

重庆邮电大学
CHONGQING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS

专业学位硕士论文
MASTER THESIS FOR PROFESSIONAL DEGREE



论文题目 重庆邮电大学学位论文
格式模板

学科专业 电子科学与技术

学号 S20202222

作者姓名 张三

指导教师 李四

学院 光电工程学院/国际半导体学院

学校代码 10617 UDC xxxxxx
分 类 号 xxxxxx 密级

学 位 论 文

重庆邮电大学学位论文格式模板

某 某

指导教师 某某某 教 授
某 某 副教授

申请学位级别 博士 学科专业 XXXX
专业学位领域 XXXXXX
答辩委员会主席 某某某 教授 论文答辩日期 2021 年 5 月 20 日
学位授予单位和日期 重庆邮电大学 2021 年 6 月

**Dissertation Template for Master Degree of
Engineering in CHONGQING UNIVERSITY OF
POSTS AND TELECOMMUNICATIONS**

A Doctoral Dissertation Submitted to
Chongqing University of Posts and Telecommunications

Discipline	XXXX
Student ID	XXXX
Author	XXXX
Supervisor	XXXX
School	XXXX

重庆邮电大学

学位论文独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文中不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在论文中以明确方式标明。本人完全知晓本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

重庆邮电大学

学位论文使用授权书

本人同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于：

公开论文

涉密论文，保密____年，过保密期后适用本授权书。

(请在以上方框内选择打“√”)

作者签名：

导师签名：

日期： 年 月 日

摘要

学位论文是研究生从事科研工作的成果的主要表现，集中表明了作者在研究工作中获得的新发明、新理论或新见解，是研究生申请硕士或博士学位的重要依据，也是科研领域中的重要文献资料和社会的宝贵财富。

为进一步规范我校研究生学位论文撰写格式，提高研究生学位论文质量，参照国家标准《学位论文编写规则》(GB/T 7713.1-2006)，结合我校实际，制定本模板。

关键词：学位论文，撰写规范，论文模板，重庆邮电大学

ABSTRACT

Dissertation /Thesis is postgraduate ' s main academic performance to display her/his works of scientific research, which shows the author ' s new invention, new theory or new opinion in her/his research. It is the crucial document for the graduate students to apply for degree, and it is also the important scientific research literature and the valuable wealth of society.

In order to further standardize the format of dissertation/thesis writing and improve graduate dissertation/thesis quality, this temolate is formulated with reference to the national standard "Rules for Dissertation Writing" (GB/T 7713.1-2006) and the reality of CQUPT.

Keywords: Dissertation/Thesis, Writing Specification, Thesis Template, Chongqing University of Posts and Telecommunications

目 录

摘要	I
ABSTRACT	II
图目录	VI
表目录	VII
主要符号表	VIII
缩略词表	IX
第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 基于反向传播的显著图解释技术	2
1.2.2 基于类激活映射的显著图解释技术	3
1.2.3 基于扰动的显著图解释方法	3
1.3 论文研究的主要内容	4
1.4 论文组织结构	4
第2章 相关理论介绍	5
2.1 引言	5
2.2	5
2.3 字数要求	5
2.3.1 硕士论文要求	5
2.3.2 博士论文要求	5
2.4 字体和段落	5
2.5 章节标题	6
2.5.1 三级标题	6
2.6 本章小结	6
第3章 基于输入图片多尺寸放大的卷积神经网络显著图解释方法	7
3.1 本章引言	7
3.2 问题描述和研究思路	7
3.3 基于输入图片多尺寸放大的卷积神经网络显著图解释方法	8
3.3.1 生成高分辨率掩膜	8
3.3.2 掩膜优化	11
3.3.3 生成显著图	12

3.4 实验与分析	13
3.4.1 实验硬件配置和软件环境	13
3.4.2 数据集及其预处理和实验参数说明	13
3.4.3 定性评估	15
3.4.4 插入 (insertion) 和删除 (deletion) 实验	15
3.4.5 定点游戏实验	19
3.4.6 合理性检验	19
3.4.7 图	20
3.4.8 表	21
3.5 公式格式	22
3.6 印制要求	23
3.7 本章小结	24
第 4 章 一种通用的基于二维滑动窗口和放大的图像分类神经网络显著图解 释增强方法	25
4.1 本章引言	25
4.2 问题描述和研究思路	25
4.3 一种通用的基于二维滑动窗口和放大的图像分类神经网络显著图解 释增强方法	26
4.3.1 获取窗口图片集合	26
4.3.2 获取窗口图片的显著图和权重	27
4.3.3 融合窗口图片集合的显著图	28
4.3.4 平滑和归一化显著图	29
4.3.5 掩膜优化	29
4.3.6 生成显著图	30
4.4 实验与分析	31
4.4.1 实验硬件配置和软件环境	31
4.4.2 数据集及其预处理和实验参数说明	32
4.4.3 定性评估	33
4.4.4 插入 (insertion) 和删除 (deletion) 实验	33
4.4.5 定点游戏实验	35
4.4.6 合理性检验	37
4.4.7 图	38
4.4.8 表	39
4.5 公式格式	40

目 录

4.6 印制要求	41
4.7 本章小结	42
4.8 随便加一章	43
4.8.1 主要结论	43
4.8.2 研究展望	43
参考文献	44
附录 A 各学院中英文名称对照表	48
附录 B 常见一级学科中英文名称对照表	49
附录 C 常见专业学位类别中英文名称对照表	50
作者简介	51
1. 基本情况	51
2. 教育和工作经历	51
3. 攻读学位期间的研究成果	51
3.1 发表的学术论文和著作	51
3.2 申请（授权）专利	51
3.3 参与的科研项目及获奖	51
致 谢	53

图目录

图 2-1 不同章节图片排版测试	6
图 3-1 MSG-CAM 算法流程示意图	8
图 3-2 单张图片在不同方法下的插入删除实验曲线对比	16
图 3-3 单张图片在不同方法下的插入删除实验曲线对比	18
图 3-4 MSG-CAM 合理性检验	20
图 3-5 不同缩放系数 v 的缩放效果	21
图 3-6 理论效率与 γ 和 φ 的关系。	22
图 4-1 当前显著图解释方法分辨低的原因	26
图 4-2 单张图片在不同方法下的插入删除实验曲线对比	35
图 4-3 单张图片在不同方法下的插入删除实验曲线对比	36
图 4-4 MSG-CAM 合理性检验	38
图 4-5 不同缩放系数 v 的缩放效果	39
图 4-6 理论效率与 γ 和 φ 的关系。	40

表目录

表 3-1 实验环境和硬件配置	14
表 3-2 电流类型对效率的影响	17
表 3-3 电流类型对效率的影响	17
表 3-4 电流类型对效率的影响	21
表 3-5 高效率功放性能对比	23
表 4-1 实验环境和硬件配置	32
表 4-2 电流类型对效率的影响	34
表 4-3 电流类型对效率的影响	37
表 4-4 电流类型对效率的影响	39
表 4-5 高效率功放性能对比	41

主要符号表

符号	说明	页码
c	电磁波的相平面速度	10

缩略词表

英文缩写	英文全称	中文全称
CQUPT	Chongqing University of Posts Telecommunications	重庆邮电大学

缩略词表

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

当今的社会正处于智能化趋势的浪潮中，由深度学习理论所衍生的相关技术被广泛的应用在人们所熟知的各个领域。在学术界和工业界的互相融合促进下，深度学习算法不断推陈出新，深度神经网络也不断进化并发展出适用与文字、图像、视频等信息介质的自动化识别和信息提取的高效的深度神经网络模型，许多相关领域深度神经网络模型已经是现代社会正常运转的不可或缺的一部分。

但是，当前主流的深度神经网络并不具备良好的可解释性，即便这些深度神经网络在各种测试任务下展现出了很高的准确率。例如在图像分类应用中，将待分类的图片送入训练好的深度神经网络会得到不同类别物体的置信概率分数，即便某一类别的置信概率分数是 99.99%，我们也无法得到深度神经网络做出这一决策的依据，即该深度神经网络的输出结果并不具备可解释性。并且随着应用场景的复杂化多样化，深度神经网络结构日趋复杂，参数数量日趋庞大，这使得深度神经网络的“黑盒”特点变得更为突出。这种难以解释的黑盒特性使得深度神经网络在可靠性要求极高的领域，诸如医疗影像、自动驾驶、航空航天等领域的应用就受到限制。

除此之外，上述的黑盒特性也会成为当前的深度神经网络的研究过程当中的“拦路虎”。研究者往往是将训练好的深度神经网络在既有的数据集上根据各种外部的量化指标评价训练效果，但是在实际应用过程当中，模型可能会对现实世界中某些特殊的数据或者人为恶意伪造的数据给出异常的结果。如果训练的深度神经网络不能对这些意外数据有着良好的鲁棒性，那么该神经网络的就不能得到人们的信任。因此这使得相关研究者必须从更加全面的角度判断深度神经网络的性能表现并且解释其训练的神经网络的结果输出，而不只是依赖单一的评价指标来判断神经网络的性能表现。

因此，从深度神经网络实际应用和可靠性的角度出发，都需要有适用于深度神经网络黑盒特性的可解释方法，所以许多研究人员将目光转移到深度神经网络的可解释性上，他们或试图从既有的深度神经网络内外寻找其的决策依据，或试图从原理上构建可解释的深度神经网络，这两类研究路径分别就是后解释的人工智能和自解释的人工智能。

通过利用针对深度神经网络的可解释方法，不仅可以使得研究者和用户知道深度神经网络的决策依据，理解其中的决策机理，增强人对神经网络输出结果的信任程度，还可以使得研究者对神经网络的可靠性进行针对性的验证和测试。加

加强对深度神经网络可解释方法的研究有助于研究人员用更加全面且灵活双向的方式和神经网络进行交互，能做到“知其然并知其所以然”。可解释性的研究赋予了深度神经网络更多的可能性并加强了其可靠性。

本文主要聚焦于图像分类神经网络的可解释性研究，更加具体的是利用图像即显著图的方式来提供图像分类神经网络的可解释性，根据显著图中给出权值数据来解释图像分类神经网络的输出结果并判断其内部决策过程是否合理可靠。同时本文的研究侧重点在于不改变神经网络内部参数，仅利用既有训练好的深度神经网络模型来进行可解释性研究。既有的图像分类神经网络模型在工业界和学术界已经得到了大量的应用，并且拥有很好的性能表现，因此在不改变模型的前提下，本文的研究可以提供简单明了能直接使用的可解释方法，对已经训练完成模型的输出结果进行显著图分析解释，将单一的，不可解释的输出结果转变为直观明了的，可解释的图像结果，提高了模型的可靠性和可信性。此外，显著图给出的分析结果可以帮助研究者有效分析模型是否学习到正确的特征，提供神经网络决策的关键依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 基于反向传播的显著图解释技术

利用反向传播的机制来实现可视化解释是较早的一些工作所采用的方法。Zeiler 等人^[1]提出了一种基于反卷积的可视化方法，反卷积将特征值逆映射回了输入图片的像素空间，借此说明图片中的哪些像素参与激活了该特征值。在这项工作的基础上，导向反向传播方法^[2]提出在反向传播时通过抑制输入和梯度小于 0 的值，从而突出可视化目标的重要特征。DeepLIFT^[3]，LRP(Layer-wise Relevance Propagation)^[4]方法通过修改反向传播的规则，将输出层的贡献逐渐向下分配直到输入层，以此来获得输入图片中每个像素对输出相关性分数。Simonyan 等人^[5]提出使用输入的梯度作为可视化解释的一种手段，这种方法认为输入的某些像素对网络的预测结果起到了主要作用，它直接计算网络输出的特定类别分数对输入的梯度，但是输入的梯度中包含明显的噪声，导致显著图可视化十分模糊。SmoothGrad 方法^[6]和 VarGrad 方法^[7]的原理都是共同的，它们向输入图片中多次添加噪声生成一组包含噪声的图片，通过平均化结果使得生成的显著性图更加平滑。为了解决梯度饱和问题，Sundararajan 等人提出了一种积分梯度方法^[8]，该方法结合了直接计算梯度和基于反向传播的归因技术 DeepLIFT 和 LRP 的分而治之的设计思想，满足敏感性和实现不变性的公理。这些研究虽然有坚实的理论基础，但是它们的可视化结果对于人类来说不容易理解，而且噪声较多。此外这些方法中许多是和具

体类别不相干的，无法对指定类别给出显著图可视化解释结果。另外有研究^[9]指出其中有些方法的可靠性是值得怀疑的，它们对深度神经网络的参数不敏感，即使网络没有经过训练也能得到相似的结果。

1.2.2 基于类激活映射的显著图解释技术

基于类激活映射的方法是目前被大量研究和应用的一种流行的方法。这类方法利用了卷积神经网络中靠近输出端的信息，这些信息中包含着和预测结果相关的丰富的类别信息，所以这类方法能够给出类别相关的显著图可视化解释。CAM^[10]方法首先提出了将卷积神经网络的最后一层全局平均池化后得到权重和该层提取的特征图线性相乘后累加从而生成显著图。Grad-CAM^[11]对CAM方法进行了改进，无需修改网络结构，利用反向传播的梯度取均值作为权重。Grad-CAM++^[12]进一步改进了Grad-CAM，它对不同像素的梯度进行加权，生成的显著图中能将同一类别物体出现多次的情况给较好的展示出来；XGrad-CAM^[13]通过分析敏感性和实现不变性公理采用了另一种加权方法来获得特征图的权重，它引入了特征图中的像素权重为对应梯度进一步加权。为了减少噪声的影响，Smooth Grad-CAM++^[14]，SS-CAM^[15]也采用了SmoothGrad^{[6]2}和VarGrad^[?2]中的向输入图片中多次添加噪声的措施。Score-CAM^[?]和Ablation-CAM^[16]没有使用反向传播中的梯度作为特征图的权重，它们将前向传播中从最后一层卷积层获得的特征图作为掩膜来扰动输入图片，利用网络输出值或者下降值作为特征图的权重，这种方法有效避免了使用梯度而产生的噪声，取得了良好的效果。Relevance-CAM^[17]将卷积神经网络中提取的特征图再分别输入到卷积神经网络中，对每张特征图的预测结果进行层间相关性传播（Layer-wise Relevance Propagation），得到对应的相关性图，将相关性图全局平均池化后作为特征的权重，该方法有效解决了之前的CAM方法对卷积神经网络中间层可视化解释不足的问题。CAMERAS^[18]提出了将输入图片进行多尺度放大再输入到网络当中，将提取到的不同分辨率的特征图和梯度全部放大到和原图分辨率一样。然而，基于类激活映射的方法只针对卷积神经网络进行设计，无法便捷的迁移到其他网络当中，比如基于Transformer的图片分类神经网络模型。

1.2.3 基于扰动的显著图解释方法

基于扰动的显著图可视化方法最突出的优点便是这种方法基本只关心网络的输入和输出，可以在不同结构网络轻松的应用，即使这些网络中的细节千差万别。Zeiler等人^{[1]2}使用一个固定形状的方块来对输入图片进行扰动，观察输出变化从而找到对模型而已输入图片中最重要的部分。SHAP方法^[19]使用了Shapley值，计算不同输入像素在是否存在的情况下对网络预测结果的影响，公平分配贡献度给

