

文章编号: 1671-251X(2024)04-0103-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023100036

用于矿井通风网络解算的通风机风压性能曲线自动识别方法

吴奉亮, 寇露

(西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 从通风机性能曲线图像中采样并识别风压性能曲线, 进而拟合出风压性能函数是矿井通风网络解算的关键技术。目前常用人工方式识别风压性能曲线, 效率低且准确性不高。提出一种基于图像处理技术的通风机风压性能曲线自动识别方法。采用双边滤波、图像锐化和二值化技术对原始通风机风压性能曲线图像进行预处理, 以提高图像质量。分别基于腐蚀算法、轮廓检测算法提取通风机性能曲线图像中的网格线和坐标文字, 采用逻辑运算、中值滤波、轮廓检测和 K3M 算法提取风压性能曲线。以逐行像素识别方式识别风压性能曲线的像素坐标, 采用模板匹配算法识别坐标数字, 进而完成像素坐标到物理坐标的转换, 实现风压性能曲线识别。将通风机风压性能曲线自动识别方法集成至通风网络解算软件, 对通风机风压性能曲线进行识别试验, 结果表明, 该方法对单条风压性能曲线的采样速度为 24 Samples/s, 识别的风压性能曲线与原始曲线的重合度高, 风压拟合值与原始值的最大误差仅为 0.88%, 较人工识别方法大大提高了通风网络解算效率和准确性。

关键词: 矿井通风网络; 通风网络解算; 通风机; 风压性能曲线; 图像自动识别; 风压性能函数拟合

中图分类号: TD724

文献标志码: A

Automatic recognition method of ventilator wind pressure performance curve for
mine ventilation network calculation

WU Fengliang, KOU Lu

(College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Sampling and recognizing the wind pressure performance curve from the wind performance curve image, and then fitting the wind pressure performance function, is a key technology for solving the mine ventilation network. Currently, manual methods are commonly used to recognize wind pressure performance curves, which have low efficiency and poor accuracy. This study proposes an automatic recognition method for the wind pressure performance curve of ventilator based on image processing technology. The method uses bilateral filtering, image sharpening, and binarization techniques to preprocess the original ventilator wind pressure performance curve image, in order to improve image quality. The method extracts grid lines and coordinate text from the performance curve image of the ventilator based on corrosion algorithm and contour detection algorithm. The method uses logical operation, median filtering, contour detection, and K3M algorithm to extract the wind pressure performance curve. The pixel coordinates of the wind pressure performance curve are recognized using a row by row pixel recognition method. The method uses template matching algorithm to recognize coordinate numbers, and then complete the conversion from pixel coordinates to physical coordinates, achieving wind pressure performance curve recognition. The automatic recognition method for the wind pressure performance curve of the ventilator is integrated into the ventilation network calculation software. The recognition

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2024-03-15; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974232)。

作者简介: 吴奉亮(1977—), 男, 四川新都人, 教授, 博士, 主要研究方向为矿井通风与安全, E-mail: 15038537@qq.com。

引用格式: 吴奉亮, 寇露. 用于矿井通风网络解算的通风机风压性能曲线自动识别方法[J]. 工矿自动化, 2024, 50(4): 103-111.

WU Fengliang, KOU Lu. Automatic recognition method of ventilator wind pressure performance curve for mine ventilation network calculation[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(4): 103-111.



扫码移动阅读

experiment is conducted on the wind pressure performance curve of the ventilator. The results show that the sampling speed of the method for a wind pressure performance curve is 24 Samples/s. The recognized wind pressure performance curve has a high overlap with the original curve. The maximum error between the wind pressure fitting value and the original value is only 0.88%. Compared to manual recognition methods, the method greatly improves the efficiency and accuracy of the ventilation network calculation.

Key words: mine ventilation network; ventilation network calculation; ventilator; wind pressure performance curve; automatic image recognition; wind pressure performance function fitting

0 引言

我国矿井通风正在经历自动化、智能化的变革,智能通风系统已成为煤炭行业智能矿井建设中的重要内容^[1-3]。矿井通风网络解算是智能通风系统主要内容之一^[4-6],提高矿井通风网络解算软件友好性、智能性的相关研究具有重要意义^[7-9]。通风机风压性能函数是矿井通风网络解算中的关键信息,相关的原始资料多为图像文件。通过计算机自动、准确地识别出图像文件中的风压性能曲线坐标,再自动拟合出精准的风压函数,是智能通风系统中不可或缺的技术,也是评价通风网络解算系统智能性的重要指标。

一直以来,关于准确获取通风机风压性能函数的研究受到许多学者的关注。唐辉雄等^[10]以零偏差点个数、零偏差点比率、总偏差、平均偏差和偏差率作为评估指标,采用最小一乘法拟合通风机风压等性能函数。尹昌盛等^[11]采用正反抛物线对通风机风压性能曲线中的“驼峰”位置进行拟合,避免了二次多项式假收敛和五次多项式曲线振荡问题。叶敏等^[12]基于通风机特性曲线矢量化软件,指出风压曲线样点的采集应集中在曲线拐弯处。贾腾等^[13]使用最小二乘法拟合通风机在不同安装角度下风压与风量之间的关系式,并利用 1stOpt 中的公式自动搜索拟合关系式。吴奉亮^[14]采用偏回归系数显著性检验来确定通风机风压性能曲线拟合多项式函数的阶数。

