

ICS  
A

**T/XXXXX**

团体标准

T/XXXX XXXX—XXXX

---

# 中压电缆终端和中间接头附件的选型导则

(征求意见稿)

---

2021 - 08 - 27 发布

河北省质量信息协会

2021 - 08 - 28 实施

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 关键参数的提取原则.....	1
5 选型的优化方法.....	6
附录 A（资料性附录） 选型优化方法应用实例.....	10

## 前 言

本文件按照 GB/T1.1—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。

本文件由河北省质量信息协会提出。

本文件由广东电网有限责任公司广州荔湾供电局归口。

本文件起草单位：广东电网有限责任公司广州荔湾供电局、华北电力大学、国网北京昌平供电公司。

本文件主要起草人：吴铮、廖磊、伍铭妍、张如昕、卢斌先、刘鹏龙、薛涛、孙欣宇、杨浩烁、胡俊竹、王珞珈。

# 引 言

XXXXXX

# 中压电缆终端和中间接头附件的选型导则

## 1 范围

本文件规定了额定电压8.7/15 kV三芯电缆冷缩式电缆附件产品在不同应用条件下的选型原则。本标准适用于额定电压8.7/15 kV三芯电缆冷缩式电缆附件产品，包含T型终端和中间接头。

## 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 311.1-2012 绝缘配合 第1部分：定义、原则和规则
- GB/T 12706.4-2008 额定电压6 kV到35 kV挤包绝缘电力电缆附件试验要求
- GB/T 18889-2002 额定电压6 kV到35 kV电力电缆附件试验方法
- T/CEC-118-2016 额定电压35 kV及以下冷缩电缆附件技术规范
- T/CEC-2021 中压电缆附件性能综合评价方法（草案）

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 冷缩附件

预制附件在常温下，用专业设备扩张至规定尺寸，并用骨架支撑。抽掉骨架后，附件自行收缩到预定尺寸的电缆附件。

### 3.2 终端

安装在电缆末端，以保证与该系统其他部分的电气连接，并保持绝缘至连接点的装置。

### 3.3 接头

连接两根电缆形成连续电路的附件。

### 3.4 工频耐压特性

电缆附件在工频电压作用下所能承受最大电压的能力。

### 3.5 热场耐受特性

电缆附件在大电流作用下所能表现出的散热能力。

## 4 关键参数的提取原则

### 4.1 工频电压局部放电试验

#### 4.1.1 试验方法

试验接线如图 1 所示，用并联法测局部放电信号，用控制台控制施加在电缆上的电压，用局放仪分析产生的放电信号。按照原理图，将试验平台搭建好。为了更好的展开试验，将每个厂家都制作了有缺陷和无缺陷各一个中间接头电缆。中间接头的缺陷是一个直径 2mm 的小钢珠，将其放在中间接头绝缘层上，夹在绝缘层和半导体层之间。由仿真结果可以得到小钢珠处的电场强度很高，可能会造成绝缘破坏，用于和无缺陷中间接头对比。试验的步骤如下：

- (1) 接高压之前先用校准源对局放仪进行校准。
- (2) 缓慢升高电压，至局放仪出现放电信号开始对样品进行 5 分钟的放电。
- (3) 待放电信号保持相对稳定时，逐步增加电压，以样品放电量达到 5pC 左右并保持稳定时所施加的电压作为起始放电电压，并对该电压进行记录。
- (4) 对各厂家的无缺陷中间接头都施加 25kV 电压，并通过局放仪进行数据的记录，分别记录每个样品的放电量、放电次数、放电能量、平均电流、均方值数据。每 1s 自动记录一次，记录 100 个数据点。有缺陷的中间接头施加 20kV 电压。

