ICS 25.040
CCS J 51

# 团　　体　　标　　准

T/CEATEC XXX—XXXX

# 人形机器人关节驱动用精密丝杠驱动模组可靠性试验方法

Reliability test method for precision lead screw drive modules used in humanoid robot joint drive

（征求意见稿）

XXXX－XX－XX 发布　　XXXX－XX－XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会　　发 布

# 目　　次

前言 ..... II
1 范围 ..... 1
2 规范性引用文件 ..... 1
3 术语和定义 ..... 1
4 基本要求 ..... 2
4.1 试验方案与样本 ..... 2
4.2 试验条件与设备 ..... 2
4.3 寿命计量与维护 ..... 2
5 试验方法 ..... 3
5.1 准备与初始检测 ..... 3
5.2 性能检测 ..... 3
5.3 耐久试验 ..... 4
5.4 静态承载试验 ..... 4
5.5 环境适应性试验 ..... 4
5.6 试后检查 ..... 5
5.7 加速寿命试验 ..... 5
6 失效判定与结果评价 ..... 6
6.1 失效判据 ..... 6
6.2 结果记录 ..... 6
6.3 可靠度评价 ..... 7
7 试验报告 ..... 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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件首次发布。

# 人形机器人关节驱动用精密丝杠驱动模组可靠性试验方法

## 1 范围

本文件规定了人形机器人关节用精密丝杠副的可靠性试验条件、试验方法、失效判定和结果评价方法。

本文件适用于人形机器人关节用滚珠丝杠副和行星滚柱丝杠副的可靠性试验。

## 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 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温

GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温

GB/T 2423.3 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验

GB/T 5080.1 可靠性试验 第1部分：试验条件和统计检验原理

GB/T 17587.3 滚珠丝杠副 第3部分：验收条件和验收检验

GB/T 17587.5 滚珠丝杠副 第5部分：轴向额定静载荷和动载荷及使用寿命

GB/T 17248.2 声学 机器和设备发射的噪声 在一个反射面上方可忽略环境修正的近似自由场测定工作位置和其他指定位置的发射声压级

GB/T 34986 产品加速试验方法

JB/T 12604 行星滚柱丝杠副

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

**精密丝杠副 precision screw assembly**

由丝杠、螺母、滚动体及实现传动所需的配套零件组成，利用螺旋传动实现旋转运动与直线运动转换，并具有规定行程精度、轴向间隙或预紧特性的机械传动组件。

3.2

**轴向间隙 axial play**

丝杠与螺母的相对角位置保持不变时，两者之间由配合间隙形成的总相对轴向自由位移量。

注：轴向间隙不包括外加载荷引起的弹性变形及试验装置的位移。

3.3

**预紧 preload**

通过结构调整、滚动体尺寸匹配或螺母组合等方式，在未施加外部工作载荷时，使丝杠副内部接触部位承受的预先载荷。

3.4

**工作循环 operating cycle**

按规定顺序完成各运行阶段并返回规定起始状态的一组操作。

注：定行程往复运动中，从起始位置运行至另一端再返回起始位置为1个工作循环。

3.5

**目标寿命 target life**

在规定载荷、运动、环境和维护条件下，要求丝杠副在达到失效判据前完成的工作循环数、累计运行距离、累计相对转数或运行时间。

## 4 基本要求

### 4.1 试验方案与样本

4.1.1 试验方案应按 GB/T 5080.1 的原则在试验前确定，至少包括：

a) 受试件型号、结构、规格、预紧状态、样本数量及来源；
b) 安装方式、轴向载荷、速度、行程、工作循环及环境条件；
c) 润滑剂、初始加注质量或体积、允许维护项目及周期；
d) 目标寿命、检测项目、检测节点、性能限值和失效判据；
e) 需要统计验证时的可靠度要求、置信水平及接收准则。

4.1.2 载荷和运动条件应依据目标关节的实测数据或经验证的计算确定，覆盖实际存在的正反向受载、短行程、频繁换向、峰值载荷和受载停歇工况。

4.1.3 样本应具有代表性和唯一标识。同一结构及试验方案的工程耐久试验样本宜不少于 3 件；需要证明规定可靠度时，样本数量应按统计方案确定。不同结构或不同载荷谱的样本不应直接合并统计。

