

# 华中科技大学本科生自然科学创新基金 申请书（机械学院初步申报版）

项目名称：        面向背景泛化的发动机叶片损伤  
                        一眼学习检测方法

申请人：                        姚骥轩

申请人学号：                        U202110654

移动电话：                        13102008228

电子邮件：                        u202110654@hust.edu.cn

所在院系：                        机械科学与工程学院

填表日期：                        2024 年 5 月

华中科技大学本科生院制

2024 年 5 月

## 基本信息

申请人信息	姓名	姚骥轩	性别	男
	出生年月	2002 年 10 月	民族	汉族
	导师姓名	余文勇	导师职称	副教授
	学籍单位	机械科学与工程院（系）	学号	U202110654
	电子邮箱	u202110654@hust.edu.cn		
	手机号码	13102008228	QQ	2174336645
	研究领域	机器视觉		
	是否基础学科拔尖学生培养计划 2.0 基地			<input type="checkbox"/> 是 <input checked="" type="checkbox"/> 否
项目基本信息	项目名称	面向背景泛化的发动机叶片损伤一眼学习检测方法		
	英文名称	Background Generalization-Oriented One-Shot Learning Detection Method		
	研究期限	2024 年 5 月 30 日---2026 年 5 月 30 日		
	研究方向	机器视觉、神经网络		
	申请金额	4（万元）		
	中文关键词	表面缺陷检测、发动机叶片、一眼学习、背景泛化、特征匹配		
	英文关键词	Surface defect detection, Engine blades, One shot learning, Background generalization, Feature matching		
中文摘要	<p>（本部分内容字数不超过 500 字）</p> <p>航空发动机叶片工作在高温，高压，高转速极端环境，同时伴随着强劲气流，叶片还容易吸入异物，造成不同程度的损伤。对在役叶片的孔探检测和损伤的高精度辨识是预测飞机故障、延长服役寿命和提高安全性的重要需求。但自动化的孔探图像检测存在部件背景复杂、损伤样本不足等问题，造成辨识准确率较低，导致重大质量事故预警不足。本项目开展基于背景泛化的一眼学习损伤检测方法的研究，包括：（1）研究一眼学习方法，比较有限样本中的损伤特征，学习损伤类型的泛化表示，解决发动机叶片损伤训练样本不足的问题。（2）研究特征匹配驱动的背景泛化神经网络，通过计算特征之间的并进一步令相关特征相减，避免突出的前景正常区域特征和背景信息的干扰，解决复杂背景下的特征比对问题。通过本项目研究，建立面向背景泛化的一眼学习检测理论和方法，形成“背景泛化抑制+损伤泛化表示”的孔探图像智能检测新方法，这对于保障航空安全、提高航空发动机维护效率具有重要意义。</p>			

