

http://bhxb.buaa.edu.cn      jbuaa@buaa.edu.cn  
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0476

# 电力系统厂站接线图拓扑关系检测技术

李昊<sup>1,\*</sup>, 管萸<sup>2</sup>, 王杉<sup>1</sup>, 石玮<sup>1</sup>, 刘子鑫<sup>2</sup>, 刘晓川<sup>3</sup>

- (1. 国网山东省电力公司青岛供电公司 电力调度控制中心, 青岛 266002;  
2. 国网山东省电力公司 电力调度控制中心, 济南 250001;  
3. 山东大学(青岛) 计算机科学与技术学院, 青岛 266237)

**摘 要:** 厂站接线图中电气元件的拓扑关系是厂站接线图自动生成技术所需的核心数据。目前, 已知的厂站接线图自动生成技术仍然依靠人工获取图中的拓扑关系。通过利用基于深度学习的目标检测技术与传统的计算机图像处理技术相结合的方式, 能够实现厂站接线图拓扑关系检测。首先, 利用基于深度学习的目标检测方法对电气元件进行识别, 并利用计算机图像处理技术对标量格式接线图进行预处理, 完成电气元件与连接线的分割。然后, 利用轮廓跟踪算法对连接线连通区域进行检测标记。最后, 根据获取的电气元件信息与连接线信息获取图纸的拓扑关系。采用国家电网有限公司提供的数据集, 并设计了对比实验, 验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 厂站接线图; 拓扑关系; 深度学习; 目标检测; 轮廓跟踪

**中图分类号:** TP399; TM734

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2021)03-0531-08

电力系统作为国家经济发展的支柱, 支撑着各行各业几乎所有环节的正常运转。自国家公布电网智能化发展计划以来, 中国电力系统得以快速发展, 完成了从旧时代传统电力系统向新时代智能电力系统的转变。随着电网规模的日益扩大, 电力系统的调度工作越来越难以进行, 这给电力系统的优化带来了新的挑战。

厂站接线图作为电力系统中的关键数据, 是电力系统调度工作的基础。无论从电能生产管理角度还是电能生产与消费不可间断角度来讲, 其被广泛应用于电力系统中, 如潮流计算、短路电流计算、可靠性分析和电网调度自动化等。传统的厂站接线图绘制与维护工作主要依靠电力调度人员的工作经验, 这种工作方式不仅增加了电网系统发生安全风险的风险, 而且给厂站接线图的维护工作带来了高昂的人工成本。因此, 国内外众

多机构对厂站接线图的自动生成技术展开了研究, 也取得了一定的成果。但目前已有的厂站接线图自动生成技术需要使用矢量格式的数据, 这种数据需要人工录入电气元件的拓扑关系, 并将以标量格式数据存储的接线图转换为矢量格式。这给厂站接线图的自动生成技术带来了一定人工成本, 也增加了人工录入信息出错的风险。

经过多年研究, 计算机图像处理技术已经发展成熟, 并已成功应用于各个领域。近年来, 深度学习技术也逐渐发展成熟, 一些研究机构已经开始尝试将深度学习技术应用到电力领域。在厂站接线图元件识别技术上, 国内不少机构已经做了不同的尝试, 并取得了一定的效果, 进一步证明了将深度学习技术应用到厂站接线图识别上的可行性。

本文旨在利用计算机图像处理技术与深度学习技术相融合的方式, 自动获取厂站接线图中电

收稿日期: 2020-08-31; 录用日期: 2020-09-05; 网络出版时间: 2020-10-28 16:03  
网络出版地址: [kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20201028.1441.001.html](https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20201028.1441.001.html)  
基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(5206021900TW)  
通信作者: E-mail: lihao-0717@163.com

**引用格式:** 李昊, 管萸, 王杉, 等. 电力系统厂站接线图拓扑关系检测技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(3): 531-538.  
LI H, GUAN T, WANG S, et al. Topological relation detection technology of substation wiring diagram in electric power system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(3): 531-538 (in Chinese).

