

# 基于信息物理系统的电压不平衡度及 电能质量分析预警方法研究

邹文骏<sup>1</sup> 曹张保<sup>2</sup> 杨力战<sup>1</sup>

(1. 苏州市轨道交通集团有限公司运营一分公司, 215128, 苏州; 2. 上海玖道信息科技股份有限公司杭州分公司, 310012, 杭州//第一作者, 工程师)

**摘 要** 基于 CPS(信息物理系统)理论,对地铁供电智能运维系统中设备的三相电压进行监测,并实现三相电压不平衡度的实时计算。将专家经验法及深度残差收缩网络法相结合得到合理阈值,并提出了三相电压不平衡度的预警方案。在此基础上,对三相电压不平衡度的单指标评估模式进行优化,提出了基于熵值法的电能质量多指标评分模型。将三相电压不平衡度阈值优化的方法应用于电能质量阈值确定,最终提供了阈值预警、评分矩阵映射预警、预警等级迁移预警 3 个层次的预警方案。

**关键词** 地铁供电;三相电压不平衡度;电能质量

**中图分类号** U231.8;U223.5<sup>+</sup>2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.015

## Research on Voltage Unbalance and Power Quality Analysis and Early-warning Method Based on CPS

ZOU Wenjun, CAO Zhangbao, YANG Lizhan

**Abstract** Based on the Cyber Physical System (CPS) theory, the three-phase voltage of the equipment in the intelligent operation and maintenance system of metro power supply is monitored, and real-time calculation of three-phase voltage unbalance is realized. A reasonable threshold is obtained by combining the expert experience method and the deep residual shrinkage network method, and an early-warning scheme of three-phase voltage unbalance is proposed. On this basis, the single-index evaluation model of three-phase voltage unbalance is optimized, and a multi-index scoring model of power quality based on entropy method is proposed. The three-phase voltage unbalance threshold optimization method is applied to the determination of power quality threshold. Finally, three levels of early-warning schemes are provided: threshold early-warning, scoring matrix mapping early-warning, and early-warning level migration early-warning.

**Key words** metro power supply; three-phase voltage imbalance; power quality

**First-author's address** No. 1 Operation Branch of Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., 215128, Suzhou, China

电能质量对地铁设备的稳定运行意义重大。三相电压不平衡度作为电能质量的重要因子,是地铁供电专业现场维护人员非常关注的重要指标<sup>[1-3]</sup>。文献[4-5]借助于信息技术、传感器技术的发展,对地铁供电设备三相电压不平衡度进行全面监测,并优化不同设备电压不平衡度的预警方式,以保障地铁供电设备的稳定运行,实现信息世界与物理世界之间的相互反馈。文献[6]对电能质量扰动分类特征选择标准不统一,泛化能力差,分类效果与分类效率不好等问题进行了优化。

基于上述文献,本文提出以 CPS(信息物理系统)为理论指导,以三相电压不平衡度计算方法为依据,采用专家经验、深度学习等技术手段,实现电压不平衡度阈值的动态确定、实时计算和及时预警。在此基础上,提出供电设备电能质量多指标综合评分模型,结合熵值法确定各指标的权值,计算得出设备的电能质量得分。然后采用专家经验法与深度残差收缩网络法相结合的方式确定电能质量的阈值,并提出 3 种预警层级应用方法,以实现供电设备的电能质量管理。

## 1 基于 CPS 的三相不平衡应用

### 1.1 CPS 的三相不平衡概念

CPS 技术将信息世界与物理世界耦合起来,结合变电所自动化系统监测得到的电压有效值,提升了常规三相电压不平衡度检测方式的工作效率。该检测以 5 min 为 1 个采样周期,24 h 昼夜不间断地对三相电压不平衡度进行计算。GB/T 15543—1995《三相电压允许不平衡度》规定,电力系统公共

连接点正常电压的不平衡度允许值为 2%,同时规定其短时的电压不平衡度不得超过 4%。定义电压不平衡度的指标为相电压不平衡度  $P$ :

$$P = [\max(U_A, U_B, U_C) - \min(U_A, U_B, U_C)] / U_{\text{avg}} \quad (1)$$

$$U_{\text{avg}} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} \quad (2)$$

式中:

$U_A, U_B, U_C$ ——分别为同一时刻监测得到的 A 相、B 相、C 相电压;

