

DOI: 10.7667/PSPC170241

# 基于ECP的轨道交通直流牵引供电系统开关状态评价算法

林勇<sup>1</sup>, 徐钦炜<sup>1</sup>, 张俊强<sup>2</sup>, 程乐峰<sup>3</sup>, 吴子杰<sup>3</sup>, 余涛<sup>3</sup>

(1. 广州地铁集团公司, 广东 广州 510330; 2. 广州白云电器设备股份有限公司, 广东 广州 510460;  
3. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 建立1500 V直流开关柜状态评价模型对地铁的安全运行具有重要意义。为此, 依据DC1500 V直流开关柜运行原理及其运行过程中体现的指标量, 以断路器信息为主, 结合配件信息和柜体信息, 建立其状态评价指标体系, 对直流开关柜功能状态进行综合评价。状态评价算法以熵-突变级数(Entropy-Catastrophe Progression, ECP)法为基础, 以信息熵取代主观权重, 避免了评价过程中主观因素的干扰, 使得设备信息能更直接地影响评价过程, 并依据云模型进行指标模糊化, 充分考虑了指标量的随机性和模糊性。状态评估模型充分考虑了影响直流开关柜运行状态的各种因素, 通过信息熵能客观反映实际情况, 并能在指标缺失的情况下给出合理评价。应用开关柜实际运行数据进行实例分析, 验证了所提出的状态评价算法的有效性和可行性。

**关键词:** 开关柜; 可靠性; 状态评价; 熵-突变级数法; 轨道交通; 直流牵引供电系统

## Status evaluation algorithm of DC traction power supply system switchgear based on ECP for rail transit

LIN Yong<sup>1</sup>, XU Qinwei<sup>1</sup>, ZHANG Junqiang<sup>2</sup>, CHENG Lefeng<sup>3</sup>, WU Zijie<sup>3</sup>, YU Tao<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Metro Co., Ltd., Guangzhou 510330, China; 2. Guangzhou Baiyun Electric Stock Co., Ltd., Guangzhou 510460, China; 3. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** It's of great significance to establish 1500 V DC switchgear (DCS) status evaluation model for the safe operation of the subway. According to the operation principle of 1500 V DCS and the indexes in its operation process, using circuit breaker information mainly, and combining with the information of accessories and cabinets, this paper establishes a status evaluation index system of 1500V DCS, which is used to make a comprehensive assessment of the function for DCS. The entropy-catastrophe progression based status evaluation algorithm replaces the subjective weight with information entropy, which avoids the interference of the subjective factors in the evaluation process and makes the equipment information more directly influence the evaluation process. It conducts index fuzzification according to the cloud model and fully considers the randomness and fuzziness of indexes. The status evaluation model also fully considers various factors that affect the operation status of DCS. The information entropy can objectively reflect the actual status of DCS, and a reasonable evaluation is given in the absence of indexes. A case study is given to validate the effectiveness and feasibility of the proposed algorithm by using the actual operation data of DCS.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477055 and No. 51777078) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. [2015]000303ZB00002).

**Key words:** switchgear; reliability; status evaluation; entropy-catastrophe progression method; rail transit; DC traction power supply system

## 0 引言

轨道交通直流供电系统中, DC1500 V 开关柜是保证列车供电安全稳定的最后一道防线, 确保其

正常运行十分重要<sup>[1-3]</sup>。其功能是切断故障电流, 并能在故障修复后恢复地铁轨道交通的供电。当直流开关柜无法实现预定功能时, 会严重威胁地铁运行安全, 因此有必要对直流开关柜(DC Switchgear, DCS)的运行情况进行综合可靠性评价分析, 准确掌握设备的功能状态, 为轨道交通的安全运行提供保障。

电气设备状态评价是设备管理人员制定状态

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477055, 51777078);  
中国南方电网科技项目([2015]000303ZB00002)

检修策略的前提, 针对目前在电网广泛应用的输变电设备(变压器、GIS、架空线等), 国家电网和南方电网公司均制定了相应的状态评价规范和导则, 指导设备的日常运维管理<sup>[4-6]</sup>。众多学者也提出了模糊综合评价、可拓层次评价、神经网络、粗糙集理论等方法进行输变电设备状态评价<sup>[7-12]</sup>, 并搭建了相关的输变电设备状态评估模型和状态评价指标体系<sup>[13-14]</sup>。但对于轨道交通特有的 1500 V 直流供电系统设备, 相关方面的研究主要集中于断路器灭弧原理<sup>[15-16]</sup>、保护装置整定<sup>[17-18]</sup>及故障后续处理<sup>[19-20]</sup>方面, 目前尚缺乏对其状态评价方法研究。

因此, 本文参考高压断路器和开关柜状态评价的相关方法<sup>[21-23]</sup>, 分析影响直流开关柜功能的电气、机械、绝缘等各方面的指标, 依据直流断路器实现合闸/保持/分闸过程中对各类指标的要求, 以广州地铁嘉禾望岗在线监测系统及检修规程为基础进行工程实例分析, 将轨道交通直流牵引供电系统重点——1500 V 直流开关——作为研究对象, 提出了一种基于熵-突变级数(Entropy-Catastrophe Progression, ECP)法的 1500 V 直流开关可靠性状态评估体系。该体系充分结合了在线监测数据和离线检修数据, 利用云模型考虑随机性和确定性得到指标模糊隶属度, 并采用熵权法确定指标的优先程度, 最后利用突变级数归一化确定直流开关设备的最终运行状态。

