



中华人民共和国国家标准

GB/T 41355—2022

机械安全 自主移动式机械与人体 之间的动态安全距离 确定方法

Safety of machinery—Dynamic safety distances between autonomous
mobile machinery and human body—Method of determination

2022-03-09 发布

2022-10-01 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	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5 方法学	2
5.1 一般要求	2
5.2 速度与安全监控	2
5.3 距离补偿系数	3
6 动态安全距离的计算	3
6.1 总响应时间	3
6.2 人体接近方向未知时动态安全距离的计算	4
6.3 人体接近方向已知时动态安全距离的计算	5
参考文献	7

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。

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。

本文件由全国机械安全标准化技术委员会(SAC/TC 208)提出并归口。

本文件起草单位：苏州安高智能安全科技有限公司、福建省闽旋科技股份有限公司、长虹美菱股份有限公司、深圳国技仪器有限公司、十一维度(厦门)网络科技有限公司、南京理工大学、台州龙江化工机械科技有限公司、金华精研机电股份有限公司、浙江武精机器制造有限公司、广东永汇科技有限公司、中机生产力促进中心、南京林业大学、四川蜀兴优创安全科技有限公司、奥煌检测技术服务(上海)有限公司、皮尔磁电子(常州)有限公司、苏州市质量和标准化院、深圳市今天国际物流技术股份有限公司、漳州市中南护理用品有限公司、中汽认证中心有限公司、西安凯金哲检测有限公司、广东昂益新科技有限公司、枣庄市恒祥纸制品有限公司、广东盈德数字科技有限公司、泉州市标准化协会、广东康鑫新材料有限公司、平湖李挺机械制造有限公司、广东铭凯科技有限公司、北京机械工业自动化研究所有限公司、义乌市义宁模具有限公司、广东当家人智能电器有限公司、苏州市计量测试院、广东雪莹电器有限公司、陕西金优邦科技有限公司、九思检测技术(广东)有限公司、江苏冠丰智能科技有限公司。

本文件主要起草人：周成、吴晓斌、项楠、李立言、杨浩、郭冰、居里锴、余海箭、秦培均、赵阳、熊从贵、陈艳庆、付卉青、姚佳宜、黄之炯、黄飞、居荣华、沈俊杰、吴向亮、曾巍巍、朱斌、陈英、梅中、李勤、陈卓贤、张欣、王明华、张硕、沈德红、程红兵、黄黎萍、林通、李忠、郑华婷、刘治永、吴才春、倪超、刘英、张直金、向贤兵、方志明、李建、宋小宁、李挺、万青兰、汪正华、冯永苗、张晓飞。

引 言

机械领域安全标准体系由以下几类标准构成。

——A类标准(基础安全标准),给出适用于所有机械的基本概念、设计原则和一般特征。

——B类标准(通用安全标准),涉及机械的一种安全特征或使用范围较宽的一类安全装置:

- B1类,安全特征(如安全距离、表面温度、噪声)标准;
- B2类,安全装置(如双手操纵装置、联锁装置、压敏装置、防护装置)标准。

——C类标准(机械产品安全标准),对一种特定的机器或一组机器规定出详细的安全要求的标准。

根据 GB/T 15706,本文件属于 B1 类标准。

本文件尤其与下列与机械安全有关的利益相关方有关:

- 机器制造商;
- 健康与安全机构。

其他受到机械安全水平影响的利益相关方有:

- 机器使用人员;
- 机器所有者;
- 服务提供人员;
- 消费者(针对预定由消费者使用的机械)。

上述利益相关方均有可能参与本文件的起草。

此外,本文件也适用于标准化机构起草 C 类标准。

本文件中的技术要求可由 C 类标准补充或修改。

对于在 C 类标准的范围内,且已按照 C 类标准设计和制造的机器,宜优先采用 C 类标准中的要求。

机械安全 自主移动式机械与人体之间的动态安全距离 确定方法

1 范围

本文件规定了基于人体或人体部位和自主移动式机械的移动速度、制动能力,确定自主移动式机械与人体或人体部位之间的动态安全距离的要求和方法。

本文件适用于自主移动式机械与人体或人体部位之间的动态安全距离的确定。

本文件不适用于人体因跑、跳或跌落等方式接近的情况,也不适用于针对 14 岁以下儿童的动态安全距离。

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 15706—2012 机械安全 设计通则 风险评估与风险减小

