



# 中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

## 机器人一体化关节性能及试验方法

Performance and related test methods of integrated joints for robots

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

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。



## 目 次

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	2
3 术语和定义 .....	2
4 单位 .....	6
5 试验条件 .....	6
5.1 试验环境 .....	6
5.2 试验设备 .....	6
6 性能测试 .....	7
6.1 试验一般要求 .....	7
6.2 机械性能 .....	8
6.3 电气性能 .....	11
6.4 控制性能 .....	13
附 录 A （资料性） 机器人一体化关节系统组成 .....	18
附 录 B （资料性） 环境适应性 .....	19
附 录 C （资料性） 试验建议项目 .....	25
附 录 D （资料性） 测试报告模板 .....	27
参 考 文 献 .....	1

## 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。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国机器人标准化技术委员会（SAC/TC 591）归口。

本文件起草单位：之江实验室、北京机械工业自动化研究所有限公司、苏州绿的谐波传动科技股份有限公司、浙江大学、上海节卡机器人科技有限公司、深圳市越疆科技有限公司、清能德创电气技术（北京）有限公司、杭州云深处科技有限公司、美的集团股份有限公司、上海电器科学研究所（集团）有限公司、上海非夕机器人科技有限公司、遨博（北京）智能科技股份有限公司、深圳市零差云控科技有限公司、杭州申昊科技股份有限公司、江苏开璇智能科技有限公司、浙江省计量科学研究院、中国计量大学、首都师范大学、成都瑞迪智驱科技股份有限公司、上海尚工机器人技术有限公司、深圳市同川科技有限公司、浙江环动机器人关节科技有限公司、重庆凯瑞机器人技术有限公司、库卡机器人（广东）有限公司。

本文件主要起草人：朱世强、谢安桓、储建华、黄晓艳、王健、许雄、刘培超、杨书评、李超、陈文杰、张磊、王世全、朱志昆、贾玺庆、孔令雨、华强、吴海腾、李健、陈元杰、王斌锐、邵振洲、李星、赵勇、沈晓龙、邵威、吴文镜、周伟刚、乔波、尹瑞多、张靖、李本旺、李建韬。

# 机器人一体化关节性能及试验方法

## 1 范围

本文件规定了机器人一体化关节（以下简称关节）的以下性能及试验方法：

- 反向启动转矩；
- 许用弯矩载荷；
- 启停容许转矩；
- 转动惯量；
- 机械刚度；
- 伺服静刚度；
- 背隙；
- 额定静制动力矩；
- 额定动制动力矩；
- 安全转矩关断；
- 额定转矩；
- 额定转速；
- 额定功率；
- 效率；
- 允许最高转速；
- 瞬时最大转矩；
- 工作电压范围；
- 转矩常数；
- 转矩密度；
- 功率密度；
- 绝缘电阻；
- 绝对定位精度；
- 重复定位精度；
- 正/负阶跃输入的位置响应时间；
- 正/负阶跃输入的转速响应时间；
- 正/负阶跃输入的转矩响应时间；
- 位置响应频带宽度；

- 转速响应频带宽度；
- 转矩控制精度；
- 旋转角度范围；
- 输出转速波动性；
- 输出转矩波动性；

本文件主要适用于协作机器人及腿足式机器人用一体化关节性能定义及其试验要求,其他一体化关节可供参考。对于某一具体关节的试验或性能评估,本文件并不规定其应选择的试验项目和性能指标要求。本文件所述的试验项目可用于分析和检验某个关节的指标,也可用于样机试验、定型试验或验收试验。

除有特殊说明外,本文件描述的性能参数均表示机器人一体化关节的性能。

## 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 39633-2020 协作机器人用一体式伺服电动机系统通用规范
- GB/T 38560-2020 工业机器人的通用驱动模块
- GB/T 12642-2013 工业机器人 性能规范及其试验方法
- GB/T 30549-2014 永磁交流伺服电动机 通用技术条件
- GB/T 30819-2014 机器人用谐波齿轮减速器
- GB/T 37718-2019 机器人用精密行星摆线减速器
- GB/T 35089-2018 机器人用精密齿轮传动装置 试验方法
- GB/T 16439-2009 交流伺服系统通用技术条件

## 3 术语和定义

GB/T 39633-2020、GB/T 38560-2020、GB/T 12642-2013、GB/T 30549-2014、GB/T 35089-2018和GB/T 16439-2009界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**一体化关节** integrated joint

由电机、减速器、位置检测传感器、电机驱动器等组成的具有独立功能的驱动模块。

[来源: GB/T 38560-2020, 3.2,有修改]

### 3.2

**反向启动转矩** backdriving torque

关节处于非制动条件下,缓慢扭转关节输出端至关节内电机启动瞬间所需的转矩。

[来源: GB/T 35089-2018, 3.3,有修改]

## 3.3

**允许最大轴向载荷** maximum permitted axial load

关节正常工作时，输出端轴向所能承受的最大载荷。

## 3.4

**允许最大径向载荷** maximum permitted radial load

关节正常工作时，输出端径向所能承受的最大载荷。

## 3.5

**许用弯矩载荷** maximum permitted moment load

关节正常工作时，输出端承受的径向载荷和偏心轴向载荷的力矩矢量和的最大值。

[来源：GB/T 37718-2019 3.14，有修改]

## 3.6

**启停容许转矩** start-stop allowable torque

启动和停止时关节容许的最大负载转矩。

## 3.7

**转动惯量** joint inertia

相对于转轴旋转中心的转子惯性矩。

注：包含电动机、减速器、制动器、编码器的旋转部分惯性矩。

[来源：GB/T 39633-2020 3.12]

## 3.8

**减速比** reduction ratio

关节内置减速器瞬时输入速度与输出速度的比值。

## 3.9

**机械刚度** mechanical stiffness

关节处于制动条件下，静态负载转矩和输出端切向弹性变形转角的比值。

## 3.10

**伺服静刚度** static servo stiffness

关节位置伺服模式使能且处于非制动条件下，静态负载转矩和输出端切向弹性变形转角的比值。

## 3.11

**背隙** backlash

关节处于制动条件下，输出端在±3%额定转矩作用下输出端的转角值之差。

[来源：GB/T 35089-2018 3.7，有修改]

## 3.12

**额定静制动力矩** static rated braking torque

关节处于制动条件下，关节输出端可以承载的最大静力矩。

[来源：GBT 34114-2017 3.12，有修改]

## 3.13

**额定动制动力矩** dynamic rated braking torque

关节处于非制动条件下，在额定转速下关节输出端可以承载的有效制动力矩。

[来源: GBT 34114-2017 3.13, 有修改]

3.14

**安全转矩关断 safety torque off**

在任何控制方式下, 关节处于空载、带载运行状态, 当安全转矩关断功能使能时, 关节关断主回路信号, 且不再输出转矩。

[来源: GB/T 39633-2020, 3.3]

3.15

**工作区 operating area**

工作区用转矩和转速特性曲线与坐标系围成的曲面表示, 如图1所示。

关节运行时温度不超过关节允许最高温度, 能长期工作的区域为连续工作区。图中处于“连续堵转转矩”、“额定转矩”和“允许最高转速”以内的工作区域(图1中无阴影区域), 它是由关节的发热、机械强度、以及关节内驱动器的极限工作条件限制的范围。

