

2022 版 中国机器人 可靠性信息报告

国家机器人检测与评定中心（总部）
上海机器人研发与转化功能型平台

2022 年 9 月

目 录

前 言.....	1
1 机器人可靠性指标.....	2
2 机器人可靠性技术及标准.....	4
3 机器人可靠性测评机构.....	16
4 机器人可靠性水平.....	19
4.1 工业机器人可靠性水平.....	19
4.2 AGV/AMR 可靠性水平.....	20
4.3 服务机器人可靠性水平.....	21
5 机器人典型故障信息.....	22
5.1 工业机器人典型故障信息.....	22
5.1.1 整机典型故障信息.....	22
5.1.2 工业机器人零部件典型故障信息.....	26
5.2 AGV/AMR 典型故障信息.....	32
5.3 服务机器人典型故障信息.....	34
6 机器人全寿命周期可靠性技术.....	35
7 结语.....	37

前 言

机器人被誉为“制造业皇冠顶端的明珠”，其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志，机器人是改善人类生活方式的重要切入点，对于经济发展和社会民生具有重要意义，机器人产业已成为全球关注重点。

机器人作为自动化技术高度发展的产物，具有以下特点：1) 设计结构复杂：例如工业机器人由控制器、减速器、伺服系统等构成，融合了电子系统和精密机械零部件，对可靠性水平的提升提出了挑战；2) 使用场景复杂：机器人根据其设计特点，使用场景可能包括室内或室外，移动类型的机器人还会受到各种复杂路面的影响；3) 失效影响大：特别是工业领域的机器人已经是整个生产线的重要环节，一般是多个机器人协同作业，一旦功能丧失或性能偏差会造成产线无法正常进行，甚至存在安全隐患。因此基于机器人的设计结构、使用场景、使用工况，研究机器人的可靠性技术，并对机器人可靠性水平进行评价至关重要。在“十四五”机器人产业发展规划中也将机器人安全性与可靠性技术作为机器人核心技术攻关行动之一。可见随着我国机器人产业的发展，全社会和整个行业越来越重视机器人的可靠性。

1 机器人可靠性指标

机器人可靠性是指机器人在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。

从机器人的角度考虑，涉及到的可靠性指标如图 1 所示。其中平均故障间隔时间（MTBF）和使用寿命分别从产品的运行稳定性和耐久性进行考核，是目前机器人行业使用最多的两个指标。在产品寿命分布已知的情况下，任务可靠度、累积失效概率、失效率可以由平均故障间隔时间计算得到。具体来说，机器人可靠性指标的取值，要根据它的特性、复杂程度及使用特点来确定。

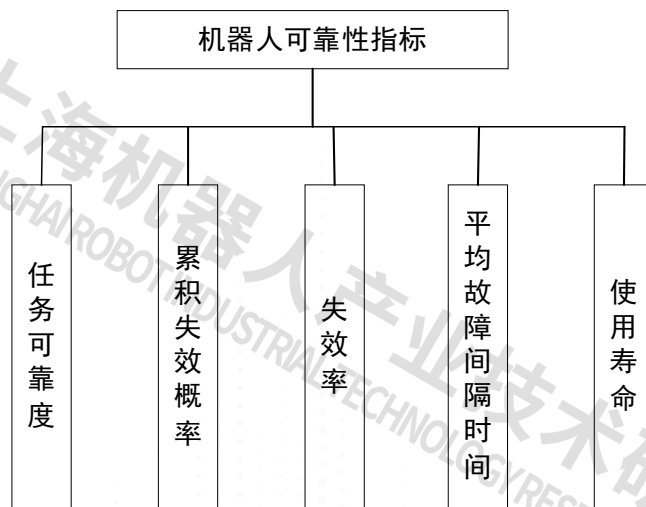


图 1 机器人可靠性指标

（1）平均故障间隔时间（MTBF）

平均故障间隔时间是产品在相邻两次故障之间的平均工作时间，它是可修复产品的一种基本可靠性参数。

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{r_n}$$

式中： t_i —在规定的时间内，每个产品的累积工作时间；

r_n —产品在工作时间内出现的故障总数。

在论证提出 MTBF 指标时，应明确指标的统计含义，说明该指标是均值还是用置信下限等。

（2）使用寿命

产品使用到无论从技术上还是经济上考虑都不宜再使用，而必须翻修或报废时的寿命单位数。



2 机器人可靠性技术及标准

作为指导机器人可靠性测评的依据，可靠性标准属于机器人标准体系框架中性能规范，是机器人标准体系的重要组成部分（如图 2）。

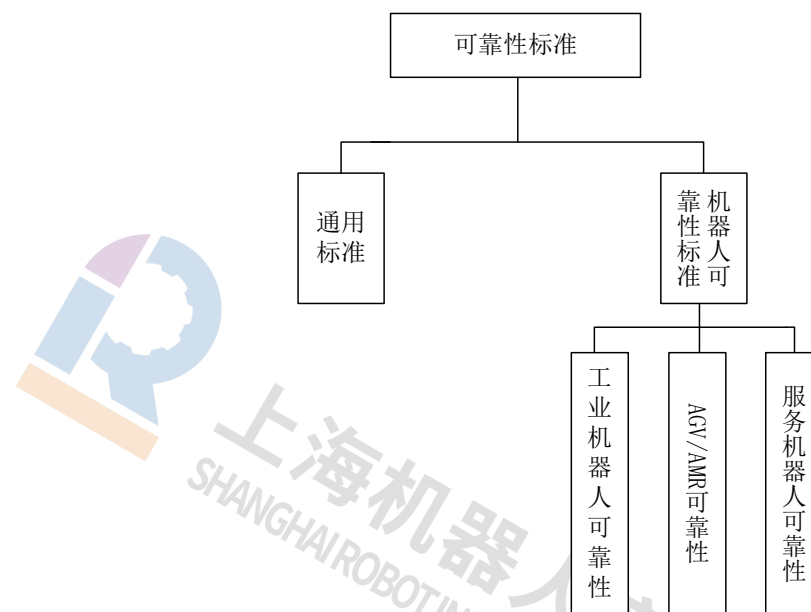


图 2 机器人可靠性标准体系

目前关于机器人可靠性的标准有工业机器人整机可靠性标准、工业机器人零部件可靠性标准、AGV/AMR 可靠性标准、服务机器人可靠性标准等。

（1）工业机器人整机

之前，行业没有关于工业机器人 MTBF 测评的标准，企业没有 MTBF 测评的标准依据，随着 GB/T 39590.1-2020、20203803-T-604、T/CEEIA 558-2021 等标准的推进，工业机器人 MTBF 测评有了标准依据。

目前关于工业机器人可靠性测评主要有两种方式，一种是现场统计的方式，该方式需要的样品量大、统计的时间较长，另一种是试验场试验的方式，通常采用加速试验，通过失效机理模型进行加速试验条件的计算，能够缩短试验时间，提高试验效率，快速地进行工业机器人可靠性评定。

工业机器人整机可靠性相关标准如表 1 所示。

表 1 工业机器人整机可靠性相关标准

序号	标准编号及名称	标准状态
1	GB/T 39590.1-2020 机器人可靠性 第 1 部分：通用导则	已发布
2	GB/T 39266-2020 工业机器人机械环境可靠性要求和测试方法	已发布
3	20203803-T-604 工业机器人平均无故障工作时间计算方法	正在审查
4	T/CEEIA 558-2021 工业机器人可靠性测试与评定	已发布
5	T/CEEIA 593-2022 工业机器人耐久性测试方法	已发布
6	T/GDEIIA 4-2020 工业机器人可靠性指标评价方法	已发布
7	T/GDEIIA 3-2020 工业机器人可靠性通用要求	已发布
8	T/FSAS 23-2018 工业机器人可靠性评定	已发布
9	20203801-T-604 工业机器人 运行维护 第 1 部分：在线监测	正在审查
10	20203797-T-604 工业机器人 运行维护 第 2 部分：故障诊断	正在审查
11	20203705-T-604 工业机器人 运行维护 第 3 部分：健康评估	正在审查
12	20203710-T-604 工业机器人 运行维护 第 4 部分：预测性维护	正在审查