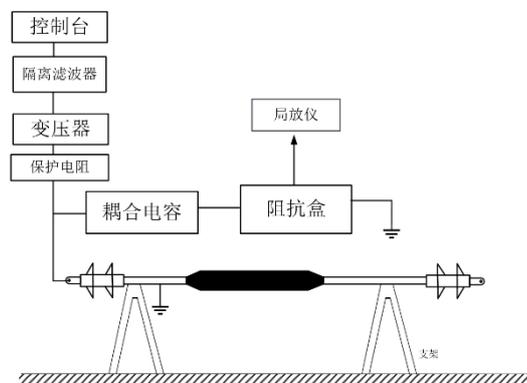


图 1 试验接线

#### 4.1.2 关键参数

从试验结果提取：

##### a) 起始放电电压

局部放电起始电压是指发生局部放电时试样两端施加的电压，工频电压下用有效值表示。一般是以视在放电电荷超过某一规定值时的最小电压作为放电起始电压。介质和气体的相对介电常数、介质和气隙的厚度、气隙的形状以及压力都会影响放电起始电压。

##### b) 视在放电电荷 $q_a$

视在放电电荷  $q_a$  是指在一次局部放电中试样两端出现的瞬变电荷，其单位为库伦 C 或者皮库 pC，视在放电电荷  $q_a$  与实际放电量  $q_r$  的关系为

$$q_a = q_r \frac{C_b}{C_c + C_b} \quad (1)$$

由于  $C_c \gg C_b$ ，所以  $q_a \ll q_r$ ，当气隙的面积或者厚度增大时， $q_a$  也会增大，当外加电压升高时，会有更多的气隙同时放电，相当于增大气隙的面积和厚度， $q_a$  增加更加明显。

##### c) 放电次数 N

放电次数 N 是指单位时间（通常为 1s）内局部放电的平均脉冲个数。外施电压的频率为 f 时，1s 内的放电次数为

$$N=4f \frac{U_m}{U_{cb}} \frac{C_b}{C_b+C_c} \quad (2)$$

其中， $U_m$ 为外加电压的峰值， $U_{cb}$ 为气隙的击穿电压。试样两端电压脉冲的次数等于气隙中的放电次数，但是在实际测量中涉及触发电平的选择，测得的放电次数是放电电压大于所选触发电平的次数。当外加电压的频率和大小增大时，放电次数会增加，在相同的试验电压下，介质的相对介电常数越大，气隙所承担的电压越大，放电次数就越多。

d) 放电能量 W

放电能量 W 是指在一次局部放电中消耗的能量，其单位为焦耳 J。放电能量为

$$W=\frac{1}{2}U_{im}q_a \quad (3)$$

其中， $U_{im}$ 为放电起始电压的峰值。由此可知影响放电能量的因素是视在放电电荷、起始放电电压和放电次数，因此气隙的面积或者厚度增大、外加电压升高、介质的相对介电常数增大都会使放电能量升高。

e) 平均电流 I

放电的平均电流 I 是指在一定时间间隔 T 内视在放电电荷绝对值的总和除以时间间隔 T，单位为安培 A。

$$I=\frac{1}{T}(|q_{a1}|+|q_{a2}|+L+|q_{an}|) \quad (4)$$

f) 均方率 D

放电均方率 D 是指在一定时间间隔 T 内视在放电电荷的平方之和除以时间间隔 T，单位为  $C^2/s$ 。

$$D=\frac{1}{T}(q_{a1}^2+q_{a2}^2+L+q_{an}^2) \quad (5)$$

可以看出，每秒内放电次数越多，每次放电的放电量越大，放电的平均电流和均方率就越大，因此气隙的面积或者厚度增大、外加电压升高、介质的相对介电常数增大都会使放电平均电流和均方率增大。

