ICS 25.040.30
CCS J 51

团　　体　　标　　准

T/CEATEC XXX—XXXX

人形机器人灵巧手用微型丝杠传动组件技术要求及试验方法

Technical requirements and test methods for miniature screw transmission assemblies for humanoid robot dexterous hands

（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 技术要求 2
4.1 一般要求 2
4.2 材料与表面质量 2
4.3 结构与尺寸 2
4.4 传动精度 2
4.5 轴向间隙与预紧 2
4.6 传动效率 2
4.7 启动与反驱性能 3
4.8 运动能力与温升 3
4.9 承载能力 3
4.10 轴向静刚度 3
4.11 耐久性能 3
5 试验方法 3
5.1 试验条件 3
5.2 材料与表面质量 4
5.3 结构与尺寸 4
5.4 传动精度 4
5.5 轴向间隙与预紧 5
5.6 传动效率 5
5.7 启动与反驱性能 5
5.8 运动能力与温升 6
5.9 承载能力 6
5.10 轴向静刚度 6
5.11 耐久性能 6
5.12 试验报告 6

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。

人形机器人灵巧手用微型丝杠传动组件技术要求及试验方法

1 范围

本文件规定了人形机器人灵巧手用微型丝杠传动组件的技术要求，描述了相应的试验方法。

本文件适用于人形机器人灵巧手用、丝杠公称直径不大于8 mm的微型丝杠传动组件（以下简称传动组件），包括滚珠丝杠传动组件和行星滚柱丝杠传动组件。

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 230.1 金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法

GB/T 4340.1 金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法

GB/T 17587.1 滚珠丝杠副 第1部分：术语和符号

GB/T 17587.2 滚珠丝杠副 第2部分：公称直径、公称导程、螺母尺寸和安装螺栓 公制系列

GB/T 17587.3 滚珠丝杠副 第3部分：验收条件和验收检验

GB/T 17587.4 滚珠丝杠副 第4部分：轴向静刚度

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 33362 金属材料 硬度值的换算

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

微型丝杠传动组件 miniature screw transmission assembly

以丝杠公称直径不大于8 mm的滚珠丝杠副或行星滚柱丝杠副为核心，适于灵巧手紧凑安装并实现旋转运动与直线运动转换的机械传动组件。

注：丝杠副为传动组件的核心部件；传动组件还包括规定机械边界内按结构配置的支承、连接、导向和密封等零部件。

3.2

轴向间隙 axial play

丝杠与螺母的相对角位置保持不变时，规定机械边界内由配合间隙形成的总相对轴向自由位移量。

注：传动组件轴向间隙按规定机械边界测量，不包括弹性变形及试验装置位移。

[来源：GB/T 17587.1—2017，2.2.2.7,有修改]

3.3

启动转矩 starting torque

在规定温度、安装、润滑、预紧和轴向载荷条件下，使静止的传动组件开始连续相对运动所需的最大输入转矩。

3.4

反驱力 backdriving force

旋转端可自由转动时，从直线运动端沿轴向施加，使传动组件由静止开始连续反向传动所需的最小轴向力。

注：反向传动是由直线运动端向旋转端传递动力。

4 技术要求

4.1 一般要求

4.1.1 传动组件应符合产品图样和技术文件。技术文件应明确传动型式、单螺母或双螺母结构、预紧状态、支承方式，以及输入端至输出端的机械边界。

4.1.2 技术文件应规定下列参数、性能限值及适用工况，并在试验前确定验收值：

a) 公称直径、公称导程、有效行程及安装尺寸；
b) 连续轴向载荷、峰值轴向载荷及其允许持续时间；
c) 允许的载荷与速度组合、加速度、换向频率及工作占空比；
d) 行程精度、最大绝对位置偏差、单向重复定位极差、轴向间隙、预紧状态及轴向静刚度；
e) 传动效率、启动转矩，以及适用时的反驱力和断电保持性能；
f) 工作温度范围、最高允许温度、允许温升、润滑方式及维护周期；
g) 规定工作任务谱下的耐久寿命和寿命终止限值。