超出连续工作区, 允许关节短时过载运行的区域为断续工作区(图1中阴影区域)。

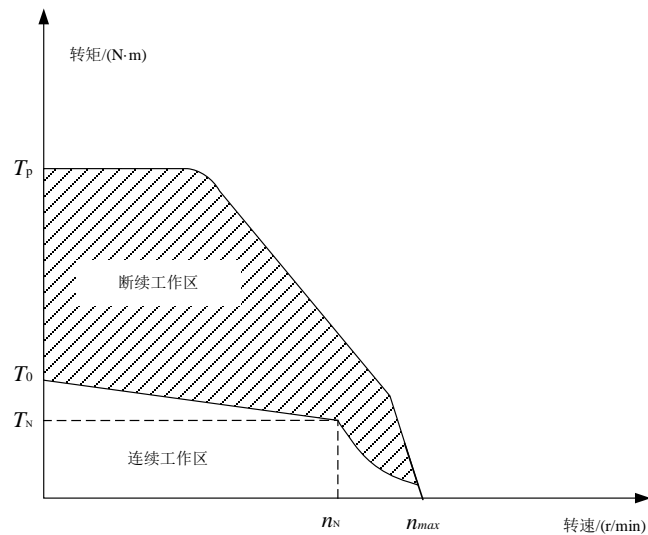


图1 工作区

说明:

$T_p$  —— 瞬时最大转矩;

$T_0$  —— 连续堵转转矩;

$T_N$  —— 额定转矩;

$n_{max}$  —— 允许最高转速;

$n_N$  —— 额定转速。

[来源: GB/T 30549-2014, 3.1, 有修改]

3.16

**额定功率 rated power**

在连续工作区内, 关节所输出的最大功率。



## 3.17

**额定转矩** rated torque

连续工作区下，关节输出最大功率时，所输出的最大转矩。

[来源：GB/T 30549-2014, 3.3, 有修改]

## 3.18

**额定转速** rated rotating speed

在连续工作区下，关节输出额定功率、额定转矩时的关节转速。

## 3.19

**效率** efficiency

在额定功率和额定转速下，关节达到热稳定后，关节输出功率与关节输入有功功率之比。

## 3.20

**允许最高转速** maximum permitted speed

在保证电气绝缘介电强度和机械强度条件下，关节所允许的最高输出转速。

## 3.21

**瞬时最大转矩** peak torque

关节断续工作区下，允许短时输出的最大转矩。

## 3.22

**工作电压范围** operating voltage range

关节额定工作时的实际所允许的电压范围值。

## 3.23

**转矩常数** torque constant

关节在额定功率和额定转速下，其输出转矩与电机线电流之比。

## 3.24

**转矩密度** torque density

额定工况下单位体积或单位重量上关节输出的转矩。

## 3.25

**功率密度** power density

额定工况下单位体积或单位重量上关节输出的功率。

## 3.26

**转矩控制精度** torque control accuracy

转矩实际值与转矩目标值的偏差占转矩目标值的百分比。

[来源：GB/T 18488.2-2015, 7.3, 有修改]

## 3.27

**旋转角度范围** range of rotation angle

关节能够运转的角度上限与下限之差。

## 3.28

**输出速度波动性** the output speed ripple

关节在稳态运行时，输出瞬时转速的最大值为 $n_{\max}$ ，最小值为 $n_{\min}$ ，则输出速度波动系数 $K_{fn}$ 为：

$$K_{fn} = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_{max} + n_{min}} \times 100\%$$

[来源：GB/T 21418-2008 3.32，有修改]

### 3.29

#### 输出转矩波动性 the torque ripple

关节在稳态运行时，对关节施加恒定负载，瞬时转矩的最大值为 $T_{max}$ ，最小值为 $T_{min}$ ，则输出转矩波动系数 $K_{fT}$ 为：

$$K_{fT} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} + T_{min}} \times 100\%$$

[来源：GB/T 21418-2008 3.33，有修改]

## 4 单位

除非另有规定，所有单位如下：

- 长度以米计..... (m)
- 角度以弧度或度计..... (rad) 或 (°)
- 时间以秒计..... (s)
- 质量以千克计..... (kg)
- 力以牛顿计..... (N)
- 转速以转每分计..... (r/min)
- 转矩以牛米计..... (N·m)
- 功率以瓦特计..... (W)
- 电压以伏特计..... (V)
- 电流以安培计..... (A)

## 5 试验条件

### 5.1 试验环境

若无其他规定，所有试验均应在下列气候条件下进行：

- 1) 环境温度：15℃~35℃；
- 2) 相对湿度：45%~75%；
- 3) 气压：86kPa~106 kPa

### 5.2 试验设备

#### 5.2.1 试验电源

直流试验电源的电压幅值波动应不大于±2%，纹波电压应不大于±1%；  
交流试验电源的电压幅值波动应不大于±5%，频率变化应不大于1%。

## 5.2.2 测量仪器

- 电压电流测量仪表，准确度等级应不低于 0.5 级；
- 功率分析仪，准确度等级不低于 0.5 级；
- 转矩测量仪器，准确度应不低于 0.5 级；
- 转速测量仪，误差应小于转速量程的  $\pm 0.1\%$  或小于  $1\text{r/min}$ ，取二者误差最小者；
- 频率表，准确度等级应不低于 0.1 级；
- 温度测量仪，示值误差为  $\pm 1^\circ\text{C}$ ；
- 角度传感器，准确度应不低于  $\pm 2$  弧秒；
- 测力计，准确度应不低于 1 级；
- 砝码，准确度应不低于 M3 等级；
- 电阻测量仪，准确度应不低于 0.2 级；
- 声级计，准确度应不低于  $\pm 1\text{dB}$ ；
- 尺寸测量设备。

