

T/CASEI

中国特种设备检验协会团体标准

T/CASEI XXXX—XXXX

核电厂运维机器人 安全要求

Operation and maintenance robots for nuclear power plants

—Safety requirements

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2025.9.18）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国特种设备检验协会 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 1

4 总体要求 1

 4.1 安全原则 1

 4.2 安全目标 2

 4.3 安全措施 2

5 安全设计要求 2

 5.1 安全设计通则 2

 5.2 整机 2

 5.3 部件 3

 5.4 控制系统 3

 5.5 环境适应性 3

 5.6 故障诊断与应急处置 3

6 安全性能测试 4

 6.1 通用安全测试 4

 6.2 专用安全测试 4

7 安全性能评估 4

 7.1 机械系统安全性评估 4

 7.2 控制系统安全性评估 4

 7.3 传感系统安全性评估 5

 7.4 执行系统安全性评估 5

 7.5 能源系统安全性评估 5

8 操作与使用要求 5

 8.1 通用要求 5

 8.2 操作安全规程 5

 8.3 人员培训与授权 5

 8.4 防异物要求 5

 8.5 数据安全与保密 5

 8.6 应急响应 5

9 维护与保养要求 5

 9.1 维护周期 5

 9.2 维护项目 5

 9.3 检修流程 6

 9.4 检修记录 6

 9.5 备件库存 6

10 停用与报废要求 6

10.1 总体原则 6

10.2 停用标准 6

10.3 停用措施 6

10.4 报废标准 7

10.5 报废措施 7

10.6 存放要求 7

10.7 拆解回收 8

附 录 A （资料性） 核电厂运维机器人风险评估 9

A.1 系统限制 9

A.2 危险识别 9

A.3 风险估计 9

A.4 风险评价 9

附 录 B （资料性） 核电厂运维机器人风险减少措施 10

B.1 本质安全设计 10

B.2 安全防护和/或补充保护措施 10

B.3 使用信息 10

附 录 C （资料性） 核电厂运维机器人通用安全测试表示例 11

附 录 D （资料性） 机器人定期安全检查与维护记录示例 12

参 考 文 献 14

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。

本文件由中国特种设备检验协会（T/CASEI）提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

引 言

核电是实现“双碳”目标的基荷清洁能源，核安全是国家安全的重要组成，是核电生存和发展的生命线。为了确保核电的安全、稳定、经济运行，必须定期开展运维检修，以保持设备的健康，且核电运维检修面临辐照、狭小受限空间等特殊环境及挑战，必须依靠运维机器人。

核电厂运维机器人是助力核电厂安全、高效、友好运行的重要装备，其研发与应用近年来获得飞速发展，种类繁多，应用广泛。然而迄今为止，国内外尚无核电厂运维机器人相关的国际标准、国家标准及行业标准，不利于核电厂运维机器人设计与应用的规范化、统一化、完备化，既增加了设计应用成本，更增加了运维机器人核安全审评的复杂性。

因此，本文件的编制，可统一核电厂运维机器人的安全要求，指导核电厂运维机器人的安全设计、安全性能测试与评估、操作使用、维护保养、停用与报废等，有助于降低安全风险，助力核电的安全、稳定、高端运行。

核电厂运维机器人 安全要求

1 范围

本文件规定了核电厂运维机器人（以下简称机器人）安全要求，包括机器人的总体要求、安全设计要求、安全性能测试、安全性能评估、操作与使用要求、维护与保养要求、停用与报废要求。

本文件适用于压水堆核电厂运维机器人，其他堆型参照执行。

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 4960.5 核科学技术术语 辐射防护与辐射源安全
- GB 11291.1 工业环境用机器人 安全要求 第1部分：机器人
- GB 11291.2 机器人与机器人装备 工业机器人的安全要求 第2部分：机器人系统与集成
- GB/T 12643 机器人词汇
- GB/T 15706 机械安全 设计通则 风险评估与风险减小

3 术语和定义

GB/T 4960.5、GB/T 12643界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

核电厂运维机器人 operation and maintenance robots for nuclear power plants

应用于核电厂运维领域，一般由经过专门培训的人员操作或使用的，辅助和/或替代人执行任务的特种机器人。

3.2

控制区 controlled area

要求或可能要求采取专门防护措施或安全手段的任何区域，以便在正常工作条件下控制正常照射或防止污染扩展及防止潜在照射或限制其程度。

[来源：GB/T 4960.5，6.20，有修改]

3.3

冷却剂丧失事故 LOCA loss of coolant accident

反应堆及一回路系统承压边界发生破裂，冷却剂从破口大量流失，从而造成堆芯燃料组件发生裸露或熔化以及放射性物质释放的事故。

4 总体要求

4.1 安全原则

4.1.1 预防为主

在设计、制造、使用和维护机器人时，应始终将预防安全放在首位。
通过采用先进的技术手段和管理措施，降低机器人运行过程中的安全风险。

4.1.2 纵深防护

机器人应具备多种安全防护措施，包括物理防护、电气安全、辐射防护等。
这些防护措施应相互协调、互为补充，形成完整的防护体系。

4.1.3 安全可靠

机器人应具有较高的可靠性和稳定性，能够在核电厂复杂、恶劣、极端环境中持续稳定运行。通过严格的质量控制和性能测试，确保机器人各项性能指标符合安全要求。

4.2 安全目标

4.2.1 人员安全

机器人的设计和使用应确保不会对操作人员和其他相关人员造成人身伤害。通过设置安全防护装置、急停按钮等措施，提高人员安全性。

4.2.2 设备及设施安全

机器人应能够安全、有效地执行运维任务，不会对核电设备及设施造成损坏或影响其正常运行。通过可靠的控制和监测技术，确保机器人在运维作业过程中的准确性和稳定性。

4.2.3 防异物安全

机器人各零部件应连接牢靠，不因机器人零部件掉落造成额外异物。机器人各零部件、整机可靠性高，不产生二次异物。

4.3 安全措施

4.3.1 安全管理制度

应建立完善的安全管理制度，明确机器人的使用、维保等安全规定。定期对安全管理制度进行审查和更新，确保其适应机器人的更新变化。

4.3.2 安全培训与教育

操作人员应接受专业的安全培训和教育，熟悉并掌握机器人的操作方法、安全规定和应急响应措施。通过定期的安全培训和演练，提高操作人员的安全意识和应急响应能力。

4.3.3 安全监测与评估

应通过各项安全性能测试、安全指标监测，对机器人的安全性能进行评估。根据监测和评估结果，及时采取措施消除安全隐患，确保机器人安全。

4.3.4 应急响应与救援

应制定完善的应急响应和救援预案，明确在机器人发生故障或事故时的应对措施和救援流程。定期组织应急演练和救援培训，提高应急响应和救援能力。

5 安全设计要求

5.1 安全设计通则

机器人应进行风险评估，内容涵盖系统限制、危险识别、风险估计、风险评价。风险评估后应采取风险减少措施降低风险，提升机器人安全设计水平。

风险评估方法见附录A。

风险减少措施见附录B。

5.2 整机

机器人应按规定程序批准的设计图纸和工艺文件进行制造。制造机器人所用材料及外购元器件、部件入厂时需经检验部门复检，并应符合产品质量标准规定。机器人整机还应符合以下要求：

