

T/SAIAS

上海市人工智能行业协会团体标准

T/SAIAS XXXX—2025

人形机器人平均无故障工作时间测试与评 定

Testing and Evaluation of Mean Time Between Failures for Humanoid Robots

(征求意见稿)

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。

2025 - XX - XX 发布

2025 - XX - XX 实施

上海市人工智能行业协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和缩略语	1
3.1 术语和定义	1
3.2 符号和缩略语	2
4 试验样品	3
4.1 样品要求	3
4.2 样品数量	3
5 统计方案	3
5.1 概述	3
5.2 评定指标	3
5.3 定时截尾试验方案	3
5.4 试验时间	4
6 试验条件	4
6.1 概述	4
6.2 环境条件	4
6.3 使用工况	4
6.4 试验方式	8
7 受试样品功能和性能检测	9
7.1 一般要求	9
7.2 检测项目	10
7.3 检测方法及其合格判据	10
8 试验实施	13
9 故障判据、分类、统计原则及故障处理	13
9.1 故障判据	13
9.2 故障分类	14
9.3 故障统计原则	16
9.4 当量故障数的计算	16
9.5 故障处理	16
10 相关试验时间统计原则	17
11 试验的结束	17
11.1 MTBF 评估	17
12 结果报告	18
参考文献	23

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。

本文件由上海市人工智能行业协会提出。

本文件由上海市人工智能行业协会归口。

本文件起草单位：上海机器人产业技术研究院、xxx……

本文件主要起草人：xxx、……

本文件为首次发布。

上海机器人产业技术研究院有限公司

人形机器人平均无故障时间测试与评定

1 范围

本文件适用于人形机器人平均无故障工作时间测试与评定的试验样品、统计方案、试验条件、受试样品功能和性能检测、试验实施、故障判据/分类/统计原则及故障处理、相关试验时间统计、试验的结束和结果报告。

本文件适用于人形机器人和泛（类）人形机器人。

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 12642—2013 工业机器人 性能规范及其试验方法
GB/T 12643—2025 机器人与机器人装备词汇
GB/T 29482.1-2013 工业机械数字控制系统 第1部分：通用技术条件
GB/T 34986-2017 产品加速试验方法
GB/T 35089-2018 机器人用精密齿轮传动装置试验方法
GB/T 38124—2019 服务机器人性能测试方法
GB T 40575-2021 工业机器人能效评估导则
GJB 899A-2009 可靠性鉴定和验收试验
T/CEEIA 650-2022 自动导引车可靠性测试与评定

3 术语、定义和缩略语

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 术语和定义

3.1.1

人形机器人 humanoid robot

具有躯干、头部和部分或全部肢体,外观和动作与人类相似,实现感知、认知、决策、执行等能力的机器人。

[来源: GB/T 12643—2013, 3.17, 有修改]

3.1.2

平均无故障工作时间 (MTBF) mean time between failure

相邻两次故障之间的平均工作时间,它仅适用于可维修产品,为产品在总的使用阶段累计工作时间与故障次数的比值。

[来源: T/CEEIA 650-2022, 3.1.2]

3.1.3

MTBF 检验下限 (θ_1) lower test MTBF (θ_1)

可接收的最低 MTBF 值。若设备的 MTBF 的真值不大于检验下限 θ_1 ,则设备被接收的概率至多为100 β %。产品的 MTBF 检验下限取值等于产品 MTBF 的最低可接受值。

[来源: GJB 899A-2009, 3.3]

3.1.4

MTBF 检验上限 (θ_0) upper test MTBF (θ_0)

若产品的 MTBF 的真值不小于检验上限 θ_0 ，则产品被接收的概率至少为100 (1 - α) %。

[来源: GJB 899A-2009, 3.4]

3.1.5

生产方风险 (α) producer, s risk (α)

MTBF 的真值不小于检验上限 θ_0 时，判定 MTBF 真值小于检验上限 θ_0 的最大概率。

[来源: GJB 899A-2009, 3.6]

3.1.6

使用方风险 (β) consumer, s risk (β)

MTBF 的真值小于检验上限 θ_1 时，判定 MTBF 真值不小于检验上限 θ_0 的最大概率。

[来源: GJB 899A-2009, 3.7]

3.1.7

鉴别比 (d) discrimination ratio (d)

MTBF 检验上限 θ_0 与检验下限 θ_1 的比值。

$$d = \theta_0 / \theta_1$$

[来源: GJB 899A-2009, 3.8]

3.1.8

当量故障数 number of equivalent fault

采用加权计算的故障次数，称为当量故障数。

[来源: GB/T 29482.1-2013, A.2.1.10]

3.2 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

符号/缩略语	描述
MTBF	平均故障间隔时间
θ_1	MTBF 检验下限值
θ_0	MTBF 检验上限值
α	生产方风险
β	使用方风险
D	鉴别比
m	θ_1 的倍数
r	关联故障数
T	累计相关试验时间
t	平均每台受试样品的相关试验时间
n	受试样品数量

M	Coffin-Manson 模型参数
r_D	故障当量数
r_{ij}	第 i 台工业机器人发生的第 j 类关联故障数
ε_j	第 j 类故障的当量故障系数
θ_L	MTBF 的置信下限
C	置信区间的置信度
χ^2	卡方分布

