

# 机械手用超柔性控制电缆的设计研制

鲍继强<sup>1</sup>, 鲍宇<sup>2</sup>, 敬廷峰<sup>1</sup>

(1. 广东日丰电缆股份有限公司, 中山 528401; 2. 东莞拓斯达智能装备有限公司, 东莞 523820)

**摘要:**随着机械手应用领域的不断细分,行业对机械手用电缆的需求也变得更加复杂和严格。为满足不同应用场景下对机械手用电缆的不同需求,介绍了一种机械手用超柔性控制电缆,从结构设计、材料选型、制造工艺角度,阐述了其研制方法。目前,该试制样品经过测试和实际应用,可以满足柔软性、耐弯折性、耐扭转性、耐高/低温性等多种需求,具备广阔的应用前景。

**关键词:**机械手;超柔性控制电缆;扭转;弯折;拖链

中图分类号:TM249

文献标志码:A

文章编号:1672-6901(2024)05-0017-06

## Design and Development of Ultra-Flexible Control Cable for Manipulator

BAO Jiqiang<sup>1</sup>, BAO Yu<sup>2</sup>, JING Tingfeng<sup>1</sup>

(1. Guangdong Rifeng Electric Cable Co., Ltd., Zhongshan 528401, China;

2. Dongguan Topstar Intelligent Technology Co., Ltd., Dongguan 523820, China)

**Abstract:** As application fields of manipulator continue to become more specific, industry's demand for cables used in manipulator has become more complex and stringent. In order to meet different needs of cables for manipulator in various application scenarios, an ultra-flexible control cable for manipulator was introduced, and development method from the perspectives of structural design, material selection and manufacturing technology was elucidated. Currently, the trial sample has passed testing and actual application, which can meet various needs such as flexibility, bending resistance, torsion resistance, and resistance to high and low temperatures, with a broad application prospect.

**Key words:** manipulator; ultra-flexible control cable; torsion; bending; e-chains

## 0 引言

机械手是在机械化、自动化生产过程中发展起来的一种新型装置,被广泛应用于现代自动化生产。为了更好地实现与机械化和自动化的有机结合,机械手的研制和生产已成为高技术领域内迅速发展起来的一门新兴技术。随着机械手大量代替流水线人工作业,机械手用细分领域电缆的需求变得更加复杂和严格。三轴以上机器人手臂本体内,随机手的不断运动,为机械手提供动力和传输信号的电缆需要具备如下基本要求。

①高柔性。随着机械手运动速度和自由度的提高,对电缆柔性的要求也越来越高。为了满足这种需求,需要不断进行材料研发和工艺创新,研制更灵活耐用的电缆。同时,采用先进的材料和结构设计,减小电缆直径,降低电缆弯曲半径,使电缆在机器人运动过程中更加灵活、不易受阻碍。②高耐磨性和耐用性。工业机器人通常需要进行高频率重复运动,这对电缆的耐磨性和耐久性提出了更高的要求。特别是控制电缆,电缆外径较小,生产过程中更容易发生断裂。

随着我国各行业降低人工成本、提高生产效率的推进,机械手的应用快速发展。为了应对机械手用线缆需求的多样化,本工作进行了机械手用超柔性控制电缆的设计研发,设计开发了额定电压为30 V的 $6 \times 2 \times 0.2 \text{ mm}^2$ 非屏蔽控制电缆。

收稿日期:2023-11-13

基金项目:中山市2012年市科技计划项目(20123A207);  
2022年度省级促进经济高质量发展专项企业技术改造资金入库项目(192000393120002)

作者简介:鲍继强(1975—),男,工程师。

E-mail:baojiqiang-75@163.com

## 1 设计原则

机械手是工业机器人的一个重要分支,它的特点是可通过编程来完成各种预期的作业任务,在构造和性能上兼具人和机器的优点,尤其体现了人的智能和适应性。为了确保机械手作业的准确性和在各种环境中完成作业的能力,机械手用控制电缆通常遵循以下几个设计原则。

### 1.1 满足使用场景

机械手应用场景多在制造业,具有重工业属性,如金属加工、码垛/搬运、橡塑、抛光、装配、机床装卸、分拣等。电缆需要考虑耐油污、耐高/低温、耐火花阻燃、耐化学溶剂、耐粉尘等方面的性能。