- 整机接口应满足核电厂维修现场接口要求，保证可顺利到达工作现场且不损伤相关设备设施。
- 宜采用模块化设计，便于快速更换故障部件，降低维修难度和成本。对于人员无法接近或维修困难的动力驱动执行部件，应配置动力驱动执行部件故障时的人工介入接口。

- 对于耐高温、耐腐蚀、耐辐射、导热散热等要求，应选用合适材料确保机器人在高温、腐蚀、辐射环境下能够稳定运行，或防止过热导致机器人损坏。
- 各部件的联接、焊合应牢固可靠，保证在正常工作中不松动和脱落。
- 机器人部件的设计、制造、保护或包装应确保不损伤或损坏设备。
- 机器人出现涉及影响作业效果、操作者安全和作业对象安全的故障时，应具有报警功能。
- 动力的损失或变化不应造成危险。
- 重新启动电源，不应导致任何异常运动。

5.3 部件

机器人部件应足够光滑，机械结构不应出现毛刺，结构表面平滑过渡，便于机器人沾污后洗消去污，同时通过紧凑或可变形结构适配狭窄空间，并对动力传递部件设防护装置保障安全。应使用固定或移动的防护装置来预防电机轴、齿轮、传动带或链等动力传递部件造成的危险。移动的防护装置与危险运动应互锁，使危险运动在危害发生前停止。

末端执行器的设计和制造应使电气、液压、气动或真空动力的损失或变化都不造成危险，否则应提供其他安全防护方法以防危险的发生。

5.4 控制系统

5.4.1 总体安全要求

机器人控制系统需配备安全相关功能，如安全停止、安全速度限制等。具备远程操控、自主导航与避障功能的机器人需配备安全相关的传感器和监控装置。控制软件需经过验证和确认，并提供足够的操作模式和权限管理，以便在必要时进行追溯和分析。

5.4.2 传感器

机器人应配备多种传感器，用于实时监测环境参数和设备状态，确保机器人在执行任务时具有足够的感知能力。

对于安全相关的传感器配置，应避免共模故障。针对高辐照、高温、高湿等特殊传感器使用环境，应考虑采取适当的防护措施。

5.4.3 通信

机器人应具备稳定的通信能力，确保与操作人员或控制中心的实时数据传输。控制系统应稳定可靠，能够确保机器人在复杂环境中的精确操控。

对于钢制安全壳、密闭金属容器、大功率设备等无网络、重屏蔽、强干扰特殊使用环境，应考虑采用自组网、抗干扰、备用网络等通信安全设计措施。

5.4.4 人机交互

机器人应配备简洁明了、直观易操作的人机交互界面，以方便操作人员进行信息交互并避免人因失误引发安全风险。

5.4.5 安全监控

机器人应配备安全监控系统，实时监测机器人的运行状态和环境参数。

安全监控系统应能够发出报警信号，并在必要时自动停止机器人的运行。

5.5 环境适应性

对于高温、腐蚀、水下、粉尘等使用环境，机器人应选用适当的防护等级及防护措施，确保机器人在特定环境中稳定运行。

对于辐射使用环境，机器人应具备良好的耐辐射、机械等性能，以保障控制区或有辐射剂量场景长期正常工作；应考虑配备辐射监测功能并将数据实时传输至操控端，供操作人员掌握情况并应对。

5.6 故障诊断与应急处置

应通过机器人自检系统、传感器数据或操作人员的观察，及时发现故障或异常，利用诊断工具对故障进行初步分析，确定故障的性质和严重程度。

出现严重故障时应按照应急响应计划将机器人从工作区域安全移除，在回收过程中确保机器人稳定且不会造成二次损伤。

6 安全性能测试

6.1 通用安全测试

机器人应根据作业环境、任务需求，进行机械结构安全测试、运动安全测试、防护装置安全测试等通用测试，验证机器人满足标准规范、作业工艺、设计指标等要求。

机器人通用安全测试示例见附录C。

6.2 专用安全测试

6.2.1 环境适应性测试

机器人应根据作业环境，测试机器人在辐照、电磁干扰、水下等特殊环境下的运行性能、安全性、抗辐照能力。测试内容包括：

——辐照测试，包括零部件辐照测试、电子电路辐照测试、整体辐照测试，验证机器人在预定的剂量率及总剂量指标内稳定、可靠工作，不出现功能失效或指标退化；

——电磁干扰测试，验证机器人在电磁干扰环境下的稳定性和可靠性，确保机器人在通信受阻或中断时处于安全状态；

——水下测试，验证机器人在水下作业环境下的稳定性和可靠性，确保机器人在规定水深稳定、可靠工作，不出现密封失效或指标退化。

6.2.2 任务匹配性测试

机器人应根据作业环境、任务需求，对机器人进行完整的功能与性能测试，验证机器人任务匹配性。

对于未经充分验证或首次应用的作业工艺，机器人应在与作业环境相对应的试验装置、模拟体或仿真系统上进行测试，以充分验证任务匹配可行性，并将风险减少至可控范围。

对于属核安全相关的作业对象，机器人应进行保护功能测试，验证其物理保护装置的有效性，确保机器人具备作业对象保护功能，不对作业对象完整性及核安全评价结果造成影响。

6.2.3 紧急停机与异常工况测试

机器人应进行紧急停机测试，验证机器人在紧急情况下能正确响应并安全停机，必要时安全退出作业环境。

机器人应进行异常工况测试，验证机器人应对异常工况处置时不对作业对象造成安全影响，异常工况消除后能恢复原有功能。

对于有安全状态要求的作业对象，机器人在执行紧急停机功能时需将作业对象置于安全状态后才能停止，例如换料机器人在执行装料或卸料过程中执行紧急停机时，需将正在抓取的核燃料组件放置在预设的停放位置才可停止工作。

7 安全性能评估

7.1 机械系统安全性评估

机器人应进行强度、刚度和稳定性的评估，检查关键部件如关节、连接件、驱动系统等是否满足设计要求和安全标准，确保在正常工作及异常情况下，如地震工况、LOCA工况等，机械系统不会发生破坏或变形。

