DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0150-05.

基于无人机航测的高压输电线路状态实时监测

史 展，王航星
(国网河南省电力公司西峡县供电公司,河南 南阳 474500)

摘 要: 针对现有高压输电线路监测方法获得结果mAP值低的问题,应用无人机航测技术,设计一种数字化高压输电线路运行状态实时监测方法。先依托于云端控制协同平台规划巡航路径,利用无人机携带的紫外相机获取高压输电线路航测图像。然后基于中值滤波与形态学腐蚀处理算法完成航测图像的预处理,再以处理后的线路航测图像为基础,识别出图像内包含的输电线路,并通过8邻域窗口计算模式判断区域线路运行状态。最后结合多态分层评估理念,生成高压输电线路运行状态实时监测结果。实验结果表明:所提监测方法的mAP值保持在97.5%左右,并未出现较大起伏。

关键词: 无人机;航拍图像;输电线路;状态监测;图像处理;多态分层评估
中图分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)02-0150-05

Real Time Monitoring of High Voltage Transmission Line Based on UAV Aerial Survey

SHI Zhan, WANG Hang-xing
(Xixia County Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company, Nanyang 474500 China)

Abstract: Aiming at the problem of low mAP value obtained by existing monitoring methods for high-voltage transmission lines, a digital real-time monitoring method for the operation status of high-voltage transmission lines is designed by using UAV aerial survey technology. First, it plans the cruise path based on the cloud control collaborative platform, and uses the UV camera carried by the UAV to obtain aerial survey images of high-voltage transmission lines. Then, based on the median filter and morphological corrosion processing algorithm, the aerial survey image is preprocessed. Then, based on the processed aerial survey image of the line, the transmission line contained in the image is recognized, and the regional line operation status is judged through the 8 neighborhood window calculation mode. Finally, combined with the concept of multi state hierarchical evaluation, real-time monitoring results of operation status of high-voltage transmission lines are generated. The experimental results show that the mAP value of the proposed monitoring method is about 97.5%, and there is no significant fluctuation.

Keywords: UAV; aerial image; transmission line; condition monitoring; image processing; polymorphic hierarchical evaluation

0 引言

电力行业进入高速发展的阶段后,电网覆盖范围不断扩大,高压输电线路的搭建也开始越来越复杂。在整个电力系统中,输电线路作为电力传输的载体[1],是保证电能顺利传输的基础。近年来,高压输电线路受到恶劣环境影响出现输电障碍的情况频繁发生,对电网的安全运行产生极大的负面影响,甚至造成了严重的经济损失[2]。无人机是信息时代高技术含量的产物,其在设计过程中涉及到传感器、通信、信息处理、智能控制等技术,因此现阶段已经有很多专家与学者将无人机应用至高压输电线路巡检领域。无人机监视系统是无人机的指挥中心,主要的任务是监视无人机的飞行状态,规划飞行航迹并发送飞行指令,并对危险情景及时作出报警提示等,使用的无人机类型主要包括高性能战术无人机、固定翼无人机、直升机、多旋翼无人机等。早在上世纪,国外部分国家就已经开始进行高压输电线路巡检方面问题的研究。如在2000年,西班牙的马德里理工大学研究将无人机应用于电力线巡检过程中。2004年,加拿大某公司开始应用无人机挂在光电吊舱开展高压输电线路巡检,以降低巡线成本。我国也积极开展高压输电线路的巡检研究,如文献[3]依托于分布式光纤传感设备,采集实时监测数据,并通过数值仿真分析提取特征信息,以此为基础得到输电线路运行状态监测结果。但该监测方法的可靠性较差。文献[4]提出将输电区域划分为多个安全作业空间,运用了飞行时间深度相机技术,对子空间内高压输电线路作业工况进行监测。但是,该方法的实时监测结果误差较大。文献[5]通过巡检机器人采集输电线路图像,再应用图像分析方法提取线路局部状态特征,根据特征信息判断线路运行状态。通过对比实验验证结果可知,该方法

*基金项目:河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(192102210138)
收稿日期:2023-10-19