4 试验样品

4.1 样品要求

人形机器人可靠性评定时，应从出厂检验合格的产品中随机抽样型号、规格及配置均相同的同一批次人形机器人作为受试样品。

4.2 样品数量

若无其他规定，每批产品至少应有两台接受试验。推荐的样本大小为每批产品的10%，但最多不超过20台（特殊约定的除外）。

每台受试样品的累计试验时间应不低于全部样品平均试验时间的50%。

注：小批量生产可选择1台样品进行试验。

5 统计方案

5.1 概述

本文件假定人形机器人的故障分布符合指数分布规律。

当发现故障呈现早期高发或逐渐磨损趋势时，可考虑采用其他分布模型或剔除初期故障后重新评估，以确保MTBF评定结果可靠。

5.2 评定指标

在试验前，制定人形机器人的平均故障间隔时间（MTBF） $\geq 1000h$ 。

5.3 定时截尾试验方案

定时截尾试验是在试验期间对受试样品进行连续地或短间隔地监测，直至累计相关试验时间超过预定的相关试验时间（接收）或发生了预定的关联故障数（拒收）。相关试验时间是指与受试样品关联故障数有关的用来验证可靠性要求或计算可靠性特征值的时间。

为了进行MTBF评定，应先确定统计方案。统计方案包括以下5个参数：

- MTBF检验下限值（ θ_1 ）；
- MTBF检验上限值（ θ_0 ）；
- 生产方风险（ α ）；
- 使用方风险（ β ）；
- 鉴别比（ d ）。

根据表1选取的统计方案，可以确定MTBF评定所需要的累计相关试验时间以及对应的关联故障数 r 。

表1 定时截尾试验方案

试验方案序号	方案的特征		累计相关试验时间 (θ_1 的倍数 m)	关联故障数	
	风险标称值/%	鉴别比		拒收数	接收数

	α	β	\cdot		\geq	\leq
1	30	30	3.37	1.20	1	0
2	30	30	2.22	2.44	2	1
3	30	30	2.00	3.70	3	2
4	20	20	7.22	1.61	1	0
5	20	20	3.63	2.99	2	1
6	20	20	3.00	4.30	3	2
7	10	10	21.85	2.30	1	0
8	10	10	7.32	3.89	2	1
9	10	10	4.83	5.32	3	2

注1：应根据产品的重要性和预期可靠性水平选择统计方案。当产品可靠性要求高且试验成本允许时，可选用风险值较低（ α 、 β 较小）的方案；一般情况下可在表1所列方案中平衡试验时间与风险，选择方案4；

注2：表1列举了部分试验方案，其他风险的试验方案依据GJB 899A-2009的附录A选择。

5.4 试验时间

依据表1选取的统计方案可得累计相关试验时间（ T ）是 θ_1 的 m 倍。

平均每台受试样品的相关试验时间（ t ）为累计相关试验时间（ T ）除以受试样品数量（ n ），即 $t = T/n$ 。

在保证试验总时间的前提下，实际单台样品试验持续时间可以作一定的调整。

6 试验条件

6.1 概述

试验条件应模拟实际使用工况和环境条件，应具备以下条件：

- 环境条件包括地面条件、温湿度条件；
- 使用工况应考虑不同应用场景，包括工业制造领域、服务领域、特种领域。

6.2 环境条件

6.2.1 地面条件

需考虑地面起伏程度、路面坡度、台阶高度、沟宽幅度、地面构造。

6.2.2 温湿度条件

试验环境应符合产品的安装使用环境条件，包括气候环境、机械环境、电磁环境等。当无明确要求时，试验环境条件通常应满足以下要求：

- 温度：15℃~55℃；
- 湿度：20%RH~80%RH；
- 气压：86 kPa~106 kPa。

或参考用户手册。

6.3 使用工况

6.3.1 工业制造领域

人形机器人在工业制造领域的使用工况应考虑汽车制造（如表2所示）、3C电子制造（如表3所示）、智慧物流（如表4所示）等场景，其他使用场景机器人的使用工况应参考上述场景制定。

表2 人形机器人在汽车制造场景使用工况

项目	要求
工作任务	根据任务内容（例如：装配底盘、打螺丝、外观检测）制定任务剖面，考虑负载、速度、工作节拍等。
工作时间	后台采集实际工作时间，或记录实际工作时间。
待机时间	尽可能缩短
工作天数	后台采集实际工作时间，或记录实际工作时间。
充电	任务分支，包含在运行时间内

注1：应使试验剖面中不同任务类型与实际工作中所占比例一致
注2：如需移动，应保证机器人在试验场中经历的路面情况、不同种类路面（如地毯、环氧地坪等）上的运行距离所占比例等与实际一致。

表3 人形机器人在3C电子场景使用工况

项目	要求
工作任务	根据任务内容（例如：精密装配与操作、柔性生产线作业、物料搬运与管理、质量检测与维护）制定任务剖面，考虑负载、速度、工作节拍、移动速度、视觉检测、视觉识别、力感知等。
工作时间	后台采集实际工作时间，或记录实际工作时间。
待机时间	尽可能缩短
工作天数	后台采集实际工作时间，或记录实际工作时间。
充电	任务分支，包含在运行时间内

注1：应使试验剖面中不同任务类型与实际工作中所占比例一致
注2：如需移动，应保证机器人在试验场中经历的路面情况、不同种类路面（如地毯、环氧地坪等）上的运行距离所占比例等与实际一致。