对于抗震等级、LOCA工况有要求的，机器人应进行抗震分析、LOCA鉴定。

7.2 控制系统安全性评估

机器人应进行控制系统稳定性和可靠性的评估，包括软硬件的容错能力、冗余设计以及故障自诊断功能，确保控制系统在面临外部干扰或内部故障时具备应对策略和恢复能力。

7.3 传感系统安全性评估

机器人应进行传感系统在辐照、高温、水下等特定环境下的准确性、响应速度与抗干扰性的验证，确保传感系统能够及时准确地感知测量对象变化。

7.4 执行系统安全性评估

机器人应进行执行系统在辐照、高温、水下等特定环境下的性能测试，确保执行系统能够按照控制系统的指令准确快速地做出反应。

7.5 能源系统安全性评估

机器人应进行能源系统的安全性检查，包括过充、过放、过温、防爆、泄漏检测等保护功能的有效性，评估能源系统的稳定性和效率，确保机器人长时间工作时保持稳定能源供应。

8 操作与使用要求

8.1 通用要求

机器人的使用应遵守核电厂的安全规定，未经授权不得进入限制区域。机器人应与核电厂的安全系统实现联动，确保在紧急情况下能够及时响应。机器人系统应定期进行安全检查和维护，确保安全性能处于最佳状态。

机器人安全检查与维护示例见附录D。

8.2 操作安全规程

机器人运行过程中应满足安全操作步骤和注意事项，包括启动、运行、停机等流程，以及紧急情况下的应对措施。

8.3 人员培训与授权

操作人员应接受专业的培训和再培训，以熟悉并掌握机器人的操作方法、安全规定和应急响应措施。培训应包括理论学习和实践操作两个方面，以确保操作人员具备足够的技能和知识。

对于作业对象属核安全相关的，宜采取授权制度，以证明其具备操作和维护机器人的能力和资格。授权应定期进行更新和复审，以确保操作人员的技能水平始终符合要求。

8.4 防异物要求

对于工作区域有防异物要求的，工作前应制定防异物措施，工作完成后核查是否有异物掉落。

8.5 数据安全与保密

应确保系统和相关数据的安全性，防止未经授权的访问和数据泄露。

8.6 应急响应

应根据机器人的使用场景、作业规范制定完善的应急响应预案，包括紧急停机、人员疏散、事故报告等环节。应急响应期间，应保持与核电厂安全部门的紧密沟通，确保事故得到及时处理。

9 维护与保养要求

9.1 维护周期

应根据运维机器人的使用频率和运行环境，制定合理的维护周期。

9.2 维护项目

应根据机器人的安全检查结果选择合适的维护项目。定期维护包括检查机器人的物理状态、能源系统和执行器的功能、传感器、仪表的检定等；专业维护包括更换磨损、老化部件，调整系统参数以及进行软件更新等。

9.3 检修流程

应制定详细的检修流程，包括故障诊断、部件更换、功能测试等环节。

9.4 检修记录

应详细记录检修过程、更换的部件以及检修后的测试结果。

9.5 备件库存

应建立适当的备件库存，库存条件应满足备件存放要求。库存中应包括常用的易损件和关键部件。所有备件应符合相关质量标准，并在入库前、领用后进行严格的质量检查。

10 停用与报废要求

10.1 总体原则

机器人系统经安全检查，若达到停用或报废标准，应启动机器人停用或报废处置流程，按相关要求要求进行存放或拆解回收，并确保机器人处置过程安全。

10.2 停用标准

机器人系统安全检查时若出现以下不达标情况之一，应考虑停用：

1) 机器人技术性能退化或结构完整性破坏，如机械臂定位精度误差增大、平均无故障时间降低、液压管路出现不可修复的渗漏、辐射屏蔽层出现裂缝或破损、行走制动性能下降等，相关技术指标已不满足机器人最低使用要求。

2) 机器人辐射安全指标超限，如机器人累积辐射剂量接近设计耐受极限、单次任务辐射剂量率过大、在高辐射环境中暴露时间超过设计的单次耐受值限值、表面放射性污染水平超过清洁解控水平限值、机器人缝隙部位去污后仍无法将表面剂量率控制在限值以下等。

3) 机器人使用过程合规性不足，如年度维护计划完成率低于限值或关键维护项目缺失、连续两次定期性能检测未通过或检测数据异常、超范围使用或未经授权的改装记录次数超限、制造商技术支持终止或关键备件停产导致无法保障等。

10.3 停用措施

机器人进入停用程序后，应执行机器人配套停用程序，做好停用前准备、安全停用操作和停用后管理，确保机器人安全停用。

1) 停用前应执行如下准备措施：

——对待停用机器人进行全面性能检测，生成包含技术状态、辐射水平和维护记录等信息的综合评估报告。

——根据评估结果制定专项停用方案，明确处理流程，划定作业区域并设置安全警示标识，制定应急处置预案。

——做好停用资源准备，如准备或配备专用存放支架、液压系统专用排空工具、放射性污染防护装备等。

2) 安全停用操作应根据需要执行如下措施：

——执行能源管理操作，如切断主电源和备用电源、拆除控制电缆并做绝缘处理、对液压系统进行卸压操作并记录初始压力和卸压时间、排空液压管路中的油液并分类收集和检测放射性水平、对电容性部件进行放电处理并确认放电完成等。

——执行污染控制操作，如操作人员穿戴相应级别的呼吸防护装备和防护服、对污染表面进行分级去污、按放射性废物管理规定分类收集去污产生的废物等。

——执行信息固化操作，如记录最后一次运行参数或故障代码、拍摄机器人外观及关键部件状态照片存档、生成停用确认报告等。

3) 停用后管理应执行如下措施：

- 建立状态标识，如在设备显著位置张贴停用标识并注明停用日期、原因和责任人，建立停用设备台账等。
- 制定停用机器人监测计划，并按计划对已停用的机器人进行定期监测。
- 根据停用期限规定做好期限管理。

10.4 报废标准

机器人系统安全检查时若出现以下不达标情况之一，应考虑报废：

- 1) 机器人技术性能失效或结构破坏无法修复，如核心部件故障修复成本过高、平均无故障时间过低、经过三次以上维修后仍无法达到基本运行要求、机器人金属结构出现疲劳裂纹或永久变形、辐射屏蔽效能下降超限且无法修复、关键部件失效无法修复、控制系统兼容性丧失且无法升级等。
- 2) 机器人辐射安全指标严重超限，如机器人表面剂量率持续超限且去污无效、内部结构沾染放射性物质且无法通过常规去污达到清洁解控水平、放射性核素半衰期超过 30 年且活度浓度超标、多次检测发现放射性物质扩散至设备内部深层、电子元件因辐射损伤导致功能失效、累积辐射剂量超过设计耐受极限等。
- 3) 机器人使用不合规，如无法通过去污处理达到环保排放标准、继续使用将导致周边环境辐射水平超标的设备、设备型号已被列入淘汰目录或制造商已终止技术支持等。

10.5 报废措施

机器人进入报废程序后，应执行机器人配套报废程序，包括报废审批、处置方案制定、实施过程控制和最终验证与记录等，确保机器人安全报废。

1) 机器人报废前，应启动报废审批流程，包括：

- 使用单位提交报废申请并附相关支撑材料，如技术评估报告和辐射检测数据、设备全生命周期维护记录和故障分析报告、报废原因说明和预期处置方案等。
- 成立由设备管理、辐射防护、机械工程等专业人员组成的评审组，对设备技术状态、辐射水平和处置方案进行可行性评估。
- 向生态环境主管部门提交报废备案材料，获得放射性废物处置许可，明确处置责任人和监督机制，签订安全责任书。