## 1 熵-突变级数法和云模糊隶属度模型

### 1.1 突变级数法

突变理论的基础是分歧理论、拓扑学和结构稳定性理论, 它以系统的势函数描述和预测事物的不连续变化, 并以此来研究突变的临界点及其附近的非连续变化, 突变理论一般将突变临界点附近的突变分为有限个初等突变来具体研究突变现象<sup>[24-25]</sup>。

突变级数法是一种类似于模糊综合评价的评价方法, 均需要先将评价目标层层分解至底层指标, 并通过模糊数学将指标值转化为模糊隶属度函数, 其主要不同在于产生模糊隶属度后的突变级数归一化, 前者不需要像常见的模糊综合评判一样对各指标进行具体定权, 而只需要确定指标的相对重要度, 即可通过突变级数对系统的隶属度矩阵层层递进, 得出最终的突变隶属度值, 进而确定系统状态<sup>[26-28]</sup>。

依据最终的评价目标, 按树状层次结构排列, 对其进行层层分解, 直至获得可具体量化的底层指标。在同一层中, 将主要因素排列在前, 次要因素排列在后。一般突变系统状态变量的个数 $\leq 4$ 个, 相应地各层指标的分解个数 $\leq 4$ 个。

在对评价目标进行多层次分解时, 如果一个目

标包含 1/2/3/4 个子指标, 那么其可视为折叠(fold)/尖点(cusp)/燕尾(swallowtail)/蝴蝶(butterfly)突变系统, 评价目标对应于势函数  $f(x)$ , 子指标对应势函数的控制变量  $a/b/c/d$ , 四种常见的突变级数模型归一化如表 1 所示。

表 1 突变系统类型及归一化公式

Table 1 Types of mutation systems and normalized formulas			
类型	势函数 $f(x)$	控制变量	归一化公式
折叠型	$x^3+ax$	1 个( $a$ )	$x_a=a^{1/2}$
尖点型	$x^4+ax^2+bx$	2 个( $a, b$ )	$x_a=a^{1/2}, x_b=b^{1/3}$
燕尾型	$x^5+ax^3+bx^2+cx$	3 个( $a, b, c$ )	$x_a=a^{1/2}, x_b=b^{1/3}, x_c=c^{1/4}$
蝴蝶型	$x^6+ax^4+bx^3+cx^2+dx$	4 个( $a, b, c, d$ )	$x_a=a^{1/2}, x_b=b^{1/3}, x_c=c^{1/4}, x_d=d^{1/5}$

在实际输入信息无法满足预定模型需要的情况下, 实施的突变系统可以依据输入的信息量进行变化。如蝴蝶突变系统, 运行时需要四个指标量的数据, 但当某一项数据缺失时, 可转化为控制燕尾突变系统, 其只需要三个控制变量即可实施。此方法可在数据缺失的情况下更方便准确地实施, 并能在仅提供关键数据时就对设备状态进行科学的评价。

### 1.2 熵值-突变模型

突变级数法需要考虑各层次中子指标的重要程度, 熵值法在此时十分适用。熵值法相比于专家调研法和层次分析法, 充分利用了指标信息本身所隐含的信息熵的价值, 其给出的指标权重会更加科学和贴合实际<sup>[29-30]</sup>。

熵是热力学中体现系统无序程度的一种度量<sup>[31]</sup>, 是热力学的中心概念, 热力学中的熵通常用于表征一个物理系统的无序程度<sup>[32]</sup>, 1877 年奥地利物理学家玻尔兹曼建立了玻尔兹曼熵公式, 对熵的统计解释进行了一种更为精确的描述: 一团物质在保持宏观特性不变的情况下, 其中所包含的粒子所有可能具有的不同微观状态数就是熵。根据玻尔兹曼提出的熵的统计解释中得出, 其提出熵的统计表达式为<sup>[32]</sup>

$$S = k \ln \Omega + S_0 \quad (1)$$

式中:  $S$  为熵函数;  $k$  为玻尔兹曼常数( $1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}$ );  $\Omega$  代表系统所处的宏观状态对应的微观状态的数目, 或称为热力学概率;  $S_0$  为熵常数。

当  $S_0=0$  时, 得到玻尔兹曼关系式:  $S=k \ln \Omega$ , 该表达式揭示了热力学中熵的微观本质, 即在孤立系统中进行的过程是热力学概率小的状态向热力学概率大的状态过渡的过程, 因此, 当  $\Omega$  越大, 则  $S$  也越大, 即当系统的微观状态数目越多时, 表明系统内部运动越具多样性, 越混乱无序, 熵越大; 反之, 可得到当系统的微观状态数目越少时, 系统内部运动越单一化, 越有序, 熵越小; 再回到信息熵

这一概念上来, 由于信息论中信息熵是作为一个随机事件的不确定性或信息量的度量, 即信息熵可看成是系统混乱程度的度量(平均信息量), 因此, 信息熵越大, 系统的无序程度也就越高, 系统越混乱, 其平均程度越高; 信息熵越小, 信息的无序度越小, 系统越趋单一化, 其无序度越小。

假设对于设备的状态评价指标体系具有  $n$  个指标量,  $y_{ij}$  为第  $i$  个设备的第  $j$  个指标规格化后的数值, 则对于搜集到的  $m$  组评价指标信息, 第  $j$  个指标的信息熵为

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \quad (2)$$

式中:  $E_j$  为指标  $j$  的信息熵;  $y_{ij}$  为第  $i$  组第  $j$  个指标规格化后的数值。当  $y_{ij}=0$  或  $y_{ij}=1$  时, 可认为  $y_{ij} \ln y_{ij}=0$ 。