4.1.4 滚珠丝杠副的载荷额定值和滚动接触疲劳计算寿命应按 GB/T 17587.5 核查。其他类型应采用与其结构和接触形式相适应的依据，不应直接套用滚珠丝杠副的寿命公式。

4.1.5 性能限值应根据关节功能要求和产品技术文件确定，包括必要的初始限值、使用限值及允许退化量。限值应在试验前确认，不应根据试验结果放宽。

### 4.2 试验条件与设备

#### 4.2.1 环境条件

除另有规定外，运行试验的环境温度应为15 ℃~35 ℃，相对湿度应为25%~75%，大气压力应为86 kPa~106 kPa。间隙和行程精度的前后对比测量应在（20±2）℃、试样温度稳定后进行。

#### 4.2.2 试验装置

试验装置应能够复现规定的载荷和运动过程，并具备载荷、位移、转速、转矩、温度测量及循环计数功能。试验装置应具有超载、超温和超行程保护，安装时应避免引入未规定的径向载荷和弯矩。

#### 4.2.3 测量仪器

试验用仪器应经校准或检定并处于有效期内。载荷、转矩和转速测量的示值误差应不超过读数的±1%，温度测量误差应不超过±1 ℃。位移测量精度应满足试验结果判定要求。

#### 4.2.4 参数控制与数据采集

稳态载荷和速度偏差应不超过设定值的±5%。动态试验时，应对载荷峰值、持续时间及换向等关键参数进行控制和记录，数据采集应能反映载荷和运动过程的主要变化。

### 4.3 寿命计量与维护

#### 4.3.1 寿命计量

4.3.1.1 应明确寿命判定的主计量单位，并记录工作循环数、累计运行距离、累计相对转数和运行时间。正、反向转数均按绝对值累计，受载停歇时间应单独记录。

4.3.1.2 有效导程恒定、定行程往返一次为 1 个工作循环时，累计相对转数按式（1）计算：

$$N_r = \frac{2sN_c}{l_e} \quad (1)$$

式中：

$N_r$——累计相对转数，单位为转（r）；

$s$——单程行程，单位为毫米（mm）；

$N_c$——工作循环数；

$I_e$——有效导程，即丝杠与螺母每相对转动1转产生的轴向位移的绝对值，单位为毫米每转（mm/r）。

4.3.1.3　存在滑移或不完整循环时，应根据实测转角和位移确定累计相对转数。

### 4.3.2　润滑与维护

试验期间不应补充或更换润滑剂，产品技术协议另有明确约定的除外。允许补充或更换时，应预先规定周期、用量和方法并记录实施情况。连续供油条件应在试验前确定。声明目标寿命内无需补充润滑的产品，试验期间不应补充润滑。

## 5　试验方法

### 5.1　准备与初始检测

5.1.1　试验前应核对受试件及技术资料，检查外观、密封和紧固状态，并按规定安装、磨合。采用产品规定的润滑脂或润滑油，记录牌号及加注量；试验期间的润滑按 4.3.2 执行。磨合是否计入寿命应预先明确。

5.1.2　按 5.2 进行初始性能检测，结果应符合预定要求。初始检测不合格的受试件及其处置情况应记录。

5.1.3　试验前、中间检测和试验后的测量应采用相同方法和条件，不应调整预紧或润滑状态以恢复性能。按 4.3.2 进行维护时，应统一检测与维护的先后顺序。

### 5.2　性能检测

#### 5.2.1　轴向间隙与预紧保持性

5.2.1.1　在丝杠与螺母相对角位置保持不变的条件下，沿正、反方向施加规定轴向载荷，测量相对轴向位移。应在有效行程内不少于 3 个位置进行测量，每个位置重复测量不少于 3 次。