这些像素点。LIME^[20]方法通过在较小的范围内扰动输入图片，得到输出结果，利用输入数据和输出数据重新训练一个可解释的代理模型去逼近黑盒模型在局部的决策边界，从而获得不同特征的重要性。RISE^[21]利用蒙特卡洛方法随机生成的数量巨大的掩膜来扰动输入图片，将模型对特定类别输出概率作为的权重，再将多个所有掩膜加权相乘得到可视化结果。有研究提出了基于机器学习的方法，将掩膜作为优化对象，通过定义限制掩膜的损失函数，不断迭代从而找到最优的掩膜。在此基础上，Fong 等人^[22]提出通过限制搜索区域，重新设计损失函数，达到了很好的效果。基于扰动的可视化算法因为能够对模型预测结果进行直接观察，所以可以较为真实的反映模型决策机制。但是，这种类型算法往往需要多次迭代，需要付出高额的计算成本

1.3 论文研究的主要内容

学位论文……

1.4 论文组织结构

本文……

第 2 章 相关理论介绍

2.1 引言

2.2

学位论文包括前置部分、主体部分和结尾部分共三大部分，各部分组成及顺序如所示。

学位论文各部分独立为一部分，每部分应从新的一页开始。

论文的正文（中间各章）是论文的核心部分，一般由标题、文字叙述、图、表格和公式等部分构成。由于涉及的学科、选题、研究方法等有很大的差异，可以有不同的写作表达方式，但应遵循本学科通行的学术规范，必须实事求是，客观真切，准确完备，合乎逻辑，层次分明，简练可读。引用他人研究成果时，应注明出处，不得将其与本人的工作混淆。

2.3 字数要求

字数要求

2.3.1 硕士论文要求

各学科和学部自定。

2.3.2 博士论文要求

各学科和学部自定。

2.4 字体和段落

学位论文中的中文统一用宋体，数字和英文统一用 Times New Roman 字体。从中文摘要开始，所有文字段落和标题行间距均取固定值 20 磅；所有段落按两端对齐、首行缩进 2 个全角字符方式书写内容。

中、英文混排时，除小数点以及引用的分图序号、公式序号等外，宜使用全角标点符号（逗号、冒号、括号、引号等）；英文段落中，符号使用应遵循英文书写习惯，统一使用半角符号，并规范使用空格。

其他要求：

- (1) 各级标题不得置于页面的最后一行，即须与下段同页；
- (2) 两个标题之间无正文时，第二个标题的段前距设置为 0 磅；

- (3) 图、表、公式统一采用单倍行距；
- (4) 只有一、两行文字的，不得单独作为一页内容；除各章最后一页外，中间页面不得出现较大空白；
- (5) 必要时，可在规定的格式要求基础上适当微调，以利于排版，但显示效果不得与规定的格式要求存在明显差距。

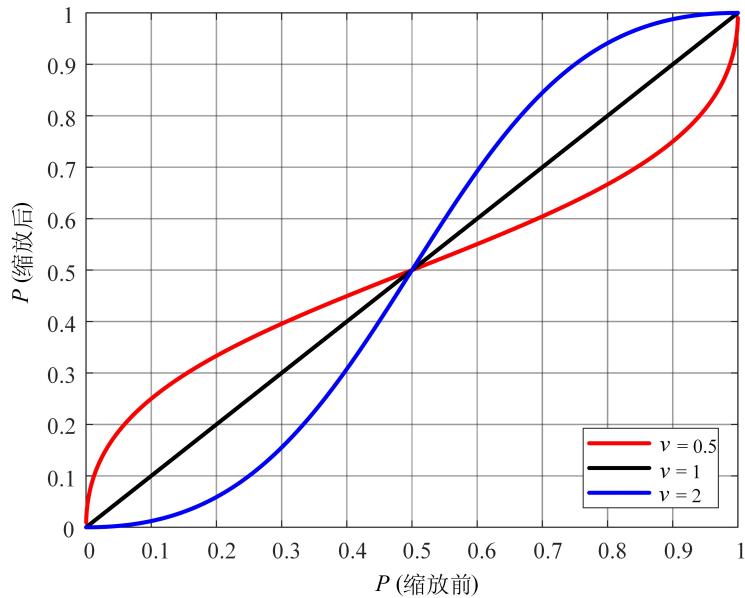


图 2-1 图片排版测试

Fig. 2-1 Scaling results with different scaling coefficients v

2.5 章节标题

目录中章节标题只显示到 3 级标题，正文中最多显示到 4 级标题。

2.5.1 三级标题

2.5.1.1 四级标题

2.6 本章小结

本章介绍了……

第3章 基于输入图片多尺寸放大的卷积神经网络显著图解释方法

3.1 本章引言

3.2 问题描述和研究思路

当前大多数基于类激活映射的显著图解释方法诸如 CAM、Grad-CAM、Grad-CAM++、XGrad-CAM、Score-CAM 等都存在一个共有问题，即最终生成的显著图的分辨率较低，这导致其只能在显著图中呈现一个模糊的解释效果，无法聚焦更加精细的特征。究其原因是这些基于类激活映射的方法一般提取的都是卷积神经网络的最后一层卷积层的输出作为特征图的来源，因该层包含较为丰富的类别特征信息，之后通过各种加权方法组合这些特征图来得到最终的显著图。因为卷积神经网络的结构特性，其最后一层卷积层的会输出多个通道的低分辨率特征图，因此无论如何组合这些特征图，最终得到的也只是一张分辨率和最后一层的卷积层输出的单一通道的特征图相当的初级显著图。当然一般情况下为了得到显著图和原始输入图片的特征对应关系，都会将这张原始输入图片进行分辨率层面的放大，使用的一般也是双线性插值算法，但这并不意味着原始显著图的有效信息的增多。

这里以 VGG19 这个基于卷积神经网络的图片分类模型举例，若输入图片的尺寸是 $3 \times 224 \times 224$ ，其中 3 表示 RGB 颜色通道， 224×224 表示图片分辨率，那么该模型最后一层卷积层的输出的特征图尺寸是 $512 \times 14 \times 14$ ，其中数字 512 是通道数量， 14×14 是特征图的分辨率。若我们使用双线性插值函数 $\phi(s, H, W)$ 将原始显著图分辨率提升到 224×224 ，那么意味着我们插入了额外 99.9% 的信息，而最终的显著图中的这些额外的像素信息并不能反映图片分类模型对原始输入图片的对应像素的兴趣程度。即便有部分文献^{[9][11]} 试图改进这种插值函数，但是它们仍然引入了外部不相关的信息。

因此为了解决上述的问题，本文从特征图的提取这一关键点着手。考虑到若使用原始输入图片，那么卷积神经网络最后一层卷积层输出的单一特征图分辨率较低且包含的特征信息有限，因此本文提出基于输入图片多尺寸放大的卷积神经网络显著图解释方法，其核心就是将输入图片进行逐级多尺寸的双线性插值放大，例如将输入图片放大至 334×334 、 434×434 、 534×534 等分辨率，这时能得到一组分辨率不同的输入图片，接着将这组输入图片分别送入基于卷积神经网络的图像分类模型中，再从其最后一层卷积层中分别提取特征图和梯度矩阵数据，基于卷积神经网络的采样特性，可以得到不同分辨率的特征图，更高分辨率的输入图片

即对应更高分辨率的特征图，也即拥有更丰富的特征信息。因此若将这些特征图的信息进行融合即能得到分辨率更高的掩膜，再用这些更高分辨率的掩膜对原始输入图片进行扰动，即可得到相应的掩膜权重，用权重和高分辨率掩膜进行融合即能得到包含更多特征信息并且分辨率更高的显著图。

3.3 基于输入图片多尺寸放大的卷积神经网络显著图解释方法

本章提出基于基于输入图片多尺寸放大的卷积神经网络显著图解释方法来解决目前可视化算法结果分辨率低、无法给出更详细目标特征的问题。为了方便本章后文的描述，本文对该方法的简称是 MSG-CAM (Multi-Scale inputs of Group-CAM)。MSG-CAM 的算法流程描述参见算法1，算法流程图参见图3-1。

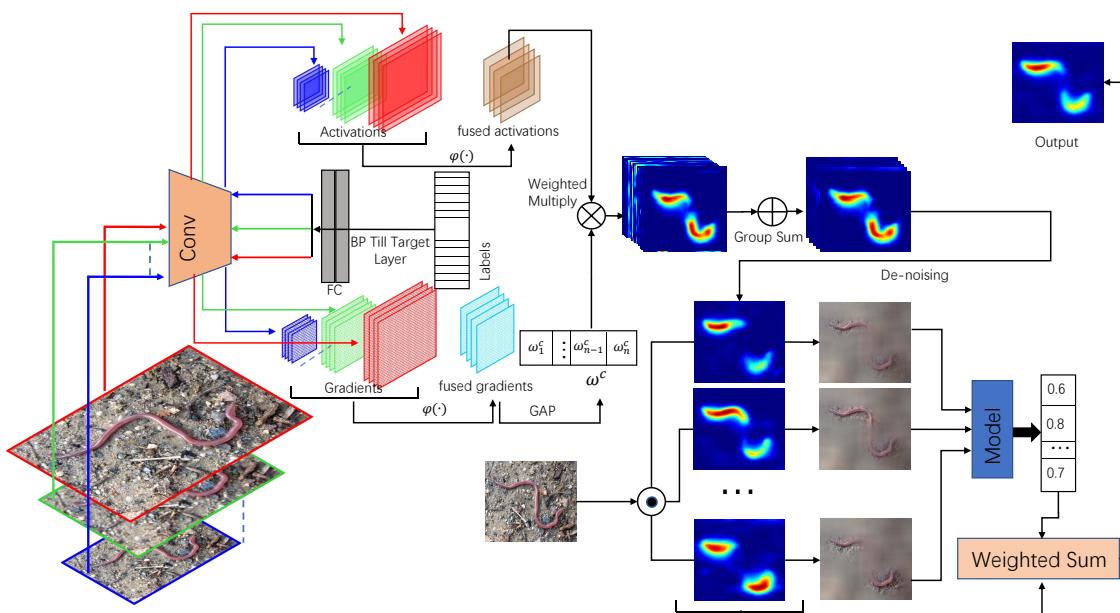


图 3-1 MSG-CAM 算法流程示意图

Fig. 3-1 Pipeline of MSG-CAM

3.3.1 生成高分辨率掩膜

令原始输入图片为 $I_0 \in \mathbb{R}^{3 \times H_0 \times W_0}$ ，其中 3 表示 RGB 颜色通道数量， H_0 和 W_0 分别原始输入图片的长和宽的像素个数，即原始输入图片的分辨率可以表示为 $\zeta_0 = (H_0, W_0)$ 。此外，我们用 \mathcal{F} 表示一个预训练好的基于卷积神经网络的图像分类模型，那么 $\mathcal{F}_c(I_0)$ 则表示在输入图片为 I_0 的情况下，图像分类模型 \mathcal{F} 对于类别 c 的输出分数，值得注意的是，该分数是未经归一化指数函数 (softmax 函数) 之前的分数。将原始输入图片送入图像分类模型 \mathcal{F} ，并从其最后一层卷积层 l 中提取

Algorithm 1 MSG-CAM

输入: 基于卷积神经网络的图像分类模型 \mathcal{F} , 原始输入图片 $I_0 \in \mathbb{R}^{3 \times H_0 \times W_0}$, 上采样分辨率上限 $\zeta_{max} = (H_{max}, W_{max})$, 卷积层 l , 最大迭代次数 N , 类别 c , 每个分组中掩膜数量 B , 高斯模糊参数: $kernel_size, sigma, interpolation\ function\ \varphi(.)$

输出: 显著图 $L_{MSG-CAM} \in \mathbb{R}^{3 \times H_0 \times W_0}$

- 1: 初始化 $L_{MSG-CAM} \leftarrow 0, \mathcal{A}_0 \leftarrow 0, \mathcal{G}_0 \leftarrow 0, r \leftarrow 0, t_{max} \leftarrow 0, t_m \leftarrow 0, kernel_size = 51, sigma = 50$, 基准图片 $I'_0 = gaussian_blur2d(I_0, kernel_size, sigma)$, $c = \mathcal{F}(I_0)$
- 2: **while** $t \leq N$ **do**
- 3: $t \leftarrow t + 1$
- 4: $\zeta_t \leftarrow \zeta_0 + \lfloor \frac{\zeta_{max}}{N} \rfloor (t - 1)$
- 5: $I_t \leftarrow \varphi(I_0, \zeta_t)$
- 6: **if** $\mathcal{F}(I_t) \rightarrow c$ **then**
- 7: $t_{max} \leftarrow t_{max} + 1$
- 8: $\mathbf{A}_t \leftarrow \mathcal{A}(I_t, l)$
- 9: $\mathbf{G}_t \leftarrow \nabla \mathcal{J}(l, c)$
- 10: $\mathcal{A}_t \leftarrow \mathcal{A}_{t-1} + \varphi(\mathbf{A}_t, \zeta_0)$
- 11: $\mathcal{G}_t \leftarrow \mathcal{G}_{t-1} + \varphi(\mathbf{G}_t, \zeta_0)$
- 12: **end if**
- 13: **end while**
- 14: $\bar{\mathbf{A}} \leftarrow \mathcal{A}_t / t_{max}$
- 15: $\bar{\mathbf{G}} \leftarrow \mathcal{G}_t / t_{max}$
- 16: $\bar{\mathbf{W}} \leftarrow \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{\mathbf{G}}$
- 17: $\mathbf{M} = \bar{\mathbf{A}} \cdot \bar{\mathbf{W}}$
- 18: $K \leftarrow \mathbf{M}$ 的通道数量;
- 19: $g \leftarrow$ 每个分组中掩膜数量;
- 20: **while** $r < B$ **do**
- 21: 在组内生成单一的掩膜
 $M_r = ReLU(\sum_{k=r \times g}^{(r+1) \times g - 1} M^k)$
- 22: 初始化 $M'_r \leftarrow$ 将 M^r 进行去噪操作和归一化
- 23: 用掩膜扰动原始输入图片
 $I_r = I_0 \odot M'_r + I'_0 \odot (1 - M'_r)$
- 24: 计算每张掩膜的权重
 $\alpha_r = \mathcal{F}_c(I_r) - \mathcal{F}_c(I'_0)$
- 25: $L_{MSG-CAM} \leftarrow L_{MSG-CAM} + \alpha_r M_r$
- 26: $r \leftarrow r + 1$
- 27: **end while**
- 28: **return** $ReLU(L_{MSG-CAM}^c)$

所有通道的特征图集合，该特征图集合表示为 \mathbf{A}_0^* 。通过获得的类别 c 的输出分数 $\mathcal{F}_c(I_0)$ ，对该分数反向传播至最后一层卷积层特征图，则可以获得对应特征图关于类别 c 的梯度矩阵 \mathbf{G}_0^* ，计算公式如下：

$$\mathbf{G}_0^* = \frac{\partial \mathcal{F}_c(I_0)}{\partial \mathbf{A}_0^*} \quad (3-1)$$

3-1公式中，梯度矩阵集合 \mathbf{G}_0^* 一共有 K 个通道，通道数量和特征图集合 \mathbf{A}_0^* 一致，并且每个通道的梯度矩阵和特征图一一对应。

接着将原始输入图片 I_0 经由双线性插值函数 $\varphi(I_0, \zeta_t)$ 上采样至图片 I_t ， t 表示第 t 次上采样结果，经由上采样后的 I_t 的分辨率可表示为 ζ_t ， ζ_t 是由于原始输入图片的分辨率 ζ_0 逐步递增得来的。为了控制计算的时间成本，考虑将 $\zeta_{max} = (H_{max}, W_{max})$ 作为上采样分辨率的上限，同时设 N 为最大迭代次数即上采样次数，那么第 t 次上采样得到的图片分辨率可由以下公式计算得出：

$$\zeta_t = \zeta_0 + \lfloor \frac{\zeta_{max}}{N} \rfloor (t - 1) \quad (3-2)$$

