

T/SAIAS

上海市人工智能行业协会团体标准

T/SAIAS XXXX—2025

一体化关节平均无故障时间测试与评定

Reliability test and evaluation for mechatronic joints

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

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

一体化关节平均无故障时间测试与评定

1 范围

本文件规定了一体化关节平均无故障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。

本文件适用于一体化关节。

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 12643—2013 机器人与机器人装备词汇

GB/T 43200—2023 机器人一体化关节性能及试验方法

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、头和四肢，外观和动作与人类相似的机器人。

[来源：GB/T 12643—2013，3.17，有修改]

一体化关节 mechatronic joint

由电机、减速器、编码器、驱动器等组成的具有独立功能的驱动模块。

[来源：GB/T 43200—2023，3.1]

3.1.2

平均故障间隔时间 (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]

3.2 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

一体化关节可靠性评定时，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一体化关节作为受试样品。

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%。

5 统计方案

5.1 概述

本文件假定一体化关节的故障分布符合指数分布规律。

5.2 评定指标

在试验前，应制定一体化关节的平均故障间隔时间（MTBF），推荐不低于10000h。

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): 可接收的最低MTBF值。若受试样机的MTBF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 %；
- MTBF检验上限值(θ_0): 若受试样机的MTBF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)%；

- c) 生产方风险(α): 若受试样机MTBF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;
- d) 使用方风险(β): 若受试样机MTBF的真值小于检验下限 θ_1 时, 判定MTBF真值不小于检验上限 θ_1 的最大概率;
- e) 鉴别比(D): MTBF的检验上限值 θ_0 与检验下限值 θ_1 的比值, $D = \frac{\theta_0}{\theta_1}$ 。

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 \geq	接收数 \leq
	α	β	.			
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

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 $t = \frac{T}{n}$ 。

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

试验条件应尽可能的模拟现场的运行工况, 需要调研实际场景中的运行工况, 确定典型运行工况。

6.2 环境条件

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:

- a) 温度: $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- b) 湿度: 45%RH~75%RH;
- c) 气压: 86 kPa~106 kPa。

6.3 使用工况

使用工况分为两种:

- a) 额定工况;
- b) 使用工况, 用于人形机器人的一体化关节使用工况应考虑负载波动、短时电压变化、冲击、堵转等条件。

使用工况优先根据委托方提供的工况条件进行。
若委托方无使用工况条件，需要根据预期的使用场景确定。

6.4 电应力

一体化关节的电应力应该按以下要求变化，输入电压变化范围为标称电压的±10%。50%的时间输入电压为设计的标称电压，25%的时间输入电压为设计的标称电压的10%上限，其余25%的时间输入电压为设计的标称电压的下限。电应力每个试验剖面循环变化一次。

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功能和性能检查，试验前中后功能检查项目一致。

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：选择GB/T 43200-2023中的项目进行测试，包括但不限于弯矩、背隙、额定转矩、功率密度、绝对定位精度、重复定位精度等。