5.2.1.2　轴向间隙应按适用产品标准规定的方法测定。采用载荷—位移曲线法时，应考虑弹性变形及试验装置位移的影响。

5.2.1.3　预紧保持性可结合载荷—位移特性和规定转速下的空载运行转矩进行评价，并记录试验前后的变化量。

#### 5.2.2　行程精度

需要评价行程精度退化时，滚珠丝杠副按GB/T 17587.3进行测量，行星滚柱丝杠副按JB/T 12604进行测量。其他类型丝杠副应按试验前确定的方法进行测量。

#### 5.2.3　转矩与传动效率

5.2.3.1　在规定的载荷、速度、温度和润滑条件下，分别测量正、反两个方向的起动转矩和运行转矩，每个方向测量不少于 3 次。起动转矩取连续运动前的峰值，运行转矩取稳定运行阶段的平均值和最大值。

5.2.3.2　需要评价传动效率时，应同步测量输入机械功率和输出机械功率。旋转输入、直线输出时，稳态传动效率按式（2）计算：

$$\eta = \frac{|F \times v|}{|T \times \omega|} \times 100\% \cdots\cdots (2)$$

式中：

$\eta$——传动效率，%；

$F$——输出轴向力，单位为牛顿（N）；

$v$——输出线速度，单位为米每秒（m/s）；

$T$——输入转矩，单位为牛顿米（N·m）；

$\omega$——输入角速度，单位为弧度每秒（rad/s）。

5.2.3.3　式（2）的输入功率应非零，且不适用于加速、减速、换向及静止保持阶段。反向驱动时，应按实际输出机械功率与输入机械功率之比计算。

#### 5.2.4 温度与噪声

##### 5.2.4.1 温度与温升测量

5.2.4.1.1 应在螺母主要承载区附近设置固定表面测温点，同步测量表面温度和不受局部热源影响的环境温度。温升为同一时刻两者之差。试验前温度稳定后记录初始温度，运行中记录最高表面温度和最大温升。

5.2.4.1.2 试验前后表面温度变化量为结束时与初始时同一测点表面温度之差,应同时记录环境温度，不应直接替代温升。结束温度宜在停机前测量；停机后测量时，应记录时间间隔。

##### 5.2.4.2 噪声测量

噪声作为评价项目时，A计权发射声压级应按GB/T 17248.2测量。前后对比测点宜保持一致，测量时段宜覆盖不少于10个完整循环且不少于30 s。应控制辅助设备噪声并进行背景修正；无法区分声源时，应注明为试验台组合噪声。

### 5.3 耐久试验

#### 5.3.1 试验实施

按4.1确定的载荷和运动条件重复运行至目标寿命或达到失效判据。存在短行程、频繁换向等工况时，应纳入试验循环。

#### 5.3.2 监测与中间检测

5.3.2.1 运行过程中应监测载荷、位移、速度、转矩和温度，并记录累计寿命量及异常事件。中间检测宜在目标寿命的 10%、25%、50%和 75%处进行，必要时可增加检测节点。

5.3.2.2 中间检测按 5.2 进行，润滑与维护按 4.3.2 执行。不应通过计划外补充润滑、调整预紧或更换零件恢复性能后，继续计为无失效运行。

#### 5.3.3 试验结束

达到目标寿命或试验终止后，应复测性能，并按5.6进行检查。完成规定运行距离不应等同于完成相同年限的贮存寿命或日历寿命验证。

### 5.4 静态承载试验

#### 5.4.1 加载试验

在规定支承条件下约束受试件旋转，沿实际受力方向逐级加载至最大静态工作载荷或规定验证载荷，并记录载荷与相对轴向位移。每一适用方向保持时间不应少于60 s。

#### 5.4.2 试后检查

卸载并恢复至规定检测状态后，应检查残余变形、裂纹、轴向间隙或载荷换向位移，以及起动转矩和运行转矩，结果应符合预定限值。

### 5.5 环境适应性试验

#### 5.5.1 试验条件

低温、高温和恒定湿热试验分别按GB/T 2423.1、GB/T 2423.2和GB/T 2423.3进行。工作试验和贮存试验应分别进行，试验严酷程度应与产品声明的使用条件相适应。试验条件可参照表1选取。