在上述迭代过程当中，每次上采样获得的输入图片 I_t 的分辨率都不同，则将其输入到图像分类模型当中 \mathcal{F} 从最后一层卷积层提取的特征图集合 \mathbf{A}_t^* 的分辨率也不同，而且随着输入图片分辨率的提高， \mathbf{A}_t^* 的分辨率也会相应提高，相对应的 \mathbf{A}_t^* 也能包含更多和类别 c 相关的细节特征信息。因此若将这些不同的分辨率的特征图集合进行融合则能够得到更多的特征信息。融合的方法可由以下的公式进行表示：

$$\bar{\mathbf{A}} = \frac{1}{t_{max}} \sum_{t=0}^{t_{max}} \varphi(\mathbf{A}_t^*, \zeta_0) \quad (3-3)$$

公式3-3中， t_{max} 表示最大的有效迭代次数，此处的“有效”指的是只有当图像分类模型的输出结果中概率分数最大的类别是 c 时才采用这次迭代的特征图集合 \mathbf{A}_t^* ，其他情况下均舍弃，因此不难得出 $t_{max} \leq N$ 。同时 $\varphi(\mathbf{A}_t^*, \zeta_0)$ 表示将特征图集合 \mathbf{A}_t^* 中的每一个通道上的特征图均上采样至原始输入图片的分辨率 ζ_0 ，这样做的目的是方便将不同分辨率的特征图集合进行融合，也方便后续对原始输入图片进行扰动。

在每次迭代过程中，都会计算并提取保存图像分类模型关于类别 c 的输出分数 $\mathcal{F}_c(I_t)$ 对于卷积层 l 的特征图集合 \mathbf{A}_t^* 的反向传播梯度 \mathbf{G}_t^* ，和特征图集合一样，将不同迭代过程中保存的梯度矩阵集合 \mathbf{G}_t^* 也进行融合，可以得到 $\bar{\mathbf{A}}$ 分辨率尺寸一

致梯度矩阵集合，融合的公式如下所示：

$$\bar{\mathbf{G}} = \frac{1}{t_{max}} \sum_{t=0}^{t_{max}} \varphi(\mathbf{G}_t^*, \zeta_0) \quad (3-4)$$

同样，公式3-4中，同时 $\varphi(\mathbf{G}_t^*, \zeta_0)$ 表示将梯度矩阵集合 \mathbf{G}_t 中的每一个通道上的梯度矩阵均上采样至原始输入图片的分辨率 ζ_0 。由于融合后的特征图集合中不仅包含类别 c 特征信息，也包含其他类别的特征信息，因此为了将类别 c 的特征信息进行凸显，其他类别的特征信息进行削弱，我们将利用融合后的梯度矩阵 $\bar{\mathbf{G}}$ ，它在一定程度上反映了特征图上不同像素对类别分数 $\mathcal{F}_c(I_0)$ 的敏感程度，或者说是重要程度^{[11]3}。仿照 Grad-CAM^{[11]4} 中的方法，我们将 $\bar{\mathbf{G}}$ 中每张梯度矩阵进行全局平均池化，在每个通道上得到一个权重值，每个通道下的权重值都和 $\bar{\mathbf{A}}$ 中的每个通道下的特征图一一对应，所有通道下权重值的集合的计算公式如下：

$$\bar{\mathbf{W}} = \frac{1}{H_0 \times W_0} \sum_{i=1}^{H_0} \sum_{j=1}^{W_0} \bar{\mathbf{G}} \quad (3-5)$$

额外说明的是，融合后的特征图集合 $\bar{\mathbf{A}}$ 的尺寸是 $[1 \times K \times H_0 \times W_0]$ ，它对应的权重集合 $\bar{\mathbf{W}}$ 的尺寸是 $[1 \times K \times 1 \times 1]$ ，其中 K 就是第 l 层卷积层输出的特征图通道数量。

本小节的最后，初始掩膜集合 \mathbf{M} 可以通过以下公式计算得出：

$$\mathbf{M} = \bar{\mathbf{A}} \cdot \bar{\mathbf{W}} \quad (3-6)$$

其中，运算符 \cdot 表示 $\bar{\mathbf{A}}$ 中的每个通道下的特征图中的每个像素值都和 $\bar{\mathbf{W}}$ 中对应每个权值相乘。

3.3.2 掩膜优化

\mathbf{M} 是经由输入图片多尺寸上采样放大后从卷积层中提取的特征图和梯度矩阵结合而得到的，相比单一原始输入图片得到掩膜（比如 Score-CAM^{[23]2}）， \mathbf{M} 包含更丰富的类别特征信息，但是目前得到 \mathbf{M} 仍然不能直接当作掩膜来扰动输入图片，它还有两个明显的缺点。第一点是 \mathbf{M} 的尺寸是 $[1 \times K \times H_0 \times W_0]$ ，其中 K 是卷积层 l 输出的特征图的通道数量，一般我们取最后一层卷积层作为 l ，因此 K 的值将会是数百至上千，显然这样掩膜的数量太多了，若像 Score-CAM^{[23]3} 一样逐个将掩膜去扰动原始输入图片得到权值，那样将会极为耗时。第二个缺点 \mathbf{M} 就是使用全局平均池化后的梯度作为特征图的权重，由于 ReLU 函数的零梯度问题^[24]，这意味着 \mathbf{M} 显然会有噪声。因此，为了使 \mathbf{M} 成为合格的掩膜，需要让它变得更加纯

净。

对于第一个缺陷，本节的解决办法是将 \mathbf{M} 中的 K 张掩膜平分为 B 个组，分类依据是它们的相邻关系，接着将每个组内的所有掩膜相加合并为一个掩膜，这个相加合并过程可由以下的公式计算得出：

$$M_r = \text{ReLU}\left(\sum_{k=r \times g}^{(r+1) \times g - 1} M^k\right) \quad (3-7)$$

公式4-12中 g 是每个组中的特征图的数量且 $g = K/B$, r 的取值范围是 $\{0, 1, 2, \dots, B-1\}$ ，即合并完成后一共有 B 张掩膜， M_r 是第 r 组中合并完成后的掩膜， M^k 是 \mathbf{M} 中第 k 个通道的特征图。

对于第二个缺陷，我们设计了一个去噪函数 $f(m_{ij}, \theta)$ ，该函数中 m_{ij} 是掩膜 M_r 中第 i 行第 j 列的像素值， θ 是一个百分比值。具体的去噪计算结果由以下公式计算得出：

$$f(m_{ij}, \theta) = \begin{cases} m_{ij}, & \text{if } m_{ij} > p(M_r, \theta); \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3-8)$$

公式4-13中 $p(M_r, \theta)$ 表示 M_r 的所有像素值从大到小处于 θ 百分比的值，比如有 100 个像素值，每个像素值都是 1 到 100 中的一个整数取值且取值唯一，此时 $\theta = 70$ ，那么 $p(M_r, \theta) = 70$ 。4-13公式的作用就是将掩膜 M_r 中百分比前 θ 大的像素值保留，小于 $p(M_r, \theta)$ 的像素值置为 0。经过去噪操作后可以得到更加纯净的掩膜。

到目前为止，还剩下最后一个操作即可得到最终的掩膜。将 M_r 中的所有像素值进行最大最小归一化，使其像素值区间位于 $[0, 1]$ ，这样方便将掩膜直接和输入图片相乘进行扰动操作。具体计算公式如下：

$$M'_r = \frac{M_r - \min(M_r)}{\max(M_r) - \min(M_r)} \quad (3-9)$$

最后，掩膜 M'_r 有和原始输入图片 I_0 一致的分辨率且掩膜的像素值和 I_0 中的像素值一一对应。

3.3.3 生成显著图

如果显著性方法确实识别出了对模型预测有重要意义的像素，那么这一点就应该反映在重建图像的模型输出当中^[25]。将 M'_r 作为掩膜来扰动原始输入图片 I_0 ，其背后的原理是从原始输入图像中保留掩膜中获得的关于类别 c 的特征信息，让图像分类模型来判断保留的这部分信息的重要性，判断依据就是图像分类模型对扰动后的图片关于类别 c 的输出概率分数。但是，如果直接将掩膜和原始输入图像

相乘进行扰动，那么扰动后的图像中的被掩盖区域和被凸显的区域之间的边界会过于明显锐利，从而对图像分类神经网络造成对抗效果^[26]。

为了遇到避免上述的问题，高斯模糊函数被引入到了接下来的改进方法中。具体方法是将扰动区域即被掩膜遮盖的区域用高斯模糊后的原始输入图片的对应区域进行替代，这样可以使得凸显的图片区域和被扰动的图片区域之间的边界更加平滑，从而像真实图片，不易让图像分类神经网络产生异常的输出。对于单一掩膜 M'_r ，这个扰动模式可以由以下的公式计算得出：

$$I_r = I_0 \odot M'_r + I'_0 \odot (1 - M'_r) \quad (3-10)$$

公式4-15中， I'_0 是将原始输入图片 I_0 高斯模糊后的得到的， I'_0 作为一张基础图片送入图像分类模型 \mathcal{F} 当中，当然得到其关于类别 c 的输出结果 $\mathcal{F}_c(I'_0)$ 是一个非常低的值且趋近于 0。具体的高斯模糊函数是 `guassian_blur2d(input, kernel_size, sigma)`，在本章中，参照 Group-CAM^[24] 的工作，设置高斯模糊的参数 $kernel_size = 51$ 和 $sigma = 50$ 。 $1 - M'_r$ 表示 M'_r 中每个像素值都作为减数被 1 相减，作用是将掩膜中关于类别 c 的特征信息进行凸显。

参考 RISE^[21] 中的方法，每张掩膜 M_r 的权重 α_r 可以由扰动后的 I_r 输入到图像分类模型 \mathcal{F} 中得到。 $\mathcal{F}_c(I_r)$ 则是该权重，其表示模型对显著图区域中类别 c 的特征信息的感兴趣程度。具体计算公式由以下式子给出：

$$\alpha_r = \mathcal{F}_c(I_r) - \mathcal{F}_c(I'_0) \quad (3-11)$$

最终的显著图即将所有 M_r 的权重 α_r 和其本身相乘，并经过 ReLU 函数后得到，ReLU 函数的作用是保留显著图中的正值，即模型关于类别 c 感兴趣的像素区域。具体式子如下表示：

$$L_{MSG-CAM} = \text{ReLU} \left(\sum_r \alpha_r M_r \right) \quad (3-12)$$

3.4 实验与分析

3.4.1 实验硬件配置和软件环境

下面给出本章实验的硬件配置和实验环境相关信息，具体信息见表4-1。

3.4.2 数据集及其预处理和实验参数说明

在本章的实验当中，主要使用了三个数据集，下面是三个数据集的简要介绍：

1. ILSVRC 2012 数据集 ILSVRC 2012 (ImageNet Large Scale Visual Recognition Chal-

表 3-1 实验环境和硬件配置

Table 3-1 Experimental environment and hardware configuration

CPU	GPU	操作系统	Python 版本	PyTorch 版本
Intel® Xeon® W-2255 CPU @3.70GHz	NVIDIA RTX A5000	Ubuntu20.04	Python3.8	1.10.1+cu113

lence 2012) 是一个用于视觉对象识别和定位的大规模数据集和竞赛。该数据集包含超过 120 万张标注图片，涵盖 1000 个不同类别的物体和场景。ILSVRC 2012 竞赛旨在推动计算机视觉领域的发展，参与者需要开发能够识别图像中物体类别的算法，并对物体进行定位。该竞赛对于深度学习和卷积神经网络等技术的发展起到了重要推动作用，成为了评估图像识别算法性能的重要基准。ILSVRC 2012 数据集的发布和竞赛对于推动计算机视觉领域的发展产生了深远影响。

2. PASCAL VOC 数据集 PASCAL VOC (Visual Object Classes) 数据集是一个常用的计算机视觉数据集，用于目标检测、图像分割和场景分类等任务。该数据集最初由牛津大学的计算机视觉研究组创建，包含了 20 个常见的物体类别，如人、狗、猫、飞机等。数据集中的图像来自于自然场景和网络图像，每个图像都标注了包含的物体类别和位置信息。PASCAL VOC 数据集被广泛应用于评估目标检测和图像分割算法的性能，是计算机视觉领域中的重要基准数据集之一。同时，PASCAL VOC 数据集也被用于举办国际性的计算机视觉竞赛，吸引了全球的研究者和工程师参与。通过使用 PASCAL VOC 数据集，研究人员可以开发和评估各种视觉任务的算法，推动计算机视觉技术的发展。

3. COCO2014 数据集 COCO2014 数据集 (Common Objects in Context) 是一个用于计算机视觉任务的大型数据集，包含超过 200,000 张图像和相关的注释信息。这些图像涵盖了 80 个不同类别的物体，并且每张图像都有多个物体的标注，这使得数据集在目标检测、图像分割和物体识别等任务中非常有用。COCO2014 数据集的引入为计算机视觉领域的研究和发展提供了重要的资源，成为了许多视觉任务的标准基准。研究人员和开发者可以利用该数据集进行模型训练、算法评估和性能比较，从而推动计算机视觉技术的进步。COCO2014 数据集的广泛应用促进了目标检测、图像分割和物体识别等领域的发展，为相关领域的研究和应用提供了有力支持。

在本章当中插入与删除实验中使用的是 ILSVRC 2012 验证集，包含 50000 张图片，并且将该验证集中的图片尺寸调整为 $(3 \times 224 \times 224)$ ，其中 3 是表示 RGB 颜色通道数量，像素值进行归一化调整，调整后的像素值范围是 $[0, 1]$ ，最后使用

Imagenet 数据集的均值 $[0.229, 0.224, 0.225]$ 和方差 $[0.485, 0.456, 0.406]$ 对所有图片像素值进行标准化处理。在定点游戏实验中，使用了两个数据集，分别是 PASCAL VOC 数据集中的测试集，包含 4952 张图片，和 COCO 2014 数据集的验证集，包含 50000 张图片。用于本章实验的图像分类神经网络模型是 torchvision 提供的预训练模型 VGG19^[27]，它是基于卷积神经网络架构的。如果没有特别说明，本章提出的方法 MSG-CAM 的默认设置参数是 $B = 32$, $\theta = 70$ 。所有方法生成的最终显著图默认都上采样至 224×224 的分辨率。

3.4.3 定性评估

3.4.4 插入 (insertion) 和删除 (deletion) 实验

插入 (insertion) 和删除 (deletion) 实验首次在 RISE^[21] 实验中提出。插入实验背后所反映的原理是当我们按照显著图给出的像素重要程度优先级开始在原图的对应位置逐渐插入重要的像素直至完全插入所有像素，在此过程中记录每次插入操作时模型对指定类别给出的可能性概率分数。插入实验可以衡量显著图对像素重要性的排序是否与模型实际决策时关注的像素重要性排序一致。与之相反的是，删除实验则是按照显著图中给出的像素重要程度优先级逐渐从原输入图片中抹去对应的像素信息。和插入实验一样，删除实验也要求记录每次删除操作后模型对感兴趣类别给出的可能性分数。删除实验可以直观的呈现出缺失重要特征的像素信息后模型对感兴趣类别的置信程度下降情况。