气元件的拓扑关系。由于厂站接线图具有元件众多、线条复杂等特点,本文通过对电力系统标量格式接线图进行预处理,实现了高质量、高效率的拓扑关系检测,进一步提高了电力系统智能化与自动化水平,降低了人工成本,对国家电网智能化推进有着重要意义。

# 1 相关工作

一般来说,厂站接线图自动生成技术的核心部分可分为图元识别和拓扑关系获取 2 部分。其中,图元识别是指电气元件的识别及其相关信息的获取,拓扑关系获取是指获取电气元件之间的连接与邻接关系。

国际电工委员会(IEC)提出了规范系统间互联和模型交换的标准,即能量管理系统应用程序接口<sup>[1]</sup>。该标准包含了电力系统公共信息模型(Common Information Model, CIM),其描述了电力系统运行对象的相关信息及对象与对象之间的相互关系。同时,该标准还推荐将矢量图形 SVG 应用至电力系统中。在实际应用中, CIM 模型及 SVG 矢量图中所需的关键信息由人工进行录入,这给厂站接线图自动生成技术带来了一定的人工成本。

目前,厂站接线图自动生成技术大多是基于 CIM 模型和矢量格式数据集实现的。沙树名和林峰<sup>[2]</sup>提出了一种根据设备连接信息自动生成厂站接线图的经验方法,对 CIM 数据中的有关设备信息进行提取,进而实现图纸的生成。章坚民等<sup>[3]</sup>提出了一种基于 CIM 模型实现不同规模变电站图形的自动生成方法。文献[4-9]描述了在电力领域基于拓扑关系模型的厂站接线图自动生成技术。以上方法均从 CIM 模型、矢量数据图中提取出图元信息、图元拓扑关系信息,进而生成厂站接线图。在此基础上,苏运光等<sup>[10]</sup>对此做了改进,提出了基于存量图形拓扑分析的厂站接线图自动生成方法,该方法通过获取图中的特征单元,实现了图元识别,但仍需从 CIM 模型中获取元件的拓扑关系。

为了解决以上问题,本文对标量格式的厂站接线图拓扑关系检测进行了研究。标量图的拓扑关系检测类似于标量图矢量化过程,矢量化研究自 20 世纪末被提出后,已有大量研究人员投身其中,大量算法被相继提出。宋晓宇等<sup>[11]</sup>提出了一种动态像素跟踪的直线段提取方法,该方法是基于像素跟踪的局部匹配矢量化方法,具有速度快、局部特征信息描述准确等优点,但在扫描过程

中会产生大量中间结果。Chang 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于线扫操作的图像骨架化算法,通过对图纸图像进行全局特征统计,获得所有元件的特征描述,从而完成图元识别,但图元之间的连接线难以正确处理,对于连接线相交、黏连、断裂等复杂情况识别准确率低,并且易受噪声干扰。Song 等<sup>[13]</sup>提出了一种面向对象的单相矢量化模型,能根据图元的自然特征直接完整地像素级别识别,但该方法在识别短小图线时存在困难,并且不同种类图纸的处理方法难以统一。张琪和叶颖<sup>[14]</sup>提出了一种基于对象图例及其拓扑关系识别的矢量化方法,在实现对象图例识别的基础上,进一步利用基于连通域标记方法实现了对对象图例拓扑关系的识别。该方法对本文研究起到了启发性的作用,但由于厂站接线图具有元件种类多样、连接线错综复杂、绘图规则不一等特点,现有的矢量化技术仍然难以满足其拓扑关系识别的精度需求。

近年来,随着深度学习技术的发展,基于深度学习的目标检测技术已在各个领域取得了不错的效果,各研究机构也已经开始将目标检测技术应用于工程图的拓扑关系检测研究中。如何将传统技术与目标检测技术相融合,从而更精确地获取电力标量图的拓扑关系,是本文研究的重点。

# 2 厂站接线图拓扑关系检测

## 2.1 问题定义

在电力图纸中,拓扑关系是指电气元件之间相互空间上的连接与邻接关系,而与电气元件的具体位置无关。厂站接线图是指使用电气系统图形符号和文字符号表示电气装置中的各元件及其相互联系的工程图,按其在电力系统中的作用,可分为厂站一次接线图和厂站二次接线图。厂站一次接线图是电力系统中表示电能输送和电能分配线路的接线图,又称主接线图,主要由母线、变压器、断路器和互感器等一次设备构成。厂站二次接线图是表示控制、指示、测量和保护主电路及其设备运行的接线图,主要由测量仪表、继电保护装置、熔断器和安全自动装置等二次设备构成。本文主要关注厂站一次接线图的拓扑关系识别。