4.1.3 传动组件应运行平稳，无卡滞、爬行和异常冲击，运行转矩波动应符合产品规定。

4.1.4 传动组件应按经验证的程序跑合。跑合后的轴向间隙及空载运行转矩应符合产品规定。

4.2 材料与表面质量

4.2.1 主要承载零件的材料、热处理或表面处理状态应在技术文件中规定，并满足规定载荷和寿命要求。

4.2.2 应分别规定丝杠、螺母及滚动体承载接触面的硬度和热处理要求；采用表面硬化工艺时，还应规定有效硬化层深度。

4.2.3 材料、热处理或表面处理工艺变更时，应验证其承载及耐久性能。

4.2.4 承载工作面不应有裂纹、剥落及影响性能的烧伤、锈蚀、划伤和毛刺；表面处理层不应有影响使用的脱落和起皮。

4.3 结构与尺寸

4.3.1 传动组件的丝杠公称直径、公称导程、有效行程、螺母和轴端尺寸及安装接口应符合产品图样。滚珠丝杠副采用标准系列尺寸时，应符合 GB/T 17587.2 的规定。

4.3.2 在全部有效行程内，传动组件不应发生干涉或螺母脱离。滚珠丝杠传动组件不应出现滚珠堵塞、脱出或循环失效；行星滚柱丝杠传动组件不应出现脱啮、同步失效或影响传动的滚柱窜动。

4.3.3 连接与支承部位应定位可靠并采取防松措施。传动组件应保留规定的安全余程，不应以循环、保持或同步机构作为机械限位。径向载荷、弯矩及偏心轴向载荷不应超过产品允许值。

4.4 传动精度

4.4.1 传动组件中，滚珠丝杠副的行程精度应按 GB/T 17587.3 确定，精密定位用宜采用 5 级或更高精度等级；行星滚柱丝杠副的行程精度按 JB/T 12604 确定。采用其他等级标识时，应明确其依据及验收允差。

4.4.2 传动组件装配后的最大绝对位置偏差和单向重复定位极差应符合产品限值，并按 5.4.2 检验。

4.4.3 短行程传动组件应按实际有效行程评价，并检验其丝杠副适用的单转行程变动量；有效行程不足一转时，按实际可用转角评价。

4.5 轴向间隙与预紧

4.5.1 传动组件轴向间隙应符合产品规定的限值，并满足 4.4.2 的定位要求。

4.5.2 采用预紧的传动组件应规定预加载荷或经验证的替代检验参数、有效载荷范围、空载运行转矩及其波动限值。预紧不应使启动转矩、温升或传动效率超出规定限值。

4.6 传动效率

4.6.1 传动组件应规定机械边界、温度、润滑及预紧状态，以及对应载荷和速度下的效率限值。

4.6.2　两个运动方向的稳态机械传动效率均应符合规定限值，以各次有效测量结果的最小值判定。
4.6.3　有反驱效率要求时，应从直线端输入动力单独检验，并规定相应限值。

4.7　启动与反驱性能

4.7.1　在规定温度和轴向载荷下，传动组件正、反两个运动方向的启动转矩均不应超过产品限值。
4.7.2　有反驱要求的传动组件应规定反驱力限值及旋转端连接状态。反驱启动后应运行平稳，无卡滞、爬行和异常冲击。
4.7.3　有断电保持要求的传动组件应规定保持方式、最大保持轴向载荷、保持时间及允许位移；实测位移不应超过限值。制动器的保持能力不应作为传动组件中丝杠副的自锁性能。

4.8　运动能力与温升

4.8.1　传动组件应在规定载荷与速度组合、加速度和换向频率下正常运行，并在最短工作行程及最小工作速度下平稳运动和换向。最高转速应符合规定支承条件下的允许值。
4.8.2　传动组件最高温度和温升不应超过产品规定值及材料、润滑剂和密封件的允许值。
4.8.3　间歇工作的传动组件应按规定占空比评价；不应将分别允许的最大载荷、最大速度和最高换向频率直接组合为同一工况。

4.9　承载能力

4.9.1　传动组件中，滚珠丝杠副的基本额定静载荷和基本额定动载荷应按 GB/T 17587.5 确定；行星滚柱丝杠副应给出额定载荷及其计算或验证依据。
4.9.2　应根据最大等效静载荷、预加载荷及启停冲击选择静安全系数，并校核轴端、螺母、支承和连接件的承载能力。丝杠受压时，应按危险截面、最大有效受压长度及支承方式校核稳定性。
4.9.3　在规定连续或峰值轴向载荷及其持续时间作用后，传动组件不应出现裂纹、连接松动或功能失效；卸载后的残余位移、传动精度和轴向间隙应符合产品限值。