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 术语和定义

GB/T 15706—2012 和 GB/T 19876—2012 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

动态安全距离 **dynamic safety distance**

用于确定危险、危险点或机器部件的实际位置,及其在实现预期风险减小的总响应时间(T)内因位置改变而可能达到的危险区边界的距离。

3.2

制动能力 **braking capability**

危险、危险点、机器部件或机器运动速度的减速能力。

3.3

速度与安全监控 **speed and safety monitoring;SSM**

保持人体或人体部位与危险区之间最小安全距离以实现风险减小的安全防护措施。

注:安全距离取决于几个因素,如人体部位的接近速度和接近方向,危险源的速度、方向和定位,电敏保护设备(ESPE)的探测能力,控制系统安全相关部件的响应时间等。

3.4

安全防护空间 **safeguarded space**

用于保护人员的防护装置和/或保护装置所围护的区域或空间。

4 符号

表 1 给出的符号适用于本文件。

表 1 符号及说明

符号	说明	单位
T	总响应时间	s
t_1	SPR/CS 输入端(如传感器、保护装置)的响应时间	s
t_L	SPR/CS 逻辑单元的响应时间	s
t_O	SPR/CS 输出端的响应时间	s
t_M	机器的响应时间	s
t_F	机器容差因子相关的响应时间	s
t_S	控制系统采样时间	s
K	来源于人体/人体部位接近速度的参数	mm/s
Δx	在总响应时间内危险源的位置变化量	mm
D_{DS}	与保护装置相关的触及距离	mm
Z	距离补偿系数	mm
v_0	机器的初始速度	m/s
t_2	SPR/CS 逻辑单元和输出端,以及机器的响应时间之和	s
t_3	带动力的防护装置打开到开口尺寸所需的时间	s
a_{\max}	机器的最大加速度	m/s ²
$-a$	减速度(制动能力)	m/s ²
S_P	人体从 T_0 开始直至在 T_1 时刻接触到危险区时的位移	mm
S_M	机器从 T_0 开始直至在 T_1 时刻停止时的位移	mm
β	人体运动角度(相对于 X 轴)	°

5 方法学

5.1 一般要求

作为计算动态安全距离的基础,危险源的位置以及危险源的实际运动速度和制动能力(减速度)均应已知。

5.2 速度与安全监控

速度与安全监控(SSM)的主要目的是通过适当改变机器或其部件潜在危险运动的速度和轨迹,保持最低的动态安全距离,从而实现风险减小。如果采用了速度与安全监控进行安全防护且满足以下要

求,则可按照第 6 章计算动态安全距离:

- 在安全防护空间内,应能检测到出现的任何人体或人体部位;
- 在安全防护空间内针对人体或人体部位的跟踪一旦失效,应立即触发可在控制范围内实现预期风险减小的指令;
- 在安全防护空间内的人体或人体部位的动态安全距离一旦不能保持,应立即触发可在控制范围内实现预期风险减小的指令。

如果保护设备可测量人体或人体部位的接近速度,则在计算动态安全距离时可采用测得的值。否则,应采用 GB/T 19876—2012 中给出的接近速度。

对于可测量接近速度的控制系统安全相关部件(SRP/CS),其性能应确保不会削弱 SRP/CS 的 SSM 功能。危险机器部件或机器自身的位置和速度的测量不确定度,以及人体部位自身的位置和速度的测量不确定度都应作为距离补偿系数(Z)的一部分。