$U_{\text{avg}}$ ——平均相电压。

基于 CPS 理论,可以实现地铁供电系统中设备三相不平衡度的全面监测管理。地铁供电系统作为一个大型的物理系统,需要确保列车牵引用电及动力照明用电的安全。传统的地铁供电运维管理方式较为粗放,经常导致设备维保工作的滞后。采用信息系统的大数据批量计算技术,对设备的实时监测数据进行处理,能及时发现三相电压不平衡度的变化情况,向工作人员发出预警信息。物理系统与信息系统的闭环反馈是 CPS 的核心应用体现,使得设备运行更为健康。

三相电压不平衡度的 CPS 应用如图 1 所示,主要体现了 CPS 的 3C 功能:计算(Computation)、通信(Communication)和控制(Control)。信息系统对获取的电压有效值,经过大数据计算引擎,实现电压不平衡度的规则计算,并对超过不平衡度允许值的设备发出及时预警。根据现场工作人员对设备的维护反馈信息,完成对不平衡度允许值计算规则的更新,实现对电压峰值的关注与判定,从而更好地完善设备的电压不平衡度管理,并制定其维保计划。

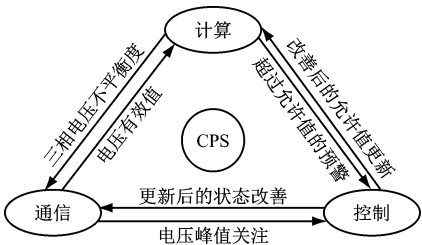


图 1 电压不平衡度的 CPS 应用示意图

Fig. 1 CPS application diagram of voltage unbalance

通过三相电压不平衡度的 CPS 理论闭环应用,能高效地完成电压不平衡度计算、阈值确定(依据专家经验法、深度残差收缩网络法)、及时预警等

工作。

### 1.2 不平衡度允许值的调整方法

实际应用中,对海量的设备时序数据进行三相电压不平衡度计算,会频繁出现报警的情况。冗余的报警内容会削弱对设备维保业务的实际帮助作用。因此,确定合理阈值意义重大。

#### 1.2.1 采用专家经验法确定阈值

专家经验法是一种灵活的阈值设定方法,根据业务人员的经验积累,对关注的重点设备设定较高的预警值。例如,设定重点设备的不平衡度阈值为 10%,从而降低设备的预警频次。如图 2 所示,专家经验法可对重点设备发生的高不平衡度情况及时予以关注,从而改善其不平衡情况。

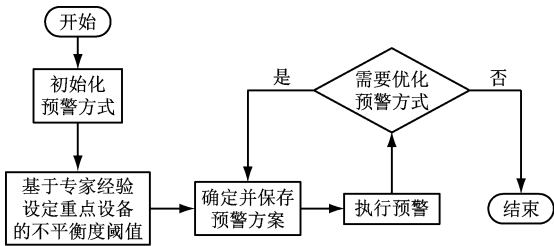


图 2 专家经验法确定设备预警阈值的流程

Fig. 2 Process of expert experience method determining equipment early warning threshold

依据专家经验法确定阈值,设备在实际工作中的预警情况较好,但该阈值的设定受专家的主观因素影响。深度残差收缩网络机器学习方法能实现客观阈值的计算,可与专家经验法互补,共同确定阈值。

#### 1.2.2 采用深度残差收缩网络法确定阈值

深度残差收缩网络法是一种采用注意力机制自动设置阈值的方法,能够客观地确定阈值。该方法通过建立小型的子网络,学习得到一组三相电压不平衡度的阈值,再进行特征的软阈值化。软阈值化是很多信号降噪算法的核心步骤,其计算式为:

$$f = \begin{cases} s - \tau & s > \tau \\ 0 & -\tau \leq s \leq \tau \\ s + \tau & s < -\tau \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$f$ ——软阈值化的函数表达;

$s$ ——特征;

$\tau$ ——某个阈值。

$f$ 的意义是将绝对值小于等于某个阈值的特征删除掉,将绝对值大于该阈值的特征朝着数值 0 的

方向进行收缩。软阈值化能够减小深度学习算法遭遇梯度弥散和梯度爆炸的风险。

子网络确定阈值的步骤如下:①对输入特征图的所有特征,求出特征的绝对值,如本文的特征为三相电压不平衡度;②经过全局平均池化,得到1个特征,记为 $A$ ;③在另一条路径中,全局平均池化后的特征图被输入到1个小型的全连接网络中。该全连接网络以 Sigmoid 函数作为最后一层,将输出的数据量纲一化到 $(0,1)$ ,获得1个系数,记为 $\alpha$ ;④最终阈值可以表示为 $\alpha A$ 。