4.10　轴向静刚度

4.10.1　传动组件应规定安装状态、加载方向、加载区间及相应的轴向静刚度限值。实测结果应包括机械边界内丝杠、螺母、支承及连接部位的变形。
4.10.2　滚珠丝杠副自身的轴向静刚度采用计算方法确定时，应按 GB/T 17587.4 执行；行星滚柱丝杠副采用计算方法时，应提供模型及验证依据。局部接触刚度不应代替传动组件的实测刚度。

4.11　耐久性能

4.11.1　传动组件应规定与灵巧手使用工况对应的目标寿命，以累计运行距离、总转数或往复循环次数表示，并明确载荷、行程、速度、换向频率、占空比及润滑条件。
4.11.2　达到目标寿命后，主要零件不应断裂或发生功能失效，承载工作面不应有影响使用的损伤；轴向间隙、传动精度、启动转矩和传动效率应符合预定的寿命终止限值。有反驱或断电保持要求时，相应功能仍应符合规定。
4.11.3　传动组件中滚珠丝杠副的基本额定寿命可按 GB/T 17587.5 计算；计算寿命不应代替传动组件在规定短行程往复工况下的耐久试验。

5　试验方法

5.1　试验条件

5.1.1　除精度试验或另有规定外，环境温度为（20±5）℃；试样达到温度平衡后试验。传动组件中滚珠丝杠副的精度试验条件按 GB/T 17587.3 执行。
5.1.2　试样按规定支承、安装、润滑及预紧状态装配，并按 5.1.5 进行跑合。试验工况和验收限值按 4.1.2 确定。
5.1.3　测量仪器应经校准或检定，分辨力及测量不确定度应满足判定要求。外部装置引入的摩擦、间隙、变形及偏心影响应修正或计入测量不确定度。
5.1.4　启动及适用的反驱、断电保持试验应覆盖常温和声明工作温度的上下限，并在试样温度稳定后

进行；存在更不利中间温度时，应增加相应温度点。

5.1.5 跑合应符合下列规定：

a) 跑合前应检查装配、清洁和润滑状态。跑合程序应规定各级载荷、转速、行程、时间或次数，以及转矩和温度稳定判据；

b) 应由低速轻载开始进行往复跑合，达到本级稳定判据后逐级加载，各级转速均应处于经验证的低速范围。不应采用大载荷、高速一次性跑合；

c) 跑合过程中应监测转矩、温度和运动状态；出现卡滞、异常冲击、转矩突增或温度超限时，应停止跑合并处理；

d) 跑合后应按规定清洁、润滑，并复测轴向间隙和空载运行转矩。跑合量应单独记录，不计入耐久试验寿命；已完成生产跑合的试样不应无依据地重复跑合。

注：跑合用于改善滚道及滚动体的微观接触状态，稳定预紧转矩，减小摩擦波动及早期磨损。

5.2 材料与表面质量

5.2.1 核查材料、热处理和表面处理质量证明文件，必要时复验。采用目视和适当放大观察检查表面缺陷。

5.2.2 硬度按 GB/T 230.1 测定；微小零件或薄硬化层不满足洛氏硬度试验条件时，按 GB/T 4340.1 测定维氏硬度，并采用预定的 HV 验收限值。需要换算时，按 GB/T 33362 确认适用性并注明换算结果。

5.2.3 有效硬化层深度按规定界限硬度和试验力，采用截面硬度梯度法测定。采用同批零件或经确认的代表性同炉试样；受损零件不应用于后续性能试验。结果应符合 4.2。