2) 处置方案制定，包括：

- 制定分级处置策略，如低污染设备采用常规去污和材料回收流程、高污染设备实施强化去污和专用容器封装安全处置等。
- 选择技术路线，如表面污染设备优先采用高压水射流去污、内部污染设备采用固定化处理后送专用处置场、机械臂部件采用模块化拆解和分类检测处置等。
- 制定应急预案，如辐射超标扩散应急隔离措施、液压油泄漏收集处理方案、人员受照应急医疗处理流程等。

3) 实施过程控制，包括：

- 管控人员资质，如操作人员需持有辐射安全培训合格证书、具备机械臂操作和液压系统处理专项资质、熟悉核电厂辐射分区管理要求等。
- 监测报废过程，如作业区域剂量率记录、关键步骤双人复核并记录、所有操作视频保存、液压油取样检测记录全程可追溯等。
- 管理报废数据，如实时记录处置过程关键数据、采用电子化系统建立完整的处置台账、所有检测报告和操作记录归档保存等。

4) 效果验证与文件闭环，包括：

- 效果验证，如连续3次检测达到清洁解控水平、处置区域环境辐射水平符合相关标准要求、废物分类和包装符合规定标准、液压油和金属部件处置符合环保要求等。
- 文件闭环，如生成包含技术数据和检测报告与监管意见的完整处置报告、所有检测数据和操作记录归档保存等。

10.6 存放要求

停用或报废的机器人应按存放区域规划要求分区存放，如待评估区存放刚停用未评估的机器人、低风险区存放表面剂量率较低的设备、高风险区存放表面剂量率高的设备。

存放区域应符合相关贮存设施标准，并按需配备独立的通风系统、设置应急屏蔽和洗消设施等。

堆放应规范，每个存放单元应标识机器人编号、型号及停用日期、辐射水平和污染状况等信息。

存放区与作业区应保持合理的安全距离，高风险存放区边界应设置警示标识和安全警戒线，禁止无关人员进入。

应对存放状态进行监测，定期检查存放设施完整性、评估设备状态，做好存放期限管理，存放逾期应提交延期申请并经监管部门批准。

10.7 拆解回收

10.7.1 拆解

机器人拆解前应制定详细的拆解方案和安全防护措施，准备专用拆解工具和辐射防护装备，划定拆解区域并设置辐射屏蔽。

拆解应遵循以下顺序原则：

- 按非污染部件、低污染部件、高污染部件的顺序拆解。
- 按电气系统、液压系统、机械结构、辐射屏蔽层的顺序拆解。
- 按从上到下、从外到内的顺序逐步拆解。

10.7.2 回收

拆解材料应满足以下条件，方可回收：

- 去污后达到清洁解控水平。
- 材料性能未受辐射损伤。
- 符合相关材料回收标准。
- 金属部件需经过熔炼去活化处理。

禁止回收情形：

- 接触过超铀元素的部件。
- 辐射剂量超过材料耐受限值的部件。
- 无法彻底去污的高污染部件。
- 因辐射导致机械性能显著下降的金属结构件。
- 液压管路内壁存在放射性污染且无法清除的。

10.7.3 废物处置

拆解废物应按照相关管理规定进行分类包装、存放和运输，并在指定场所进行最终处置。

附 录 A
(资料性)
核电厂运维机器人风险评估

A.1 系统限制

机器人在风险评估时应充分考虑其预期用途的限制，包括使用限制、空间限制、时间限制及其他限制。

A.2 危险识别

机器人在风险评估时应能识别与机器人单元相关的所有合理可预见的危险情况(任务和危险组合)，包括间接的相互作用可能造成进一步的危险。

A.3 风险估计

针对机器人系统识别出的危险，需评估危险造成后果的严重程度，同时分析其发生概率，为后续制定风险应对措施提供依据。

A.3.1 伤害的严重程度

机器人应考虑伤害或损害健康的严重程度、伤害的范围等因素进行风险评估。应考虑每一种已识别的最有可能造成严重伤害的危险所产生的风险，但也应考虑可预见的最严重的伤害，即使其发生的概率并不高。

A.3.2 伤害发生的概率

机器人应考虑人员暴露于危险类型、危险事件的发生概率、避免或限制伤害的可能性等因素进行风险评估。危险事件的发生可能源于技术或人为原因。

A.4 风险评价

完成风险估计后，应进行风险评价，以确定是否需要进行风险控制及选用何种适当的保护措施。

设计者还应检查采用新的保护措施时是否引入了额外的危险或增加了其他风险。如有必要，将其列入已识别的危险清单中，并提出适当的保护措施。

充分的风险减少、风险比较可作为风险已被充分减少的判断准则。

附 录 B
(资料性)
核电厂运维机器人风险减少措施

B.1 本质安全设计

本质安全设计是指通过适当选择机器人的设计特性和/或暴露人员与机器的交互作用来消除危险或减少风险。

提高机器人本质安全设计水平的设计包括：

- 任务与功能适配性，例如功能针对性、低干预原则等；
- 环境适应性与防护设计，例如辐射防护、极端环境耐受、空间适配等；
- 材料与部件安全性，例如低污染风险、防火防爆、防异物等；
- 机械结构设计，例如低伤害性结构、限制运动范围与速度、轻量化设计等；
- 感知与反馈安全设计，例如内置安全传感器、非接触式感知、状态可视化等；
- 人机交互与应急控制，例如安全通信、应急停机机制等；
- 自主与容错能力，例如自主决策、容错与冗余设计等；
- 能量控制设计，例如低能量驱动、能量隔离与泄放、过载保护等；
- 控制逻辑与软件设计，例如故障安全、运动监控与限制、任务逻辑保护等。

B.2 安全防护和/或补充保护措施

B.2.1 防护装置和保护装置的选择要求

防护装置和保护装置的选择应根据运动部件的性质、进入危险区的需求、风险评估结果确定，防止运动部件对人员产生危险。

合适的安全防护装置包括但不限于固定式防护装置、活动式联锁防护装置、敏感保护设备等其中一种或组合。

B.2.2 防护装置和保护装置的设计要求

防护装置和保护装置的设计应适用于预定使用，并考虑相关的机械危险和其他危险。防护装置和保护装置应与机器人工作环境协调，不与机器人全生命周期各阶段各种动作干涉，且不易被废弃。

B.2.3 补充保护措施

补充保护措施包括但不限于实现急停功能的组件和元件、被困人员逃生和救援措施、隔离和能量耗散的措施、提供方便且安全搬运机器及其重型零部件的装置、安全进入机器人的措施、辐射屏蔽、应急响应等。