监测范围较小。

在高压输电线路运行状态监测过程中，为了保证监测的实时性和准确性，文中应用无人机航测技术，设计了一种新的数字化监测方法。

1 基于无人机航测的高压输电线路状态实时监测方法

1.1 高压输电线路航测图像获取

依托于无人机航测技术采集输电线路图像时，为保证采集图像的全面性，文中设计了以云端服务器为核心的云端控制协同平台，该平台主要包括显示模块、无人机定位模块、图像坐标标记模块三部分，通过不同模块的协同工作规划和控制无人机航测路线[6]。在实际路线规划过程中，需要将无人机航测得到的云数据传回云端控制协同平台，从中识别出输电线路中的铁塔，作为无人机巡视路径的启动和悬停节点。

无人机在悬停节点调整不同角度，可全角度、多方位拍摄高压输电线路图像。需要注意的是，无人机接近输电线路后，虽然获取的高压输电线路航测图像质量更高，但同时也面临着非常严重的飞行安全问题。文中在高压输电线路航测图像获取阶段，以保证无人机飞行安全为目标，定义安全飞行距离。

$$d=\max\{b_1,b_2,b_3,b_4\}+v_1+v_2+vs+\varepsilon \tag{1}$$

式中，d表示无人机安全飞行距离，b_1，b_2，b_3，b_4表示磁场、电场干扰下无人机与高压输电线路左右两侧导线的最短安全距离，v_1表示最大偏航距离，v_2表示坐标尺寸误差，v表示无人机飞行速度，s表示通信时延，ε表示无人机的轴距。

根据式(1)计算出安全飞行距离后，以该距离要求为限制条件，通过云端控制协同平台建立无人机最优巡检航线。在无人机上安装紫外相机，按照最优路线控制无人机行进，行进过程中连接紫外相机终端和地面服务器，无人机采集的高压输电线路图像会实时传到服务器，并进行压缩和编码处理，作为线路运行状态实时监测的基础。

1.2 输电线路图像的预处理

无人机航测图像采集过程中，会受到外界环境影响，导致实时采集的图像中包含大量噪声。因此，在图像预处理阶段，先采用中值滤波算法对图像进行去噪处理，具体的滤波模式如图2所示。

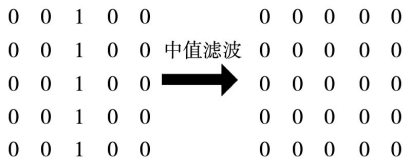


图1 中值滤波算法示意图

高压输电线路航测图像的形态学处理，需要经过腐蚀、膨胀、开运算与闭运算四个步骤，腐蚀运算的目的是去除图像中存在的干扰信息[7]，从而便于后续数字化分析时得到准确的运行状态监测结果，其具体计算公式为：

$$Q\otimes B=\left\{(a,f)\middle|B_{\{(a,f)\}}\subseteq Q\right\} \tag{2}$$

式中，B、Q表示两个集合，⊗表示腐蚀算子，$Q\otimes B$表示Q被B腐蚀，(a,f)表示被腐蚀的点。

面对腐蚀问题，可采用膨胀运算的形式，将高压输电线路航拍图像腐蚀点附近图像区域进行放大[8]，补充缺失区域，膨胀运算可以表示为：

$$Q\oplus B=\left\{(a,f)\middle|\overline{B}_{\{(a,f)\}}Q\neq\varnothing\right\} \tag{3}$$

式中，⊕表示膨胀算子，$\overline{B}$表示集合B关于原点对称的集合，∅表示空集合。

在进行图像实时处理过程中，膨胀运算和腐蚀运算的实现需要依托于开运算和闭运算两种形式：

$$\begin{cases}Q\circ B=Q\otimes B\oplus B\\ Q\bullet B=Q\oplus B\otimes B\end{cases} \tag{4}$$

式中，∘表示开运算，•表示闭运算。通过上述一系列计算和处理，得到预处理后的高压输电线路图像：

$$g(a,f)=\frac{\eta(a,f)}{Q\bullet B} \tag{5}$$

式中，η表示无人机航测采集的原始图像，g表示预处理后的图像。

1.3 基于无人机航测的状态判断算法

针对预处理后的输电线路图像，本章设计了一种基于无人机航测的运行状态判断算法。由于无人机航测拍摄的图像中，输电线同时存在边缘特征和线特征[9]，在图像分割阶段应用了改进Canny边缘检测算法，通过8邻域算法计算图像不同方向的梯度幅值与方向角，具体计算公式为：

$$\delta(i,j)=\max(|\lambda_x|,|\lambda_y|,|\lambda_{45^\circ}|,|\lambda_{135^\circ}|) \tag{6}$$

$$\alpha(i,j)=\arctan(\frac{\lambda_y}{\lambda_x}) \tag{7}$$

式中，(i,j)表示目标点坐标，λ_x、λ_y、λ_{45°、λ_{135°表示x方向、y方向、45°方向、135°方向的方向算子，δ表示梯度幅值，α表示方向角。

