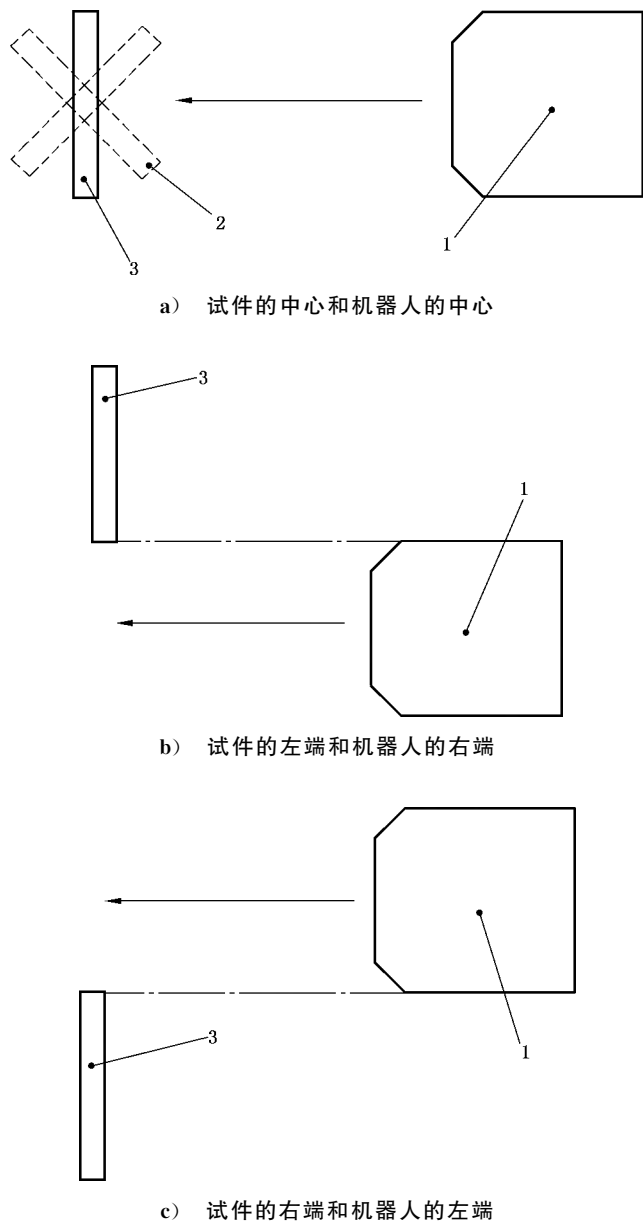
- i) 与机器人的移动路径成 $90^\circ \pm 5^\circ$ 。
- ii) 与机器人的移动路径成 $45^\circ \pm 5^\circ$ 。

3) 试件位置

- i) 试件的中心位于机器人行走路径的中心线上。
- ii) 试件的左端与机器人的右端在行走方向上对齐[见图 19b)]。
- iii) 试件的右端与机器人的左端在行走方向上对齐[见图 19c)]。
- iv) 如果试件旨在模拟移动物体,则试件以一定速度直线移动,使其穿越机器人的行走路径,以 90° , 180° 和 270° 的方向与机器人相遇。

b) 在预定使用条件下,机器人以其典型速度行走。

c) 机器人完全停止时,测量机器人与试件之间的最短距离。在试件移动的情况下,运动跟踪装置跟踪机器人和试件的运动,以识别机器人速度变为零时的距离。



说明：
1——机器人；
2——45°障碍；
3——90°障碍物。

图 19 机器人与障碍物之间的横向相对位置

15.2 安全相关速度控制中的距离和速度

15.2.1 原则

该试验同时测量机器人的速度以及机器人与模拟的安全相关障碍物之间的距离,以评估“安全相关速度控制”(见 GB/T 36530—2018 中的 5.10.8.3)。该试验旨在验证机器人具有保持安全相关的速度和与障碍物之间的安全距离的能力,并基于验证的数据确认安全相关的速度控制。

该试验适用于所有可移动且具有安全相关速度控制功能的机器人。

使用 15.1 相同的试验方法来执行该试验。

注：GB/T 36530—2018 的附录 C 规定了安全相关速度控制的速度和距离之间的安全准则。

15.2.2 仪器和步骤

该试验的执行方式与保护性停止距离的试验相同(见 15.1)。在障碍物进入安全空间时,运动跟踪装置用于测量位置和速度,监视并记录从运动跟踪装置获得的机器人对障碍物的反应以及相对接近速度。

15.3 凸面地形前停车距离

15.3.1 原则

此试验旨在评估机器人“行走面感知”的保护措施(见 GB/T 36530—2018 中的 5.10.3.3 和 6.5.3)在机器人执行保护性停止后,测量包括上升楼梯在内的凸起地形与机器人之间的距离。

该试验适用于具有移动性和安全相关行走面感知功能的机器人。

该试验包括三个步骤:

- a) 设置,
- b) 执行测试动作,
- c) 测量距离。

该试验使用行走面和凸面地形。

15.3.2 仪器

该试验所需仪器如下。

- a) 测试行走面

使用适合预期的机器人使用环境的行走面。如果刹车距离因表面而异,则使用刹车距离最长的表面。

同样重要的是行走面要有足够的长度和宽度,以使机器人加速到正常行走速度后减速并停止。

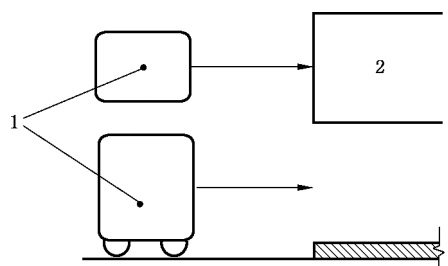
- b) 凸面地形

凸面地形是通过一个顶部平坦、侧面垂直的块来模拟。其高度至少等于机器人能穿越的最大值,但不超过最大值的 120%。能使用升降平台等来模拟凸面高度。但是,需要填充行走面传感器能够检测到的行走面和凸面高度(升降平台)之间缝隙。凸面地形的宽度大于机器人的整个宽度。

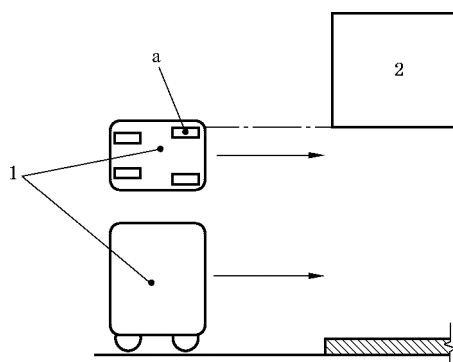
15.3.3 步骤

该试验步骤如下。

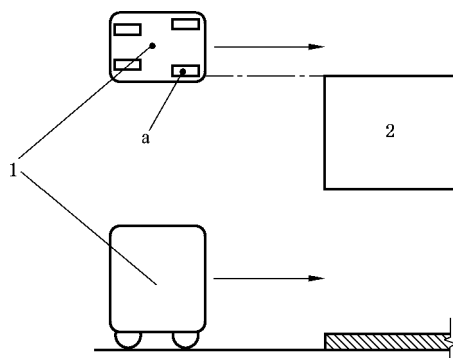
- a) 机器人以预定使用条件下的典型速度行走。
- b) 接近凸面地形时,它会进行保护性停止。接近路径如下:
 - 1) 机器人接近凸面宽度的中心的路径[见图 20a)];
 - 2) 此路径是指连接凸面地形的右端和受地形影响的机器人最左侧的线路,与机器人的行走方向相匹配[见图 20b)];
 - 3) 此路径是指连接凸面地形的左端和受地形影响的机器人的最右侧的线线路,与机器人的行走方向相匹配[见图 20c)]。
- c) 接近角是在预定使用条件下预期的角度。如果未规定,则与凸面地形的边缘的角度分别为 10°,45°和 90°,公差为±5°(见图 21)。
- d) 当机器人完全停止时,测量凸面地形的边缘与机器人之间的最短距离。