B.3 使用信息

B.3.1 使用信息的内容

使用信息由文本、文字、标记、信号、符号或图表等组成，以单独或联合使用的形式向使用者传递信息，包括使用手册、说明书等，提供给专业和/或非专业人员。

使用信息内容应包括机器人运输、搬运、贮存、安装、试运转、预定使用、维护，拆卸、停用及报废等信息。

B.3.2 使用信息的编制

使用信息编制应明确适用机型，语言简明，术语准确，便于使用者理解。使用信息编制应考虑印刷格式、适用国家语言、图文编排、制表、颜色、索引列表等形式要求。

使用信息应向使用者提供关于确保安全和正确使用机器人所需的各项信息，告知或警示剩余风险，特别考虑机器人的所有运行模式、涵盖机器人的全生命周期。

涉及安全相关问题的信息如果采用电子形式（硬盘、光盘、磁带等）保存使用，应经常进行硬拷贝备份，供随时获取；如果采用纸质形式，宜以便于操作者可随时获取的形式给出。

附 录 C
(资料性)
核电厂运维机器人通用安全测试表示例

表C. 1给出了核电厂运维机器人通用安全测试示例。

示例：

表C. 1 核电厂运维机器人通用安全测试表

测试对象	[机器人型号/名称]	测试日期	[年/月/日]		
测试编号	[唯一编号]	测试人员	[姓名]		
测试环境	温度[]℃/湿度[]%/气压[]kPa				
一、基本信息确认					
序号	项目	内容	确认结果 (合格/不合格/NA)		备注
1	产品信息	型号、生产批次、额定电压/电流/功率			
2	测试标准	依据标准(如GB/T 15706)			
3	测试设备	设备名称、型号、校准有效期			
二、机械安全测试					
测试项目	测试方法	判定标准	数据记录	测试结果(合格/不合格/NA)	备注
1.1结构强度	对承重部件施加1.5倍额定载荷,保持10min	无变形、裂纹、断裂	载荷[]N 变形量[]mm		
1.2连接可靠性	检查螺栓、焊接点等连接部位	无松动、脱焊、锈蚀	扭矩检测值 []N·m		
1.3运动部件防护	查看齿轮、皮带等暴露部位防护装置	防护装置完整、无缺口	防护间隙 []mm		
三、运动安全测试					
测试项目	测试方法	判定标准	数据记录	测试结果(合格/不合格/NA)	备注
2.1速度限制	测试额定/最大运动速度	不超过设计值 (设计值[]m/s)	实测速度 []m/s		
2.2加速度限制	检测启动/制动加速度	不超过安全阈值 (阈值[]m/s²)	实测加速度 []m/s²		
2.3定位精度	控制机器人到达指定坐标,重复5次	偏差≤设计公差 (公差[]mm)	最大偏差 []mm		
2.4急停响应	触发急停按钮,记录停机时间	停机时间≤0.5s, 无二次动作	响应时间 []s		
四、防护装置安全测试					
测试项目	测试方法	判定标准	数据记录	测试结果(合格/不合格/NA)	备注
3.1安全门/护栏	模拟安全门开启,检查机器人状态	立即停止运动,报警提示	响应时间[]s		
3.2光电/红外传感器	遮挡传感器,测试触发结果	触发后1s内停机,无误触发	测试次数[], 误触发[]次		
3.3缓冲装置	让机器人以0.5m/s速度撞击缓冲器	冲击力≤设计值 (设计值[]N)	实测冲击力 []N		
五、测试总结与判定					
测试结果汇总	本次共测试[]项,合格[]项,不合格[]项,不适用[]项				
不合格项处理	不合格项目:[列出具体项目] 原因分析:[简要说明] 整改建议:[具体整改措施]				
综合判定	☐ 合格(无不合格项) ☐ 限期整改(存在可整改不合格项) ☐ 不合格(存在重大安全隐患)				
签字确认	测试人员签字:		审核人员签字:		
	日期:		日期:		

附录 D
(资料性)
机器人定期安全检查与维护记录示例

表D. 1给出了机器人定期安全检查与维护记录示例。

示例：

表D. 1 核电厂运维机器人通用安全测试表

机器人编号		型号规格		使用部门		
安装日期		本次检查日期		上次检查日期		
检查周期		检查人员		联系方式		
备注						
一、检查与维护项目						
类别	检查项目	检查内容	检查结果 (正常✓/ 异常×)	维护措施	维护结果(已 完成✓/未完 成×)	备注
基础信息	设备标识	标识是否清晰、完整， 包含设备名称、编号等		若标识模糊或缺失，及 时更换或补充		
	运行记录	查看近期运行记录，是 否有异常停机、故障等 情况		对记录的异常情况进 行分析和处理		
机械系统	关节活动	各关节活动是否灵活， 有无卡顿、异响		对卡顿关节进行润滑， 检查异响原因并修复		
	连接件	螺丝、螺母等连接件是 否松动、缺失		紧固松动的连接件，更 换缺失的连接件		
	传动部件	传送带、齿轮等传动部 件是否磨损、变形，张 紧度是否合适		对磨损严重的部件进 行更换，调整传动部件 张紧度		
	导轨滑块	导轨是否有划痕、锈蚀， 滑块运动是否顺畅		清洁导轨，对锈蚀部位 进行处理，添加润滑剂		
电气系统	电源线路	电源线是否有破损、老 化，插头插座是否接触 良好		更换破损、老化的电源 线，修复接触不良的插 头插座		
	控制柜	控制柜内线路是否整 齐，有无松动、过热现 象，指示灯是否正常		整理线路，紧固松动的 接线，处理过热部件， 更换故障指示灯		
	传感器	各类传感器（如位置传 感器、视觉传感器等） 是否工作正常，检测精 度是否符合要求		校准传感器，对故障传 感器进行维修或更换		
	电机	电机运行是否平稳，有 无异响、过热现象		对电机进行清洁和润 滑，检查过热原因并处 理，必要时更换电机		
软件系统	程序运行	机器人运行程序是否正 常，有无程序错误、卡 顿等情况		调试程序，修复程序错 误		
	系统版本	操作系统及相关软件版 本是否为最新稳定版本		更新系统及软件至最 新稳定版本		
	数据备份	机器人运行数据、程序 等是否定期备份		对未备份的数据进行 备份，确保备份数据的 完整性和安全性		
安全装置	急停按钮	急停按钮是否灵敏有 效，按下后机器人能否 立即停止运行		对失灵的急停按钮进 行维修或更换		
	防护栏	防护栏是否完好，有无		修复或更换破损的防		

		破损、松动现象		护栏，紧固松动的部位		
	警示标识	警示标识是否清晰、醒目，有无缺失、模糊现象		补充缺失的警示标识，更换模糊的标识		
气动 / 液压系统	管路连接	管路连接是否牢固，有无泄漏现象		紧固松动的管路连接，修复泄漏部位		
	压力值	系统压力是否在规定范围内		调整系统压力至规定范围		
	过滤器	过滤器是否清洁，有无堵塞现象		清洁或更换堵塞的过滤器		
外观清洁	表面清洁	机器人表面是否有灰尘、油污等污渍		对机器人表面进行清洁		
	散热部件	散热风扇、散热片等是否清洁，有无堵塞现象		清洁散热部件，确保散热良好		
二、综合评估与处理意见						
本次检查总体评价						
主要问题及处理建议						
后续维护计划						
签字确认	测试人员签字：			审核人员签字：		
	日期：			日期：		