### 1.2 机械性能

机械手主要由执行机构、驱动机构和控制系统3大部分组成。执行机构是用来抓持工件(或工具)的部件。驱动机构使手臂完成各种转动(摆动)、移动或复合运动来实现规定的动作,包括升降、伸缩、旋转等独立运动方式。控制系统控制手臂动作。因此,配套的电缆需要满足高强度、耐扭转、耐弯折、耐往复移动等要求<sup>[1-2]</sup>。

#### 1.2.1 90 °弯折要求

机械手需要进行各种弯曲动作,故需要对电缆进行循环弯折试验。电缆垂直于导体轴线平面作180°往复弯折运动,在800万次后,表面无裂纹,并通过电压为2 kV、时间为5 min的耐压试验,且导体直流电阻变化率应不大于10%。

#### 1.2.2 垂直扭转要求

多轴机械臂在工作时会进行多方向运动。机械手本体控制电缆会跟随机械手进行多方向运动扭转,故对其进行扭转试验。在电缆经过800万次±180°往复扭转后,表面无裂纹,并通过电压为2 kV、时间为5 min的耐压试验,且导体直流电阻变化率应不大于10%。

#### 1.2.3 拖链要求

机械手需要进行伸缩往复工作,故需要对其进行往复拖链试验。在对电缆进行1000万次拖链试验后,电缆表面完好,并通过电压为2 kV、时间为5 min的耐压试验,且导体直流电阻变化率应不大于10%。

### 1.3 电气性能

机械手在工作时控制信号需要稳定传输,不能有其他干扰。因此,控制电缆在设计时需要保证有稳定的电容、电感、绝缘电阻常数,屏蔽电缆还需要控制屏蔽层表面转移阻抗。

综上,6×2×0.2 mm<sup>2</sup>非屏蔽控制电缆的主要技术指标<sup>[3]</sup>见表1。

表1 机械手用控制电缆技术指标

| 技术指标                            |             | 技术要求  |
|---------------------------------|-------------|-------|
| 循环弯折试验<br>(不小于800万次)            | 导体直流电阻变化率/% | ≤10   |
|                                 | —           | 表面无裂纹 |
| 扭转试验<br>(不小于800万次)              | 导体直流电阻变化率/% | ≤10   |
|                                 | —           | 表面无裂纹 |
| 往复拖链试验<br>(不小于1000万次)           | 导体直流电阻变化率/% | ≤10   |
|                                 | —           | 表面无裂纹 |
| 电容(1 kHz)/(pF·m <sup>-1</sup> ) |             | ≤75   |
| 电感电阻比/(μH·Ω <sup>-1</sup> )     |             | ≤25   |
| 绝缘电阻常数/(MΩ·km)                  |             | ≥3.67 |
| 导体直流电阻(20 °C)/(Ω·km)            |             | ≤123  |
| 导体标称截面面积/mm <sup>2</sup>        |             | 0.2   |

## 2 结构设计、材料选型及工艺控制

### 2.1 导体设计

采用GB/T 3956—2008《电缆的导体》第6类导体的裸铜丝,以增加导体的柔软性。采用1+6正规绞合小节距结构,提高导体的弯曲能力<sup>[4]</sup>。当弯曲半径为2倍电缆外径时,在弯折角度为±90°和±180°的条件下,分别以每分钟60次和每分钟20次的弯折频率进行2万次弯折,对比不同单丝伸长率下导体直流电阻的变化率,结果见表2。

表2 0.2 mm<sup>2</sup>导体弯折试验后直流电阻变化率对比 %

| 单丝伸长率 | 样品1  | 样品2  | 样品3  | 样品4  | 样品5  |
|-------|------|------|------|------|------|
| 15%   | 23.6 | 22.1 | 19.8 | 24.6 | 18.9 |
| 18%   | 13.5 | 16.8 | 18.2 | 16.7 | 15.9 |
| 20%   | 5.6  | 8.3  | 9.8  | 10.2 | 5.7  |
| 22%   | 3.2  | 2.6  | 1.5  | 0.8  | 2.5  |

由表2可知,当单丝伸长率为22%时,导体直流电阻变化率在0.5%~3.5%之间,结果最优。

### 2.2 绝缘材料选型

根据电缆设计原则和主要技术指标要求,绝缘材料需要具备良好的电气性能、机械性能、耐老化性能、耐弯曲扭转性能、耐腐蚀性能<sup>[5]</sup>。对热塑性聚酯弹性体(TPEE)、热塑性硫化橡胶(TPV)、热塑性弹性体(TPE)这3种常见绝缘材料的主要性能指标进行对比,结果见表3。