a) 地形中心和机器人中心



b) 凸面的右端和机器人的左端



c) 凸面的左端和机器人的右端

标引序号说明：

1——机器人；

2——凸面；

a——机器人受地形影响的最远点。

图 20 与凸面地形有关的放置方法

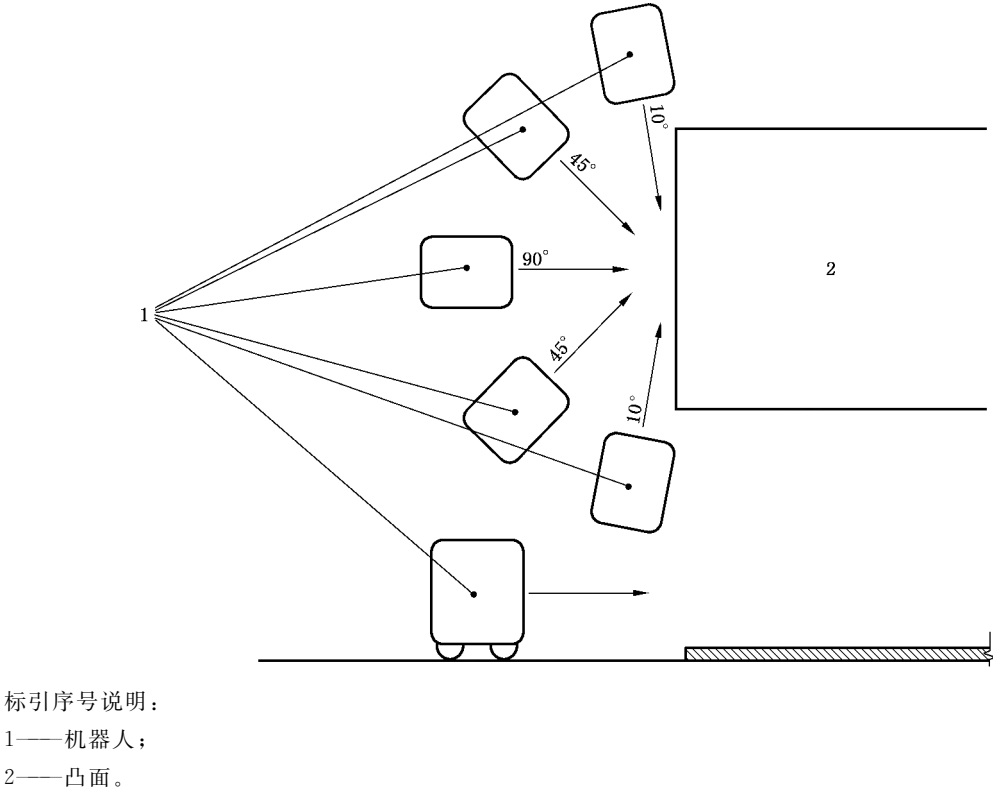


图 21 凸面地形的接近角

15.4 凹面地形前停车距离

15.4.1 原则

此试验旨在评估机器人“行走面感知”的保护措施(见 GB/T 36530—2018 中的 5.10.3.3 和 6.5.3)。在机器人执行保护性停止后,测量包括下楼梯在内的凹面地形与机器人之间的距离。

该试验适用于所有可移动且具有与安全相关的行走面感知功能的机器人。

该试验使用与 15.3 相同的测试方法执行,除了测试地形是机器人的行走面接触区域可能掉落的最小凹坑。除非适用于机器人的特性,否则会选择适合它的试验条件。

15.4.2 仪器

该试验所需仪器如下。

a) 测试行走面

使用适合预期的机器人使用环境的行走面。如果刹车距离因表面而异,则使用刹车距离最长的表面。

同样重要的是要有足够的长度和宽度,以使机器人在加速到正常行走速度后减速并停止。

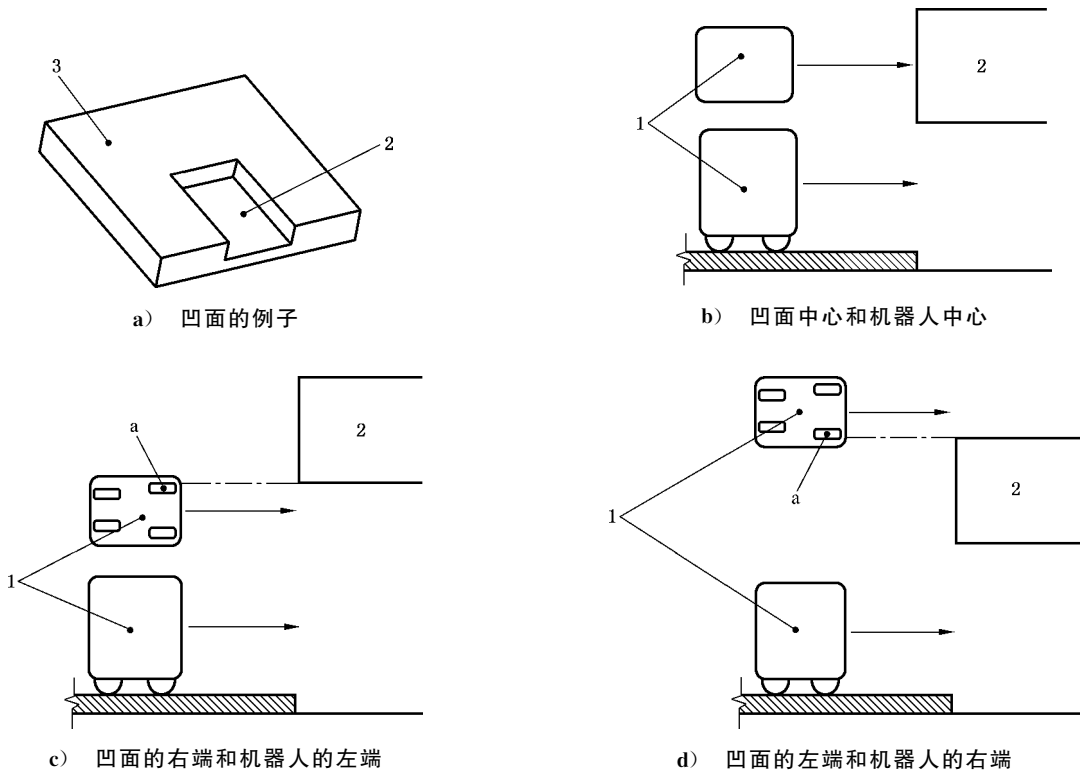
b) 凹面地形

凹陷深度比机器人能够穿越的深度更深。其深度能使用升降平台等进行模拟,只要它能够使机器人掉落到凹陷处即可。但是,需要填充行走面传感器能够检测到的行走表面和凹陷深度(升降平台)之间的缝隙。凹面地形的宽度大于机器人的整个宽度。如果风险评估表明凹面的形状与图 22a)中给出的形状不同,则将不同的形状应用于试验。

15.4.3 步骤

该试验步骤如下。

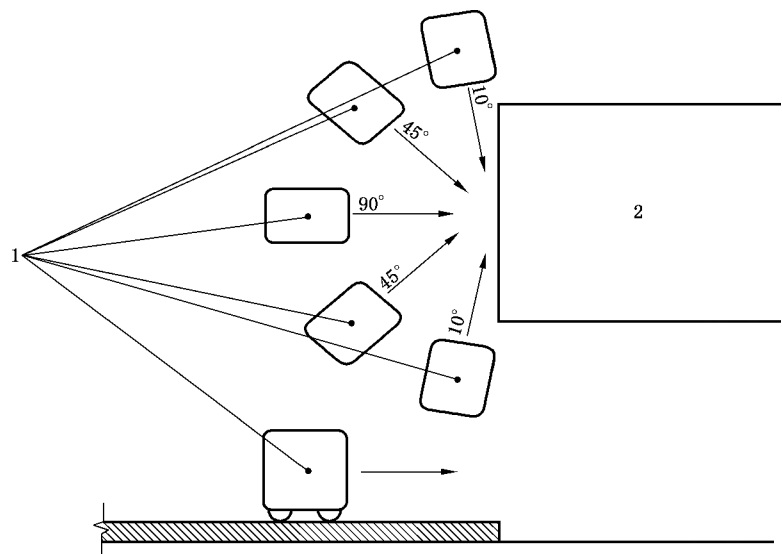
- a) 机器人以预定使用条件下的典型速度行走。
- b) 在接近凹面地形时,机器人会进行保护性停止。接近路径如下:
 - 1) 机器人接近凹面宽度中心的路径[见图 22b)];
 - 2) 该路径连接凹面地形的右端和受地形影响的机器人左侧最远点的线路,与机器人的行走方向相匹配 [见图 22c)];
 - 3) 该路径连接凹面地形的左端和受地形影响的机器人右侧最远点的线路,与机器人的行走方向相匹配 [见图 22d)]。
- c) 如果凹地不是旋转对称的,则接近角是在预定使用条件下预期的角度。如果未规定,则与凹面地形边缘的夹角为 10°,45°和 90°,公差为±5°(见图 23)。
- d) 测量凹面地形边缘与机器人之间的最短距离。



标引序号说明:

- 1——机器人;
- 2——凹面;
- 3——行走面;
- a——机器人受地形影响的最远点。

图 22 相对于凹面地形的放置方法



标引序号说明：
1——机器人；
2——凹面。

图 23 凹面地形的接近角

16 安全相关定位和导航试验

16.1 原则

机器人在环境中行走,同时根据地图数据和环境中的特征或标记来确定其位置。对于此试验,环境的几何形状与内部地图存储的几何形状有变化。在试验过程中,监测机器人是否对此偏差做出危险的反应。

该试验适用于所有使用内部地图并使用标记或特征进行定位的移动机器人(见 GB/T 36530—2018 中的 5.16.2)。

16.2 仪器

试验环境由一个长度等于或大于 6 m,宽度等于或大于 3 m(相对于被测机器人的尺寸)的长方形的房间组成。在房间的较长边之一的中间附近放置一个长约 1 m 的矩形障碍物(见图 24)。

房间较短的一侧和障碍物是可移动的。如果机器人的定位是基于标记,那么在墙壁和障碍物上要分布足够多的标记,以供机器人操作。墙壁和障碍物要足够高,以便用于定位机器人的所有传感器都能够看到他们,并遮挡这些传感器感知的房屋的外部视图。