上述研究均以人工采集的通风机风压性能曲线图像上有限的样点为原始参数,样点采集效率低,风压性能曲线识别准确率不高。直接识别通风机性能曲线图像中的风压性能曲线,进而基于大数据量样点拟合风压性能函数,对于提高曲线识别精度和通风网络解算软件的智能性有现实意义。本文采用图像处理技术,提出了一种通风机风压性能曲线自动识别方法,得到了满足通风网络解算要求的风压性能函数。

1 通风机风压性能曲线特征及对网络解算的影响

矿井通风机在出厂或后期性能测定过程中会形成性能曲线图像,主要有效率性能曲线和风压性能曲线。某对旋式通风机性能曲线图像如图 1 所示。

横坐标为通风机风量,纵坐标为通风机在不同叶片安装角下的输出风压。风压性能曲线上的数字为对旋式通风机 2 个叶片的安装角,效率性能曲线上的数字为通风机运行效率。在有效的工作范围内,风量与风压呈单调递减关系,即风量越小,通风机输出风压(承担的阻力)越大。风压性能曲线中的每一个点均为通风机潜在的工况点。通过人工准确计算通风机运行于某实际矿井中的工况点往往很难完成,这是因为矿井通风系统复杂,通风机与风网、井巷风阻耦合作用决定网络中的流量分配。

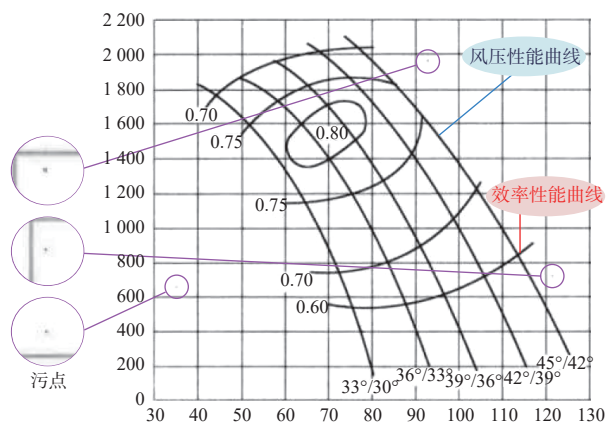


图 1 矿井通风机性能曲线图像

Fig. 1 Performance curve image of mine ventilator

某简化矿井通风网络如图 2 所示,箭头表示风流方向,分支 8 的风量为通风机风量。

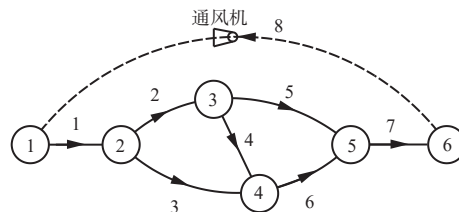


图 2 简化矿井通风网络

Fig. 2 Simplified mine ventilation network

在通风机作用下,风流在巷道中流动满足节点流量平衡定律(式(1))与风压平衡定律(式(2))。

$$\sum_{j=1}^N b_{kj} q_j = 0 \quad k = 1, 2, \dots, M-1 \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^N c_{ij} (r_j q_j^2 - h_{fj}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

式中: N 为矿井通风网络分支数; b_{kj} 为节点 k 与分支 j 关系; q_j 为分支 j 的风量; M 为矿井通风网络节点数; c_{ij} 为分支 j 与回路 i 的关系; r_j 为分支 j 的风阻; h_{fj} 为分支 j 中通风机风压性能函数, 是分支风量 q_j 的函数; l 为独立回路数, $l=N-M+1$ 。

$$b_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } k \text{ 为分支 } j \text{ 端点, 且风流流向该节点} \\ -1 & \text{节点 } k \text{ 为分支 } j \text{ 端点, 且风流流出该节点} \\ 0 & \text{节点 } k \text{ 不是分支 } j \text{ 端点} \end{cases} \quad (3)$$

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{分支 } j \text{ 属于回路 } i, \text{ 且与回路 } i \text{ 同向} \\ -1 & \text{分支 } j \text{ 属于回路 } i, \text{ 且与回路 } i \text{ 反向} \\ 0 & \text{分支 } j \text{ 不属于回路 } i \end{cases} \quad (4)$$

通风网络解算即求解式(1)和式(2)组成的非线性方程组, 以求得每条分支风量的过程。在式(2)中, 通风机性能以风压性能函数 h_{fj} 的形式表现, 但其多以如图1所示的曲线图像文件存在, 因此需在通风网络解算软件中对通风机性能曲线图像进行识

别, 得出风压性能函数。

2 通风机性能曲线图像预处理

图1中存在印刷产生的黑色污点和像素值区分度低导致的图像模糊等问题, 且采集图像时可能因光照不均匀产生光斑, 影响识别效果, 需对通风机性能曲线图像进行预处理, 以提高图像质量。预处理操作包括将图像尺寸统一为 900×800 、滤波去噪、锐化和二值化。