(2) 控制器

机器人控制器的可靠性分为硬件和软件两方面，硬件可靠性和软件可靠性对机器人的稳定运行都十分重要。

为了确保机器人控制器的硬件可靠性，利用图 3 所示的技术路线，针对机器人控制器硬件可靠性提升面临的瓶颈，研究高可靠性设计保证技术，定量评估产品研发阶段的可靠性，找出产品的薄弱环节，提高工业机器人控制器的可靠性水平。

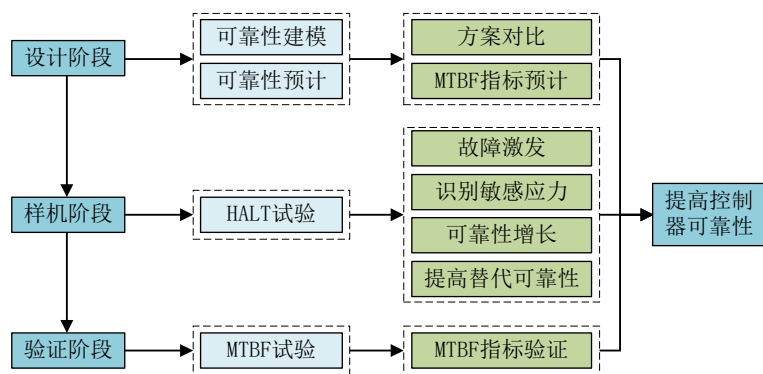


图 3 工业机器人控制器硬件可靠性提升技术

针对机器人控制器硬件设计缺陷不易发现的难题，研究故障激发与快速提升技术，通过施加步进应力激发产品的潜在缺陷，并研究控制器可靠性指标加速验证及增长技术，工业机器人的控制器进行 MTBF 的快速验证，对故障进行分析提出改进措施，使产品的可靠性水平得到快速提升，如图 4 所示。控制器部件可靠性强化试验有可能导致例如冷热变化导致电连接器接触不良、电连接件由于振动导致的接插件松动或脱落的典型故障。

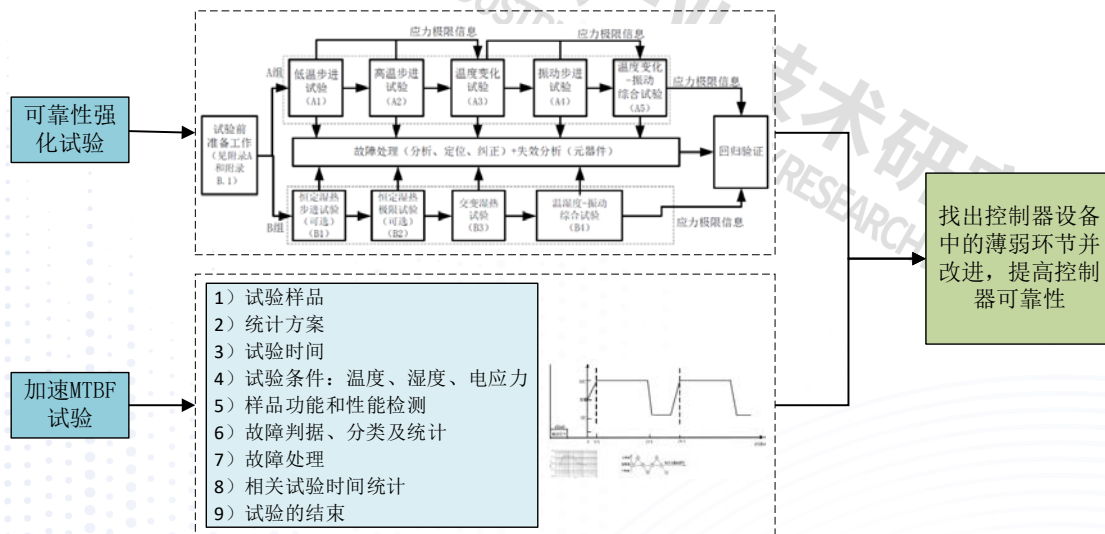


图 4 工业机器人控制器硬件可靠性提升方法

基于机器人控制器软件可靠性测评缺乏依据的问题，研究控制器软件质量评价和软件安全测试技术，从控制器的功能性、兼容性、静态分析、单元测试、代码漏洞扫描等方面对控制器的软件可靠性进行测试和评价，如图 5 所示。

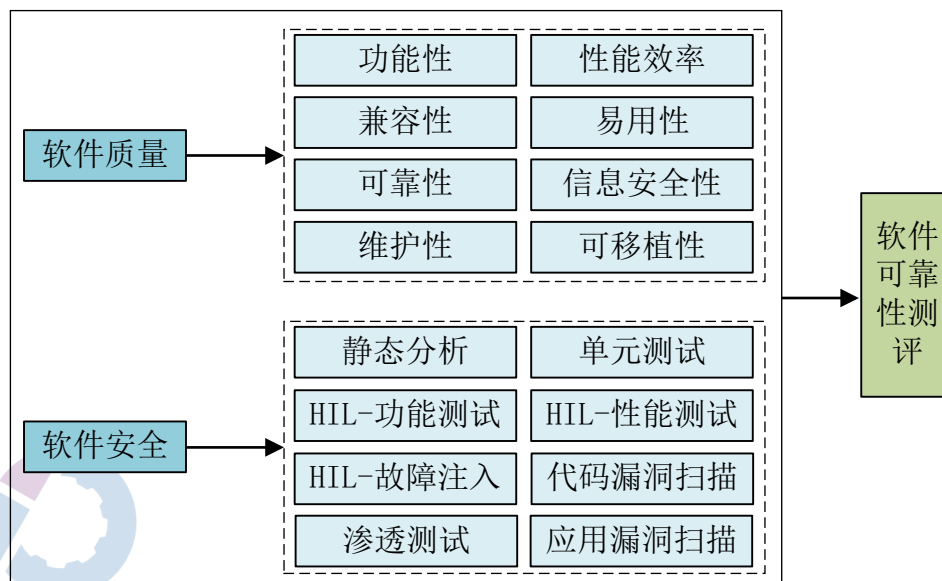


图 5 工业机器人控制器硬件可靠性提升技术

控制器与机器人本体配套使用，进行 MTBF 试验的整机，其控制器也通过相应的 MTBF 值。

工业机器人控制器可靠性相关标准如表 2 所示。

表 2 工业机器人控制器可靠性相关标准

序号	标准编号及名称	标准状态
1	GB/T 37414.1-2019 工业机器人电气设备及系统 第 1 部分：控制装置技术条件	已发布
2	T/CEEIA 556-2021 机器人控制部件可靠性强化试验方法	已发布
3	T/GQDA 00005—2021 机器人控制器加速试验与可靠性指标验证方法	已发布
4	CEEIA2022046 工业机器人控制器通用规范	立项通过

(3) 减速器

随着国产工业机器人销量不断上升，国产减速器企业获得了源源不断的发展助力，国产减速器伴随着工业机器人开始崛起之路。近两年，在有了相对的技术沉淀之后，国产减速器企业无论是在技术上，还是在成本控制上，都取得了一定的突破。虽然市场依旧由国外减速器主导，但是国产减速器也在不断进步。