按照上述计算公式，确定整个高压输电线路航测图像中的像素对角线方向。再结合最大类间方差原理，分析图像像素数量和灰度范围，自动选取两个自适应分割阈值，将无人机航测图像的目标区域和背景区域完美分割开来。

而后，应用以点-线对偶变换原理为核心的Hough变换方法，将分割处理后的图像边缘特征信息，从图像空

间映射至参数空间，更加准确地识别图像中包含的输电线路。在Hough变换法的作用下，设置图像空间内随机选取的一条直线，可通过公式(8)进行描述：

$$e = ku + \theta \tag{8}$$

式中，k表示斜率，θ表示截距，(e,u)表示空间内的直线点。

由于图像空间和参数空间之间存在对偶关系，图像空间内选取的点，在参数空间内也存在对应点。图像变换处理过程中，可针对参数空间内的点叠加程度进行分析，以此来反映图像空间内存在的共线情况[10]。考虑到呈现为垂线状态的输电线，变换时会出现病态情况，文中在Hough变换时应用了极坐标的形式：

$$\rho = u\cos\psi + e\sin\psi \tag{9}$$

式中，(ρ,ψ)表示极坐标。在极坐标系中，图像空间内的直线会成为正弦线，且所有的正弦线会有一个共同的交点。因此，极坐标系内的直线方程可变换为：

$$\rho' = u\cos\psi' + e\sin\psi' \tag{10}$$

式中，(ρ',ψ')表示极坐标系内所有正弦曲线的交点。

在Hough变换处理后，可确定极坐标内存在的具有公共点的离散点之间，存在共享关系[11]。通过处理可将这些离散点拟合为一条线段，则该线段就是图像中识别出的高压输电线路。考虑到高压输电线路具有平行的特点，在线路识别完成后，还需要进行线段平行分析，将不平行的直线消除，留下代表输电线的直线。

经过上述处理后，针对正常状态的航测图像，分析目标区域与背景区域的灰度值之比，并将其看作输电线路状态判断阈值。在阈值计算过程中，应用8邻域窗口计算模式，如图2所示。

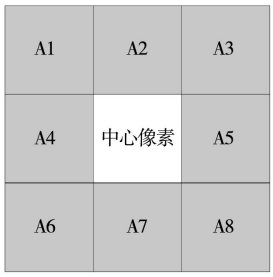


图2 中心像素点及8邻域像素

如图2所示，在确定代表目标的中心像素后，从该像素周围入手，选定8个邻域像素，结合邻域像素的最大和最小灰度值，确定高压输电线路运行状态判断阈值为：

$$T = \frac{\sum_{o=1}^{8} A_o}{g(a,f)} \times \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2} \tag{11}$$

式中，T表示状态判断阈值，A_o表示第o个领域像素，$A_{\max}$、$A_{\min}$表示邻域像素的最大和最小灰度值[12]。

依托于式(10)计算出的判断阈值，定义数字化高压输电线路运行状态判断规则。当采集图像目标与背景灰度值的比值大于判断阈值时，表明此时线路属于异常状态，反之则属于正常运行状态。

1.4 生成线路运行状态实时监测结果

在完成区域线路异常状态判断后，依托于多态分层评估理念，构建线路多状态推理评估模型。从高压输电线路的主要组成部件入手，分别采用上文提出方法进行异常状态判断，再汇总分析得到线路运行状态实时监测结果，具体的分层评估模型如图3所示。