具体而言，对于插入实验，我们将原输入图片高斯模糊化后作为画布，随后每次迭代过程中，我们按照显著图给出的像素优先级逐渐向画布中对应的位置中引入原输入图片的像素，每次迭代过程中记录模型对引入像素后的的图片关于指定类别的可能性概率分数。为了更加精确的反映显著图的像素优先级，我们每次迭代只引入约 $0.89\%(224 \times 2)$ 的像素。和插入实验相对比，删除实验每次迭代将原输入图片中的像素逐渐替代为画布上的像素，直到输入图片被完全替换为画布为止。删除实验每次迭代仍然是变更约 0.89% 的在原图中的像素。需

要特别说明的是，我们引入高斯模糊后的原输入图片作为画布是为了避免引入像素或者删除像素时产生过于锐利的边界，从而更加接近真实图片，避免产生对抗攻击的样本。此外，每次迭代记录的可能性分数都是经过 softmax 函数进行归一化后的数据。得到插入实验和删除实验每次迭代获得的分数后，我们使用概率分数随插入或者删除次数的曲线的曲线下面积 (Area Under Curve) 作为的作为量化指标。为了总体衡量插入实验和删除实验的优劣，我们使用总体 (over-all) 分数。按照上面关于插入实验和删除实验的描述，AUC(insertion) 越高表明显著图越

准确, 同理, AUC(deletion) 越低越好。因此, overall 分数计算方式是 AUC(insertion)-AUC(deletion)。图4-2展示了 Grad-CAM、Score-CAM、Group-CAM 和 MSG-CAM 为所选的 4 幅代表性图像生成了显著图以及相应的插入和删除曲线。对于删除曲线, 更好的显著图解释方法给出的显著性图应尽可能快地下降, 插入曲线与删除曲线正好相反。从图中可以看出本文提出的 MSG-CAM 在视觉解释效果以及插入删除曲线的表现来看均优于其他三种基于类激活映射的方法。

表??列出了在 50000 张图像上进行插入和删除的实验结果。虽然 MSG-CAM 在单项指标上并不突出, 但在 AUC(overall) 这项指标上却是第一名, 比第二名的 Score-CAM 高出 1.07%。此外, 为了探究图像分类神经网络对目标类别的置信程度与三个指标之间的关系。我们根据每幅图像的分类类别的最大得分将其分为 11 组, 并统计每组的 AUC(insertion), AUC(insertion) 和 AUC(overall), 统计数据绘制成了表4-3。从图中可以看出, 当图像的分类类别的概率分数较低时, 各种显著图解释方法之间很难拉开差距。随着图像的分类类别的概率分数的上升, MSG-CAM 逐渐显示出优势。在图像的分类类别的概率分数 ≥ 99.99 时, 即当图像分类神经模型对这组图像中的分类类别有很高的置信度时, MSG-CAM 在 AUC(overall) 有着明显领先。这表明, 当图像分类神经网络接近完美的学习到相关类别信息时, MSG-CAM 能准确反映这种情况。

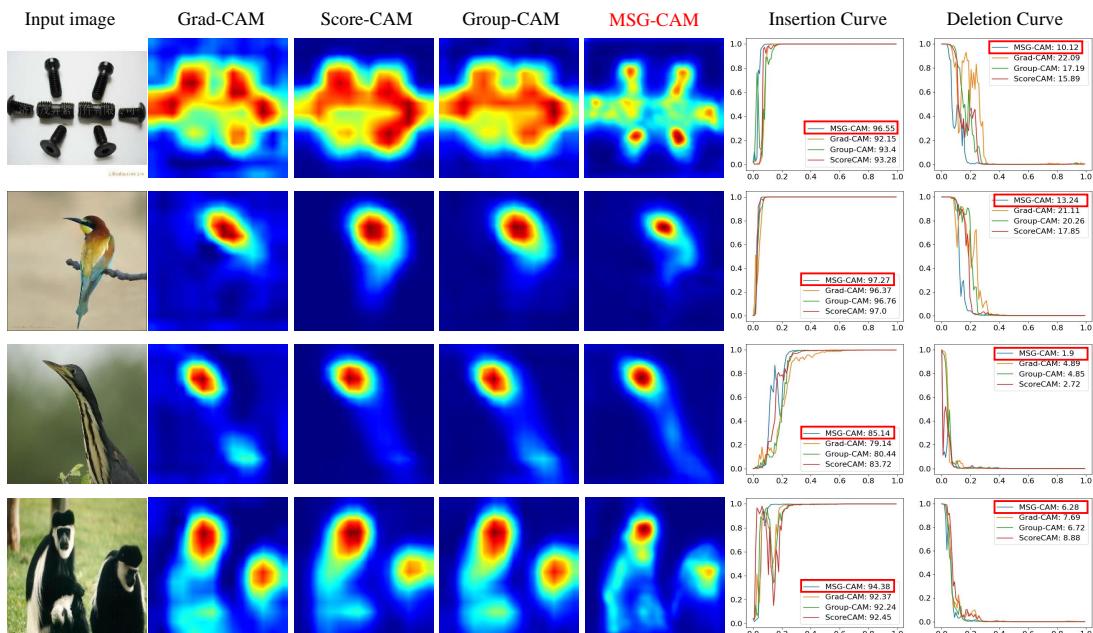


图 3-2 不同方法下的插入删除实验曲线对比图

Fig. 3-2 Comparison of experimental curves of insertion and deletion under different methods

表 3-2 电流类型对效率的影响

Table 3-2 Current type impact on efficiency

AUC	GradCAM	GradCAM+XGradCAM	ScoreCAM	GroupCAM	CAMERAS	MSGCAM	
Insertion	53.19	51.57	52.57	55.10	54.61	44.10	54.52
Deletion	11.52	12.16	11.53	11.43	11.21	8.01	9.78
Over-all	41.67	39.41	41.04	43.67	43.40	36.09	44.74

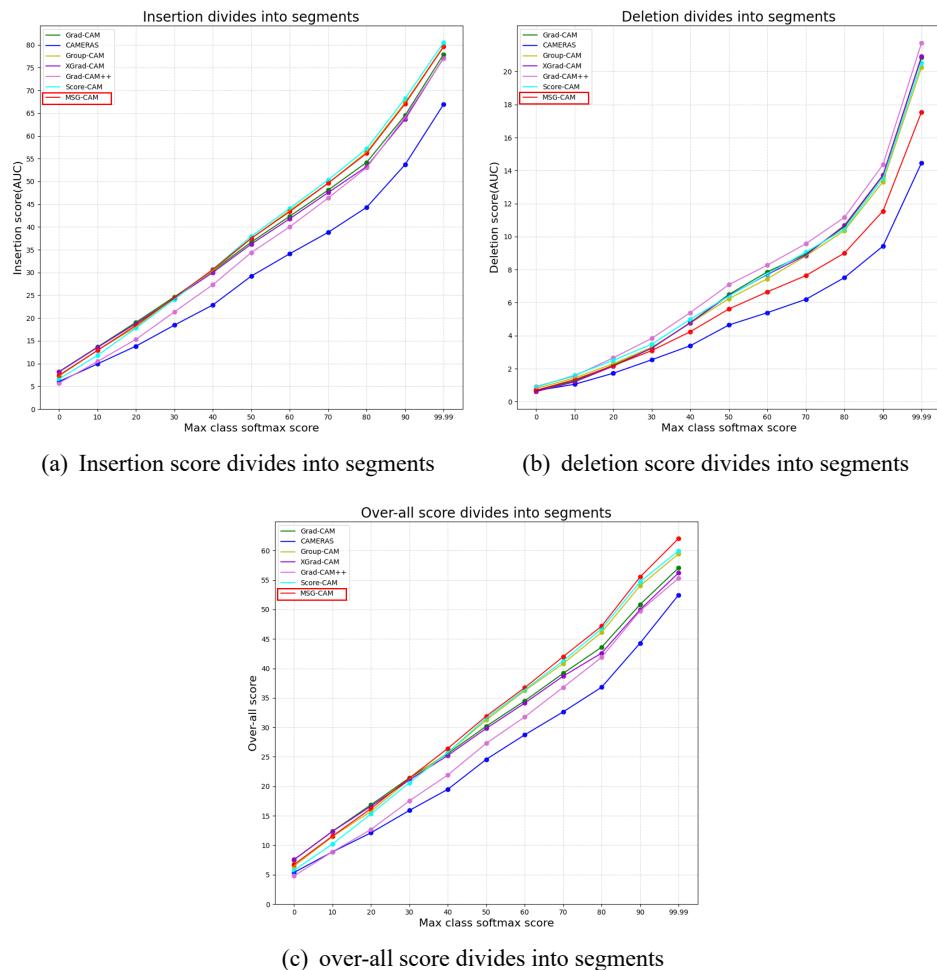
表 3-3 电流类型对效率的影响

Table 3-3 Current type impact on efficiency

Method	PASCAL VOC test	COCO 2014 validation
	Mean Accuracy(%)	Mean Accuracy(%)
Grad-CAM	83.04	55.50
Grad-CAM++	83.21	52.91
XGrad-CAM	86.70	55.93
Score-CAM	73.92	51.20
Group-CAM	82.41	54.14
CAMERAS	87.16	55.40
MSG-CAM	87.24	56.62

图 3-3 不同方法下的插入删除实验曲线对比图

Fig. 3-3 Comparison of experimental curves of insertion and deletion under different methods



3.4.5 定点游戏实验

定点游戏 (pointing game) [28] 实验对于给定显著图解释方法的空间选择性能够给出比较客观的评估结果。所谓空间选择性就是定点游戏要求图像分类神经网络对给定类别在输入图片中指出其所在位置, 这对显著图解释方法提出了挑战, 方法生成的显著图必须要准确反映给定类别在输入图片的具体位置。定点游戏的具体操作是从针对一个指定类别生成的显著图中找到值最大的那个点并记录它的坐标, 如果该坐标位于该类别对象的预先人工标注的边界框内部, 则记录一次击中 (hit), 否则就是没有击中 (miss)。定点游戏的量化评价指标即是显著图解释方法在给定数据集上对输入图片中所有类别的击中准确率, 具体计算公式如下:

$$Acc = \frac{\#hits}{\#hits + \#misses} \quad (3-13)$$

在式4-18中, $\#hits$ 表示数据集中所有显著图的最大值点落在标注框中的个数, $\#misses$ 则表示数据集中所有显著图的最大值点落在标注框外的个数。在只计算最大值空间选择性的定点游戏当中, $\#hits + \#misses$ 就等于数据集中所有图片标注框的个数。

为了更加精确的反映显著图的空间选择性, 本节实验当中摈弃了只计算最大值点所在坐标的做法, 转而计算显著图中里面从大到小的前 100 个点的坐标, 这可以排除偶发性的噪声影响。最终的性能指标是对一个数据集中每个类别的 Acc 取平均。在本次实验中, 我们使用的是 VGG19 模型, 且分别在 PASCAL VOC 测试集和 COCO 2014 验证集上进行了微调训练。如表4-3所示, 我们的方法在两个数据集上都处于领先地位, 这表明我们的方法比其他基于类激活映射图的方法更能反映图像分类神经网络的空间选择性。

3.4.6 合理性检验

部分基于反向传播的显著图方法对模型参数并不敏感, 这意味不管图像分类模型有没有经过训练, 它们都能够给出相似的结果, 这显然是违背显著图解释的初衷。所以, 能否通过合理性检验是衡量显著图解释方法是否具备可解释性的标准。具体而言, 本节 [28] 根据中的实验方法对经过预训练的 VGG19 采用级联随机化 (cascade randomization) 和独立随机化 (independent randomization)。级联随机化是从靠近模型的输出端开始, 逐渐将卷积层的参数随机化, 直至将所有卷积层的参数随机化。独立随机化也是从靠近模型的输出端开始, 每次仅将单独的一层卷积层参数随机化, 其他卷积层不变。

图4-4中展示了 MSG-CAM 在单一图片下分别进行级联随机化和独立随机化的结果示意图, 图中 Conv34 表示的是将 VGG19 的第 34 层卷积层经过独立随机化和

级联随机化后的显著图生成结果，其他的 Conv32 等以此类推。可以看出无论是级联随机化还是独立随机化，本章提出的 MSG-CAM 生成的显著图均受到了明显影响，表面 MSG-CAM 是受到图像分类神经网络训练参数影响的，能够通过合理性检验。

