



中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 44938.2—2024/IEC TR 62998-2:2020

机械电气安全 第2部分：保护人员 安全的传感器的应用示例

Electrical safety of machinery—Part 2: Examples of application for
safety-related sensors used to protect persons

(IEC TR 62998-2:2020, Safety of machinery—Part 2: Examples of
application, IDT)

2024-12-31 发布

2025-07-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

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、缩略语	2
3.1 术语和定义	2
3.2 缩略语	2
4 移动机器人的应用	2
4.1 概述	2
4.2 邮件运输移动机器人上的 SRSS	3
4.3 SRSS 清洁移动机器人	12
5 港口物流集装箱装卸设备的应用	18
5.1 概述	18
5.2 CHE 的 SRSS	18
参考文献	27
图 1 室外场景示意图	3
图 2 设有 2 个特定安全区域的移动机器人	4
图 3 将 3 个 SRS 组合成一个 SRSS 及其功能	5
图 4 SRS 的安装位置和感应区以及 SRSS 的安全相关区	7
图 5 SRS 的安装位置和感应区以及 SRSS 的安全相关区	7
图 6 用于评估覆盖间隔的测量数据示例	10
图 7 试验装置	10
图 8 CHE 应用	18
图 9 CHE 的作业区域	19
图 10 SRSS 的结构和安全相关功能	21
图 11 SRSS 的安全相关区	23
图 12 SRS 的安装位置和感应区以及 SRSS 的安全相关区	23
表 1 安全相关要求	5
表 2 SRS 的置信度信息示例	9
表 3 SRSS 的使用信息	11
表 4 安全相关要求	14
表 5 SRSS 的使用信息	17
表 6 安全相关要求	21
表 7 SRSS 的环境限制	24
表 8 SRSS 的使用信息	25

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 44938《机械电气安全》的第 2 部分。GB/Z 44938 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：用于保护人员安全的传感器；
- 第 2 部分：保护人员安全的传感器的应用示例。

本文件等同采用 IEC TR 62998-2:2020《机械安全 第 2 部分：应用示例》。

本文件做了下列编辑性改动：

- 将标准名称改为《机械电气安全 第 2 部分：保护人员安全的传感器的应用示例》；
- 更改了图 1 的形式，将 IEC 原文中的图片改线图；
- 删除了 4.2.5 中的注 1 和注 2，转化为我国标准后无意义；
- 更改了 IEC 原文的勘误，将 5.2.10 中的“6.2.6”改为“5.2.6”，“6.2.3”改为“5.2.3”；
- 更改了 IEC 原文的勘误，将表 6 中的“6.2.3”改为“5.2.3”，“6.2.5”改为“5.2.5”，“6.2.6”改为“5.2.6”；
- 更改了参考文献的文件清单。

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。

本文件由全国工业机械电气系统标准化技术委员会(SAC/TC 231)归口。

本文件起草单位：北京机床研究所有限公司、西安交通大学、中国石油大学(北京)、东莞海裕百特智能装备有限公司、郑州煤机智能工作面科技有限公司、黄鹄(浙江)精密机床有限公司。

本文件主要起草人：薛瑞娟、王金江、吴翟、张颖、李支康、黄祖广、赵立波、吴怡然、张培森、高知国、王楚婷、林启敬、王留军、张文琦、董伟。

引 言

安全相关传感器主要用于存在人员受伤风险的机械设备上。安全相关传感器可使机器在有人处于危险状况前回复到安全状态,从而实现人员保护。目前,传感器行业主要使用通用功能安全标准 GB/T 20438(IEC 61508)系列标准,或者具体领域的机械标准 IEC 62061 和 ISO 13849 系列标准作为安全相关产品的设计指南,但这些标准并未就对于在特定环境条件下如何避免设计失败或无法检测指定物体,给出足够的指导,可能导致无法承受的人员风险。GB/Z 44938 明确了传感器或传感器系统的功能安全,规范了传感器和传感器系统的在系统性方面的开发与集成的要求,填补了具体传感器设计标准与电气、电子和可编程电子控制系统的通用功能安全标准之间系统性能验证方面的空白,GB/Z 44938 拟由 3 个部分构成。

- 第 1 部分:用于保护人员安全的传感器。目的在于提高我国机械电气设备的安全水平,保障相关从业人员的人身安全,指导保护人员安全的传感器的设计制造与生产使用过程,规范保护人员安全的传感器的功能、安全及试验要求。
- 第 2 部分:保护人员安全的传感器的应用示例。目的在于为使用第 1 部分提供指南和应用示例。
- 第 3 部分:传感器技术和算法。目的在于指导如何正确实施算法以防止人们承受不可容忍的风险。

本文件为了 GB/Z 44938.1 的使用提供了指南和应用示例,对 GB/Z 44938.1 的贯彻和实施有重要意义。

机械电气安全 第2部分:保护人员 安全的传感器的应用示例

1 范围

本文件为 GB/Z 44938.1—2024 的应用提供使用指南。

提供以下示例:

- 与 SRS/SRSS 相关的应用;
- 从应用的角度使用 SRS/SRSS 信息;
- 针对特定应用将 SRS 融合到 SRSS 中;以及
- 用于给定应用的适当使用说明。

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 16855.1—2018 机械安全 控制系统安全相关部件 第1部分:设计通则(ISO 13849-1:2015, IDT)

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(ISO 13855:2010, IDT)

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

GB/Z 44938.1—2024 机械电气安全 第1部分:用于保护人员的安全相关传感器(IEC TS 62998-1:2019)

ISO 12100 机械安全 设计通则 风险评估与风险减小(Safety of machinery—General principles for design—Risk assessment and risk reduction)

IEC 60721-3-5 环境条件分类 第3部分:环境参数组及其严酷程度的分类分级 第5节:地面车辆上的设备(Classification of environmental conditions—Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities—Section 5: Ground vehicle installations)

IEC 61496-1 机械电气安全 电敏保护设备 第1部分:通用技术要求和试验(Safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Part 1: General requirements and tests)

IEC 61496-3 机械电气安全 电敏保护设备 第3部分:使用有源光电漫反射保护装置(AOPD-DR)设备的特殊要求[Electrical safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Part 3: Particular requirements for Active Opto-electronic Protective Devices responsive to Diffuse Reflection (AOPDDR)]

IEC 62061 机械安全 关系安全的电气、电子和可编程电子控制系统的功能安全(Safety of machinery—Functional safety of safety-related control systems)

3 术语和定义、缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

移动机器人

能够在自己控制下移动的机器人。

3.1.2

机器人

在两个或多个轴上具有一定程度自主权,在相应环境中执行预期任务的可编程驱动设备。

[来源:GB/T 12643—2013,2.6,有修改]

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

ALARP:最低合理可行(As Low As Reasonably Practical)

CHE:集装箱装卸设备(Container-handling Equipment)

LiDAR:光探测和测距(Light Detection And Ranging)

MOR:气象光学视程(Meteorological Optical Range)

SCS:安全相关控制系统(Safety-related Control System)

SLAM:即时定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping)

SRS:安全相关传感器(Safety-related Sensor)

SRSS:安全相关的传感器系统(Safety-related Sensor System)

TOF:飞行时间(Time of Flight)

4 移动机器人的应用

4.1 概述

此示例涵盖了根据 GB/Z 44938.1—2024 的第 6 章,将 3 个 SRS 融合到 SRSS 的集成和安装阶段,以根据预期用途的要求改善感应区和安全相关区的内容。预期用途是根据 GB/T 36530—2018 的两种不同类型的在访问受限的公共区域内自主运行的移动机器人形成的。宜注意以下说明并未基于全面的分析,而仅是移动机器人的示例。

注:GB/T 36530—2018 中称为以自主方式运行的移动机器人。为了简化名称,本文件将使用术语“移动机器人”。

两台不同的移动机器人放置在某个建筑物密集的大学校园里操作以实现:

在大学办公楼之间运输内部邮件,以及清洗大学的人行道。

图 1 显示了大学校园中典型的户外人行道。出现或者接近 SRSS 安全相关区的人会被检测到,并且安全相关控制系统宜令移动机器人做出适当的反应。

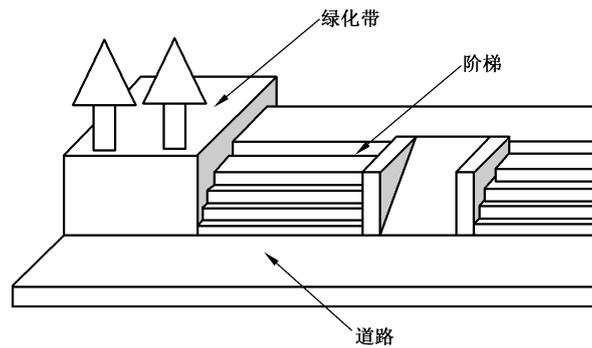


图 1 室外场景示意图

4.2 邮件运输移动机器人上的 SRSS

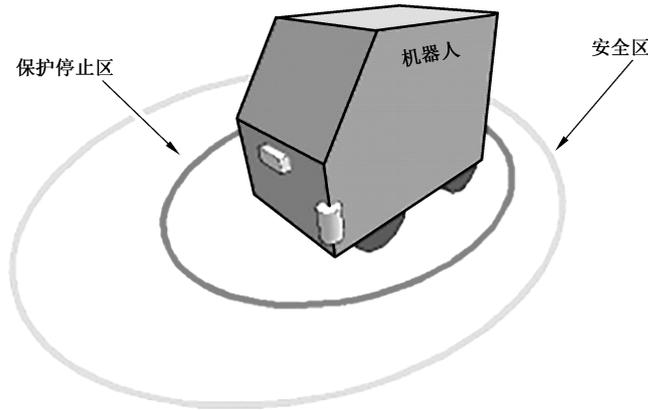
4.2.1 预期用途

宜由集成商确定预期用途(见 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.1)。它由以下选定的示例项定义。

- a) 该移动机器人为 GB/T 36530—2018 规定的 1.1 型机器人,其质量为 30 kg,尺寸为:500 mm×500 mm×600 mm。
- b) 移动机器人自动在连接大学办公楼的人行道上进行导航。机器人的路径是根据由 SLAM 技术所创建的地图以及物理约束预先确定的。该地图中包含了沿人行道固定物体(例如护栏、建筑物墙壁、树木等)的位置信息。通过参考该地图,机器人可在移动时确定其自身的限定空间(GB/T 36530—2018 中 3.18.2)。
- c) 若移动机器人于白天在非车道上移动,其中:
 - 1) 禁止轻型车辆(如自行车)进入;
 - 2) 轮椅能够进入;
 - 3) 如图 1 所示,路面平整,某些区域的坡度最高为 5 度;
 - 4) 人行道上站立或行走的均为成人和/或儿童。3 岁以下的儿童被认为是受到控制的,4 岁到 10 岁的儿童被认为是由成人陪同的。成人或许不会陪同 10 岁以上且未满 14 岁的儿童。就本示例而言,如果有人进入安全区域,则其朝向移动机器人的速度在 0 mm/s~800 mm/s 之间。