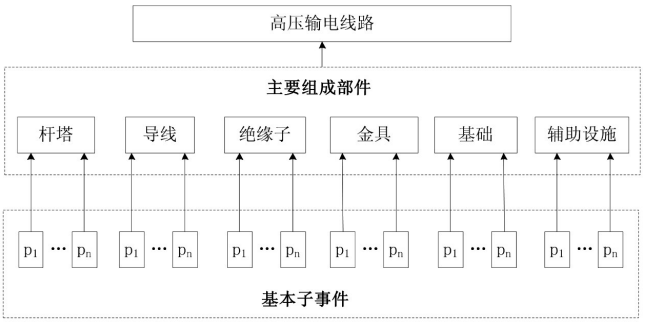


图3 输电线路运行状态分层评估模型

如图3所示，将主要组成部件无人机航测图像划分为多个子区域，每个子区域作为一个子事件，根据子区域异常判断结果确定线路部件状态。最后，针对不用部件的重要程度和异常情况进行加权计算，得到整条高压输电线路当前运行状态。

2 实验

文中运用了无人机航测技术，针对高压输电线路提出一种新型状态监测方法。为确保这种监测方法具有良好的应用效果，在推广应用之前需要选定研究区域，进行实验分析。

2.1 实验准备

本次实验选定的研究区域位于广西区北部，属于桂林灌阳县桂山地区，实验区域的经度范围为110.75～110.81°E，纬度范围为25.26～25.27°N，以这一区段的高压输电线路为例，在2022年9月10日至2022年9月20日，运用所提方法对于线路运行状态进行实时监测。

考虑到文中设计监测方法运用了无人机航测技术，在本次实验过程中，应用了携带紫外相机的多旋翼无人机，采集输电线路航测图像。多旋翼无人机巡检图像如图4所示。

紫外相机的具体参数如表1所示。

按照表1所示信息完成无人机航测设备设置后，应用其对目标区域高压输电线路进行航测。

通过无人机航测，获取输电线路航测图像，作为实时监测的基础数据。

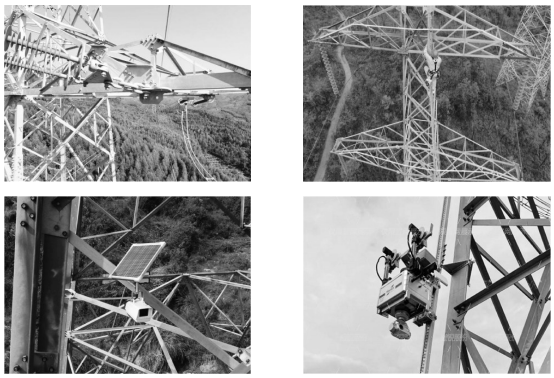
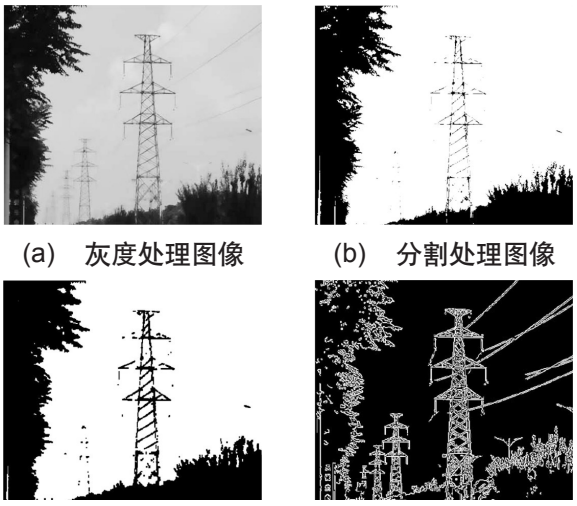


图4 多旋翼无人机巡检图像

表1 紫外光传感器、成像仪参数信息

设备	技术指标	数值
紫外光传感器	俯仰角/°	0~180
	最大俯仰角速度/(°/s)	≥90
	最大俯仰角加速度/(°/s)	≥150
	横滚角/°	±50
	最大横滚角速度/(°/s)	≥20
	最大横滚角加速度/(°/s)	≥150
	分辨率(TVL)	≥750
	波长范围/nm	220~290
	稳定精度/mrad	≤1
	角度控制精度/°	≤0.02
	有效探测距离/m	≥25
	视长宽度/°	≥50
成像仪	物理特性/mm	220×250×240
	旋转角度/°	-180~0
	运行速度/(°/s)	±110
	供电电压/V	25~30
	工作温度/℃	-15~45
	存储温度/℃	-25~55