**报告正文**（从以下三方面进行阐述，不超过 3000 字。请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。）建议 2-3 页

研究 初 衷	<p><b>（为什么选择该研究课题？）</b></p> <p>航空发动机工作过程中长期承受高温、高压和强振动的严峻考验，叶片还容易吸入异物，造成不同程度的损失，出现多种缺陷。通过对以往重大航空事故的分析，发现叶片损伤的失效占比高达 70%。因此，定期检查对提升飞机使用效率、确保飞机适航性与安全性至关重要。通常对于裂纹、叶片缺口、积炭等微小损伤，可不拆卸发动机，在原位进行检测和维修。这种原位检测广泛采用孔探技术，通过内窥镜等孔探设备对发动机内部环境进行探查，依据拍摄到的叶片图像进行人工筛查。</p> <p>然而，航空发动机叶片损伤检测领域目前有以下存在的问题：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 自动化程度不高、效率低下：目前主要依靠两名工人分别负责叶片拨动和孔探仪操作，效率低下；对发动机的损伤评估由检验员参考飞机维修手册主观判断，因此将带来更多的不确定因素。</li> <li>2. 缺陷种类多、数据集数量少：缺陷类型多，形状千奇百怪，传统识别方法难以识别全部缺陷类型；航空领域龙头企业一般会出于保密等安全要求，拒绝提供发动机叶片的缺陷图片。</li> <li>3. 采样图片背景复杂、质量差：航空发动机内部空间狭小，使用孔探仪采集的图像背景复杂；发动机内部无照明，依靠孔探仪照明采样得到的图片对比度差。</li> <li>4. 国产化率低、存在安全风险：国外在检测仪器、检测算法等方面存在垄断，有断供和数据泄露风险。</li> </ol> <p>从深度学习在自动化的孔探损伤检测中的应用可以判断出，目前孔探损伤智能检测方法存在部件背景复杂、损伤样本不足等问题，造成辨识准确率较低，是未来突破的主要方向。</p>
前 期 工 作	<p><b>（前期做了哪些思考和准备？包括但不限于查阅文献、理论分析、实验验证等）</b></p> <p><b>一、查阅文献</b></p> <p>目前而言，发动机内部损伤通常使用无损探伤方法检测。无损探伤方法检测技术大体上可以分为两大类，传统检测和基于深度学习的视觉检测。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 传统检测方案中： 丁鹏<sup>[1]</sup>等研究人员利用 SU-SAN 边缘检测算子定位发动机叶片损伤，并采用小波变换对图像进行多尺度分解，以识别损伤特征的频谱分量。Wang 等人<sup>[2]</sup>则开发了一种基于 Haar 特征的自动裂纹检测框架，通过扩展级联分类器进行裂纹识别。</li> <li>2. 以深度学习为代表的视觉检测： Reddy 等人<sup>[3]</sup>就利用卷积神经网络（CNN）对电机叶片损伤图像进行训练，成功实现</li> </ol>

了损伤的自动化检测。李龙浦团队<sup>[4]</sup>结合了 YOLOv3 和 faster R-CNN 模型，他们对模型结构和特征提取进行了改进，从而有效地实现了损伤的识别与定位。李晨炫<sup>[5]</sup>基于 Mask R-CNN 提出了递进式检测网络。该网络通过增加一个二分类检测分支，优化了定位坐标的回归，从而提高了检测的精确度。

综上所述，目前发动机叶片检测主要依靠各种基于视觉方法，而基于深度学习的视觉检测方法展示出了极高的检测性能和泛化性能，因此成为目前主流的技术发展方向。

## 二、理论分析

对于训练样本不足、用于检测的图像背景复杂，本研究考虑提出一种面向背景泛化的发动机叶片损伤一眼学习检测方法。

一眼检测方法：针对缺陷数据量少的问题，通过孪生神经网络，可以利用少量数据，实现对两张图片一致性的实时检测。通过此方法，可以实现对发动机叶片损伤实现一眼学习检测。

背景泛化网络：通过将非缺陷的叶片定义为背景，将缺陷定义为前景，即背景泛化旨在泛化不同非缺陷叶片下寻找缺陷的能力。然而，基于深度学习的表面缺陷检测中，复杂的发动机内部结构会导致背景的空间变化、颜色变化、纹理变化，从而造成识别准确率降低。对于纹理变化、颜色变化，传统卷积神经网络具有强大的特征提取能力和鲁棒性，但在空间变化上，虽然学界早有提出各种方法，如孪生 U-net、DSSSNet<sup>[6]</sup>和 GWnet<sup>[6]</sup>等在处理空间变化上有一定的有效性，但在处理复杂的空间关系上能力欠佳。我们试图在孪生神经网络的基础上，使用 Transformer<sup>[7]</sup>通过自注意力和交叉注意力机制，填补复杂空间关系中背景泛化能力不强的这一空白。