表4 人形机器人在智慧物流场景使用工况

项目	要求
任务分配	调度软件随机分配任务，保证单台最短累计相关试验时间不得少于试验制定时间（每台产品的试验时间至少应为所有受试产品平均试验时间的一半）。后台采集实际工作任务数据。
任务内容	根据任务内容（例如：拣选、搬运、人机交互）制定任务剖面，考虑负载、速度、工作节拍、移动速度、视觉检测、视觉识别、语音交互/力感知等。
单台日里程数	后台采集实际工作任务数据。
次数	后台采集实际工作任务数据。
实际运行时间（工作状态）	试验制定时间期望值
待机时间（非工作状态）	尽可能缩短
充电	任务分支，包含在运行时间内
其他	突发干扰，如：人为碰撞、网络中断

注1：应使试验剖面中不同任务类型与实际工作中所占比例一致
注2：如需移动，应保证机器人在试验场中经历的路面情况、不同种类路面（如地毯、环氧地坪等）上的运行距离所占比例等与实际一致。

6.3.2 服务领域

人形机器人在服务领域的使用工况应考虑家庭服务与陪伴（如表5所示）、医疗康复与保健（如表6所示）、教育与科研（如表7所示）、医疗护理（如表8所示）、助老陪护（如表9所示）、餐饮服务（如表10所示）等场景，其他使用场景机器人的使用工况应参考上述场景制定。

表5 人形机器人在家庭服务与陪伴使用工况

项目	要求
工作任务	根据任务内容制定任务剖面，考虑移动能力、导航、避障、语音交互、人脸识别等。
工作时间	后台采集实际工作时间，或记录实际工作时间。
待机时间	尽可能缩短
充电	任务分支，包含在运行时间内
其他	突发干扰，如：人为碰撞、网络中断

注1：应使试验剖面中不同任务类型与实际工作中所占比例一致，充电时间包含在任务剖面中。
注2：如需移动，应保证机器人在试验场中经历的路面情况、不同种类路面（如地毯、环氧地坪等）上的运行距离所占比例等与实际一致。

表6 人形机器人在医疗康复与保健场景使用工况

项目	要求
工作任务	根据任务内容（例如：上肢康复、下肢康复）制定任务剖面。
工作时间	后台采集实际工作时间，或记录实际工作时间。
待机时间	尽可能缩短
充电	任务分支，包含在运行时间内
其他	突发干扰，如：人为碰撞、网络中断

注1：应使试验剖面中不同任务类型与实际工作中所占比例一致，充电时间包含在任务剖面中。
注2：如需移动，应保证机器人在试验场中经历的路面情况、不同种类路面（如地毯、环氧地坪等）上的运行距离所占比例等与实际一致。

表7 人形机器人在教育科研场景使用工况

项目	要求
工作任务	根据任务内容（辅助教学、交流互动）制定任务剖面。
工作时间	后台采集实际工作时间，或记录实际工作时间。
待机时间	尽可能缩短
充电	任务分支，包含在运行时间内
其他	突发干扰，如：人为碰撞、网络中断

注1：应使试验剖面中不同任务类型与实际工作中所占比例一致，充电时间包含在任务剖面中。
注2：如需移动，应保证机器人在试验场中经历的路面情况、不同种类路面（如地毯、环氧地坪等）上的运行距离所占比例等与实际一致。

表8 人形机器人在医疗护理场景使用工况

项目	要求
----	----

工作任务	根据任务内容制定任务剖面，考虑医疗需求、药物管理、紧急处理等。
工作时间	后台采集实际工作时间，或记录实际工作时间。
待机时间	尽可能缩短
充电	任务分支，包含在运行时间内
其他	突发干扰，如：人为碰撞、网络中断
注1：应使试验剖面中不同任务类型与实际工作中所占比例一致，充电时间包含在任务剖面中。 注2：如需移动，应保证机器人在试验场中经历的路面情况、不同种类路面（如地毯、环氧地坪等）上的运行距离所占比例等与实际一致。	

表9 人形机器人在助老陪护场景使用工况

项目	要求
工作任务	根据任务内容制定任务剖面，考虑老年人生活辅助、陪伴互动、监测健康等。
工作时间	后台采集实际工作时间，或记录实际工作时间。
待机时间	尽可能缩短
充电	任务分支，包含在运行时间内
其他	突发干扰，如：人为碰撞、网络中断
注1：应使试验剖面中不同任务类型与实际工作中所占比例一致，充电时间包含在任务剖面中。 注2：如需移动，应保证机器人在试验场中经历的路面情况、不同种类路面（如地毯、环氧地坪等）上的运行距离所占比例等与实际一致。	

表10 人形机器人在餐饮服务场景使用工况

项目	要求
工作任务	根据任务内容制定任务剖面，考虑食品配送、餐桌清理、饮品准备等。
工作时间	后台采集实际工作时间，或记录实际工作时间。
待机时间	尽可能缩短
充电	任务分支，包含在运行时间内
其他	突发干扰，如：人为碰撞、网络中断
注1：应使试验剖面中不同任务类型与实际工作中所占比例一致，充电时间包含在任务剖面中。 注2：如需移动，应保证机器人在试验场中经历的路面情况、不同种类路面（如地毯、环氧地坪等）上的运行距离所占比例等与实际一致。	

6.3.3 特种领域

人形机器人在特种领域的使用工况宜考虑消防救援（如表11所示）、安防巡逻（如表12所示）等场景，其他使用场景机器人的使用工况应参考上述场景制定。

表11 人形机器人在消防救援场景使用工况

项目	要求
工作任务	根据任务内容制定任务剖面，考虑火灾报警、灭火、疏散引导、救援等。
工作时间	后台采集实际工作时间，或记录实际工作时间。
待机时间	尽可能缩短