参 考 文 献

- [1] GB 5226.1-2019 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件
 - [2] GB 6249-2025 核动力厂环境辐射防护规定
 - [3] GB/T 7932-2017 气动 对系统及其元件的一般规则和安全要求
 - [4] GB/T 16855.1-2018 机械安全 控制系统有关安全部件 第1部分：设计通则
 - [5] GB/T 18209.2-2010 机械电气 安全指示、标志和操作 第2部分：标志要求
 - [6] GB 18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准
 - [7] GB/T 23821-2022 机械安全 防止上下肢触及危险区的安全距离
 - [8] GB/T 44080-2024 核电厂可靠性、可用性、可维修性和安全性管理规范
 - [9] NB/T 20662-2023 压水堆核电厂工况分类
 - [10] HJ 1417-2025 核技术利用放射性废物库运行管理技术规范
 - [11] 《放射性废物安全管理条例》（国务院令第612号，2011年）
-

团体标准《核电厂运维机器人 安全要求》

编制说明

（征求意见稿）

2025 年 9 月

《核电厂运维机器人 安全要求》编制说明

（征求意见稿）

一、工作简况

1 任务来源

根据中国特种设备检验协会团体标准工作委员会文件《中国特种设备检验协会团体标准项目任务书》要求，本项目由中国特种设备检验协会团体标准工作委员会特种设备用机器人标准化工作组（以下简称“中特协团标委特种设备用机器人工作组”）指导、监督和具体管理。项目由中广核研究院有限公司牵头负责起草，联合 16 家核电运维企业、科研院所、高校及相关科技企业共同参与，计划完成时间为 2025 年 9 月。

2 主要工作过程

起草阶段：目前国内外尚未有专门针对核电厂运维机器人安全要求的标准，现有的机器人相关标准如 GB 11291.1《工业环境用机器人 安全要求 第 1 部分：机器人》、GB 11291.2《机器人与机器人装备 工业机器人的安全要求 第 2 部分：机器人系统与集成》、GB/T 15706《机械安全 设计通则 风险评估与风险减小》等，虽有指导作用，但不完全适用于核电厂运维机器人。因此，为满足当前核电厂机器人研发与应用推广的实际需求，规范核电厂运维机器人安全要求，亟需制定一项新的标准以填补这方面的空缺。中广核研究院有限公司联合北京石油化工学院、哈尔滨工业大学、河北工科大学、深圳市人工智能与机器人研究院、北京理工大学、山东大学、中山大学、中国科学院深圳先进技术研究院等核电运维机器人研究机构，中广核工程有限公司、中核武汉核电运行技术股份有限公司、国核电站运行服务技术有限公司、中广核检测技术有限公司、苏州热工研究院有限公司等国内三大核电集团运维企业、中广核核电运营有限公司、广西防城港核电有限公司、台山核电合营有限公司等核电运营企业，大连洁能重工股份有限公司等核电相关科技企业，以及中国特种设备检测研究院、福建省特种设备检验研究院等多家检验机构，共同组成标准起草工作组。工作组前期广泛调研国内外相关文献资料，分类整理国内外核电运维机器人信息，参照 GB 5226.1-2019《机械电气安全 机械电气设备 第 1 部分：通用技术条件》、GB/T 44080-2024《核电厂可靠性、可用性、可维修性和安全性管理规范》、GB 11291.1《工业环境用机器人 安全要求 第 1 部分：机器人》、GB 11291.2《机器人与机器人装备 工业机器人的安全要求 第 2 部分：机器人系

统与集成》、GB/T 15706《机械安全 设计通则 风险评估与风险减小》等标准，立足核电厂运维机器人实践，严格按照 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，编制了《核电厂运维机器人 安全要求》标准草案，并及时上报到中特协团标委特种设备用机器人工作组。

研讨阶段：2024 年 11 月 15 日，中特协团标委特种设备用机器人工作组秘书处在广东省深圳市召集《核电厂运维机器人 安全要求》标准主要起草单位，包括中广核研究院有限公司、中核武汉核电运行技术股份有限公司、国核电站运行服务技术有限公司、哈尔滨工业大学、福建特种设备检验研究院、中广核工程有限公司、河北工业大学、北京石油化工学院、山东大学、北京理工大学、深圳市人工智能与机器人研究院、中广核核电运营有限公司、苏州热工研究院有限公司、广西防城港核电有限公司、台山核电合营有限公司、中山大学、中国科学院深圳先进技术研究院、深圳市人工智能与机器人研究院、大连洁能重工股份有限公司及部分标准化专家，共同讨论标准框架、编制进度及标准草案。经研讨，确定标准应总体围绕核电机器人、并结合核电的特殊性，从人、机、料、法、环等维度来考虑安全，且考虑人因失效及机器人失效等因素。整体思路建议按照：整体安全、本体安全（机械安全、电气安全、防水安全、防爆安全、防尘安全等）、功能安全、使用安全（含防异物等）、信息安全、伦理安全、环境安全、材料及档案安全等。标准框架可参考《GB/T 44253-2024 巡检机器人安全要求》，建议分为前言、引言、范围、规范性引用文件、术语和定义、总体总则、风险评估、安全要求、验证与确认、维护与保养要求、附录等。

2025 年 4 月，依据第一次标准讨论会议纪要要求，由中广核研究院有限公司、北京石油化工学院、国核电站运行服务技术有限公司等起草单位分别牵头，组建了由 17 家参编单位构成的讨论小组。该小组对标准中安全原则、风险评估、设计要求、测试要求、评估要求、操作要求、维护要求等内容进行编制汇总，最终确定了标准的总则性安全要求、风险评估与风险减少、安全设计要求、安全性能测试、安全性能评估、操作与使用要求、维护与保养要求等具体内容，形成了工作组讨论稿。

2025 年 7 月，起草工作组充分吸纳参编单位和工作组专家提出的建议与意见，对标准讨论稿中第五章《风险评估》、第六章《风险减少》内容进行优化规范，补充了第十章《设计要求与保护措施》，形成征求意见稿初稿。

2025年8月，起草工作组通过网络开展第二次讨论，对第五章节、第六章节内容进行了合并，结合核电厂运维机器人实践，重点加强了本质安全设计措施的描述；对第十章节内容进行了优化，由原来的零散分项整理为7个分项，并针对核电特殊运维环境，加强了设计实践方面的举措，有利于核电厂运维机器人行业专业人士依据建议解决核电特种作业环境中的技术问题，强化设计水平。依据启动会意见，对出现两次及以上的术语进行了定义，补充了核电行业部分术语，便于非核电行业人员快速掌握术语内涵，理解标准技术内容，进一步完善了征求意见稿。