直流开关柜状态信息指标的熵直接体现这些指标在直流开关柜不同运行状态下的变化情况。某一指标在不同运行状态下变化越大, 其熵值越小, 通过该指标进行的状态评价越能准确反映设备运行状态, 在运用突变级数进行排序时, 需将该指标排在前列。通过熵值-突变模型, 避免了主观因素的影响, 让设备的客观信息直接地在状态评价过程中得到体现, 具有更多信息量的指标。因而通过排在前列, 确保评价指标体系能充分地反映实际情况。

### 1.3 云模糊隶属度模型

应用突变级数进行模糊评价还需对原始数据进行规格化, 依据不同指标量的取值范围和量纲单位, 需将指标量转化为无量纲数值(文中为 0~1), 并通过与各指标相匹配的隶属度函数, 将规格化数据转化为模糊评价矩阵, 最终应用突变级数归一化公式(如表 1), 得到最终评价结果。

云模型是李德毅院士提出的一种随机性和模糊性相结合的定性定量转换模型, 该模型是对模糊理论隶属函数概念的创新与发展, 正态云模型在其中最具有普适性<sup>[28]</sup>。由于开关柜中许多定性和定量的因素都近似服从正态或半正态分布, 因而利用正态云模型确定开关柜的隶属函数和模糊判断矩阵是适用的、可靠的。

若已知某一指标在某一状态下的数值上限和下限, 如  $[A_{\min}, A_{\max}]$ , 那么此状态下的正态云模型可视为双边约束的云, 它的各数值特征参数计算公式为

$$\begin{cases} Ex = (A_{\min} + A_{\max}) / 2 \\ En = (A_{\max} - A_{\min}) / 6 \\ He = k \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $k$  是由变量本身的模糊度来确定的常数;  $A_{\max}$ 、 $A_{\min}$  是对应状态指标的上下限值, 具有一定的主观性;  $Ex$  是指标在该状态下的期望;  $En$  是指标在该状态下的熵, 代表指标偏离期望的程度;  $He$  是超熵, 代表该指标实际情况与正态分布的偏离程度。实际情况下, 有些指标只具有数值上限(如 GIS 气室的微水含量)或数值下限(绝缘电阻), 即  $(-\infty, A_{\max})$  或  $[A_{\min}, +\infty]$ , 其缺失的边界参数或期望值可以依据现实状态下指标的最大/最小值来确定, 然后再按照式(3)计算云参数。

设定一个云模型, 其特征参数为:  $[Ex, En, He]=[0.6, 0.05, 0.005]$ , 得到云分布如图 1 所示。

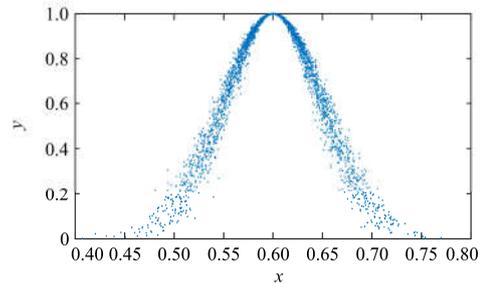


图 1 云模型分布图

Fig. 1 Cloud model distribution

假设将指标状态划分为正常、注意、异常和严重四个状态等级区间, 即  $V_1: [0, a]$ ;  $V_2: [b, c]$ ;  $V_3: [d, e]$ ;  $V_4: [f, g]$  或  $[g, +\infty]$ 。参考相关文献的处理方法<sup>[33]</sup>, 云模型实际分布的三个特征值的确定如表 2 所示。

表 2 云模型特征数值的确定

Table 2 Determination of characteristic values of cloud model

云参数	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
$Ex$	$Ex_1=a/2$	$Ex_2=(b+c)/2$	$Ex_3=(d+e)/2$	$Ex_4=g$
$En$	$En_1=a/6$	$En_2=(c-b)/6$	$En_3=(e-d)/6$	$En_4=(2g-d-e)/6$
$He$	0.005	0.005	0.005	0.005

## 2 直流开关柜状态评价体系

### 2.1 初始评价指标体系

反映直流开关柜运行状态的指标量既有来源于带电监测的信息, 又有来源于离线检修的信息; 既有容易测量的定量信息(电阻、时间等), 又有难以具量的定性信息(外观情况、磨损情况等)。据此, 将可在直流开关柜日常运行维护过程中搜集到的信息, 按功能部件, 将其分为断路器小车、柜体、配件这三大类, 以便对直流开关柜进行评价<sup>[34-35]</sup>。

断路器小车状态信息可分为电气部分和机械部分, 电气部分包括: 1) 开断磨损, 有开断次数、

电磨损、使用年数; 2) 绝缘, 有断口绝缘电阻、一次回路对框架绝缘电阻和一次回路对地绝缘电阻; 3) 电阻, 有主回路电阻、合闸保持电阻、合闸线圈直流电阻; 机械部分包括: 1) 时间, 有分闸时间、合闸时间; 2) 电流, 有最小合闸保持电流、合闸保持电流、分闸启动电流、合闸启动电流。

配件状态主要包含断路器零部件可见磨损信息、避雷器信息、继电保护装置、隔离放大器及其他零部件状态, 其中, 避雷器状态主要由泄漏电流/绝缘电阻体现, 继电保护装置状态的影响因素有硬件和软件, 其他如显示屏等零部件正常与否也可划分配件状态。