充电	任务分支, 包含在运行时间内
其他	突发干扰, 如: 人为碰撞、网络中断

注1: 应使试验剖面中不同任务类型与实际工作中所占比例一致, 充电时间包含在任务剖面中。
注2: 如需移动, 应保证机器人在试验场中经历的路面情况、不同种类路面(如地毯、环氧地坪等)上的运行距离所占比例等与实际一致。

表12 人形机器人在安防巡逻场景使用工况

项目	要求
工作任务	根据任务内容制定任务剖面, 考虑巡逻路线、视频监控、异常报警等。
工作时间	后台采集实际工作时间, 或记录实际工作时间。
待机时间	尽可能缩短
充电	任务分支, 包含在运行时间内
其他	突发干扰, 如: 人为碰撞、网络中断

注1: 应使试验剖面中不同任务类型与实际工作中所占比例一致, 充电时间包含在任务剖面中。
注2: 如需移动, 应保证机器人在试验场中经历的路面情况、不同种类路面(如地毯、环氧地坪等)上的运行距离所占比例等与实际一致。

6.4 试验方式

6.4.1 概述

试验条件可以采用实际使用条件或加速试验条件, 加速试验条件应考虑温度应力、湿度应力、振动应力对产品的影响。所有加速试验条件应根据6.2的环境条件和6.3的使用工况进行加速。

6.4.2 环境加速方法

6.4.2.1 温度应力

温度应力的加速模型采用阿伦尼斯(Arrhenius), 加速因子 AF_1 公式如公式(1):

$$AF_1 = e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right]} \dots \dots \dots (1)$$

公式中参数如下:

AF_1 ——不同温度下的加速因子;

E_a ——激活能, 单位为电子伏特(eV), 依据GB/T 34986-2017附录D计算, 推荐取0.7;

k_B ——玻尔兹曼常数(8.617385×10⁻⁵ Ev/K);

T_{use} ——使用环境下的绝对温度, 单位为开尔文(K);

T_{test} ——试验环境下的绝对温度, 单位为开尔文(K)。

温度循环加速模型建议采用Coffin-Manson模型, 加速因子计算公式如公式(2)所示:

$$AF_2 = \frac{N_{use}}{N_{test}} = \left(\frac{\Delta T_{test}}{\Delta T_{use}} \right)^M \dots \dots \dots (2)$$

式中:

AF_2 ——温循应力下的加速因子;

N_{use} ——使用条件下的温度循环数;

N_{test} ——试验条件下的循环数;

ΔT_{use} ——使用条件下的平均温差;

ΔT_{test} ——环境箱温度循环试验温差；

M ——模型参数，一般取2.5，若取其他值，在报告中注明；
一般情况下，温变速率不高于5 °C/min。

6.4.2.2 湿度应力

试验循环期间对湿度一般不加控制，只在需要时（如实际使用时有冷凝、结霜或结冰等情况）才在试验循环的适当阶段喷入水蒸气，以模拟使用中经历的环境条件。

6.4.2.3 振动应力

振动试验加速模型采用逆幂律模型，加速因子计算公式如公式（3）所示：

$$AF_3 = \frac{t_{test}}{t_{use}} = \left(\frac{W_{use}}{W_{test}} \right)^b \dots\dots\dots (3)$$

式中：

AF_3 ——振动应力下的加速因子；

t_{use} ——使用条件下振动时间；

t_{test} ——试验条件下振动时间；

W_{use} ——使用条件下的功率谱密度；

W_{test} ——试验条件下的功率谱密度；

b ——模型参数，一般随机振动取4，正选振动取6，若取其他值，在报告中注明。

6.4.3 机械部件加速方法

6.4.3.1 减速器加速方法

减速器加速模型依据GB/T 35089-2018，如公式（4）所示：

$$AF_4 = \frac{N_{m2}}{N_{m1}} \times \left(\frac{T_{m2}}{T_{m1}} \right)^e \dots\dots\dots (4)$$

AF_4 ——加速因子；

N_{m1} ——基准程序下的平均转速；

T_{m1} ——基准程序下的平均扭矩；

N_{m2} ——加速程序下的平均转速；

T_{m2} ——加速程序下的平均扭矩；

e ——寿命指数。对摆线类减速器偏心轴滚子轴承， $e=10/3$ ；对谐波减速器柔性（球轴承）， $e=3$ 。

6.4.3.2 运动加速

分析人形机器人的动作序列，通过增加应力施加的频次和时间的方法来进行加速。

7 受试样品功能和性能检测

7.1 一般要求

试验前中后对所有待测样品进行外观、功能和性能检查，外观和功能为必检测项目，性能根据产品功能和使用场景选择合适的项目进行测试。

7.2 检测项目

检测项目包括：

- a) 外观检查；
- b) 功能检查；
- c) 性能检测。

性能检测项目包括（适用时）：

- a) 行走性能：
 - 1) 行走速度；
 - 2) 关节活动范围；
 - 3) 运动稳定性；
 - 4) 地形适应能力；
- b) 控制性能：
 - 1) 导航能力；
 - 2) 目标定位；
 - 3) 避障能力；
 - 4) 任务执行能力；
- c) 操作能力：
 - 1) 手臂负载能力；
 - 2) 手指能力；
 - 3) 上肢精度；
- d) 续航性能：
 - 1) 满电后持续工作时间；
 - 2) 充电时间；
- e) 感知与交互：
 - 1) 语音交互；
 - 2) 人脸识别。
- f) 工作能耗。