特征匹配方法：在利用背景泛化网络获得了密集特征之后，我们考虑利用内积运算获得相似分数矩阵，再利用双 softmax 算子<sup>[7]</sup>对相似分数矩阵进行归一化，得到用于互近邻（MNN）算法的概率矩阵。MNN 算法的原理是，通过寻找一个点的最近邻，再判断他们是否互为近邻，从而筛选出一个类型的数据，而没有互为近邻关系的点，则认为是噪声。在这里，通过互近邻强制找出同为背景类别的点，并建立匹配关系，然后将样本中有匹配关系的点屏蔽，就可以得到缺陷的特征图。

## 三、实验验证

前期，我们采集了涵盖不同光照条件、拍摄角度及背景环境的涵盖了不同类型、不同程度的发动机叶片缺陷图片，并对其进行了详细的标记处理，具体效果如下：



在完成发动机叶片检测数据集的构建后对本项目中的模型进行了初步部署，旨在验

	<p>证该模型在发动机叶片缺陷检测方面的可行性。初步部署效果如下图所示：</p>  <p>通过初步的测试，我们发现该模型已经具备一定的缺陷检测能力，能够较为准确地识别出叶片上的缺陷，并对其进行分类和标注。然而，我们也发现了一些问题，如模型在复杂背景下的识别准确率还有待提高。这些问题为我们指明了后续的研究方向，也说明了本项目的前期工作具有一定的价值。</p> <p style="text-align: center;">参考文献</p> <p>[1] 丁鹏, 李长有, 马齐爽, et al. 基于小波的航空发动机叶片孔探损伤检测[J].北京航空航天大学学报. 2006, (12): 1435-8.</p> <p>[2] Long W ,Zijun Z . Automatic Detection of Wind Turbine Blade Surface Cracks Based on UAV-Taken Images[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2017,64(9).</p> <p>[3] Reddy A ,Indragandhi V ,Ravi L , et al. Detection of Cracks and damage in wind turbine blades using artificial intelligence-based image analytics[J]. Measurement,2019,147.</p> <p>[4] 李龙浦. 基于孔探数据的航空发动机叶片损伤识别研究 [D]; 中国民航大学, 2020.</p> <p>[5] 李晨炫. 基于 Mask R-CNN 的航空发动机损伤检测方法 [D]; 中国民航大学, 2021.</p> <p>[6] Z. Ling, A. Zhang, D. Ma, Y. Shi, H. Wen, Deep siamese semantic segmentation network for PCB welding defect detection, IEEE Trans. Instrum. Meas. 71 (2022) 1 – 11.</p> <p>[7] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A.N. Gomez, Ł. Kaiser, I. Polosukhin, Attention is all you need: Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 30, 2017.</p> <p>[8] J. Sun, Z. Shen, Y. Wang, H. Bao, X. Zhou, LoFTR: Detector-free local feature matching with transformers: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2021, pp. 8922 – 8931.</p>
研究内容	<p>（包括研究目标和拟解决的关键问题，以及拟采取的研究方法、技术路线等）</p> <p>一、研究目标</p> <p>本项目开展面向背景泛化的一眼学习检测理论和方法，形成“背景泛化抑制+损伤泛化表示”的孔探图像智能检测新方法，实现对在役叶片的孔探检测和损伤的高精度辨识，有助于预测飞机故障、延长服役寿命和提高安全性。</p> <p>二、拟解决的关键问题</p>