7.3 检测方法及合格判据

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；
- d) 产品应有标牌和商标。

7.3.2 功能检查

试验方法：按照产品手册或者说明书操作一体化关节。

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

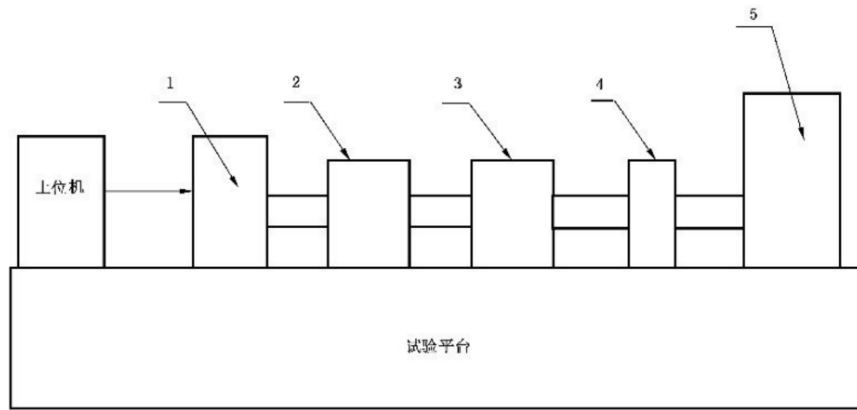
试验方法：按照GB/T 43200-2023进行测试。

合格判据：应符合产品手册或说明书的要求。

8 试验实施

一体化关节的可靠性试验按照以下步骤进行：

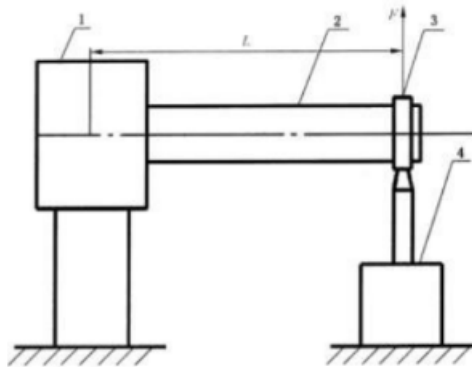
- a) 按照第7章进行受试样品的外观、功能和性能检测，检测结果应符合第7章要求；
- b) 将样品按照预期的安装要求安装在测试设备上，试验设备可以采用性能测试设备（额定工况，如图1所示，许用弯矩载荷如图2所示），或者其他设备（使用工况，如图3所示）；
- c) 按照第6章确定的试验条件和使用工况进行测试；
- d) 试验过程中定期对样品的外观、功能和性能进行检测，检测时间间隔可根据试验实际情况自行设定，建议单台样品的检测次数不少于5次（含首末次检测）；