柜体状态主要为断路器小车、开关柜外绝缘金属框架及一些主要部件的状态, 主要体现为柜体外观情况, 有无形变, 以及安装在柜体上的温度传感器测得的温度信息等。此外, 环境污秽、湿度、温度也是重要的影响因素。

建立直流开关的评价体系, 包括: 直流开关柜状态评价指标体系, 如表 3 所示, 该体系中包含三层, 即第一层目标层、第二层特性层和第三层因素层; 配件信息评价体系, 如表 4 所示, 该体系包括特性、影响因素、检测信息和评价标准等; 柜体信息评价体系, 如表 5 所示, 该体系包含信息同表 4 类似。

表 3 直流开关柜状态评价指标体系

目标层	特性层	因素层	指标类型	
断路器 $A_1$	电气特性 $B_1$	开断磨损 $C_1$	使用年数 $D_1$	
			开断次数 $D_2$	
			相对电磨损度 $D_3$	
	绝缘情况 $C_2$	断口绝缘 $D_4$	一次对框绝缘 $D_5$	
			一次对地绝缘 $D_6$	
			电阻情况 $C_3$	主回路电阻 $D_7$
				合闸保持电阻 $D_8$
				合闸线圈直流电阻 $D_9$
			时间状态 $C_4$	合闸时间 $D_{10}$
	机械特性 $B_2$	最小合闸电流 $D_{12}$		
		电气状态 $C_5$	最小合闸保持电流 $D_{13}$	
			合闸启动电流 $D_{14}$	
	分闸启动电流 $D_{15}$			
	配件信息 $A_2$	部件磨损、避雷器信息、隔离放大器、继电保护装置	触头磨损、引弧电极、MU 金属条、灭弧室、零部件	—
			柜体信息 $A_3$	本体、环境

表 4 配件信息评价体系

特性	影响因素	监测信息	评价标准
部件磨损	触头磨损	无/有	长度减少度
	引弧电极、MU 金属条	无/有	电机烧蚀面积占比
	灭弧室	无/有	灭弧栅片烧蚀情况
	零部件(如固定螺丝、连接电缆等)	无/有	有无零部件不正常运行
	避雷器信息	无/有	是否有电流泄漏情况
	隔离放大器	无/有	功能正常否
	继电保护装置	无/有	是否有误动
	分流器	无/有	外观正常否

表 5 柜体信息评价体系

特性	影响因素	监测信息	评价标准
本体	柜体外观	无/有	油漆破损等
	断路器小车	无/有	导轨、滑轮手动操作杆、接地线及框架连接装置
	进出端子排	无/有	外观/紧固
	绝缘挡板操动机构	无/有	外观/紧固/润滑/锈蚀
运行环境	温度	无/有	是否工作在允许温度下
	湿度	无/有	湿度是否超标
	污秽度	无/有	是否超标

## 2.2 模糊隶属度确定

### 2.2.1 指标的规格化处理

在对直流开关柜各状态指标进行隶属度确定和熵值排序之前需将其进行规格化处理, 去除不同的量纲, 变化成可比较的 0~1 数值, 具体处理如下。

1) 对于绝缘电阻类数据, 如断口绝缘电阻、一次回路对框架绝缘电阻、一次回路对地绝缘电阻等的处理方法采用指数函数进行处理, 即

$$f(x) = \exp\left(\frac{M-x}{x}\right) \quad (4)$$

式中:  $f(x)$  为指标规格化后的数据;  $x$  为实际指标值;  $M$  为该指标的阈值/报警值。

2) 对于其余电气类和时间类参数, 如合闸线圈/合闸保持电阻、分合闸时间、操动电流等的处理方法, 采用 Gauss 函数进行处理, 即

$$f(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2\right) \quad (5)$$

式中:  $a$  为最优指标, 即出厂指标或额定指标;  $b$  为设定的指标值允许浮动范围。

### 3) 其他指标

对于某些难以具体量化的指标如引弧电极磨损、柜体情况、配件信息等, 很难通过相关实验或测量得到具体数值, 可采用区间打分法等多种打分

评价法由多位专家确定或通过实际运行人员的经验确定。如对于引弧电极磨损,可通过现场运行人员判断,若其磨损度很低,约为限值的0.1,即可将其规格化为0.1。

### 2.2.2 隶属度函数的确定

假设对于某指标,评价其具有四个状态,对应指标规格化后状态分区为:正常  $V_1[0, 0.4]$ ; 注意  $V_2[0.2, 0.6]$ ; 异常  $V_3[0.4, 0.8]$ ; 严重  $V_4[0.8, 1]$ ,之后形成的云模糊隶属度分布,如图2所示。

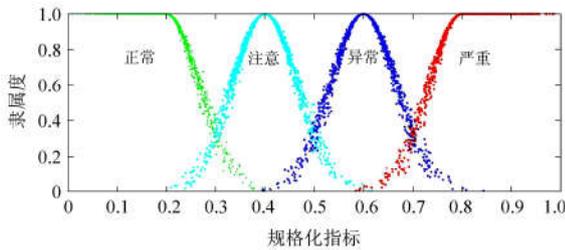


图2 指标状态云模糊分布图

Fig. 2 Cloud fuzzy distribution of index status

对于不同的指标,因实际情况的不同,其隶属度分布也不相同,需单独确定它们的状态隶属度分布函数,即对应的云模糊参数。

### 2.3 熵值-突变模型的确立和归一化

从开关柜初始评价指标体系可以看出,在输入信息完整的情况下,开关柜评价体系包含常见的折叠、尖点、燕尾、蝴蝶等突变型系统,以搜集到的评价指标信息组,对各底层指标规范化处理后,并依据熵值对各系统子指标进行排序,将初始评价指标体系转化为更科学的熵值-突变评价指标体系,以进行之后的归一化处理。