目前，国内涌现出一批机器人减速器研发生产企业，在谐波减速器方面如：绿的、来福、大族、昊志机电、中技克美、北京谐波等，其中绿的谐波发布的 N 系列谐波减速器，具有精度高、承载高、温升小、效率高、运行平稳、抗冲击能力强等特性，“精度保持寿命”超过 2 万小时；昊志机电谐波减速器，标称传动精度可达 25 角秒，重复定位精度达 5 角秒，寿命 L10 可达 10000 小时以上，L50 可达 50000 小时以上。RV 减速器方面有：双环传动、南通振康、中大力德、秦川发展、武汉精华等品牌。国产 RV 减速器在额定转速和额定负载下，通常运转噪音低于 80db，标称寿命长于 6,000 小时。



图 6 机器人用精密减速器（左图：谐波减速器 右图：RV 减速器）

工业机器人减速器可靠性相关标准如表 3 所示。

表 3 工业机器人减速器可靠性相关标准

序号	标准编号及名称	标准状态
1	GB/T 30819-2014 机器人用谐波齿轮减速器	已发布
2	GB / T 36491-2018 机器人用摆线针轮行星齿轮传动装置通用技术条件	已发布
3	GB / T 37165-2018 机器人用精密摆线针轮减速器	已发布
4	GB/T 35089-2018 机器人用精密齿轮传动装置 试验方法	已发布
5	GB/T 37718-2019 机器人用精密行星摆线减速器	已发布
6	T/CEEIA 595-2022 机器人精密减速器温度适应性要求和测试方法	已发布

(3) 伺服系统

伺服电机作为工业机器人的核心零部件，其性能对于工业机器人的使用影响较大。伺服电机系统具有精度高、响应快、适应性强等特点，随着国内企业针对性地投入研发力量并在交流伺服电机核心技术上取得关键性突破，国内产品各项性能均有大幅提升，部分伺服产品速度波动率指标已经低于 0.1%，国内外技术差距已经开始出现缩减趋势。目前，工业机器人伺服系统国产代表企业主要有台达、汇川、埃斯顿、大族电机等。同时，高精度编码器作为伺服电机中的核心部件，目前严重依赖进口，是我国伺服电机产品突破的重要瓶颈。



图 7 机器人用伺服电动机

工业机器人电机可靠性相关标准如表 4 所示。

表 4 工业机器人电机可靠性相关标准

序号	标准编号及名称	标准状态
1	GB/T 39633-2020 协作机器人用一体式伺服电动机系统通用规范	已发布
2	GB/T 39553-2020 直流伺服电动机通用技术条件	已发布
3	GB / T 37414.2-2020 工业机器人电气设备及系统 第 2 部分：交流伺服驱动装置技术条件	已发布
4	GB/T 37414.3-2020 工业机器人电气设备及系统第 3 部分：交流伺服电动机技术条件	已发布
5	GB/T 16439-2009 交流伺服系统通用技术条件	已发布
6	GB/T 7344-2015 交流伺服电动机通用技术条件	已发布
7	GB/T 30549-2014 永磁交流伺服电动机通用技术条件	已发布

序号	标准编号及名称	标准状态
8	JB/T 11991-2014 工业机械数字控制系统用交流伺服电动机	已发布
9	JB/T 5867-2004 空心杯电枢永磁直流伺服电动机通用技术条件	已发布
10	JB/T 5866-2004 宽调速永磁直流伺服电动机通用技术条件	已发布
11	JB/T 5868-2004 印制绕组直流伺服电动机通用技术条件	已发布
12	T/JSQA 147—2022 永磁交流伺服电动机	已发布
13	T/GDCKCJH 014—2020 工业机器人伺服系统可靠性仿真试验规范	已发布
14	T/GDCKCJH 017—2020 工业机器人伺服系统可靠性指标评估	已发布
15	T/GDCKCJH 016—2020 工业机器人伺服系统可靠性加速试验规范	已发布
16	T/GDCKCJH 015—2020 工业机器人伺服系统可靠性强化试验方法	已发布
17	T/GDCKCJH 013—2020 工业机器人伺服系统可靠性通用要求	已发布
18	T/ZZB 0656—2018 《工业机器人用通信指令型交流伺服系统》	已发布

(5) 线缆

机器人电缆作为工业机器人核心零部件之一，用来进行信号传输、控制及电源动力传输。机器人电缆包括本体电缆、基座电缆、示教器电缆、控制柜内电缆等，与普通电缆相比，机器人电缆一般移动使用，且弯曲半径小，需要承受弯曲和扭转运动的应力，例如本体电缆在整个寿命周期中随着机械臂的周期运动，承受数百万次以上的弯曲、扭转或弯扭组合的载荷作用；而基座中的拖链电缆则承受拖链运动的应力。一旦电缆失效，则导致信号中断，机器人无法正常控制，造成人员和财产损失。当前的机器人电缆行业标准主要包括线缆电性能测试、机械和物理性能测试、机械寿命测试，其中机械寿命测试针对工业机器人电缆的运动特点，包含 2D 扭转、弯曲试验、3D 扭转试验等测试项，对工业机器人电缆的机械寿命进行测评。

当前工业机器人电缆选用的电缆供应商国内企业有苏州科宝光电、奥林特等，这些线缆供应商在电缆型式试验中对新设计的电缆型号进行机械寿命的测试。目前该品牌电缆的扭转和 90 度弯曲寿命可以达到 1000 万次。



图 8 工业机器人电缆

表 5 部分企业机器人电缆机械寿命信息

电缆品牌	电缆型号	扭转寿命	90 度弯曲寿命	拖链弯曲寿命	数据来源
科宝 光电	3P×0.25mm ² (编码器电缆)	1000 万次	1000 万次	——	产品手册, 测试参数: 扭转角度±180°, 长度: 0.6m。弯折角度±90°, 弯曲半径: 10×OD
	4C×2.5mm ² +1P×0.5mm ² (本体动力电缆)	1000 万次	1000 万次	——	产品手册, 测试参数: 扭转角度±180°, 长度: 0.6m。弯折角度±90°, 弯曲半径: 10×OD
	16C×2.5mm ² (地板线)	——	——	1000 万次	产品手册, 测试参数: 弯曲半径 10×OD; 行程 0.5m; 拖链速度为 1.0m/s。
	UL21149-9P*24AWG (SCARA 机器人本体通信电缆)	1000 万次	——	——	1) 产品手册, 测试参数: 扭转角度±180 度, 间隔 280mm。 2) 实际测试, 测试参数: 扭转角度±150 度, 间隔 360mm。
	UL11528-22AWG (SCARA 机器人本体动力电缆)	1000 万次	——	——	1) 产品手册, 测试参数: 扭转角度±180 度, 间隔 120mm。 2) 实际测试, 测试参数: 扭转角度±150 度, 间隔 360mm。

电缆品牌	电缆型号	扭转寿命	90 度弯曲寿命	拖链弯曲寿命	数据来源
奥林特电缆	UL20276 3P*25AWG (本体通信电缆)	1000 万次	1000 万次	——	产品手册，测试参数：扭转间隔 0.6m，扭转角度±270 度。

机器人电缆可靠性相关标准如表 6 所示。

表 6 工业机器人电缆可靠性相关标准

序号	标准编号及名称	标准状态
1	CRIA 0003-2016 工业机器人专用电缆	已发布
2	2PFG2577 Requirements for Cables used in Robot System	已发布
3	UL RP 5770 Recommended Practice for Evaluating Cables for Use in Repeated Flexing Applications	已发布
4	TICW 21-2019 工业机器人用柔性电缆	已发布