由表3可知,TPEE的电气性能更优,且具有良好的物理性能和耐温等级。因此,本工作选用性价

比较优的 TPEE 作绝缘材料。

表 3 3 种常见绝缘材料的主要性能指标对比

| 性能指标                       | TPEE                  | TPV                   | TPE                   |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 耐温等级/℃                     | 110                   | 125                   | 105                   |
| 原始拉伸强度/MPa                 | ≥35                   | ≥12                   | ≥16                   |
| 原始断裂伸长率/%                  | ≥400                  | ≥500                  | ≥600                  |
| 高温压力变形率(90℃×4h)/%          | ≤30                   | ≤8                    | ≤30                   |
| 冲击脆化性能(-40℃)/失效数           | ≤10                   | ≤3                    | ≤5                    |
| 体积电阻率(20℃)/(Ω·m)           | ≥1.0×10 <sup>15</sup> | ≥1.0×10 <sup>15</sup> | ≥1.0×10 <sup>15</sup> |
| 介电强度/(MV·m <sup>-1</sup> ) | ≥20                   | ≥18                   | ≥20                   |

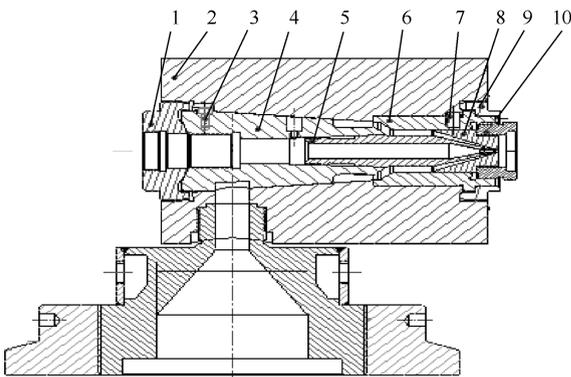
### 2.3 绝缘线芯外径设计及挤出设备选用

在额定电压下,为确保电容、电感电阻比的稳定性,绝缘厚度必须均匀。任一绝缘线芯的假定直径计算公式为

$$D_c = d_L + 2t_1 \quad (1)$$

式中: $D_c$  为任一绝缘线芯的假定直径,mm; $d_L$  为每一标称截面面积的假定直径,mm; $t_1$  为绝缘标称厚度,mm。

0.2 mm<sup>2</sup> 裸铜导体绞合后直径为 0.6 mm,绝缘标称厚度设计值为 0.2 mm。因此,绝缘线芯的假定直径为 1.0 mm,绝缘线芯外径设计公差为 ±0.03 mm,同心度为 98%。采购免调机头,保证绝缘同心度,见图 1。采用挤出压力较大的模具,保证外径均匀及导体与绝缘之间的附着力稳定;导体过特种隔离油,减小导体过内模的阻力,保证速率恒定;挤出过程中,导体同在一水平线上向前运行,保证绝缘外径的稳定。



1—后压套;2—本体;3—螺钉;4—分流器;  
5—定芯内模;6—定芯模套;7—定位销;  
8—模口;9—前压套;10—调整套

图 1 免调机头示意图

### 2.4 绝缘线芯对绞

采用 6 组线对结构,每个线对中的绝缘线芯采用不同颜色区分。每对两根绝缘线芯应左向绞合在

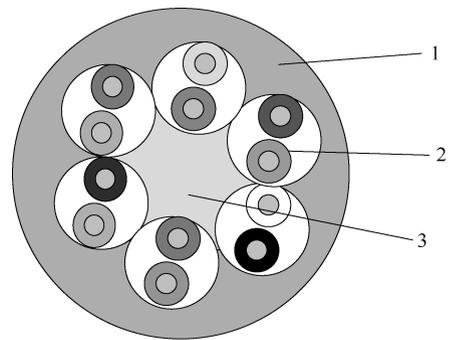
一起;每对线芯对绞节距应设计成不同值,不大于 100 mm 且互不为整数倍,以防止组件相互干扰。线芯对绞时,绝缘线芯应采用退扭方式,以避免损伤绝缘层,影响电气性能;同时,需要控制各线芯的张力,节距应均匀一致,以保证电气传输性能稳定。线芯对绞后,每个线对绞合的直径按公式(2)计算,6×2×0.2 mm<sup>2</sup> 线芯对绞后的直径为 2.0 mm。