注: 在此应用中假设不同人员的行为时,本示例中的速度偏离了 GB/T 19876—2012 的标准。对于其他应用程序,更快或更慢的速度可能更加合适。在校园中,人们会被组织措施和警告信号告知,在有移动机器人出现的区域内禁止跑步。其他特性示例在 4.2.4 中给出。

- d) 移动机器人:
 - 1) 当站立或行走的人进入保护停止区域时,进行保护性停止(见图 2);
 - 2) 当站立或行走的人进入安全区域时,进行降低速度(见图 2);
 - 3) 最高驱动速度可达 700 mm/s,其速度可通过安全相关的速度控制功能降至 300 mm/s;
 - 4) 能在 0.5 s 内将速度从 700 mm/s 降低到 300 mm/s,再在 0.2 s 内将速度降低为零;
 - 5) 在白天工作。
- e) 运行期间的室外环境条件:
 - 1) 降水量最高为 10 mm/h;
 - 2) 白天有光线干扰。



根据 GB/T 36530—2018, 移动机器人设有两个特定区域。移动机器人执行保护性停止的保护停止区, 和当检测到与安全相关的对象时执行与安全相关速度控制功能的保护区。根据 GB/Z 44938.1—2024, 将保护停止区和保护区定义为安全相关区。

图 2 设有 2 个特定安全区域的移动机器人

4.2.2 SRSS 性能等级的确定

在所选择的方法中, 使用 GB/T 36530—2018 所规定的 1.1 型移动机器人的安全功能性能等级须为符合 GB/T 16855.1—2018 的 PL-b 等级。安全功能包括通过 SRSS 启动的符合 GB/T 36530—2018 的保护停止功能, 安全相关的速度控制功能, 避免危险碰撞功能以及行驶面检测功能。

对应于 PL-b 等级的 SRSS 所需的性能等级是 GB/Z 44938.1—2024 中所规定的传感器性能等级 B。

4.2.3 SRS 使用限制和 SRSS 的功能

SRSS 由制造商定义的 3 个 SRS 组成, 如下所示(见图 3)。

- a) SRS1: 一种适用于符合 GB/T 16855.1—2018 最高 PL-b 等级的, 可检测到人员和其他安全相关物体并精确测量其位置和速度的二维激光雷达系统。系统性能根据 GB/Z 44938.1—2024 进行评估。感应区的半径最大为 7 000 mm, 视角为 270°。安全相关对象的特性检测能力为: 最小尺寸 40 mm×40 mm; 最小物体反射率 5%; 最大物体速度 1 600 mm/s。响应时间为 0.05 s。在规定的范围内, 其可在室内和室外环境下使用。
- b) SRS2: 一种适用于符合 GB/T 16855.1—2018 标准最高 PL-b 等级的 TOF 相机(新型 3D 图像传感器), 能够使用 3D 成像技术检测部分人体, 道路表面和其他安全相关物体。此系统性能是根据 GB/Z 44938.1—2024 进行评估。SRS2 能够在 3D 传感器坐标系内测量对象的位置和速度。感应区最大为 4 000 mm, 垂直和水平视角分别为 60°和 70°。安全相关对象的特性检测能力为: 最小尺寸 40 mm×40 mm×40mm; 最小物体反射率 5%; 最大物体速度 1 600 mm/s; 响应时间为 0.05 s。其可立体区分开铺砌的路面和其他物体。在规定的范围内, 其可在室内和室外环境下使用;
- c) SRS3: 与 SRS1 的规格相同。

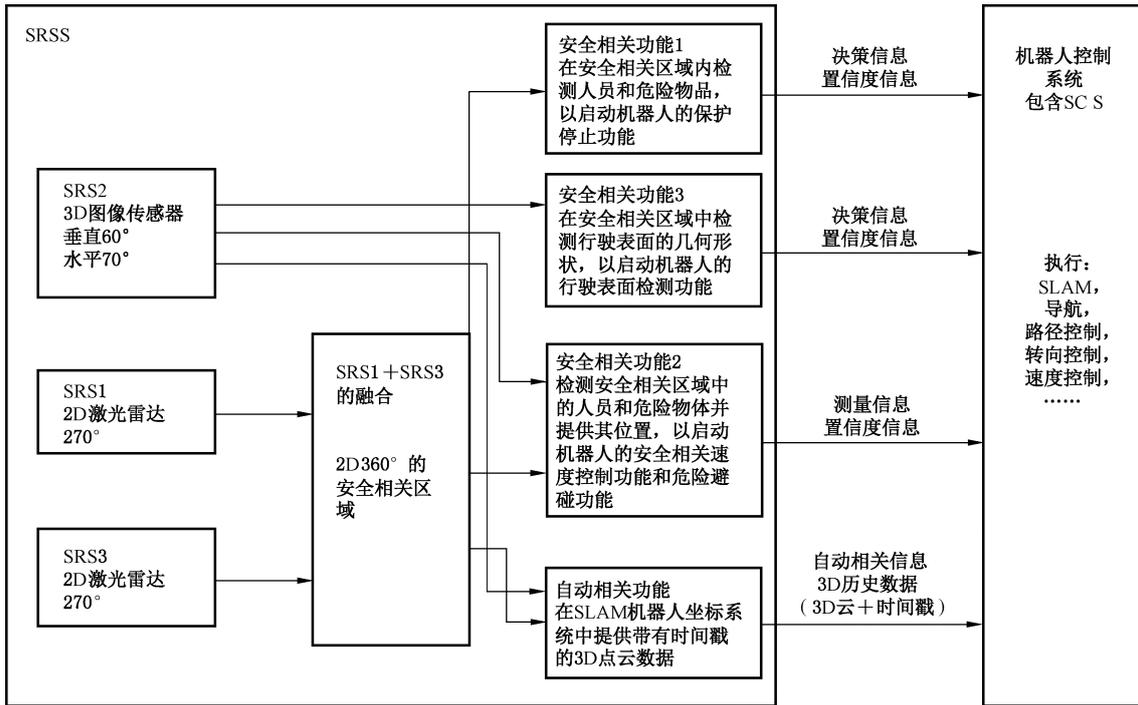


图 3 将 3 个 SRS 组合成一个 SRSS 及其功能

目标应用程序需要 4 个 SRSS 功能(见图 3)。

- 安全相关功能 1:当检测到保护停止区域中的人员和危险物品时,启动 GB/T 36530—2018 中 6.2.2.3 指定的保护性停止功能。
- 安全相关功能 2:检测人员和危险物体并给与安全有关的速度控制功能和/或危险碰撞避免功能提供符合 GB/T 36530—2018 中 6.4 和 6.5.2.1 规定的位置与速度作为安全相关信息。
- 安全相关功能 3:按照 GB/T 36530—2018 中 6.5.3 规定对机器人行驶表面的几何形状进行检测。当机器人在其移动方向上观察到允许移动的地面时,机器人执行向前移动命令。如果机器人需要往回移动,则必定存在其已行进的路面,因此不需要向回移动检测路面功能。
- 自动相关功能:在 SLAM 机器人坐标系统中提供带有时间戳的 3D 点云数据。

4.2.4 安全相关要求

SRSS 安全相关要求宜由集成商根据预期用途进行规定(见 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.1)。例如,见表 1 中的需求定义。

表 1 安全相关要求

术语	要求	细节
SRSS 性能等级	性能等级 B	见 4.2.2 由相同性能等级 B 级的 SRS 集成
SRSS 安全相关功能的要求率	10/h	
SRSS 响应时间	0.1 s	

表 1 安全相关要求 (续)

术语	要求	细节
SRSS 检测能力	例如,人员相关特性: 代表处于直立姿势的 4 岁儿童的尺寸; 最小反射值 5%; 速度 800 mm/s。 例如,危险物品特性: 代表轮椅的尺寸; 最小反射值 5%; 速度 800 mm/s	见 4.2.5
SRSS 感应区	例如,安全相关区: 2 维 $S_0=656$ mm 和 $S_1=1\ 255$ mm 的 360° ; 3 维垂直和水平视角 60° ;其中 $S_0=656$ mm 和 $S_1=1\ 255$ mm	见 4.2.6

4.2.5 对象类别和物理特性

SRSS 的检测能力宜由集成商根据 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.3 进行规定。下面是具体示例。
所分析的对象类别如下:

- a) 用于执行人体检测功能的对象:
 - 1) 3 岁及以下的受监护儿童;
 - 2) 4 岁至 10 岁的有人陪同儿童;
 - 3) 11 岁至 13 岁的无人陪同儿童;
 - 4) 14 岁以上的成人。
- b) 用于执行危险对象功能的对象:轮椅。
- c) 用于执行自动相关功能的对象:用于导航的地标。

此外,只有有人陪同站立或行走的儿童特性会针对安全相关功能 1 和安全相关功能 2 进行分析。

对于安全相关功能 2,SRSS 的检测极限是 4 岁儿童的前臂。简化形状约为直径为 40 mm 或更大,长度为 200 mm 的圆柱体。

对于安全相关功能 1,将 4 岁儿童的下肢作为最小识别尺寸。简化形状约为直径为 50 mm 的圆柱体,对应 SRS1 和 SRS3 的安装高度。

对于由 SRSS 的 SRS2 执行的安全相关功能 3,待测的行驶面是连续平坦表面或平滑曲面,其在机器人前方的坡度为 5° 或更小。

注 1: SRS1 可能在斜坡入口处将路面检测为危险物体。或许需要采取其他措施来防止移动机器人永久停止。

在每个 SRS 通用的波长下,用于代表受雇人员、危险物体和行进表面的最小漫反射率被认为是 5% 或更高。

注 2: 遵循最低合理可行原则,PL-b 等级的安全功能最小反射率值为 5%。在安全和自动应用中,许多标准 LiDAR 传感器将最小反射率值规定为 10%,而对于在自动引导车辆上使用传感器进行人员检测,则要求最小反射率值为 6%,配备符合 B56.5:2012。通常情况下,在使用说明中,移动机器人能在应用程序中进行额外的验证,以用于检测使用过的物体特性或规定的性能(例如物体的速度或最小反射值)是否合适。针对许多人所关注的在机械设备中使用传感器进行人身保护的情况,在此专门讨论了最小反射率值。需要考虑到,SRS 的检测能力通常是基于不同特性的组合,而不是基于确定性分析的单个特性。例如,低反射值和小尺寸物体以及最大假定速度的组合被认为出现的概率是极低的。在考虑其概率分布的情况下,实际应用和特性组合是