在厂站接线图拓扑关系检测问题中,输入数据为标量格式的厂站一次接线图,如图 1 所示。输出为接线图中各元件信息及代表元件拓扑关系的链接点号,如表 1 所示。其中,每一个链接点号都代表一段连接线,具有相同链接点号的元件相互连接。用链接点号表示元件连接关系的方式只考虑了元件相互空间上的连接与邻接关系,不受

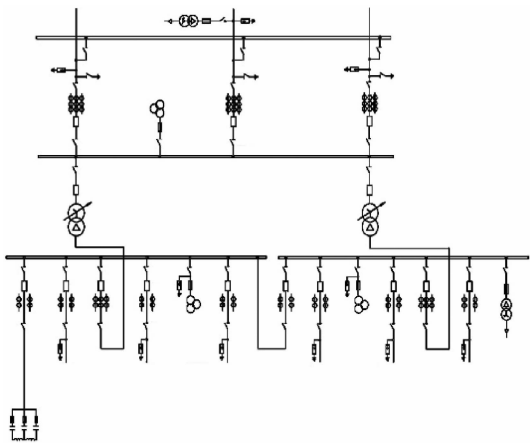


图 1 标量格式接线图示例

Fig. 1 An example of scalar-format wiring diagram

元件具体位置的影响。因此,元件的拓扑关系可抽象为元件的链接点号。

表 1 拓扑关系检测结果

Table 1 Results of topological relation detection

设备名称	$x$ 坐标	$y$ 坐标	电压等级/kV	链接点号
刀闸_25	1 298	1416	35	54,68
刀闸_10	1 273	182	35	9,12
变压器_2	2 010	1 168	35	74,76
避雷器_10	1 89	1 496	35	43,51
避雷器_5	873	1 806	35	23,31
熔断器_4	297	2 155	35	18,25
电容_2	297	2 197	35	15,18
电容_3	356	2 198	35	15,16

2.2 实现流程

厂站接线图拓扑关系检测技术实现流程如图 2所示,主要包括目标检测、预处理、拓扑关系获取等部分。

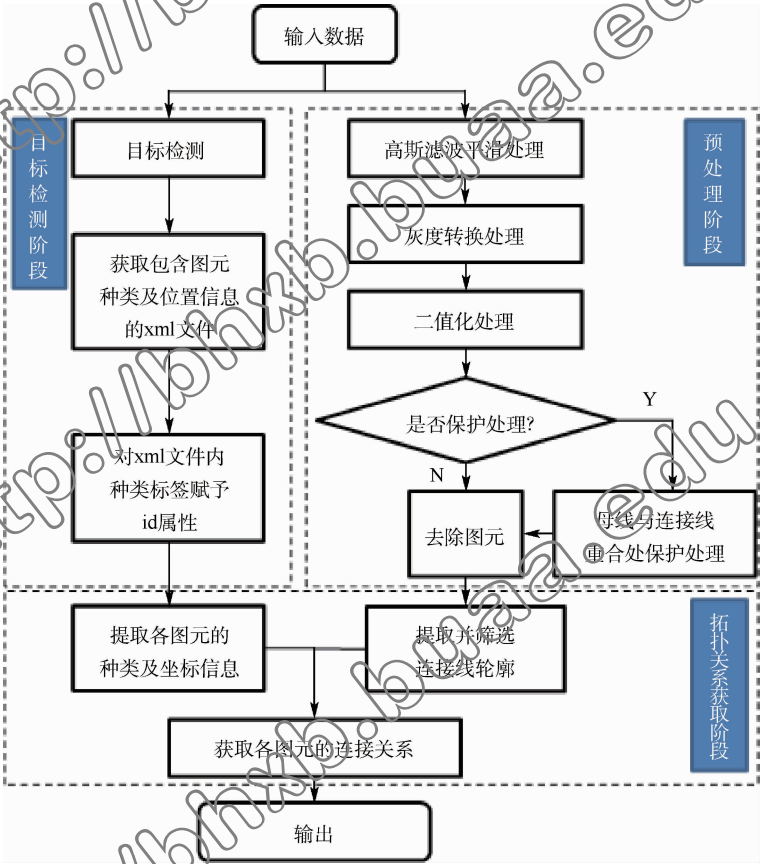


图 2 厂站接线图拓扑关系检测流程

Fig. 2 Flowchart of topological relation detection of substation wiring diagram

首先,输入数据经过目标检测技术,得到输入接线图中各电气元件的名称、坐标位置等信息,存储至 xml 文件中。然后,根据目标检测的 xml 文件,对输入接线图进行预处理。最后,根据 xml 文件中保存的图元信息及预处理后的输入接线图,进行拓扑关系提取工作,并输出最后结果。