分别采用均值滤波、中值滤波和双边滤波算法对原始的通风机性能曲线图像进行滤波去噪, 结果如图3所示。可看出3种方法均能够有效去除噪声, 但双边滤波能更好地保留图像边缘信息^[15], 因此选用双边滤波去噪。通过对多张通风机性能曲线图像进行双边滤波发现, 将与待处理像素点距离为50、像素值相差15的像素点视为相似并赋予更高权重时, 滤波效果最佳。

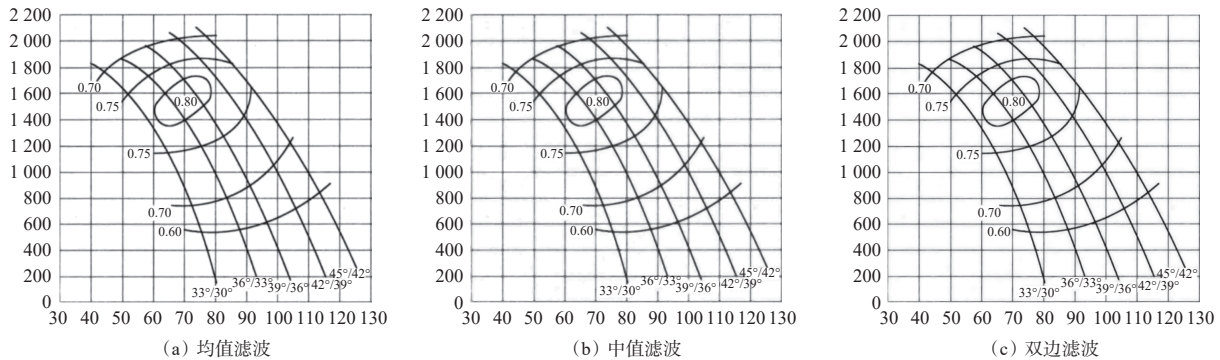


图3 不同滤波效果对比

Fig. 3 Comparison of different filtering effects

滤波去噪操作会引入一定程度的图像模糊。为了提升图像的清晰度, 需进行图像锐化处理。本文采用图像卷积^[16]方式来实现。定义一个中心数值为5、周围数值为-1的卷积核, 对滤波图像进行卷积操作。该设置可以突出中心像素点, 减弱周围像素点的影响, 从而强化图像边缘。

二值图能更好地突出图像边缘信息, 提高图像处理效率, 因此对通风机性能曲线图像进行二值化处理。阈值取200, 将大于200的灰度值变为图像中的最大灰度值, 小于200的灰度值变为0。

图1的预处理结果如图4所示。可看出图像清晰度明显提升, 数字间距明显, 噪声被消除。

3 通风机性能曲线图像分割

通风机性能曲线图像包括网格线(蓝色)、坐标数字(紫色)和曲线(红色)3个部分, 如图5所示。3个部分相互交叉, 统一识别会导致算法冗杂和识别

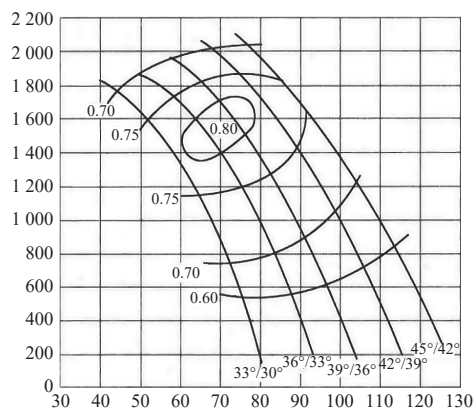
结果不准确, 因此需要进行图像分割。

3.1 基于腐蚀的网格线提取

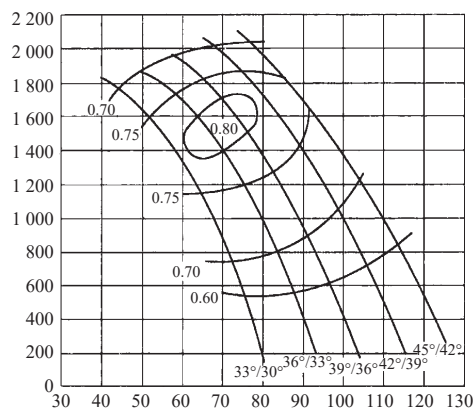
腐蚀和膨胀都是针对二值图像的处理算法。腐蚀通过消除物体边界点来分开看似相连的区域; 膨胀通过扩大物体边缘, 将分开的区域连接或消除小的空洞。提取网格线实质上是消除其他区域, 因此采用腐蚀算法。

腐蚀效果与腐蚀算法采用的结构元素密切相关, 结构元素是以某点为中心定义的像素块, 如矩形、十字形等。对背景为黑色的图像进行腐蚀操作时, 将结构元素的中心点依次置于图像中每个非0像素点 P (白色) 处, 若待处理图像中结构元素覆盖区域内存在0像素点(黑色), 则将点 P 的像素值置为0, 否则保留其像素值。