SRS 和 SRS 应用中所面临的一个越来越大的挑战。

在白天向移动机器人移动的人员速度被认为 800 mm/s。

注 3: 在大学中行动的人员会被告知移动机器人正在工作中, 并需要与移动机器人保持一定距离。

对于 SRSS 的自动相关功能, 在 SRSS 感应区内, 移动机器人行走路径上代表可靠的固定地标的的所有对象将在运行开始期间进行识别。

4.2.6 感应区

SRSS 感应区宜由集成商根据 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.4 进行规定。

图 4 和图 5 显示了每个 SRS 的安装位置和感应区, 以及融合后所得 SRSS 的改进安全相关区。

SRS1 和 SRS3 分别水平安装在机器人的左前方和右后方, 距地面高度为 200 mm。通过将 SRS1 和 SRS3 安装到机器人的相对角上, 可无盲点观察到机器人的整个四周。

SRS2 安装在机器人正面的中心, 高度为 400 mm, 其用于测量机器人的运动方向。它可实现现在 SRS1 的检测平面上方检测安全相关对象, 并执行行驶面检测功能。

使用前, 请使用专用的校准工具对 SRS 的安装位置进行校准。

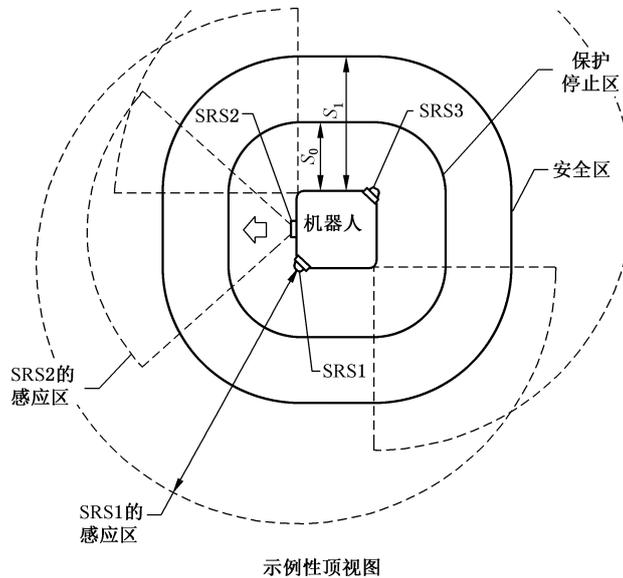


图 4 SRS 的安装位置和感应区以及 SRSS 的安全相关区

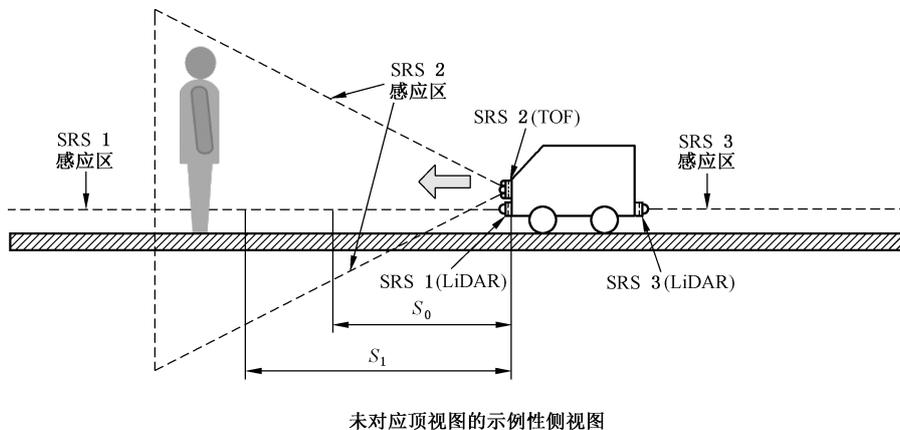


图 5 SRS 的安装位置和感应区以及 SRSS 的安全相关区

SRSS 的安全相关区对应于机器人的保护停止区和保护区。它们分别由距机器人外表面的距离 S_0 和 S_1 定义,如图 4 所示。

注 1: 这与 GB/T 36530—2018 中附录 C 不符,后者引用了机器人的中心点,而不是机器人的外表面,为了避免本文件假定造成的典型混淆,计算是基于 GB/T 19876—2012 中的概念,见 GB/T 36530—2018 中 5.10.8.3。GB/T 19876—2012 的概念是根据假定的、详尽的、针对特定应用风险评估结果进行调整的。根据 GB/T 19876—2012 进行的现有计算似乎经常是只考虑如 PL d 这样的“高”性能类(对应 SIL 2)和不考虑上下文的参数(例如不考虑运动方向的速度指标,达到危险点时停止危险运动或在运动过程中人员弯腰的情况)。

S_0 是移动机器人与安全相关物体之间的最小距离。它是根据 GB/T 19876—2012 的概念计算得出的,并且根据 ISO 12100 进行以下特定风险评估:

$$S_0 = K \times T + C + M = (V_{r-stop} + V_{obj}) \times (T_{SRSS} + T_r) + 300 \text{ mm} + M \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- K ——设备的速度,单位为米每秒(m/s);
- T ——响应时间,单位为秒(s);
- V_{r-stop} ——启动保护停止时机器人的最大速度,单位为毫米每秒(mm/s);
- V_{obj} ——物体的接近速度,单位为毫米每秒(mm/s);
- T_{SRSS} ——SRSS 响应时间,单位为秒(s);
- T_r ——机器人的响应时间,单位为秒(s);
- M ——根据 4.2.8 规定的测量不确定度,它可是测量距离周围的覆盖间隔的一半值(有关值见表 2),单位为毫米(mm)。

距离 C 是以 mm 为单位的附加距离,根据 GB/T 19876—2012 的概念,其基于在保护设备启动前进入危险区域的情况得出。 C 的值是对下肢潜在危害进行分析的结果。对于上肢,由于移动机器人的特性,不会对人体造成明显的危害。

注 2: 如果存在有必要情况,则在计算 S_0 时考虑额外的停止距离。

S_1 定义了启动安全限速功能时,以最大速度 $V_{r-reduce}$ 移动的机器人将速度降低至 V_{r-stop} 的保护区距离。计算见公式(2):

$$S_1 = (V_{r-reduce} + V_{obj}) \times (T_{SRSS} + T_r) + C + M \quad \dots\dots\dots (2)$$

SRSS 感应区的安全相关区依照如下确定:

$$S_0 = (300 \text{ mm/s} + 800 \text{ mm/s}) \times (0.1 \text{ s} + 0.2 \text{ s}) + 300 \text{ mm} + 26 \text{ mm} = 656 \text{ mm}$$

$$S_1 = (700 \text{ mm/s} + 800 \text{ mm/s}) \times (0.1 \text{ s} + 0.5 \text{ s}) + 300 \text{ mm} + 55 \text{ mm} = 1\ 255 \text{ mm}$$

SRSS 的自动相关区域是 SRS 感应区的并集。

4.2.7 环境影响下的可靠性

SRSS 集成商宜指定所有相关环境影响的限制(见 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.5)。

在下文中,集成商验证了在 4.2.1 规定的降水和直射阳光的环境影响限制下,移动机器人没有发生危险事故并且可正常运行。

注: GB/Z 44938.1—2024 的附录 F 提供了有关符合 IEC 60721 系列标准的影响和环境使用等级的进一步信息。

4.2.8 安全相关信息

SRSS 集成商宜指定在 SRSS 处理单元中执行的逻辑功能,并宜指定 SRSS 提供的安全相关信息(见 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.6)。在以下段落中给出了安全相关信息的示例。

SRSS 提供作为输出信号的安全相关信息。SRSS 的安全相关信息(见图 3)包括:

- 安全相关功能 1 相关的决策信息,二进制;
- 安全相关功能 3 相关的决策信息,二进制;
- 安全相关功能 2 相关的测量信息, n 位;
- 所有安全相关功能的置信度信息, n 位。

SRSS 输出功能的自动相关信息包括:

SLAM 的点云, n 位。

在制造商规定的使用信息中所提供的置信度信息如下:

对于每个 SRS,规定的 SRS 性能等级为 B。SRSS 所要求的性能等级也为 B。

规定的覆盖概率或决策概率为 1×10^{-6} 。按照 GB/Z 44938.1—2024 中公式(1)的规定确定如下:

覆盖概率或决策概率 $> 1 \times [\text{对应于 SRS/SRSS 性能等级 B 的 PFH(点特征直方图)上限}] / (\text{应用具体要求率}) = 1 \times 10^{-5} / 10 = 1 \times 10^{-6}$ 。

制造商根据检测距离提供每个 SRS 的置信度信息结果。覆盖间隔的值由 SRS 的不确定性统计确定。

除了制造商提供的使用信息外,集成商还要根据图 6 执行自己的测量。测试是在 3 m 处使用一块反射率约为 5% 的测试片进行的。通过测量 SRS1, SRS3 和 SRS2 的不确定度获得的实验结果得出,在 4 m 距离处标准偏差分别为 76.29 mm(SRS1 和 SRS3)和 48.24 mm(SRS2)。

由于对应于覆盖概率 $1 \sim 10^{-6}$ 的覆盖区间被计算为 $2 \times 4.89 \sigma$,假设 SRS1 和 SRS2 分别将此 LiDAR 和 TOF 相机作为传感器单元, SRS1 在 7 m 距离处的覆盖区间为 $2 \times 4.89 \times 76.29 = 746.10$ mm (± 373.05 mm),而 SRS2 在 4m 处的覆盖间隔为 $2 \times 4.89 \times 48.24 = 471.75$ mm (± 235.88 mm)。这些值低于 SRS 制造商所声明的数值。对于 5.2.6 中的计算,集成商决定使用表 2 中所述的方法。

表 2 SRS 的置信度信息示例

距离 m	覆盖率	SRS1/3 的覆盖间隔 mm	SRS2 的覆盖间隔 mm
1	$1 \sim 10^{-6}$	51.67	62.89
2	$1 \sim 10^{-6}$	53.43	110.60
3	$1 \sim 10^{-6}$	57.37	232.46
4	$1 \sim 10^{-6}$	72.08	471.75
5	$1 \sim 10^{-6}$	77.06	—
6	$1 \sim 10^{-6}$	106.17	—
7	$1 \sim 10^{-6}$	746.10	—