## 4.2 热场扩散试验

### 4.2.1 试验方法

试验采用升流器与电缆回路组成试验回路，用红外测温仪作为测量温度的工具。其中升流器即为大电流发生器，为实验回路提供电流。

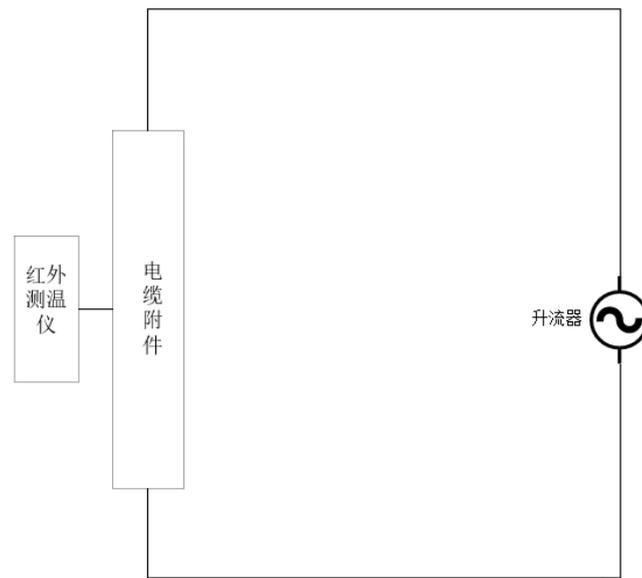


图 2 试验回路

本次试验旨在对不同的电缆附件样品进行测温试验。考虑电缆附件中由于生产和安装可能存在各种不同的缺陷，缺陷的存在可能对热扩散特性有影响，因此在本研究方法中提出了考虑缺陷存在时的热扩散特性的试验研究。电缆附件在运行时，主要包括两种热源：一是高压导体中通以运行电流是会产生焦耳热；二是施加在电介质的高压会产生介质损耗热。由于相对于高压导体的焦耳热来说，介质损耗热源很小，因此可以忽略。在热扩散试验中，仅需要考虑焦耳热，因此设计了大电流试验回路。设计为每种样品分别通过仅幅值不同的交流电流，每隔一段时间测量一次表面温度。

接下来给出所有样品的测温试验统计图。为了处理起始温度不同导致测量结果无法对比的问题，统计图横坐标为时间，单位为分钟，纵坐标为相对温度，相对温度的计算方式为：

$$\gamma_T = \frac{T(t)}{T_0} \quad (6)$$

其中  $T(t)$ 、 $T_0$  和  $\gamma_T$  分别为  $t$  时刻采样点的温度、初始温度和相对温度，单位： $^{\circ}\text{C}$ 。

热扩散试验实验步骤：

首先研究缺陷对电缆附件温度的影响：对待研究试样有缺陷的电缆附件与无缺陷的电缆附件进行对比试验，在相同时间内通过相同大小的电流，观察其温度随时间变化情况。

其次研究待研究试样的电缆附件的热扩散特性：对待研究试样无缺陷的电缆附件进行对比试验，在相同时间内通过幅值相同的电流，观察其温度随时间变化状况，。

最后研究电缆附件温度随时间变化状况与电流幅值大小的对应关系：对待研究试样无缺陷的电缆附件分别进行对比试验，在相同时间内通过幅值大小不同的电流，观察其温度随时间变化情况。

#### 4.2.2 关键参数

根据 4.2.1 的试验方法得到试验结果，从试验结果计算分析得到：

a) 温升曲线斜率

将所有待测试样品的温升曲线线性度最好的部分进行直线拟合，得到样品的温升曲线斜率，对温升曲线斜率进行统计分析，得到标准斜率、斜率的标准偏差，标准斜率与斜率的标准偏差按公式计算得到。

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (7)$$

式中：

$S$  为待测试样品温升曲线的斜率，单位（1/min）；

$i$  为待测试样品的编号， $i$  从 1 到  $n$ ；

$n$  为待测试样品的总数；

$T_s$  为标准斜率，单位（1/min）。

$$T_{ds} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - T_s)^2}{n-1}} \quad (8)$$