模糊综合评价的最后一步是将评价矩阵转化为最终隶属度,一般有加权平均、取大取小、环和乘积等方式,而采用突变模型时,需先通过突变归一化公式,将指标评价矩阵转化为突变系统的评价矩阵,然后考虑指标间的“互补”(指标间存在明显的相互关联)和“非互补”关系,通过取平均值  $(x = \sum_{i=1}^n x_i / n)$  或“大中取小”  $(x = \min(x_i))$ ,其中  $i=a, b, c, d$ ,将突变评价矩阵转化为最终的突变隶属度。

在直流开关柜评价指标体系中,机械特性、开断磨损为互补指标,其他如断路器绝缘情况、电阻情况等均为非互补指标。

## 3 实例分析

以在广州嘉禾望岗地铁站的直流开关柜(如图3所示)作为状态评价对象,在考虑断路器实际指标信

息搜集状况的情况下,分析如何由直流开关指标量得到评价结果。



图3 评价对象: 直流开关柜

Fig. 3 Evaluation object: DC switchgear

因为在实际运行中,基于表3,直流开关柜配件信息  $A_2$  和柜体信息  $A_3$  一般为正常情况,且较难在不影响其运行的情况下进行简单精确的评分,当这些部位有异常情况发生时,也容易被直接发现并进行相应的处理,因此在此可视为缺失。因此直流开关柜评价结果  $X=A_1=A_2=A_3$ ,是控制变量为  $(B_1, B_2)$  的尖点突变系统。在初始直流开关状态评价体系中,包含控制变量为两个的  $(C_4, C_5)$ 、 $(D_{10}, D_{11})$  的尖点突变;控制变量为三个的  $(C_1, C_2, C_3)$ 、 $(D_1, D_2, D_3)$ 、 $(D_4, D_5, D_6)$ 、 $(D_7, D_8, D_9)$  的燕尾突变;控制变量为四个的  $(D_{11}, D_{12}, D_{13}, D_{14})$  的蝴蝶突变。在断路器信息搜集,因为以往运行维护缺乏对开断磨损的信息记录(在实际运行中,当直流开关柜有异常发生时,对断路器小车进行备用更换,更换记录难以寻找,因此断路器小车的实际运行记录难以搜集),  $B_1$  转化为控制变量为  $(C_2, C_3)$  的尖点突变系统;对于和/分闸启动电流,难以得到和实际运行时开断大电流情况相匹配的分合闸线圈启动电流,因此  $C_5$  转化为控制变量为  $(D_{11}, D_{12})$  的尖点突变系统。

以搜集到的八组直流开关柜运行状态信息,计算指标层的信息熵值,依据熵值大小,将各指标重新进行重要度排序。

绝缘状态  $C_2$  的指标值如表6所示,单位为  $\Omega$ ,指标为越大越优指标,规格化公式采用式(4),当指标越接近限值,转化后越接近于1;当指标越优,转化后越接近于0。

表 6 绝缘状态指标熵值比较

Table 6 Comparison of entropy values of insulation status

开关柜编号	断口绝缘	一次对柜绝缘	一次对地绝缘
	$D_4/M\Omega$	$D_5/M\Omega$	$D_6/M\Omega$
201	$1.64 \times 10^5$	$7.76 \times 10^4$	$1.5 \times 10^5$
202	$1.5 \times 10^5$	$9.5 \times 10^4$	$1.2 \times 10^5$
211	$1.7 \times 10^5$	$6.8 \times 10^4$	$9.2 \times 10^4$
212	$4.5 \times 10^4$	$4.6 \times 10^4$	$7.8 \times 10^4$
213	$6.7 \times 10^4$	$2.2 \times 10^5$	$1 \times 10^5$
214	$1.4 \times 10^5$	$1.1 \times 10^5$	$9.2 \times 10^4$
215	$8.3 \times 10^4$	$6.8 \times 10^4$	$6.2 \times 10^4$
216	$1.4 \times 10^5$	$7.6 \times 10^4$	$9.3 \times 10^4$
指标熵值 $E$	$6.0 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-3}$

依据表 6 所得熵值将绝缘状态  $C_2$  的指标排序为:  $D_4 > D_5 > D_6$ 。即在断路器绝缘状态发生变化时, 断口绝缘电阻的变化程度大于一次回路对框架绝缘电阻, 一次回路对地绝缘电阻的变化程度最小。

电阻特性状态  $C_3$  指标值如表 7 所示, 单位为  $\Omega$ 。指标为适中型指标, 采用式(5)对原始数据进行无量纲化处理, 当实际指标量越接近于额定指标时, 规格化后的数据越接近于 1; 当实际指标越偏离额定指标值时, 将数据规格化后, 其值越接近于 0。

表 7 电阻特性指标熵值比较

Table 7 Entropy comparison of resistance characteristic index

开关柜编号	主回路电阻	合闸保持电阻	合闸线圈直流电阻
	$D_7/\mu\Omega$	$D_8/\Omega$	$D_9/\Omega$
201	18	212.9	9.5
202	19	212.0	9.5
211	18	211.5	9.6
212	20	212.0	9.5
213	18	214.2	9.8
214	29	213.2	9.6
215	22	211.7	9.5
216	19	212.0	9.8
指标熵值 $E$	0.9892	0.9782	0.9951