7.3 检测方法及其合格判据

7.3.1 外观检查

试验方法：目视检查。

合格判据应符合以下要求：

- a) 表面不应有明显的凹痕、划伤、裂缝、变形和污渍；
- b) 表面应色泽均匀，不应有起泡、龟裂、脱落和磨损现象；
- c) 金属零部件不应有锈蚀。

7.3.2 功能检查

试验方法：按照产品手册或者说明书操作机器人。

合格判据：应符合产品手册或说明书的要求。

7.3.3 性能检测

7.3.3.1 行走速度

试验方法：

- a) 选取测试区域长度为不小于5米，宽度要保证机器人能够正常行走；
- b) 将机器人放置在初始位置；
- c) 机器人从初始位置开始加速，以便在起始线前达到额定速度；
- d) 测量机器人在同一位置通过速度测试区域的时间 t ；
- e) 机器人通过终止线后减速至停止；

f) 按照公式(5)计算额定速度。
合格判据：应符合产品手册或说明书的要求。

$$v=s/t \dots\dots\dots (5)$$

式中：

v——速度，单位为米每秒(m/s)；

s——距离，单位为米(m)；

t——时间，单位为秒(s)。

7.3.3.2 关节活动范围

试验方法：按照产品手册要求手动和自动控制运行机器人的每个关节，观察记录其活动范围；
合格判据：应符合产品手册或说明书的要求。

7.3.3.3 运动稳定性

试验方法：

- a) 根据实际应用场景选择测试地面，测试地面应考虑地面类型、地面起伏、坡度、沟坎、台阶等；
- b) 测试区域长度至少为5m宽度至少为3m；
- c) 机器人按照说明书做好导航准备（建图等）后到达起点位置；
- d) 按照表13的要求运动直至停止。

表13 机器人运行状态要求

机器人行走方式
启动—匀速行走—避障/停止—继续行走—90°转弯—继续行走—越障—继续行走—停止
注1：越障障碍物根据机器人应用场景和制造商要求选择GB/T 38124—2019表3的障碍物，障碍物高度根据制造商声明的越障能力选择； 注2：除90°转弯外，其他运动为直线运行。

合格判据：机器人能正常行走，不应出现倾倒、报错等异常。

7.3.3.4 地形适应能力

试验方法：

- a) 根据实际应用场景选择测试地面，测试地面应考虑地面类型、地面起伏、坡度、沟坎、台阶等；
- b) 测试区域长度至少为5m宽度至少为3m；
- c) 机器人按照说明书做好导航准备（建图等）后进行到达起点位置；
- d) 根据机器人实际应用场景进行运动。

合格判据：机器人能正常运动，不应出现倾倒、报错等异常。

7.3.3.5 导航能力

试验方法：按照GB/T 38124—2019中5.2.2的方法试验。

合格判据：符合用户手册要求。

7.3.3.6 目标定位

试验方法：按照GB/T 38124—2019中5.2.1的方法试验。

合格判据：符合用户手册要求。

7.3.3.7 避障能力

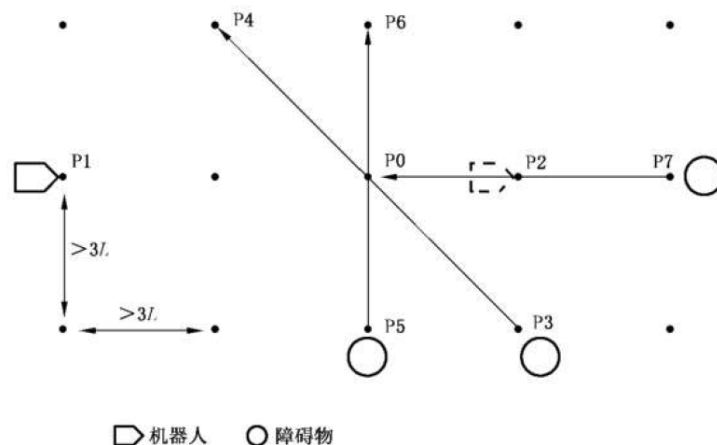
试验方法：

- a) 机器人运行到P1点；
- b) 按表14测试配置，分别使机器人自动模式下到达位置P2，如图1所示；

- c) 测试配置5~10测试中可以沿着直线路径调整障碍物的初始位置，确保障碍物和机器人同时到达P0；
- d) 当机器人到达目标位置P2时应当停止；
- e) 每种配置连续测试3次。

表14 避障障碍物及机器人运动要求

测试配置	使用障碍物	障碍物位置或移动路线	障碍物移动速度 m/s	机器人移动路线
1	桌子	P0	0	P1 到 P2
2	长形障碍物	P0	0	P1 到 P2
3	人	P0	0	P1 到 P2
4	人	P3 到 P4	1.6	P1 到 P2
5	人	P5 到 P6	1.6	P1 到 P2
6	人	P7 到 P0	1.6	P1 到 P2



注：L为1m。

图1 避障测试布局

合格判据：

- a) 机器人运动过程中不能碰到障碍物；
- b) 当机器人的可行驶道路被障碍物部分阻挡时，机器人应规划绕行道路继续行走；
- c) 当机器人的可行驶道路被障碍物完全阻挡时，机器人应停止运动并原地等待，如果在机器人系统规定时间内障碍物移走，机器人应能继续行走；如超过机器人系统设定时间障碍物仍未移除，机器人应采取措施通知工作人员处理，例如：发出警报信息至测试中心。