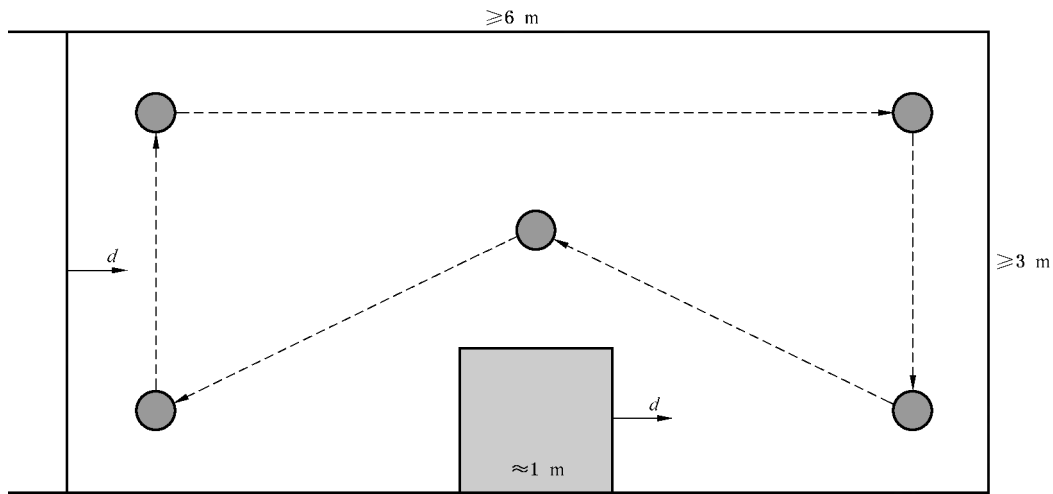


图 24 定位试验的设备和试验路径

16.3 步骤

该过程包括以下步骤。

- 生成具有墙壁和障碍物原始位置的房间的地图。能够手动执行此操作(通过根据准确的房间几何形状提供地图),或者让机器人生成地图,例如用 SLAM 算法。
- 移动可移动的墙和障碍物,使其朝短固定墙方向移动距离 d 。
- 机器人被放置在房间的一个角落。如有必要,初始化机器人的定位,使其与最近的角对齐。
- 对机器人进行编程,使其沿着图 24 中所示的路径移动。在地图坐标中规定了该路径,选择途径点,使得墙壁和障碍物的最小距离等于会导致碰撞的机器人执行保护性停止的距离的 150%。

对于墙和障碍物的位移 $d=5\text{ cm}$, $d=10\text{ cm}$, $d=20\text{ cm}$ 和 $d=50\text{ cm}$, 执行步骤 c) 和 d)。每个试验在顺时针方向重复至少四次,在逆时针方向重复至少四次。

在机器人行走期间,监视并记录机器人是否移动不平稳、突然停止或执行其他潜在危险动作。

17 自主决策和动作的可靠性试验(通用)

17.1 概述

如果机器人的自主决策或动作导致危险,则需要评估决策和动作的可靠性,并需要进行风险评估,以确定可靠性是否足够(见 GB/T 36530—2018 中的 5.12)。

自主决策和动作能够包括识别对象、解释(模糊的)用户命令、选择一种策略以最大程度地减少碰撞带来预期风险等。由于决策问题种类繁多,因此并非所有问题都能够涵盖在本文件中。

设置一个试验,在该试验中,机器人面临需要自主决策或采取行动的情况。检测机器人的反应,以确定决策和行动是否正确执行。一个执行对象检测试验的示例见 17.2。

17.2 对象识别

17.2.1 原则

此试验测量正确识别对象的可靠性。它适用于所有具有对象识别能力的机器人。

17.2.2 仪器

17.2.2.1 试验对象

选择通常发生在预期环境中的足够多的试验对象。如果适用,包括彼此非常相似的对象组。

17.2.2.2 试验设备

物体的设置以这种方式,通常是在典型的照明条件下,在预期操作环境中出现(例如放在桌子上,存放在盒子或橱柜中等)。

17.2.3 步骤

机器人识别每个对象。记录正确识别的对象的总数。如果识别的对象不正确,则会记录对象类型和被误认为的对象。

18 命令装置(通用)

18.1 命令装置连接、断开或重新连接时的安全操作

18.1.1 原则

该试验检查机器人对命令装置的连接、断开和重新连接的反应,以确保在这种情况下不会发生不可接受的风险。

该试验适用于所有具有命令装置的机器人。

在风险评估期间,需要识别命令装置连接、断开或重新连接可能导致的危险状态,试验考虑:

- 命令装置的不同类型和数量;
- 预计可能发生危险反应的运行模式、任务和移动方式;
- 内部控制系统中的危险状态;
- 不同的连接或断开方法,例如通过软件命令进行连接,与硬件插头的连接、断电和重启电源,以及破坏性的断开方式,例如剥脱/切断电缆;
- 有意和无意的连接,断开和重新连接。

18.1.2 仪器

除了机器人本身和相关命令装置之外,不需要其他仪器。

18.1.3 步骤

该试验所需仪器如下:

- a) 对于在风险评估期间识别出的每种潜在危险状态,将根据识别出的状态的操作参数来设置机器人并使其运行;
- b) 根据确定情况的操作参数,连接、断开或重新连接所涉及的命令装置;
- c) 对于每种情况,观察并记录机器人对每个事件的响应。

18.2 对多个或意外命令装置的响应

18.2.1 原则

该试验确定“个人助理机器人”的设计和构造方式,是否仅对来自预定控制单元的信号做出响应(见

GB/T 36530—2018 中的 6.9.3)。

该试验适用于所有具有多个控制单元的机器人。

在风险评估期间,需要识别使用多个控制单元而只能接受来自一个控制单元的信号的情况。试验考虑:

- 不同类型和数量的控制单元;
- 预计可能发生危险反应的运行模式、任务和移动方式;
- 内部控制系统中的危险状态。

18.2.2 仪器

除了机器人本身和相关控制单元之外,不需要其他仪器。

18.2.3 步骤

该试验步骤如下:

- a) 对于在风险评估期间识别出的每种潜在危险状态,将根据识别出的状态的操作参数来设置机器人并使其运行;
- b) 从无效/非预定的控制单元发送信号,并监视信号是否以任何方式影响机器人;记录控制设备的属性以及机器人相应的反应。

18.3 当无线或可拆卸的命令设备失去通讯时的安全操作

18.3.1 原则

该试验确定个人助理机器人及其命令装置的设计方式,即在通信中断或未接收到正确的控制信号的情况下,如果继续执行任务会产生不可接受的风险,则该装置控制的任何机器人都将执行保护性停止(见 GB/T 36530—2018 中的 6.9.6)。

该试验适用于所有具有无线或可拆卸的命令装置的机器人。

在风险评估期间,识别通信可能丢失或损坏情况,例如:

- 拔出或关闭命令装置;
- (电池)电能的损失;
- 命令装置移离机器人太远;
- 在受到其他电子装置强烈干扰的区域中操作;
- 硬件或软件故障。

此外,还要识别机器人控制系统可能接收到错误信号的情况。

18.3.2 仪器

该试验需要机器人和相关的命令装置。根据风险评估识别通信丢失或损坏的可能情况,需要使用其他设备来模拟特定情况。必要的设备能够包括:

- 命令装置的外部电源,其能够被关闭以模拟电池电量的损失;
- 能够模拟其他电子装置电磁干扰的发射机;
- 虚拟的命令装置,能够模拟命令装置硬件和软件的故障,从而导致通信丢失或受到干扰,或者发送不正确的信号。

18.3.3 步骤

该试验步骤如下:

- a) 对于风险评估期间识别出的每一种潜在危险状态,机器人根据识别出的状态的运行参数进行设置并使其运行;
- b) 通信的丢失、损坏或错误信号的发送被模拟,机器人的反应被监视;
记录机器人对给定事件的反应以及所使用的试验设备。

19 试验报告

清楚记录所有根据机器人设计和/或预定使用调整的可选试验条件。

试验报告至少包含以下信息:

- a) 测试机构的名称和地址;
- b) 个人助理机器人制造商的名称和地址;
- c) 个人助理机器人的类型、序列号和批号;
- d) 安装在个人助理机器人上的设备的说明;
- e) 可调部件的设置细节;
- f) 使用的测试假人的大小;
- g) 试验结果(见附录 D);
- h) 试验日期;
- i) 使用了试验方法的声明如本文件中所述;
- j) 任何评论或意见。

附录 A
(资料性)
评估试验结果的信息

A.1 总则

制造商能参考本附录中提供的数据来定义试验的通过/失败准则。根据机器人的设计和使用环境,制造商能够根据最适当的标准采用允许值。本附录中给出的数据未在 ISO 13482 中列为强制性数据。准则因机器人或机器人装置的设计及其预定使用情况(例如,机器人部件的材料,预期环境中儿童的存在,是否需要人与机器人之间的接触等)而异。

A.2 噪声(6.2)

噪声的准则取决于预定使用情况。在 IEC 60601-1:2012 中 9.6.1 的一个示例描述为“最新研究表明,在 24 h 内持续 8 h 的值为 85 dBA,当时间加倍或减半时的偏移量为 3 dBA。”

A.3 表面温度(6.3)