本研究的关键科学问题是复杂背景下的罕见异常特征的泛化辨识问题。

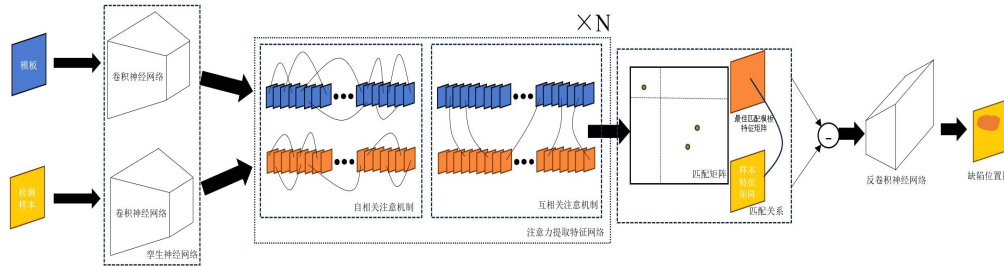
航空发动机孔探检测领域存在一些挑战和问题包括，公开的孔探图像数据集有限，训练模型的数据量不足，直接影响损伤检测算法效果和可靠性。此外航空发动机内部无照明，空间狭小，使用孔探仪采集的图像背景复杂，增加了损伤检测难度。

### 三、研究方法与技术路线：

针对发动机叶片损伤类型繁多、训练样本不足的问题，本研究计划采用一眼学习检测方法。该方法通过孪生的卷积神经网络，学习损伤类型的泛化表示进行匹配，只需要一张无缺陷的模板图片便可以实现对未知缺陷的检测。从而在有限的孔探图像数据集上实现发动机叶片的准确检测。

针对表面缺陷检测中图片背景复杂的问题，本研究计划设计一种基于特征匹配驱动的背景泛化神经网络。这种网络能够直接对前景特征进行匹配，从而消除由空间变化引起的噪声干扰，实现背景特征的空间不变性，最终实现准确的表面缺陷分割。

为了实现以上目标，拟开发一种面向背景泛化的发动机叶片损伤一眼学习检测方法，如下图所示：



虽然发动机叶片的损伤类型繁多且数据集有限，但获取无损伤的正常叶片数据相对简单。因此，我们将无缺陷叶片数据（正样本）作为一眼学习检测网络的模板。

尽管模板和样本的背景特征具有空间变化，但仍具有一对一的匹配关系。首先采用一眼学习方法，令模板图片与样本图片通过基于卷积神经网络（CNN）的孪生网络，得到多个不同尺度的相应特征作为特征匹配信息，学习损伤特征的准确提取。

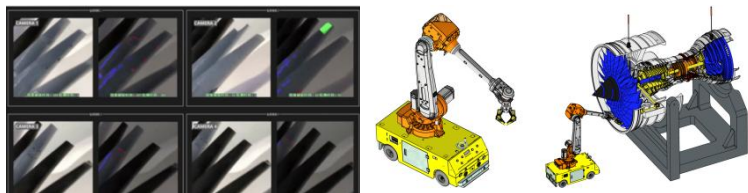

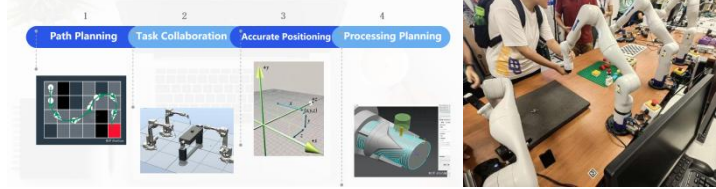
然而，这些特征信息的感受野有限，缺乏样本与模板之间的相关信息。为了解决这个问题，使用背景泛化的方法，将提取出的特征经过位置编码后，通过自注意力和交叉注意力机制，令其获得全局上下文信息。

随后，对拥有全局上下文信息的特征进行特征匹配计算，之后通过 dual-softmax 操作得到匹配相似度矩阵，然后用互近邻算法建立特征之间的匹配关系。基于得到的匹配关系，从模板中特定尺度上的匹配特征减去样本中对应尺度上的匹配特征，以获得无噪声的前景特征（缺陷特征）并通过上采样将缺陷样本的无噪声前景信息解码为损伤的形状与位置。