## 6 性能测试

### 6.1 试验一般要求

测试前，需将关节水平固定在试验装置上，除有特殊说明外，测试装置如图2所示，检查试验环境应不受外界辐射及气流影响，各测试仪器设备是否正常。

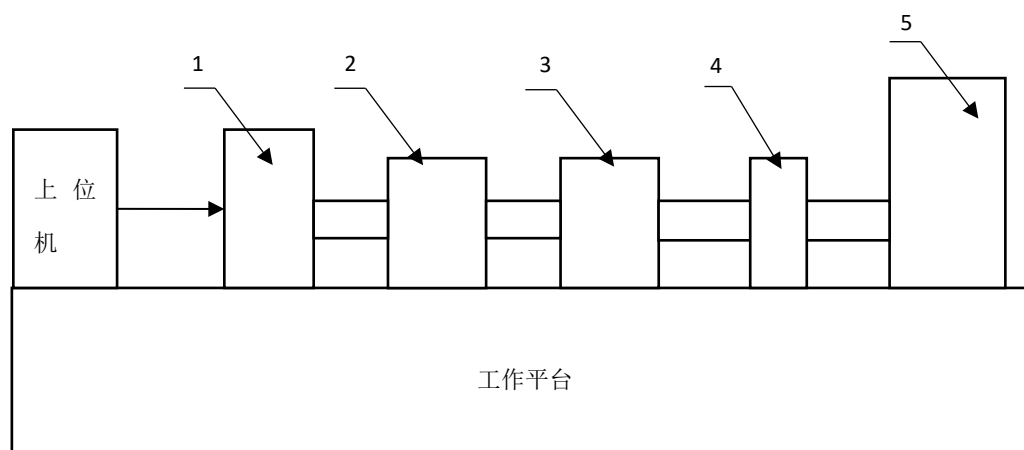


图2 试验装置及设备示意图

说明：

- 1——试验件；
- 2——角度传感器；

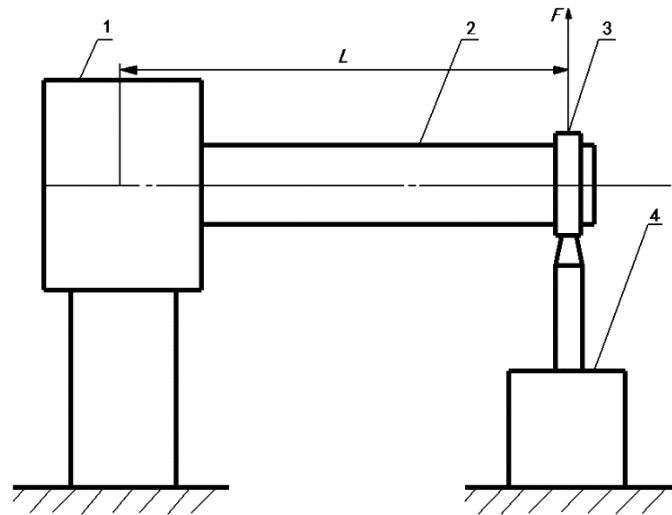
- 3——转矩转速传感器；
- 4——惯量盘；
- 5——加载系统。

## 6.2 机械性能

### 6.2.1 反向启动转矩

关节处于非制动条件下，从关节输出端施加缓慢、平稳的转矩，期间实时采集输出端转矩值和关节内电机角度值，电机角度开始变化时对应的转矩值即为反向启动转矩。

### 6.2.2 许用弯矩载荷



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3 弯矩载荷试验装置

弯矩载荷试验装置如图3所示，负载为梁柱，末端有加载装置。加载装置运行时能够加载/卸载，载荷稳定。被测样品应按要求安装。

关节在额定条件下运行，逐渐施加输出端弯矩至制造商规定的许用弯矩载荷值，检查关节是否运行正常。

### 6.2.3 启停容许转矩

在关节末端未施加负载条件下，运行至额定输出转速，逐渐施加输出端负载至制造商规定的启停容许转矩，运转10min，检查关节是否运行正常。

#### 6.2.4 转动惯量

当关节模块处于运行状态时，关节的输出力矩为负载力矩、摩擦力矩、转子惯性力矩之和，即如下公式所示：

$$T_O = T_L + B * \omega_m + J \frac{\Delta\omega_m}{\Delta t}$$

其中：

$T_O$  ——关节输出力矩，单位 N.m；

$T_L$  —— 负载力矩，单位 N.m；

$B$  —— 关节机械摩擦系数；N/rad/s；

$\omega_m$  ——关节机械角速度，单位 rad/s；

$J$  ——关节转子的转动惯量，单位  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ；

$\Delta t$  ——加速时间，单位 s。

空载情况下，设定关节模块转速  $n_1$ （单位r/min），待关节模块运行一段时间进入稳态后，通过驱动器读取关节模块输出力矩值  $T_{O1}$ ，可计算得关节模块机械摩擦系数，如下：

$$B = T_{O1} / \omega_m = \frac{30T_{O1}}{\pi n_1}$$

空载情况下，对关节进行加速控制，加速时间为  $\Delta t$ ，加速前后的转速差为  $n_t$ ，读取加速过程中关节模块输出力矩  $T_{O2}$  与转速  $n_s$  的关系曲线，通过关系曲线，选取一组相对应的输出力矩  $T_{O2}$  与转速  $n_s$ ，按照如下公式计算得关节转子转动惯量为：

$$J = (T_{O2} - \frac{n_s T_{O1}}{n_1}) / \frac{\pi n_t}{30 \Delta t}$$

如需提高惯量值精度，可取多组相对应的输出力矩  $T_{O2}$  与转速  $n_s$ ，算出J值，然后求均值。

#### 6.2.5 机械刚度

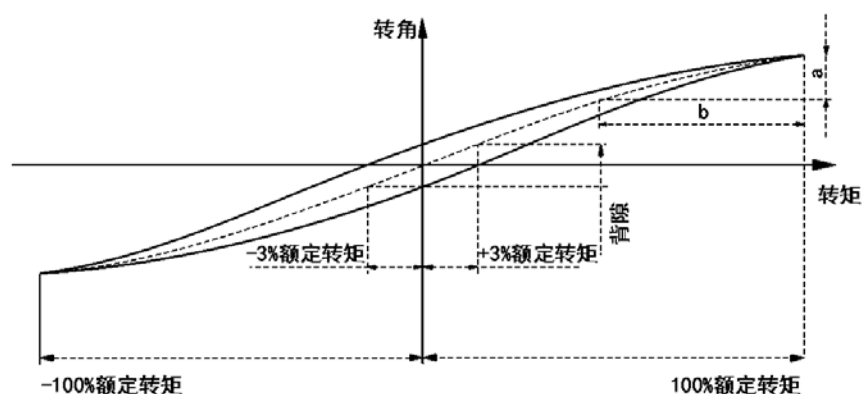


图4 机械刚度滞回特性曲线

本方法只针对内部具有制动器的关节。关节处于制动状态，将输入端固定，输出端加载，首先从0N·m开始沿一个方向缓慢加载到关节额定扭矩 $T_N$ ，再反方向缓慢加载到 $-T_N$ ，再正方向缓慢加载到关节 $T_N$ ，最后缓慢卸载，记录该过程中不同负载扭矩对应的输出端转角变化值，并绘制滞回特性曲线，如图4所示。滞回曲线中，负载扭矩与相应弹性变形转角的比值，图中 $b/a$ 即为机械刚度，其中 $b$ 为额定扭矩的一半， $a$ 为额定扭矩下转角与额定扭矩的一半转角差。

### 6.2.6 伺服静刚度

关节处于位置控制状态，如有制动器应将制动器处于非制动条件下，将输入端固定，输出端加载，首先从0 N·m开始沿一个方向缓慢加载到关节额定扭矩 $T_N$ ，再反方向缓慢加载到 $-T_N$ ，再正方向缓慢加载到关节额定扭矩 $T_N$ ，最后缓慢卸载，记录该过程中不同负载扭矩对应的输出端转角变化值，并绘制滞回特性曲线，如图5所示。滞回曲线中，负载扭矩与相应弹性变形转角的比值，图中 $b/a$ 即为机械刚度，其中 $b$ 为额定扭矩的一半， $a$ 为额定扭矩下转角与额定扭矩的一半转角差。