依据表 7 所得熵值将电阻特性  $C_3$  的指标排序为:  $D_8 > D_7 > D_9$ 。即合闸保持电阻在断路器不同运行状态下的差异度较主回路电阻和合闸线圈直流电阻要大, 合闸线圈直流电阻的变化度最小。

机械特性时间状态  $C_4$  的指标值如表 8 所示。指标为适中型指标, 规格化原理同电阻特性指标。

依据表 8 所得熵值将机械特性时间状态  $C_4$  的指标排序为:  $D_{11} > D_{10}$ 。即分闸时间在断路器不同运行情况下的差异程度较合闸时间要大, 即分闸时间可以比合闸时间更多地体现机械特性状态。

机械特性电气状态  $C_5$  的指标值如表 9 所示, 指标为适中型指标, 规格化原理同电阻特性指标。

表 8 机械特性时间状态指标熵值比较

Table 8 Entropy comparison of mechanical characteristics

开关柜编号	time status index	
	合闸时间 $D_{10}/ms$	分闸时间 $D_{11}/ms$
201	120	12
202	112	11
211	119	16
212	117	13
213	115	21
214	122	18
215	110	15
216	129	10
指标熵值 $E$	0.9721	0.9609

表 9 机械特性电气指标熵值比较

Table 9 Entropy comparison of mechanical characteristics electrical index

开关柜编号	最小合闸电流 $D_{12}/A$	最小合闸保持电流 $D_{13}/A$
201	4.15	0.32
202	3.96	0.30
211	4.07	0.24
212	4.28	0.31
213	4.15	0.31
214	3.71	0.27
215	4.66	0.26
216	3.99	0.31
指标熵值 $E$	0.9666	0.9971

依据表 9 所得熵值将机械特性电气状态  $C_5$  的指标排序为:  $D_{12} > D_{13}$ , 最小合闸电流相比最小合闸保持电流更能体现操动机械的电气特性。

因此, 实际评价模型如图 4 所示。

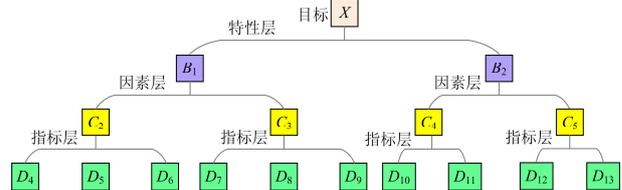


图 4 实际评价模型架构图

Fig. 4 Architecture diagram of actual evaluation model

以得到的实际评价模型(图4所示), 对一组现有的断路器小车的指标信息进行状态评价。将各底层指标量规格化后, 通过云模糊隶属度函数, 得到指标对于正常、注意、异常、严重四种状态的隶属度, 然后即可代入图示突变级数评价模型, 层层递归, 得到设备最终状态突变隶属度  $X$ , 依据最大隶属度原则, 确定设备对应的状态。

依据最大隶属度原则, 隶属度最大值为“0.9801”, 对应的设备状态评语为正常, 操动机械

电气特性略有异常，需加以注意，但整体而言工作性能稳定，故障率极低，符合实际情况。

验证和专家经验判断，证实了算法所建立评价模型与实际相符合，并且评价结果正确，证明了算法的实际可行性。

图 5 为状态评价算法过程。通过对现有数据的

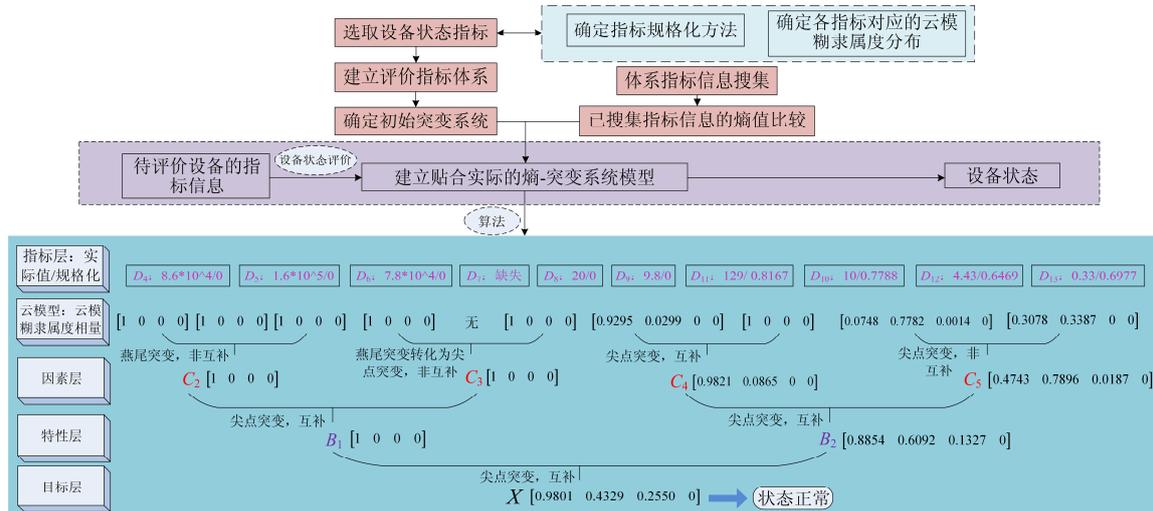


图 5 状态评价算法流程图

Fig. 5 Status evaluation algorithm flow chart

## 4 结论

1) 开发基于熵值-突变级数的 1500 V 直流开关柜状态评价模型，对直流开关柜在运行维护中所能获得的信息量进行分析，可选取出能充分体现直流开关柜运行状态的指标量，以建立评价体系，进行多指标综合评价。