2.3 目标检测

本文使用 Faster R-CNN 深度学习模型进行

目标检测工作<sup>[15]</sup>。首先,通过一组基础的卷积层提取图片的特征图,以传递给后续的区域生成网络(Region Proposal Network, RPN)和全连接层。然后,感兴趣区域(Region of Interest, ROI)池化层对特征图和 ROI 进行综合处理,提取出 ROI 的特征图。最后,通过全连接层和 Softmax 回归模型进行目标分类,同时获得目标的精确位置。其中,RPN 网络是 Faster R-CNN 的最大亮点。在进

行候选框位置确定时,Faster R-CNN 抛弃了传统的滑动窗口和 SS(Selective Search)等方法,可以利用 RPN 网络直接生成 ROI,极大地提升了检测框的生成速度。

与大多数检测任务的检测目标相比,厂站一次接线图的图像分辨率较高,但图中待检测元件分布密集、像素数少且很多不同种类的元件之间具有较高的相似性。为了提高小尺度目标元件的检测精度,采用了图像分割技术,将原图按元件分布分割成若干子图并放大,再对原图和子图分别训练一个检测网络,并将大小图网络的检测结果进行融合,从而得到最终的检测结果。

2.4 预处理

2.4.1 高斯滤波

厂站接线图由于其存储格式的问题,存在明显的噪声且包含大量的无用细节。采用高斯滤波技术,对图像进行去噪,并将高斯核大小设置为  $3 \times 3$ 。通过对图片进行高斯滤波处理,消除了图中大部分噪声及无用细节。同时,又最大程度地保留了有用信息。

2.4.2 灰度转换

厂站接线图属于 RGB 三通道图像,包含的像素信息数量较多。为了简化矩阵,提高运算速度,将 RGB 三通道的接线图转换为灰度的单通道图像。本文采用的灰度转换公式是一种常见的转换公式,如下:

$$\text{Gray} = \frac{R \times 30 + G \times 59 + B \times 11}{100} \quad (1)$$

式中: $R$  代表图像色彩通道中的红色通道; $G$  代表图像色彩通道中的绿色通道; $B$  代表色彩通道中的黑色通道。

式(1)是以国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITC)提供的灰度转换公式为基础,将  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三个通道对应的权重由 0.299:0.587:0.114 变为 0.3:0.59:0.11。式(1)提升了运算速度,又兼顾了人眼对颜色感知的生理特点<sup>[16]</sup>。

2.4.3 二值化

将经由高斯滤波处理后的图像转换为如图 3(a)所示的单通道灰度图像后,仍存在一些无用细节且图中连接线轮廓不太清晰。为了解决上述问题,又对厂站一次接线图采取了二值化处理。将 256 个等级的灰度图像根据适当的阈值,变换为如图 3(b)所示能够更加反映图像特征的二值化图像。

2.4.4 去除图元

通过目标检测技术已经获取了厂站一次接线

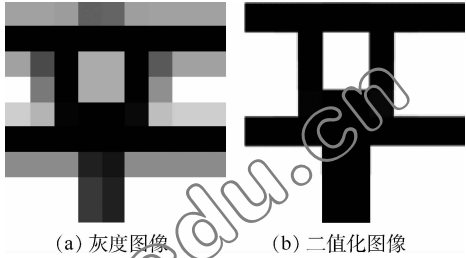


图 3 图像二值化

Fig. 3 Image binarization

图中各电气元件的信息。为了获取厂站接线图的拓扑关系,还需要获取图中连接线的轮廓信息,才能进而判断出各元件的连接关系。由于本文方法是对厂站接线图中的像素进行操作,为了排除电气元件像素对寻找连接线轮廓的影响,还需对电气图元和连接线进行分割,去除图像中如图 4(a)红框所示属于电气元件的像素信息,使图中不存在属于任何元件的像素信息,只保留除元件外的其他像素信息,如图 4(b)所示。