$$d_p = D_c \times 2 \quad (2)$$

式中: $d_p$  为单对线组的直径,mm。

### 2.5 成缆

6 组线对绞合成缆,绞合方向为右向<sup>[6]</sup>。为保证受力均匀,6 组线对排列在外层,缆芯中间填充芳纶承拉,绞合成缆后电缆结构示意图见图 2。



1—护套;2—信号线对;3—填充

图 2 绞合成缆后电缆结构示意图

芳纶的断裂伸长率低,在受力过程中,芳纶为主要受力单元。相同导体标称截面面积对线组绞合成缆后的直径按公式(3)计算。

$$D_p = d_p \times K \times cf \quad (3)$$

式中: $D_p$  为缆芯外径,mm; $d_p$  为单对线组的直径,mm; $K$  为绞合系数,6 对线芯绞合系数为 3; $cf$  为压缩系数,取值为 0.82。

由公式(3)计算可得,6×2×0.2 mm<sup>2</sup> 非屏蔽控制电缆绞合成缆后的直径为 4.92 mm。

### 2.6 护套材料选型

护套材料需要具有良好的物理机械性能、老化性能、耐弯曲扭转性能、耐腐蚀性能,即满足撕裂强度大于 20 N·mm<sup>-1</sup>、120℃时的热收缩率小于 3%、耐化学液体、长期高温工作,以及能够通过 VW-1 阻燃测试等要求。对 TPE、热塑性聚氨酯弹性体(TPU)、聚氯乙烯(PVC)等 3 种材料的主要技术指标进行对比,见表 4。

由表 4 可知,TPU 护套材料的性能最优,但成本较高,故选用 TPE 作护套材料。

### 2.7 护套外径设计

为了确保电缆护套的耐老化性能、耐弯曲扭转

性能、耐腐蚀性能,护套厚度必须均匀。成品电缆标称外径计算公式为

$$D_s = D_p + 2t_s \quad (4)$$

式中: $D_s$ 为成品电缆标称外径,mm; $t_s$ 为护套标称厚度,mm。

表4 护套材料性能指标对比

| 性能指标       | TPU    | TPE     | PVC    |
|------------|--------|---------|--------|
| 工作温度/℃     | -40~90 | -40~120 | -15~70 |
| 原始拉伸强度/MPa | ≥30    | ≥10     | ≥12.5  |
| 原始断裂伸长率/%  | ≥400   | ≥400    | ≥200   |
| 耐候性能       | 优      | 良       | 优      |
| 耐盐雾性       | 优      | 中       | 优      |
| 耐油性        | 优      | 中       | 良      |
| 抗撕裂性       | 优      | 差       | 良      |
| 阻燃性        | 优      | 良       | 优      |

$6 \times 2 \times 0.2 \text{ mm}^2$ 非屏蔽控制电缆护套标称厚度设计值为1.0 mm,由公式(4)计算可得成品电缆标称外径为6.92 mm。

### 3 超柔性试验<sup>[7]</sup>

#### 3.1 循环弯折试验

取3段适量长度的电缆试样,每段长度不小于1.5 m,作为循环弯折试验前导体直流电缆试样。去除试样两端护套50 mm,同时去除试样两端绝缘及以外的所有护层,露出导体约15 mm。将试样两端固定在设备上,试样芯线与设备导通,每根绝缘芯线串联形成通路,循环弯折试验示意图见图3。

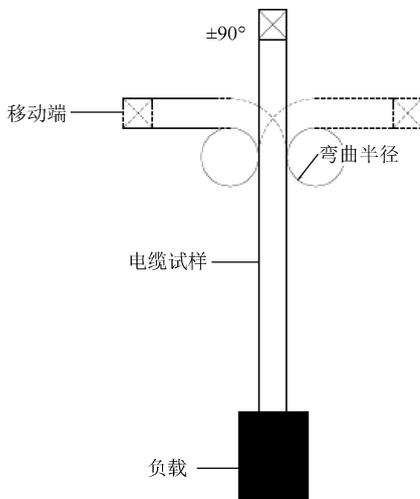


图3 循环弯折试验示意图

循环试验中,试样上端固定点与负载固定点之间的距离不小于0.6 m;滚轮半径为7.6~8.4倍电缆外径,滚轮之间的间距不小于1.2倍电缆外径;负载为0.2 kg,其下端离地面不小于0.1 m。在循环