(6) AGV/AMR

当前市场对于 AGV 产品应用的要求越来越高，随着全场景渗透、规模化落地等需求演化，行业逐渐进入“深水区”。在某些场景上，AGV 已不是简单的物料搬运设备，而是逐步融入到企业整个生产流程中，成为生产工艺的一部分。而企业间的竞争也从单纯的产品比拼延伸到对场景的理解及使用渗透上。AGV 工作时需要多台组成系统运作，使用调度软件分配任务，单台故障会影响整个系统的正常运行，造成较大的经济损失。因此针对 AGV 工作的主要运行环境，制定工作试验剖面，对 AGV 的 MTBF（平均无故障工作时间）水平进行测评，对于提升 AGV 的可靠性水平至关重要。

另外，AGV/AMR 在寿命周期会受到各种环境应力的影响，包括温度、湿度、振动、冲击等，均会影响其使用寿命，需要对其寿命进行测评，评估产品投入市场后能否达到预期的设计寿命。

AGV/AMR 整机可靠性相关标准如表 7 所示。

表 7 AGV/AMR 可靠性相关标准

序号	标准编号及名称	标准状态
1	T/CEEIA2021116 自动导引车可靠性测试与评定	报批中
2	T/CEEIA2021052 移动机器人寿命测试与评定	报批中
3	T/CEEIA555-2021 移动机器人振动与冲击试验条件确定方法	已发布

(5) 服务机器人

目前常见服务机器人的有送餐机器人、导引机器人、清洁机器人，二者属于室内服务机器人，适用于商超，酒店，餐厅，展馆等公共室内场合，通过机器视觉和激光雷达实现全自主定位导航、智能避障，提供导引、导购、语音对话等服务。

在服务机器人的寿命周期中，会受到各种环境应力的影响，包括温度、湿度、振动、冲击等，均会影响其使用寿命，特别是服务机器人在不同的路面和障碍物行走时，由路面不平整引起的振动和冲击会影响机器人寿命水平。寿命作为可靠性水平的重要指标，对服务机器人的寿命进行评定并延长产品的寿命，可以评估产品投入市场后能否达到预期的设计寿命，暴露产品在寿命周期中可能遇到的故障并进行解决。

服务机器人整机可靠性相关标准如表 8 所示。

表 8 服务机器人可靠性相关标准

序号	标准编号及名称	标准状态
1	T/CEEIA2021052 移动机器人寿命测试与评定	报批中
2	T/CEEIA555-2021 移动机器人振动与冲击试验条件确定方法	已发布

移动机器人的寿命评定可以参考团体标准 T/CEEIA2021052 《移动机器人寿命测试与评定》，目前已进入标准报批阶段，该标准提供了移动机器人的寿命测试与评定方法，适用于服务机器人。服务机器人的振动条件制定和路谱采集可以参考团体标准 T/CEEIA555-2021 移动机器人振动与冲击试验条件确定方法，可用于指导服务机器人的路谱采集工作，为验证服务机器人在振动与冲击环境

下的耐久性提供了依据。

T/CEEIA2021052《移动机器人寿命测试与评定》规定了移动机器人在进行寿命测试与评定时样品要求、试验时间、试验条件、试验实施方法、故障判据、预防性维修、故障处理、试验评定等要求，针对寿命测试时间过长无法满足研制要求的问题，该标准结合移动机器人的环境应力和工作应力，设计了高温寿命试验、热疲劳寿命试验、振动疲劳试验、寿命高温寿命试验的加速试验条件，达到快速验证服务机器人整机寿命的效果。

T/CEEIA555-2021《移动机器人振动与冲击试验条件确定方法》规定了移动机器人振动与冲击数据采集、数据检验、数据分析、数据归纳、试验条件确定等内容，通过采集移动机器人实际应用的振动路谱，为移动机器人试验设计和验证提供依据。在路谱采集前需调研服务机器人的使用场景，包括行走路面，越障，沟槽等，表 9 中整理了常见的服务机器人路面条件。路谱采集需覆盖典型的使用场景和使用工况（如速度、负载等），最后对采集的振动信号进行处理归纳，使用累积损伤原理制定服务机器人的疲劳耐久试验条件。

表 9 服务机器人常见路面类型

序号	路面材料	应用场景	备注
1	木材	家庭	接缝路
2	石材（大理石为主）	家庭、商场、餐厅等	接缝路
3	瓷砖	家庭、商场、餐厅等	接缝路
4	地毯	家庭	考虑与其他材料衔接情况

服务机器人的振动耐久性测评可分为试验场试验和实验室道路模拟试验，在试验场试验中，各厂商会根据对机器人的定义、目标用户等等定义机器人的载重、试验道路的种类以及通过它们的行驶速度，从而以确定载荷强度和频率考核机器人和各个零部件。道路模拟试验使用振动台架进行试验，可以消除气候等因素的影响，而且能有效缩短试验周期、精度高、可控性好。

服务机器人振动台架试验一般包括电动振动台和四立柱振动台架，电动振动台可以对服务机器人从底座分别施加 X、Y、Z 三个方向的振动，而四立柱振

动台架有 4 个垂向作动器可以从车轮处施加振动信号，相对于三方向振动台，四立柱振动台对于颠簸路面的振动可以更好得模拟。四立柱振动台架从 1962 年问世以来，已经在汽车的疲劳测试领域得到了广泛应用，同样也可以用于轮式服务机器人。在服务机器人行驶过程中，疲劳通常由路面的垂直输入载荷所引起，四立柱振动台架通过在车轮下使用 4 个垂向作动器施加激励模拟，施加实际路面行驶所受垂向载荷，达到和试验场试验比较一致的耐久效果。

注：本章所列标准是专门针对机器人及零部件可靠性，有的标准是某一章节对可靠性以及测评方法作出要求。



3 机器人可靠性测评机构

目前进行机器人可靠性测评的机构有：上海机器人产业技术研究院有限公司、重庆凯瑞机器人技术有限公司、中国软件评测中心、中国科学院沈阳自动化研究所、广州机械科学研究院有限公司、芜湖赛宝机器人产业技术研究院有限公司、广州赛宝认证中心服务有限公司、广东科鉴检测工程技术有限公司。

上海机器人产业技术研究院是上海电器科学研究所（集团）有限公司旗下集机器人研发、服务、成果转化于一体的新型研发机构。它是上海市机器人研发与转化功能型平台和国家机器人检测与评定中心（总部）的实施载体，围绕机器人产业的需求，搭建机器人共性技术平台，为企业提供技术服务，承担国家机器人检测与认证职能，加速科研成果转化进程，推动机器人产业发展，成为国内领先、国际知名的机器人技术研发、服务和成果转化高地。近年来，通过技术研发、标准制定、检测认证、成果转化、人才聚集、行业资源融合六大智能陆续汇聚机器人技术及人才资源，培育了一批科技型企业，形成了机器人产业的集群，成为国内领先、国际知名的机器人技术研发、服务和成果转化高地。上海机器人产业技术研究院有限公司目前开展的业务有标准化服务、可靠性提升服务、智能化评价服务、智能创新应用服务和成果转化与孵化。

重庆凯瑞认证服务有限公司（英文缩写：**CRRI**）是经国家工商行政管理部门注册登记，国家认证认可监督管理委员会（**CNCA**）批准，具有独立法律地位的第三方认证机构。**CRRI** 是中国通用技术集团旗下重庆德新机器人检测中心有限公司设立的全资子公司，并于 2020 年 5 月获批成为自愿性产品认证机构，2020 年 6 月获得中国机器人（**CR**）认证资格。公司拥有国家机器人检测与评定中心（重庆）、国家机器人质量监督检验中心（重庆）两个国家级平台，是中国机器人产业联盟理事单位、中国机器人检测认证联盟成员单位。