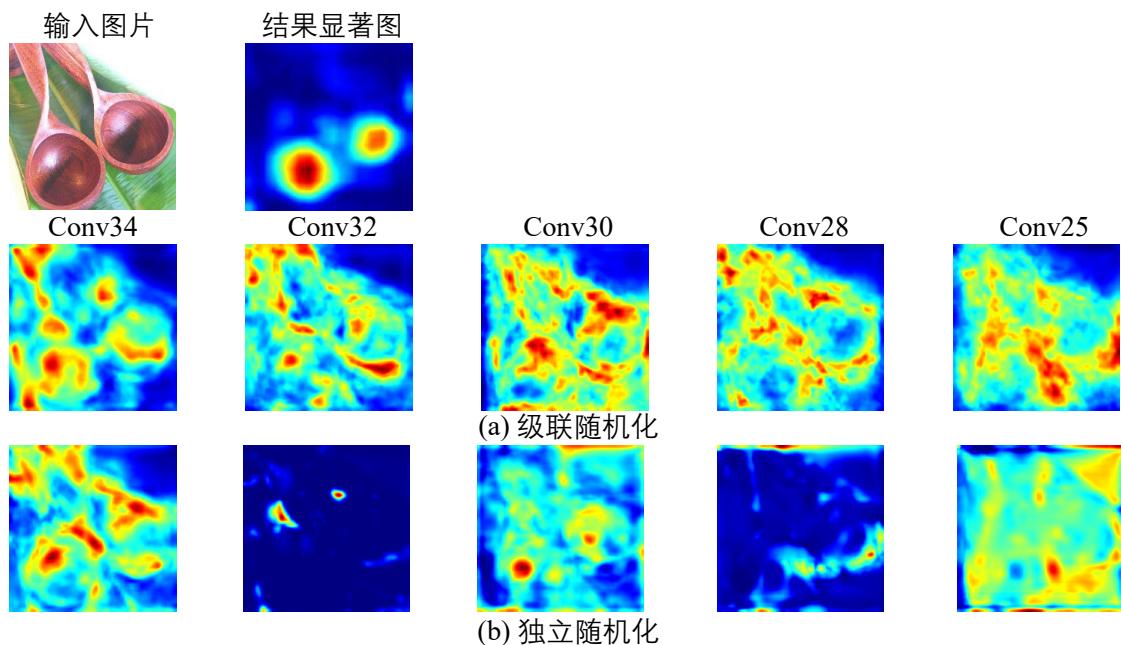


图 3-4 MSG-CAM 合理性检验示意图

Fig. 3-4 Sanity check of MSG-CAM

3.4.7 图

下面给出图片示例：

图片标题与图片之间的间距使用默认设置即可，与上下文的间距由于 LATEX 动态排版特性，需要大家手动调整。

下图是多子图示例：

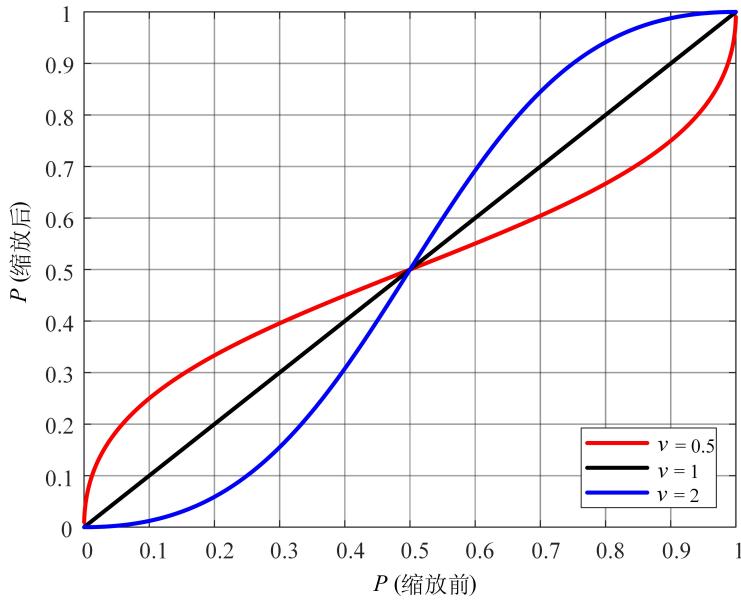


图 3-5 不同缩放系数 v 的缩放结果

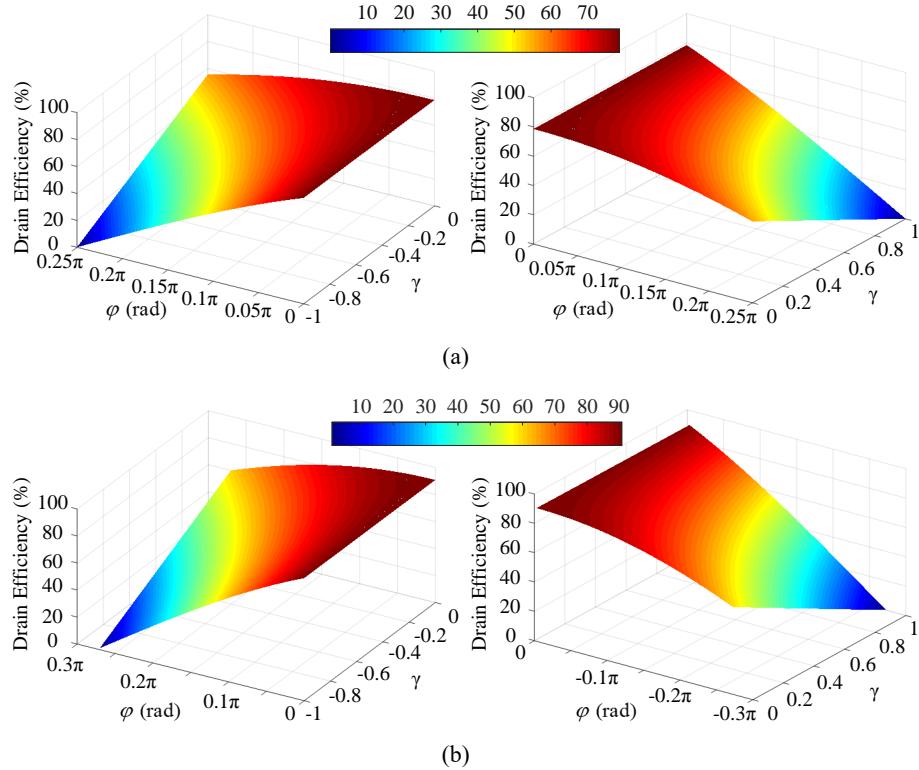
Fig. 3-5 Scaling results with different scaling coefficients v

3.4.8 表

表 3-4 电流类型对效率的影响

Table 3-4 Current type impact on efficiency

电流类型	A	B	C
aaa	aa1	bb1	cc1

图 3-6 理论效率与 γ 和 φ 的关系。 (a) $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 2/\sqrt{3}$ Fig. 3-6 Theoretical DE versus γ and φ . (a) $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 2/\sqrt{3}$

3.5 公式格式

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.794 \leq \zeta \leq 1 \\ 0.631 \leq \gamma = \frac{0.631}{\zeta^2} \leq 1 \\ -\frac{1}{2\gamma} \leq \delta \leq \frac{1}{2\gamma} \\ Z_{c,low,f} = 2R_{opt}(\gamma + j\delta) \\ Z_{c,2f} = Z_{c,low,2f} = -j\frac{3\pi}{4}\gamma\delta R_{opt} \end{array} \right. \quad (3-14)$$

$$v(\theta) = V_{DD} \cdot (1 - \alpha \cos(\theta + \varphi) + \beta \cos(3\theta + 3\varphi)) \cdot (1 - \gamma \sin(\theta + \varphi)) \quad -1 \leq \gamma \leq 1 \quad (3-15)$$

公式格式测试。 $\Theta = \{\theta_k(n), \forall k, n\}$

表 3-5 高效率功放性能对比

Table 3-5 High-efficiency power amplifier performance comparison

带宽 (GHz)	功率 (dBm)	效率 (%)	线性度 (dBc)	信号带宽 (MHz)
1.4–2.6	32–34	30–40 (DE)	-25 – -30 (ACLR)	5
2.1–2.7	39 (average)	45 (DE) @ 2.14 GHz 40 (DE) @ 2.655 GHz	-31 (ACLR) -30 (ACLR)	5
3.5	38.1	59 (PAE)	30 (C/I)	5
1.6–2.6	36.0–38.5 35.3–37.5	45–60 (PAE) 40–55 (PAE)	30 (C/I) -30 (ACLR)	5 20

3.6 印制要求

涉密学位论文的印刷、制作、传递、存档等，须符合国家、学校相关保密要求。学位论文一律左侧装订。

中文摘要之前的前置部分（封面、中、英文题名页、独创性声明和使用授权书），采用单面印刷。

从中文摘要开始，采用双面印刷。

中文摘要及之后的前置部分，包括中文摘要、ABSTRACT、目录、图目录（如有）、表目录（如有）、主要符号表（如有）、缩略词表（如有），在双面印刷时，若某部分页数为奇数，则该部分最后一页单面印刷。例如：若“摘要”只有1页，则其页码是“I”，第“I”页纸的背面为空白（无页眉或页码）；“ABSTRACT”用新的一张纸印刷，页码从“II”开始。

从第1章第1页开始，至论文最后1页，所有页面均双面印刷。例如：若第1章的最后1页为第17页，则第2章的第1页在第17页的背面印刷，页码为“18”（页眉是“重庆邮电大学博士（硕士）学位论文”）。

一次性双面打印整本学位论文技巧：除用于打印的版本外，电子版论文中一律不得出现空白页。论文打印建议使用PDF格式。为方便一次性双面打印，有时可在单面印刷的部分（如封面、中、英文题名页、独创性声明和使用授权书），或者双面打印只有1页的某部分内容（如摘要、ABSTRACT等）后插入1页空白页，该空白页不编排页眉页码；论文中出现的页码应前后连续，不得中断。

3.7 本章小结

本章介绍了……

第4章 一种通用的基于二维滑动窗口和放大的图像分类神经网络显著图解释增强方法

4.1 本章引言

4.2 问题描述和研究思路

显著图分辨率低，包含特征细节信息少仍然是当前绝大多数显著图解释方法的一个弊病。从基于卷积神经网络的图像分类神经网络来看，针对这一网络的显著图解释方法通常是从卷积神经网络的最后一层卷积层提取特征图。这一层包含了丰富的类别特征信息，然后通过加权组合这些特征图来生成最终的显著图。然而，由于卷积神经网络的结构特性，最后一层卷积层会输出多个通道的低分辨率特征图。因此，无论怎样组合这些特征图，最终得到的显著图分辨率仅与最后一层卷积层的单一通道特征图相当。当然，为了建立显著图与原始输入图片的特征对应关系，通常会对原始输入图片进行分辨率放大。这一过程通常采用双线性插值算法，但这并不意味着显著图中有效信息的增加。另外，当前的一些研究者也在积极探索对基于 Transformer 架构的图像分类模型进行显著图解释，Chefer 等人^[29]在近年发布了针对这一方面的研究，他们针对 Transformer 的结构的制定了新的层间相关性反向传播规则，解决了传播过程中遇到的注意层和跳跃连接时的挑战。他们将每一个 Transformer 块的梯度和其对应的相关性分数结合解决了 Transformer 在图像分类领域的显著图可视化问题。但是即便如此他们针对 Transformer 提出的方法仍然会面临低分辨率的困扰，究其原因是 Transformer 结构的图像分类神经网络反向传播过程中计算并生成显著图时也只能受限于 token 的尺寸，无法生成包含信息量更多的显著图。图4-1描述了这一问题，无论针对卷积神经网络的基于类激活映射图的方法还是针对 Transformer 架构提出的 Transformer attribution 方法（即 Chefer 等人提出的方法）都只能生成分辨率较低的原始显著图，之后通过上采样获得最终的显著图。

因此为了解决上述的问题，本章提出了一种通用的显著图增强方法，可以直接应用在多数可视化算法上。该方法使用固定尺寸的滑动窗口对输入图片中的所有局部区域上采样到输入图片尺寸，然后将结果输入到选定的可视化算法中得到所有图片的针对特定类别的显著图和概率分数，最后将显著图下采样到输入图片对应位置上的窗口中，并乘以概率分数，即可得到具备更多细节的显著图。将该方法应用在不同的可视化算法上，这些算法基于不同架构的网络，无论是量化指标还是直观评测都显示出我们的方法使这些可视化算法得到了明显提升，从而证明

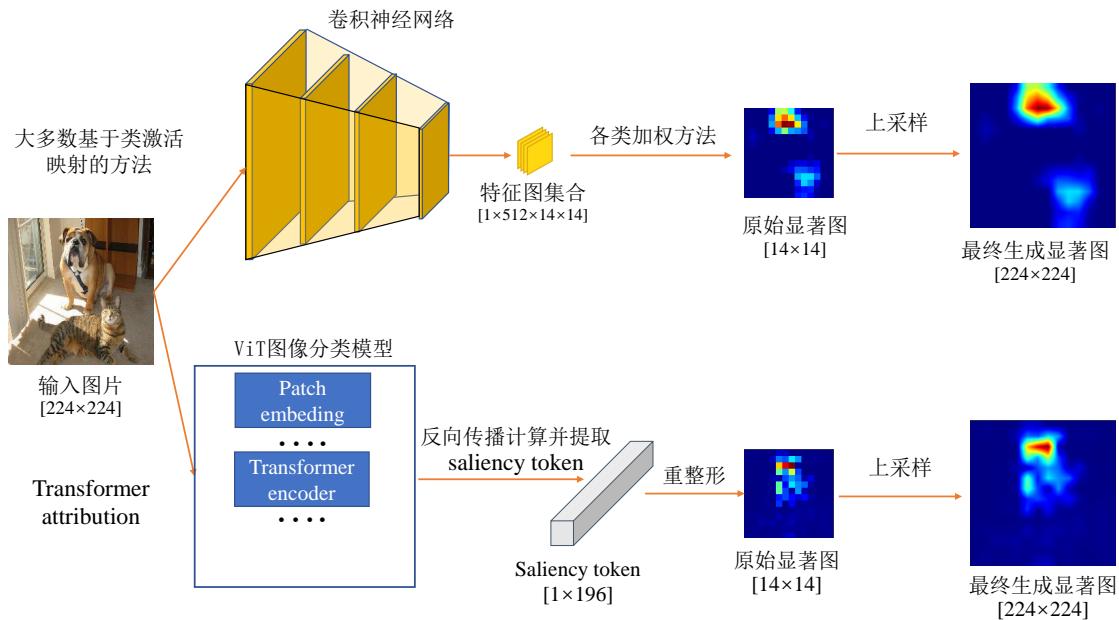


图 4-1 当前显著图解释方法分辨率低的原因

Fig. 4-1 Reasons for the low resolution of current saliency map interpretation methods

本章提出的方法的有效性和可靠性。

4.3 一种通用的基于二维滑动窗口和放大的图像分类神经网络显著图解释增强方法

为了解决当前可视化算法存在的分辨率低，特征模糊，噪声多的问题，我们的方法在输入图片上应用了滑动窗口，通过采集并融合不同窗口图片的可视化信息，让可视化算法加强对输入图片中的局部信息的感知。

4.3.1 获取窗口图片集合

设定原始输入图片 $I_0 \in \mathbb{R}^{3 \times H_0 \times W_0}$ ，使用一个二维滑动窗口函数 $\psi(I, start, h, w, stride)$ 来从输入图片 I_0 中提取窗口图片，函数 $\psi(I, start, h, w, stride)$ 中 I 就是函数所应用的输入图片， $start$ 表示滑动窗口在二维坐标系统的起点，一般设定在输入图片的左上角位置， h 和 w 表示窗口像素尺寸且窗口尺寸应该小于输入图片尺寸， $stride$ 表示每次滑动窗口移动的像素个数，窗口从左上角起点开始移动，只能在图片区域内移动，即滑动窗口应该向右或者向左移动。每次移动则将窗口内的图片区域进行复制并保存，移动完毕后即可得到关于窗口图片的集合，单张窗口图片的获取的公式如下：

$$p_{k_n} = \psi(I_0, start, h, w, stride) \quad (4-1)$$

式4-1中 p_{k_n} 表示一张窗口图片, k_n 表示这张图片在输入图片 I_0 中的二维坐标标记。所有窗口图片的集合可以如下表示:

$$\mathbf{p}^* = \{p_{k_1}, p_{k_2}, \dots, p_{k_n}\} \quad (4-2)$$

式4-2中, \mathbf{p}^* 即表示滑动窗口所有窗口图片集合。获取的窗口图片尺寸是和窗口一致的, 因此是无法直接输入图像分类模型的, 所以需要将其上采样到原始输入图片 I_0 的尺寸, 本方法上采样所用的函数是双线性插值函数 ϕ , 具体上采样过程描述见如下公式:

$$\mathbf{P}^* = \phi(\mathbf{p}^*, H_0, W_0) \quad (4-3)$$

式4-3中, H_0 和 W_0 是原始输入图片 I_0 的长和宽的像素个数, \mathbf{P}^* 表示窗口图片上采样后的图片集合, 因此 $\mathbf{P}^* = \{P_{k_1}, P_{k_2}, \dots, P_{k_n}\}$, P_{k_n} 即表示窗口图片 p_{k_n} 上采样到原始输入图片尺寸后的图片。

4.3.2 获取窗口图片的显著图和权重

设定 \mathcal{F} 是经过预训练的图像分类神经网络, $\mathcal{F}_c(I)$ 表示当输入图片是 I 的情况下, 图像分类神经网络 \mathcal{F} 关于类别 c 的输出概率分数。对于当前主流的显著图解释算法来说, 将某一显著图解释算法考虑为一个函数 f , 该函数的输入参数是图像分类神经网络 \mathcal{F} , 输入图片 I 和指定类别 c 。当输入图片是 I_0 , 可以获得图像分类神经网络 \mathcal{F} 在采用显著图解释算法 f 时生成的关于类别 c 的显著图:

$$S_0 = f(\mathcal{F}, I_0, c) \quad (4-4)$$

式4-4是生成的显著图, 且 $S_0 \in \mathbb{R}^{1 \times H_0 \times W_0}$ 。显著图 S_0 的分辨率和原始输入图片是一致的, 因其已经经过上采样处理了。 S_0 中的像素和原始输入图片的像素是一一对应的, 且其像素的值表示图像分类神经网络对输入图片 I_0 关于类别 c 的判断权值。现在已经获得了原始输入图片 I_0 的显著图, 在上一小节当中, 获取的窗口图片集合 \mathbf{P}^* 也需要经过同样的步骤分别获取每张窗口图片关于类别 c 的显著图:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}^* &= f(\mathcal{F}, \mathbf{P}^*, c) \\ &= \{S_{k_1}, S_{k_2}, \dots, S_{k_n}\} \end{aligned} \quad (4-5)$$