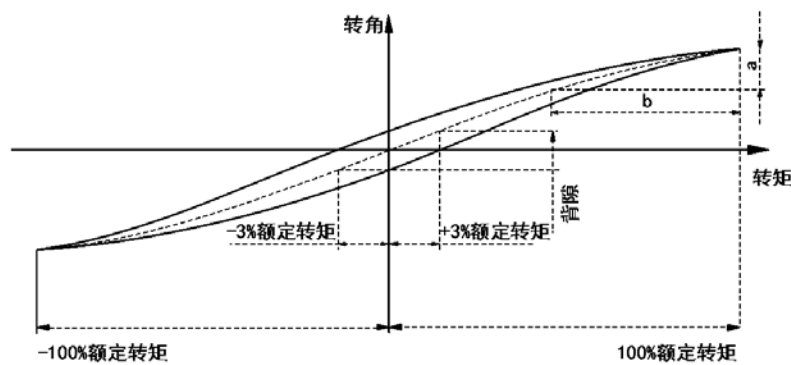


图5 伺服静刚度滞回特性曲线

### 6.2.7 背隙

通过图 5 的机械刚度滞回特性曲线分别得出 3%和-3%额定扭矩下的转角中值 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ ， $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 的差值即为关节背隙。

### 6.2.8 额定静制动力矩

本方法只针对内部具有制动器的关节。关节处于制动状态下，缓慢均匀增大施加于关节输出端的扭矩至制造厂商给定的额定静制动力矩值，且位置检测传感器检测到关节输出端发生角位移不超过正负 1 度。在正反两个方向上间隔不同相位各进行 5 次试验，均满足要求。

### 6.2.9 额定动制动力矩

本方法只针对内部具有制动器的关节。关节处于非制动条件下，关节模组在额定转速条件下匀速旋转，逐步增加施加于关节输出端的扭矩至制造厂商给定的额定动制动力矩，内部制动器使能瞬间开启条件下，关节模组能正常制动并停止转动。

### 6.2.10 安全转矩关断

本方法针对具备安全转矩关断功能的关节。试验时关节在额定电压下运行，当安全转矩关断信号有效时，关节应停止功率输出，且输出轴进入自由状态。

## 6.3 电气性能

### 6.3.1 额定数据

额定电压、空载条件下控制关节输出转速至设计的额定转速 $n_N$ ，在关节输出端逐渐加载负载，在保持额定转速情况下直到负载达到关节的设计额定转矩 $T_N$ ，并能保持正常运转，关节的额定功率 $P_N$ ，计算如式（1）。

$$P_N = T_N \cdot \left( \frac{2\pi}{60} \cdot n_N \right) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$P_N$ ——额定功率；

$n_N$ ——额定转速；

$T_N$ ——额定转矩。

当关节运行在额定功率点时，能够正常连续运转对应的转速记录为额定转速。

当关节运行在额定功率点时，能够正常连续运转对应的转矩记录为额定转矩。

### 6.3.2 关节效率

按照6.3.1试验方法测得额定转矩 $T_N$ 和额定转速 $n_N$ ，关节运行至稳定工作温度，同时读取在额定功率下关节驱动器输入电压 $U$ 和输入电流 $I$ ，则额定工作效率 $\eta$ 计算公式为：

$$\eta = \frac{2\pi \cdot T_N \cdot n_N}{60 \cdot U \cdot I} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$\eta$  ——效率；

$n_N$ ——额定转速；

$T_N$ ——额定转矩；

$U$  ——驱动器输入电压；

$I$ ——驱动器输入电流。

### 6.3.3 允许最高转速

关节在额定电压、空载条件下，按照被测关节设计的允许最高转速运行2min（时间待定，与减速器部分协商），试验后检查零件不应有损坏，再次启动时能够正常运行，不应有异常的噪声和振动。

### 6.3.4 瞬时最大转矩

将关节输出端固定使其输出速度保持为零，关节电机输入设计的峰值电流，记录扭矩传感器瞬间输出的最大转矩即为瞬时最大转矩。

### 6.3.5 工作电压范围

在给定工作电压范围内，均匀间隔取10个不同电压值，在不同工作电压下测试，关节在额定转速和额定转矩条件下应能稳定正常运转。

### 6.3.6 转矩常数

关节空载运行至额定输出转速，负载从零逐渐增加至额定转矩 $T_N$ ，测量电机线电流大小 $I$ ，则额定转矩常数 $K_T$ 计算公式为： $K_T = \frac{T_N}{I}$

式中：

$K_T$ ——转矩常数；

$I$ ——电机线电流有效值。

### 6.3.7 转矩密度

用电子秤测量出关节整体质量 $m$ ，额定转矩密度计算公式为： $\frac{T_N}{m}$

瞬时最大转矩密度为： $\frac{T_P}{m}$

式中：

$m$ ——关节质量；

$T_N$ ——额定转矩；

$T_P$ ——峰值转矩。

或

测量并计算出关节整体体积 $v$ ，额定转矩密度计算公式为： $\frac{T_N}{v}$

瞬时最大转矩密度为： $\frac{T_P}{v}$

式中：

$v$ ——关节体积；

$T_N$ ——额定转矩；

$T_P$ ——瞬时最大转矩。

### 6.3.8 功率密度

用电子秤等仪器测量出关节整体质量 $m$ ，额定功率密度计算公式为： $\frac{P_N}{m}$

式中：

$m$ ——关节质量；



$P_N$ ——额定功率。

或

测量出关节整体体积 $v$ ，额定功率密度计算公式为： $\frac{P_N}{v}$

瞬时最大功率密度为： $\frac{P_P}{v}$

式中：

$v$ ——关节体积；

$P_N$ ——额定功率。

## 6.4 控制性能

### 6.4.1 绝对定位精度

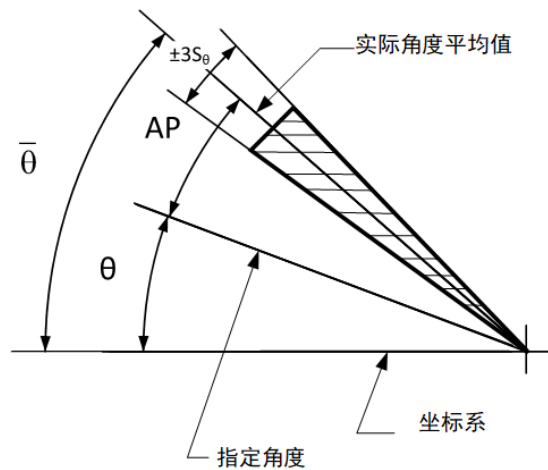


图6 绝对定位精度示意图

关节输出在某一指令角度的绝对定位精度计算公式如下：

$$AP = |\theta - \bar{\theta}| \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i}{n} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