标引序号说明：

- 1——被测关节；
- 2——角度传感器；
- 3——转矩转速传感器；
- 4——惯量盘；
- 5——加载系统。

图1 额定工况测试平台示意

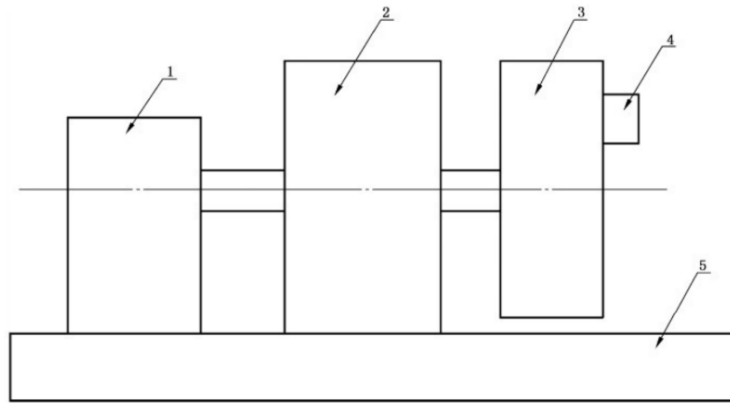


标引说明：

- 1——关节；
- 2——横梁；
- 3——轴承；
- 4——加载器；
- L ——径向负载力臂；
- F ——加载器提供的径向负载。

图2 许用弯矩载荷试验装置

上海



- 说明：
- 1——驱动系统；
 - 2——试验件及安装支承系统；
 - 3——惯性负载；
 - 4——加速度传感器；
 - 5——工作平台。

图3 使用工况测试平台示意

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；
- d) 试验温湿度、大气压。

9 故障判据、分类、统计原则及故障处理

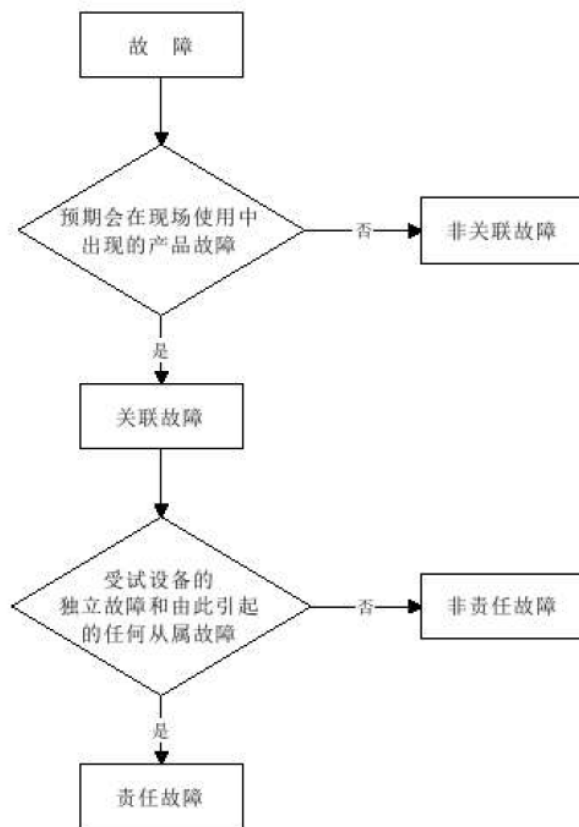
9.1 故障判据

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。



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：

- a) 设计缺陷或制造工艺缺陷造成的故障；
- b) 元器件缺陷造成的故障；
- c) 由于软件造成的故障；
- d) 间歇故障；
- e) 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：

- a) 误操作引起的受试产品故障；
- b) 试验设施及测试仪表故障引起的受试产品故障；
- c) 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；
- d) 修复过程中引入的故障；
- e) 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4所示。

表4 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, 爆炸、着火、触电、电机失控, 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: 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。			

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(2)。

$$r = \sum_{j=1}^4 r_j \varepsilon_j \dots\dots\dots (2)$$

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;
- 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;
- 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；

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：_____			

附录 B

(资料性)

机器人一体化关节功率 MOSFET 选型要求

B.1 基本电气参数

B.1.1 抗直通能力

应符合以下要求：

- 为防止上下管直通 (shoot-through)，功率 MOSFET 的 C_{rss}/C_{iss} 比值应 $\leq 1\%$ ；
- 栅极开启电压 $V_{GS(th)}$ 典型值宜为 3V，以确保驱动可靠性。

B.1.2 损耗要求

优先选用 FOM ($R_{DS(on)} \times Q_g$) 值低的器件，推荐 $FOM \leq 140 \text{ m}\Omega \cdot \text{nC}$ (如 SMT10T02AHPDC)。

4.2 效率与能效

应符合以下要求：

- 系统整体效率应 $\geq 90\%$ ，以满足 IE5 能效等级要求。
- 导通损耗 ($I_{RMS}^2 R$) 及开关损耗 (E_{SW}) 需通过仿真或实测试证。

4.3 可靠性设计

电压裕量：击穿电压 BV_{DSS} 需保留 20% 冗余 (如 100V 器件实际耐压 $\geq 120V$)。

电流裕量：持续电流额定值需满足电机 3 倍过载需求 (如 30A 额定电流对应 90A 峰值能力)。

温度裕量：结温 T_j 设计上限应低于标称值 25°C (如标称 175°C 时，实际应用 $\leq 150^\circ\text{C}$)。

4.4 动态特性

关断特性应符合以下要求：

关断电压尖峰需限制在器件耐压值的 80% 以内。

MOSFET 关断时， V_{ds} 电压振铃阶数应 ≤ 5 ，以降低 EMI 风险。

优先选用 C_{oss} 较大的器件，利用寄生 RC 效应抑制振铃。

反向恢复特性应符合以下要求：

大电流应用 (相电流 $\geq 50A$) 需采用低反向恢复电荷 (Q_{rr}) 及短恢复时间 (T_{rr}) 的 MOSFET。

4.5 封装与散热

大功率器件：推荐采用双面散热封装 (如 PDFN5060)，以降低高温环境 (85°C) 下的温升。

小功率集成方案：功率 $< 100W$ 时，可选用全桥或三相全桥合封模块，以提升功率密度。

4.6 抗冲击能力

MOSFET 的 SOA 曲线需覆盖电机堵转工况，确保线性区工作时无瞬时失效风险。

参 考 文 献

- [1] GB/T 5080.1-2012 可靠性试验第1部分：试验条件和统计检验原理
- [2] GB/T 5080.7-1986 设备可靠性试验-恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验方案
-

上海机器人产业技术研究院有限公司