2025年9月10日，起草工作组通过网络开展第三次讨论，邀请团标委4位专家提出评审意见和建议。团标委专家提出进一步精简第三章《术语和定义》，将风险评估与风险减少措施以通则及附录形式与安全设计要求章节合并，并将安全设计要求章节内容按照合理分类原则进行重新排列，体现内容逻辑相关性。将安全性能测试按照通用与专用测试原则进行分类，补充测试范例强化测试指导意义，补充机器人安全检查与维护范例强化运维指导意义。增加第十章节“停用与报废要求”，针对机器人寿期末安全性能下降问题，提出停用与报废的标准、处理流程以及存放、拆解回收的具体流程，确保机器人处置过程安全。起草工作组按照上述意见完善，最终形成征求意见稿。

征求意见阶段：

工作组将讨论稿在内部公示审阅，根据反馈意见修订后形成《核电厂运维机器人 安全要求》（征求意见稿）及编制说明，报送至中特协团标委特种设备用机器人工作组秘书处。

二、制定原则和主要内容的论据

1 标准编制原则

面向市场与技术创新结合：遵循“面向市场、服务产业、自主制定、适时推出”原则，紧密结合核电厂运维机器人技术发展趋势，统筹推进标准修订与产业应用协同发展。

科学严谨与协商一致：广泛征求核电站、核电厂运维企业、运维机器人研发机构、其他相关科技企业和使用单位等多方意见，充分结合我国核电运维机器人发展现状及趋势，科学合理地制定标准。

适用性与可操作性：保证标准内容满足当前核电运维机器人技术发展需求，为运维机器人安全要求提供明确、具体的依据，确保内容表达科学准确、语言简洁精炼。

规范性与协调性：标准的结构和内容编排严格依据 GB/T 1.1—2020，确保符合机械制造标准体系要求，与现行法规、标准保持协调一致。

2 标准主要内容

本文件与现有相关标准相比，首次针对核电厂运维机器人制定安全要求规范，主要技术内容如下：

范围：明确规定了核电厂运维机器人的安全要求，适用于压水堆核电厂运维机器人，其他堆型参照执行。

术语和定义：清晰界定了“核电厂运维机器人”、“控制区”和“冷却剂丧失事故”等术语定义，同时引用 GB/T 4960.5、GB/T 12643 等标准术语。

1) 总体要求

安全原则：根据核电厂运维机器人安全应遵循的原则，提出预防为主、纵深防护、安全可靠的总体要求，与我国核电厂倡导的安全原则保持一致。

安全目标：根据核电厂运维机器人安全需实现的目标，提出人员安全、设备及设施安全、防异物安全的总体目标，与我国核电厂倡导的安全目标保持一致。

安全措施：根据核电厂运维机器人安全需采取的措施，提出管理制度、培训与教育、监测与评估、应急响应与救援的具体举措，与我国核电厂倡导的安全措施保持一致。

2) 安全设计要求

安全设计通则：提出机器人的安全设计通用原则，即风险评估与风险减少。其中风险评估涵盖系统限制、危险识别、风险估计、风险评价，以附录 A 形式给出了具体的指导方法。风险减少可降低风险，提升机器人安全设计水平，以附录 B 形式给出了具体的减少措施。

整机：提出机器人整机设计制造的要求，并在接口设计、故障维修、特殊环境适应、防异物、故障预警、动力丧失、重启等方面提出了进一步的要求，确保机器人整机符合安全设计特性要求。

部件：提出机器人部件结构设计的具体要求，便于洗消去污及狭窄空间作业；要求采用适当的防护装置预防动力传递部件危险；对于末端执行器，要求动力丧失时不应造成危险。

控制系统：总体要求机器人控制系统配备安全功能及配备必要的传感器和监控装置，控制软件需经过验证和确认，并提供操作模式选择、权限控制及追溯分析功能。对于传感器，

要求机器人配备足够类型传感器，实时监测环境参数和设备状态；传感器配置应避免共模故障，并采取适当的防护措施。对于通信，要求稳定可靠，确保数据可以实时传输及机器人精确操控；针对无网络、重屏蔽、强干扰使用环境，要求考虑采用自组网、抗干扰、备用网络等加强设计措施。对于人机交互，要求人机交互界面简洁明了、直观易操作，避免人因失误。对于安全监控，要求能实时监测机器人状态和参数，并能发出报警信号，必要时停止机器人运行。

环境适应性：要求机器人根据使用环境选用适当防护等级及防护措施，针对辐照环境，要求机器人具备良好耐辐照、机械性能，配备辐射监测功能，确保在此场景下长期可靠工作。

故障诊断与应急处置：要求机器人具备故障监测、诊断功能，及时发现并分析、诊断故障性质和严重程度。出现严重故障时，机器人可安全移除且不会造成二次损伤。

3) 安全性能测试

通用安全测试：提出机器人应进行机械结构安全测试、运动安全测试、防护装置安全测试等通用测试，验证满足标准规范、作业工艺、设计指标等要求，以附录 C 形式提出通用安全测试范例。

专用安全测试：专用安全测试分为环境适应性测试、任务匹配性测试、紧急停机与异常工况测试。

环境适应性测试涵盖辐照测试、电磁干扰测试、水下测试。辐照测试验证机器人在预定的剂量率及总剂量指标内稳定、可靠工作，不出现功能失效或指标退化。电磁干扰测试验证机器人在电磁干扰环境下的稳定性和可靠性。水下测试，验证机器人在水下作业环境下的稳定性和可靠性。

任务匹配性测试验证机器人任务匹配性。对于未经充分验证或首次应用的作业工艺，需要在试验装置、模拟体或仿真系统上进行测试，以充分验证任务匹配可行性。对于属核安全相关的作业对象，机器人应进行保护功能测试，确保机器人具备作业对象保护功能。

紧急停机与异常工况测试验证机器人在紧急情况下能正确响应并安全停机，应对异常工况处置时不对作业对象造成安全影响，异常工况消除后能恢复原有功能。对于有安全状态要求的作业对象，机器人在执行紧急停机功能时需将作业对象置于安全状态后才能停止。

4) 安全性能评估

机械系统安全性评估：对机器人进行强度、刚度和稳定性的评估，确保在正常工作及异常情况下，机械系统不会发生破坏或变形。

控制系统安全性评估：对机器人进行控制系统稳定性和可靠性的评估，确保控制系统在面临外部干扰或内部故障时具备应对策略和恢复能力。

传感系统安全性评估：对机器人进行传感系统在辐照、高温、水下等特定环境下的准确性、响应速度与抗干扰性的验证，确保传感系统能够及时准确地感知测量对象变化。

执行系统安全性评估：对机器人进行系统在辐照、高温、水下等特定环境下的性能测试，确保执行系统能够按照控制系统的指令准确快速地做出反应。

能源系统安全性评估：对机器人进行过充、过放、过温、防爆、泄漏检测等保护功能的安全检查，确保机器人长时间工作时保持稳定能源供应。

5) 操作与使用要求

通用要求：应遵守核电厂的安全规定，与核电厂的安全系统实现联动，确保在紧急情况下能够及时响应。应定期进行安全检查和维护，确保安全性能处于最佳状态，并以附录 D 形式给出了机器人安全检查与维护范例。