AP——绝对定位精度；

$\theta$ ——指令角度；

$\bar{\theta}$ ——对同一指令角度响应 $n$ 次的实到角度平均值；

$\theta_i$ ——第 $i$ 次实到角度。

表1为绝对定位精度试验条件，其中 $P_1 \sim P_{20}$ 为均匀分布在被测关节工作最大范围内的角度。关节工作在位置控制模式下，对关节输出端施加100%额定负载，分别在100%、50%、10%额定转速的条件下，从 $P_1$ 点开始，按照 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow \dots \rightarrow P_{19} \rightarrow P_{20}$ 的顺序，以单一方向接近每个位置，计算每个位置的绝对定位精度。单个循环结束后控制关节回到 $P_1$ 点，再开始另一循环。重复循环5次，记录各个实到角

度值。分别计算这20个点在100%、50%、10%额定转速条件下的绝对定位精度，在三种转速条件下，取这20个点的绝对定位精度最大值作为被测关节的绝对定位精度。

表1 绝对定位精度测试试验条件

负载	速度	位置	循环次数
100%额定负载	100%额定速度	$P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow \dots \rightarrow P_{19} \rightarrow P_{20}$	5
	50%额定速度		
	10%额定速度		

6.4.2 重复定位精度

重复定位精度可表示为：围绕实到位置平均值的角度散布 $\pm 3S_\theta$ ，其中 $S_\theta$ 为标准偏差。

关节输出在某一指令角度的重复定位精度计算公式如下：

$$RP = \pm 3S_\theta = \pm 3\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n(\theta_i - \bar{\theta})^2} \dots\dots\dots(5)$$

式中：

$RP$ ——重复定位精度；

$S_\theta$ ——标准偏差；

$\bar{\theta}$ ——对同一指令角度响应  $n$  次的实到角度平均值，及  $\bar{\theta} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \theta_i$ ；

$\theta_i$ ——第  $i$  次实到角度。

表 2 为绝对定位精度试验条件，其中  $P_1 \sim P_5$  为均匀分布在被测关节工作最大范围内的角度。关节工作在位置控制模式下，对关节输出端加载 100% 额定转矩的负载，分别在 100%、50%、10% 额定转速的条件下，从  $P_1$  点开始，按照  $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5$  的顺序重复执行指令角度循环 30 次，分别记录在同一指令角度下重复 30 次的实到角度  $\theta_i$ 。分别计算这 5 个点的重复定位精度，取这 5 个点中重复定位精度最大值为被测关节的重复定位精度。

表2 重复位置精度试验条件

负载	速度	位置	循环次数
100%额定负载	100%额定速度	$P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5$	30
	50%额定速度		
	10%额定速度		

6.4.3 转矩控制精度

关节输出在某一指令转矩的控制精度计算公式如下：

$$TR = |T - \bar{T}| \div T \times 100\% \tag{6}$$

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \tag{7}$$

式中:

TR——转矩控制精度;

T ——指令转矩;

$\bar{T}$ ——对同一指令转矩响应n次的实际转矩输出平均值;

$T_i$ ——第i次实际转矩输出值。

表 3 为转矩控制精度试验条件, 其中  $T_1 \sim T_{10}$  为 10%~100% 的额定转矩范围内均匀取的 10 个不同的转矩点。关节工作在转矩控制模式下, 加载系统带动关节转动至额定转速下, 关节输入  $T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow \dots \rightarrow T_9 \rightarrow T_{10}$  的目标转矩值。重复循环 3 次, 在关节达到稳定状态后记录关节实际输出转矩值。分别计算各个转矩目标值的控制精度, 选取转矩控制精度中的误差最大值作为关节转矩控制精度。

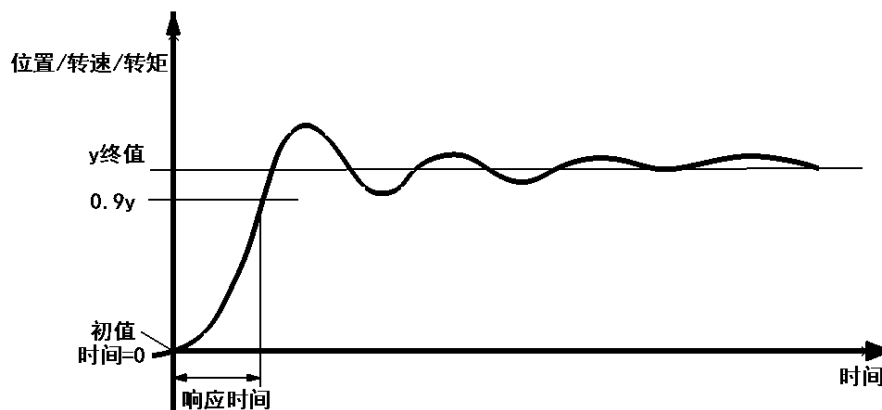
表3 转矩控制精度试验条件

速度	转矩	循环次数
额定转速	$T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow \dots \rightarrow T_9 \rightarrow P_{10}$	3

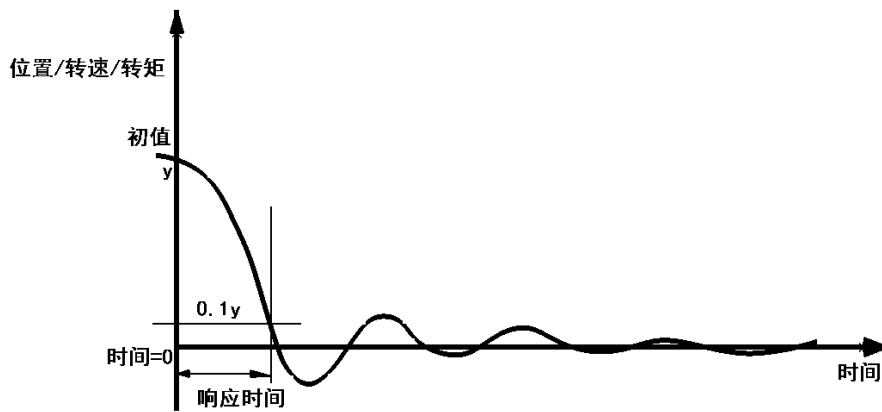
#### 6.4.4 正/负阶跃输入的位置响应时间

关节工作在位置控制模式下, 关节在空载条件下或按照试验要求加载某一恒定负载(根据需求确定转动惯量和扭矩大小)。关节输入由 0 到  $\theta_N$  (若无特殊情况, 取  $360^\circ$ ) 的正阶跃信号给关节, 并同步读取角度传感器的数据, 记录从阶跃信号发出至关节位置达到  $0.9\theta_N$  的时间; 重复上述试验 5 次, 取 5 次试验的平均值即为关节的正阶跃输入的位置响应时间。

同理, 关节输入由  $\theta_N$  到 0 的负阶跃信号给关节, 并同步读取角度传感器的数据, 记录从阶跃信号发出至关节位置达到  $0.1\theta_N$  的时间; 重复上述试验 5 次, 取 5 次试验的平均值即为关节的负阶跃输入的位置响应时间。



正阶跃响应时间示意图



负阶跃响应时间示意图

图7 响应时间示意图

#### 6.4.5 正/负阶跃输入的转速响应时间

关节工作在转速控制模式下，关节在空载条件下或按照试验要求加载某一恒定负载（根据需求确定转动惯量和扭矩大小）。关节输入  $0$  到  $n_N$  的正阶跃转速信号给关节，并同步读取转速传感器的数据，记录从阶跃信号发出至关节转速达到  $0.9n_N$  的时间；重复上述试验 5 次，取 5 次试验的平均值即为关节的正阶跃输入的转速响应时间。