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），简称中国软件评测中心，作为国内权威的第三方软、硬件产品及系统质量安全与可靠性检测、认证机构，是直属于工业和信息化部的一类科研事业单位。成立近 30 年来，中国软件评测中心秉承“专业就是实力”的宗旨，共承担了 10 万余款软硬件产品和 1 万余项信息系统的测试任务，业务网络覆盖全国 500 多个城市。

国家机器人检测与评定中心（沈阳）是由中国科学院沈阳自动化研究所建成的集机器人检测认证、标准制修订、科研开发为一体的国家级第三方专业检测认证机构，拥有国家机器人质量监督检验中心（辽宁）、国家机器人标准化总体组秘书处等国家级平台，具备国家认监委、认可委的 CMA、CNAS 检测资质和认证资质。中心检测业务范围涵盖各类工业机器人、服务机器人的机器人整机、核心零部件、机器人集成应用系统的检验检测，包括性能、安全、电磁兼容、环境试验、噪声、电气安全及伺服电机、精密减速器等核心零部件检测实验室。中心认证业务范围涵盖各类机器人产品的 CR 认证服务。

广州机械科学研究院有限公司（中汽检测技术有限公司），是中国机械工业集团有限公司专业从事汽车零部件、机器人及自动化装备的第三方检测和认证服务机构。运营管理着“国家自动化装备质量监督检验中心”、“机械工业汽车零部件产品质量监督检测中心”，现拥有 12 个汽车零部件专业试验室和 14 个机器人及自动化装备检测专业实验室，在广州、苏州、长沙、保定分布有不同专业的检测能力，是“国家机器人检测与评定中心（广州）”的建设单位、国家 3C 认证授权实验室和汽车零部件、机器人和智能装备标准起草和参与单位，成为商务部“国家汽车及零部件出口基地技术研究开发平台”，是首批国家级机器人、智能装备检测与认证机构。

芜湖赛宝机器人产业技术研究院有限公司成立于 2015 年 3 月，由广州赛宝信息产业技术研究院、芜湖哈特机器人产业技术研究院有限公司、芜湖滨江智能装备产业发展有限公司共同出资成立，是服务工业机器人全产业链的研发设计、检验检测、认证等服务为主的第三方专业化高技术服务企业。

广州赛宝认证中心服务有限公司成立于 2000 年 9 月，由工业和信息化部电子第五研究所投资组建、经国务院行政主管部门授权及国际体系认可，是专业从事认证、评估、研究、培训等技术服务的第三方机构，也是中国最早的认证机构，前身为成立于 1956 年的“中国电子产品可靠性与环境试验研究所”审查部，从 1979 年将“认证”的概念引入中国至今，赛宝已经向各行业颁发各类的证书数万张，建有广东省工业机器人可靠性工程实验室。

广东科鉴检测工程技术有限公司广东科鉴检测工程技术有限公司（以下简称“科鉴检测”）是一家致力于提升国产装备可靠性水平的国家高新技术企业和

第三方检测专业机构。科鉴可靠性具有国家认定和认可的 CMA、CNAS、DILAC 等第三方检测资质证书以及装备承制（试验类）、GJB9000C、生产备案等装备承试资质证书，拥有安全测试、环境试验、可靠性试验、软件测评、元器件老化筛选实验室。



4 机器人可靠性水平

4.1 工业机器人可靠性水平

发达国家在工业机器人技术和产业方面占据先发优势，以 ABB、库卡、发那科和安川为代表的“四大家族”，以及 UR、EPSON、iRobot 等行业新贵，占据全球 60% 以上的市场份额，高附加值的高端制造领域（电子制造、汽车装配等）几乎被四大家族垄断。国产机器人进入高端应用领域的主要瓶颈是可靠性差距。可靠性测评可以得到工业机器人的可靠性水平，得到工业机器人的平均故障间隔时间（MTBF）、寿命等，为生产企业对机器人零部件的选取、保养、维护、零部件更换以及产品寿命评估提供依据。

工信部在《工业机器人行业规范条件》以及“中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要”规划中，明确提出了“可靠性、环境适应性和耐久性水平接近国外同类产品水平，平均故障间隔时间（MTBF）不低于 50000 小时的规范条件；到 2020 年，工业机器人平均故障间隔时间达到 80000 小时”的目标要求。

目前，有 7 家企业的传统工业机器人经第三方测评机构进行了 MTBF 测评，测评结果如图 9 所示，其中有 1 家达到了 8 万小时，最低通过了 2 万小时的测评。