综上所述,将专家经验法和深度残差收缩网络法相结合,可实现主客观结合,让专家经验法在机器学习输出阈值的基础上,调整至更为合理的阈值,从而实现高精度的报警。

### 1.3 预警告警方案

常规的预警方案下,一旦达到阈值,供电智能运维系统将发出告警。使用上述两种方法对阈值进行优化后,降低了预警的频次,提高了预警的精确度,减少了不必要的告警关注,提高了对告警内容的处理效果。

然而,仅仅针对三相电压不平衡度进行阈值告警仍有所欠缺。虽然三相电压不平衡度是电能质量的重要告警指标,但它仅是单因子指标。为此,本文进一步提出了电能质量评价的多维度因子指标体系,用以提升电能质量的综合分析评判效果。

## 2 电能质量分析评判

### 2.1 熵值法确定指标权重

#### 2.1.1 采用熵值法确定各指标权重的步骤

1) 选取 $i$ 个评价样本及每个样本的 $j$ 个指标,得到第 $i$ 个设备第 $j$ 个指标的指标值 $x_{ij}$ ,构成矩阵 $X$ 。对于每个评价指标,指标值之间的差距越大,则该指标在综合评价中所起到的作用越大。如果某个指标的指标值全部相等,则该指标在综合评价中不起作用。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2) 各个指标的收敛速度、精度、度量衡等可能不统一,因此需要对指标结果进行量纲一化处理。设 $x$ 为矩阵 $X$ 的每列具体值, $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 分别为 $x$ 中的

最小值和最大值,则量纲一化处理将原始矩阵 $X$ 中的元素计算转化为:

$$x = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

3) 计算每个样本在具体指标 $x_{ij}$ 中所占据的比重 $p_{ij}$ 为:

$$p_{ij} = x_{ij} / \sum_i x_{ij} \quad (6)$$

式(4)中的元素经式(6)进行比重转换后, $x_{ij}$ 变为 $p_{ij}$ ,形成由 $p_{ij}$ 构成的新矩阵数据项。

4) 计算指标熵值 $e_j$ 和信息熵冗余度 $d_j$ 。其计算式分别为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln i} \sum_i p_{ij} \ln p_{ij} \quad (7)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (8)$$

5) 计算各项指标的权值 $w_j$ 。其计算式为:

$$w_j = d_j / \sum_j d_j \quad (9)$$

根据以上步骤可计算出设备样本中每个指标的权值,随之可得设备多指标评价的综合得分。采用熵值法确定各指标权值,其计算的重点是对业务场景应用矩阵的转化,其流程图如图3所示。

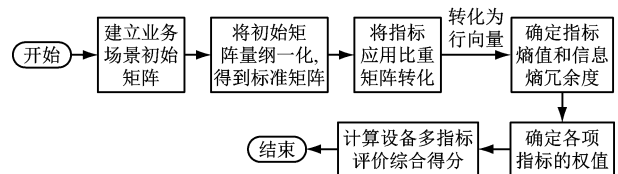


图3 熵值法计算指标权值的流程

Fig. 3 Process of calculating index weight value by entropy method

#### 2.1.2 电能质量综合得分

电能质量的具体指标包括电压偏差 $m_1$ 、三相电压不平衡度 $m_2$ 、公用电网谐波 $m_3$ 、公用电网间谐波 $m_4$ 、波动和闪变 $m_5$ 、电压暂降与短时中断 $m_6$ 等6个指标。根据样本数量构建由这6个指标组成的矩阵,其中:每个指标的指标值均可采用大数据计算引擎技术得到,再通过熵值法确定各指标权值。设这6个指标相应的权值分别为 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、 $n_4$ 、 $n_5$ 、 $n_6$ ,从而可计算出电能质量评价的综合得分 $S$ :

$$S = m_1 n_1 + m_2 n_2 + m_3 n_3 + m_4 n_4 + m_5 n_5 + m_6 n_6 \quad (10)$$

对上述指标进行多重样本反复验证,使 $S$ 更加科学地反映设备电能质量的真实情况。同时,对地

铁供电系统中的中高压设备的电能质量进行综合排名,能全局掌握各设备电能质量的优劣情况,从而制定更为合理、高效的维保计划。

2.2 设备电能质量的分析预警应用

上文基于 CPS 的三相电压不平衡度阈值的确定方法,可以同样应用于确定电能质量的综合得分阈值。电能质量综合得分越低,说明设备的电能质量问题越严重。根据电能质量综合得分,本文提出了阈值触发预警、评分矩阵映射预警、预警等级迁移预警 3 种层次递进的预警方法。