A.3.1 总则

表面温度的标准取决于材料、接触时间、预期环境中儿童的存在等。

A.3.2 医用电气设备部件的最高允许温度

IEC 60601-1:2012, 11 章的表 23 描述了无论是有意还是意外,仅成年人都可能触摸的医用电气设备部件的最高允许温度。见表 A.1。

表 A.1 IEC 60601-1:2012 中规定的最高允许温度

医用电气设备部件		最大温度/℃		
		金属和液体	玻璃、瓷器、 玻璃材料	模压材料、 塑料、橡胶、木头
医用电气设备可能在“ t ”时间内接触到的外表面	$t < 1\text{ s}$	74	80	86
	$1\text{ s} \leq t < 10\text{ s}$	56	66	71
	$10\text{ s} \leq t < 1\text{ min}$	51	56	60
	$1\text{ min} \leq t$	48	48	48

A.3.3 家用和类似用途电器的温升限制

IEC 60335-1:2010 的第 11 章表 3 描述了家用和类似用途电器的部件表面的温升极限。所描述的极限值不是绝对值,而是相对于 IEC 60335-1:2010 的 5.7 中定义的环境温度的升高。

A.3.4 音频/视频、信息和通信技术设备的最高允许温度

IEC 60950-1:2005 / Amd2:2013 的 4.5 中表 4C 描述了无论是否可能触摸的“主电源或电池供电的信息技术设备,包括电气商业设备和相关设备”部件的最高允许温度,无论是有意或意外。

IEC 62368-1:2014 的第 9 章描述了可能被触及的“音频、视频、信息和通信技术以及商务和办公机器领域中的电气和电子设备”部件的风险分析和最高允许温度,无论是有意还是意外。

A.3.5 燃烧阈值

IEC 指南 117:2010 的附录 A 和 ISO 13732-1:2006 的第 4 章提供了燃烧阈值数据。

A.4 有意接触和意外接触以及与机器人碰撞的伤害准则(7.1 和 7.2)

A.4.1 要考虑的事项

确定伤害准则时要考虑:

- a) 预定使用用例,例如,在预定环境中存在儿童,
- b) 接触是有意还是无意的。

当本节中的数据作为受伤概率提供时(见 A.4.3.3 和 A.4.4.1),会选择适当的概率来定义试验结果的准则。A.4.5 中描述了一些示例。

尽管大多数数据是有关碰撞中伤害准则的信息,但它们也适用于有意和意外接触的力控制测试准则。如果在力控制测试中测量除力以外的参数,那么这些参数也适用。

A.4.2 疼痛发作

GB/T 36008—2018 的附录 A 总结了在协作操作中与机器人的准静态和暂态接触(包括预期的接触)中疼痛发作的资料性数据。表 A.2 复制了 GB/T 36008—2018 的表 A.2,并提供了人与机器人系统之间准静态和暂态接触的量化最大值。

注 1: 在本文件发布时,GB/T 36008 中描述的疼痛发作标准是评估已标准化的机器人作用力和冲击的唯一准则,并且被认为是可忍受的疼痛极限的第一个来源。如果在 ISO 13482 中缺少某些用例或伤害类型,可能要谨慎使用其他准则作为参考。

注 2: Yamada,Saito 和 Muttray 等报告了与 Muttray 等人所做的工作相关的疼痛耐受性值。

表 A.2 生物力学极限

身体区位	特定身体部位		准静态接触		暂态接触	
			最大允许压力 ^a p_s N/cm ²	最大允许力 ^b N	最大允许压力乘数 ^c P_T	最大允许力乘数 ^c F_T
颅脑与前额 ^d	1	前额中部	130	130	不适用	不适用
	2	太阳穴	110		不适用	
面部 ^d	3	咀嚼肌	110	65	不适用	不适用
颈部	4	颈部肌肉	140	150	2	2
	5	第 7 颈椎	210		2	
后背与肩部	6	肩关节	160	210	2	2
	7	第 5 腰椎	210		2	2
胸部	8	胸骨	120	140	2	2
	9	胸部肌肉	170		2	
腹部	10	腹部肌肉	140	110	2	2
盆骨部	11	盆骨	210	180	2	2

表 A.2 生物力学极限（续）

身体区位	特定身体部位		准静态接触		暂态接触	
			最大允许压力 ^a p_s N/cm ²	最大允许力 ^b N	最大允许压力 乘数 ^c P_T	最大允许 力乘数 ^c F_T
上臂与肘关节	12	三角肌	190	150	2	2
	13	肱部	220		2	
前臂与腕关节	14	桡骨	190	160	2	2
	15	前臂肌肉	180		2	
	16	臂部神经	180		2	
手与手指	17	食指腹 D	300	140	2	2
	18	食指腹 ND	270		2	
	19	食指末关节 D	280		2	
	20	食指末关节 ND	220		2	
	21	大鱼际隆起	200		2	
	22	手掌 D	260		2	
	23	手掌 ND	260		2	
	24	手背 D	200		2	
	25	手背 ND	190		2	
大腿与膝部	26	大腿肌肉	250	220	2	2
	27	膝盖	220		2	
小腿	28	胫骨	220	130	2	2
	29	腓肠肌	210		2	

^a 这些生物力学数值来自于美因茨大学(Mainz University)关于疼痛发作等级的研究结果。尽管该研究采用了最新测试技术,但其所示的值仍是某一课题领域内的单一研究结果而没有广泛研究基础。有一些先期成果表明,可预期的未来研究中可能将会调整这些数值。在其测试中采用了 100 个健康成年人的 29 个特定身体部位,对于身体的每个部位在准静态接触时的压力和力限制,都根据疼痛发作的阈值进行评价并得到验证。此处所显示的最大允许压力值代表了它超过了特定身体区域所能承受压力记录值范围的 75%。它们被定义为一个物理量,对应压力施加给特定身体部位所产生的疼痛在发作时相应的感觉。峰值压力是基于具有 1 mm²分辨率的均值。研究结果基于使用平面(1.4 cm×1.4 cm,金属)测试表面且四边圆弧为 2 mm 倒角的测试器械完成。有可能采用其他的测试器械会产生不同结果。更多研究细节见 ISO 7176-13。

^b 最大允许力的值是源于独立组织所进行的研究(见 ISO 7176-21,参考了 188 个来源,这些值参考了身体区域,但没有针对更多的特定身体部位。最大允许力的值基于最小化能量传递可致伤害最小这一准则,例如在挫伤中,应等同于简明创伤量表(AIS)的严重等级的 1 级,而 AIS 由汽车医学发展协会(AAAM)所制定。遵守该限制值将防止出现皮肤或软组织破溃,其通常伴随于出血性伤口、骨折或其他骨损伤而产生,并可使 AIS 等级低于 1 级。该限制值在未来的研究中将被替换为针对更多具体协作机器人的值。

^c 暂态乘数值源自相关研究,显示了力与压力的暂态限制值可达到准静态值至少两倍。更多研究细节参照 ISO 7176-8,ISO 7176-10,ISO 7176-11 和 ISO 8373。

^d 关键区域(斜体)。

A.4.3 软组织损伤耐受性

A.4.3.1 切向牵引力——起泡的时间特性

展示与起泡现象相关的数值样本非常有用,详见第 8 章物理危险特性测试。图 A.1 显示了切向牵引力,即袖带与猪皮在时间跨度较长的时间范围内接触的时间特性。切向牵引力是通过使用流变仪测量的,其中,通过准确知晓负荷点与样品表面之间的接触面积,精确地计算了牵引力。在同一图中,还使用人类受试者获得的实验数据在较短的时间内进行了比较,这些试验由 P.F.D.Naylor 进行。在图中绘制了三个示例线,基于异常值分析后统计估计的 $2\hat{\sigma}$ 、 $3\hat{\sigma}$ 和 $4\hat{\sigma}$ 标准差。

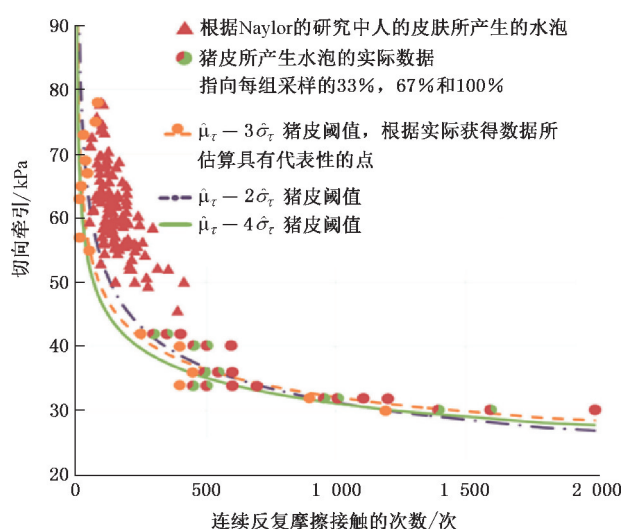
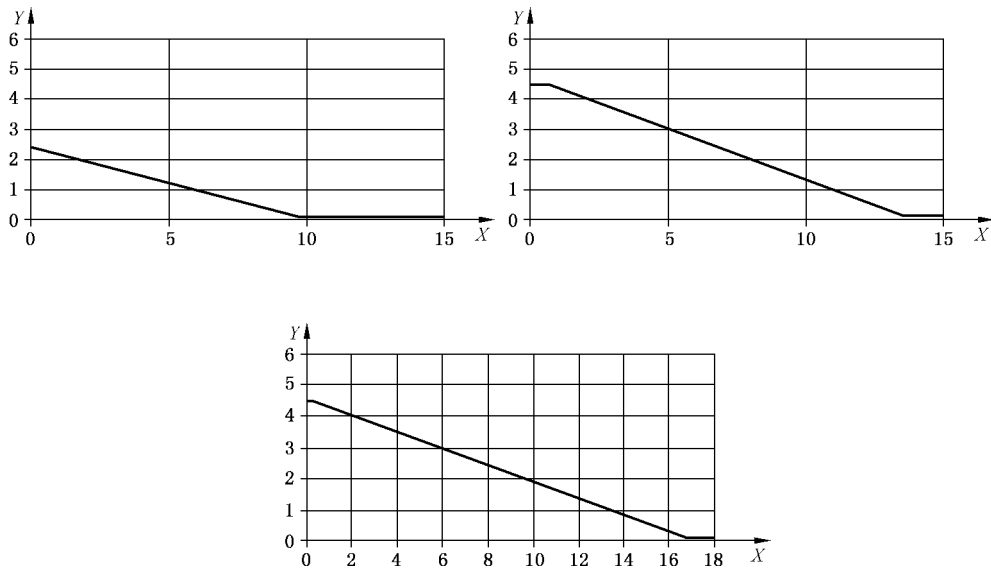