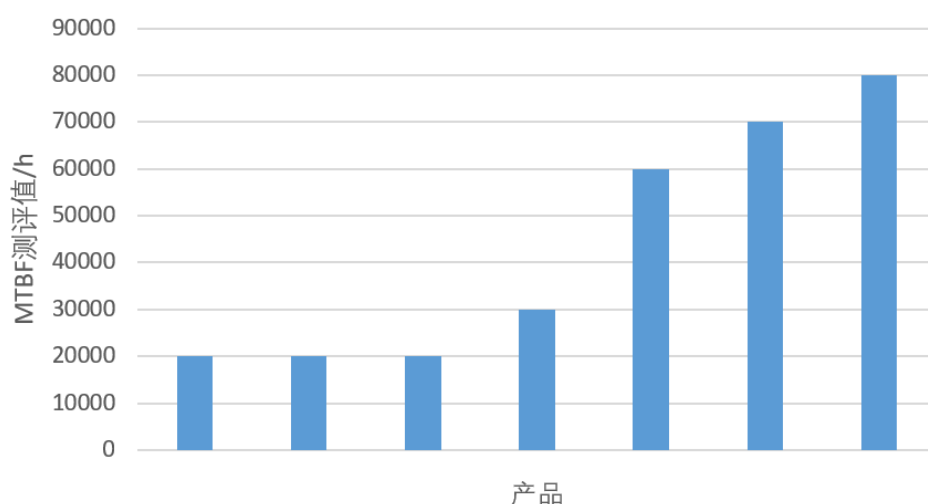


图 9 传统工业机器人测评结果

目前，有 7 家企业的协作机器人经第三方测评机构进行了 MTBF 测评，测评结果如图 10 所示，其中最多达到了 8 万小时，最低通过了 2 万小时的测评。

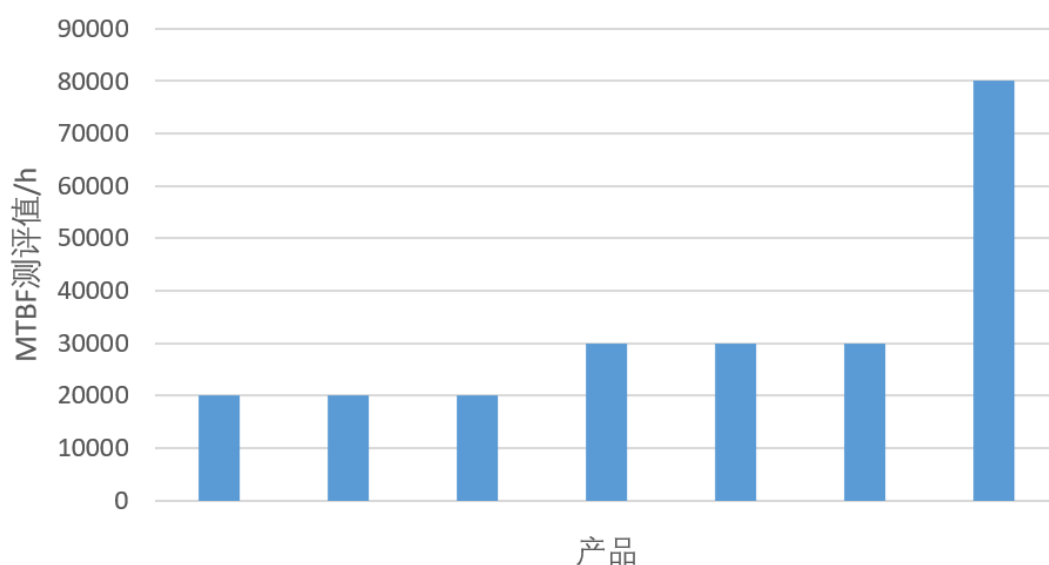


图 10 协作机器人测评结果

目前，有 1 家企业的 SCARA 机器人经第三方测评机构进行了 MTBF 测评，通过了 20000h 的 MTBF 测评。

完成工业机器人整机 MTBF 测评的机器人，其零部件包括电机、减速器、控制器、驱动器等都达到整机完成的 MTBF 测评值。

注：本节提到的 MTBF 测评值表示产品通过了相应的 MTBF 值，不代表此产品 MTBF 水平上限。

4.2 AGV/AMR 可靠性水平

当前部分工业移动机器人企业如北京京东乾石科技有限公司、深圳市海柔创新科技有限公司已经对产品的平均无故障工作时间（MTBF）开展测评。

深圳市海柔创新科技有限公司还开展了设计寿命 5 年的测评。

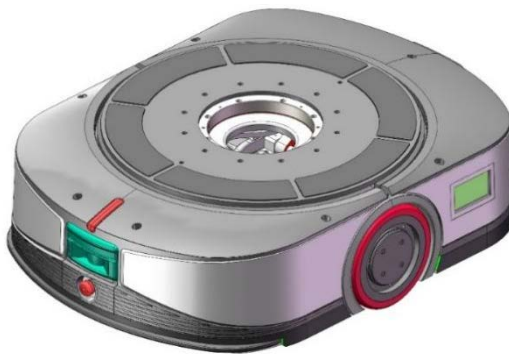


图 11 潜伏顶升式 AGV



图 12 箱式仓储机器人

4.3 服务机器人可靠性水平

服务机器人部分头部企业经测评已达到了设计寿命 5 年的目标值。



图 13 服务机器人图片

5 机器人典型故障信息

5.1 工业机器人典型故障信息

5.1.1 整机典型故障信息

经过广泛的调研和行业摸底，汇总工业机器人整机的典型故障如表 14 所示。

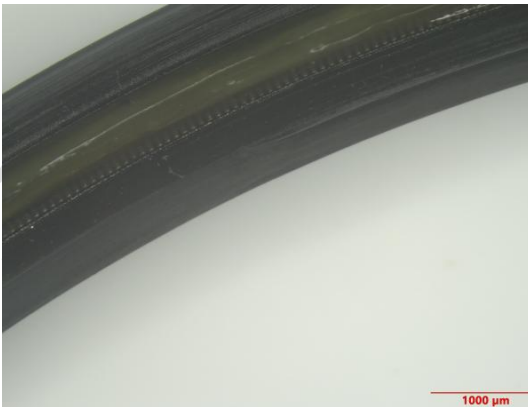

表 14 工业机器人典型故障表

序号	系统名称	典型故障模式
1	机器人本体	机器人本体异响
2		本体关节/底座等连接螺丝松动、断裂
3		减速器故障：减速器漏油（密封圈密封失效）、损坏，减速器抖动
4		机械臂抖动
5		轴脱落
6		关节撞毁
7	控制系统	通信异常
8		机器脚本运行一段时间后报错停机
9		控制器存储卡损坏
10		控制器电路板损坏
11		控制器外部急停输入失效
12		急停按钮失效
13	伺服系统	伺服报位置超差错误
14		伺服欠压
15		关节运行伺服无有效数据
16		伺服驱动器通信中断

序号	系统名称	典型故障模式
17		伺服驱动器损坏
18	软件	运行错误
19		程序加载异常
20		IO 连接错误
21		WaitIO 超时
22		重新启动失败
23		机器人运行中系统重新启动
24		系统不能重新启动
25	示教器	示教器急停按钮失效
26		示教器显示屏失效
27		示教器屏幕滑动失效
28		示教器破损
29		示教器烧毁
30	线缆	动力线缆损坏
31		信号线缆损坏
32		其他线缆断裂
33		电连接器接口损坏
34		电连接器与插针接触不良
35	电源	电源连接器与插针接触不良

部分故障的失效分析图片如表 15、16、17 所示。

表 15 工业机器人部分本体故障的失效分析图片

机器人本体故障	
	
关节漏油	
	
减速器油封密封圈破损	减速器油封密封圈磨损
	
螺钉断裂	螺钉断裂



机器人本体故障	
	
减速器轴承碎裂	减速器轴承碎裂

表 16 工业机器人部分示教器故障的图片


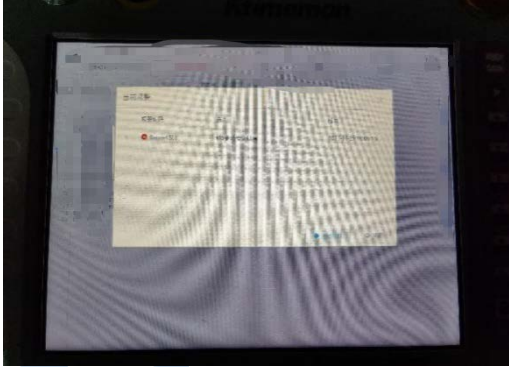

示教器故障

示教器花屏

表 17 工业机器人部分驱动单元故障的图片

驱动单元故障	
	
驱动模块过温	母线电压欠压

5.1.2 工业机器人零部件典型故障信息

(1) 工业机器人控制器

工业机器人控制器在 MTBF 测试中出现的典型故障模式和表 11 控制器系统的典型故障模式相同。

(2) 工业机器人减速器





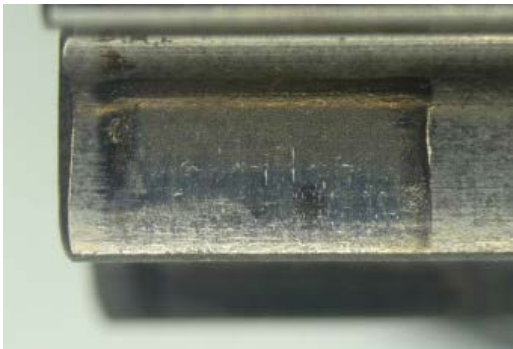
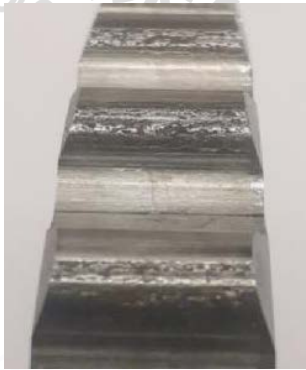
工业机器人精密谐波与 RV 减速器在整机系统测试和单体测试中零部件结构出现的典型故障模式如表 18 所示。

表 18 机器人用减速器试验典型故障表

序号	谐波减速器故障名称	RV 减速器故障名称
1	柔性轴承外圈疲劳断裂	转臂轴承过载失效
2	柔性轴承沟道疲劳磨损	太阳轮轮齿断裂时效
3	柔轮刚度失效	曲柄轴弯曲变形失效
4	柔轮轮齿磨损失效	摆线轮传动精度退化失效
5	润滑油老化未及时更换	密封件性能退化漏油失效

零部件结构常见的故障照片如表 19 所示：

表 19 机器人用减速器部分故障照片

机器人用减速器部分故障	
	
柔轮刚度失效：扭麻花	柔性轴承：外圈断裂
	
柔性轴承：内圈严重磨损	RV 减速器：转臂轴承卡死
	
太阳轮轴：齿面过载磨损	摆线轮：齿面胶合

减速器作为机器人的核心零部件，润滑是保障其正常运转并实现各项标称性能的必要手段，油脂的选用及长期使用性能表现关乎产品的使用寿命、研发/生产厂家的成本控制等多项经济指标。一般工业机器人用润滑油脂的技术确认权掌握在整机厂及关键零部件（精密减速器）生产商手中，许多机器人生产企业都有自己指定的润滑油品牌，例如日系机器人减速器润滑与日本协同系列油