式4-5中 \mathbf{S}^* 表示图像分类神经网络 \mathcal{F} 对窗口图片集合生成的关于类别 c 的显著图集合, \mathbf{S}^* 中所有显著图的分辨率都和原始输入图片 I_0 一致。

在所有基于类激活映射的显著图解释算法中, 都采用了各种形式的特征图加权, 而这一步骤对于衡量每个特征图关于类别 c 的贡献至关重要。为了衡量由不同

窗口图片生成的显著图的重要性，可以获得每张窗口图片相对于类别 c 的概率分数。这个概率分数反映了图像分类神经网络关于窗口图片中类别 c 的特征信息的贡献权重。

$$\begin{aligned} \alpha^* &= \mathcal{F}_c(\mathbf{P}^*) \\ &= \{\alpha_{k_1}, \alpha_{k_2}, \dots, \alpha_{k_n}\} \end{aligned} \quad (4-6)$$

式4-6中 α^* 就是 \mathbf{P}^* 所有窗口图片的关于类别 c 的概率分数，以此作为 \mathbf{S}^* 的权重。

4.3.3 融合窗口图片集合的显著图

由于不同窗口图片生成的显著图只包含了原始输入图片部分区域的特征信息，因此需要将所有窗口图片进行拼接融合从而得到包含丰富特征信息的完整显著图，这一将窗口图片显著图拼接融合的操作也变相提高了最终呈现特征图对细节特征的解释能力，能够给出更精确的特征信息。由于式4-7中窗口图片显著图集合 \mathbf{S}^* 中的显著图尺寸和原始输入图片 I_0 的分辨率是一致的，因此要将其下采样至窗口图片的尺寸才方便根据其携带的在原始输入图片中的坐标信息进行拼接融合，具体的过程用公式表示如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{s}^* &= \phi(\mathbf{S}^*, h, w) \\ &= \{s_{k_1}, s_{k_2}, \dots, s_{k_n}\} \end{aligned} \quad (4-7)$$

式4-7中， \mathbf{s}^* 是窗口图片集合 \mathbf{P}^* 的显著图集合 \mathbf{S}^* 下采样至滑动窗口尺寸的显著图集合， s_{k_n} 中的 k_n 表示该张显著图在原始输入图片中的坐标位置，这个坐标位置是用来方便后续显著图进行拼接融合的。

显著图拼接融合的具体方法是将所有 \mathbf{s}^* 中窗口尺寸的显著图乘以该显著图在 α^* 对应的权重，再根据记录的坐标和原始输入图片的显著图 S_0 中对应位置区域的像素值相加，窗口显著图拼接融合的具体公式如下：

$$\begin{aligned} S'_c &= \sum_{k_1}^{k_n} (\mathbf{s}^* \alpha^* + S_0) \\ &= \sum_{k_1}^{k_n} (\alpha_{k_n} s_{k_n} + S_0^{k_n}) \end{aligned} \quad (4-8)$$

在式4-8中， $S_0^{k_n}$ 中 k_n 表示原始输入图片的显著图 S_0 中左上角坐标为 k_n 长宽为 h 和 w 的窗口区域。 S'_c 表示拼接融合后的显著图。

4.3.4 平滑和归一化显著图

因为滑动窗口是以一定步长在输入图片上截取窗口图片，这会导致窗口图片的显著图的在按照以上方法进行融合的过程中不可避免的会在拼接融合后的显著图上留下网格状的痕迹，使得显著图视觉效果不够平滑。因此为了尽可能降低滑动窗口带来的不利影响，本方法使用了一个理想低通滤波器对其进行优化，将显著图中网格状的痕迹进行减弱或者消除。定义这个理想低通滤波器函数为 δ ， S'_c 经过其处理的过程由以下式子定义：

$$S''_c = \Delta(S'_c, H(X, Y)) \quad (4-9)$$

式4-9中， $H(X, Y)$ 为该理想低通滤波器的传递函数，它的具体定义如下：

$$H(X, Y) = \begin{cases} 1 & D(X, Y) \leq D_0 \\ 0 & D(X, Y) > D_0 \end{cases} \quad (4-10)$$

在式4-10中， D_0 是截止频率到频率域中心的距离，它决定了低通滤波器的频率响应范围。当 $D(X, Y)$ 小于 D_0 时， $H(X, Y)$ 接近于 1，表示对低频分量的保留；当 $D(X, Y)$ 大于 D_0 时， $H(X, Y)$ 接近于 0，表示对高频分量的抑制。因此， D_0 决定了滤波器的频率截止位置，即在该位置之前的频率成分会被保留，之后的频率成分会被抑制。 $D(X, Y) = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 是显著图 S'_c 的频率域里的点 (X, Y) 到频率域中心的距离，频率域的中心通常指的是频率域图像的中心点，也就是频率为零的点。

最后，经过低通滤波器处理过后的显著图 S''_c 再经过最大最小归一化即可得到增强的且拥有更多特征细节的显著图 S_c ：

$$S_c = \frac{S''_c - \min(S''_c)}{\max(S''_c) - \min(S''_c)} \quad (4-11)$$

4.3.5 掩膜优化

\mathbf{M} 是经由输入图片多尺寸上采样放大后从卷积层中提取的特征图和梯度矩阵结合而得到的，相比单一原始输入图片得到掩膜（比如 Score-CAM^{[23]2}）， \mathbf{M} 包含更丰富的类别特征信息，但是目前得到 \mathbf{M} 仍然不能直接当作掩膜来扰动输入图片，它还有两个明显的缺点。第一点是 \mathbf{M} 的尺寸是 $[1 \times K \times H_0 \times W_0]$ ，其中 K 是卷积层 l 输出的特征图的通道数量，一般我们取最后一层卷积层作为 l ，因此 K 的值将会是数百至上千，显然这样掩膜的数量太多了，若像 Score-CAM^{[23]3} 一样逐个将掩膜去扰动原始输入图片得到权值，那样将会极为耗时。第二个缺点 \mathbf{M} 就是使用全局平均池化后的梯度作为特征图的权重，由于 ReLU 函数的零梯度问题^[24]，这

意味着 \mathbf{M} 显然会有噪声。因此，为了使 \mathbf{M} 成为合格的掩膜，需要让它变得更加纯净。

对于第一个缺陷，本节的解决办法是将 \mathbf{M} 中的 K 张掩膜平分为 B 个组，分类依据是它们的相邻关系，接着将每个组内的所有掩膜相加合并为一个掩膜，这个相加合并过程可由以下的公式计算得出：

$$M_r = \text{ReLU} \left(\sum_{k=r \times g}^{(r+1) \times g - 1} M^k \right) \quad (4-12)$$

公式4-12中 g 是每个组中的特征图的数量且 $g = K/B$, r 的取值范围是 $\{0, 1, 2, \dots, B-1\}$ ，即合并完成后一共有 B 张掩膜， M_r 是第 r 组中合并完成后的掩膜， M^k 是 \mathbf{M} 中第 k 个通道的特征图。

对于第二个缺陷，我们设计了一个去噪函数 $f(m_{ij}, \theta)$ ，该函数中 m_{ij} 是掩膜 M_r 中第 i 行第 j 列的像素值， θ 是一个百分比值。具体的去噪计算结果由以下公式计算得出：

$$f(m_{ij}, \theta) = \begin{cases} m_{ij}, & \text{if } m_{ij} > p(M_r, \theta); \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4-13)$$

公式4-13中 $p(M_r, \theta)$ 表示 M_r 的所有像素值从大到小小于 θ 百分比的值，比如有 100 个像素值，每个像素值都是 1 到 100 中的一个整数取值且取值唯一，此时 $\theta = 70$ ，那么 $p(M_r, \theta) = 70$ 。4-13公式的作用就是将掩膜 M_r 中百分比前 θ 大的像素值保留，小于 $p(M_r, \theta)$ 的像素值置为 0。经过去噪操作后可以得到更加纯净的掩膜。

到目前为止，还剩下最后一个操作即可得到最终的掩膜。将 M_r 中的所有像素值进行最大最小归一化，使其像素值区间位于 $[0, 1]$ ，这样方便将掩膜直接和输入图片相乘进行扰动操作。具体计算公式如下：

$$M'_r = \frac{M_r - \min(M_r)}{\max(M_r) - \min(M_r)} \quad (4-14)$$

最后，掩膜 M'_r 有这和原始输入图片 I_0 一致的分辨率且掩膜的像素值和 I_0 中的像素值一一对应。

4.3.6 生成显著图

如果显著性方法确实识别出了对模型预测有重要意义的像素，那么这一点就应该反映在重建图像的模型输出当中^[25]。将 M'_r 作为掩膜来扰动原始输入图片 I_0 ，其背后的原理是从原始输入图像中保留掩膜中获得的关于类别 c 的特征信息，让图像分类模型来判断保留的这部分信息的重要性，判断依据就是图像分类模型对

扰动后的图片关于类别 c 的输出概率分数。但是，如果直接将掩膜和原始输入图像相乘进行扰动，那么扰动后的图像中的被掩盖区域和被凸显的区域之间的边界会过于明显锐利，从而对图像分类神经网络造成对抗效果^[26]。

为了遇到避免上述的问题，高斯模糊函数被引入到了接下来的改进方法中。具体方法是将扰动区域即被掩膜遮盖的区域用高斯模糊后的原始输入图片的对应区域进行替代，这样可以使得凸显的图片区域和被扰动的图片区域之间的边界更加平滑，从而像真实图片，不易让图像分类神经网络产生异常的输出。对于单一掩膜 M'_r ，这个扰动模式可以由以下的公式计算得出：

$$I_r = I_0 \odot M'_r + I'_0 \odot (1 - M'_r) \quad (4-15)$$

公式4-15中， I'_0 是将原始输入图片 I_0 高斯模糊后的得到的， I'_0 作为一张基础图片送入图像分类模型 \mathcal{F} 当中，当然得到其关于类别 c 的输出结果 $\mathcal{F}_c(I'_0)$ 是一个非常低的值且趋近于 0。具体的高斯模糊函数是 `gaussian_blur2d(input, kernel_size, sigma)`，在本章中，参照 Group-CAM^[24] 的工作，设置高斯模糊的参数 $kernel_size = 51$ 和 $sigma = 50$ 。 $1 - M'_r$ 表示 M'_r 中每个像素值都作为减数被 1 相减，作用是将掩膜中关于类别 c 的特征信息进行凸显。

参考 RISE^[21] 中的方法，每张掩膜 M_r 的权重 α_r 可以由扰动后的 I_r 输入到图像分类模型 \mathcal{F} 中得到。 $\mathcal{F}_c(I_r)$ 则是该权重，其表示模型对显著图区域中类别 c 的特征信息的感兴趣程度。具体计算公式由以下式子给出：

$$\alpha_r = \mathcal{F}_c(I_r) - \mathcal{F}_c(I'_0) \quad (4-16)$$

最终的显著图即将所有 M_r 的权重 α_r 和其本身相乘，并经过 ReLU 函数后得到，ReLU 函数的作用是保留显著图中的正值，即模型关于类别 c 感兴趣的像素区域。具体式子如下表示：

$$L_{MSG-CAM} = \text{ReLU} \left(\sum_r \alpha_r M_r \right) \quad (4-17)$$

4.4 实验与分析

4.4.1 实验硬件配置和软件环境

下面给出本章实验的硬件配置和实验环境相关信息，具体信息见表4-1。

表 4-1 实验环境和硬件配置

Table 4-1 Experimental environment and hardware configuration

CPU	GPU	操作系统	Python 版本	PyTorch 版本
Intel® Xeon® W-2255 CPU @3.70GHz	NVIDIA RTX A5000	Ubuntu20.04	Python3.8	1.10.1+cu113

4.4.2 数据集及其预处理和实验参数说明

在本章的实验当中，主要使用了三个数据集，下面是三个数据集的简要介绍：

1. ILSVRC 2012 数据集 ILSVRC 2012 (ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge 2012) 是一个用于视觉对象识别和定位的大规模数据集和竞赛。该数据集包含超过 120 万张标注图片，涵盖 1000 个不同类别的物体和场景。ILSVRC 2012 竞赛旨在推动计算机视觉领域的发展，参与者需要开发能够识别图像中物体类别的算法，并对物体进行定位。该竞赛对于深度学习和卷积神经网络等技术的发展起到了重要推动作用，成为了评估图像识别算法性能的重要基准。ILSVRC 2012 数据集的发布和竞赛对于推动计算机视觉领域的发展产生了深远影响。

2. PASCAL VOC 数据集 PASCAL VOC (Visual Object Classes) 数据集是一个常用的计算机视觉数据集，用于目标检测、图像分割和场景分类等任务。该数据集最初由牛津大学的计算机视觉研究组创建，包含了 20 个常见的物体类别，如人、狗、猫、飞机等。数据集中的图像来自于自然场景和网络图像，每个图像都标注了包含的物体类别和位置信息。PASCAL VOC 数据集被广泛应用于评估目标检测和图像分割算法的性能，是计算机视觉领域中的重要基准数据集之一。同时，PASCAL VOC 数据集也被用于举办国际性的计算机视觉竞赛，吸引了全球的研究者和工程师参与。通过使用 PASCAL VOC 数据集，研究人员可以开发和评估各种视觉任务的算法，推动计算机视觉技术的发展。

3. COCO2014 数据集 COCO2014 数据集 (Common Objects in Context) 是一个用于计算机视觉任务的大型数据集，包含超过 200,000 张图像和相关的注释信息。这些图像涵盖了 80 个不同类别的物体，并且每张图像都有多个物体的标注，这使得数据集在目标检测、图像分割和物体识别等任务中非常有用。COCO2014 数据集的引入为计算机视觉领域的研究和发展提供了重要的资源，成为了许多视觉任务的标准基准。研究人员和开发者可以利用该数据集进行模型训练、算法评估和性能比较，从而推动计算机视觉技术的进步。COCO2014 数据集的广泛应用促进了目标检测、图像分割和物体识别等领域的发展，为相关领域的研究和应用提供

了有力支持。

在本章当中插入与删除实验中使用的是 ILSVRC 2012 验证集，包含 50000 张图片，并且将该验证集中的图片尺寸调整为 $(3 \times 224 \times 224)$ ，其中 3 是表示 RGB 颜色通道数量，像素值进行归一化调整，调整后的像素值范围是 $[0, 1]$ ，最后使用 Imagenet 数据集的均值 $[0.229, 0.224, 0.225]$ 和方差 $[0.485, 0.456, 0.406]$ 对所有图片像素值进行标准化处理。在定点游戏实验中，使用了两个数据集，分别是 PASCAL VOC 数据集中的测试集，包含 4952 张图片，和 COCO 2014 数据集的验证集，包含 50000 张图片。用于本章实验的图像分类神经网络模型是 torchvision 提供的预训练模型 VGG19^[27]，它是基于卷积神经网络架构的。如果没有特别说明，本章提出的方法 MSG-CAM 的默认设置参数是 $B = 32$, $\theta = 70$ 。所有方法生成的最终显著图默认都上采样至 224×224 的分辨率。

4.4.3 定性评估

4.4.4 插入 (insertion) 和删除 (deletion) 实验

插入 (insertion) 和删除 (deletion) 实验首次在 RISE^[21] 实验中提出。插入实验背后所反映的原理是当我们按照显著图给出的像素重要程度优先级开始在原图的对应位置逐渐插入重要的像素直至完全插入所有像素，在此过程中记录每次插入操作时模型对指定类别给出的可能性概率分数。插入实验可以衡量显著图对像素重要性的排序是否与模型实际决策时关注的像素重要性排序一致。与之相反的是，删除实验则是按照显著图中给出的像素重要程度优先级逐渐从原输入图片中抹去对应的像素信息。和插入实验一样，删除实验也要求记录每次删除操作后模型对感兴趣类别给出的可能性分数。删除实验可以直观的呈现出缺失重要特征的像素信息后模型对感兴趣类别的置信程度下降情况。