2.2 航测图像处理



(a) 灰度处理图像 (b) 分割处理图像

(c) 形态学处理图像 (d) 边缘检测图像

图5 输电线路航测图像处理过程

由于无人机航测采集的图像属于彩色图像，对其进行处理的计算复杂度较高，为了提升图像处理效率和处理效果，在高压输电线路航测图像处理阶段，先对原始彩色图像进行灰度处理，得到图5(a)所示的灰度图像。再改进Canny边缘检测算法，分割灰度图像的目标区域和背景区域，得到图5(b)所示的分割结果。考虑到分割处理后的图像，部分黑色像素出现缺失情况，使得线路和杆塔外轮廓边缘不完整，加大了后续的线路运行状态实时监测的难度。按照文中研究内容，在航测图像预处理阶段，采用形态学腐蚀处理理念合理促使黑色像素数量的增长，使得间断的轮廓边缘重新连接起来，如图5(c)所示。最后，对处理后的图像进行边缘检测，得到图5(d)所示的边缘检测结果。

2.3 线路运行状态实时监测结果

以2022年9月10日为例，在图像处理完成后，通过基于无人机航测的运行状态判断算法、线路多状态推理评估模型对目标区域的输电线路运行状态进行评估，得到图6所示的评估结果。

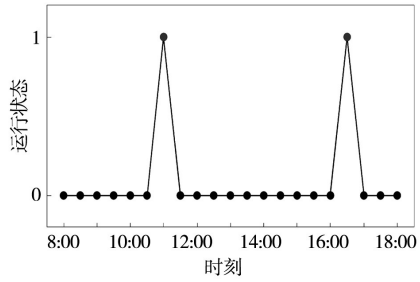


图6 高压输电线路运行状态实时监测结果

运行状态取值为0时，表明此时高压输电线路运行状态处于正常状态，当运行状态取值为1时线路处于异常状态。根据图5可知，该区域的高压输电线路在11:00和16:30两个时刻处于异常状态，派遣维修人员前往现场检查，确定这两个时刻确实存在影响输电稳定性的异常问题，表明了文中设计实时监测方法的有效性。

而后，选取全类平均正确率mAP衡量监测方法的应用性能，该指标的计算需要以精确率、召回率、平均正确率三项参数为基础，具体计算公式为：

$$\vartheta=\frac{\sum_{r=1}^{N}P(r)\Delta R(r)}{m}\times 100\% \tag{12}$$

式中，ϑ表示mAP值，N表示监测天数，$P(r)$表示第r天高压输电线路运行状态实时监测的精度，$\triangle R(r)$表示从第$r-1$天到第r天监测结果召回率的变化量，m表示线路运行状态类别总数。

为使实验结果更具说服力，本次实验还应用了基于巡检机器人的监测方法、基于ToF技术的监测方法，与所提方法一同进行线路状态监测。再运用式(12)计算三种监测方法的mAP值，得到图7所示的对比结果。

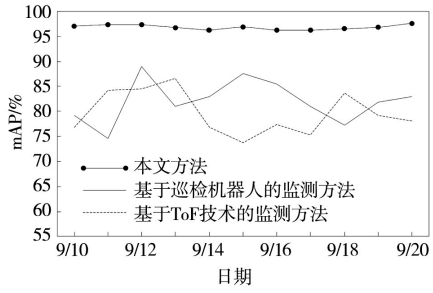


图7 不同监测方法的mAP对比

根据图7可知，文中设计方法的监测结果mAP值保持在97.5%左右，始终没有出现较大波动。而其他两种监测方法的mAP均值分别为83.67%、80.25%。综上所述，应用无人机航测技术的实时监测方法可得到更加准确的线路运行状态监测结果，与传统方法相比mAP值提升了13.83%、17.25%。

3 结束语

随着高压输电线路覆盖范围越来越广，其搭建区域环境较为复杂，使得线路运行状态极易受到外界环境干扰，影响输电稳定性和安全性。文中以无人机航测技术为核心，通过航测图像对线路运行状态进行实时监测，得到更加准确的监测结果。

参考文献：

[1] 周经中，何学敏，孙阔腾，等.强腐蚀地区输电线路腐蚀及监测防护的研究现状[J].腐蚀与防护，2021，42(4)：1−8.