过程 1 去除图元。

步骤 1 从目标检测返回的 xml 文件中,依次提取出  $\langle \text{object} \rangle$  下的  $\langle \text{bndbox} \rangle$  包含的  $\langle \text{xmin} \rangle$ 、 $\langle \text{ymin} \rangle$ 、 $\langle \text{xmax} \rangle$ 、 $\langle \text{ymax} \rangle$  坐标信息。其中, $\langle \text{bndbox} \rangle$  为检测出的元件坐标框, ( $\langle \text{xmin} \rangle$ ,  $\langle \text{ymin} \rangle$ ) 和 ( $\langle \text{xmax} \rangle$ ,  $\langle \text{ymax} \rangle$ ) 分别为该坐标框的左上角端点和右下角端点的像素坐标。

步骤 2 将厂站接线图中坐标  $(x, y)$  处的像素信息抹去,其中  $(x, y) | x \in (\text{xmin}, \text{xmax}), y \in (\text{ymin}, \text{ymax})$ 。

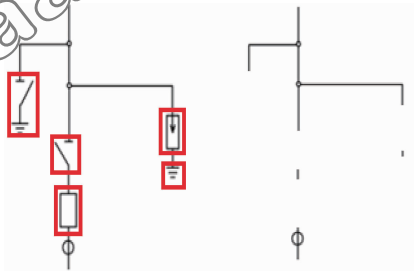


图 4 去除图元

Fig. 4 Removing graphics

2.4.5 保护处理

由于厂站一次接线图布线复杂,图中线条较多,存在如图 5(a)所示母线与连接线交叉重合的情况。如果按照 2.4.4 节去除图元的方式,如图 5(b)所示,会导致本应连续的连接线中断,从而导致拓扑连接检测出错。因此,在去除母线区域像素信息的同时需要对母线区域内的连接线进



行保护处理,使其不因去除母线而被消除,从而保持连接线轮廓信息的完整性。本文中,首先,利用类似匹配的方式,检测出母线区域内出现的连接线的位 置信息;然后,对母线区域进行去除图元处理,保护处理后的效果如图 5(c)所示。假设母线区域为  $\{(x,y) \mid x \in (x_{min}, x_{max}), y \in (y_{min}, y_{max})\}$ ,过程如下。

**过程 2** 保护处理过程。

**步骤 1** 创建一个包含  $(y_{max} - y_{min} + 1) \times 1$  维黑色像素的区域。

**步骤 2** 将此区域以 1 像素的步距,沿着母线行索引递增的方向运动。

**步骤 3** 运动一次便与当前所在母线区域包含的像素信息进行迭代比较一次,判断当前母线区域包含的像素信息是否与其包含的像素信息相同,相同则保存当前位置信息之后继续运动,否则继续运动,直至遍历完母线区域。最终可以得到母线区域内所有交叉重合连接线的行坐标。

**步骤 4** 结合去除图元的方法,抹去母线区域像素信息的同时避开母线内连接线区域,就可以达到保持连接线轮廓完整性的要求。

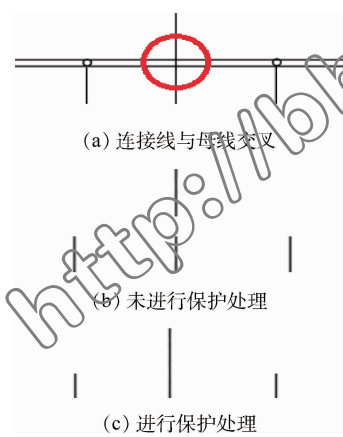


图 5 保护处理  
Fig. 5 Protection processing

2.5 拓扑关系获取

**步骤 1** 针对厂站一次接线图像素信息的特点,使用基于 8 邻域连通区域标记的轮廓跟踪算法,对预处理后的图像进行连接线的轮廓提取,并将提取后的轮廓信息存储至列表中。

**步骤 2** 对保存至列表中的轮廓坐标信息进行筛选操作,将 L 中的坐标信息  $(x,y)$  与 2.4.4 节提取出的坐标信息  $\langle x_{min} \rangle$ 、 $\langle y_{min} \rangle$ 、 $\langle x_{max} \rangle$ 、 $\langle y_{max} \rangle$  进行比较判断,只保留各轮廓内符合  $x_{min} - 1 \leq x \leq x_{max} + 1$  和  $y_{min} - 1 \leq y \leq y_{max} + 1$  条件的轮廓坐标信息,并对提取出的每个轮廓进行编号,以作为后续代表图元拓扑关系的链接点