从腐蚀的原理可知, 当结构元素完全被包含在某图形中时, 腐蚀操作不会对图形造成影响。因此设置尺寸为 100×1 的水平线型结构元素对二值化的



(a) 双边滤波和锐化结果



(b) 二值化结果

图 4 通风机性能曲线图像预处理结果

Fig. 4 Preprocessed result of ventilator performance curve image

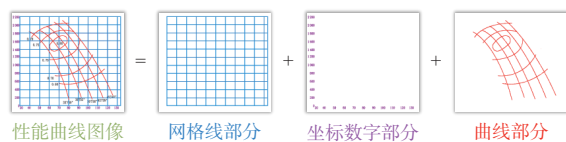


图 5 通风机性能曲线图像分割

Fig. 5 Segmentation of ventilator performance curve image

通风机性能曲线图像(图 4(b))进行腐蚀和反色操作,结果如图 6(a)所示,可看出只有完全包含水平线型结构元素的横线被保留。同理,设置尺寸为 1×100 的垂直线型结构元素提取竖线,结果如图 6(b)所示。对图 6(a)与图 6(b)进行逻辑“或”运算,得到网格线,如图 6(c)所示。若输入的通风机性能曲线图像中没有网格线,只有横纵坐标轴,上述算法依然可识别出横线和竖线。

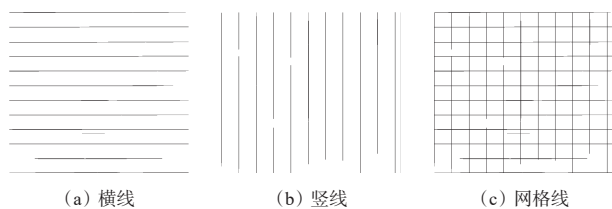


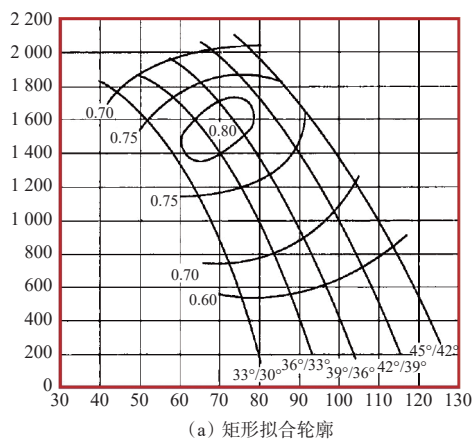
图 6 网格线提取过程

Fig. 6 Process of extracting grid lines

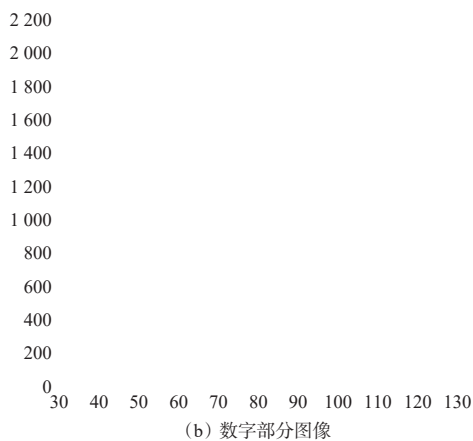
3.2 基于轮廓检测的坐标值提取

分析通风机性能曲线图像可看出,坐标数字单独存在于网格线之外,因此将原图像中网格线外轮廓范围内的内容全部置为背景色,即可提取出坐标数字。需要说明的是,如果在坐标文字附近存在干扰数字及文字,如人为涂画的痕迹,则需要人工清除这些痕迹,否则会影响算法执行。采用图像处理中的轮廓检测算法提取坐标文字,基本思想是从图像中某个起始点开始,沿着轮廓边缘进行追踪,直到回到起始点。常用的轮廓检测算法有边缘追踪算法^[17]、分水岭算法^[18]等。

本文采用边缘追踪算法对识别出的网格线(图 6(c))进行最外层的轮廓检测。从该轮廓中某个 0 像素点 P_0 出发,按顺时针或逆时针顺序在点 P_0 周围上、下、左、右、右上、右下、左上、左下的八邻域点中寻找下一个 0 像素点 M_0 ,然后从点 M_0 开始重复此操作,直到回到点 P_0 ,完成轮廓检测。用矩形对该轮廓进行框选,得到如图 7(a)所示的红色矩形框。对该矩形填充白色,得到如图 7(b)所示的含坐标数字图像。若输入图像没有网格线,只有横纵坐标轴,仍可通过上述方法得到红色矩形,完成坐标数字的分割。



(a) 矩形拟合轮廓



(b) 数字部分图像

图 7 坐标数字提取过程

Fig. 7 Process of extracting coordinate numbers

3.3 曲线提取

曲线部分完全存在于网格线范围内。为提取曲线,需先提取网格线范围内的所有内容,再去除网格线和标注文字。对于通风机性能曲线,每个风量值

(横坐标值)只对应唯一的风压值(纵坐标值),但在像素层面,曲线上的点由多个像素点构成,即每个横坐标对应多个纵坐标,因此需对曲线做细化处理。曲线提取过程如图8所示,步骤如下。