5.3 结构与尺寸

按图样基准测量尺寸和接口；低速运行至有效行程两端，检查安全余程、防松及循环、保持和同步机构。结果应符合 4.3。

5.4 传动精度

5.4.1 传动组件中，滚珠丝杠副按 GB/T 17587.3、行星滚柱丝杠副按 JB/T 12604 测量行程精度；短行程测量应符合 4.4.3。

5.4.2 传动组件定位性能按下列方法测量：

a) 在有效行程内设置不少于 5 个测点，覆盖两端附近和中部，测点不应全部处于相同丝杠转角相位。

b) 在规定载荷、速度和停留时间下，从两个运动方向到达各测点，每方向重复测量不少于 5 次。以同一位置及转角为零点，同步测量实际轴向位移和相对转角。

c) 未补偿的位置偏差按式（1）计算；位移与转角的正方向应按公称导程关系一致选取。

$$e_{ijs} = x_{ijs} - \frac{P_{h0}\theta_{ijs}}{2\pi} \quad (1)$$

式中：

e_{ijs}——第i测点、第s运动方向、第j次测量的位置偏差，单位为毫米（mm）；

x_{ijs}——对应的实际轴向位移，单位为毫米（mm）；

P_{h0}——公称导程，单位为毫米（mm）；

θ_{ijs}——丝杠与螺母自共同基准起的实际相对转角，单位为弧度（rad）。

i、j分别为测点和重复测量序号；s表示正、反两个运动方向。

d) 最大绝对位置偏差和单向重复定位极差分别按式（2）和式（3）计算。各测点重复到位时的实际转角应一致，其残余差异应计入测量不确定度。

$$E_{max} = \max_{i,j,s}|e_{ijs}| \quad (2)$$

$$R_{uni} = \max_{i,s}[\max_{j}(x_{ijs}) - \min_{j}(x_{ijs})] \quad (3)$$

式中：

E_{max}——覆盖两个运动方向的最大绝对位置偏差，单位为毫米（mm）；

R_{uni}——各测点、各运动方向重复测量位移极差的最大值，单位为毫米（mm）。

5.5 轴向间隙与预紧

5.5.1 轴向间隙

5.5.1.1 保持丝杠与螺母的相对角位置不变，在有效行程两端附近和中部至少 3 个位置，测量规定机械边界内的轴向间隙。

5.5.1.2 在不损伤传动组件或破坏预紧的载荷范围内，进行正、反向准静态加载和卸载，每个位置不少于 3 次。按预定方法分离弹性变形和间隙位移，取轴向间隙最大值，按 4.5.1 判定。

5.5.2 预紧

5.5.2.1 核查预紧装配记录及规定检验参数；以空载运行转矩间接检验预紧时，其对应关系应经验证。

5.5.2.2 在规定转速、温度、润滑及无外部工作载荷条件下，测量两个运动方向的空载运行转矩，记录平均值、最大值、最小值及峰—峰值。测量应避开启动、加减速和换向区段，结果应符合 4.5.2。

5.6 传动效率

5.6.1 在规定机械边界处，同步测量轴向力、线速度、转矩和角速度。边界外装置的附加影响应修正，传动组件内部损耗应保留。

5.6.2 在规定载荷和速度下，分别测量两个运动方向的稳态区段，每个工况重复不少于 3 次。旋转端驱动时在直线端加载，反驱时在旋转端加载；负载应阻碍运动。测量不包括加减速、换向和静止阶段。

5.6.3 旋转端驱动和直线端反驱的效率分别按式（4）和式（5）计算。输入、输出功率按实际能量流向取正值，均应大于零。

$$\eta_r = \frac{\overline{F_{out}v_{out}}}{\overline{T_{in}\omega_{in}}} \times 100\% \quad \cdots\cdots (4)$$

$$\eta_b = \frac{\overline{T_{out}\omega_{out}}}{\overline{F_{in}v_{in}}} \times 100\% \quad \cdots\cdots (5)$$

式中：

η_r、η_b——旋转端驱动和直线端反驱的稳态机械传动效率，以百分数表示；

F——轴向力，单位为牛顿（N）；

v——线速度，单位为米每秒（m/s）；

T——转矩，单位为牛顿米（N·m）；

ω——角速度，单位为弧度每秒（rad/s）。

注：下标in、out分别表示输入和输出；上划线表示同一稳态区段内同步采样的瞬时功率的时间平均值。

转速以转每分（r/min）记录时，按式（6）换算为角速度，其中n为转速：

5.6.4 转速以转每分（r/min）记录时，按式（6）换算为角速度，其中 n 为转速：

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad \cdots\cdots (6)$$

式中：

η_r、η_b——旋转端驱动和直线端反驱的稳态机械传动效率，以百分数表示；

5.6.5 分别报告旋转端驱动和直线端反驱在各工况、各方向的效率及最小值，按 4.6 判定。不能形成可测稳态区段时，不应用本方法判定稳态效率合格。

5.7 启动与反驱性能

5.7.1 启动转矩

5.7.1.1 在 5.1.4 规定温度下，于有效行程两端附近和中部至少 3 个位置施加规定轴向载荷。静置规定时间后缓慢增加驱动转矩，以位移或角度确认开始连续运动，记录启动阶段转矩峰值，并排除加速惯性影响。