**表 1 环境试验条件选取参考**

| 试验项目 | 温度或湿度 | 持续时间 | 试样状态 |
|---|---|---|---|
| 低温工作 | -20 ℃ | 稳定后4 h | 规定载荷、行程、速度及工作制 |
| 高温工作 | 80 ℃ | 稳定后4 h | 规定载荷、行程、速度及工作制 |
| 低温贮存 | -40 ℃ | 稳定后16 h | 非运行，按声明贮存状态 |
| 高温贮存 | 100 ℃ | 稳定后16 h | 非运行，按声明贮存状态 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 恒定湿热 | （40±2）℃、相对湿度（93±3）% | 48 h | 非运行；需评价运行能力时另行规定 |

#### 5.5.2 工作试验

工作试验应明确载荷、行程、速度及工作制。低温试验时应先进行起动检查，再按规定工况运行；高温试验时应监测试样温度及润滑、密封状态。持续时间从规定温度稳定后开始计算。

#### 5.5.3 贮存与湿热试验

贮存试验应按产品声明的贮存和润滑状态进行，试验过程中不施加工作载荷。恒定湿热试验应记录试样表面腐蚀及润滑状态。

#### 5.5.4 试后检查

环境试验结束并恢复至规定条件后，应检查外观、密封和润滑状态，并进行起动及适用性能复测。

### 5.6 试后检查

#### 5.6.1 检查内容

完成性能复测后，应检查丝杠、螺母、滚动体、循环或同步机构、预紧结构、密封及润滑部位，必要时进行拆解检查，重点检查滚道或螺纹工作表面的磨损、压痕、剥落、裂纹及其他异常损伤。

#### 5.6.2 结果判定

试后检查发现受试件达到6.1规定的失效判据时，应判定为失效，不应记为全程无失效。

### 5.7 加速寿命试验

#### 5.7.1 一般要求

需要缩短试验周期时，可按GB/T 34986开展加速寿命试验。加速条件与4.1规定的使用条件下的失效机理应保持一致，加速模型及参数应经验证。未经验证的试验不应用于定量外推寿命或可靠度。

#### 5.7.2 试验方案与加速条件

试验方案应明确基准使用条件、加速应力及水平、样本分配、加速模型、检测节点和终止准则。拟合模型时应设置多个应力水平。

可选用提高轴向载荷、循环频次或温度的方式。应核查承载能力、转速、温升及润滑和密封的适用范围，保留影响失效的短行程、换向和受载停歇工况。

#### 5.7.3 加速因子

加速因子为同一失效机理、同一可靠度水平下基准使用条件寿命与加速条件寿命之比，两者应采用相同计量单位。

##### 5.7.3.1 轴向载荷加速因子

无预紧、单向恒载且其他条件相同，滚动接触疲劳寿命经验证符合逆幂律模型时，加速因子按式（3）计算。

$$A_F = \left(\frac{F_a}{F_u}\right)^m \quad (3)$$

式中：

$A_F$——轴向载荷加速因子；

$F_a$——加速试验条件下的轴向载荷大小，单位为牛顿（N）；

$F_u$——基准使用条件下的轴向载荷大小，单位为牛顿（N）；

m——载荷—寿命模型指数，大于0。

注：滚珠丝杠副可依据GB/T 17587.5—2008的7.2.1.1取m=3；其他类型应标定m。预紧、双向或变载荷工况应按实际承载状态及经验证的寿命模型计算加速因子。

#### 5.7.3.2 温度加速因子

润滑剂或密封材料的恒温热老化经验证符合阿伦尼斯模型时，温度加速因子按式（4）计算。应采用被考核部位的实际温度；采用箱温替代时，应验证其对应关系。

$$A_T = \exp\left[\left(\frac{E_a}{k}\right)\left(\frac{1}{T_u}-\frac{1}{T_a}\right)\right] \cdots\cdots (4)$$

式中：

$A_T$——温度加速因子；

$E_a$——与材料及考核失效机理相对应的激活能，单位为电子伏特（eV）；

k——玻尔兹曼常数，取$8.617\times10^{-5}$ eV/K；

$T_u$、$T_a$——分别为基准使用条件和加速试验条件下被考核部位的绝对温度，单位为开尔文（K）。

#### 5.7.3.3 循环频次及组合加速

仅提高循环频次且单循环损伤等效时，试验时间压缩因子为加速频次与基准频次之比。循环数和运行距离按实测值记录，不应按该比值放大。

组合加速应验证因素间的交互影响及模型适用性；不同失效机理的加速因子不应直接相乘。

### 5.7.4 试验实施

按5.1和4.3.2完成准备及润滑，按方案施加加速条件，记录实际应力、累计寿命量及异常事件。中间检测应恢复规定条件并按5.2进行，检测及恢复时间不计入加速运行时间。