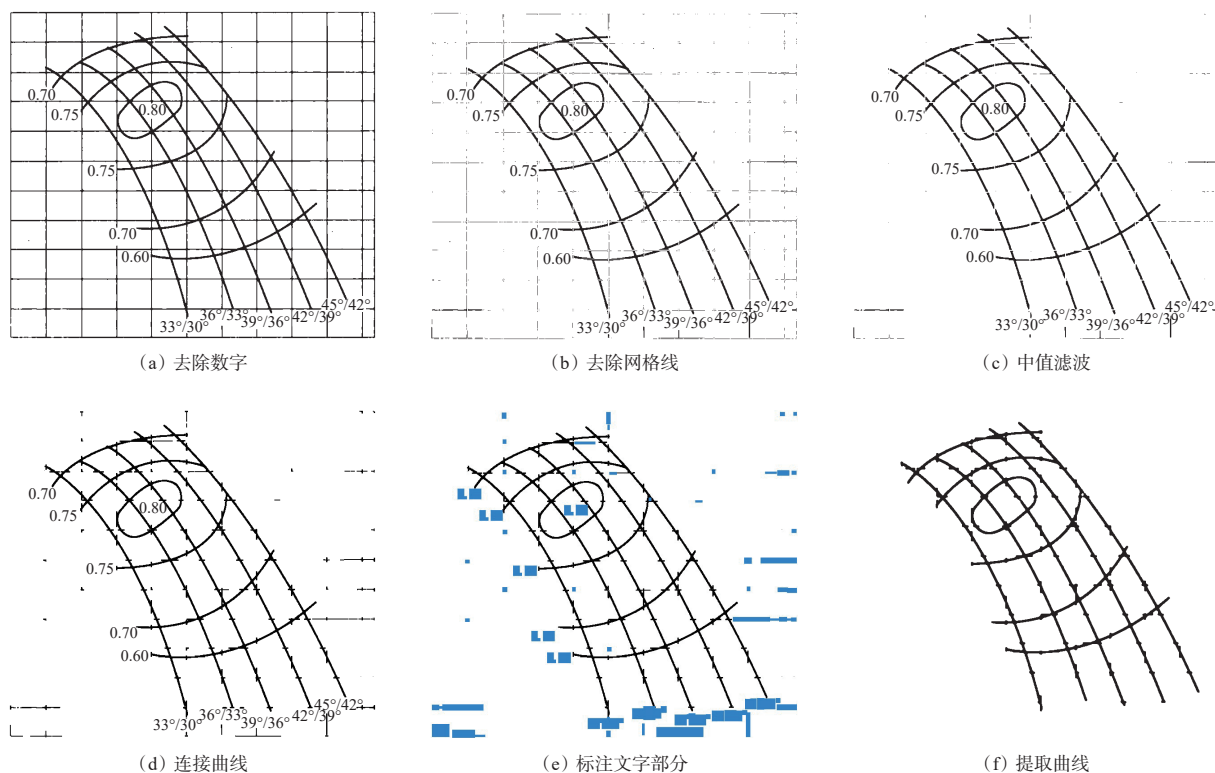


图8 曲线提取过程

Fig. 8 Process of extracting curves

1) 利用逻辑运算和中值滤波去除网格线。提取网格线范围内所有内容,结果如图8(a)所示。该图中背景色与图6(c)中背景色均为白色,因此对二者进行逻辑“异或”运算,使图8(a)背景色变成黑色,与图8(a)中网格线同色,即成功去除图像中的网格线。对运算结果进行反色操作,结果如图8(b)所示。可看出大部分网格线已被去除,残留的部分痕迹可视作随机噪声。常用的方框滤波、双边滤波、中值滤波等滤波方法中,中值滤波对随机噪声的消除效果最好,因此选用尺寸为 3×3 的中值滤波器滤除随机噪声,结果如图8(c)所示。可看出图像噪声被大量去除,仅含有标注文字和被网格线断开的曲线。采用膨胀和腐蚀操作连接断开的曲线,结果如图8(d)所示。若输入图像中只有横纵坐标轴,通过上述算法可去除横纵坐标线并保证曲线的完整性。

2) 利用轮廓检测算法去除标注文字。由于标注文字具有独立的轮廓,并与曲线的轮廓属于同一层次,所以可将标注文字与曲线分别圈定,并根据文字

轮廓明显小于曲线轮廓的特点进行区分。对图8(d)进行轮廓检测,并对大小为 $10 \sim 1\,000$ 像素的轮廓用蓝色矩形进行框选和填充,结果如图8(e)所示。可看出文字和噪声均为蓝色。将矩形颜色改为背景色,即可去除标注文字。为使曲线更加平滑,再次进行膨胀、腐蚀和中值滤波操作,结果如图8(f)所示。至此成功提取出曲线部分。

3) 采用K3M算法细化曲线。图像细化是将图像的线条从多像素宽度减小到单位像素宽度并保持原形状的过程。K3M算法是一种简单易实现的图像细化算法^[19]。采用K3M算法对提取的曲线(图8(f))进行图像细化时,需经过多次迭代处理。每次迭代从左上角开始,逐行对每个0像素点进行6次检查,查看其八邻域内是否有 $3 \sim 7$ 个相邻的0像素点。若有则说明该点不属于曲线骨架部分,需要删除。当某个0像素点不满足删除条件时,迭代停止,完成图像细化,如图9所示。可看出图像中的曲线形态与原图像一致,且曲线宽度减小为1个像素宽度。