注:为了计算公式(1)和公式(2)中的 M ,能在假设正态分布的条件下,使用表 2 的一半值。

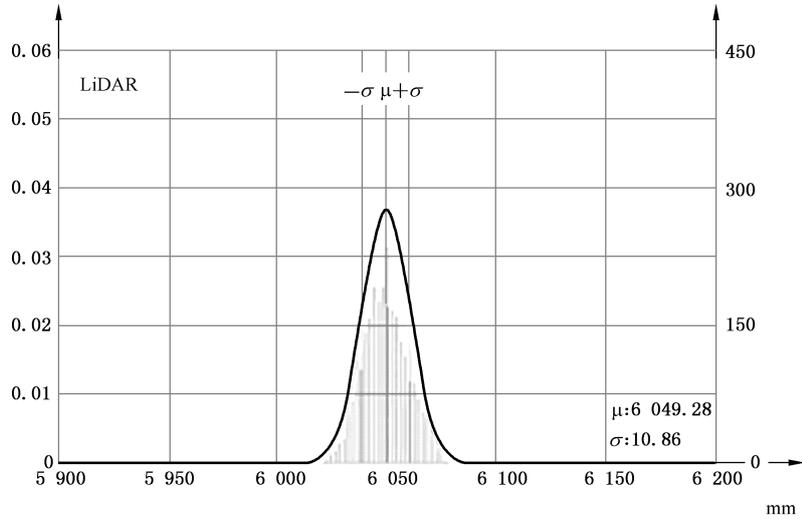


图6 用于评估覆盖间隔的测量数据示例

4.2.9 验证与确认

SRSS 集成商宜根据 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.3、6.2.4 和 6.2.7 对 SRSS 核实查证和/或确认生效。

下面以安全相关功能 1 和 2 的正常运行实验室测试为例,对 SRSS 进行了验证。

正常运行测试的试验装置如下:

- 按照制造商的定义,将 SRS1, SRS2 和 SRS3 用支架安装在机器人的预定位置上;
- 将 4.2.6 中所描述的安全区域确定为 $S_0 = 656 \text{ mm}$ 和 $S_1 = 1\ 255 \text{ mm}$;
- 如 4.2.5 中所述,选择直径为 40 mm,高度为 200 mm,表面反射率为 5% 的黑色圆柱体代表具有儿童特性的安全相关物体测试件。

图 7 展示了试验装置的示例。线性滑块放置在与 SRSS 的保护停止区和/或保护区相交的位置。

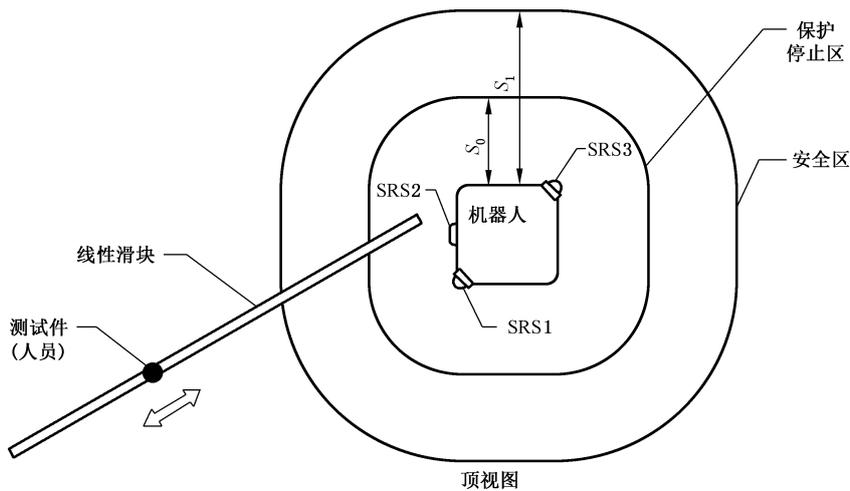


图7 试验装置

测试步骤如下:

- a) 启动 SRSS;

- b) 构建地图以注册测试设备,例如线性滑块;
- c) 将测试件放在线性滑块上;
- d) 开始移动滑块,让测试件以最大相对速度进入安全相关区;
- e) 记录带有时间戳的 SRSS 安全相关信息和线性滑块的运动情况;
- f) 关闭 SRSS;
- g) 改变线性滑块的相对位置,并至少重复从机器人的前、左、右、后方接近测试件位置的操作,试验要涵盖不同 SRS 的所有视野范围以及测试件的各个相关速度;
- h) 分析记录的安全相关信息和滑块运动情况。

在集成商的进一步验证过程中,确保能够在每个 SRS 的制造商定义的使用范围内使用 SRSS。

4.2.10 SRSS 的使用信息

本节描述了符合 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.2 使用限制文件。表 3 展示了有关 SRSS 使用信息中记录的 SRSS 使用限制示例。

表 3 SRSS 的使用信息

GB/Z 44938.1—2024 的章节	提供的使用信息概述	SRSS 的使用信息
4.3	供应商宜说明 SRS/SRSS 的性能等级和安全性能等级(PL、SIL 或 SIL CL)及参考标准	SRSS 性能等级按 GB/Z 44938.1—2024 规定为 B,符合 GB/T 16855.1—2018 规定的安全性能等级 PLb
5.2	制造商宜根据 GB/Z 44938.1—2024 表 2 的一般描述来定义 SRSS 的功能	<p>安全相关功能 1:当检测到保护停止区域中的人员和危险物品时,启动 GB/T 36530—2018 中 6.2.2.3 指定的保护性停止功能。</p> <p>安全相关功能 2:检测人员和危险物体并提供符合 GB/T 36530—2018 中 6.4 和 6.5.2.1 规定的作为安全相关信息的位置与速度信息给与安全有关的速度控制功能和/或危险碰撞避免功能。</p> <p>安全相关功能 3:按照 GB/T 36530—2018 中 6.5.3 规定对机器人行走表面的几何形状进行检测。当机器人在其移动方向上观察到允许移动的地面时,机器人执行向前移动命令。如果机器人需要往回移动,则必定存在其已行进的路面,因此不需要向回移动检测路面功能。</p> <p>自动相关功能:在 SLAM 机器人坐标系中提供带有时间戳的 3D 点云数据</p>
5.5	如果适用,供应商宜提供有关感应区的信息	<p>由作为 SRSS 一部分的 SRS1 和 SRS3 实现。最大尺寸的半径为 7 000 mm,水平视角为 360°,垂直视角为 0.5°。</p> <p>由作为 SRSS 一部分的 SRS2 实现。最大尺寸的半径为 4 000 mm,垂直视角为 60°,水平视角为 70°。</p> <p>细节见图 4</p>

表 3 SRSS 的使用信息 (续)

GB/Z 44938.1—2024 的章节	提供的使用信息概述	SRSS 的使用信息
5.6	安全相关区规范	安全相关区“ S_0 ”： 对应于移动机器人的保护停止区域；用于执行 SRSS 的安全相关功能 1，且是 2 维的 $S_0 = 656 \text{ mm}$ 是 360° 的；距地面 200 mm 。 安全相关区“ S_1 ”： 对应于移动机器人的保护区域；用于执行 SRSS 的安全相关功能 2，是 3 维的；垂直、水平视角为 60° ； $S_1 = 1\ 255 \text{ mm}$ ；距地面 400 mm ，且是 2 维的； $S_1 = 11\ 255 \text{ mm}$ 是 360° 的；距地面 200 mm 。 细节见图 4
5.7	自动区域规范(如果适用)	SRSS 的自动相关区域是 SRS 感应区域的并集
注：作为示例，仅使用了 GB/Z 44938.1—2024 表 7 的第 1 至 5 行。		

4.3 SRSS 清洁移动机器人

4.3.1 预期用途

宜由集成商确定预期用途(见 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.1)。预定用途由以下选定的示例项定义。

- a) 该移动机器人为 GB/T 36530—2018 中规定的 1.2 型机器人，其质量为 100 kg ，尺寸为： $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \times 1\ 000 \text{ mm}$ 。

注 1：根据 GB/T 36530—2018，1.2 型机器人被定义为大型的或轻型的或快速型的，或带有机械手的。

- b) 移动机器人在连接大学办公楼的人行道上自动进行导航。机器人的路径是根据由 SLAM 技术以及物理约束所创建的地图预先确定的。该地图中包含了沿人行道固定物体(例如护栏,建筑物墙壁,树木等)的位置信息。通过参考该地图,机器人可在移动时确定其自身的限定空间(GB/T 36530—2018 中 3.18.2)。

- c) 移动机器人于夜间在非车道上移动,其中:

- 1) 校园从凌晨 2 点至凌晨 5 点不对公众开放,并且将在凌晨 2 点至凌晨 4 点进行夜间清洁,此时宜只有服务人员在场;
- 2) 如图 1 所示,路面平整,某些区域的坡度最高为 5° ;

注 2：在楼梯上机器人的移动假定被可靠的 SLAM 技术所控制。该机器人不适用于与人行横道相交的普通人行道,其也不会沿着有通向不同楼层向下台阶的交叉路口车道行进。

- 3) 在人行道上站立或行走的是被告知的超过 18 岁的成人,如果他们进入移动机器人的安全区,移动速度在 0 mm/s 到 $1\ 600 \text{ mm/s}$ 之间。

注 3：进一步信息在 4.3.4 中给出。

- d) 移动机器人:

- 1) 当站立或行走的人进入保护停止区域时,进行保护性停止(见图 2);

- 2) 当站立或行走的人进入安全区域时,进行降低速度(见图 2);
 - 3) 驱动速度最高可达到 700 mm/s,可通过安全相关的速度控制功能降至 300 mm/s;
 - 4) 能在 0.6 s 内将速度从 700 mm/s 降低到 300 mm/s,再在 0.3 s 内将速度降低为零。
- e) 运行期间的室外环境条件:
- 1) 降水量最高为 10 mm/h;
 - 2) 夜间在校园内有光干扰。

4.3.2 SRSS 性能等级的确定

在所选择的方法中,使用 GB/T 36530—2018 所规定的 1.2 型移动机器人的安全功能性能等级须为符合 GB/T 16855.1—2018 的 PL d 等级。安全功能包括通过 SRSS 启动的保护停止功能,安全相关的速度控制功能,避免危险碰撞功能以及行驶面检测功能。

对应于 SRSS 所需的性能等级 PL d 的是 GB/Z 44938.1—2024 中所规定的传感器性能等级 D。

4.3.3 SRS 使用限制和 SRSS 功能

SRSS 由制造商定义的 3 个 SRS 组成,如下所示(见图 3)。

- a) SRS1:一种适用于符合 GB/T 16855.1—2018 标准最高 PL d 等级的二维激光雷达;其符合 IEC 62061 的 SIL2 以及 IEC 61496-1 的类型 3 评估,允许对人员进行检测。根据 GB/Z 44938.1—2024 评估了用于检测危险物体,人员和危险物体及人员位置以及在室外环境下使用的其他系统能力。感应区的半径最大为 7 000 mm,视角为 270°。安全相关对象的特性检测能力为:最小尺寸 40 mm×40 mm×40 mm;最小物体反射率 2%;最大物体速度 1 600 mm/s。响应时间为 0.05 s。在规定的范围内,其可在室内和室外环境下使用。
- b) SRS2:一种适用于符合 GB/T 16855.1—2018 标准最高 PL d 等级的 TOF 相机(新型 3D 图像传感器);SIL 2 符合 IEC 62061,能够使用 3D 成像技术检测部分人体,道路表面和其他安全相关物体。此系统性能是根据 GB/Z 44938.1—2024 标准进行评估。SRS2 能够在 3D 传感器坐标系内测量对象的位置。感应区最大为 4 000 mm,垂直和水平视角分别为 60°和 70°。安全相关对象的特性检测能力为:最小尺寸 40 mm×40 mm×40 mm;最小物体反射率 5%;最大物体速度 1 600 mm/s。其可立体区分开铺砌的路面和其他物体。在规定的范围内,其可在室内和室外环境下使用。
- c) SRS3:与 SRS1 的规格相同。