式中：

$T_{ds}$  为斜率的标准偏差，单位：1/min。

b) 温升曲线斜率对电流大小的敏感度

将所有待测试样品的温升斜率关于电流的敏感度进行统计分析，得到各待测样品的敏感度、标准敏感度和敏感度的标准偏差，敏感度、标准敏感度和敏感度的标准偏差应按公式计算得到。

$$E = \frac{S_d}{D} \times A \quad (9)$$

式中：

$S_d$  为样品在通过不同电流大小的情况下的斜率差值，单位：1/(min)；

$D$  为所通电流大小的差值，单位：A；

$E$  为拟合的直线斜率对所通电流大小的敏感度，单位：1/(min·A)；

$A$  为增益倍数，是为了使敏感度不至于太小而使得分析困难而将其扩大一定的倍数。

$$T_E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (10)$$

式中：

$E$  为待测试样品的敏感度，单位：1/(min·A)；

$i$  为待测试样品的编号， $i$  从 1 到  $n$ ；

$n$  为待测试样品的总数；

$T_E$  为标准敏感度，单位：1/(min·A)。

根据概率与统计原理给出敏感度的标准偏差的计算公式如下：

$$T_{dE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - T_E)^2}{n-1}} \quad (11)$$

式中：

$T_{dE}$  为敏感度的标准偏差，单位：1/min。

## 5 选型的优化方法

### 5.1 方法简述

以往的性能评价标准往往是从电缆终端和中间接头附件自身的质量出发，忽略了使用场所和使用条件的重要性，导致实际应用中电缆终端和中间接头附件事故频发。本导则从电缆终端和中间接头附件的选型和应用场所的角度建立中压电缆终端和中间接头附件性能评价体系，对参数不同的被评价电缆终端和中间接头附件进行性能排序。

评价的基本过程是先将原始数据矩阵统一指标类型得到正向化的矩阵，再对正向化的矩阵进行标准化处理以消除各指标量纲的影响，找到有限方案中的最优方案和最劣方案，分别计算各评价对象与最优方案和最劣方案间的距离，最后获得各评价对象与最优方案的相对接近程度，以此作为评价优劣的依据。

### 5.2 评价指标体系的构建

建立评价指标体系是电缆终端和中间接头附件性能评价工作的重要内容。电缆终端和中间接头附件的性能评价指标应该能够准确、清楚地反映出自身的工作状态和运行情况。因此需要仔细筛选，遵循系统、科学、客观的原则，建立全面的指标体系，这样才能保证评价结果的可靠性。

#### 5.2.1 评价指标构建方法

(1) 明确评价的目标。先对评价目标进行界定，划出评价范围，才能进一步细化评价指标。本文的评价目标是电缆终端和中间接头附件的性能。

(2) 确定评价指标的层次结构，一般来说分为一级评价指标和二级评价指标。

(3) 初选评价指标。搜集电缆终端和中间接头附件制造商提供的技术资料，结合前文中对电缆终端和中间接头附件运行性能的分析，列出可供选择的指标。

(4) 确定评价指标。对各项指标进行分析，按照评价指标的构建原则进行筛选，最终确定各项评价指标。

(5) 构建评价指标体系。为已经确定的指标进行分类，量化定性指标，并对所有指标进行标准化处理。

#### 5.2.2 电缆终端和中间接头附件的性能评价指标

经评估，得到一级指标两个，分别为局放特性和热扩散特性。二级指标七个，分别为局放特性下的起始放电电压、放电量、放电次数、放电能量、平均电流；热扩散特性下的温升曲线斜率、温升曲线对电流敏感度。其结构如图 3 所示。