具体而言，对于插入实验，我们将原输入图片高斯模糊化后作为画布，随后每次迭代过程中，我们按照显著图给出的像素优先级逐渐向画布中对应的位置中引入原输入图片的像素，每次迭代过程中记录模型对引入像素后的的图片关于指定类别的可能性概率分数。为了更加精确的反映显著图的像素优先级，我们每次迭代只引入约 $0.89\%(224 \times 2)$ 的像素。和插入实验相对比，删除实验每次迭代将原输入图片中的像素逐渐替代为画布上的像素，直到输入图片被完全替换为画布为止。删除实验每次迭代仍然是变更约 0.89% 的在原图中的像素。需

要特别说明的是，我们引入高斯模糊后的原输入图片作为画布是为了避免引入像素或者删除像素时产生过于锐利的边界，从而更加接近真实图片，避免产生对抗攻击的样本。此外，每次迭代记录的可能性分数都是经过 softmax 函数进行归

表 4-2 电流类型对效率的影响

Table 4-2 Current type impact on efficiency

AUC	GradCAM	GradCAM+XGradCAM	ScoreCAM	GroupCAM	CAMERAS	MSGCAM
Insertion	53.19	51.57	52.57	55.10	54.61	44.10
Deletion	11.52	12.16	11.53	11.43	11.21	8.01
Over-all	41.67	39.41	41.04	43.67	43.40	44.74

一化后的数据。得到插入实验和删除实验每次迭代获得的分数后，我们使用概率分数随插入或者删除次数的曲线的曲线下面积 (Area Under Curve) 作为的作为量化指标。为了总体衡量插入实验和删除实验的优劣，我们使用总体 (over-all) 分数。按照上面关于插入实验和删除实验的描述，AUC(insertion) 越高表明显著图越准确，同理，AUC(deletion) 越低越好。因此，overall 分数计算方式是 AUC(insertion)-AUC(deletion)。图4-2展示了 Grad-CAM、Score-CAM、Group-CAM 和 MSG-CAM 为所选的 4 幅代表性图像生成了显著图以及相应的插入和删除曲线。对于删除曲线，更好的显著图解释方法给出的显著性图应尽可能快地下降，插入曲线与删除曲线正好相反。从图中可以看出本文提出的 MSG-CAM 在视觉解释效果以及插入删除曲线的表现来看均优于其他三种基于类激活映射的方法。

表??列出了在 50000 张图像上进行插入和删除的实验结果。虽然 MSG-CAM 在单项指标上并不突出，但在 AUC(overll) 这项指标上却是第一名，比第二名的 Score-CAM 高出 1.07%。此外，为了探究图像分类神经网络对目标类别的置信程度与三个指标之间的关系。我们根据每幅图像的分类类别的最大得分将其分为 11 组，并统计每组的 AUC(insertion)，AUC(insertion) 和 AUC(overall)，统计数据绘制成了表4-3。从图中可以看出，当图像的分类类别的概率分数较低时，各种显著图解释方法之间很难拉开差距。随着图像的分类类别的概率分数的上升，MSG-CAM 逐渐显示出优势。在图像的分类类别的概率分数 ≥ 99.99 时，即当图像分类神经模型对这组图像中的分类类别有很高的置信度时，MSG-CAM 在 AUC(overall) 有着明显领先。这表明，当图像分类神经网络接近完美的学习到相关类别信息时，MSG-CAM 能准确反映这种情况。

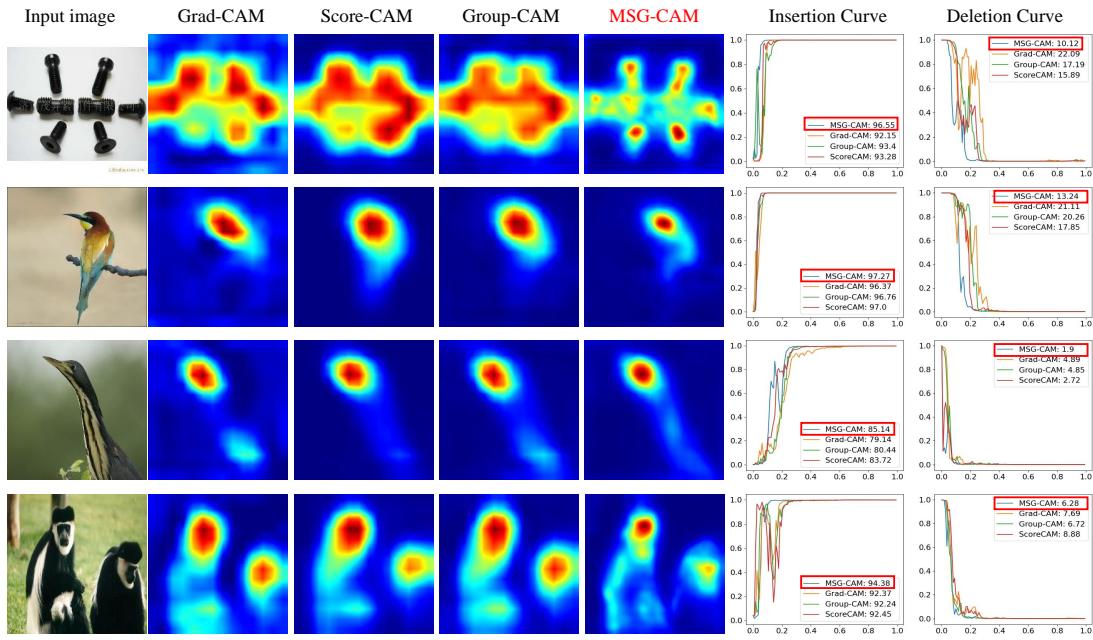


图 4-2 不同方法下的插入删除实验曲线对比如图

Fig. 4-2 Comparison of experimental curves of insertion and deletion under different methods

4.4.5 定点游戏实验

定点游戏 (pointing game) [28] 实验对于给定显著图解释方法的空间选择性能能够给出比较客观的评估结果。所谓空间选择性就是定点游戏要求图像分类神经网络对给定类别在输入图片中指出其所在位置, 这对显著图解释方法提出了挑战, 方法生成的显著图必须要准确反映给定类别在输入图片的具体位置。定点游戏的具体操作是从针对一个指定类别生成的显著图中找到值最大的那个点并记录它的坐标, 如果该坐标位于该类别对象的预先人工标注的边界框内部, 则记录一次击中 (hit), 否则就是没有击中 (miss)。定点游戏的量化评价指标即是显著图解释方法在给定数据集上对输入图片中所有类别的击中准确率, 具体计算公式如下:

$$Acc = \frac{\#hits}{\#hits + \#misses} \quad (4-18)$$

在式4-18中, $\#hits$ 表示数据集中所有显著图的最大值点落在标注框中的个数, $\#misses$ 则表示数据集中所有显著图的最大值点落在标注框外的个数。在只计算最大值空间选择性的定点游戏当中, $\#hits + \#misses$ 就等于数据集中所有图片标注框的个数。

为了更加精确的反映显著图的空间选择性, 本节实验当中摈弃了只计算最大值点所在坐标的办法, 转而计算显著图中里面从大到小的前 100 个点的坐标, 这可以排除偶发性的噪声影响。最终的性能指标是对一个数据集中每个类别的 Acc 取平均。在本次实验中, 我们使用的是 VGG19 模型, 且分别在 PASCAL VOC 测试

图 4-3 不同方法下的插入删除实验曲线对比图

Fig. 4-3 Comparison of experimental curves of insertion and deletion under different methods

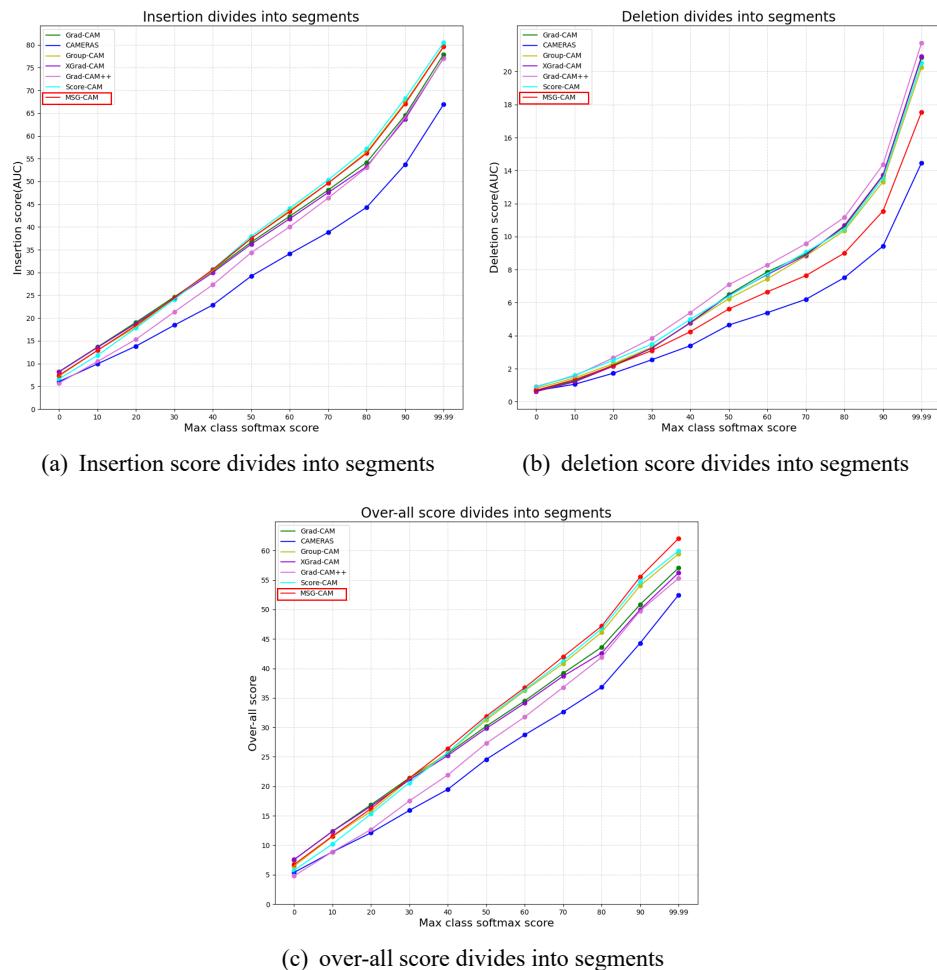


表4-3 电流类型对效率的影响

Table 4-3 Current type impact on efficiency

Method	PASCAL VOC test	COCO 2014 validation
	Mean Accuracy(%)	Mean Accuracy(%)
Grad-CAM	83.04	55.50
Grad-CAM++	83.21	52.91
XGrad-CAM	86.70	55.93
Score-CAM	73.92	51.20
Group-CAM	82.41	54.14
CAMERAS	87.16	55.40
MSG-CAM	87.24	56.62

集和 COCO 2014 验证集上进行了微调训练。如表4-3所示，我们的方法在两个数据集上都处于领先地位，这表明我们的方法比其他基于类激活映射图的方法更能反映图像分类神经网络的空间选择性。

4.4.6 合理性检验

部分基于反向传播的显著图方法对模型参数并不敏感，这意味着不管图像分类模型有没有经过训练，它们都能够给出相似的结果，这显然是违背显著图解释的初衷。所以，能否通过合理性检验是衡量显著图解释方法是否具备可解释性的标准。具体而言，本节 [28] 根据中的实验方法对经过预训练的 VGG19 采用级联随机化 (cascade randomization) 和独立随机化 (independent randomization)。级联随机化是从靠近模型的输出端开始，逐渐将卷积层的参数随机化，直至将所有卷积层的参数随机化。独立随机化也是从靠近模型的输出端开始，每次仅将单独的一层卷积层参数随机化，其他卷积层不变。

图4-4中展示了 MSG-CAM 在单一图片下分别进行级联随机化和独立随机化的结果示意图，图中 Conv34 表示的是将 VGG19 的第 34 层卷积层经过独立随机化和级联随机化后的显著图生成结果，其他的 Conv32 等以此类推。可以看出无论是级

联随机化还是独立随机化，本章提出的 MSG-CAM 生成的显著图均受到了明显影响，表面 MSG-CAM 是受到图像分类神经网络训练参数影响的，能够通过合理性检验。