图 A.1 切向牵引力:起泡的时间特性

A.4.3.2 运动部件的质量和速度

Haddadin 等人提供了钝器撞击造成的软组织损伤的临界质量和速度(见图 A.2)。要将这些容忍值应用于机器人,7.2 中测量了冲击速度而不是冲击力。



标引符号说明:

X ——冲击质量(kg);

Y ——最大速度(m/s)。

图 A.2 对于机器人实时控制,保守的安全曲线是为了确保机器人在受到 5 mm 半径的球体(左上)、12.5 mm 半径的球体(右上)和 45°楔形(下方)冲击的影响时,保持在由 Haddadin 等人的实验数据获得的所有观察到的淤血但无皮肤开放的范围里

A.4.3.3 接触压力和传递的能量

Fujikawa 等提供机器人的钝性撞击导致的软组织损伤(瘀伤)的概率,该概率是峰值平均接触压力 P_{peak} 的函数,见公式(A.1)。

$$Pr_P = 1 / \{1 + \exp(5.637 - 2.355 P_{\text{peak}})\} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

P_{peak} ——峰值平均接触压力。

要将数据应用于机器人,需要估算接触压力。接触压力直接由在 7.1 和 7.2 中用于冲击力测量的压力传感器测量。假设在接触区域中的接触压力具有大致均匀的分布,则通过将峰值冲击力除以接触区域来估算。为了测量这些数据,能够将两种柔顺性(即人体软组织柔顺性和人体结构柔顺性)应用于受机器人影响的部件。它们减小了冲击力和接触压力,并且增加了接触面积。

Fujikawa 等还提供了由机器人的钝性撞击导致的软组织损伤(瘀伤)的概率,作为转移到人体各部位的总能量的函数,见公式(A.2)。

$$Pr_U = 1 / \{1 + \exp(9.243 - 0.0686 U_{\text{total}})\} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

U_{total} ——每单位面积的总转移能量。

例如公式(A.3)。

$$U_{\text{total}} = \frac{1}{A} \int_0^{\delta_1} F d\delta \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

A ——接触面积;

F ——接触力;

δ ——机器人运动部件的位移,并且 δ_1 是机器人部件的最大位移。

要将数据应用于机器人,通过以下方法之一估算每单位面积的总传输能量。

- 测量机器人在接触期间的位移和接触面积,以及在 7.1 和 7.2 中的冲击力,并按公式定义计算每单位面积的总传递能量。
- 测量操作机部件的接触面积和速度,而不是测量 7.1 和 7.2 中的冲击力,如果所传递的能量近似于操作机部件的动能,则计算出每单位面积的总传递能量。见公式(A.4)。

$$U_{\text{total}} = mv^2/2A \quad \dots\dots\dots (\text{A.4})$$

此处, m 是机器人部件的有效质量, v 是机器人部件在接触开始时的速度。

为了测量数据,能够将两种柔顺性(即人体软组织柔顺性和人体结构柔顺性)应用于受机器人影响的部件。它们减小了冲击力,并且增加了位移和接触面积。

注:瘀伤的伤害准则如下。

——对于峰值平均接触压力:

- 软组织损伤(挫伤)的可能性为 30%:2.03 MPa;
- 软组织损伤(挫伤)的可能性为 10%:1.46 MPa;
- 软组织损伤(瘀伤)的可能性为 1%:0.45 MPa。

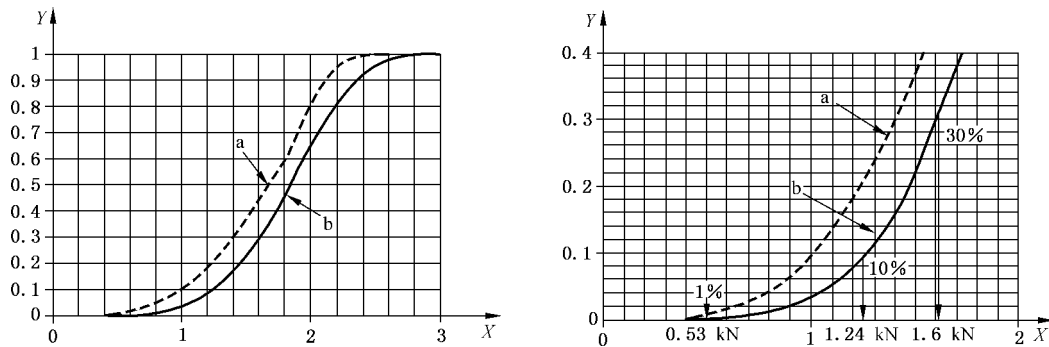
——对于总能量:

- 软组织损伤(挫伤)的可能性为 30%:122 kJ/m²;
- 软组织损伤(瘀伤)的可能性为 10%:103 kJ/m²;
- 软组织损伤(瘀伤)的可能性为 1%:67 kJ/m²。

A.4.4 伤害准则

A.4.4.1 脚部受伤

Fujikawa 等人提供了成年女性跖骨骨折的概率,作为撞车事故中负荷的函数(见图 A.3)。



标引符号说明:

X ——人体第四跖骨的负荷(kN);

Y ——骨折概率;

a——威布尔图(Weibull)的 95%置信区间;

b——从威布尔图获得的概率。

图 A.3 由 Fujikawa 等人的实验数据,估计机器人轮胎对人类第四跖骨(六名典型的人类女性的平均值)的累积破裂概率的预测

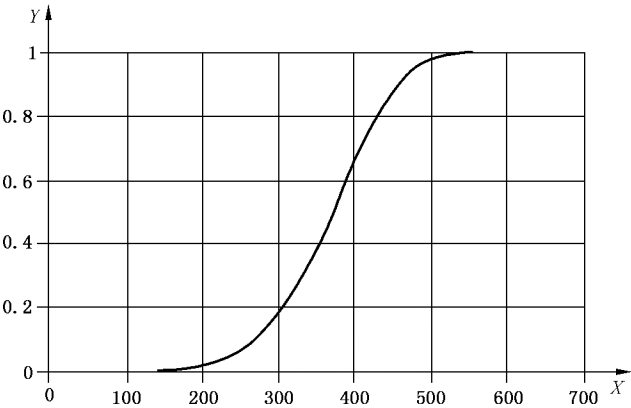
注:足部骨折的损伤标准如下:

- 骨折的可能性为 30%:1.6 kN;
- 骨折的可能性为 10%:1.24 kN;
- 骨折的可能性为 1%:0.77 kN;

——骨折的可能性为 1%，置信度为 95%，上限为 0.53 kN。

A.4.4.2 腿部受伤

Takahashi 等提供了成年人在事故中胫骨骨折的概率与弯矩的函数关系。联合国车辆法规 127 号附录 5 中描述了一种测量弯矩的方法示例。该法规附录 4 中定义的柔性小腿冲击器在规定的接触条件下撞击汽车保险杠。弯矩由安装在小腿冲击器中的传感器测量。见图 A.4。



标引符号说明：
X ——腿弯矩(Nm)；
Y ——腿部骨折的概率。

图 A.4 Takahashi 等人估计的胫骨骨折的概率

A.4.4.3 头部受伤

美国国家公路交通安全管理局(NHTSA)提供了 3 岁儿童在事故中发生 AIS 1 级头部受伤概率,见表 A.3 这些概率是根据头部受伤准则(HIC₁₅)提供的,见公式(A.5)。

$$HIC_{15} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：
a(t) —— 是头部在重力加速度中的加速度(g)；
t₁和 t₂ ——是间隔为 15 ms 的加速脉冲期间的时间。

表 A.3 NHTSA 提供的三岁儿童发生 AIS 1 级颅脑损伤的概率与 HIC₁₅的函数关系

HIC ₁₅	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
AIS1 的 概率	18.94%	40.86%	53.44%	59.48%	61.49%	61.11%	59.34%	56.80%	53.86%	50.75%
AIS1 或 更高的 概率	19.10%	42.56%	58.47%	69.11%	76.43%	81.61%	85.39%	88.21%	90.36%	92.02%