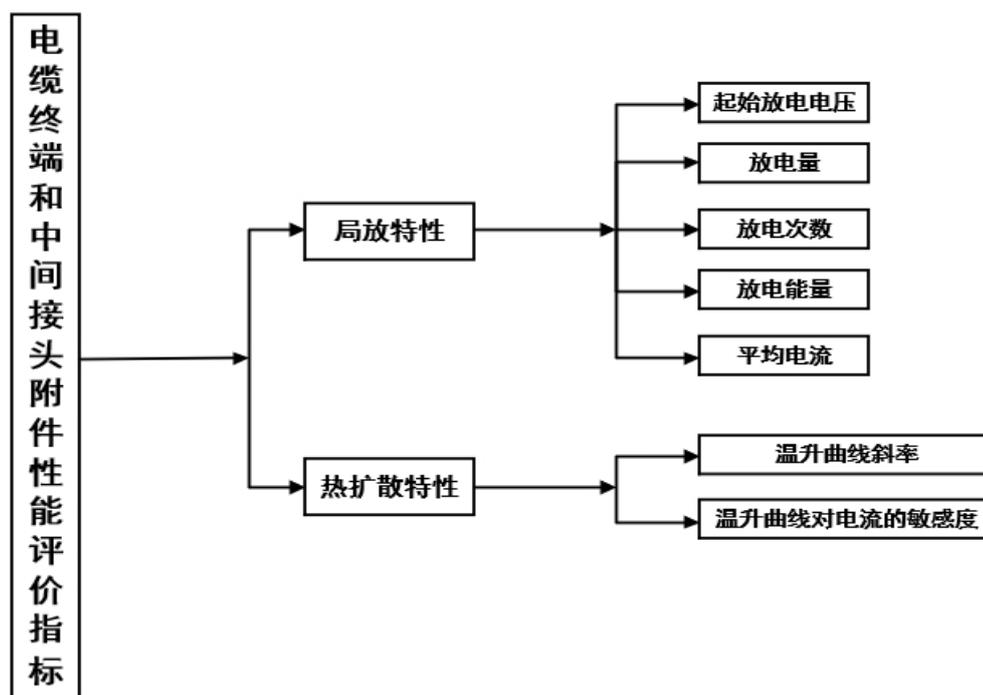


图 3 评价指标结构图

构造评价矩阵  $R$ ，矩阵中共含有  $m$  个评价对象和  $n$  个评价指标 ( $n=6$ )，对各指标进行量化，对于定性指标，采用 1~9 比较度进行打分。量化后对应的指标值为  $r_{ij}$  ( $i=1, 2, 3 \dots m, j=1, 2, 3 \dots n$ )。由于各评估指标之间单位、数量级存在较大差别，因此需要对指标矩阵进行规范化处理，得到无量纲指标矩阵  $X = \{x_{ij}\}$ 。评价指标分为效益型指标和成本型指标，效益型指标是指数值越大越好的指标，成本型指标是指数值越小越好的指标。规范化计算公式如下。

对于效益型指标：

$$x_{ij} = \frac{r_{ij} - \min(r_j)}{\max(r_j) - \min(r_j)} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

对于成本型指标：

$$x_{ij} = \frac{\max(r_j) - r_{ij}}{\max(r_j) - \min(r_j)} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

### 5.3 指标权重确定

采用层次分析法确定指标权重。依据评价对象的情况，将复杂问题分解为若干个不同的组成部分，这些不同的组成部分根据属性或者条件的不同又分为不同的组，形成层次结构。将问题分为目标层、项目层和指标层之后，利用下层对上层的重要性确定评价指标的权重。

#### 5.3.1 建立各层次的判断矩阵

对于位于同一层次中的各个影响因素，依据以往经验以及向该领域专家咨询来确定其相对重要度，采用两两比较的方法，根据“1~9 比较度”得到判断矩阵。“1~9 比较度”是层次分析法中判断矩阵指标的标准，其含义如表 1 所示。判断矩阵是一个正互反矩阵，且满足：

$$c_{ij} = 1 / c_{ji} \quad (14)$$

$$c_{ii} = 1 \quad (15)$$

表1 判断标度及含义

标度 $c_{ij}$	标度属性
1	因素重要度一样
3	因素 i 比因素 j 重要度稍强
5	因素 i 比因素 j 重要度强
7	因素 i 比因素 j 重要度明显强
9	因素 i 比因素 j 重要度绝对强
2, 4, 6, 8	因素 i 比因素 j 重要度为相邻的中值
1, 1/2, ..., 1/9	两个因素重要度与上述相反