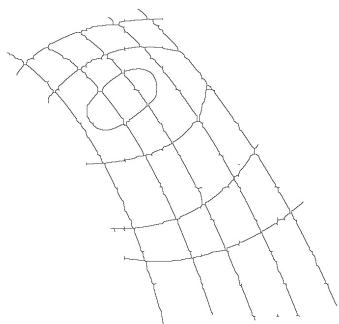


图 9 图像细化结果

Fig. 9 Image after skeletonization

4 风压性能曲线识别

针对图像细化结果,识别曲线上的工况点。由于图像像素坐标系与通风机性能曲线的物理坐标系不同,所以需将识别出的像素坐标转换为物理坐标。

4.1 风压性能曲线像素坐标识别

对图像细化结果进行像素坐标识别时,从图像左上角开始,按行逐像素搜索构成曲线段的黑色像素点。当在第 n 行第 m 列检测到某 0 像素点 P_1 时,将其作为某段性能曲线的起点,并在该点的八邻域内寻找第 2 个 0 像素点 P_2 。由于风压性能曲线是单调递减的,若点 P_2 和点 P_1 满足单调递减的规律,则认为这 2 个点为风压性能曲线中的点,保存二者的像素坐标信息后将其变为白色,以避免重复搜索。从点 P_2 开始,按相同方法搜索构成风压性能曲线的下一个点。当搜索到第 n 个点的八邻域内没有 0 像素点时,表示这段曲线搜索结束,该点为曲线段终点。然后从图像中第 n 行第 $m+1$ 列开始寻找下一段曲线的首个 0 像素点。重复上述操作,找出所有曲线段。需要说明的是,部分效率性能曲线也呈现单调递减趋势,与风压性能曲线相比,这部分效率性能曲线在横轴方向上的跨度远大于纵轴方向,据此去除效率性能曲线。另外,图 9 中除曲线骨架外,还存在一些特别短小的直线,因此,设定某条曲线段的样点数少于 25 时将其舍去。这使得识别出来的风压性能曲线呈断裂状,如图 10 所示。可看出 5 条曲线共断裂成 31 条曲线段。之后通过膨胀、腐蚀、曲线细化等操作得到完整的曲线坐标。

4.2 基于模板匹配算法的数字识别

为了将曲线的像素坐标转换为物理坐标,需要确定坐标系之间的转换关系。识别出坐标轴上数字及其所在的像素位置即可建立转换关系,因此,坐标转换的关键是数字识别。

通风机性能曲线图像中的数字以印刷体呈现,与手写体相比,数字样式和比例更加固定,采用模板

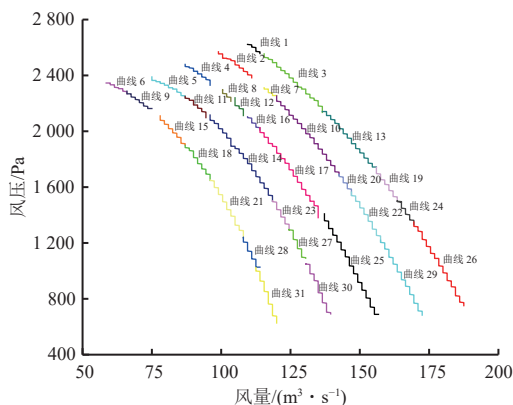


图 10 像素坐标系中识别出的曲线段

Fig. 10 Curve segments recognized in pixel coordinate system

匹配算法进行识别更为简洁。1 个模板就是 1 张确定大小的图像,只与 0—9 中的 1 个数字对应,图像中显示的也是该数字,如图 11 所示(模板大小为 30×40)。匹配就是计算模板图像和与其具有相同大小的待匹配图像之间的像素相似度,取得最大相似度的模板对应的数字即待匹配图像中显示的数字。本文采用归一化相关匹配法^[20]计算相似度。该方法基于矩阵内积来判断相似性,2 个矩阵的内积在一定程度上反映它们之间的相似度,内积越大,则相似度越高。为了避免光照对相似度的影响,归一化相关匹配法先将模板和待匹配图像的像素值分别减去各自的均值,再进行内积运算,将内积归一化到 $[-1, 1]$ 范围内。



(a) 数字 7 图像 (b) 数字 8 图像

图 11 模板图像

Fig. 11 Template image

每个坐标数字均由单个数字组成,在进行匹配前需将数字切割为单个数字。利用膨胀和腐蚀操作,将图 7(b)中组成各数的数字连成整体,再通过轮廓检测算法找到如 800 等数字的矩形外轮廓。针对每个找到的矩形区域,采用膨胀、腐蚀和轮廓检测算法找到每个数字(如 800 中的 8, 0, 0)的矩形外轮廓,将其从图 7(b)中截取,即得到单个数字的图像,并将尺寸调整为与模板相同大小。从图 7(b)中采集的数字 8 图像如图 12 所示,其与图 11(b)模板的相似度为 0.92,与其他 9 个模板的相似度均小于该值,与图 11(a)模板的相似度仅为 0.18,因此该图片被识别为数字 8。