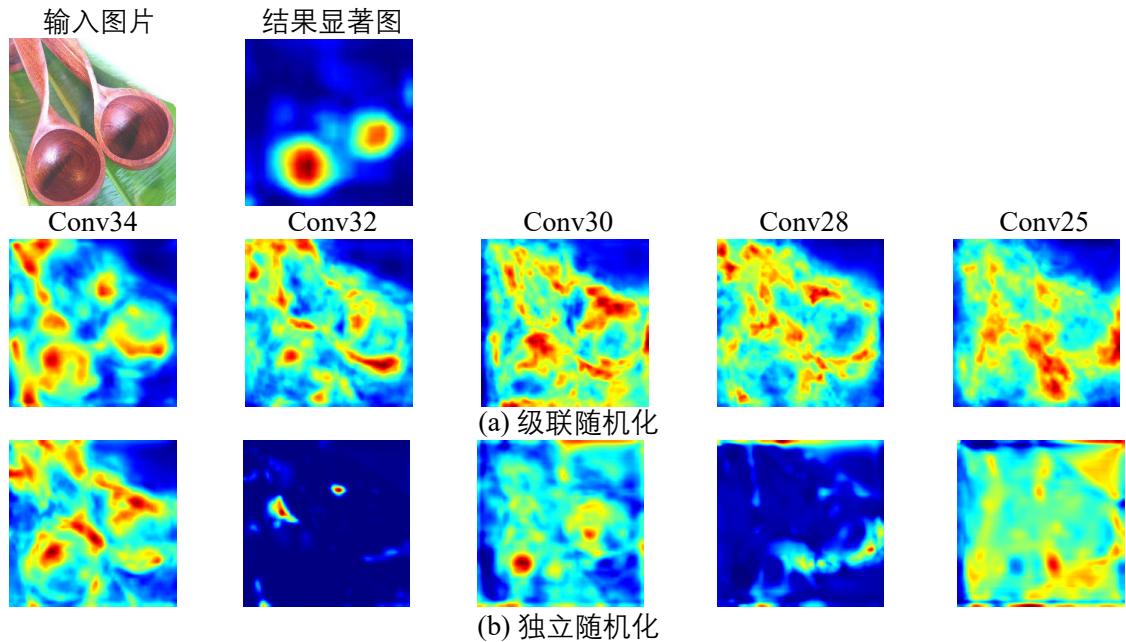


图 4-4 MSG-CAM 合理性检验示意图

Fig. 4-4 Sanity check of MSG-CAM

4.4.7 图

下面给出图片示例：

图片标题与图片之间的间距使用默认设置即可，与上下文的间距由于 LATEX 动态排版特性，需要大家手动调整。

下图是多子图示例：

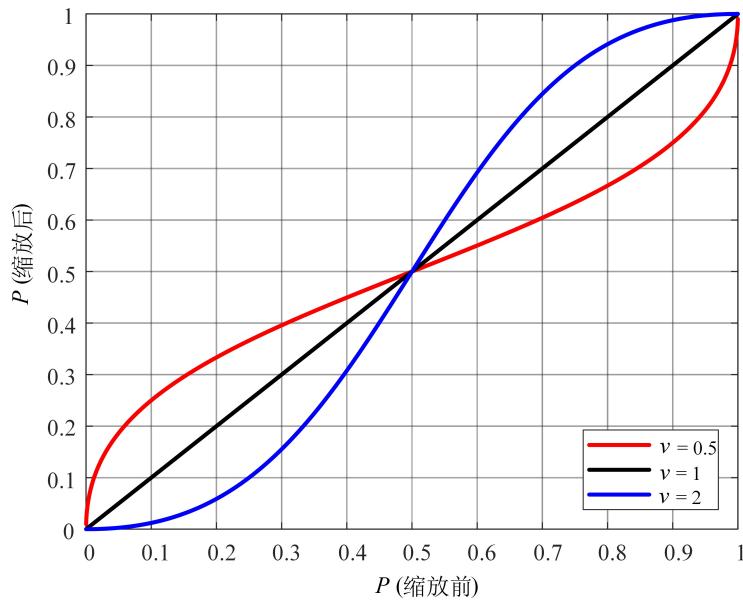


图 4-5 不同缩放系数 v 的缩放结果

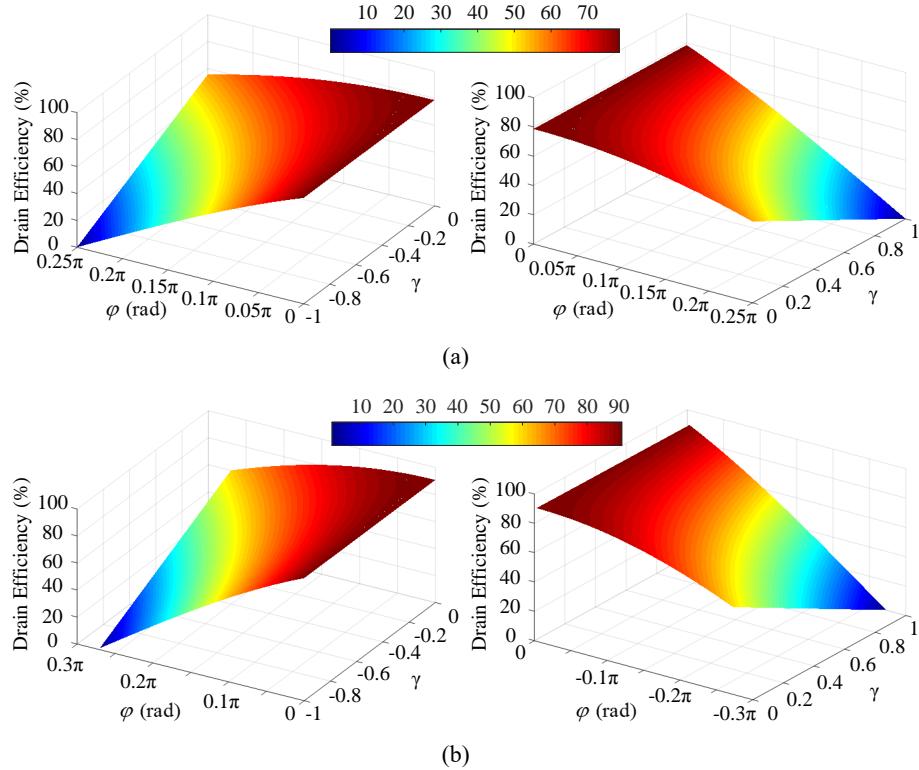
Fig. 4-5 Scaling results with different scaling coefficients v

4.4.8 表

表 4-4 电流类型对效率的影响

Table 4-4 Current type impact on efficiency

电流类型	A	B	C
aaa	aa1	bb1	cc1

图 4-6 理论效率与 γ 和 φ 的关系。 (a) $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 2/\sqrt{3}$ Fig. 4-6 Theoretical DE versus γ and φ . (a) $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 2/\sqrt{3}$

4.5 公式格式

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.794 \leq \zeta \leq 1 \\ 0.631 \leq \gamma = \frac{0.631}{\zeta^2} \leq 1 \\ -\frac{1}{2\gamma} \leq \delta \leq \frac{1}{2\gamma} \\ Z_{c,low,f} = 2R_{opt}(\gamma + j\delta) \\ Z_{c,2f} = Z_{c,low,2f} = -j\frac{3\pi}{4}\gamma\delta R_{opt} \end{array} \right. \quad (4-19)$$

$$v(\theta) = V_{DD} \cdot (1 - \alpha \cos(\theta + \varphi) + \beta \cos(3\theta + 3\varphi)) \cdot (1 - \gamma \sin(\theta + \varphi)) \quad -1 \leq \gamma \leq 1 \quad (4-20)$$

公式格式测试。 $\Theta = \{\theta_k(n), \forall k, n\}$

表 4-5 高效率功放性能对比

Table 4-5 High-efficiency power amplifier performance comparison

带宽 (GHz)	功率 (dBm)	效率 (%)	线性度 (dBc)	信号带宽 (MHz)
1.4–2.6	32–34	30–40 (DE)	-25 – -30 (ACLR)	5
2.1–2.7	39	45 (DE) @ 2.14 GHz	-31 (ACLR)	5
	(average)	40 (DE) @ 2.655 GHz	-30 (ACLR)	
3.5	38.1	59 (PAE)	30 (C/I)	5
1.6–2.6	36.0–38.5	45–60 (PAE)	30 (C/I)	5
	35.3–37.5	40–55 (PAE)	-30 (ACLR)	20

4.6 印制要求

涉密学位论文的印刷、制作、传递、存档等，须符合国家、学校相关保密要求。学位论文一律左侧装订。

中文摘要之前的前置部分（封面、中、英文题名页、独创性声明和使用授权书），采用单面印刷。

从中文摘要开始，采用双面印刷。

中文摘要及之后的前置部分，包括中文摘要、ABSTRACT、目录、图目录（如有）、表目录（如有）、主要符号表（如有）、缩略词表（如有），在双面印刷时，若某部分页数为奇数，则该部分最后一页单面印刷。例如：若“摘要”只有1页，则其页码是“I”，第“I”页纸的背面为空白（无页眉或页码）；“ABSTRACT”用新的一张纸印刷，页码从“II”开始。

从第1章第1页开始，至论文最后1页，所有页面均双面印刷。例如：若第1章的最后1页为第17页，则第2章的第1页在第17页的背面印刷，页码为“18”（页眉是“重庆邮电大学博士（硕士）学位论文”）。

一次性双面打印整本学位论文技巧：除用于打印的版本外，电子版论文中一律不得出现空白页。论文打印建议使用PDF格式。为方便一次性双面打印，有时可在单面印刷的部分（如封面、中、英文题名页、独创性声明和使用授权书），或者双面打印只有1页的某部分内容（如摘要、ABSTRACT等）后插入1页空白页，该空白页不编排页眉页码；论文中出现的页码应前后连续，不得中断。

4.7 本章小结

本章介绍了……

4.8 随便加一章

4.8.1 主要结论

本文主要……

4.8.2 研究展望

更深入的研究……

参考文献

- [1] Matthew D Zeiler and Rob Fergus. Visualizing and understanding convolutional networks. In *European conference on computer vision*, pages 818–833. Springer, 2014.
- [2] Jost Tobias Springenberg, Alexey Dosovitskiy, Thomas Brox, and Martin Riedmiller. Striving for simplicity: The all convolutional net. *arXiv preprint arXiv:1412.6806*, 2014.
- [3] Avanti Shrikumar, Peyton Greenside, and Anshul Kundaje. Learning important features through propagating activation differences. In *International conference on machine learning*, pages 3145–3153. PMLR, 2017.
- [4] Alexander Binder, Grégoire Montavon, Sebastian Lapuschkin, Klaus-Robert Müller, and Wojciech Samek. Layer-wise relevance propagation for neural networks with local renormalization layers. In *International Conference on Artificial Neural Networks*, pages 63–71. Springer, 2016.
- [5] Karen Simonyan, Andrea Vedaldi, and Andrew Zisserman. Deep inside convolutional networks: Visualising image classification models and saliency maps. In *In Workshop at International Conference on Learning Representations*. Citeseer, 2014.
- [6] Daniel Smilkov, Nikhil Thorat, Been Kim, Fernanda Viégas, and Martin Wattenberg. Smoothgrad: removing noise by adding noise. *ArXiv preprint*, abs/1706.03825, 2017.
- [7] Julius Adebayo, Justin Gilmer, Ian Goodfellow, and Been Kim. Local explanation methods for deep neural networks lack sensitivity to parameter values. *ArXiv preprint*, abs/1810.03307, 2018.
- [8] Mukund Sundararajan, Ankur Taly, and Qiqi Yan. Axiomatic attribution for deep networks. In *International conference on machine learning*, pages 3319–3328. PMLR, 2017.
- [9] Julius Adebayo, Justin Gilmer, Michael Muelly, Ian J. Goodfellow, Moritz Hardt, and Been Kim. Sanity checks for saliency maps. In Samy Bengio, Hanna M. Wallach,

- Hugo Larochelle, Kristen Grauman, Nicolò Cesa-Bianchi, and Roman Garnett, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 31: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2018, NeurIPS 2018, December 3-8, 2018, Montréal, Canada*, pages 9525–9536, 2018.
- [10] Bolei Zhou, Aditya Khosla, Àgata Lapedriza, Aude Oliva, and Antonio Torralba. Learning deep features for discriminative localization. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2016, Las Vegas, NV, USA, June 27-30, 2016*, pages 2921–2929. IEEE Computer Society, 2016.
- [11] Ramprasaath R. Selvaraju, Michael Cogswell, Abhishek Das, Ramakrishna Vedantam, Devi Parikh, and Dhruv Batra. Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. In *IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV 2017, Venice, Italy, October 22-29, 2017*, pages 618–626. IEEE Computer Society, 2017.
- [12] Aditya Chattopadhyay, Anirban Sarkar, Prantik Howlader, and Vineeth N Balasubramanian. Grad-cam++: Generalized gradient-based visual explanations for deep convolutional networks. In *2018 IEEE winter conference on applications of computer vision (WACV)*, pages 839–847. IEEE, 2018.
- [13] Ruigang Fu, Qingyong Hu, Xiaohu Dong, Yulan Guo, Yinghui Gao, and Biao Li. Axiom-based grad-cam: Towards accurate visualization and explanation of cnns. In *31st British Machine Vision Conference 2020, BMVC 2020, Virtual Event, UK, September 7-10, 2020*. BMVA Press, 2020.
- [14] Daniel Omeiza, Skyler Speakman, Celia Cintas, and Komminist Weldermariam. Smooth grad-cam++: An enhanced inference level visualization technique for deep convolutional neural network models. *ArXiv preprint*, abs/1908.01224, 2019.
- [15] Haofan Wang, Rakshit Naidu, Joy Michael, and Soumya Snigdha Kundu. Sscam: Smoothed score-cam for sharper visual feature localization. *ArXiv preprint*, abs/2006.14255, 2020.
- [16] Harish Guruprasad Ramaswamy et al. Ablation-cam: Visual explanations for deep convolutional network via gradient-free localization. In *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*, pages 983–991, 2020.

- [17] Jeong Ryong Lee, Sewon Kim, Inyong Park, Taejoon Eo, and Dosik Hwang. Relevance-cam: Your model already knows where to look. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 14944–14953, 2021.
- [18] Mohammad AAK Jalwana, Naveed Akhtar, Mohammed Bennamoun, and Ajmal Mian. Cameras: Enhanced resolution and sanity preserving class activation mapping for image saliency. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 16327–16336, 2021.
- [19] Scott M. Lundberg and Su-In Lee. A unified approach to interpreting model predictions. In Isabelle Guyon, Ulrike von Luxburg, Samy Bengio, Hanna M. Wallach, Rob Fergus, S. V. N. Vishwanathan, and Roman Garnett, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 30: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2017, December 4-9, 2017, Long Beach, CA, USA*, pages 4765–4774, 2017.
- [20] Marco Túlio Ribeiro, Sameer Singh, and Carlos Guestrin. "why should I trust you?": Explaining the predictions of any classifier. In Balaji Krishnapuram, Mohak Shah, Alexander J. Smola, Charu C. Aggarwal, Dou Shen, and Rajeev Rastogi, editors, *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, CA, USA, August 13-17, 2016*, pages 1135–1144. ACM, 2016.
- [21] Vitali Petsiuk, Abir Das, and Kate Saenko. RISE: randomized input sampling for explanation of black-box models. In *British Machine Vision Conference 2018, BMVC 2018, Newcastle, UK, September 3-6, 2018*, page 151. BMVA Press, 2018.
- [22] Ruth Fong, Mandela Patrick, and Andrea Vedaldi. Understanding deep networks via extremal perturbations and smooth masks. In *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, ICCV 2019, Seoul, Korea (South), October 27 - November 2, 2019*, pages 2950–2958. IEEE, 2019.
- [23] Haofan Wang, Zifan Wang, Mengnan Du, Fan Yang, Zijian Zhang, Sirui Ding, Piotr Mardziel, and Xia Hu. Score-cam: Score-weighted visual explanations for convolutional neural networks. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition workshops*, pages 24–25, 2020.

- [24] Qinglong Zhang, Lu Rao, and Yubin Yang. A novel visual interpretability for deep neural networks by optimizing activation maps with perturbation. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, volume 35, pages 3377–3384, 2021.
- [25] Andrei Kapishnikov, Tolga Bolukbasi, Fernanda Viégas, and Michael Terry. Xrai: Better attributions through regions. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pages 4948–4957, 2019.
- [26] Piotr Dabkowski and Yarin Gal. Real time image saliency for black box classifiers. In Isabelle Guyon, Ulrike von Luxburg, Samy Bengio, Hanna M. Wallach, Rob Fergus, S. V. N. Vishwanathan, and Roman Garnett, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 30: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2017, December 4-9, 2017, Long Beach, CA, USA*, pages 6967–6976, 2017.
- [27] Karen Simonyan and Andrew Zisserman. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. In Yoshua Bengio and Yann LeCun, editors, *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015, San Diego, CA, USA, May 7-9, 2015, Conference Track Proceedings*, 2015.
- [28] Jianming Zhang, Sarah Adel Bargal, Zhe Lin, Jonathan Brandt, Xiaohui Shen, and Stan Sclaroff. Top-down neural attention by excitation backprop. *International Journal of Computer Vision*, 126(10):1084–1102, 2018.
- [29] Hila Chefer, Shir Gur, and Lior Wolf. Transformer interpretability beyond attention visualization. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 782–791, 2021.

附录 A 各学院中英文名称对照表

序号	中文名称	英文名称
01	通信工程学院	School of Communications and Information Engineering

附录 B 常见一级学科中英文名称对照表

代码	中文名称	英文名称
0810	信息与通信工程	Information and Communication Engineering

附录 C 常见专业学位类别中英文名称对照表

代码	中文名称	英文名称
1256	工程管理	Engineering Management

作者简介

1. 基本情况

张某某，男，重庆人，1993年8月出生，重庆邮电大学XX学院XX专业2018级博士研究生。

2. 教育和工作经历

3. 攻读学位期间的研究成果

3.1 发表的学术论文和著作

3.2 申请（授权）专利

3.3 参与的科研项目及获奖

以下文字用于测试。

感谢老师、同学们的关心、支持和帮助！

感谢老师、同学们的关心、支持和帮助！