目标应用程序需要 4 个 SRSS 功能(见图 3)。

- a) 安全相关功能 1:当检测到保护停止区域中的人员和危险物品时,启动 GB/T 36530—2018 中 6.2.2.3 指定的保护性停止功能。
- b) 安全相关功能 2:检测人员和危险物体并提供符合 GB/T 36530—2018 中 6.4 和 6.5.2.1 所规定的与安全有关的速度控制功能和/或危险碰撞避免功能的位置和速度的安全相关信息。
- c) 安全相关功能 3:按照 GB/T 36530—2018 中 6.5.3 规定对机器人行走表面的几何形状进行检测。当机器人在其移动方向上观察到允许移动的表面时,机器人执行向前移动命令。如果机器人需要往回移动,则必定存在其已行进的路面,因此不需要向回移动检测路面功能。
- d) 自动相关功能:在 SLAM 机器人坐标系中提供带有时间戳的 3D 点云数据。

4.3.4 安全相关要求

SRSS 安全相关要求宜由集成商根据预期用途进行规定(见 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.1)。例如,见表 4 中的需求定义。

表 4 安全相关要求

术语	要求	细节
SRSS 性能等级	D	见 4.3.2 具有相同性能等级的 D 级 SRS 集成
SRSS 安全相关功能的需求率	1/h	
SRSS 响应时间	0.1 s	
SRSS 检测能力	例如,人员检测特性: 例如,人员相关特性: 代表处于直立姿势的 18 岁成人的尺寸 最小反射值 5% 速度 1 600 mm/s	见 4.3.5
SRSS 感应区	例如,安全相关区 2 维 $S_0=766$ mm 和 $S_1=1\ 965$ mm 的 360° ; 3 维垂直和水平视角 60° ; 其中 $S_0=766$ mm 和 $S_1=1\ 965$ mm	见 4.3.6

4.3.5 对象类别和物理特性

SRSS 的检测能力宜由集成商根据 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.3 进行规定。下面是具体示例。
所分析的对象类别有:

- a) 用于执行人员检测功能的对象:18 岁以上的成人;
- b) 用于执行危险对象功能的对象:无适用的;
- c) 用于执行自动相关功能的对象:用于导航的地标。

在夜间活动的站立或行走的受雇人员的特性将通过由 SRS1 和 SRS3 执行的安全相关功能 1 和由 SRS2 执行的安全相关功能 2 进行分析。

对于安全相关的功能 2,SRS2 检测到的极限是 18 岁成人的前臂。简化形状约为直径 40 mm,长度 200 mm 的圆柱体。

注 1:对象尺寸基于 ISO TR 7250-2:2010。前臂指尖长度的第 5 个百分位数为 390 mm,手腕周长为 147 mm。为了进行简化,在本示例中采用较小的圆柱体进行表示。

对于安全相关功能 1,将 18 岁成人的下肢作为最小识别尺寸。简化形状约为直径为 50 mm 的圆柱体,对应 SRS1 和 SRS3 的安装高度。

注 2:ISO TR 7250-2:2024 中显示的尺寸并不代表 SRS1 和 SRS3 的安装位置。为了进行简化,取 IEC TS 61496-4-3 的最小尺寸 50 mm 代表下肢。

对于由 SRSS 的 SRS2 执行的安全相关功能 3,待测的行驶面是连续平坦表面或平滑曲面,其在机器人前方的坡度为 5° 或更小。

注 3:SRS1 能在斜坡入口处将路面检测为危险物体。或许需要采取其他措施来防止移动机器人永久停止。

在每个 SRS 通用的波长下,用于代表受雇人员,危险物体和行进表面的最小漫反射率被认为是 5% 或更高。

注 4:人员的最低 5% 的反射率值是根据当移动机器人工作时,大学对于凌晨 2 点至凌晨 4 点之间的受雇夜间工作人员的组织指令得出的。大学会给他们提供衣服,并进行指导。

对于安全相关功能 1,夜间人员的速度被认为 800 mm/s;对于安全相关功能 2,其速度为 1 600 mm/s。

注 5:在本示例中,假定在夜间,员工可能会稍晚识别出移动机器人,并且从未识别移动机器人旁更快地走开。

对于 SRSS 的自动相关功能,在 SRSS 感应区内代表移动机器人行走路径上可靠的固定地标的对象将在运行开始期间进行识别。

4.3.6 感应区

SRSS 感应区宜由集成商根据 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.4 进行规定。

图 4 和图 5 显示了每个 SRS 的安装位置和感应区,以及融合后所得 SRSS 的改进安全相关区。

SRS1 和 SRS3 分别水平安装在机器人的左前方和右后方,距地面高度为 200 mm。通过将 SRS1 和 SRS3 安装到机器人的相对角上,可无盲点观察到机器人的整个四周。

SRS2 安装在机器人正面的中心,高度为 400 mm,其用于测量机器人的运动方向。它可实现在 SRS1 的检测平面上方检测安全相关对象,并执行行驶面检测功能。

SRS 的安装位置在使用前已由专用的校准工具进行校准。

SRSS 的安全相关区对应于机器人的保护停止区和保护区。它们分别由距机器人外表面的距离 S_0 和 S_1 定义,如图 4 所示。

注 1: 这与 GB/T 36530—2018 的附录 C 不符,后者引用了机器人的中心点,而不是机器人的外表面,为了避免本文件假定造成的典型混淆,计算是基于 GB/T 19876—2012 中的概念,见 GB/T 36530—2018 的 5.10.8.3。GB/T 19876—2012 的概念是根据假定的、详尽的、针对特定应用风险评估结果进行调整的。根据 GB/T 19876—2012 进行的现有计算似乎经常是只考虑如 PLd 这样的“高”性能类,以及使用 SIL2 和不考虑上下文的参数(例如不考虑运动方向的速度指标,达到危险点时停止危险运动或在运动过程中人员弯腰的情况)。

S_0 是移动机器人与安全相关物体之间的最小距离。它是根据 GB/T 19876—2012 的概念计算得出的,并且根据 ISO 12100 进行以下特定风险评估:

$$S_0 = K \times T + C + M = (V_{r-stop} + V_{obj}) \times (T_{SRSS} + T_r) + 300 \text{ mm} + M \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- K ——设备的速度,单位为米每秒(m/s);
- T ——响应时间,单位为秒(s);
- V_{r-stop} ——启动保护停止时机器人的最大速度,单位为毫米每秒(mm/s);
- V_{obj} ——物体的接近速度,单位为毫米每秒(mm/s);
- T_{SRSS} ——SRSS 响应时间,单位为秒(s);
- T_r ——机器人的响应时间,单位为秒(s);
- M ——根据 4.2.8 规定的测量不确定度,单位为毫米(mm);
- C ——对下肢潜在危害进行分析的附加值,单位为毫米(mm)。

注 2: 如果存在有必要情况,则在计算 S_0 时需要考虑额外的停止距离。

S_1 定义了启动安全限速功能时,以最大速度 $V_{r-reduce}$ 移动的机器人将速度降低至 V_{r-stop} 的保护区距离。计算见公式(4):

$$S_1 = (V_{r-reduce} + V_{obj}) \times (T_{SRSS} + T_r) + C + M \quad \dots\dots\dots (4)$$

SRSS 感应区的安全相关区如下确定:

$$S_0 = (300 \text{ mm/s} + 800 \text{ mm/s}) \times (0.1 \text{ s} + 0.3 \text{ s}) + 300 \text{ mm} + 26 \text{ mm} = 766 \text{ mm}$$

$$S_1 = (700 \text{ mm/s} + 1\ 600 \text{ mm/s}) \times (0.1 \text{ s} + 0.6 \text{ s}) + 300 \text{ mm} + 55 \text{ mm} = 1\ 965 \text{ mm}$$

SRSS 的自动相关区域是 SRS 传感区域的并集。

4.3.7 环境影响下的可靠性

所有相关环境影响的限制宜由 SRSS 集成商指定(见 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.5)。安全相关信息的例子在 4.3.8 中提供。

在下文中,集成商验证了在 4.3.1 规定的降水和校园光线干扰的环境影响限制下,移动机器人没有发生危险事故并且可正常运行。

注: GB/Z 44938.1—2024 的附录 F 提供了有关符合 IEC 60721 系列的环境条件和环境使用等级的进一步信息。

4.3.8 安全相关信息

SRSS 集成商宜指定在 SRSS 处理单元中执行的逻辑功能,并宜指定 SRSS 提供的安全相关信息(见 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.6)。以下给出了安全相关信息的示例。

SRSS 提供作为输出信号的安全相关信息。SRSS 的安全相关信息(见图 3)包括:

- 安全相关功能 1 相关的决策信息,二进制;
- 安全相关功能 3 相关的决策信息,二进制;
- 安全相关功能 2 相关的测量信息, n 位;
- 所有安全相关功能的置信度信息, n 位。

SRSS 输出功能的自动相关信息包括:SLAM 的点云, n 位。

在制造商规定的使用信息中所提供的置信度信息如下。

对于每个 SRS,规定的 SRS 性能等级为 D。SRSS 所要求的性能等级也为 D。

规定的覆盖概率(决策概率)为 1×10^{-6} 。按照 GB/Z 44938.1—2024 中公式(1)的规定确定如下:

覆盖概率或决策概率 $> 1 \times [\text{对应于 SRS/SRSS 性能等级 D 的 PFH(点特征直方图)上限}]/(\text{应用具体需求率}) = 1 \times 10^{-6} / 1 = 1 \times 10^{-6}$

制造商根据检测距离提供每个 SRS 的置信度信息结果。覆盖间隔的值由 SRS 的不确定性统计确定。

除了制造商提供的使用信息外,集成商还要根据图 6 执行自己的测量。测试是在 3 m 处使用一块反射率约为 5% 的测试片进行的。通过测量 SRS1/3 和 SRS2 的不确定度获得的实验结果得出标准偏差分别为 5.87 mm(SRS1/3)和 23.77 mm(SRS2)。