2.2.1 阈值触发预警

将三相电压不平衡度这一指标的应用研究延伸至电能质量综合得分多指标评价体系研究。专家经验法与深度残差收缩网络法相结合得到电能质量综合得分的阈值,可用于触发供电设备电能质量的预警。在计算得到不同设备的电能质量综合得分后,根据阈值调整的结果,对符合条件触发阈值上限的供电运行设备进行预警,可为运维人员对设备进行重点维保提供精准的数据指导。

2.2.2 评分矩阵映射预警

根据评分矩阵的得分来映射预警级别,即:将得分结果分为不同区段,不同区段的得分分别对应不同的预警等级。例如,将预警等级分为了 11 个层级(见表 1),可根据实际需求分别设定  $a_1$  至  $a_{10}$  的值,以进行分段划分,并确定需要预警的等级(如 AA 级至 AAA 级均需预警)。预警层级划分越精细,设备电能质量的情况越明确。

表 1 设备电能质量预警评级矩阵表  
Tab. 1 Equipment power quality early warning rating matrix

得分段	预警等级	得分段	预警等级
$[0,a_1)$	AAA	$[a_6,a_7)$	A <sup>-</sup>
$[a_1,a_2)$	AA <sup>+</sup>	$[a_7,a_8)$	BBB <sup>+</sup>
$[a_2,a_3)$	AA	$[a_8,a_9)$	BBB
$[a_3,a_4)$	AA <sup>-</sup>	$[a_9,a_{10})$	BBB <sup>-</sup>
$[a_4,a_5)$	A <sup>+</sup>	$[a_{10},+\infty)$	BB <sup>+</sup> 及以下
$[a_5,a_6)$	A		

2.2.3 预警等级迁移预警

图 4 是根据 2021 年 1 月至 2022 年 2 月苏州轨道交通 4 号线吴江人民广场站 35 kV 进线开关柜电能质量评判的记录,绘制得到的预警等级迁移轨迹。迁移图可用于预警等级的变化分析,也能用来

全面掌握预警等级的历史状态,了解该设备电能质量的劣化趋势。实际运维工作中,应针对电能质量预警等级骤然上升或持续上升的设备进行重点预警,从而对电能质量劣化的阶段进行提前干涉,以延长设备的使用寿命、提升设备的维保效率。

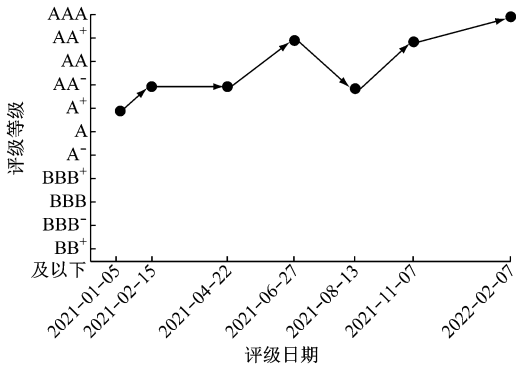


图 4 设备电能质量预警等级迁移图  
Fig. 4 Diagram of equipment power quality early warning level migration

3 结语

本文基于 CPS 的三相电压不平衡度应用及电能质量分析预警方法,实现了地铁中高压供电设备直观、高效、全面的监测,并对设备电能质量的预警方式进行了优化,提升了供电设备智能运维的效率,为城市轨道交通向智慧运维迈进提供了更多可能。

参考文献

[1] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. 中国电机工程学报, 2014(29):7.  
LIN Haixue. Perfecting power quality indices and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(29):7.  
[2] 甄超, 张健, 季坤, 等. 电能质量治理设备运行状态识别及其治理效果评价[J]. 电测与仪表, 2020(3):65.  
ZHEN Chao, ZHANG Jian, JI Kun, et al. Operation status identification of power quality compensation equipment and its effect evaluation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020(3):65.  
[3] 牟树贞, 齐晓波, 刘芹. 三相电压不平衡度的不同计算方法对比[J]. 智慧电力, 2010(12):55.  
MOU Shuzhen, QI Xiaobo, LIU Qin. Comparison of various calculation methods for three-phase voltage unbalance[J]. Smart Power, 2010(12):55.  
[4] 刘东, 盛万兴, 王云, 等. 电网信息物理系统的关键技术及其进展[J]. 中国电机工程学报, 2015(14):3522.