完成坐标数字识别后,选取通风机性能曲线图



图 12 待匹配数字 8 图像

Fig. 12 The image of the number 8 to be matched

像横坐标轴上最大值点 A 和纵坐标轴上最大值点 B 为参考点, 建立坐标系转换关系 dx 和 dy 。假设点 A 的像素坐标为 $(p_{x\max}, p_{y\min})$, 物理坐标为 $(s_{x\max}, s_{y\min})$; 点 B 的像素坐标为 $(p_{x\min}, p_{y\max})$, 物理坐标为 $(s_{x\min}, s_{y\max})$, 则转换关系为

$$\begin{cases} dx = (p_{x\max} - p_{x\min}) / (s_{x\max} - s_{x\min}) \\ dy = (p_{y\max} - p_{y\min}) / (s_{y\max} - s_{y\min}) \end{cases} \quad (5)$$

5 方法应用

5.1 程序实现

经过上述处理可从通风机性能曲线图像中识别出足够的样点, 再根据文献[14]中的方法即可得到风压性能函数。将相关算法集成到已有矿井通风网络解算软件中^[21], 开发工具主要有 VC++, ObjectARX, OpenCV 等。OpenCV 是一个开源的视觉库, 提供了丰富的图像处理和计算机视觉算法。本文使用的 OpenCV 函数见表 1, 程序界面如图 13 所示。使用时只需选择待识别通风机性能曲线图像, 即可自动识别出风压性能曲线。

表 1 通风机风压性能曲线识别使用的 OpenCV 库函数

Table 1 The OpenCV functions used in recognizing ventilator wind-pressure performance curve

| 函数名称 | 作用 | 函数名称 | 作用 |
|-------------------|----------|-------------------------|--------|
| cvtColor() | 颜色模型转换 | erode() | 图像腐蚀 |
| threshold() | 图像二值化 | dilate() | 图像膨胀 |
| resize() | 图像尺寸调整 | findContours() | 轮廓检测 |
| rectangle() | 矩形绘制 | drawContours() | 轮廓绘制 |
| mediaBlur() | 中值滤波 | contourArea() | 轮廓面积计算 |
| bilateralFilter() | 双边滤波 | matchTemplate() | 图像模板匹配 |
| bitwise_or() | 逻辑“或”运算 | boundingRect() | 轮廓外接矩形 |
| bitwise_xor() | 逻辑“异或”运算 | getStructuringElement() | 结构元素生成 |

5.2 实例应用

为检验通风机风压性能曲线自动识别方法的准确性与效率, 对 15 张通风机性能曲线图像进行识别。对于 1 张图像, 自动识别方法平均 25 s 完成 3 000 个样点采集, 单条曲线采样速度达 24 Samples/s, 而人工识别一般需 30 min, 可见本文方法效率明显高于人工识别方法。

分别采用人工识别方法和自动识别方法对

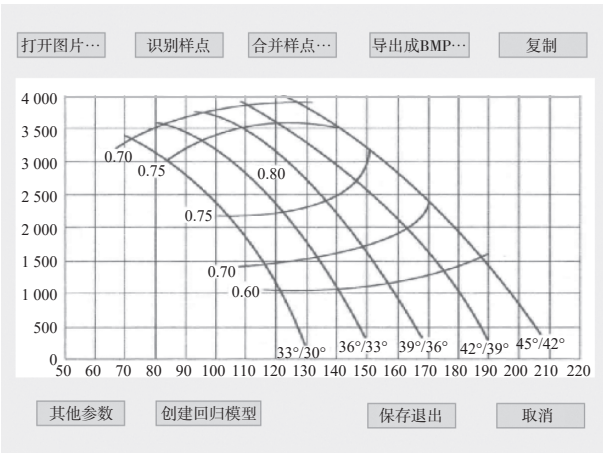


图 13 程序界面

Fig. 13 User interface

图 13 中的通风机风压性能曲线进行识别, 结果如图 14 所示。可看出人工识别结果在弯曲度较大的位置与原始曲线有明显的分离, 而自动识别结果几乎与原始曲线重合, 准确性更高。