同理，关节输入由  $n_N$  到  $0$  的负阶跃转速信号给关节，并同步读取转速传感器的数据，记录从阶跃信号发出至关节转速达到  $0.1n_N$  的时间；重复上述试验 5 次，取 5 次试验的平均值即为关节的负阶跃输入的转速响应时间。

#### 6.4.6 正/负阶跃输入的转矩响应时间

关节工作在转矩控制模式，加载系统带动关节转动至额定转速下，关节输入由  $0$  到  $T_N$  的正阶跃信号，同步读取转矩传感器的数据，记录从阶跃信号发出至关节转矩达到  $0.9T_N$  的时间；重复上述试验 5 次，取 5 次试验的平均值即为关节的正阶跃输入的转矩响应时间。

同理，关节输入由  $T_N$  到  $0$  的负阶跃信号，同步读取转矩传感器的数据，记录从阶跃信号发出至关节转矩达到  $0.1T_N$  的时间；重复上述试验 5 次，取 5 次试验的平均值即为关节的负阶跃输入的转矩响应时间。

#### 6.4.7 位置响应频带宽度

关节工作在位置模式下，在空载条件下或按照试验要求加载某一恒定负载（根据需求确定转动惯量和扭矩大小），关节发送输入不同频率的正弦波位置指令，正弦波幅值为  $\theta_N$ （若无特殊情况，取  $360^\circ$ ），频率由  $1\text{Hz}$  逐渐升高，通过读取角度传感器的数据来记录关节对应的位置曲线。随着指令正弦波频率的提高，关节位置的波形曲线对指令正弦波曲线的相位滞后逐渐增大，而幅值逐渐减小。相位滞后增大至  $90^\circ$  时的频率作为系统  $90^\circ$  相移的频带宽度，幅值减小至  $1/\sqrt{2}$  的频率作为系统的  $-3\text{dB}$  频带宽度。

#### 6.4.8 转速响应频带宽度

关节工作在速度模式下，在空载条件下或按照试验要求加载某一恒定负载（根据需求确定转动惯量和扭矩大小），关节输入不同频率的正弦波速度指令，正弦波幅值为额定转速 $n_N$ ，频率由 1Hz 逐渐升高，通过读取转速传感器的数据来记录关节对应的转速曲线。随着指令正弦波频率的提高，关节转速的波形曲线对指令正弦波曲线的相位滞后逐渐增大，而幅值逐渐减小。相位滞后增大至 90°时的频率作为系统 90°相移的频带宽度，幅值减小至 $1/\sqrt{2}$ 的频率作为系统的-3dB 频带宽度。

#### 6.4.9 转矩响应频带宽度

关节工作在转矩模式下，加载系统带动关节转动至额定转速下。关节输入不同频率的正弦波转矩指令，正弦波幅值为额定转矩 $T_N$ ，频率由 1Hz 逐渐升高，通过读取转矩传感器的数据来记录关节对应的转矩曲线。随着指令正弦波频率的提高，关节转矩的波形曲线对指令正弦波曲线的相位滞后逐渐增大，而幅值逐渐减小。相位滞后增大至 90°时的频率作为系统 90°相移的频带宽度，幅值减小至 $1/\sqrt{2}$ 的频率作为系统的-3dB 频带宽度。

#### 6.4.10 旋转角度范围

关节工作在位置控制模式下，给关节发送位置指令，通过外部角度传感器检测关节旋转角度值，关节旋转角度范围应符合产品专用技术条件的规定。

#### 6.4.11 输出转速波动性

关节工作在速度控制模式下，在空载条件下，分别测试并记录在100%额定转速（必测）、50%额定转速（选测）、10%额定转速（选测）条件下关节的输出转速，找出最大转速 $n_{max}$ 与最小转速 $n_{min}$ ，按下式计算关节的输出速度波动系数。

$$K_{fn} = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_{max} + n_{min}} \times 100\%$$

#### 6.4.12 输出转矩波动性

关节工作在速度控制模式下，在额定转速状态施加额定负载，测试并记录关节在一圈中的关节的输出转矩，找出最大转矩 $T_{max}$ 和最小转矩 $T_{min}$ ，按下式计算关节的输出转矩波动系数。

$$K_{fT} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} + T_{min}} \times 100\%$$

附录 A  
(资料性)  
机器人一体化关节系统组成

机器人一体化关节主要由电机、减速器、编码器和驱动器等组成，其中一种结构组成示例如图8所示。其中减速器输入端与电机输出侧连接，传输电机的扭矩和速度，编码器检测电机主轴、关节输出轴的旋转位置，驱动器驱动电机运动。

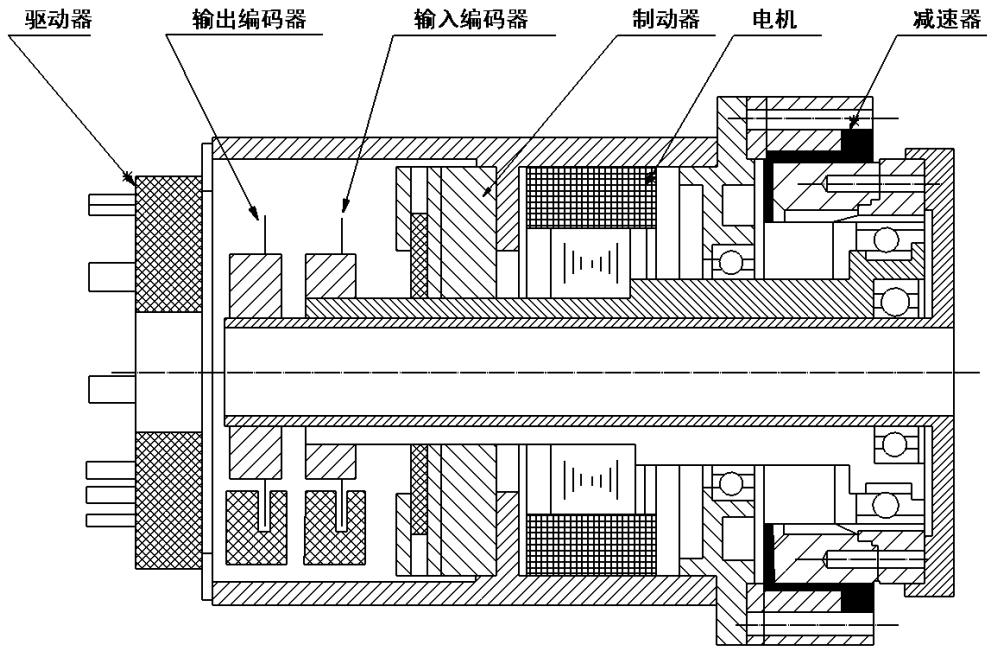


图8 关节组成示意图（参考 GB/T 39633-2020）

## 附录 B

### (资料性)

### 环境适应性

本附录内容主要用于补充关节环境适应性等相关参数定义和测试方法，可供参考。

#### B.1 高低温

##### B.1.1 低温存储

按 GB/T 2423.1-2008 中试验方法 Ad 进行低温存储试验，测试在存储状态下进行，或符合产品专用技术条件的规定。测试结束后，关节应能正常运行。

##### B.1.2 低温运行

按 GB/T 2423.1-2008 中试验方法 Ad 进行低温运行试验，测试在额定供电条件、额定负载、额定转速下进行，或符合产品专用技术条件的规定。在测试过程中，关节应能正常运行。