5.3 距离补偿系数

在具体应用中,可能有必要考虑机器和安全防护装置的距离补偿系数(Z)。相关的指南见制造商给出的使用说明书。

距离补偿系数应考虑,但不限于以下因素。

- Z_G ,装置测量误差的一般补偿。
- Z_R ,基于反射的测量误差补偿。如果电敏保护设备(ESPE)附近有反射镜,需要考虑此类补偿。
- Z_F ,移动式机械(如车辆)因离地间隙不足的补偿。一般情况下,ESPE 是通过检测人体足部以上来检测人体,并且机器的制动能力无法考虑检测点前面脚的长度,因此需要考虑此类补偿。如果机器没有足够的离地高度,脚可能受到伤害。
- Z_B ,移动式机械(如车辆)减速时制动扭矩的补偿。

6 动态安全距离的计算

6.1 总响应时间

动态安全距离限定了危险区的边界。该危险区可以是危险、危险点、产生危险的机器部件或机器本身,在实现风险减小的总响应时间(T)内,因其实时位置的改变而可以达到的区域。总响应时间(T)类似于 GB/T 19876—2012 中 5.1 给出的时间,只是增加了控制系统采样时间(t_s),见公式(1)。

$$T = t_1 + t_L + t_O + t_M + t_F + t_s \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- T ——总响应时间,单位为秒(s);
- t_1 ——SPR/CS 输入端(如传感器、保护装置)的响应时间,单位为秒(s);
- t_L ——SPR/CS 逻辑单元的响应时间,单位为秒(s);
- t_O ——SPR/CS 输出端的响应时间,单位为秒(s);
- t_M ——机器的响应时间,单位为秒(s);
- t_F ——必要时,机器容差因子相关的响应时间,单位为秒(s);
- t_s ——控制系统采样时间,必要时需要考虑后续每次开始采样时的检测时间,单位为秒(s)。

在相关的计算过程中,应考虑敏感保护设备制动时危险源的位置,以及基于实时速度和减速率的停止距离。

注：停止距离为达到安全状态之前，危险、危险点、机器部件或机器移动的距离。

在危险机器功能运行期间，应以合适的时间间隔确定动态安全距离。计算的频次应包括确定达到安全状态的总响应时间(T)。

6.2 人体接近方向未知时动态安全距离的计算

人体接近方向未知时，为了实现预期风险减小，计算动态安全距离时应在总响应时间内额外增加危险源位置的变化量(Δx)。此时，动态安全距离(S)应按公式(2)计算：

$$S = (K \times T) + \Delta x + D_{DS} + Z \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中：

- K ——来源于人体/人体部位接近速度的参数，单位为毫米每秒(mm/s)；
- T ——按照公式(1)确定的时间，单位为秒(s)；
- Δx ——在总响应时间内危险源的位置变化量，单位为毫米(mm)；
- D_{DS} ——与保护装置相关的触及距离(见 GB/T 19876—2012 中 5.2)，单位为毫米(mm)；
- Z ——距离补偿系数(见 5.3)，单位为毫米(mm)。

如果加速度和减速度已知且连续，则 Δx 应按照公式(3)计算得出：

$$\Delta x = v_0 \times (t_1 + t_3) + \frac{a_{\max}}{2} \times (t_1 + t_3)^2 + v_0 \times t_2 + \frac{-a}{2} \times t_2^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中：

- v₀ ——机器的初始速度，单位为米每秒(m/s)；
- t₁ ——SPR/CS 输入端(如传感器、保护装置)的响应时间，即t₁，单位为秒(s)；
- t₂ ——SPR/CS 逻辑单元和输出端，以及机器的响应时间之和，即t₂=t_L+t_O+t_M，单位为秒(s)；
- t₃ ——带动力的防护装置打开到开口尺寸所需的时间(如果没有此类防护装置则取 0)，单位为秒(s)；
- a_{max} ——机器的最大加速度，单位为米每二次方秒(m/s²)；
- a ——减速度(制动能力)，单位为米每二次方秒(m/s²)。