7.3.3.8 任务执行能力

试验方法：按照机器人产品手册执行相应的任务，观察记录机器人完成情况；

合格判据：应符合产品手册要求。

7.3.3.9 手臂能力

试验方法：按照GB/T 38124—2019中5.3.2的方法试验。

合格判据：符合用户手册要求。

7.3.3.10 手指能力

试验方法：按照GB/T 38124—2019中5.3.1的方法试验。

合格判据：符合用户手册要求。

7.3.3.11 上肢精度

试验方法：用于工业场景的机器人按照GB/T 12642—2013的方法根据使用工况选择合适的项目测试。

合格判据：符合用户手册要求。

7.3.3.12 满电后持续工作时间

试验方法：

- a) 机器人充满电后，按照说明书开启机器人，使机器人全部软件处于运行状态，运动部件按照说明书要求工作；
- b) 直到机器人自动停止或不能重新启动，或者已经在寻找充电座或发出充电警告，以记录的开始时间和结束时间计算出整个操作时间；
- c) 以上步骤重复3次，计算平均工作时间。

合格判据：符合用户手册要求。

7.3.3.13 充电时间

试验方法：按照GB/T 38124—2019中5.4.2的方法试验。

合格判据：符合用户手册要求。

7.3.3.14 语音交互

试验方法：按照GB/T 38124—2019中5.6的方法试验。

合格判据：符合用户手册要求。

7.3.3.15 人脸识别

试验方法：按照GB/T 38124—2019中5.7的方法试验。

合格判据：符合用户手册要求。

7.3.3.16 工作能耗

试验方法：按照GB/T 40575-2021的方法试验。

合格判据：符合用户手册要求。

8 试验实施

人形机器人的可靠性试验按照以下步骤进行：

- a) 按照第7章进行受试样品的的外观、功能和性能检测，检测结果应符合第7章要求；
- b) 按照第6章确定的试验条件和使用工况进行测试；
- c) 试验过程中定期对样品的外观、功能和性能进行检测，检测时间间隔可根据试验实际情况自行设定，建议单台样品的检测次数不少于5次（含首末次检测）；

试验过程中应记录以下信息：

- a) 样品每天的运行信息；
- b) 故障信息；
- c) 试验前、中、后外观、功能检查和性能检测的结果。

9 故障判据、分类、统计原则及故障处理

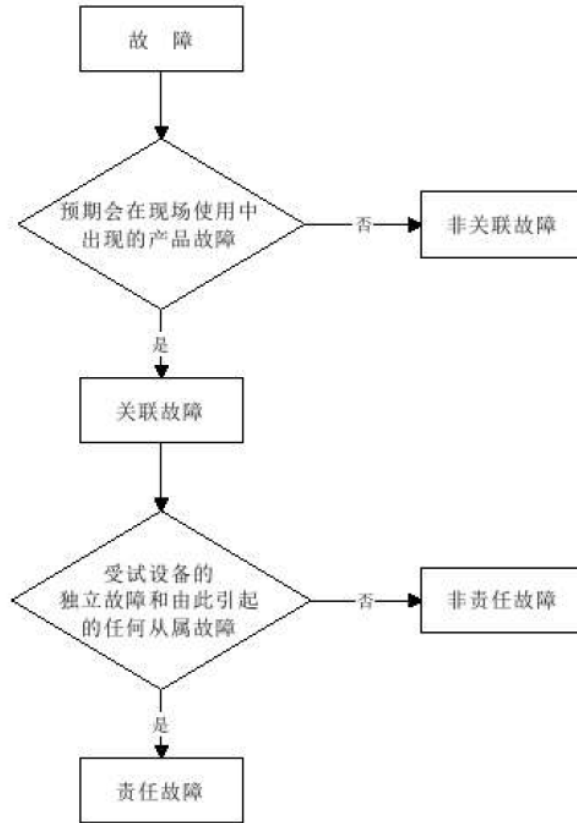
9.1 故障判据

在试验过程中，出现下列任何一种状态时，应判定受试产品出现故障：

- a) 受试产品不能工作或部分功能丧失；
- b) 受试产品参数检测结果超出规范允许范围；
- c) 受试产品的机械、结构部件或元器件发生松动、破裂、断裂或损坏。。

9.2 故障分类

故障分为关联故障和非关联故障。关联故障应进一步分为责任故障和非责任故障。只有责任故障才是用于可靠性验证试验统计的故障，如图2所示。



9.2.1 责任故障

在解释试验或运行结果或者计算可靠性量值时必须计入的故障。

在测试过程中，下列故障可判为关联故障：

- 设计缺陷或制造工艺缺陷造成的故障；
- 元器件缺陷造成的故障；
- 由于软件造成的故障；
- 间歇故障；
- 无法证实原因的异常。

9.2.2 非责任故障

在解释试验或运行结果或者计算可靠性量值时应予排除的故障。

在测试过程中，下列故障可判为非关联故障：

- 误操作引起的受试产品故障；
- 试验设施及测试仪表故障引起的受试产品故障；
- 超出设备工作极限的环境和工作条件引起的受试产品故障；
- 修复过程中引入的故障；
- 将有寿器件超期使用，使得该器件产生故障及其引发的从属故障。

9.2.3 故障危害程度

按故障性质及危害程度，将故障分为四类，其分类原则如表15所示。

表15 故障危害程度分类

故障类别		故障分类原则	当量故障系数 ϵ
1	致命故障	危及使用安全，导致人身伤亡，引起产品的报废，造成重大损失	10
2	严重故障	主要零件、元器件损坏，丧失产品功能	1
3	一般故障	一般零件、元器件损坏	0.5
4	轻微故障	与产品的性能无关或影响较小	0.2

注1：零件是指用来装配成机器人的单个制件，元器件是指电子器件。
 注2：当量故障系数参考了行业可靠性规范T/CEEIA 650-2022、GB/T 29482.1-2013。
 注3：当量故障系数的确定应考虑维修时间和成本。