由于对应于覆盖概率 $1 \sim 10^{-6}$ 的覆盖区间被计算为 $2 \times 4.89\sigma$,假设 SRS1 和 SRS2 分别将此 LiDAR 和 TOF 相机作为传感器单元,则 SRS1 在 3 m 距离处的覆盖区间为 $2 \times 4.89 \times 5.87 = 57.37$ mm (± 28.69 mm),而 SRS2 的覆盖间隔为 $2 \times 4.89 \times 23.77 = 232.46$ mm (± 116.23 mm)。这些值低于 SRS 制造商所声明的数值。对于 4.3.6 中的计算,集成商决定使用表 2 中的数值。

4.3.9 验证与确认

作为根据 GB/Z 44938.1—2024 的第 6 章进行的所需核实查证和确认生效活动的子集,以 SRSS 检测能力的测试为例进行了说明。

下面以安全相关功能 1 和 2 的正常运行实验室测试为例,对 SRSS 进行了验证。

注:为进行简化,仅描述使用 40 mm 圆柱形测试件进行的测试。这仅代表安全相关功能 2 的测试。对于安全相关功能 1 的测试,直径 40 mm 显然满足条件。

正常运行测试的试验装置如下:

- 按照制造商的定义,将 SRS1, SRS2 和 SRS3 用支架安装在机器人的预定位置上;
- 将 4.3.6 中所描述的安全区域确定为 $S_0 = 766$ mm 和 $S_1 = 1\,295$ mm;
- 如 4.3.5 中所述,选择直径为 40 mm,高度为 200 mm,表面反射率为 5% 的黑色圆柱体代表具有儿童特性的安全相关物体测试件。

图 7 展示了试验装置的示例。线性滑块放置在与 SRSS 的保护停止区和/或保护区相交的位置。

测试步骤如下:

- a) 启动 SRSS;

- b) 构建地图以注册测试设备,例如线性滑块;
- c) 将测试件放在线性滑块上;
- d) 开始移动滑块,让测试件以最大相对速度进入安全相关区;
- e) 记录带有时间戳的 SRSS 安全相关信息和线性滑块的运动情况;
- f) 关闭 SRSS;
- g) 改变线性滑块的相对位置,并至少重复从机器人的前、左、右、后方接近测试件位置的操作,试验要涵盖不同 SRS 的所有视野范围以及测试件的各个相关速度;
- h) 分析记录的安全相关信息和滑块运动情况。

在集成商的进一步验证过程中,确定能够在每个 SRS 的制造商定义的使用范围内使用 SRSS。

4.3.10 SRSS 的使用信息

本条款描述了符合 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.2 使用限制文件。表 5 展示了有关 SRSS 使用信息中记录的 SRSS 使用限制示例。

表 5 SRSS 的使用信息

GB/Z 44938.1—2024 的章节	提供的使用信息概述	SRSS 的使用信息
4.3	供应商宜说明 SRS/SRSS 的性能等级和安全性能等级 (PL、SIL 或 SIL CL) 及参考标准	SRSS 性能等级按 GB/Z 44938.1—2024 规定为 D,符合按 GB/T 16855.1—2018 规定的安全性能等级 PLd
5.2	制造商宜根据 GB/Z 44938.1—2024 表 2 的一般描述来定义 SRSS 的功能	<p>安全相关功能 1: 当检测到保护停止区域中的人员和危险物品时,启动 GB/T 36530—2018 中 6.2.2.3 指定的保护性停止功能。</p> <p>安全相关功能 2: 检测人员和危险物体并提供符合 GB/T 36530—2018 中 6.4 和 6.5.2.1 所规定的与安全有关的速度控制功能和/或危险碰撞避免功能的位置和速度的安全相关信息。</p> <p>安全相关功能 3: 按照 GB/T 36530—2018 中 6.5.3 规定对机器人行走表面的几何形状进行检测。当机器人在其移动方向上观察到允许移动的地面时,机器人执行向前移动命令。如果机器人需要往回移动,则必定存在其已行进的路面,因此不需要向回移动检测路面功能。</p> <p>自动相关功能: 在 SLAM 机器人坐标系统中提供带有时间戳的 3D 点云数据</p>
5.5	如果适用,供应商宜提供有关感应区的信息	<p>由 SRS1 和 SRS3 作为 SRSS 的一部分所实现功能。最大尺寸的半径为 7 000 mm,水平视角为 360°,垂直视角为 0.5°。</p> <p>由 SRS2 作为 SRSS 的一部分所实现的功能。最大尺寸的半径为 4 000 mm,垂直视角为 60°,水平视角为 70°。</p> <p>细节见图 3.4</p>

表 5 SRSS 的使用信息 (续)

GB/Z 44938.1—2024 的章节	提供的信息概述	SRSS 的使用信息
5.6	安全相关区规范	安全相关区“ S_0 ”： 对应于移动机器人的保护停止区域；用于执行 SRSS 的安全相关功能 1，且是 2 维的； 360° 范围的 $S_0 = 766 \text{ mm}$ ；距地面 200 mm 。 安全相关区“ S_1 ”： 对应于移动机器人的保护区域；用于执行 SRSS 的安全相关功能 2 和 3，是 3 维的；垂直、水平视角为 60° ； $S_1 = 1\,965 \text{ mm}$ ；距地面 400 mm ，且是 2 维的； 360° 范围的 $S_1 = 1\,965 \text{ mm}$ ；距地面 200 mm 。 细节见图 4
5.7	自动区域规范 (如果适用)	SRSS 的自动相关区域是 SRS 感应区的并集
注：作为举例，仅使用 GB/Z 44938.1—2024 表 7 的第 1 至 5 行。		

5 港口物流集装箱装卸设备的应用

5.1 概述

此示例涵盖了根据 GB/Z 44938.1—2024 的第 6 章，将 3 个 SRS 融合到 SRSS 的集成和安装阶段。目标是针对每个 SRS 改善 SRSS 的结果可靠性和性能等级。预期用途是维护港口区域的自动 CHE，该港口在码头区域处理海外集装箱。宜注意，以下描述并非基于全面的分析，仅是具有严格管理和控制的港口应用示例。

图 8 显示了安装在 CHE 上的 SRSS 应用程序的示例，该程序用于有人在场时控制 CHE 的移动。

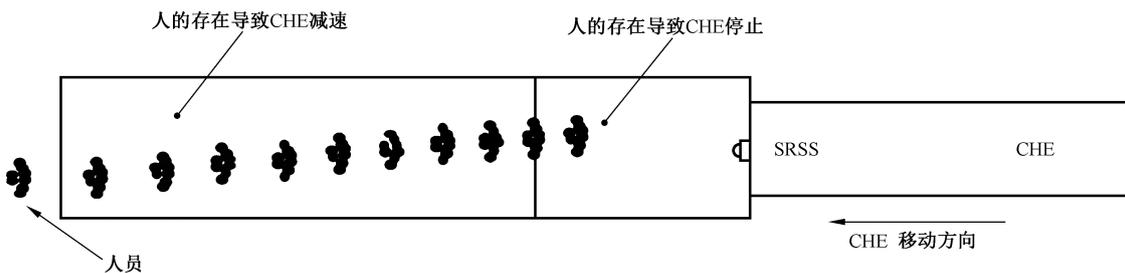


图 8 CHE 应用

5.2 CHE 的 SRSS

5.2.1 预期用途

由集成商确定预期用途 (见 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.1)。由以下选定的示例项定义。

- a) CHE 用于在货船和仓储地点之间运输货物的集装箱。装载时最大质量为 50 t ，尺寸如下： $12.2 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$ (含集装箱)。
- b) CHE 在受限制的物流区域自主运行，并使用里程计和感应标记进行导航。行人的交通受到限

制,只有特别指示人员可进入现场进行维护工作;

c) 每周 7 d,每天 24 h 运行:

- 1) 维护工作仅在特定时间(例如每周 3 次)完成,或者在极少数情况下需要进行故障排除。在 CHE 的作业区域 1 中,应用程序的具体需求率假设为 1/d。
- 2) 物流站点分为两个不同的作业区域。作业区域 1 是装载和存储区域。这是一个大而平坦的户外区域,周围有道路,且相邻集装箱存放区。
- 3) 作业区域 2(见图 9)是个用于在装载区和存储区之间运送集装箱的转运区。这是一个宽阔平坦的户外区域,有道路但没有存储或处理区域。CHE 能够在作业区域 2 中以较高的速度移动,但人员出入将受到进一步的限制。与作业区域 1 相比,这导致了更低的需求率。
- 4) 受过训练的人员能够出现在作业区域内的通道上,尤其是在作业区域 1。他们都是穿着带有反光标记衣服的成人。

注 1: 不允许设置阻碍人与车直接视线的障碍物。CHE 仅监视计划的路径,而不监视其路径的左右区域。

注 2: 为进行简化,在 CHE 应用程序的示例中不考虑人员移动。

d) CHE:

- 1) 当操作人员在作业区域 1 和 2 中与车辆(在通道中)相距 4 m 或更短距离时,应完全停止行驶;
- 2) 在检测到作业区域 2 的路径上有人时,将降低其速度。减速开始时的相对距离为 13.32 m(详细信息见下文);
- 3) 在作业区域 2 中以最高速度 20 km/h(5.56 m/s)行驶;
- 4) 在作业区域 1 中以降低/速度 9 km/h(2.5 m/s)行驶;
- 5) 路线是预先计划的,因此可准确知道所走的路线。

注 3: 对于自动型 CHE,不存在 C 类型标准。假定所有给定的要求均基于集成商的调查。

注 4: 为了进行简化,仅考虑 CHE 的直线运动。

e) 针对此特定应用的指定室外条件:

- 1) 温度范围为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 2) 最高 10 mm/h 的降水量;
- 3) 雾密度最高 MOR=30 m;
- 4) 环境光最高 40 000 lx(日光)。