5.7.1.2 每个位置、每个方向测量不少于 3 次，报告最大值；静置时间、加载速率和运动识别阈值应一致并记录。结果应符合 4.7.1。

5.7.2 反驱力

5.7.2.1 旋转端在规定机械边界处自由转动，排除边界外电机、减速机构和制动器的阻力影响。在 5.7.1 规定的位置和温度下，从直线端缓慢增加轴向力，记录开始连续反驱时的力值；修正外部装置摩擦和重力分量。

5.7.2.2　每个位置、每个方向测量不少于 3 次，报告最大值，并检查运动状态。结果应符合 4.7.2。

5.7.3　断电保持

按规定温度、位置和载荷方向，使传动组件处于声明的断电及制动状态，施加最大保持轴向载荷，连续记录规定时间内的位移。分别记录加载即时位移和保持阶段位移变化，按预定判定口径与 4.7.3 的限值比较。

5.8　运动能力与温升

5.8.1　按规定连续及间歇工况运行，测量速度、加速度、换向频率及温度，并检查最短工作行程、最小工作速度和最高规定换向频率下的运动状态。

5.8.2　温度测点应包括螺母及预计温升最大的部位。连续工况运行至温度稳定，间歇工况运行至周期性温度状态稳定；稳定判据和试验持续时间应预先确定。温升为同一测点温度与同期环境温度之差。结果应符合 4.8。

5.9　承载能力

5.9.1　核查额定载荷、静安全系数、支承和连接强度及受压稳定性的计算或验证资料。按规定方式安装并约束旋转端转动，在最不利工作位置，沿适用方向分别施加连续轴向载荷和峰值轴向载荷，并保持规定时间。

5.9.2　测量加载前、加载中和卸载后的位移，检查裂纹及连接松动；解除约束后检查运动状态，复测轴向间隙和传动精度。结果应符合 4.9。

5.10　轴向静刚度

5.10.1　按规定支承和预紧状态安装传动组件，锁定丝杠与螺母的相对转动。在有效行程两端附近和中部至少 3 个位置分级加载和卸载，每个位置不少于 3 次；测量机械边界间的轴向位移，修正夹具变形，不应采用主动位置补偿。

5.10.2　在规定的同向工作载荷区间内，按式（7）计算区间轴向静刚度：

$$R_a = \frac{\Delta \mathrm{F}}{\Delta \delta} \cdots\cdots (7)$$

式中：

R_a——规定载荷区间的轴向静刚度，单位为牛顿每微米（N/μm）；

ΔF——同一加载或卸载分支上两载荷点的轴向力差，单位为牛顿（N）；

$\Delta\delta$——对应的轴向弹性位移差，单位为微米（μm）。

应报告位置、加载方向、载荷区间及加载和卸载曲线。计算应采用同一曲线分支，避开消隙区段，结果应符合 4.10。

5.11　耐久性能

5.11.1　预先确定试样数量、工作任务谱、目标寿命、检查间隔和寿命终止限值；测量初始轴向间隙、传动精度、启动转矩及效率。

5.11.2　按 4.11.1 规定的任务谱试验，包含产品规定的短行程往复和换向工况，记录累计寿命、温度、异常及润滑维护情况。除预定维护外，不应更换承载零件或调整预紧。

5.11.3　达到目标寿命或失效后停止试验。恢复至初始测量温度，在相同安装及测量条件下先复测性能，再检查承载工作面和循环、保持、同步机构。复测前不应通过清洗、补充润滑或调整预紧改善结果。按 4.11.2 判定，并逐件报告完成寿命及失效情况。

5.12　试验报告

试验报告应包括试样信息、传动组件型式及机械边界、工况及限值、仪器与测量不确定度、跑合及润滑状态、试验结果和结论、异常与维护记录，以及计算、修正、补偿方法和引用标准版本。效率试验还应注明动力传递方向及稳态采样区段。