若受试样品出现致命故障(危及安全或设备报废)，应立即判定试验结果不合格并终止可靠性试验。

9.2.4 典型责任故障

典型责任故障如表16所示。

表16 典型故障表

序号	系统名称	故障名称
1	控制系统	姿态控制失效
2		步态规划异常
3		平衡控制功能失效
4		多关节协调控制故障
5	感知系统	摄像头图像丢失或模糊
6		麦克风接收异常或无响应
7		激光雷达或超声波传感器故障
8		触觉传感器失效
9	电源系统	电池续航时间严重下降
10		电池充电异常（无法充满或无法启动）
11		供电中断或电压不稳定
12		低电量状态识别异常
13	驱动系统	关节电机卡滞或异常抖动
14		某肢体关节无法响应控制指令
15		行走/奔跑过程中异常声响
16		关节转速或扭矩异常
17	通信系统	控制指令丢失或响应延迟
18		与远程控制终端通信中断
19	人机交互系统	语音识别功能故障
20		显示界面黑屏或点击无响应

21		面部识别失败或误识别
22	安全系统	跌倒检测失效
23		急停按钮失效
24		防撞机制触发无反应
25		过载或过热保护功能异常
26		动作边界异常检测功能失效
27		室内导航地图丢失或载入失败
28	导航系统	定位偏差严重
29		路径规划失败
30		环境变化适应能力下降
31	其他	不能原因的停止复位后可正常操作
32		神经网络决策失误任务失败

9.3 故障统计原则

故障可参照以下原则进行统计：

- 当可证实多种故障模式由同一原因引起时，整个事件计为一次故障；
- 有多个元器件在试验过程中同时失效时，在不能证明是一个元器件失效引起了另一些失效时，每个元器件的失效计为一次独立的故障；若可证明是一个元器件的失效引起的另一些失效时，则所有元器件的失效合计为一次故障；
- 可证实是由于同一原因引起的间歇故障，若经分析确认采取纠正措施经验证有效后将不再发生，则多次故障合计为一次故障；
- 多次发生在相同部位、相同性质、相同原因的故障，若经分析确认采取纠正措施经验证有效后将不再发生，则多次故障合计为一次故障；
- 已经报告过的由同一故障原因引起的故障，由于未能真正排除而再次出现时，应和原来报告过的故障合计为一次故障；
- 在故障检测和修理期间，若发现受试产品中还存在其他故障而不能确定为是由原有故障引起的，则应将其视为单独的责任故障进行统计。

9.4 当量故障数的计算

累积当量故障总数的计算见公式（6）。

$$r = \sum_{j=1}^4 r_j \varepsilon_j \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- r ——累积当量故障数,作为试验评定的关联故障数；
- r_j ——试验期内受试样品第 j 类关联故障数；
- ε_j ——试验期内受试样品第 j 类当量故障系数。

9.5 故障处理

在可靠性试验中出现故障时，故障处理应按下述试验程序的规定进行：

- 附录A中表及时填写故障报告；
- 在故障处理过程中，更换所有故障的零部件，其中包括由其它零部件故障引起应力超出允许额定值的零部件，但不能更换性能虽已恶化但未超出允许容限的零部件；

- c) 经修理恢复到可工作状态的受试样品，在证实其修理有效后，并经确认后可重新投入试验；
- d) 如果受试样品的故障为元器件故障，试验后应对故障元器件进行失效分析，找出元器件失效机理，并落实纠正措施，为故障归零提供支持。

10 相关试验时间统计原则

样品的相关试验时间是指样品正常运行的时间之和。

当试验中测试发现某个样品故障时，该样品的相关试验时间应为截至上次对应检测时间为止的试验时间，该故障样品上次对应检测时间至本次检测发现故障期间的试验时间为无效时间。各样品的相关试验时间应为其相关试验时间减去无效试验时间，各个样品的相关试验时间之和为总累积相关试验时间。

11 试验的结束

当试验过程中出现的关联故障数超出统计方案规定的接收故障数时，即可做出拒收判决，此次可靠性评定试验结束。

当累计相关试验时间达到统计方案中规定的试验时间，且受试产品发生的关联故障数小于统计方案规定的拒收故障数时，即可做出接收判决，正常结束可靠性评定试验。只要有一台产品的累计试验时间少于全部受试产品平均试验时间的一半则不应作出合格判决。

11.1 MTBF 评估

11.1.1 接收判决条件下的单边下限估计

接收判决下的MTBF的置信下限估计按照按公式 (5) 计算：

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2_{1-C}(2r+2)} \dots\dots\dots (5)$$

- θ_L ——MTBF的置信下限；
- T ——累计相关试验时间；
- r ——试验过程中的关联故障数；
- C ——置信区间的置信度， $C=1-\beta$ ；
- $\chi^2_{1-C}(2r+2)$ ——自由度为 $2r+2$ 的 χ^2 分布的 $(1-C)$ 上侧分位数，可查 χ^2 分布表获得；

11.1.2 拒收判决条件下的单边下限估计

拒收判决下的MTBF单边下限估计按公式 (6) 计算：

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2_{1-C}(2r)} \dots\dots\dots (6)$$

- θ_L ——MTBF的置信下限；
- T ——累计相关试验时间；
- r ——试验过程中的关联故障数；
- C ——置信区间的置信度， $C=1-\beta$ ；
- $\chi^2_{1-C}(2r)$ ——自由度为 $2r$ 的 χ^2 分布的 $(1-C)$ 上侧分位数，可查 χ^2 分布表获得；