弯折试验中,试样每分钟弯折28~32次,弯折角度为 $\pm 90^\circ$ ,800万次后进行通电测试,不应短路,且导体直流电阻变化率不大于10%。

#### 3.2 扭转试验

取3段适量长度的电缆试样,试样制备同循环弯折试验。将试样两端固定在设备上,试样芯线与设备导通,每根绝缘芯线串联形成通路,扭转试验示意图见图4。

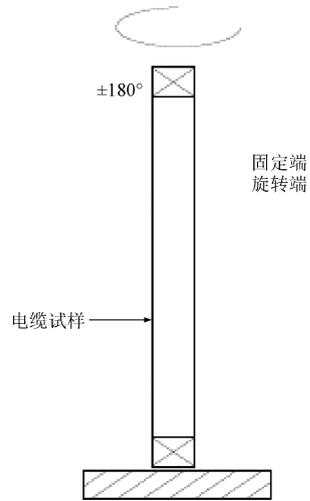


图4 扭转试验示意图

扭转试验中,试验上端固定点与负载固定点之间的距离不小于0.6 m;调节固定端与旋转端的距离( $L$ )为28.5~31.5倍电缆外径;试样在固定端与旋转端之间自然悬垂,试样的长度为 $1.05L$ 。在扭转试验中,试样每分钟扭转38~42次,扭转角度为 $\pm 180^\circ$ ,800万次后进行成品电缆耐压试验,每个线芯应不击穿,且导体直流电阻变化率不大于10%。

#### 3.3 往复拖链试验

取3段适量长度的电缆试样,试样制备同循环弯折试验。将试样两端固定在设备上,试样芯线与设备导通,每根绝缘芯线串联形成通路,往复拖链试验示意图见图5。

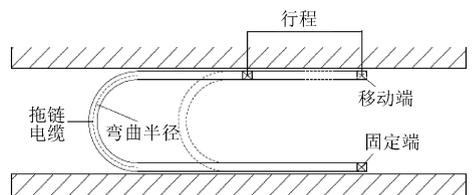


图5 往复拖链试验示意图

往复拖链试验中,试样上端固定点与负载固定点之间的距离不小于0.6 m;弯曲半径为7.6~8.4倍电缆外径。在往复拖链试验中,拖链移动端平均速率为 $9.8 \sim 10.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,行程为450~550 mm,1 000万次后信号传输正常,且导体电阻变化率不

大于10%。

事项见表5。

#### 4 电缆生产工艺与性能测试

通过合理的结构工艺参数设计及材料选型,生产 $6\times 2\times 0.2\text{ mm}^2$ 控制电缆,并进行现场试验,结果

样品生产过程中,不同工序的生产工艺及注意事项见表6。

表5 样品生产工艺及注意事项

| 生产工序 | 生产设备           | 生产参数  | 重点及注意事项   |
|------|----------------|---|---|
| 导体工序 | DBT型16头小拉机     | 拉丝油体积分数为5%~8%;<br>拉丝油温度为25~35℃;<br>退火液体积浓度为0.5~1.0 mg·L <sup>-1</sup> ;<br>退火液温度为25~35℃;<br>张力为0.05 MPa;<br>退火率为88% | 单丝直径为0.079~0.081 mm,60支单丝左向绞合,绞合节距为13~15 mm   |
| 绝缘工序 | SP45/25挤塑机     | 机筒一区温度为215~225℃;<br>机筒二区温度为220~230℃;<br>机筒三区温度为225~235℃;<br>机颈温度为230~240℃;<br>机头温度为240~250℃                         | TPEE绝缘料采用高温高压挤出;烘料温度为80℃,时间为4 h,挤出速率为50 m·min <sup>-1</sup> ;15 m冷却水槽进行冷却,颜色为黑、白、红、绿、黄、棕、蓝、橙、灰、紫、粉、浅蓝 |
| 对绞工序 | GDJ-500P型高速对绞机 | 放线张力为8 N;<br>收线张力为12 N  | 绞合节距:<br>黑/白为45.03 mm;红/绿为74.38 mm;<br>黄/棕为50.59 mm;蓝/橙为88.79 mm;<br>灰/紫为58.85 mm;粉/浅蓝为63.67 mm       |
| 成缆工序 | CLY6+12型成缆机    | 放线张力为10 N<br>收线张力为30 N  | 每盘线对放线张力误差不大于2 N  |
| 护套工序 | SP65/45挤塑机     | 机筒一区温度为70~80℃;<br>机筒二区温度为85~95℃;<br>机筒三区温度为110~120℃;<br>机头一区温度为110~120℃;<br>机头二区温度为120~130℃                         | TPE采用挤管式工艺;烘料温度为60℃,时间为2 h,挤出速率为30 m·min <sup>-1</sup> ;20 m冷却水槽进行冷却                                  |