机器可能有最大的速度。根据采样时机器的当前速度，达到最大速度的时间可根据公式(4)计算得出：

$$T_{v \rightarrow v_{\max}} = \frac{v_{\max} - v_0}{a} \quad \dots\dots\dots(4)$$

因此，只有(t₁+t₃)<T_{v→v_{max}}时，公式(3)才有效。(t₁+t₃)≥T_{v→v_{max}}时，v 应取v_{max}，此时，Δx 的计算公式变为公式(5)：

$$\Delta x = v_0 \times T_{v \rightarrow v_{\max}} + \frac{a_{\max}}{2} \times T_{v \rightarrow v_{\max}}^2 + v_{\max} \times (t_1 + t_3 - T_{v \rightarrow v_{\max}}) + v_{\max} \times t_2 + \frac{-a}{2} \times t_2^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

此外，如果a_{max}未知，公式(3)中应采用极限加速度，此时公式(3)简化为公式(6)：

$$\Delta x = v_{\max} \cdot (t_1 + t_3) + v_{\max} \cdot t_2 + \frac{-a}{2} \cdot t_2^2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

最后，如果-a 未知，则减速度应取零。

当a_{max}和-a 均未知时，两种简化方式都可以使用。

另外，某些功能安全相关的标准可能给出了 Δx，或者，由于减速度(-a)取决于几个参数，可通过测量得出 Δx。应额外增加允差，且该允差不应小于测量值的 10%。

对于计算得出的 Δx 值，应进行验证。

6.3 人体接近方向已知时动态安全距离的计算

当人体接近方向已知时,动态安全距离应按照公式(7)计算得出(见图 1):

$$S = \sqrt{S_M^2 + S_P^2 - 2 \times S_M \times S_P \times \cos\beta} + D_{DS} + Z \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

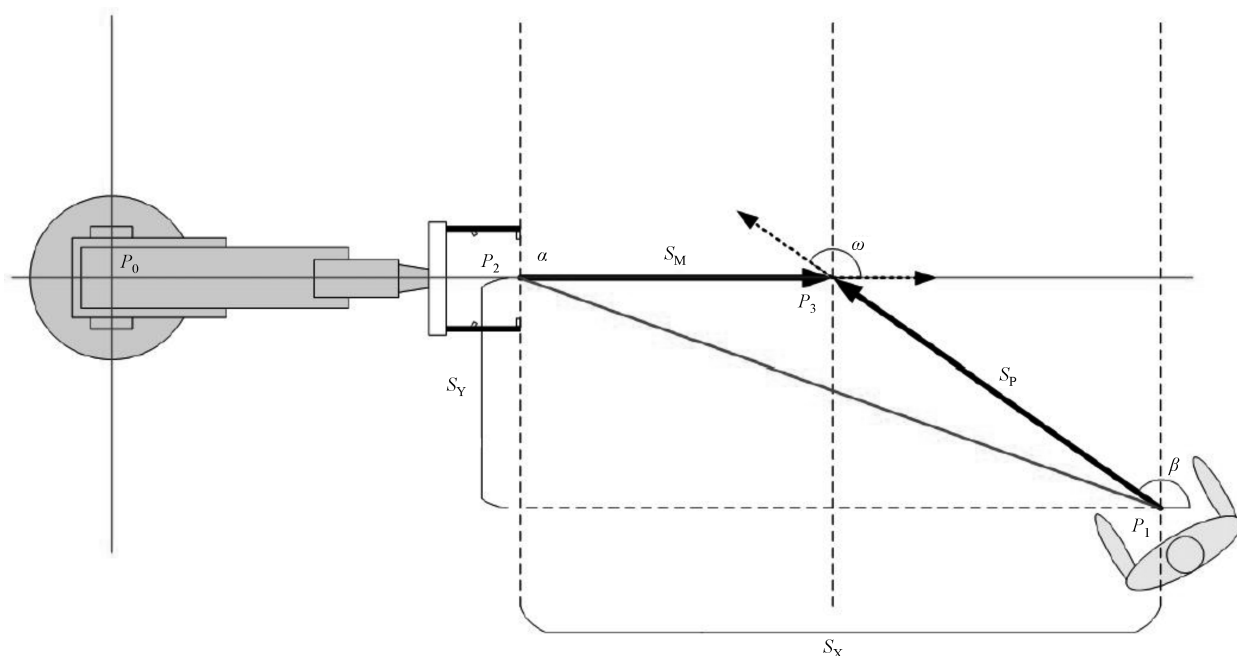
S_P ——人体从 T_0 开始直至到 T_1 时刻接触到危险区时的位移,单位为毫米(mm)。假定人体速度为 1.6 m/s($S_P = 1.6 \text{ m/s} \times T$);