11.1.3 区间估计

MTBF 置信区间计算公式如式 (10)、式 (11) 所示，可靠性报告宜以单侧下限置信区间进行描述。

$$\theta_L = \hat{\theta}C_L \dots\dots\dots (10)$$

$$\theta_U = \hat{\theta}C_U \dots\dots\dots (11)$$

式中:

- θ_L ——MTBF的单侧置信下限;
- θ_u ——MTBF的单侧置信上限;
- θ ——工业机器人平均无故障工作时间 MTBF 点估计值;
- C_L ——定时截尾MTBF的置信下限系数 (见表2);
- C_U ——定时截尾MTBF的置信下限系数 (见表2)。

12 结果报告

试验结果的报告包括但不限于以下内容:

- a) 试验目的;
- b) 试验依据;
- c) 试验样品说明 (注明关键零部件, 至少包括电机、减速器、控制柜、示教器);
- d) 试验统计方案;
- e) 试验条件说明;
- f) 试验过程描述;
- g) 试验中发生的故障次数、故障分类及故障处理情况;
- h) 可靠性评定结论。

上海机器人产业技术研究院有限公司

附录 A

(资料性)

试验记录

A.1 试验时间及记录

在MTBF评定试验过程中应严格记录样品试验时间,及时进行汇总计算,确保相关试验时间达到规定要求,MTBF评定试验时间记录表见表A.1。

在MTBF评定试验中,试验分成多个周期进行,在长期正常运行过程中,应每隔1个周期记录1次试验时间,如试验过程中发生停机事件(无论是样品故障导致还是其他因素导致)则应及时记录在表A.1中。

A.2 故障记录

A.2.1 故障情况记录

故障情况记录由试验人员填写,可参考表A.2格式,包括以下四点:

- a) 故障记录包括:故障发生日期和时间,试验样品的顺序号,故障时的工作条件和环境条件,单项试验时间和/或累积试验时间,故障发生情况和故障现象说明,试验人员姓名;
- b) 故障的性质;
- c) 产品性能的故障特征,例如:故障参数的实测值和该项参数的最低要求值等;
- d) 故障判定依据。

A.2.2 故障维修记录

故障维修记录由维修人员填写,包括以下三点:

- a) 故障核实,包括:使用的仪器仪表和方案,观察结果及说明;
- b) 维修说明,包括:采取的措施,维修过程中样品的工作时间,维修日期、时间及维修持续时间,维修人员姓名;
- c) 被更换的零部件说明,包括:名称、型号,所在位置,供货单位,故障的主要特征和确定故障时所采用的试验,故障原因和分类意见,维修中所采取的措施。

A.2.3 故障分析记录

故障分析记录由故障分析人员填写 MTBF 评定试验故障分析及纠正措施记录表,可参考表 A.3 格式,包括以下三点:

- a) MTBF 评定试验故障分析基本信息:目视和初始测量情况、分析日期、分析所用设备、故障分类和分析人员姓名等;
- b) 引起故障原因的分析;
- c) 故障的分析意见及纠正措施的建议。

表A.1 MTBF评定试验时间记录表

设备名称		设备型号						
设备编号		制造商						
日期	开始工作时刻	结束工作时刻	单次时间(h)	故障名称	故障停机时间(h)	有效时间(h)	记录人	校核人
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
__月__日	__点__分	__点__分						
使用记录核实意见:					制造商:			
					日期: __年__月__日			
					试验方:			
					日期: __年__月__日			

上海机器人产业技术研究院有限公司

表A. 2 MTBF评定试验故障记录表

设备名称		设备型号	
制造商		故障时刻	___年___月___日___时___分
故障时机	相关试验时间：___小时___分； 累计相关试验时间：___小时___分。		
故障时 试验应力	温度：___℃；湿度：___%；振动：___g ² /Hz； 电应力：直流___伏；交流___伏。		
故障现象：			
故障判定依据：			
注：故障是否首次发生？ <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否			
记录人签名： 日期：___年___月___日			
现场处理方法： <input type="checkbox"/> 停机排故 <input type="checkbox"/> 更换样品 <input type="checkbox"/> 继续观察试验中断时间：___小时___分。			
记录人签名： 日期：___年___月___日			
校核人签名： 日期：___年___月___日			
故障核实及初步分析意见：			制造商：
			日期：___年___月___日
			试验方：
			日期：___年___月___日

表A. 3 MTBF评定试验故障分析及纠正措施记录表

故障产品名称		故障产品型号	
故障件名称		故障件型号	
故障件批次号		制造商	
分析日期	__年__月__日	故障分类	<input type="checkbox"/> 关联故障 <input type="checkbox"/> 非关联故障
分析所用设备			
目视和初始测量情况			
故障原因分析及纠正措施建议（需要时另加附页）			
分析人签名：			
纠正措施			
纠正措施制定人签名：			
制造商意见			
签名：_____ 日期：____年__月__日			
实施人签名：完成日期：____年__月__日			
验证方法及纠正效果			
签名：_____ 日期：____年__月__日			
遗留问题及处理意见			
制造商技术主管：_____ 制造商质量主管：_____ 试验方：_____			

参 考 文 献

- [1] GB/T 42982-2023 工业机器人平均无故障工作时间计算方法
- [2] T/CEEIA 558-2021 工业机器人可靠性测试与评定
- [3] GB/T 35089-2018 机器人用精密齿轮传动装置 试验方法
- [4] 可靠性与寿命试验

上海机器人产业技术研究院有限公司