操作安全规程：提出机器人在运行时应满足启动、运行、停机等流程的安全操作步骤和注意事项以及紧急情况下的应对措施。

人员培训与授权：提出操作人员应接受包括理论学习和实践操作两个方面的培训，以掌握足够的技能和知识。对于特殊作业对象，宜采取授权制度并定期更新和复审。

防异物要求：提出机器人在防异物区作业应制定防异物措施。

数据安全与保密：提出应确保机器人系统和相关数据的安全性，防止泄露。

应急响应：提出机器人应制定完善的应急响应预案，并在应急响应期间保持与电厂安全部门的紧密沟通。

6) 维护与保养要求

维护周期：根据机器人使用频率和运行环境制定合理的维护周期。

维护项目：根据机器人机器人的安全检查结果选择合适的维护项目，包括定期维护与专业维护。

检修流程：应制定包括故障诊断、部件更换、功能测试等环节的检修流程。

检修记录：应详细记录检修过程、更换的部件以及检修后的测试结果。

备件库存：应建立适当的备件库存，库存条件应满足备件存放要求，备件出入库应进行质量检查。

7) 停用与报废要求

总体原则：根据机器人的实际状态启动停用或报废流程，后续存放或拆解回收。

停用标准：明确机器人应考虑停用的三种情况，一是机器人技术性能退化或结构完整性破坏，相关技术指标已不满足机器人最低使用要求。二是机器人辐射安全指标超限。三是机器人使用过程合规性不足。

停用措施：明确机器人停用前准备、安全停用操作和停用后管理的各项具体措施，确保机器人安全停用。

报废标准：明确机器人应考虑报废的三种情况，一是机器人技术性能失效或结构破坏无法修复。二是机器人辐射安全指标严重超限。三是机器人使用不合规。

报废措施：明确机器人报废审批、处置方案制定、实施过程控制和最终验证与记录的各项具体措施，确保机器人安全报废。

存放要求：提出机器人应按存放区域规划要求分区存放、贮存设施标准、堆放规范、存放区与作业区的安全规定及存放期间的监测管理。

拆解回收：提出机器人拆解前准备要求、拆解原则，明确了拆解、回收、废物处置的各项具体措施，确保拆解回收安全可控、合规合法。

3 解决的主要问题

明确安全标准：统一核电厂运维机器人的安全要求，确保行业内的一致性和规范性。有效解决现行标准中相关内容欠缺及核电厂运维机器人安全要求缺乏统一规范的问题，消除各企业在机器人安全设计上存在的个性化差异，大力促进行业标准化进程。

适应技术发展：针对核电厂运维机器人，从安全设计、安全性能测试与评估、操作使用、维护保养、停用与报废等维度提供全寿期的安全要求，能够适应核电厂运维机器人技术发展，确保技术先进性、稳定性和可操作性。

降低安全风险：通过各项安全设计、测试、评估、使用、退役等具体措施，助力核电厂

运维机器人在设计、制造、安装、调试、运行和维护等环节符合核安全要求，降低机器人应用安全风险，提高机器人应用效率，减少因不统一造成的混淆和误操作，切实促进核电厂运维机器人应用推广。

三、主要撰写与修改情况

本标准部分分类方法参考了 GB 11291.1《工业环境用机器人 安全要求 第1部分：机器人》、GB 11291.2《机器人与机器人装备 工业机器人的安全要求 第2部分：机器人系统与集成》、GB/T 15706《机械安全 设计通则 风险评估与风险减小》等实施经验，结合已有的核电运维机器人研发与应用实践，提出了从人、机、料、法、环等维度来考虑安全，且考虑人因失效及机器人失效等因素，形成了以安全原则、风险评估、设计要求、测试要求、评估要求、操作要求、维护要求、报废要求为内涵的机器人安全要求标准，标准既有传统工业机器人安全要求精髓，又充分吸收了核电厂运维机器人领域安全相关的经验反馈。标准相关内容多次征求三大核电集团、核电设计与建造、高校、科研院所、核电运营、核电设备制造厂、制造企业的相关业内专家意见并不断修改完善，充分确保了安全要求的科学性和可操作性。

四、标准中涉及专利的情况 本标准不涉及专利问题。

本标准不涉及专利问题。

五、预期达到的社会效益等情况、对产业发展的作用等情况

本标准在编写过程中，广泛邀请业内从事核电站运维的单位代表和国内核电机机器人研发机构共同参与研究，其中包含国内三大核电集团核电设计、建造与运营企业，核电运维机器人研究高校和科研院所，核电设备制造厂和相关科技企业具有探索精神和丰富实践经验的科研和工程技术人员。通过集合各核电运营机构和机器人研发单位的认识与经验，将分散的知识和经验以规范性的标准形式呈现，制定出一项内容全面、要求规范、举措清晰的核电厂运维机器人安全要求标准，对核电厂运维机器人技术发展起到积极的推动作用。

提升安全规范性、促进行业标准化：统一核电厂运维机器人的安全要求，确保行业内的一致性和规范性，消除各企业在机器人安全设计、制造、测试、评估、运维、退役存在的个性化差异，促进行业标准化进程，促进国际交流。

指导研制应用、促进技术发展：针对核电厂运维机器人，从安全设计、安全性能测试与

评估、操作使用、维护保养、停用与报废等维度提供科学合理的设计方法，为核电厂运维系列机器人的设计优化、加工制造、生产运行及检查维修提供指导依据，促进核电厂运维机器人技术发展，确保技术先进性、稳定性和可操作性。

增强信息协同、降低安全风险：确保运维机器人设计与应用的规范化、统一化、完备化，有助于降低安全风险，助力企业依据标准规范开展核电厂运维机器人研发和生产，避免研发投入重复浪费从而降低企业成本；通过明确核电厂运维机器人的安全要求，助力核电厂运维机器人在设计、制造、安装、调试、运行和维护等环节符合核安全要求，降低机器人应用安全风险，促进核电厂运维机器人应用推广。

六、与国际、国外对比情况

本标准未采用国际标准，制定过程中未查到同类国际、国外标准，安全要求中已充分考虑国内外核电运维机器人产品现状及发展趋势，标准水平为国内先进水平。

七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

与 GB 11291.1、GB 11291.2、GB/T 15706 等现行法律、法规、标准协调一致。

八、重大分歧意见处理经过和依据

无。

九、贯彻标准的要求和措施建议

建议标准批准发布 3 个月后实施，实施前组织检验机构、制造单位、使用单位开展培训，确保标准有效贯彻。

十、其他应予说明的事项

无。

起草工作组 2025 年 9 月 18 日