

中国科学技术大学

本科毕业论文



基于事件相机的火焰检测方法研究

作者姓名：	张皓瑞
学 号：	PB20071475
专 业：	安全工程
导师姓名：	宋卫国 研究员
完成时间：	2024 年 4 月 17 日

摘 要

事件相机是一种新型的, 模拟生物视网膜原理的视觉传感设备, 以完全不同于标准相机的方式工作, 基于事件驱动的方式来捕捉场景中的动态变化。相对于传统相机的每一帧图像, 事件相机只会记录下物体的运动变化信息, 这一特点赋予了它在很多高速, 高变化频率场景下的优秀信息处理能力, 可以广泛应用到多个研究领域。

火焰检测工作, 这一已经被国内外学者研究了数十年的领域, 无疑看起来是一个十分契合事件相机工作特点的场景, 理想情况下, 我们可以通过事件相机实现对火焰全天候的监控, 并利用其独特的特性排除无关背景噪音干扰而提高大幅火焰检测效率。然而, 目前尚未有对利用事件相机进行火焰检测的研究展开讨论, 事件相机在火灾领域的应用暂时还处于一片空白。在这种情况下, 如何应用事件相机准确而迅速地提取相关火焰特征, 并基于此探索该装置在火焰检测研究工作中的可行性, 是一项有重要意义的研究课题。本工作旨在利用事件相机拍摄构建一定规模的火焰数据集, 并在对火焰数据集的静态和动态特征提取和分析工作的基础上, 利用机器学习等多种方法思路, 对基于事件相机的火焰检测算法进行一定深度的研究, 并建立起初步的, 较完整的检测算法框架, 探讨事件相机在火灾检测领域的可行性与应用价值。

首先, 本次使用型号 DAVIS346 的事件相机对多种不同材质的木垛火进行了多角度拍摄, 同时又通过拍摄一定数量的无火焰场景对其进行了补充, 建立起初步的火焰数据集。之后, 在建立的数据集基础上, 本次工作对火焰检测中常见的火焰静态与动态特征进行了罗列与提取, 建立了较完整的事件数据特征提取算法框架, 对部分提取的特征进行了进一步的处理与分析。最后, 在特征提取工作的基础上, 本次工作从机器学习等三个角度分别开展检测算法模型的构建工作, 同时利用评价算法对三个模型的检测精确率, 召回率等客观参数进行了客观的评估, 对三个方向的最终呈现效果进行横向比较。

基于上述工作, 我们最终搭建了基于事件相机的初步火焰检测算法模型, 此模型接收一定长度的火焰的事件数据片段, 通过提取其中的相关静态与动态特征, 经过一系列预处理, 最终返回模型的检测结果, 即是否存在火焰以及包含火焰的检测框位置坐标。实验表明,

关键词：事件相机；火焰检测算法；机器学习

ABSTRACT

The event camera, a novel visual sensing device that mimics the principles of the biological retina, operates in a fundamentally different manner from standard cameras. It captures dynamic changes in a scene using an event-driven approach, distinct from the frame-by-frame imaging of traditional cameras. Unlike traditional cameras that capture every frame of an image, the event camera records only the motion and change information of objects in the scene. This characteristic equips it with excellent information processing capabilities, particularly suitable for high-speed and high-frequency dynamic scenes. Consequently, it finds wide applications across various research domains.

The field of flame detection, which has been studied by scholars both domestically and internationally for decades, undoubtedly appears to be well-suited for the operational principles of event cameras. Ideally, event cameras could enable round-the-clock monitoring of flames and exploit their unique characteristics to eliminate irrelevant background noise interference, thereby significantly improving flame detection efficiency. However, there has been no discussion on utilizing event cameras for flame detection, and their application in the field of fire detection remains largely unexplored. In this situation, the rapid and accurate identification and extraction of various flame characteristics using event cameras, as well as the exploration of their application value and prospects in fire detection, hold significant research value. This work aims to utilize event cameras to capture and construct a substantial-scale dataset of flames. Building upon the static and dynamic feature extraction and analysis of the flame dataset, this research employs various methods, including machine learning, to delve into event camera-based flame detection algorithms. It establishes an initial and relatively comprehensive detection algorithm and explores the feasibility and application value of event cameras in the field of fire detection.

Firstly, using the DAVIS346 model event camera, this study captured multi-angle footage of woodpile fires of various materials. Additionally, a certain quantity of flameless scenes was also captured to supplement the dataset, thereby establishing an initial flame dataset. Subsequently, based on this established dataset, this study enumerated and extracted common static and dynamic features of flames in flame detection,

constructing a relatively comprehensive framework for event data feature extraction algorithms. Further processing and analysis were conducted on some of the extracted features. Finally, building upon the feature extraction work, this study approached the construction of detection algorithm models from three perspectives, including machine learning. Objective evaluations of the detection precision, recall rates, and other parameters of the three models were conducted using evaluation algorithms, facilitating a comparative analysis of the final presentation effects across the three directions.