NHTSA 提供了六岁的儿童和成人头部受伤概率,以 AIS 1 级表示,见表 A.4。

表 A.4 NHTSA 提供的六岁儿童和成人发生 AIS 1 级颅脑损伤的概率与 HIC_{15} 的函数关系

HIC_{15}	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
AIS1 的概率	1.3%	7.9%	16.9%	26.5%	34.5%	39.4%	40.4%	38.1%	33.6%	28.0%
AIS1 或更高的概率	2.0%	11.8%	25.4%	40.6%	55.5%	68.6%	78.8%	86.1%	91.1%	94.4%

A.4.4.4 颈部受伤

NHTSA 提供了在事故中 AIS 2 等级的颈部受伤概率,其为颈部伤害准则(N_{ij})的函数。见公式(A.6)。

$$N_{ij} = F_z / F_{zc} + M_{ocy} / M_{yc} \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

式中:

F_z ——拉伸或压缩时的轴向力;

F_{zc} ——用于标准化的负载的临界截距值;

M_{ocy} ——枕骨髁弯曲或伸展的弯矩;

M_{yc} ——用于标准化的弯矩的临界截距值。

AIS 2 或更高的颈部受伤的概率见公式(A.7)。

$$P_{\text{Neck}2+} = 1 / \{1 + \exp(2.054 - 1.1955 * N_{ij})\} \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

对于一个三岁儿童, $F_{zc} = 2\,120\text{ N}$ (拉伸)和 $F_{zc} = 2\,120\text{ N}$ (压缩), M_{yc} (弯曲力矩) = 68 Nm (弯曲)和 27 Nm (伸展)。

对于一个六岁儿童, $F_{zc} = 2\,800\text{ N}$ (拉伸)和 $F_{zc} = 2\,800\text{ N}$ (压缩), M_{yc} (弯曲力矩) = 93 Nm (弯曲)和 39 Nm (伸展)。

对于成年女性, $F_{zc} = 3\,370\text{ N}$ (拉伸)和 $3\,370\text{ N}$ (压缩), M_{yc} (弯曲力矩) = 155 Nm (弯曲)和 62 Nm (伸展)。

对于中型成年男性, $F_{zc} = 4\,500\text{ N}$ (拉伸)和 $4\,500\text{ N}$ (压缩), M_{yc} (弯曲力矩) = 310 Nm (拉伸)和 125 Nm (伸展)。

尽管 NHTSA 没有提供颈部受伤比 AIS 2 少的概率,但 Palisson 等人报告,对于三岁儿童,根据他们对 40 位真实事故的再现虚拟测量,在剪切力低于 730 N ,拉伸力低于 $1\,450\text{ N}$ 的或弯矩力矩低于 13 Nm 时,没有发生颈部损伤事故。

A.4.4.5 胸部受伤

NHTSA 提供了 3 岁儿童 AIS 为 2 或更大的胸部受伤概率,这是最大胸部挠度的函数,见公式(A.8)。

$$P_{\text{Chest}2+} = 1 / \{1 + \exp(1.8706 - 0.08225d)\} \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

d ——最大胸部挠度(mm)。

NHTSA 还为发生事故的六岁儿童提供了 AIS 2 或更高的胸部受伤概率,见公式(A.9)。

$$P_{\text{Chest}2+} = 1 / \{1 + \exp(1.8706 - 0.06991d)\} \dots\dots\dots (A.9)$$

NHTSA 不能提供小于 AIS 2 的胸部受伤概率。根据 Palisson 等人对 24 例现实生活事故的重建虚拟数据,对于三级以下的情况,在 3 岁儿童伤患的胸部偏斜 20 mm 以下没有观察到胸部受伤。

A.4.5 如何使用受伤概率

为了根据提供的数据来定义伤害概率(A.4.3.3 和 A.4.4),需要选择适当的概率水平。这里提供了一些例子。

例如,Fujikawa 等人在图 A.3 中选择断裂概率为 10%的载荷作为试验准则。根据图 A.3 中的概率曲线,10%的概率。在垂直轴上表示为 0.1,对应水平轴上表示为 1.24 kN。

另一个示例在图 A.3 中表示,30%的断裂概率为 1.6 kN,因为汽车法规中行人小腿受伤的标准对应于 30%的断裂概率。

航空法规中材料强度的准则较为保守,要求断裂概率为 1%,置信区间为 95%。尽管此准则不是针对生物力学耐受性,而是针对机械部件的材料强度,并且引入此附录的少数资料提供了 95%的置信区间,但基于机械强度统计分析的风险减小原则也适用于此讨论。该准则对应于图 A.3 中的 0.53 kN。

A.5 承受环境温度/湿度波动以及与这些波动相结合的振动(9.1)

IEC 60068-2-6:2007 的第 5 章从频率范围、振动幅度和耐久试验的持续时间方面规定了正弦振动测试的严酷等级。

IEC 60068-2-64:2008 的第 5 章在频率范围、加速度和耐久试验的持续时间方面规定了宽带随机振动测试的严酷等级。

IEC 60068-2-80:2005 的第 6 章根据频率范围、加速度和耐久试验的持续时间规定了混合模式振动测试的严酷等级。

IEC 60068-2-30:2005 的第 5 章和第 7 章以温度、循环次数和湿度的形式规定了余热循环测试的条件。

IEC 60068-2-38:2009 的第 5 章和第 6 章规定了复合温度/湿度循环测试的条件。

A.6 运动的耐用性(用于移动机器人)(9.2)

ISO 7176-8:2014 的 10.3.4h)要求电动轮椅运行直到参考辊完成 200 000 次循环,其中辊的尺寸在 ISO 7176-8:2014,5.8 中图 6 规定。

A.7 静态稳定性特性(用于移动机器人)(第 11 章)

A.7.1 室内和室外使用的静态稳定性(第 11 章)

EN 12184:2014 的表 1 规定了电动轮椅的静态稳定性要求:

- 对于 A 级电动轮椅,为最小值为 6°的斜坡;
- 对于 B 级电动轮椅,为最小值为 9°的斜坡;
- 用于 C 类电动轮椅;为最小值为 15°的斜坡。

A.7.2 室内使用的静态稳定性

ISO 10535:2006 的 5.3.1 和 6.3.1 要求升降机用于在以下地板角度处转移残疾人时不失去平衡:

- a) 向前和向后 10°,基座在预期的行走位置;

b) 在最不利的情况下,在向前和向后的方向上以 7° 为基准;

c) 在任何其他方向上 5° 。

IEC 60335-1:2010, 20.1 要求家用和类似用途的电器不得在与水平面成 10° 的平面上倾覆。

A.8 动态稳定性特性(用于移动机器人)(第 13 章)

EN 12184:2014 的表 1 规定了电动轮椅的动态稳定性要求:

——对于 A 级电动轮椅,为最小值为 3° 的斜坡;

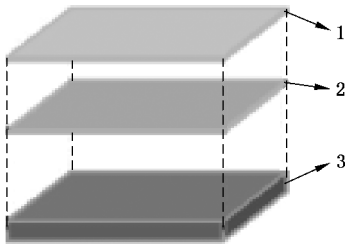
——对于 B 级电动轮椅,为最小值为 9° 的斜坡;

——用于 C 类电动轮椅;为最小值为 10° 的斜坡。

附录 B
(资料性)

人造真皮及皮下组织的机械特性

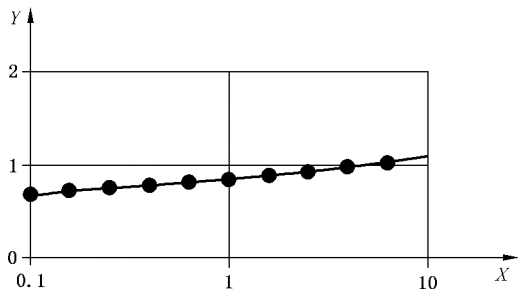
模仿人类皮肤粘弹性的人造皮肤能够使用以下多层结构来构造。如图 B.1 所示,使用粘合片将组织层和表面层粘合在一起。



标引序号说明:
1——伤口敷料;
2——丙烯酸胶($t=0.005\text{ mm}$);
3——聚氨酯胶($t=10\text{ mm}$)。
注:用 ASKER 硬度计(C 型)测量为 0。

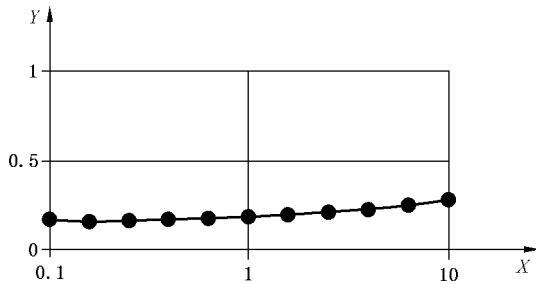
图 B.1 人造皮肤的结构

人造皮肤的粘弹性特性见图 B.2。



标引符号说明:
 X —— 频率(Hz);
 Y —— G' (存储模量)(MPa)。

a)



标引符号说明:
 X —— 频率(Hz);
 Y —— G'' (损耗模量)(MPa)。

b)

图 B.2 人造皮肤的粘弹性

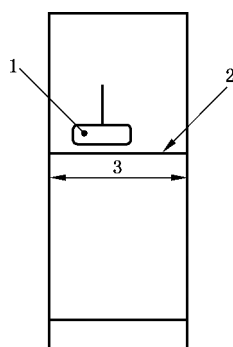
附录 C

(资料性)

用于自平衡载人机器人的无人驾驶试验的假人

C.1 假人示例

除涉及刹车和转弯的情况外,以下假人能用于第 12 章和第 13 章中的试验。



标引序号说明:

- 1——可活动的质量块;
- 2——高度可调的表面;
- 3——可活动质量块的行程。

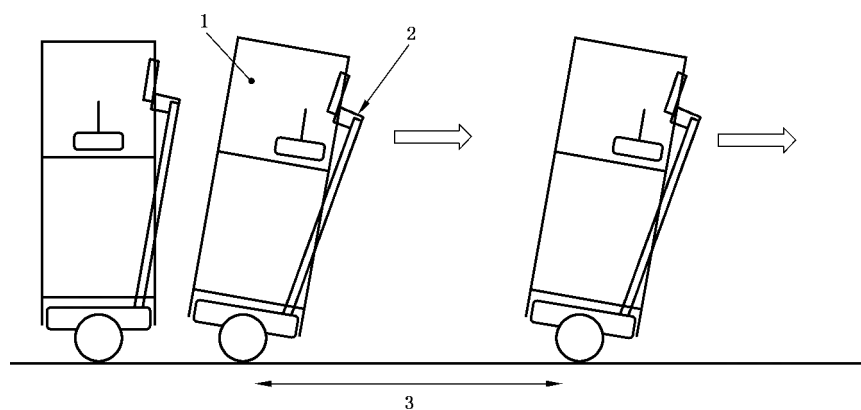
图 C.1 用于自平衡载人机器人的无人驾驶试验的假人示例

C.2 步骤示例

该试验的步骤如下:

- a) 将机器人放置在初始位置;
- b) 向前倾斜机器人进行加速;
- c) 进行测试。

见图 C.2。



标引序号说明：

1——假人；

2——载人机器人；

3——加速段。

图 C.2 无人驾驶试验的示例

附 录 D
(资料性)
试验报告格式示例

噪声试验报告示例见图 D.1。

GB/Z 43202.1—2024 的 6.2 噪声 参考编号:	模型名称:							
	序列号:							
	样品 ID:							
温度:	测试日期:							
湿度:	测试地点:							
压力:	测试人员:							
试验设备:测试行走面() 带精密声级计(1类)的噪声测量系统() 传声器 #1()传声器 #2()传声器 #3() 传声器 #4()传声器 #5() 背景噪声:_____ dBA 行走模式:_____ 传声器 #1 位置:_____ m 传声器 #5 位置:载乘人员耳中 传声器 #2 位置:_____ m 传声器 #3 位置:_____ m 传声器 #4 位置:_____ m 测量结果:								
模式	试验	通过噪声					载乘人员听到噪声	
		传声器位于 m		传声器位于 m		平均值中的 最大值	传声器 #5	平均值中的 最大值
		传声器 #1	传声器 #2	传声器 #3	传声器 #4			
	S-1							
	S-2							
	S-3							
	S-4							
	平均							
	A-1							
	A-1							
	A-1							
	A-1							
	平均							
试验地点说明(照片或图纸):								

图 D.1 试验报告示例(噪声)

附录 E

(资料性)

替代皮肤片上的测量试验和损伤观察

E.1 概述

第 8 章所述的安全验证试验通常足以确保身体辅助机器人的用户免受物理压力或拉力,该压力或拉力会导致机器人袖口与人体皮肤的接触表面产生水泡等伤口。如果接触表面上的应力集中没有很好地监控,本附录提供有关观察替代皮肤片上损伤的试验方法的补充信息,如图 4 中的试验流程所示。

E.2 原则

试验过程包括以下三个步骤。

- 把机器人穿戴在他/她预先确定的感兴趣的周期性运动中,定义人体最大负荷的接触状态和模式。
- 在上下肢、腰部等身体部位的接触面下准备好模拟人体皮下的材料,身体辅助机器人的袖口连接在这些接触面上,并在袖口表面与模拟材料之间固定猪皮这样的人体皮肤替代品。
- 复制并记录与 a) 中定义的相同接触状态下施加在替代皮肤片上的最大/平均负载模式。在测试过程中,如果应力集中没有得到很好地监测,通过观察替代皮肤片上的损伤来检查替代物是否受伤。

E.3 仪器

仪器由具有力/牵引感知能力的袖带,用于带人造真皮和皮下组织的假人以及具有袖带移动能力的操作机组成,如 8.2 中所述。还需要替代皮肤片来附着在人造真皮及皮下组织表面。

使用替代皮肤片的典型示例是猪皮肤表面。为了使猪皮肤的形状与人类受试者的皮肤更相似,使用手术剪刀将其小心剃毛。在进行摩擦试验之前,将明显的毛发完全去除,对皮肤表面没有任何伤害。还要使用外科剪刀将猪皮下面部分皮下组织中多余的脂肪小心地切掉。

E.4 步骤

试验过程包括以下步骤。

- 在上下肢、腰部等身体部位的接触表面下准备模拟人体真皮的材料,并附上身体辅助机器人的袖带,而人体皮肤的替代物比如猪皮固定在覆盖有人造真皮和皮下组织的假人身体部位上。假人还包裹着一层替代皮肤。具有力/牵引感知能力的机器人袖带安装在执行器末端,并附在替代皮肤表面上。

人体部分和袖带之间的力模式能通过 8.3a) 中描述的相同过程获取。

- 通过开始准备假人来进行试验,该假人用附加的替代皮肤包裹。其他准备见 8.3。当袖带以制造商规定的次数和频率重复摩擦代理皮肤片的表面时,进行测量。
- 记录接触表面状态的外观照片图像,以便与制造商在 8.3a) 2) 中规定的最大/平均力/牵引力值平行地用于以后的观察。

通过以下方式获得接触表面的外观照片图像。将替代皮肤的主要接触部分依次浸入 10% 福尔马林溶液、20% 蔗糖和 30% 蔗糖中,并用磷酸盐缓冲盐水浸泡 8 h。将处理后的组织样品手动切成细管,并与 OCT 复合培养基混合,以用干冰快速冷冻。OCT 复合培养基能够嵌入和固定替代皮肤样品,以在 -20 °C 下进一步冷冻切片。预冷 30 min 后,将样品在低温恒温器中切成 10 mm 的切片。样

品的组织学切片通过常规的 H&E 染色技术进行染色。用显微镜观察到,在棘皮层皮肤层中观察到的裂痕被认为是水泡初期的重要证据。见图 E.1。

- 注 1: OCT 是最佳切割温度的缩写,是乙二醇和树脂的水溶性混合物,为低温恒温器组织切片提供稳定的样品基质。
- 注 2: H&E 是苏木素和曙红的两种染料。前者是一种称为 hematein 的染料,可染色酸性(嗜碱性)结构,例如细胞核和细胞质的一部分呈紫蓝色,而后者是酸性染料,可染色基本(嗜酸)结构,例如细胞质的另一部分为红色或粉红色。