2) 将熵值法运用于突变级数中，利用云模型确定指标隶属度，然后利用 ECP 模型进行量化递归计算，由指标层→云模型→因素层→特性层→目标层，层层递进，合成最终的突变隶属度  $X$ 。

3) 模型简单可行，在直流开关柜运行中变化更剧烈的指标信息能在状态评价模型中得到凸显，更能贴合实际情况，并能在指标信息缺失的情况下，得到符合实际情况的评价结果，通过广州某地铁实际运行数据对所提模型算法进行了实例验证，表明本文开发的地铁 1500 V 直流开关状态评价算法具有一定的实用性和可行性，可为相关地铁管理部门提供理论依据和参考。

## 参考文献

[1] 低压开关设备和控制设备. 第 1 部分: 总则: GB 14048.1—2006[S]. 北京: 国家质检总局, 2006.  
Low-voltage switchgear and control gear. part 1: general rules: GB 14048.1 — 2006[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2006.

[2] 松伟, 杨兴山, 韩连祥, 等. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用[M]. 西安: 西南交通大学出版社, 2008.

[3] 蔡彬, 陈德桂. 轨道交通的直流供电系统[J]. 电气应用, 2001, 20(2): 10-13.  
CAI Bin, CHEN Degui. DC power distribution systems for mass transit railway[J]. Electrotechnical Application, 2001, 20(2): 10-13.

[4] 国家电网公司生产技术部. 国家电网公司设备状态检修规章制度和技术标准汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[5] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI 10.1186/s41601-017-0047-z.

[6] 王涛云, 马宏忠, 崔杨柳, 等. 基于可拓分析和熵值法的 GIS 状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 115-120.  
WANG Taoyun, MA Hongzhong, CUI Yangliu, et al. Condition evaluation of gas insulated switchgear based on extension analysis and entropy method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 115-120.

[7] 张珂斐, 郭江, 肖志怀, 等. 模糊综合评价和改进证据理论相融合的变压器状态评价方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(2): 279-284.  
ZHANG Kefei, GUO Jiang, XIAO Zhihui, et al. Research on state evaluation method of transformer based

- on fusion of fuzzy comprehensive evaluation and improved D-S evidence theory[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(2): 279-284.
- [8] 杜林, 袁蕾, 熊浩, 等. 电力变压器运行状态可拓层次评估[J]. *高电压技术*, 2011, 37(4): 897-903.  
DU Lin, YUAN Lei, XIONG Hao, et al. Extension hierarchy assessment for operating condition of power transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(4): 897-903.
- [9] 付强, 陈特放, 朱佼佼. 采用自组织 RBF 网络算法的变压器故障诊断[J]. *高电压技术*, 2012, 38(6): 1368-1375.  
FU Qiang, CHEN Tefang, ZHU Jiaojiao. Transformer fault diagnosis using self-adaptive RBF neural network algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(6): 1368-1375.
- [10] 陈小青, 刘觉民, 黄英伟, 等. 采用改进人工鱼群优化粗糙集算法的变压器故障诊断[J]. *高电压技术*, 2012, 38(6): 1403-1409.  
CHEN Xiaoqing, LIU Juemin, HUANG Yingwei, et al. Transformer fault diagnosis using improved artificial fish swarm with rough set algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(6): 1403-1409.
- [11] 袁鹏, 杨红旗, 马韬韬, 等. 基于设备故障假设和分层流模型的电网智能报警方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(4): 92-97.  
YUAN Peng, YANG Hongqi, MA Taotao, et al. An intelligent alarm method based on equipment fault hypothesis and MFM[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(4): 92-97.
- [12] 谢善益, 杨强, 王彬, 等. 开放式输变电设备状态监测信息平台设计与实现[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(23): 125-130.  
XIE Shanyi, YANG Qiang, WANG Bin, et al. Design and implementation of open information platform for transmission and transformation equipment condition monitoring[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(23): 125-130.
- [13] 谢善益, 杨强, 梁成辉, 等. 输变电设备远程诊断信息平台中的统一状态监测模型研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(11): 86-91.  
XIE Shanyi, YANG Qiang, LIANG Chenghui, et al. Research of unified condition monitoring information model in data platform of power transmission equipment remote monitoring and diagnosis[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(11): 86-91.
- [14] 黄小庆, 张军永, 朱玉生, 等. 基于物联网的输变电设备监控体系研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(9): 137-141.  
HUANG Xiaoqing, ZHANG Junyong, ZHU Yusheng, et al. Research on monitoring system for power transmission and transformation equipments based on IoT[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(9): 137-141.
- [15] 高银银. 地铁用直流断路器灭弧方案的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
GAO Yinyin. Study on the arc extinction scheme of DC circuit breaker for metro system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [16] ITURREGI A, BARBU B, TORRES E, et al. Electric arc in low-voltage circuit breakers: experiments and simulation[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(1): 113-120.
- [17] 方刚, 王开康. 地铁直流开关柜热过负荷保护温升校验法[J]. *城市轨道交通研究*, 2014, 17(12): 112-114.  
FANG Gang, WANG Kaikang. Checking method for DC thermal overload protection based on metro temperature rise[J]. *Urban Mass Transit*, 2014, 17(12): 112-114.
- [18] 蔡远鑫. 地铁直流开关柜设置间接脱扣装置的分析[J]. *铁道勘测与设计*, 2011, 9(4): 40-41.  
CAI Yuanxin. The analysis of indirect tripping device for subway DC switchgear[J]. *Railway Survey and Design*, 2011, 9(4): 40-41.
- [19] 肖伟强. 广州地铁 2 号线 1500 V 直流开关的控制保护[J]. *机车电传动*, 2006, 35(1): 50-53.  
XIAO Weiqiang. Control and protection of 1500 V DC switch for vehicles of Guangzhou metro line 2[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2006, 35(1): 50-53.
- [20] 肖涛古, 李敏. 广州地铁四号线牵引变电所 1500 V 直流开关柜变流器故障分析[J]. *科技风*, 2012, 6(1): 123-124.  
XIAO Taogu, LI Min. Analysis of the failure of 1500 V DC switchgear in traction substation of Guangzhou metro line 4[J]. *Technology Wind*, 2012, 6(1): 123-124.
- [21] 谢静, 束洪春, 王科, 等. 基于 FCM 算法的高压开关柜局部放电状态评价方法研究[J]. *高压电器*, 2015, 51(10): 82-90.  
XIE Jing, SHU Hongchun, WANG Ke, et al. Study on state evaluation of partial discharge in high voltage switchgear based on fuzzy clustering algorithm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(10): 82-90.
- [22] 谢静, 束洪春, 王科, 等. 基于突变级数法的高压开关柜状态评价算法[J]. *高电压技术*, 2014, 40(8): 2372-2380.  
XIE Jing, SHU Hongchun, WANG Ke, et al. State evaluation algorithm based on catastrophe progression method of high voltage switchgears[J]. *High Voltage*