达到终止准则或失效判据时，应停止试验并按5.6检查。失效机理改变时，不应继续采用原加速因子换算寿命。

### 5.7.5 数据处理与评价

基准与加速条件下的寿命分布经验证仅尺度不同，且加速因子恒定时，等效寿命量按式（5）计算。

$$L_{eq} = A \times L_a \cdots\cdots (5)$$

式中：

$L_{eq}$——基准使用条件下的等效寿命量；

$A$——与考核失效机理和寿命计量单位相对应的经验证加速因子；

$L_a$——加速条件下实测的寿命量。

注：两种寿命量应采用相同单位。温度加速按时间计量；变应力数据应采用经验证的模型处理。未失效样本按截尾数据记录。

## 6 失效判定与结果评价

### 6.1 失效判据

出现下列任一情况时，应判定为失效：

a) 丝杠、螺母或关键承载件断裂、开裂，或发生导致承载能力丧失的损伤；

b) 在规定驱动能力和载荷条件下发生卡死、传动中断或不能完成规定行程；

c) 滚动体、循环或同步机构损坏、脱出，或滚动接触部位发生疲劳剥落；

d) 轴向间隙、预紧保持性、行程精度、转矩、传动效率、温度或噪声等规定项目达到失效限值；

e) 润滑、密封或自润滑功能失效，或需进行超出预定维护范围的调整、修理或更换才能恢复功能。

### 6.2 结果记录

#### 6.2.1 寿命与失效记录

应逐件记录完成的寿命量、性能变化和失效情况。失效寿命按首次达到失效判据时的寿命量确定；仅能确定失效发生区间时，应记录该区间。

#### 6.2.2 未失效样本记录

达到目标寿命且未失效的样本，应记录为完成目标寿命，不应将目标寿命作为实际失效寿命。提前终止且未失效的样本，不应计为完成目标寿命。

#### 6.2.3 异常情况记录

试验过程中的异常、维护和停机情况均应记录。经确认与受试件无关且未改变受试件状态的设备故障可予以排除；原因不能确定时，不应据此判定通过无失效验证。

### 6.3 可靠度评价

#### 6.3.1 评价要求

进行可靠度验证时，样本应相互独立并代表同一产品总体，按预定统计方案进行评价。仅开展少量样件工程试验时，应报告样件试验结果，不应据此直接证明产品总体可靠度。

#### 6.3.2 零失效评价

采用二项分布零失效定寿命方案，全部预定有效样本均完成相同目标寿命且无失效时，目标寿命处可靠度的单侧置信下限按式（6）计算：

$$R_l = (1-\gamma)^{1/n_s} \cdots\cdots (6)$$

式中：

$R_l$——目标寿命处可靠度的单侧置信下限；

$\gamma$——单侧置信水平，$0<\gamma<1$；

$n_s$——完成目标寿命的独立有效样本数。

#### 6.3.3 结果判定

$R_l$不低于预定可靠度要求时，可判定满足相应可靠度要求。样本数量应在试验前根据可靠度要求和置信水平确定。

**注：**可靠度要求为95%、单侧置信水平为95%时，零失效方案所需独立有效样本数不少于59件。

#### 6.3.4 样本有效性

不应删除失效或提前退出记录，也不应将同一样本的多个工作循环作为多个独立样本。出现失效时，原零失效接收方案不通过。

## 7 试验报告

试验报告应至少包括：

a) 试验依据、日期、单位及受试件型号、结构、批次、数量和标识；
b) 试验装置、载荷、运动、环境、润滑和维护条件；
c) 目标寿命、检测项目、性能限值及判定规则；
d) 初始、中间和最终检测结果，累计寿命量、异常、维护及失效记录；
e) 试后检查结果、统计方法、评价结论及适用范围；
f) 加速试验的应力条件、模型及参数依据、失效机理验证结果、实测与等效寿命量及不确定性。