### 5.3.2 计算各指标的权重

求解判断矩阵的特征方程。求出矩阵的最大特征值以及其所对应的特征向量，对特征向量进行归一化处理，即为指标的权重向量  $W$ 。

$$CW = \lambda W \quad (16)$$

得到指标权重后，从指标矩阵中得到正负理想解。将规范化后的指标矩阵乘以对应的指标权重形成加权标准化矩阵  $Z$ ，即：

$$z_{ij} = w_{ij} x_{ij} \quad (17)$$

确定每个指标集合（即同一属性的指标）的最大值和最小值，以  $Z_0^+$  表示正理想解，以  $Z_0^-$  表示负理想解，则有：

$$z_0^+ = (\max_{1 \leq i < m} z_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m) = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+) \quad (18)$$

$$z_0^- = (\min_{1 \leq i \leq m} z_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m) = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^-) \quad (19)$$

计算欧氏距离和相对贴近度。第  $i$  个对象与理想方案的距离  $D_i^+$  和与负理想方案的欧氏距离  $D_i^-$ ：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - x_i^+)^2} \quad (20)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - x_i^-)^2} \quad (21)$$

各个目标的相对贴近度：

$$P_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} (i = 1, 2, \dots, m) \quad (22)$$

最后将各目标的相对贴近度开展排序，从而确定最优电缆终端和中间接头附件型号。

---

附录 A  
(资料性附录)  
选型优化方法应用实例

以无缺陷中间接头为例，各厂家参数指标如下表：

表 A.1 参数指标

厂家名称	起始放电电压 (kV) 效益型	放电量 (pC) 成本型	放电次数 (次/秒) 成本型	放电能量 (J) 成本型	平均电流 (A) 成本型
厂家 1	15.9	6.42	102	$5.1013 \times 10^{-8}$	$1.0788 \times 10^{-8}$
厂家 2	6.30	168.33	12290	$5.3021 \times 10^{-7}$	$7.5357 \times 10^{-7}$
厂家 3	13.2	56.87	4807	$3.7526 \times 10^{-7}$	$9.4911 \times 10^{-8}$
厂家 4	23.3	7.72	95	$8.9833 \times 10^{-8}$	$5.2007 \times 10^{-9}$
厂家 5	19.3	8.27	93	$7.9789 \times 10^{-8}$	$7.102 \times 10^{-9}$
厂家 6	15.4	59.72	2339	$4.5985 \times 10^{-7}$	$5.517 \times 10^{-8}$
厂家 7	17.9	62.66	2171	$5.6082 \times 10^{-7}$	$5.4131 \times 10^{-8}$
厂家 8	13.0	160.25	593	$1.0416 \times 10^{-6}$	$5.5716 \times 10^{-8}$
厂家 9	23.5	47.46	81	$5.5761 \times 10^{-7}$	$1.1643 \times 10^{-8}$

根据上述表格构造样本数据的评价矩阵  $R$ ，矩阵中共含有 9 个评价对象和 5 个属性指标。对各指标进行量化，量化后对应的指标值为  $r_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,9, j=1,2,\dots,5$ )。由于各评估指标之间单位、数量级存在较大差别，因此需要对指标矩阵进行规范化处理，得到无量纲指标矩阵  $X=\{x_{ij}\}$ 。

评价指标分为效益型指标和成本型指标，效益型指标是指数值越大越好的指标，成本型指标是指数值越小越好的指标。按照公式 12、公式 13 计算得到矩阵  $X$  如下：

$$X = \begin{bmatrix} 0.5581 & 1 & 0.9983 & 1 & 0.9925 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5162 & 0 \\ 0.4012 & 0.6884 & 0.6129 & 0.6727 & 0.8801 \\ 0.9884 & 0.992 & 0.9989 & 0.9608 & 1 \\ 0.7558 & 0.9886 & 0.999 & 0.9710 & 0.9975 \\ 0.5291 & 0.6708 & 0.8151 & 0.5873 & 0.9332 \\ 0.6744 & 0.6526 & 0.8288 & 0.4853 & 0.9346 \\ 0.3895 & 0.0499 & 0.9581 & 0 & 0.9346 \\ 1 & 0.7465 & 1 & 0.4886 & 0.9914 \end{bmatrix}$$