脂关系紧密；欧系机器人多采用嘉实多、美孚等润滑品牌；国产减速器厂家如南通振康亦指定专用油脂为 ZK RE 00 等。随着减速器的国产化替代持续发展，润滑油脂的国产替代需求也非常迫切，杭州得润宝等国内润滑油脂研发企业陆续推出适用于国产减速器的润滑产品，如 2019 年推出的灵威 9101 系列润滑油脂已经应用在多个国产品牌（如南通振康、秦川发展、珠海飞马、中大力德、武汉精华等）减速器上，在与国外进口品牌油脂的性能测试对比上也表现优异，见表 20。

表 20 得润宝 9101 润滑油脂与某进口品牌油脂的性能测试对比

序号	测试项目	某进口品牌油脂	得润宝灵威 9101	检测方法
1	锥入度/0.1mm	425	423	GB/T 269
2	滴点/℃	165	180	GB/T 3498
3	铜片腐蚀	2c	1b	GB/T 7326，方法乙
4	氧化诱导期（180℃）	120	120	SH/T 0790
5	PB/kg	80	100	SH/T 0202
6	PD/kg	250	250	
7	-20℃启动转矩/mN·m	900	288	SH/T 0338
8	-20℃运转转矩/mN·m	320	95	
注：数据来源于公开资料。				

润滑作为保障机器人减速器正常运行的重要组成部分，油脂或油液的存量多少和性能好坏对减速器齿间啮合、腔内温升、滚动接触等均会造成“致命”损伤，研究减速器油脂对国产机器人减速器水平提升有着至关重要的影响。

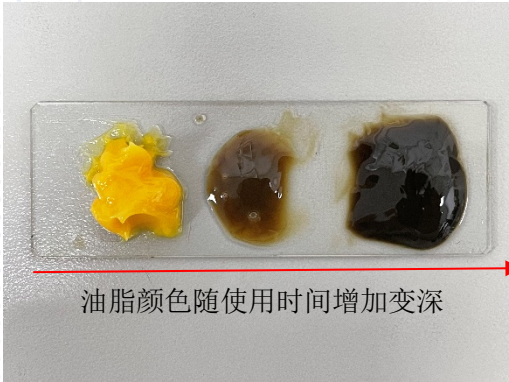

减速器油脂在测试中出现的典型故障模式如表 21 所示。

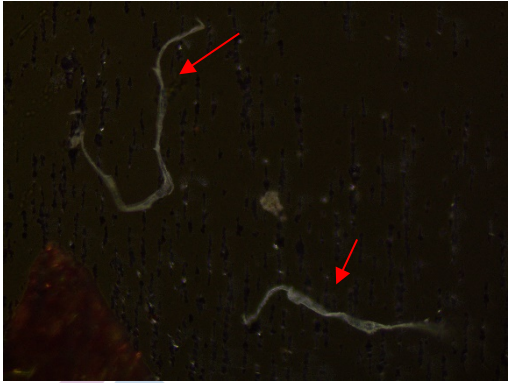
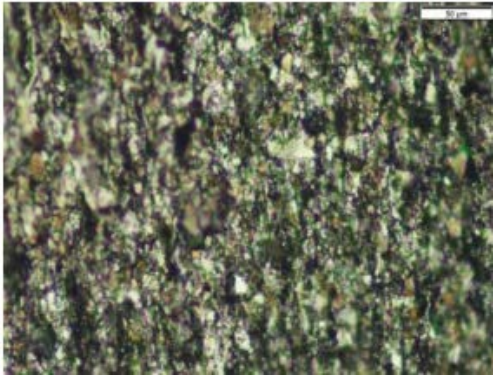
表 21 机器人用减速器油脂典型故障表

序号	故障模式	故障原因
1	漏油	假漏油：设备运行磨合期假漏油
2		油封问题：油封破损，油封与油脂相容性不佳被腐蚀；油封老化失去密封效果；油封装配不当导致变形等
3		摩擦副设计问题：转轴设计/加工问题、电机法兰设计问题、输出连接法兰设计问题、O 型圈装配问题等
4		内部压力问题：不良发热导致内部压力升高；油脂用量不当（过饱和）
5		油脂选型不当，如粘度过低或高温稳定性欠佳
6	油脂变性	油脂变质，如高温氧化、乳化等
7		过磨损，油脂内部铁粉等含量过高
8		异物污染，如进水导致水分含量过高等

油脂常见故障照片如表 22 所示：

表 22 机器人用减速器油脂部分故障图片

机器人用减速器油脂部分故障	
 <p>油脂颜色随使用时间增加变深</p>	
油脂变色	油泥

机器人用减速器油脂部分故障	
	
油内污染（纤维）	油脂过磨（铁粉含量过高）

（3）工业机器人伺服系统

工业机器人需要搭载重物，规划路径具有不确定性和复杂性，通常需要急转急停、频繁的正反转，搭载重物时负载会实时变化，这些工况都可能造成伺服电机系统故障和异常。工业机器人伺服电机系统在日常应用中出现的典型故障模式如表 23 所示。

表 23 机器人用伺服电机系统典型故障表

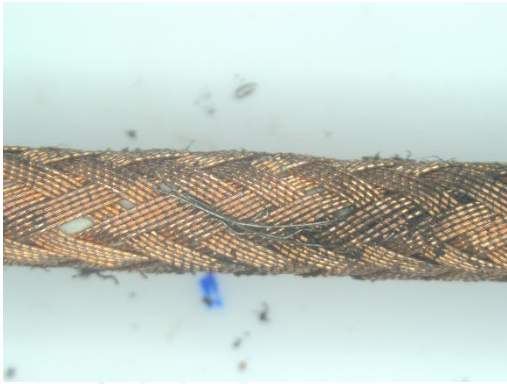

序号	故障类型	故障表现
1	启动异常	启动报警
2		启动跳闸
3		启动无力
4	运行故障	高速运转噪音大
5		低速正常告诉偏差
6		高速正常低速偏差
7		运行抖动
8		跑位
9		输出不平衡

序号	故障类型	故障表现
10		刹车失灵
11	结构故障	轴承槽磨损
12		转自断裂
13		轴断裂
14		磁铁爆钢、脱落
15		刹车片磨损
16		插头损坏