- Engineering, 2014, 40(8): 2372-2380.
- [23] 陈伟根, 吴娅, 刘强. 基于突变理论的断路器运行状态模糊综合评判方法[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 127-130.  
CHEN Weigen, WU Ya, LIU Qiang. The fuzzy comprehensive evaluation of the high voltage circuit breaker condition based on catastrophe theory[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 127-130.
- [24] 吴伟丽. 基于突变理论的计及磁暴扰动电力系统电压稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 30-36.  
WU Weili. Analysis of voltage stability considering geomagnetic disturbance on the catastrophe theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 30-36.
- [25] 金玉生, 谌军, 李巍, 等. 基于突变理论的油浸式变压器过热性故障预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 100-106.  
QUAN Yusheng, CHEN Jun, LI Wei, et al. Methodology of forecasting the oil-immersed transformer over-hot fault tendency based on catastrophe theory[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(18): 100-106.
- [26] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000.  
SU Weihua. Research on the theory and method of multi index comprehensive evaluation[D]. Xiamen: Xiamen University, 2000.
- [27] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004, 20(11): 119-121.  
YU Xiaofen, FU Dai. Review of multi index evaluation method[J]. Statistics & Decision, 2004, 20(11): 119-121.
- [28] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.  
LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34.
- [29] 赵宏波, 马延吉, 苗长虹. 基于熵值-突变级数法的国家战略经济区环境承载力综合评价及障碍因子——以长吉图开发开放先导区为例[J]. 地理科学, 2015, 35(12): 1525-1532.  
ZHAO Hongbo, MA Yanji, MIAO Changhong. Intergrated assessment and obstacle factors of environmental carrying capacity of national strategic economic zones based on entropy and catastrophe progression methods: a case study in Changchun-Jilin-Tumenjiang development and opening-up pilot area[J]. Scientia Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(12): 1525-1532.
- [30] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.  
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.
- [31] 张桦, 魏本刚, 李可军, 等. 基于变压器马尔可夫状态评估模型和熵权模糊评价方法的风险评估技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 134-140.  
ZHANG Hua, WEI Bengang, LI Kejun, et al. Research on risk assessment technology based on Markov state evaluation model for power transformer and entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 134-140.
- [32] 廖大麟. 随机事件的不确定性或信息量的度量——信息熵[J]. 毕节学院学报, 2006, 24(4): 35-38.  
LIAO Dalin. The uncertainty of random event or the amount of information measure — information entropy[J]. Journal of Bijie Uncertainty, 2006, 24(4): 35-38.
- [33] 钟鸣. 基于关联规则和云模型的水库诱发地震风险多层次模糊综合评价[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.  
ZHONG Ming. Reservoir induced seismic risk based on association rules and cloud model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [34] 赵虎. 高压 SF<sub>6</sub> 断路器状态评估方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
ZHAO Hu. Study on condition assessment of high-voltage SF<sub>6</sub> circuit breaker[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [35] 轨道交通—地面装置—直流开关设备—第 1 部分: 总则: GB/T 25890.1—2010[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2011.  
Railway applications — fixed installations — DC switchgear — part 1: general: GB/T 25890.1 — 2010[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee, 2011.

收稿日期: 2017-02-22; 修回日期: 2017-05-16

作者简介:

林勇(1973—), 男, 工程师, 从事轨道交通供电管理相关工作; E-mail: linyong@gzmtr.com

张俊强(1986—), 男, 中级电气工程师, 从事设备自动化及相关管理工作; E-mail: sai244514615@163.com

程乐峰(1990—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为配网自动化、电力系统优化运行与控制、博弈论等。  
E-mail: chenlf\_suct@163.com

(编辑 周金梅)