对于位于同一层次中的各个影响因素，依据以往经验以及向该领域专家咨询来确定其相对重要度，采用两两比较的方法，根据“1~9 比较度”得到判断矩阵。“1~9 比较度”是层次分析法中判断矩阵指标的标准，其含义如表 A.2 所示。

表 A.2 判断标度及意义

标度 $c_{ij}$	标度属性
1	因素重要度一样
3	因素 i 比因素 j 重要度稍强
5	因素 i 比因素 j 重要度强
7	因素 i 比因素 j 重要度明显强
9	因素 i 比因素 j 重要度绝对强
2, 4, 6, 8	因素 i 比因素 j 重要度为相邻的中值
$1, 1/2, \dots, 1/9$	两个因素重要度与上述相反

根据以上标准构建如附表 3 所示判断矩阵：

表 A.3 判断矩阵

特征量	起始放电电压	放电量	放电次数	放电能量	平均电流
起始放电电压	1	3	5	7	9
放电量	1/3	1	3	5	7
放电次数	1/5	1/3	1	3	5
放电能量	1/7	1/5	1/3	1	3
平均电流	1/9	1/7	1/5	1/3	1

通过计算可以得到以上矩阵的最大特征值对应的特征向量为

$$a = \begin{bmatrix} 0.863 \\ 0.4401 \\ 0.217 \\ 0.1067 \\ 0.0561 \end{bmatrix}$$

对特征向量进行归一化处理，得到指标的权重向量  $W$ 。

$$W = \begin{bmatrix} 0.5128 \\ 0.2615 \\ 0.1289 \\ 0.0634 \\ 0.0333 \end{bmatrix}$$

将规范化后的指标矩阵乘以对应的指标权重，得到加权标准化矩阵  $Z$ ：

$$Z = \begin{bmatrix} 0.2862 & 0.2615 & 0.1287 & 0.0634 & 0.0331 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0327 & 0 \\ 0.2057 & 0.1800 & 0.0790 & 0.0426 & 0.0293 \\ 0.5069 & 0.2594 & 0.1288 & 0.0609 & 0.0333 \\ 0.3876 & 0.2585 & 0.1288 & 0.0616 & 0.0332 \\ 0.2713 & 0.1754 & 0.1051 & 0.0372 & 0.0311 \\ 0.3458 & 0.1707 & 0.1068 & 0.0308 & 0.0311 \\ 0.1997 & 0.0130 & 0.1235 & 0 & 0.0311 \\ 0.5128 & 0.1952 & 0.1289 & 0.0310 & 0.0330 \end{bmatrix}$$

根据公式 (18)、公式 (19) 可以得到：

$$z_0^+ = [0.5128 \quad 0.2615 \quad 0.1289 \quad 0.0634 \quad 0.0333]$$

$$z_0^- = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

根据公式 (20)、公式 (21) 计算正负欧氏距离可得：

$$D^+ = [0.23 \quad 0.59 \quad 0.32 \quad 0.01 \quad 0.13 \quad 0.26 \quad 0.19 \quad 0.40 \quad 0.07]$$

$$D^- = [0.41 \quad 0.03 \quad 0.29 \quad 0.59 \quad 0.49 \quad 0.34 \quad 0.40 \quad 0.24 \quad 0.57]$$

根据公式 (22) 计算贴近度可得：

$$P = [0.65 \quad 0.05 \quad 0.47 \quad 0.99 \quad 0.37 \quad 0.57 \quad 0.67 \quad 0.80 \quad 0.88]$$

由贴近度结果由大到小进行排序可知：

厂家 4 > 厂家 9 > 厂家 5 > 厂家 7 > 厂家 8 > 厂家 6 > 厂家 3 > 厂家 1 > 厂家 2

根据优化选择的结果，在此使用场合下采用厂家 4 生产的中间接头，具有最佳使用效果。