号。其中,通过对  $x_{min}$ 、 $y_{min}$  和  $x_{max}$ 、 $y_{max}$  分别采取减 1、加 1 操作,消除了二值化处理与人工绘制图纸不规范导致的电气元件轮廓与连接线轮廓不相连的情况,保证了厂站接线图的完整性。

**步骤 3** 将筛选后的各连接线轮廓坐标信息和图元的坐标信息进行比较,将与同一连接线相连的图元放至集合中,并将该轮廓编号作为集合编号,同时使用集合操作,可以达到去重的效果。

至此,已经获得厂站接线图包含的所有连接关系。

3 实 验

3.1 实验设定

为了验证本文方法的有效性,使用真实的厂站接线图数据集:青岛市某 70 个区域变电站接线图数据集。该数据集主要包含断路器、变压器、电抗和避雷器等 12 种电气元件,其数据规模如表 2 所示。

表 2 青岛市区县变电站接线图数据集

Table 2 Wiring diagram dataset of district and county substation in Qingdao

元件类别	数目
断路器	344
接地刀闸	1 093
电抗	208
刀闸	1 258
变压器	144
避雷器	829
母线	275
手车开关	991
隔离手车	308
所变	172
电力电感器	205
电容	974

共设计了 3 组实验,对本文方法进行验证。第 1 组验证分割技术对目标检测任务的有效性;第 2 组检验分割技术对拓扑关系检测的影响;第 3 组验证预处理技术对拓扑关系检测的有效性。

在第 1 组实验中,按照 8:1:1 的比例对数据集进行划分(即 80% 作为训练集,10% 作为验证集,10% 作为测试集),并用目标检测常用评价指标——平均精度(Average Precision, AP)、平均精度均值(mean Average Precision, mAP)对模型进行评估。

在第 2、3 组实验中,将第 1 组实验的测试集作为测试数据,并用精确率(Precision)、召回率(Recall)和 F1-score 指标进行评估,公式如下:

Precision =  $\frac{\text{CorrectRelations}}{\text{DetectedRelations}}$

(2)

$$\text{Recall} = \frac{\text{CorrectRelations}}{\text{TotalRelations}} \quad (3)$$

$$\text{F1-score} = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (4)$$

式中:CorrectRelations 为正确检测出的拓扑关系数;DetectedRelations 为检测出的拓扑关系总数;TotalRelations 为数据共包含的正确拓扑关系总数。

### 3.2 验证分割技术对目标检测任务的有效性

为了验证分割技术对目标检测任务的有效性,对比了分割前后各类元件的目标检测结果。图6展示了分割前后各类元件的AP结果对比,表3给出了分割前后目标检测的mAP结果对比。

从图6及表3中可以看出,采用分割技术的目标检测模型在数据集中的表现明显高于未采用分割技术的模型。该实验结果说明,分割技术增强了模型的检测效果,有利于实现更加精准的电气元件检测。同时还观察到,采用分割技术后,模型对于一些尺寸较小、特征不明显的电气元件(如刀闸、避雷器、隔离手车、电容等)的检测效果有了明显的提升,而对于一些尺寸较大、特征较明显的元件(如变压器、手车开关等)的检测效果相对提升较小。这可能是因为:分割技术使得目标检测模型更加注重图像中局部区域的特征提取,使得模型对较小元件的检测结果更加准确。

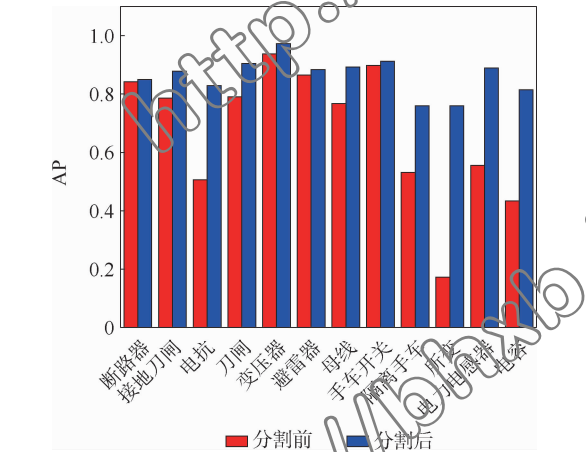


图6 分割前后各类元件的平均精度

Fig. 6 Average precision of various components before and after segmentation

表3 分割前后目标检测平均精度均值

Table 3 Mean average precision of object detection before and after segmentation

分割前后	mAP/%
分割前	62.91
分割后	84.37

### 3.3 分割技术对拓扑关系检测的影响

为了检验分割技术对拓扑关系检测的影响,利用未采用分割技术的目标检测模型与采用分割技术的目标检测模型,分别对测试数据进行拓扑关系检测。表4展示了采用分割技术前后的拓扑关系检测结果对比。