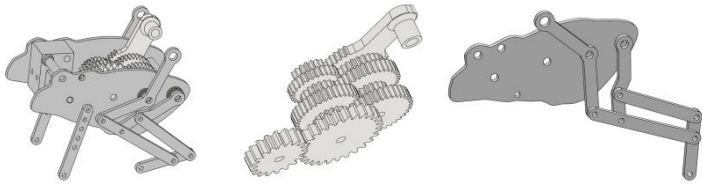
总的来说，这种面向背景泛化的发动机叶片损伤一眼学习检测方法的优势在于：一

	<p>方面通过匹配模板图片和待测图片的特征来消除噪声干扰，从而提高网络在复杂背景下对于缺陷的检测能力；另一方面，一眼学习的思路能够显著提高神经网络算法在新检测场景下的泛化能力，解决了训练样本不足的问题。这对于保障航空安全、提高航空发动机维护与检测效率具有重要的应用价值。</p>
--	---

## 申请人简历


教育经历	<p>(从高中开始;大学期间教育经历需写明所在院系)</p> <p>天津市新华中学(2018年—2021年);</p> <p>华中科技大学机械工程与科学学院(2021年—2025年);</p>
项目经历	<p>(曾参与的科技活动或项目)</p> <p>一、华中科技大学第十三届“求是杯”大学生创业计划竞赛:“智探者——智能探测航空发动机叶片缺陷的专业者”</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 构建发动机叶片缺陷数据集并实现对缺陷的语义分割。</li> <li>· 设计整机原位叶片多孔同步检测平台中的孔探针进给机构。</li> <li>· 设计用以转动发动机叶片的机器人柔性末端夹具。</li> </ul> <div data-bbox="467 920 1217 1111">  </div> <p>二、复杂场景下多零件识别与分割任务</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 部署基于 yolov5 的不同纹理下多零件检测网络。</li> <li>· 部署基于 mask-rcnn 的装配环境下零件分割网络。</li> </ul> <div data-bbox="316 1305 1342 1496">  </div> <p>三、南洋理工大学智能制造学习交流项目</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 设计基于视觉导航的模块化智能无人移动平台。</li> <li>· 学习工业 4.0、创新战略产品开发和智能工厂、人工智能、机器学习等相关课程。</li> </ul> <div data-bbox="467 1693 1185 1881">  </div>



	<p>四、全国大学生机械创新大赛</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 设计一种基于不完全齿轮的高减速比储能一释放装置。</li> <li>· 设计一种基于仿生青蛙的高能效比的多连杆蹬地机构。</li> </ul> 
成绩奖励	<p>本科学业成绩、加权排名和获得奖励情况（如论文、专利、奖项等，高中期间获得全国性学科竞赛奖项也可列出）</p> <p>本科学业加权成绩：88.1 / 100            平均学分绩点：4.28 / 5            加权排名：47 / 242</p> <p>奖项：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 全国大学生先进成图技术与产品信息建模创新大赛（全国一等奖）</li> <li>2. 中国大学生机械工程创新创业大赛创意赛道（全国二等奖）</li> <li>3. 亚太地区大学生数学建模竞赛（全国三等奖）</li> <li>4. 全国大学生机械创新大赛（省级一等奖）</li> <li>5. 全国大学生数学建模竞赛（省级三等奖）</li> </ol>

## 项目承诺


本人承诺遵守学术伦理,承诺遵守国家和学校规定,合法合规使用项目经费;承诺按照申请书制定的目标和计划完成项目;如在项目结题之前毕业,本人承诺按本科生院要求结题。

承诺人: 

2024 年 5 月 22 日

## 导师意见

该项目具有很高的创新性和实用价值。申请者具备较高的思想素质和科研能力,对相关领域有深入的理解和独到的见解。在创新潜力方面,申请者提出了新颖的研究思路和方法,有望在发动机叶片缺陷检测领域取得重要突破。拟开展的研究工作计划周密,目标明确,具有可行性和前瞻性。综上所述,我同意申报该项目。

导师: 

2024 年 5 月 22 日