##### B.1.3 高温存储

按 GB/T 2423.2-2008 中试验方法 Bd 进行高温存储试验，测试在存储状态下进行，或符合产品专用技术条件的规定。测试结束后，关节应能正常运行。

##### B.1.4 高温运行

按 GB/T 2423.2-2008 中试验方法 Bd 进行高温运行试验，测试在额定供电条件、额定负载、额定转速下进行，或符合产品专用技术条件的规定。在测试过程中，关节应能正常运行。

##### B.1.5 温度循环试验

按 GB/T 2423.22-2012 中试验方法 Na 或 Nb 进行温度循环试验，测试在额定供电条件、额定负载、额定转速下进行，或符合产品专用技术条件的规定。在测试过程中，关节应能正常运行。

[来源：GB/T 39633-2020 ,6.5.1, ,6.5.2, 有修改]

#### B.2 噪音

关节的噪声等级（dB）用声功率级 dB(A)表示，按 GB/T 10069.1-2008 中声功率级的测定方法进行试验，测试关节在额定供电条件、额定负载、额定转速下的运行噪声。

噪声测试点为 5 个，分布在关节前、后、左、右、上距关节 1m 处，其中前、后、左、右 4 个测试点的高度与关节等高。

[来源：GB/T 39633-2020 ,6.5.6 ,有修改]

#### B.3 温升

关节在额定供电条件、额定负载、额定转速下，或按照产品指定的工作循环条件运行，并且系统应尽可能远离热传导表面和通风装置以及附加的降温装置，直到样机达到稳定工作温度，用温度记录仪分

别采集关节壳体、内部发热元件表面，在相同的时间间隔内，分别记录每个点的温度，温升应符合产品专用技术条件规定。

#### B.4 振动

当有要求时，按 GB/T 39266-2020 中 5.2 的规定执行，关节应能承受规定振动条件的初始振动响应及耐久试验。试验后不应出现零部件松动或损坏，性能应符合产品专用技术条件的规定。

表4 振动指标建议

振动频率 (Hz)	振幅	扫频次数	振动时间上限
10~200	0.03mm 或 5m/ s <sup>2</sup>	10	10

#### B.5 抗冲击

当有要求时，按 GB/T 39266-2020 中 5.3 的规定执行，关节冲击应符合产品专用技术条件中规定。试验后不应出现零部件松动或损坏。

表5 抗冲击指标建议

脉冲持续时间 ms	冲击波形	冲击次数	峰值加速度 m/s <sup>2</sup>
30	半正弦	5	300

#### B.6 防护等级

关节外壳防护按 GB/T 4942-2021 的第 8 章~第 10 章规定的方法进行试验。

#### B.7 绝缘电阻

制造商应对关节电动机的绝缘电阻和驱动器的绝缘电阻作出规定。电动机的绝缘电阻可在驱动器安装前检查电机各独立绕组对机壳及其相互间的绝缘电阻是否符合规定值；驱动器的绝缘电阻在关节组装完成后，检查电源线对机壳保护接地端之间的绝缘电阻是否符合规定值。电动机的绝缘电阻技术要求与试验方法应符合GB/T 7345中的相关规定。

#### B.8 寿命

关节安装在试验支架上，可在模拟整机运行的负载条件，或者当模拟试验条件不具备时，额定负载按表规定的条件进行寿命试验，在轴伸每一种安装位置，系统正反方向旋转的时间各为50%。

表6 寿命试验条件

安装位置	轴伸向上	轴伸向下	轴伸水平
时间分配	寿命时间的 1/4	寿命时间的 1/4	寿命时间的 1/2



## B.9 电磁兼容性

### B.9.1 抗扰度

参考 GB/T 39633-2020 的 6.6 章 电磁兼容性 (EMC)

涉及的设备抗扰度试验要求是按端口逐一给出的。

试验应按下表的规定,以完全确定的和可重复的方式进行。

试验时关节在额定转速下空载运行,工作特性未有明显的编号,在规定的允许偏差内正常工作。

表7 抗扰度试验

项目	端口	试验要求	试验方法
浪涌冲击	输入直流电源接口	试验点为系统的供电电源端口线对地的,规范值: Tt/Th (1.2/50 $\mu$ 2~8/20 $\mu$ /), +0.5kV (开路试验电压)	GB/T 17626.5-2019
电快速瞬变脉冲群	信号端口/直流输入电源端口	试验点为系统的供电电源端口和控制信号端口,规范值: +0.5kV (开路试验电压), Tt/Th 5/50ns, 重复频率 5kHz	GB/T 17626.4-2018
静电放电	外壳端口	试验点为驱动器的保护接地端,优先选用接触放电法测试,规范值+4kV,空气放电规范值+8kV	GB/T 17626.2-2018
射频电磁场辐射	外壳端口	试验点是外壳端口,规定的试验电平是未调制载波的有效值。规范值频段为 80MHz~1000 MHz, 1.4 MHz~2.0MHz, 2.0MHz~2.7 MHz; 电平 3V/m, 80%AM(1kHz)	GB/T 17626.3-2016

### B.9.2 发射

测试场地应符合 GB/T 6113.104-2016 的规定。

发射测试天线应符合 GB/T 6113.104-2016 的规定。

测量接收机应符合 GB/T 6113.101-2016 的规定。

传导测试设备应符合 GB/T 6113.102-2018 的规定。

关节工作在额定电压、额定转速、空载状态下。电源终端传导骚扰及信号终端传导共模骚扰的极限值应符合表 的规定。

表8 电源终端传导骚扰及信号终端传导共模骚扰的极限值

频段	A 类限值	B 类限值	试验方法
----	-------	-------	------

MHz	准峰值 dBuV	平均值 dBuV	准峰值 dBuV	平均值 dBuV	
$0.15 \leq f < 0.5$	79	66	66~56 随频率的对数呈 线性减小	56~46 随频率的对数呈 线性减小	GB/T 6113.201-2018
$0.5 \leq f < 5$	73	60	56	46	
$56T < 30$	73	60	60	50	

表9 电磁辐射骚扰的极限值 (30MHz-1000MHz)

频段 MHz	A 类限值		B 类限值		试验方法
	准峰值 (3 米) dBuV	准峰值 (10 米) dBuV	准峰值 (3 米) dBuV	准峰值 (10 米) dBuV	
$30 \leq f < 230$	40	50	30	40	GB/T 6113.203-2016
$230 \leq f < 1000$	47	57	37	47	

表10 电磁辐射骚扰的极限值 (1GHz-6GHz)