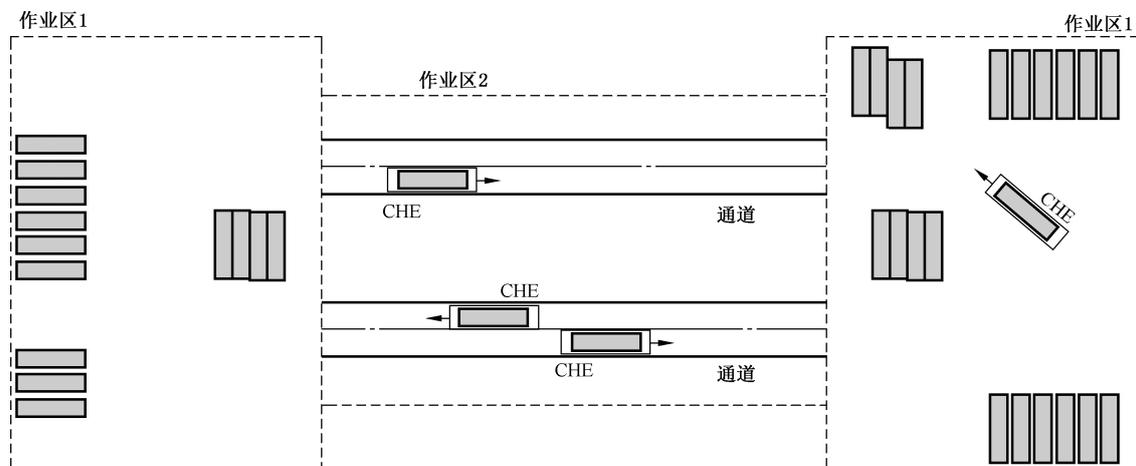


图 9 CHE 的作业区域

5.2.2 SRS 的使用限制和 SRSS 功能

SRSS 由制造商定义的 3 个 SRS 组成,如下所示。

- a) SRS1:一种适用于符合 GB/T 16855.1—2018 中最高 PL-b 等级风险缓解的多层激光扫描仪,其用于检测人员。系统性能根据 GB/Z 44938.1—2024 的 SRS 性能等级 B 进行评估。其能够监测设备前方的体积并检测 20 m 范围内的物体。水平视角为 180°,垂直视角为 15°,响应时间为 50 ms。在该应用中设定的最小物体反射率为 6%。代表人员的物体最小尺寸为直径 200 mm,长度 600 mm 的圆柱形测试件。其提供以下属性的安全相关信息:位置(径向距离和方向),覆盖范围和覆盖概率。
- 注 1:最小 6%的物体反射率通过作业区域中的任何人都穿着反光衣,并且多层检测将覆盖一个人的多个平面的组织措施验证得到。考虑到特殊的应用,有很大可能一个人不会被反射率 2%的黑色衣服完全覆盖以及或者 SRSS 的可用性会不足以在特定的环境条件下探测到反射率 2%的物体。
- 注 2:SRS 的多层检测证明了最小物体尺寸设为 200 mm(直径)×600 mm(长度)是合理的,因为该检测假设不受扫描光束只能覆盖一条腿的最坏情况限制。
- b) SRS2:一种适用于符合 GB/T 16855.1—2018 中最高 PL-b 等级的立体摄像机。系统性能根据 GB/Z 44938.1—2024 的 SRS 性能等级 B 进行评估。其能够监测车辆前方的体积并检测 15 m 范围内的物体。水平视角为 90°,垂直视角为 50°,响应时间为 40 ms。该 SRS 的最小物体反射率为 6%。代表人员的物体最小尺寸为直径 200 mm、长度 600 mm 的圆柱形测试件。其提供以下属性的安全相关信息:位置(径向距离和方向),覆盖范围和覆盖概率。
- c) SRS3:一种适用于符合 GB/T 16855.1—2018 中最高 PL-b 等级或 IEC 62061 中 SIL 2 等级的安全激光扫描仪,其用于在近距离检测人员和其他安全相关物体。系统性能根据 GB/Z 44938.1—2024 的 SRS 性能等级 D 和 IEC 61496-3 的类型 3 进行评估。其能够监控设备前方直至 4 m 的区域,并具有 0.1 s 的响应时间。水平视角为 190°,垂直视角为单个平面。特定的最小物体反射率是 2%。代表人体部分(下肢)的物体最小尺寸为直径 70 mm、长度 400 mm 的圆柱形测试件。存在于安全相关区中的对象会使得 SRS3 向 CHE 控件发送安全相关的停止信号。

目标应用程序要求 SRSS 提供以下安全相关功能。

- 安全相关功能 A,用于检测安全相关区 A 中的人员,以在作业区域 1 中启动保护性停止安全相关功能 A。
- 安全相关功能 B1,用于检测安全相关区 B1 中的人员,以在作业区域 2 中启动保护性停止安全相关功能 B1。
- 安全相关功能 B2,用于在安全相关区 B2 中进行检测和定位人员,以在作业区域 2 中启动减速安全相关功能 B2。
- 安全相关功能 B2 用于降低作业区域 2 中 CHE 的速度。如果速度降低且人员仍在现场,则安全相关功能 B1 将启动 CHE 的保护性停止功能。

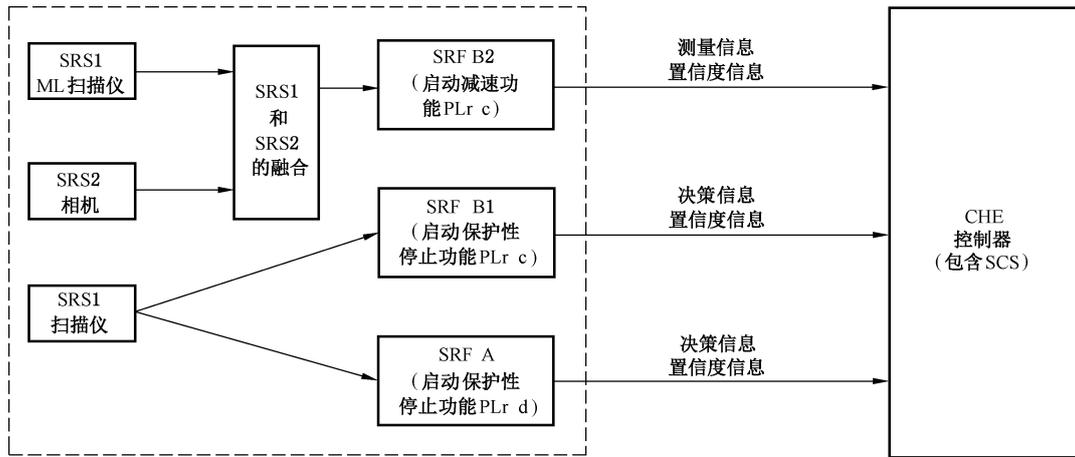


图 10 SRSS 的结构和安全相关功能

5.2.3 SRSS 性能等级确定

根据 ISO 12100 进行的风险评估,对与 CHE 运行所在的两个不同区域相关的 SRSS 功能,得出了两个不同的 PL SIL。

作业区域 1:

在此区域中,避免伤害的可能性低且暴露率高。由此得到用于安全相关功能 A(“停止功能”)PLr d 各自的 SIL2。

作业区域 2:

在此区域中,避免伤害的可能性高且暴露率低。由此得到用于安全相关功能 B1(“停止功能”)和安全相关功能 B2(“减速功能”)PLr C 各自的 SIL1。

按照 GB/Z 44938.1—2024 表 1 的规定,安全相关功能 A 所需的 SRSS 传感器性能等级为 D。

按照 GB/Z 44938.1—2024 表 1 的规定,安全相关功能 B1 和 B2 所需的 SRSS 传感器性能等级为 C。

5.2.4 安全相关要求

SRSS 安全相关要求宜由集成商根据预期用途进行规定(见 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.1)。例如,见表 6 中的需求定义。

表 6 安全相关要求

术语	要求	细节
SRSS 性能等级	分别与特定安全相关功能有关的 C 和 D	见 5.2.3 和图 10。 性能等级 C 是通过两个性能等级 B 的 SRS 的集成实现的。 性能等级 D 由一个性能等级 D 的 SRS 实现
SRSS 响应时间/s	0.2 s(安全相关功能 B2, SRS1 和 SRS2 组合) 0.1 s(安全相关功能 A 和 B1, SRS3)	

表 6 安全相关要求 (续)

术语	要求	细节
SRSS 检测能力	例如,人员相关特性: 成人(70 mm×400 mm 用于下肢检测, 200 mm×600 mm 用于人体躯干检测) 下肢的最小反射值为 2%,躯干的最小反射 值为 6%	见 5.2.5
SRSS 感应区	例如,安全相关区 安全相关区 A:2 维;190°范围的 $S_1 = 4\text{ m}$; 宽度 $W_1 = 3\text{ m}$ 安全相关区 B2:3 维;垂直尺寸:0.3 m… 2 m;水平尺寸: $S_2 = 4\text{ m}$, $S_1 = 15\text{ m}$;宽度 $W_1 = 3\text{ m}$ 安全相关区 B1:2 维;190°范文的 $S_1 = 4\text{ m}$; 宽度 $W_1 = 3\text{ m}$	见 5.2.6 和图 11 安全相关区 B2(安全相关域)与安全相关区 B1 不重叠

在本应用中不考虑走向 CHE 或从侧面进入 CHE 行进道路的人。如果需要考虑进入人员,那么安全相关区的大小是不同的。

5.2.5 对象类别和物理特性

SRSS 的检测能力应由集成商根据 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.3 进行规定。以下是具体示例。

唯一相关对象类别是“成人”。

对于安全相关功能 B2(减速),需要对整体进行检测。这导致可识别最小物体尺寸为 200 mm(直径)×600 mm(长度),最小反射率为 6%。

对于安全相关功能 B1(保护性停止),只需要检测腿部。这导致可识别最小物体尺寸为 70 mm(直径)×400 mm(长度),最小反射率为 6%。

对于安全相关功能 A(保护性停止),只需要检测腿部。这导致可识别最小物体尺寸为 70 mm(直径)×400 mm(长度),最小反射率为 2%。

注:在 CHE 作业区域的人员被告知由 CHE 所带来的风险。此外,在应用中已格外小心地将可能导致人员看不到正在接近的自动引导车(AGV)的盲点和物体移除。

5.2.6 感应区

SRSS 感应区由集成商根据 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.4 进行规定。

图 11 和图 12 显示了每个 SRS 的安装位置和检测区域,以及融合后所得的 SRSS 安全相关区。

SRS1 和 SRS2 安装在距地面高度 0.5 m 处,并靠近设备正面的中心。它们的组合感应区扩大至距车辆最大距离 15 m 的范围,并覆盖图 12 所示的区域。

SRS3 安装在设备正面的中心,高度为 300 mm,并使检测平面为水平方向。

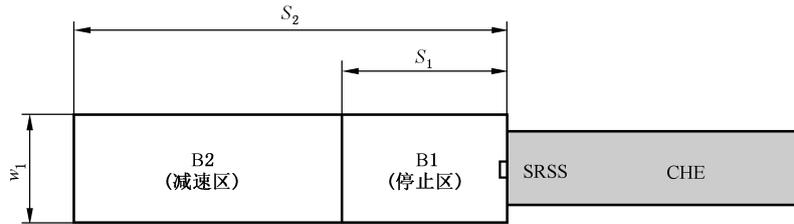
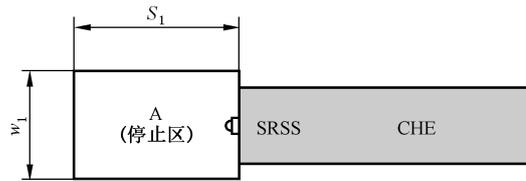