[2] 姚景岩，杨世勇，舒征宇，等.基于航拍的输电线路覆冰厚度监测研究[J].高压电器，2021，57(8)：105−114.

[3] 杨芳，唐小亮，尹文阔，等.基于多参量分布式光纤传感的架空输电线路风振监测分析[J].电力系统保护与控制，2022，50(11)：169−177.

[4] 邹德华，严宇，王伟，等.基于ToF技术的高压输电线路带电作业安全监测方法[J].高电压技术，2020，46(7)：2570−2577.

[5] 熊佳佳.基于巡检机器人的电网覆冰输电线路状态智能监测技术[J].制造业自动化，2021，43(4)：153−156.

[6] 万林，巫世晶，谢福起，等.基于图像处理的输电线路耐张线夹监测系统[J].武汉大学学报(工学版)，2020，53(12)：1106−1111.

[7] 杨剑锋，秦钟，庞小龙，等.基于深度学习网络的输电线路异物入侵监测和识别方法[J].电力系统保护与控制，2021，49(4)：37−44.

[8] 张星炜，徐鑫乾，王红星，等.基于数据挖掘的海量激光点云数据快速集成方法[J].自动化技术与应用，2024，43(12)：93−97.

[9] 徐梁，卜京.基于无人机低空遥感的输变电线路定时巡检系统[J].电子设计工程，2022，30(5)：90−94.

[10] 陈硕，马国庆.基于物联网的远程医疗监控网络节点能耗自动识别模型[J].自动化技术与应用，2024，43(12)：135−138，153.

[11] 张安安，邓芳明.融合无线传感器网络与射频识别的输电线路杆塔状态监测网络低延时技术[J].科学技术与工程，2020，20(4)：1442−1447.

[12] 王涛，袁天梦，刘晓琳，等.基于分布式控制系统的光电传感器智能控制[J].自动化技术与应用，2024，43(12)：39−42.

作者简介：史展(1986−)，男，硕士，高级工程师，研究方向：柔性交流输电技术及项目建设管理。

(上接第126页)

分析，试验结果表明：对滑油样品进行20次图像采样求平均磨粒浓度的方法，可有效削减采样偏差影响，且滑油磨粒浓度测试方法的耗时仅为13.42 s。对部署后的YOLOv3模型进行了误差分析，在显著性水平0.05下，服从于正态分布，且在置信度0.95下，总体的磨粒浓度误差在4.16%以内。此外，由于采用连续流微流控芯片的图像采集系统，实现了对非铁磁性磨粒的检测。

参考文献：

[1] 谷亚南，陈岷.飞机维修时航空发动机滑油系统污染防控措施探析[J].内燃机与配件，2019(10)：131−132.

[2] 许艳芝，李志鹏，郭政波.某型涡扇发动机滑油压差异常故障分析[J].科学技术与工程，2019，19(17)：341−346.

[3] 申江江，孙中华，齐银鹏.基于RBF神经网络的发动机磨损故障分析[J].人工智能及识别技术，2016，12(33)：177−179.

[4] 鲜倪军.基于ABC−BP神经网络的航空发动机故障诊断方法[J].装备制造技术，2018(5)：173−178.

[5] 陈庆贵，于光辉，谢静等.基于神经网络的航空发动机金属含量预测[J].兵器工程学报，2019，40(12)：150−152.

[6] 刘加卫，刘晓卫，王崴，等.基于极限学习机的铁谱磨粒模式识别[J].润滑与密封，2019，44(6)：72−77.

[7] 王涛.基于深度学习的ECT滑油检测技术研究[D].天津：中国民航大学，2020.

[8] 许琢.航空发动机滑油金属磨屑在线检测技术研究[D].沈阳：沈阳航空航天大学，2016.

[9] 朱守全.感应式船舶滑油污染物在线分析技术和装置的研究[D].大连：大连海事大学，2017.

[10] 侯媛媛，李江红，薛军印.基于深度学习的航空发动机滑油磨粒检测研究[J].计算机测量与控制，2022，30(4)：14−22.

[11] 李步遥，司马军.基于MEC−BP神经网络的基坑水平位移反演分析[J].铁道科学与工程学报，2021，18(7)：1764−1772.

作者简介：侯媛媛(1986−)，女，博士，讲师，研究方向：人工智能深度学习领域。