表6 机械手用控制电缆主要性能试验数据

| 测试项目                            |             | 技术要求  | 检测结果          |
|---------------------------------|-------------|-------|---------------|
| 循环弯折试验<br>(不小于800万次)            | 导体直流电阻变化率/% | ≤10   | ≤8.6(856万次)   |
|                                 | —           | 表面无裂纹 | 表面无裂纹(856万次)  |
| 扭转试验<br>(不小于800万次)              | 导体直流电阻变化率/% | ≤10   | ≤8.2(883万次)   |
|                                 | —           | 表面无裂纹 | 表面无裂纹(883万次)  |
| 往复拖链试验<br>(不小于1000万次)           | 导体直流电阻变化率/% | ≤10   | ≤8.8(1157万次)  |
|                                 | —           | 表面无裂纹 | 表面无裂纹(1157万次) |
| 电容(1 kHz)/(pF·m <sup>-1</sup> ) |             | ≤75   | 70.5          |
| 电感电阻比/(μH·Ω <sup>-1</sup> )     |             | ≤25   | 18.5          |
| 绝缘电阻常数/(MΩ·km)                  |             | ≥3.67 | 5.66          |
| 导体直流电阻(20℃)/(Ω·km)              |             | ≤123  | 119           |
| 导体标称截面积/mm <sup>2</sup>         |             | 0.2   | 0.2           |

由表5可知,通过循环弯折试验、扭转试验、往复拖链试验及与控制信号有关的电气性能测试可知,控制电缆的各项性能均达到设计要求。

将试制的控制电缆应用于5台机器人上,进

行实际运行验证。机器人持续运行1 a后,信号控制正常,柔软度优异;拆除电缆进行检测,直流电阻变化率在3%~6%之间,符合机械手运行要求。

## 5 结束语

机械手用电缆使用工况的特殊性,要求电缆满足高承拉性、抗扭曲性、耐弯折、电容低、电感电阻比稳定、导体直流电阻变化率小、绝缘体积电阻大等要求。经过不断沟通和验证,该机械手用超柔性控制电缆满足机械手使用特性的要求,具有外径小、信号稳定、性价比高等特点,适用于多种工况。随着自动化行业的发展,轻量化、小型化、集成化机器人用控制电缆值得继续深入研究。

## 参考文献:

[ 1 ] TÜV Rheinland. Requirements for cables used in robot system

[M]. Germany: TUV Rheinland, 2016.

[ 2 ] UL. Recommended practice for evaluating cables for use in repeated flexing applications: RP5770 [S]. Starbucks: UL, 2018.

[ 3 ] 田建永,袁欢,刘芸转. 机器人线缆性能检测技术研究及认证发展现状[J]. 日用电器, 2018(10): 15-17.

[ 4 ] 王红岭,张红艳,谢太阶,等. 工业互联网用 Profibus-PA 现场总线电缆的结构设计和测试[J]. 电线电缆, 2023(4): 22-26.

[ 5 ] 鲍继强. 一种机器人用电缆: CN213935684U [P]. 2021-08-10.

[ 6 ] 王昆. 机器人用柔性电缆的研发和性能验证[J]. 电线电缆, 2019(6): 19-21.

[ 7 ] 王会永,包大勇,李娜,等. 工业机器人用柔性电缆技术要求研究[J]. 电线电缆, 2021(6): 50-52.

(上接第 6 页)

[ 11 ] 舒印彪,汤涌,孙华东. 电力系统安全稳定标准研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 1-9.

[ 12 ] 舒印彪,刘泽洪,袁骏,等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-12.

[ 13 ] 王裕霜. 国内外海底电缆输电工程综述[J]. 南方电网技术,

2012,6(2):26-30.

[ 14 ] 黄小卫,蔡驰,李晓骏,等. 长距离海底电缆故障定位技术研究探讨[J]. 电线电缆, 2021(3): 35-40.

[ 15 ] 陈钢,邓声华,刘和平,等. 10 kV 配电网智能电缆的研发[J]. 电线电缆, 2021(2): 8-14.