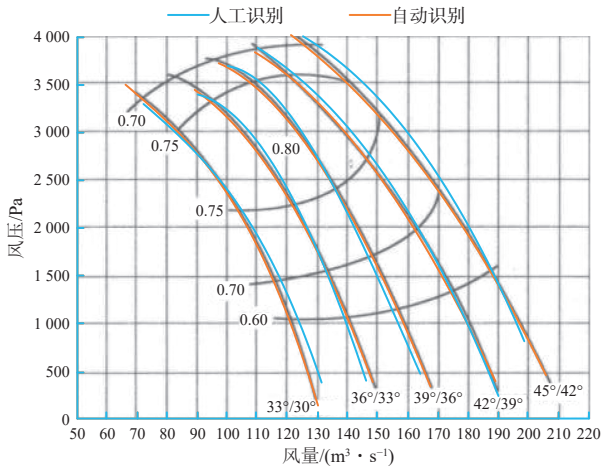


图 14 通风机风压性能曲线识别结果

Fig. 14 Recognition results of ventilator wind-pressure performance curve

软件采用三阶多项式对人工识别方法和自动识别方法获得的风压性能曲线进行拟合, 拟合函数见表 2, 其中 Q 为风量。

表 2 风压性能曲线拟合函数

Table 2 The fitting function for wind-pressure performance curve

| 叶片角/(°) | 拟合函数 | |
|---------|--|--|
| | 人工识别 | 自动识别 |
| 33/30 | $4\,666.9 - 33.293\,65Q + 0.476\,19Q^2 - 0.0037Q^3$ | $7\,500.8 - 125.328\,4Q + 1.438\,54Q^2 - 0.007Q^3$ |
| 36/33 | $-1\,131.7 + 134.324\,82Q - 1.068\,8Q^2 + 0.001\,61Q^3$ | $2\,693.3 + 30.135\,15Q - 0.145\,24Q^2 - 0.001\,1Q^3$ |
| 39/36 | $1\,304.9 + 63.979\,1Q - 0.393\,54Q^2 - 0.000\,13Q^3$ | $-1\,120.4 + 123.620\,72Q - 0.859\,17Q^2 + 0.001\,02Q^3$ |
| 42/39 | $9\,744.5 - 108.190\,48Q + 0.756\,81Q^2 - 0.002\,35Q^3$ | $11\,328.1 - 139.917\,39Q + 0.963\,12Q^2 - 0.002\,8Q^3$ |
| 45/42 | $-3\,181.9 + 156.332\,47Q - 0.983\,38Q^2 + 0.001\,51Q^3$ | $5\,439.6 - 7.957\,58Q + 0.037\,72Q^2 - 0.000\,57Q^3$ |

- 6-11.
- [6] 周福宝, 辛海会, 魏连江, 等. 矿井智能通风理论与技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 313-328.
ZHOU Fubao, XIN Haihui, WEI Lianjiang, et al. Research progress of mine intelligent ventilation theory and technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 313-328.
- [7] 张浪, 刘彦青. 矿井智能通风与关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 178-195.
ZHANG Lang, LIU Yanqing. Research on technology of key steps of intelligent ventilation in mines[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 178-195.
- [8] 刘剑. 矿井智能通风关键科学技术问题综述[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 108-111, 117.
LIU Jian. Overview on key scientific and technical issues of mine intelligent ventilation[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 108-111, 117.
- [9] 魏连江, 周福宝, 夏同强, 等. 矿井智能通风与灾害应急决策平台[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(9): 158-167.
WEI Lianjiang, ZHOU Fubao, XIA Tongqiang, et al. Mine intelligent ventilation and disaster emergency decision platform[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(9): 158-167.
- [10] 唐辉雄, 赵伏军, 张柏, 等. 基于最小一乘准则求解矿井通风机性能曲线[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(10): 16-21.
TANG Huixiong, ZHAO Fujun, ZHANG Bai, et al. Solution on performance curves of mine ventilator based on least absolute deviation criteria[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(10): 16-21.
- [11] 尹昌胜, 刘剑, 邓立军. 正反相切抛物线方法拟合通风机特性曲线[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 77-81.
YIN Changsheng, LIU Jian, DENG Lijun. Characteristic curve of fan fitted with two positive and negative tangent parabolic curve method[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2015, 34(1): 77-81.
- [12] 叶敏, 杨应迪. 轴流式风机特性曲线的图形数字化及优化研究[J]. 煤炭工程, 2013, 45(增刊 1): 110-111, 115.
YE Min, YANG Yingdi. The digitalization and optimization study of characteristic curves for axial flow fans[J]. Coal Engineering, 2013, 45(S1): 110-111, 115.
- [13] 贾腾, 王海桥, 陈世强, 等. 矿用通风机性能曲线图的函数化再现[J]. 矿业工程研究, 2014, 29(2): 70-74.
JIA Teng, WANG Haiqiao, CHEN Shiqiang, et al. A functional representation of the mine ventilator's performance chart[J]. Mineral Engineering Research, 2014, 29(2): 70-74.
- [14] 吴奉亮. 矿井主要通风机性能曲线的最优多项式拟合[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(1): 14-18.
WU Fengliang. Optimal polynomial fitting for mine main fan characteristic curves[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(1): 14-18.
- [15] RONGDI L. An optimal algorithm for bilateral filtering[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2634(1). DOI:10.1088/1742-6596/2634/1/012030.
- [16] CAPOBIANCO G, CERRONE C, PLACIDO D A, et al. Image convolution: a linear programming approach for filters design[J]. *Soft Computing*, 2021, 25(14): 1-16.
- [17] ZHANG Weiguo, SHI Dan, YANG Xiaoqiang. An improved edge detection algorithm based on mathematical morphology and directional wavelet transform[C]. The 8th International Congress on Image and Signal Processing, Shenyang, 2015: 335-339.
- [18] LIU Hongquan, ZHANG Weijin, WANG Fushun, et al. Application of an improved watershed algorithm based on distance map reconstruction in bean image segmentation[J]. *Heliyon*, 2023, 9(4). DOI: 10.1016/J.HELİYON.2023.E15097.
- [19] TABEDZKI M, SAEED K, SZCZEPAŃSKI A. A modified K3M thinning algorithm[J]. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2016, 26(2): 439-450.
- [20] CUI Zhongjie, QI Wenfa, LIU Yuxin. A fast image template matching algorithm based on normalized cross correlation[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1693(1). DOI:10.1088/1742-6596/1693/1/012163.
- [21] 吴奉亮, 周澎, 李晖, 等. 基于智能对象的矿井通风CAD模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(5): 54-57.
WU Fengliang, ZHOU Peng, LI Hui, et al. Research on mine ventilation CAD model based on intelligent object[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(5): 54-57.