表 7 案例线路区间的风险等级统计(2013 年、2016 年)

Tab.7 Statical result of case line intervals at different risk grades in 2013 and 2016

风险等级	各风险等级下的区间数/个		各风险等级下的区间数占比/%	
	2013 年	2016 年	2013 年	2016 年
I	15	8	62.5	33.3
II	4	8	16.7	33.3
III	5	8	20.8	33.4

4 结语

本文所建立的轨道交通土建系统风险评估模型可同时用于评估轨道、隧道、桥梁等线路土建设施的运营风险。结合现有的工务设备伤损扣分标准及线路上的监测数据,先以 AHP 量化专家群确定的不同伤损类别相对重要性并计算得到主观权重,再以熵值法将线路上连续监测数据转化为部分评估指标的客观权重,最后结合两者的计算结果,采用综合集成赋权法计算出各评估项目和评估指标的最终权重。

采用本文提出的风险评价模型对案例线路进行整体风险评估,比对案例线路评估期间土建设施性能恶化的具体状况,提出了相应的养护建议。对案例线路的应用分析结果表明,该评估体系具有一定的合理性和工程可用性,可为其他轨道交通项目土建系统的运营安全风险评估提供参考。

参考文献

[1] PARK J W, LEE K C, SIM S H, et al. Traffic safety evaluation for railway bridges using expanded multisensor data fusion[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2016, 31(10):749.

[2] 潘栋. 地铁结构变形预测模型与安全评估分析[D]. 南京:东南大学,2016.

PAN Dong. The prediction model and safety assessment analysis of subway structural deformation[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

[3] 马化洲. 城市轨道交通线路轨道系统安全风险评价[D]. 北京:北京交通大学, 2011.

MA Huazhou. Safety risk assessment on the track system of urban mass transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

[4] LI Z, HE Q. Prediction of railcar remaining useful life by multiple data source fusion[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015,16(4):2226.

[5] 丁荣, 许玉德, 李海锋, 等. 城市轨道交通运营安全评价中土建系统数据库的设计[J]. 城市轨道交通研究, 2015(3):21.

DING Rong, XU Yude, LI Haifeng, et al. Database design in operation safety evaluation for urban rail transit construction system[J]. Urban Mass Transit, 2015(3):21.

[6] 卢野, 许玉德, 李海锋, 等. 城市轨道交通运营安全评价中土建系统典型问题分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015(3):17.

LU Ye, XU Yude, LI Haifeng, et al. Typical problems of construction system in urban rail transit operation safety evaluation[J]. Urban Mass Transit, 2015(3):17.

[7] 许湘华. AHP 法在铁路既有混凝土桥梁综合性能评价中的应用[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版),2003(3):89.

XU Xianghua. Application of the analytical hierarchy process in comprehensive performance evaluation of railway existing concrete bridge[J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2003(3):89.

[8] NYSTRÖM B, SÖDERHOLM P. Selection of maintenance actions using the analytic hierarchy process (AHP): decision-making in railway infrastructure[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2010,6(4):467.

[9] 李元韬, 曹志宇. 基于层次分析法的铁路线路安全性能分析与研究[J]. 铁道运输与经济, 2012(4):9.

LI Yuantao, CAO Zhiyu. Analysis and research of railway line safety performance based on AHP method[J]. Railway Transport and Economy, 2012(4):9.

[10] 刘润恺, 于龙, 陈德明. 基于 AHP-熵权法的高铁接触网可信性评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019(8):1882.

LIU Runkai, YU Long, CHEN Deming. Research on dependability evaluation of high-speed railway catenary based on AHP-entropy method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019(8):1882.

(收稿日期:2020-05-21)



(上接第 73 页)

LIU Dong, SHENG Wanxing, WANG Yun, et al. Key technologies and trends of cyber physical systems for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015(14):3522.

[5] 孙隼华, 李永福, 刘卫宁, 等. 交通信息物理系统及其关键技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2013(1):144.

SUN Dihua, LI Yongfu, LIU Weining, et al. Research summary on transportation cyber physical systems and the challenging technologies[J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2013

(1):144.

[6] 靳果, 朱清智, 孟阳, 等. 基于多层极限学习机的电能质量扰动多标签分类算法[J]. 电力系统保护与控制, 2020(8):102.

JIN Guo, ZHU Qingzhi, MENG Yang, et al. Power quality disturbances multi-label classification algorithm based on a multi-layer extreme learning machine[J]. Power System Protection and Control, 2020(8):102.

(收稿日期:2021-12-21)