图 11 SRSS 的安全相关区

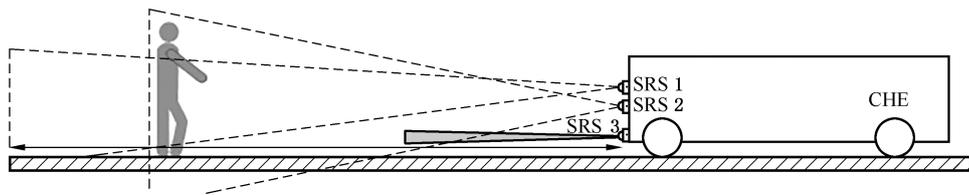


图 12 SRS 的安装位置和感应区以及 SRSS 的安全相关区

SRSS 的安全相关区对应于机器人的减速区和保护停止区。图 11 和图 12 显示了它们的形状和范围：

保护停止功能的响应时间 T_A 和 T_{B1} 为 0.1 s；

减速功能的总响应时间 T_{B2} 为 0.2 s；

GB/T 19876—2012 的概念适用于确定安全相关区(A, B1 和 B2)的大小以及设备的最大速度。

保护停止功能 A 和 B1：

为了在发生碰撞之前完全停止,当有人员进入保护停止区域时,CHE 必须减速至 $V_{reduced}$ 。保护停止区 A 和 B1 的范围 S_1 由公式(5)给出：

$$S_1 = K \times T + S_{Stopp} + C + M = V_{reduced} \times T + S_{stopp} + 850 \text{ mm} + 100 \text{ mm} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

K ——设备的速度,单位为米每秒(m/s)；

T ——响应时间,单位为秒(s)；

S_{Stopp} ——停止距离,单位为秒(s)；

C ——臂长,单位为米(m)；

M ——容差区距离,单位为米(m)。

使用 SRS3 提供的最大范围 $S_1 = 4 \text{ m}$,并假设 $S_{Stopp} = 2.8 \text{ m}$, $C = 0.85 \text{ m}$ (臂长), $M = 0.1 \text{ m}$ (容差区), $T = 0.1 \text{ s}$, $V_{reduced}$ 应小于 2.5 m/s 。

注： $C = 850 \text{ mm}$ 的值基于此示例的假设,即不考虑走向 CHE 或从侧面进入 CHE 行进道路的人。

因此,安全功能 B2 使设备应在人员到达保护停止区 B1 之前将速度降低到 2.5 m/s 以下。

将恒定减速度设置为 $a=1.6 \text{ m/s}^2$, 并从 $v=5.56 \text{ m/s}$ (20 km/h) 开始, CHE 将花费 $T_{\text{brake}}=1.913 \text{ s}$ 减速至 V_{reduced} 。

可根据公式(6)计算出所需范围 S_2 :

$$S_2 = v_{\text{max}} \times T_{\text{SRSS}} + V_{\text{reduced}} \times T_{\text{brake}} + \frac{1}{2} a \times T_{\text{brake}}^2 + M + S_1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$S_2 = 5.56 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.1\text{s} + 2.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 1.915\text{s} + \frac{1}{2} 1.6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 1.913^2\text{s}^2 + 0.5 \text{ m} + 4 \text{ m} = 12.77 \text{ m}$$

$M=0.5 \text{ m}$ 解释了安全相关区 B2 中安全相关功能 B2 的测量不确定性。

5.2.7 环境影响下的可靠性

所有相关环境影响的限制宜由 SRSS 集成商指定(见 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.5)。表 7 列出了可能的影响及其指定的限制。

表 7 SRSS 的环境限制

影响	SRSS 限制
温度	-25 °C ~ +40 °C
降水	10 mm/h
雾	能见度 > 30 m (MOR)
环境光	40 000 lx(日光)
振动/冲击	5 M ² , 符合 IEC 60721-3-5

SRSS 将在表 7 的限制内进行正常工作。在此示例中未考虑到没有危险故障的限制。

注: GB/Z 44938.1—2024 的附录 F 提供了有关符合 IEC 60721 系列的环境限制和环境使用等级的进一步信息。

5.2.8 安全相关信息

SRSS 集成商宜指定 SRSS 提供的安全相关信息(参阅 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.6)。

SRSS 提供以下安全相关信息作为输出信号:

- 安全相关功能 A 和 B1 相关的决策信息, 二进制;
- 安全相关功能 B2 相关的测量信息, n 元关系。

在使用说明中提供用作所有安全相关功能的决策概率和覆盖区间的置信度信息。

5.2.9 融合后的 SRSS 性能等级

SRS 制造商为 SRS1 和 SRS2 指定了 SRS 性能等级 B, 为 SRS3 指定了 SRS 性能等级 D。

SRS1 和 SRS2 的融合产生了与 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.7 和表 5 相符合的性能等级为 C 的安全相关功能, 考虑如下因素:

- 环境条件;
- 使用 SRS1 和 SRS2 执行安全相关功能 B2 的 SRSS 的冗余和多样化设置;
- 除所述的性能等级 B 外, 在制造商规定的范围内使用每个 SRS;
- SRS1 和 SRS2 的安装和配置, 使其能够在安全相关区 B2 内的任何位置提供检测。

除了本示例中所述的系统功能之外, 还应满足符合规定安全性能 PL c 的组合 SRSS 的安全相关硬件和软件的设计要求。

5.2.10 验证和确认

SRSS 集成商宜根据 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.3、6.2.4 和 6.2.7 对 SRSS 核实查证和确认生效。下面以 SRSS 安全相关功能 B2 的正常运行实验室测试为例进行说明。

注：为进行简化，仅描述了使用 200 mm 圆柱形测试件进行的测试。这仅代表安全相关功能 B2 的测试。对于安全相关功能 A 或 B1 的测试，需要使用直径 70 mm 的测试件。

正常运行测试的试验装置如下：

——安装条件和安装支架：SRS1，SRS2 和 SRS3 分别用制造商和集成商定义的支架安装在 CHE 上的预定位置。

5.2.6 中描述的安全相关区确定为 $S_1=4\ 000\text{ mm}$ 和 $S_2=13\ 320\text{ mm}$ 。

安全相关对象属性的再现性表示为：如 5.2.3 所述，选择直径为 200 mm、高度为 600 mm，表面反射率为 6% 的黑色圆柱体作为代表成人的试样。

成人试样放置在 B2 保护区内的任何位置（见图 7 原理上的应用示例）。

测试步骤如下：

- a) 启动 SRSS 和 CHE；
- b) 安全相关区 B1 或 B2 中没有试件；
- c) 开始记录 SRS1 和 SRS2 的安全相关信息；
- d) 将 200 mm×600 mm 试件放置于在 CHE 与试件距离小于 S_2 之前，接近的 CHE 可达到最大速度 20 km/h 的一个位置上；
- e) 将 CHE 加速到 20 km/h 的最大速度，然后朝着试件直线行驶；
- f) 当到达距离 S_1 时，对 CHE 进行制动；
- g) 关闭 SRSS 和 CHE；
- h) 更改试件在 CHE 计划路径上的位置，并从 a) 开始重复；
- i) 停止记录 SRS1 和 SRS2 的安全相关信息；
- j) 分析记录的安全相关信息。

在集成商的进一步验证过程中，能够在每个 SRS 制造商定义的使用范围内使用 SRSS。

5.2.11 SRSS 的使用信息

本条款描述了符合 GB/Z 44938.1—2024 的 6.2.2 使用限制文件。表 8 展示了有关 SRSS 使用信息中记录的 SRSS 使用限制示例。

表 8 SRSS 的使用信息

GB/Z 44938.1—2024 的章节	提供的使用信息概述	SRSS 的使用信息
4.3	供应商宜说明 SRS/SRSS 的性能等级和安全性能等级(PL、SIL 或 SIL CL)及参考标准	安全相关功能 A： SRSS 性能等级为 GB/Z 44938.1—2024 的 D 级，以达到 GB/T 16855.1—2018 的 PL d 级和 IEC 62061 的 SIL2 级。 安全相关功能 B1 和 B2： SRSS 性能等级为 GB/Z 44938.1—2024 的 C 级，以达到 GB/T 16855.1—2018 的 PL c 级和 IEC 62061 的 SIL1 级

表 8 SRSS 的使用信息 (续)

GB/Z 44938.1—2024 的章节	提供的使用信息概述	SRSS 的使用信息
5.2	制造商宜根据 GB/Z 44938.1—2024 表 2 的一般描述来定义 SRSS 的功能	安全相关功能 A 和 B1: 检测保护停止区域中的人员以启动保护停止功能。 安全相关功能 B2: 检测减速区域内的人员并启动安全相关的减速功能
5.5	如果适用,供应商宜提供有关感应区的信息	由 SRS1 和 SRS2 作为 SRSS 的一部分所实现的功能。最大尺寸为 15 m。水平视角为 90°,垂直视角 15°。 由 SRS3 作为 SRSS 的一部分所实现的功能。最大尺寸为 4 m。水平视角为 190°,垂直视角 15°,检测是在一个垂直平面完成
5.6	安全相关区规范	安全相关区“A”和“B1”: 对应于 CHE 的保护停止区;且 用于执行 SRSS 的安全相关功能 A 和 B1,且是宽度为 3 m 的二维区域。起点为 0 m,终点 4 m。 安全相关区“B2”: 对应 CHE 的减速区; 用于执行 SRSS 的安全相关功能 B2;且是宽度为 3 m 的三维区域。起点为 4 m,终点为 13.32 m,垂直视角为 15°。 细节见图 11
5.8.2.1 5.8.2.2 5.8.2.3	执行 SRS/SRSS 功能的物理特性(例如用于人员检测的特性,如长度、面积、体积、反射率、速度和/或用于危险物体检测的特性)的限制	对于安全相关功能 A 和 B1: 圆柱型; 70 mm×400 mm; 反射率 2%。 对于安全相关功能 B2: 圆柱型; 200 mm×600 mm; 反射率 6%
注: 作为举例,仅使用 GB/Z 44938.1—2024 表 7 的第 1 至 5 行。		

参 考 文 献

- [1] GB/T 12643—2013 机器人与机器人装备 词汇
 - [2] GB/T 20438(所有部分) 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全
 - [3] ISO 12100 Safety of machinery—General principles for design—Risk assessment and risk reduction
 - [4] ISO TR 7250-2:2024 Basic human body measurements for technological design—Part 2: Statistical summaries of body measurements from national populations
 - [5] IEC 61496-1 Safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Part 1:General requirements and tests
 - [6] 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)
 - [7] IEC 62061 Safety of machinery—Functional safety of safety-related control systems
 - [8] IEC TS 61496-4-3 Safety of machiner—Electro-sensitive protective equipment—Part 4-3: Particular requirements for equipment using vision based protective devices (VBPD)—Additional requirements when using stereo vision techniques (VBPDEST)
 - [9] S.Thrun,W.Burgard and D.Fox,Probabilistic Robotics,The MIT Press,2005.
 - [10] Japanese children size DATA,Report of children size Data Base for increasing safety of machinery 2008, Japan Machinery Federation and Research Institute of Human Engineering for Quality Life
-