从表4可以看出,分割技术可有效提升拓扑关系检测效果。经过分析发现,目标检测存在漏检、误检等情况,会直接导致拓扑关系检测效果下降,目标检测效果的提升有助于实现更高效、精确的拓扑关系检测。本文使用的分割技术可以有效提升目标检测效果,进而提升拓扑关系检测效果。

表4 分割前后拓扑关系检测结果对比

Table 4 Comparison of topological relation detection results before and after segmentation

分割前后	Precision/%	Recall/%	F1-score/%
分割前	81.27	74.09	77.41
分割后	85.02	85.86	85.42

### 3.4 验证预处理对拓扑关系检测的有效性

为了验证预处理对拓扑关系检测的有效性,对测试集数据分别进行了有无预处理的拓扑关系检测实验,表5展示了有无预处理阶段的拓扑关系检测的结果对比。由于去除图元是分割图元与连接线的关键操作,为了能够正确提取出连接线位置信息,保证实验结果的准确性,该环节的无预处理实验具有去除图元操作。

从表5可以看出,预处理工作对拓扑关系检测有关键性的作用。经过分析发现,未进行预处理的厂站接线图具有许多无用像素,这些像素导致了元件粘连、线条轮廓不清晰等情况的发生,进而使得轮廓跟踪算法无法正确检测出连接线轮廓,最终导致较差的拓扑关系检测结果。该实验结果进一步表明了预处理操作对厂站一次接线图数据的高度适用性。

表5 预处理前后拓扑关系检测结果对比

Table 5 Comparison of topological relation detection results before and after preprocessing

有/无预处理	Precision/%	Recall/%	F1-score/%
无预处理	35.92	1.64	3.11
有预处理	85.02	85.86	85.42

## 4 结 论

1) 本文方法可以有效检测出厂站接线图中电气元件的拓扑关系,且实现了较优的检测效果。在 Precision、Recall、F1-score 三个指标上,分别达到了 85.02%、85.86%、85.42%。

2) 本文方法适用于标量格式的数据集,减少了人工干预,降低了人工成本。

3) 目标检测效果可直接影响拓扑关系检测效果,分割技术提升了目标检测效果,进而提升了拓扑关系检测的效果。

4) 标量格式数据集存在制图不规范、噪声多等问题,这会导致拓扑关系检测效果下降,预处理过程可降低这类问题对检测结果的不利影响。

为提升本文方法的检测效果,仍需优化目标检测模型和增加对数据集有效的预处理。

参考文献 (References)

[ 1 ] W3C. Scalable vector graphics (SVG) 1.2 specification [EB/OL]. (2004-10-27) [2020-08-01]. <http://www.w3.org/TR/2004/WD-SVG12-20041027>.

[ 2 ] 沙树名,林峰.一种基于 CIM 的厂站接线图自动生成技术[J].电力系统自动化,2008,32(21):68-71.

SHA S M,LIN F. A technique of automatic generation of substation wiring diagram based on CIM[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(21):68-71(in Chinese).

[ 3 ] 章坚民,叶义,徐冠华.变电站单线图模数图一致性设计与自动成图[J].电力系统自动化,2013,37(9):84-91.

ZHANG J M,YE Y,XU G H. Consistency design and automatic mapping of single line diagram modulus diagram of substation[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(9):84-91(in Chinese).

[ 4 ] 沈伟,吴文传,张伯明,等.能量管理系统中电网潮流单线图自动生成算法[J].电力系统自动化,2010,34(6):48-53.

SHEN W,WU W C,ZHANG B M,et al. A power grid one-line diagram automatic generation method in the EMS[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(6):48-53(in Chinese).

[ 5 ] 章坚民,叶琳,孙维真,等.基于地理相对位置的省级输电网均匀接线图自动生成[J].电力系统自动化,2010,34(24):55-59.

ZHANG J M,YE L,SUN W Z,et al. Automatic generation of the uniformly-distributed provincial transmission power grid diagram based on relative geographical location information[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(24):55-59(in Chinese).

[ 6 ] 周博曦,孟昭勇,王志臣,等.基于 CIM 的变电站与配电馈线一次接线图自动绘制算法[J].电力系统自动化,2012,36(11):77-81.