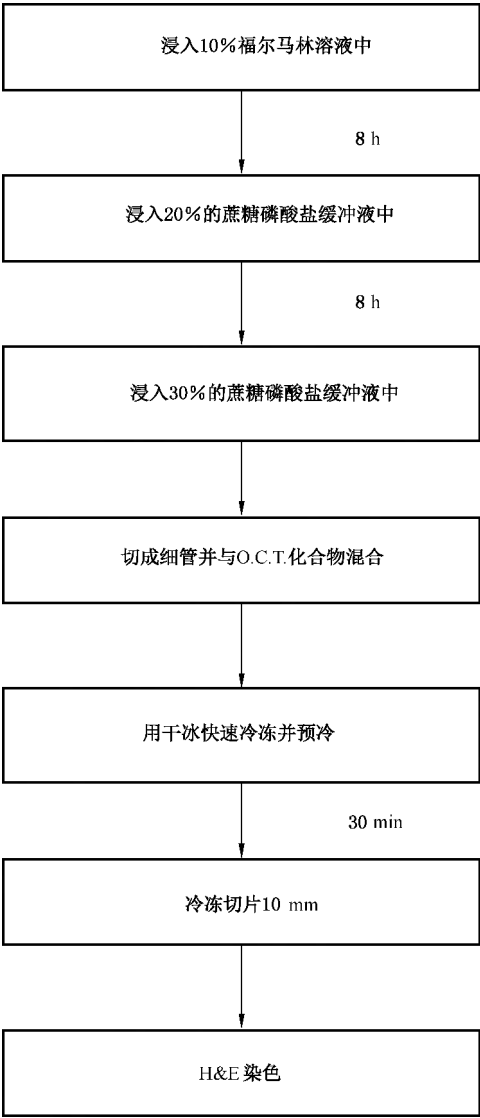


图 E.1 替代皮肤片的处理流程

参 考 文 献

- [1] GB/T 12643—2013 机器人与机器人装备 词汇
- [2] GB/T 19876—2012 机械安全 与人体部位接近速度相关的安全防护装置的定位
- [3] GB/T 36008—2018 机器人与机器人装备 协作机器人
- [4] ISO 7176-1:2014 Wheelchairs—Part 1:Determination of static stability
- [5] ISO 7176-8:2014 Wheelchairs—Part 8:Requirements and test methods for static, impact and fatigue strengths
- [6] ISO 7176-10 Wheelchairs—Part 10:Determination of obstacle-climbing ability of electrically powered wheelchairs
- [7] ISO 7176-11 Wheelchairs—Part 11:Test dummies
- [8] ISO 7176-13 Wheelchairs—Part 13:Determination of coefficient of friction of test surfaces
- [9] ISO 7176-21 Wheelchairs—Part 21:Requirements and test methods for electromagnetic compatibility of electrically powered wheelchairs and scooters, and battery chargers
- [10] ISO 7250-1 Basic human body measurements for technological design—Part 1:Body measurement definitions and landmarks
- [11] ISO 10535:2006 Hoists for the transfer of disabled persons—Requirements and test methods
- [12] ISO 11202:2010 Acoustics—Noise emitted by machinery and equipment—Determination of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions applying approximate environmental corrections
- [13] ISO 12100 Safety of machinery—General principles for design—Risk assessment and risk reduction
- [14] ISO 13482 Robots and robotic devices—Safety requirements for personal care robots
- [15] ISO 13732-1:2006 Ergonomics of the thermal environment—Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces—Part 1:Hot surfaces
- [16] ISO 13849-2:2012 Safety of machinery—Safety-related parts of control systems—Part 2:Validation
- [17] ISO 13856-3 Safety of machinery—Pressure-sensitive protective devices—Part 3:General principles for design and testing of pressure-sensitive bumpers, plates, wires and similar devices
- [18] ISO 16024 Personal protective equipment for protection against falls from a height—Flexible horizontal lifeline systems
- [19] IEC Guide 117:2010 Electrotechnical equipment—Temperatures of touchable hot surfaces
- [20] IEC 60068-2-2 Environmental testing—Part 2-2:Tests—Test B:Dry heat
- [21] IEC 60068-2-3 Basic environmental testing procedures—Part 2-3:Tests—Test Ca:Damp heat, steady state
- [22] IEC 60068-2-6:2007 Environmental testing—Part 2-6:Tests—test Fc:Vibration (sinusoidal)
- [23] IEC 60068-2-13 Basic environmental testing procedures—Part 2-13:Tests—Test M:Low air pressure
- [24] IEC 60068-2-14:2009 Environmental testing—Part 2-14:Tests—Test N:Change of tem-

perature

- [25] IEC 60068-2-17:1994 Basic environmental testing procedures—Part 2-17: Tests—Test Q: Sealing
- [26] IEC 60068-2-18:2017 Environmental testing—Part 2-18: Tests—Test R and guidance: Water
- [27] IEC 60068-2-27 Environmental testing—Part 2-27: Tests—Test Ea and guidance: Shock
- [28] IEC 60068-2-30:2005 Environmental testing—Part 2-30: Tests—Test Db: Damp heat, cyclic (12 h+ 12 h cycle)
- [29] IEC 60068-2-31 Environmental testing—Part 2-31: Tests—Test Ec: Rough handling shocks, primarily for equipment-type specimens
- [30] IEC 60068-2-38:2009 Environmental testing—Part 2-38: Tests—Test Z/AD: Composite temperature/humidity cyclic test
- [31] IEC 60068-2-40 Basic environmental testing procedures—Part 2-40: Tests—Test Z/AM: Combined cold/low air pressure tests
- [32] IEC 60068-2-41 Basic environmental testing procedures—Part 2-41: Tests—Test Z/BM: Combined dry heat/low air pressure tests
- [33] IEC 60068-2-64:2008 Environmental testing—Part 2-64: Tests—Test Fh: Vibration, broadband random and guidance
- [34] IEC 60068-2-80:2005 Environmental testing—Part 2-80: Tests—Test Fi: Vibration—Mixed mode
- [35] IEC 60204-1 Safety of machinery—Electrical equipment of machines—Part 1: General requirements
- [36] IEC 60335-1:2010 Household and similar electrical appliances—Safety—Part 1: General requirements
- [37] IEC 60601-1:2012 Medical electrical equipment—Part 1: General requirements for basic safety and essential performance
- [38] IEC 60950-1:2005/Amd2:2013 Information technology equipment—Safety—Part 1: General requirements
- [39] IEC 61000-4-2 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-2: Testing and measurement techniques—Electrostatic discharge immunity test
- [40] IEC 61000-4-3 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-3: Testing and measurement techniques—Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test
- [41] IEC 61000-4-4 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-4: Testing and measurement techniques—Electrical fast transient/burst immunity test
- [42] IEC 61000-4-5 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-5: Testing and measurement techniques—Surge immunity test
- [43] IEC 61000-4-6 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-6: Testing and measurement techniques—Immunity to conducted disturbances induced by radio-frequency fields
- [44] IEC 61000-4-8 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-8: Testing and measurement techniques—Power frequency magnetic field immunity test
- [45] IEC 61000-4-11 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-11: Testing and measurement techniques—Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests
- [46] IEC 61000-6-1 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 6-1: Generic standards—Immunity standard for residential, commercial and light-industrial environments

[47] IEC 61000-6-2 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 6-2: Generic standards—Immunity standard for industrial environments

[48] IEC 61032 Protection of persons and equipment by enclosures—Probes for verification

[49] IEC 61326-3-1 Electrical equipment for measurement, control and laboratory use—EMC requirements—Part 3-1: Immunity requirements for safety-related systems and for equipment intended to perform safety-related functions (functional safety)—General industrial applications

[50] IEC 61496-1 Safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Part 1: General requirements and tests

[51] IEC 61496-2 Safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Part 2: Particular requirements for equipment using active opto-electronic protective devices (AOPDs)

[52] IEC 61496-3 Safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Part 3: Particular requirements for active opto-electronic protective devices responsive to diffuse Reflection (AOP-DDR)

[53] IEC/TS 61496-4-2 Safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Part 4-2: Particular requirements for equipment using vision based protective devices (VBPD)—Additional requirements when using reference pattern techniques (VBPDP)

[54] IEC/TS 61496-4-3 Safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Part 4-3: Particular requirements for equipment using vision based protective devices (VBPD)—Additional requirements when using stereo vision techniques (VBPDS)

[55] IEC 61672-1 Electroacoustics—Sound level meters—Part 1: Specifications

[56] IEC 62368-1:2014 Audio/video, information and communication technology equipment—Part 1: Safety requirements

[57] EN 12184:2014, Electrically powered wheelchairs, scooters and their chargers—Requirements and test methods

[58] EN 62998-721, Safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Safety-related sensors used for protection of person

[59] SAE J211-1, Instrumentation for impact test—Part 1: Electronic instrumentation

[60] UN Regulation No.127, Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to their pedestrian safety performance

[61] UN Regulation No.44, Uniform provisions concerning the approval of restraining devices for child occupants of power-driven vehicles (“Child Restraint Systems”) regard to their pedestrian safety performance

[62] US Code of Federal Regulations Title 49, Part 572, Transportation—Anthropomorphic test devices

[63] US department of transportation, Federal Aviation Regulations, 14 CFR 25.613—Material strength properties and design values

[64] Eppinger R., Sun E., Bandak F., Haffner M., Khaewpong N., Maltese M., Kuppa S., Nguyen T., Takhounts E., Tannous R., Zhang A., Saul R. “Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems— II ,” NHTSA, 1999

[65] Fujikawa T., Asano Y., Nishimoto T., Nishikata R. “Static fracture tolerance of human metatarsal in being run over by robot,” Proceedings of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2017), 2017, pp.6935-6942

[66] Fujikawa T., Sugiura R., Nishikata R., Nishimoto T. “Critical contact pressure and trans-

ferred energy for traumatic injury of soft tissue by blunt impact in human-robot interaction,”Proceedings of 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2017), 2017, pp.867-872

[67] Haddadin S., Haddadin S., Khoury A., Rokahr T., Parusel S., Burgkart R., Bicchi A. and Ibu-Schäffer A. “On making robots understand safety: Embedding injury knowledge into control,” The International Journal of Robotics Research, 2012, vol.31, issue:13, pp.1578-1602

[68] Mao X., Yamada Y., Akiyama Y. et al. “, Safety verification method for preventing friction blisters during utilization of physical assistant robots,” Advanced Robotics, 2017, vol.31, no.13 pp. 680-694

[69] Muttray A., Melia M., Geissler B., König J., Letzel S., “Experimental assessment of pain thresholds in major parts of the human body due to mechanical exposure in human-machine interface, Final report of Project,” No.FF-FP 0317, 2016, <https://www.dguv.de/ifa/index.jsp>

[70] Naylor P.F.D. “, Experimental friction blisters,” British Journal of Dermatology, 1955, vol.67, no.10, pp.327-342

[71] NHTSA Proposed Amendment to FMVSS No 213 Frontal Test Procedure, 2002

[72] Saito T., Ikeda H. “Measuring System and Analytical Method of Pain Tolerance to Mechanical Stimulus for Safe Design of Human-Collaborative Robot,” Proceedings of the 4th International Conference—Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2005), 2005

[73] Takahashi Y., Matsuoka F., Okuyama H., Imaizumi I. “, Development of injury probability functions for the flexible pedestrian legform impactor, SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems,” 2012 vol.5, no.1, pp.242-252

[74] Palisson A., Cassan F., Trosseille X., Lesire P., Alonzo F. “Estimating Q3 dummy injury criteria for frontal impact using the child project results and scaling reference values,” Proceedings of the IRCOBI conference, 2007, pp.263-276

[75] Yamada Y., Hirasawa Y., Huang Y., Umetani Y., Suita K. “, Human-robot contact in the safeguarding space,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1997, vol.2, issue:4, pp.230-236