频段 GHz	A 类限值		B 类限值		试验方法
	准峰值 (3 米) dBuV	平均值 (3 米) dBuV	准峰值 (3 米) dBuV	平均值 (3 米) dBuV	
$1 \leq f < 3$	56	76	50	70	GB/T 6113.203-2016
$3 \leq f < 6$	60	80	54	74	

B.10 安全等级

B.10.1 典型的安全功能

关节的各种功能，尤其是有关安全和安全防护装置的功能，都应进行试验。功能试验可用控制系统自动进行，也可按预定间隔手动检查或试验，——或以适当方式组合。

B.10.2 安全转矩取消 (STO)

能够引起关节转动的电源不被应用，驱动器将不对产生转矩的电机提供能量。

注 1：本安全功能对应于不可控停止，与 IEC60204-1 停止类型 0 相对应。

注 2：当外部影响情况（悬挂负载下降）出现，可能有必要采用额外措施（例如，机械制动）来阻止任何危险。

试验方法：

关节正常工作过程中，激活 STO 功能，关节停止过程应符合 IEC60204-1 停止类型 0。

### B.10.3 安全停止 1 (SS1)

关节应满足以下条件之一：

- a) 在设定的限值内，启动并控制电动机减速使电动机停止，当电动机速度低于规定的限值时启动 STO 功能；或
- b) 在设定的限值内，启动并监视电动机减速使电动机停止，当电动机速度低于规定的限值时启动 STO 功能；或
- c) 在规定的延时后，启动电动机减速并启动 STO 功能

注：本安全功能对应于可控停止，与 IEC60204-1 停止类型 1 相对应。

试验方法：

关节正常工作过程中，当进入安全停止 1 时关节以调节控制的方式关闭驱动器输出，中断电机的驱动电源，关节停止运行进入 STO 状态。

### B.10.4 安全停止 2 (SS2)

关节应满足以下条件之一：

- d) 在设定的限值内，启动并控制电动机减速率使电动机停止，当电动机速度低于规定的限值时启动安全操作停止功能；或
- e) 在设定的限值内，启动并监视电动机减速率使电动机停止，当电动机速度低于规定的限值时启动安全操作停止功能；或
- f) 在规定的延时后，启动电动机减速并启动 STO 功能

注：本安全功能对应于可控停止，与 IEC60204-1 停止类型 2 相对应。

试验方法：

关节正常工作过程中，当进入安全停止 2 时关节在受控的关闭、停止之后启动安全操作停止功能或启动 STO。

#### B.10.5 安全极限速度（SLS）

SLS功能防止关节超过规定的速度限值

试验方法：

极限速度限定值可通过参数进行设定。关节分别工作在位置模式、速度模式、转矩模式，给定不同的目标值，使速度指令值超过极限速度限定值，关节运行的实际速度应不大于极限速度限定值。

#### B.10.6 安全极限转矩（SLT）

SLT功能防止关节超过规定的转矩限值

试验方法：

极限转矩限定值可通过参数进行设定。关节分别工作在位置模式、速度模式、转矩模式，给定不同的目标值，使转矩指令值超过极限转矩限定值，关节输出的实际转矩应不大于极限转矩限定值。

#### B.10.7 安全限位（SLP）

SLP功能防止关节超过规定的位置限值

试验方法：

安全限位功能能够确保关节运行不会超出位置限值，当关节运动范围达到软限位设定值或硬限位后将使用安全停止对电机实施制动，低于限值时，电机的加速度和速度将不受限制；试验过程中软限位设定值应小于硬限位位置值。

#### B.10.8 安全制动（SBC）

SBC功能提供安全输出信号以控制外部制动

试验方法：

关节安装内部或外部制动装置，当SBC功能激活后，关节可以输出控制信号启动制动装置，防止机械臂掉落。

附 录 C  
(资料性)  
试验建议项目

本文件并不规定其应选择的试验项目和性能指标要求，如下建议项目供参考：

序号	试验项目	章条号	建议项目			
			出厂试验		鉴定检验	
			带制动器	不带制动器	带制动器	不带制动器
1	反向启动转矩	6.2.1	√	√	√	√
2	许用弯矩载荷	6.2.2	—	—	√	√
3	启停容许转矩	6.2.3	—	—	√	√
4	转动惯量	6.2.4	—	—	√	√
5	机械刚度	6.2.5	—	—	√	—
6	伺服静刚度	6.2.6	—	—	√	√
7	背隙	6.2.7	√	√	√	—
8	额定静制动力矩	6.2.8	—	—	√	—
9	额定动制动力矩	6.2.9	—	—	√	—
10	安全转矩关断	6.2.10	√	√	√	√
11	额定转矩	6.3.1	√	√	√	√
12	额定转速	6.3.1	√	√	√	√
13	额定功率	6.3.1	√	√	√	√
14	系统效率	6.3.2	—	—	√	√
15	允许最高转速	6.3.3	√	√	√	√
16	瞬时最大转矩	6.3.4	√	√	√	√
17	工作电压范围	6.3.5	—	—	√	√
18	转矩常数	6.3.6	—	—	√	√
19	转矩密度	6.3.7	—	—	√	√
20	功率密度	6.3.8	—	—	√	√
21	绝对定位精度	6.4.1	—	—	√	√
22	重复定位精度	6.4.2	√	√	√	√
23	转矩控制精度	6.4.3	√	√	√	√
24	正/负阶跃输入的位置响应时间	6.4.4	—	—	√	√
25	正/负阶跃输入的转速响应时间	6.4.5	—	—	√	√
26	正/负阶跃输入的转矩响应时间	6.4.6	—	—	√	√

27	位置响应频带宽度	6.4.7	—	—	√	√
28	转速响应频带宽度	6.4.8	—	—	√	√
29	转矩控制响应频带宽度	6.4.9	—	—	√	√
29	旋转角度范围	6.4.10	—	—	√	√
30	输出转速波动性	6.4.11	—	—	√	√
31	输出转矩波动性	6.4.12	—	—	√	√
32	高低温	附录B 1	—	—	√	√
33	噪音	附录B 2	√	√	√	√
34	温升	附录B 3	—	—	√	√
35	振动	附录B 4	—	—	√	√
36	抗冲击	附录B 5	—	—	√	√
37	防护等级	附录B 6	—	—	√	√
38	绝缘电阻	附录B 7	—	—	—	—
39	寿命	附录B 8	—	—	√	√
40	电磁兼容性	附录B 9	—	—	√	√
41	安全等级	附录B 10	—	—	√	√







### 参 考 文 献

- [1] GB 755-2008 旋转电机 定额和性能
  - [2] GB/T 2900.25-2008 电工术语 旋转电机
  - [3] GB/T 5171.21-2016 小功率电动机 第21部分：通用试验方法
  - [4] GB/T 21418-2008 永磁无刷电动机系统通用技术条件
  - [5] T/ZZB 0533-2018 控制用精密行星齿轮减速器
  - [6] GB/T 18488.2-2015 电动汽车用驱动电机系统 第2部分：试验方法
  - [7] GB/T 34114-2017 电动机用电磁制动器通用技术条件
-