ZHOU B X,MENG Z Y,WANG Z C,et al. Automatic graphing algorithm for primary electric wiring diagram of substation and distribution feeder based on CIM[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(11):77-81(in Chinese).

[ 7 ] 陈连杰,赵仰东,韩韬,等.基于层次结构及模型驱动的配电网图形自动生成[J].电力系统自动化,2015,39(1):226-232.

CHEN L J,ZHAO Y D,HAN T,et al. Hierarchically structured and model driven automatic generation of distribution network graphs[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(1):226-232(in Chinese).

[ 8 ] 陈璐,陈连杰,欧阳文,等.基于环形结构的配电网联络图布局算法[J].电力系统自动化,2016,40(24):151-156.

CHEN L,CHEN L J,OUYANG W,et al. Ring structure based layout algorithm for distribution network contact graph[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(24):151-156(in Chinese).

[ 9 ] 廖凡锐,刘东,闫红漫,等.基于拓扑分层的配电网电气接线图自动生成算法[J].电力系统自动化,2014,38(13):174-181.

LIAO F Q,LIU D,YAN H M,et al. An automatic electrical diagram generation method for distribution networks based on hierarchical topology model[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(13):174-181(in Chinese).

[ 10 ] 苏运光,罗俊,熊浩,等.基于存量图形拓扑分析的厂站接线图自动生成[J].电力系统自动化,2020,44(3):162-168.

SU Y G,LUO J,XIONG H,et al. Automatic generation of substation wiring graph based on inventory graph topology analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(3):162-168(in Chinese).

[ 11 ] 宋晓宇,王永会,栾方军.基于动态跟踪步长的直线快速矢量化算法[J].计算机工程与应用,2002,38(2):92-93.

SONG X Y,WANG Y H,LUAN F J. Straight lines vector algorithm based on dynamic trace step[J]. Computer Engineering and Applications,2002,38(2):92-93(in Chinese).

[ 12 ] CHANG F,LUY C,PAVLIDIS T. Feature analysis using line sweep thinning algorithm[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1999,21(2):145-158.

[ 13 ] SONG J Q,SU F,TAI C L,et al. An object-oriented progressive-simplification-based vectorization system for engineering drawing: Model, algorithm, and performance[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2002,24(8):1048-1060.

[ 14 ] 张琪,叶颖.基于对象图例及其拓扑关系识别的二维工程 CAD 图纸矢量化方法[J].计算机与现代化,2018(11):40-45.

ZHANG Q,YE Y. 2D engineering CAD drawings vectorization method based on recognition of object legends and their topology[J]. Computer and Modernization,2018(11):40-45(in Chinese).

[ 15 ] REN S Q,HE K M,GIRSHICK R,et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2017,39(6):1137-1149.

[ 16 ] PRATT W K,ADAMS J E. Digital image processing[J]. Journal of Electronic Imaging,2007,16(2):131-145.

作者简介:  
李昊 男,硕士,工程师。主要研究方向:电力调度自动化。

# Topological relation detection technology of substation wiring diagram in electric power system

LI Hao<sup>1,\*</sup>, GUAN Ti<sup>2</sup>, WANG Shan<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>1</sup>, LIU Zixin<sup>3</sup>, LIU Xiaochuan<sup>3</sup>

- (1. Electric Power Dispatching & Control Center, State Grid Qingdao Power Supply Company, Qingdao 266002, China;
- 2. Electric Power Dispatching & Control Center, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China;
- 3. School of Computer Science and Technology, Shandong University (Qingdao), Qingdao 266237, China)

**Abstract:** Topological relation of electrical components is the core-data required by substation wiring diagram automatic generation technology. At present, known technologies still rely much on artificial access to topological relations. By the combination of deep learning based object detection technology and traditional computer image processing technology, topological relation can be detected automatically. Firstly, to segment the electrical components and connection lines, deep learning based object detection technology was used to identify the electrical components, and the image processing technology was used to preprocess the scalar-format wiring diagram of power plants. Secondly, a contour tracking algorithm was adopted to detect and mark the connected area of the connection lines. Finally, the topological relation of the drawing was acquired according to the obtained information of electrical components and connection lines. Comparative experiments based on a dataset released by the State Grid Corporation of China indicate the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** substation wiring diagram; topological relation; deep learning; object detection; contour tracking