(3) 工业机器人线缆

线缆典型故障模式如表 24 所示。

表 24 工业机器人部分线缆故障的失效分析图片

线缆故障	
	
电缆编织屏蔽层磨损屏蔽线漏出	线缆外部绝缘层鼓包

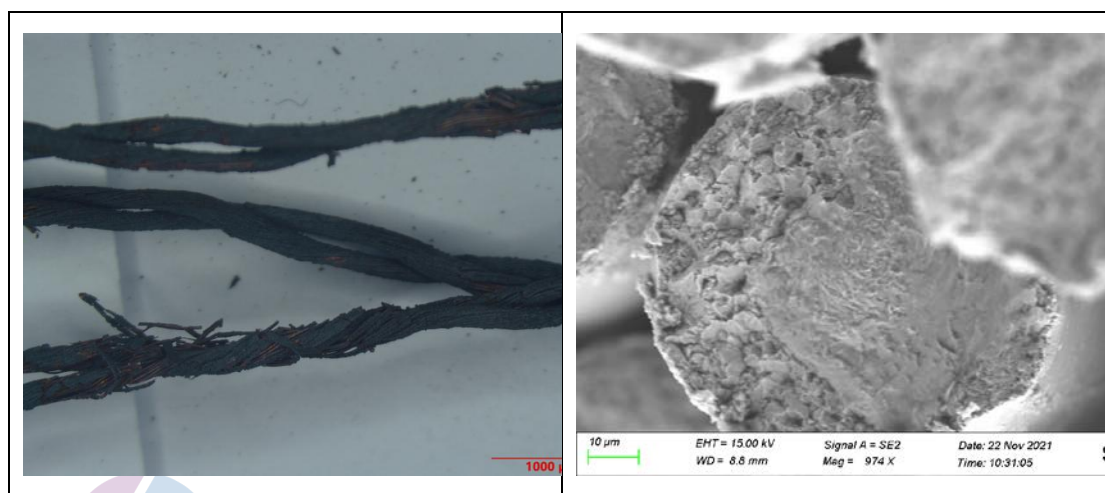


表 25 电缆的典型故障模式

序号	故障模式	故障原因分析
1	短路故障	由于机械应力造成导线绝缘层损坏，使导线和导线之间、导线和屏蔽之间接触。
2	开路故障	由于弯扭等机械应力导致内部导线断裂
3	绝缘损坏	由于机械、电、热应力等造成绝缘损坏、老化。
4	护套鼓包	由于弯扭等机械应力导致护套鼓包，剥开后一般伴随着内部绝缘和导线损伤
5	护套开裂	由于摩擦、弯折等机械应力导致护套损坏

5.2 AGV/AMR 典型故障信息

参考自动导引车相关文件，自动导引车主要由控制系统、机械本体、电源系统、导航定位系统、驱动系统、装载系统、安全防护系统、通信系统等部分组成。根据自动导引车各系统的功能性能，《自动导引车可靠性测试与评定》标准中整理了自动导引车的典型故障表，可以用于对试验过程中的故障进行分析和分类，自动导引车的典型故障表见表 26。

表 26 AGV 典型故障表

序号	系统名称	故障名称
1	控制系统	运动控制功能故障
2		故障报警功能故障
3		低电量报警功能故障
4		控制面板死机、点击无反应
5		小车上线失败
6	机械本体	机械本体扭曲变形
7	电源系统	自动充电功能故障
8		手动充电功能故障
9		低电量自我保护功能故障
10		电量显示不准确
11		电源电压过高或不平衡
12	导航定位系统	定位功能丧失
13		路径规划功能故障
14		二维码视觉传感器故障
15		定位精度偏差
16	驱动系统	行走速度不满足额定速度要求
17		制动功能故障
18		行走过程有异响
19	装载系统	自动起升和下降功能故障
20		举升超载后快速下降
21		手动操作功能故障

序号	系统名称	故障名称
22	安全防护系统	障碍物检测传感器功能故障
23		碰撞条损坏
24		急停功能故障
25		声光告警功能故障
26		失速保护功能故障
27		通信中断保护功能故障
28		导航丢失保护功能故障
29	通信系统	通信中断
30		通信延迟

5.3 服务机器人典型故障信息

服务机器人典型故障模式与 AGV/AMR 类似，针对具体应用，还可能还有其他故障，例如：送餐机器人送餐功能异常、点餐操作异常，清洁机器人盘刷故障、加排水功能异常、任务设置失败等。

企业通过对各类机器人产品的故障进行分类、分析并纠正，可以对产品进行优化，弥补产品缺陷，促进机器人的可靠性提升。

6 机器人全寿命周期可靠性技术

在机器人的全寿命周期，从产品设计初期概念设计阶段即可使用可靠性设计仿真技术对设计风险进行拦截，在工程样机阶段可进行故障激发试验，并通过失效分析识别故障机理进行纠正实现可靠性提升，并通过 MTBF 试验、寿命试验对可靠性指标进行验证。目前行业内企业已经在设计阶段使用可靠性设计技术进行风险拦截，各测评机构也重点在样机阶段开展了 MTBF 试验、寿命试验对可靠性指标进行评价。

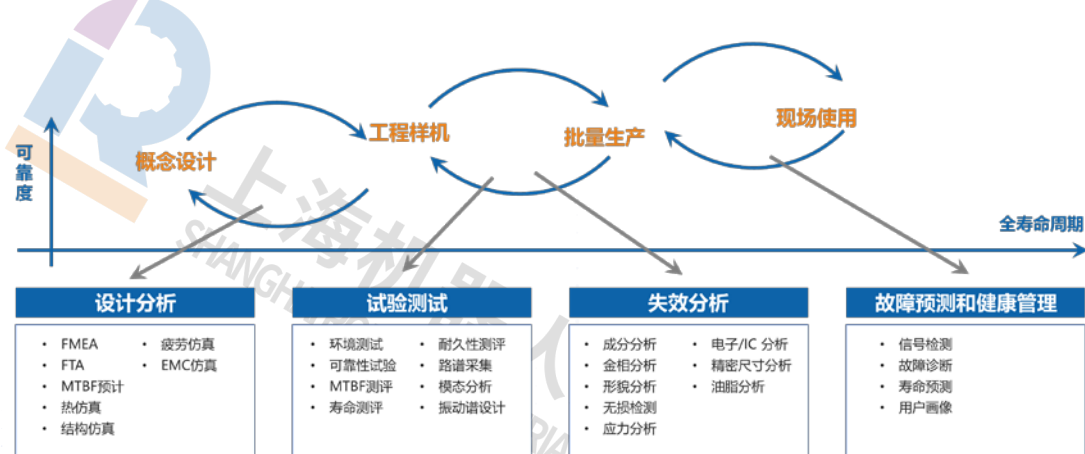


图 14 产品全寿命周期可靠性技术

当前 MTBF 测评主要有两种方法，一种是使用现场数据进行统计计算得到产品 MTBF 指标，该方法需要的样本量大，所需时间较长，由于现场使用环境、工作剖面参差不齐，且统计数据存在偏差，可能导致 MTBF 评价结果不够准确；另一种方法是试验场试验的方式，根据样本量以及试验周期，通常采用常规应力或加速应力的方法，根据产品的典型使用场景和工作剖面制定试验条件，并在试验前、中、后分别进行功能性能测试，通过试验场试验测评的 MTBF 指标可以更贴近产品在典型使用场景下的可靠性水平。

故障预测和健康管理（PHM）技术采用传感器技术获取和采集与系统属性有关的特征参数，然后将这些特征参数和有用的信息关联，借助智能算法和模型进行检测、分析、预测，并管理系统或设备的工作状态，实现了从传统基于传感器的诊断向智能系统的预测的转变，使得事后维修或定期维修策略被视情维修所取代。机器人行业 PHM 技术应用还不够广泛，尚处于起步阶段，随着相

关技术研究的深入以及企业的应用，PHM 技术将为提高机器人在现场使用的可靠性，减少维修投入发挥重要作用。



7 结语

综上，工业机器人企业的 MTBF 测评开展较多，但 AGV/AMR 和服务机器人的可靠性只有头部企业关注，而可靠性是机器人的一个重要指标，希望引起机器人制造商、上游零部件制造商和下游用户的关注。国产机器人的可靠性提升仍有较大空间，未来关于国产机器人可靠性标准、技术、测评方法仍需进一步研究，需要机器人行业、科研机构、高校、第三方机构共同努力，提升国产机器人的可靠性水平。

本报告主要以机器人可靠性为中心展开介绍，旨在为机器人行业可靠性提升提供参考信息，希望可以对行业的发展有所帮助。

上海机器人产业技术研究院
SHANGHAI ROBOT INDUSTRIAL TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE

声 明

本报告版权归发布单位所有，发布单位拥有对此报告的最终解释权，如需转载，请注明出处。

本报告的所有数据来源于公开信息，如有疑问，请与发布单位联系。