S_M ——机器从 T_0 开始直至到 T_1 时刻停止时的位移,单位为毫米(mm)。假定机器当前速度为 v_M ,制动能力为 $-a$,总响应时间为 T ,则: $S_M = v_M \times T - \left(\frac{a}{2}\right) \times T^2$;

β ——人体运动角度(相对于 X 轴),见图 1;

D_{DS} ——与保护装置相关的触及距离(见 GB/T 19876—2012 中 5.2),单位为毫米(mm);

Z ——距离补偿系数(见 5.3),单位为毫米(mm)。



标引序号说明:

S_X ——人体与机器在 X 轴上的垂直距离;

S_Y ——人体与机器在 Y 轴上的垂直距离;

S_P ——人体从 T_0 开始直至到 T_1 时刻接触到危险区时的位移。假定人体速度为 1.6 m/s($S_P = 1.6 \text{ m/s} \times T$);

S_M ——机器从 T_0 开始直至到 T_1 时刻停止时的位移;

T_0 ——安全功能被触发的时刻(在 P_0 位置);

T_1 ——实现预期风险减小的时刻;因此, $T = T_0 + T_1$;

P_0 ——坐标原点;

P_1 ——安全功能被触发时人体所在的位置(在 T_0 时刻);

P_2 —— T_0 时刻危险机器所在的位置;

P_3 ——实现预期风险减小时,机器所在的位置;

α ——危险源相对于 X 轴的移动角度(简化为 $\alpha = 0$);

β ——人体相对于 X 轴的移动角度;

ω ——危险源与人体之间的运动夹角。

注:角度 β 可由机器控制系统通过感应危险源的运动方向和合适保护装置检测到的人体接近方向来确定。

图 1 人体接近方向已知时的动态安全距离

只要人体的运动角度(α)相对于危险源的运动角度(β)没有重大改变,就可以采用 S 的最终结果。任何情况下,一旦采样发现触及动态安全距离(S),应立即触发停止。因此,在采样发现触及动态安全距离(S)时,假定人体的运动轨迹在总时间内保持不变,以使系统实现安全状态。

由于人体的运动不可预测,因此,这种假设应只适用于 T 较小(小于 100 ms),或者人体或危险的运动被物理屏障严格限制的情形。否则,应采用 6.2 给出的方法。

注:示例给出了简化的二维模型,以帮助理解。计算原理同样适用于三维模型。

参 考 文 献

- [1] ISO 11161 Safety of machinery—Integrated manufacturing systems—Basic requirements
- [2] ISO 13849-1:2006 Safety of machinery—Safety-related parts of control systems—Part 1: General principles for design
- [3] IEC 61496-2 Safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Part 2: Particular requirements for equipment using active opto-electronic protective devices (AOPDs)
- [4] IEC 61496-3 Safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Part 3: Particular requirements for active opto-electronic protective devices responsive to diffuse reflection (AOPDDR)
- [5] IEC/TR 61496-4 Safety of machinery—Electro-sensitive protective equipment—Part 4: Particular requirements for equipment using vision based protective devices (VBPD)
-