Based on the aforementioned work, we ultimately constructed a preliminary flame detection algorithm model based on event cameras. This model receives event data segments of a certain length corresponding to flames, extracts relevant static and dynamic features, undergoes a series of preprocessing steps, and ultimately returns the detection results of the model, indicating whether flames exist and the positional coordinates of the detection boxes containing flames.

Key Words: event camera; flame detection algorithm; machine learning

目 录

第一章 绪论	4
第一节 研究背景及意义	4
第二节 国内外研究现状	5
一、火焰成像传感器	5
二、火焰特征研究	6
三、火焰数据集	6
四、火焰检测算法	7
第三节 研究目标和内容	7
第四节 论文章节安排	8
第二章 相关理论概述	9
第一节 事件相机	9
一、工作原理	9
二、对事件数据的处理	10
三、事件相机的独特优势	10
第二节 本章小结	11
第三章 基于事件相机的火焰数据集构建	12
第一节 火焰数据集	12
第二节 本章小结	12
第四章 基于事件相机的火焰特征提取	13
第一节 火焰特征	13
一、提取前的去噪还原	13
二、火焰的静态特征	13
三、火焰的动态特征	13
第二节 本章小结	13
第五章 基于事件相机的火焰检测算法	14
第一节 规则化检测算法	14
第二节 基于机器学习的检测算法	14

第三节 基于深度学习的检测算法	14
第四节 评估与比较	14
第五节 本章小结	14
第六章 工作总结与展望	15
第一节 工作总结	15
第二节 创新点	15
第三节 工作展望	15
第七章 引用文献的标注	16
第一节 顺序编码制	16
一、角标数字标注法	16
二、数字标注法	16
第二节 著者-出版年制标注法	16
参考文献	17
附录 A 补充材料	20
第一节 补充章节	20
致谢	21
在读期间发表的学术论文与取得的研究成果	22

符 号 说 明

a	The number of angels per unit area
N	The number of angels per needle point
A	The area of the needle point
σ	The total mass of angels per unit area
m	The mass of one angel
$\sum_{i=1}^n a_i$	The sum of a_i

第一章 绪论

第一节 研究背景及意义

近年来, 由于受到极端气候的影响, 全球各地频繁发生火灾事故。例如, 2021 年发生在加州的山火面积达到了 9800 公顷, 导致 2300 余人被迫疏散。2019 年至 2020 年期间, 澳大利亚的山火持续了长达半年之久, 造成了巨大的生态灾难, 约有 30 亿只动物死亡, 同时也造成了不计其数的财产损失。这些火灾不仅给人员和经济带来了巨大损失, 同时还释放了大量的温室气体和有害气体, 对自然环境和气候造成了严重影响。因此, 及时发现火灾、采取有效的防控措施对保护人员和国家财产的安全至关重要。

早期的火灾探测方法主要采用传统型检测设备, 如感温、感烟和感光型火灾探测器等。这些设备能够在一定程度上监测环境, 并对可能出现的异常现象及时预警。然而, 由于其工作原理的限制, 这些传感器往往具有灵敏度较低的缺点, 并且容易受到环境影响, 导致误报或漏报的情况。因此, 基于图像的火灾传感器开始被广泛应用。这些传感器通过视频监控系统和相关算法的处理分析, 不仅可以精准地预警和判断早期火灾, 还可以通过实时监控图像来消除误报现象, 具有极大的优势。目前常见的用于火灾检测的传感器主要有 CMOS 和红外两种。CMOS 传感器通过直接的视频传输进行火灾检测, 而红外传感器则捕捉 400 到 1700 纳米波段内的红外光线。然而, 它们仍然存在一些问题: 对于 CMOS 传感器, 视频传输的信息量过于冗余, 通常需要提取前景才能进行后续的火灾特征提取和检测工作, 同时可能出现过曝、欠曝和低对比度等问题; 而红外传感器受到其动态范围的限制, 超出动态范围的高温物体如某些阳光下的物体, 火焰等, 均可能表现为高灰度值的形式而难以有效区分。

为了解决这些问题, 我们引入了一种新型的成像装置——事件相机, 它模仿生物视网膜的原理工作。事件相机与传统相机不同, 它采用基于事件驱动的方式捕捉场景中的动态变化, 而不是记录每一帧图像。事件相机只记录物体的运动变化信息, 如亮度变化和波长变化, 通过 AER 协议输出模拟的生物电信号, 并利用独立的时间空间编码方式存储起来。相较于传统的 RGB 视频传感器, 事件相机具有独特的相素独立异步工作机制, 可以有效消除冗余信息。同时, 其差分成像机制和对数亮度计算可以确保较高的对比度和高动态范围内的感知。可见, 事件相机相比于前两类传统传感器更加的可靠、灵敏。

然而，基于事件相机的新颖性和前沿性，目前在火灾领域的应用尚未被充分探索，缺乏相关研究。所以，如何应用事件相机准确而迅速地提取相关火焰特征，并基于此探索该装置在火焰检测研究工作中的可行性，是一项有重要意义的研究课题。

第二节 国内外研究现状

一、火焰成像传感器

成像传感器的研究目前主要为可见光和红外两类。在基于可见光相机的火灾检测和识别中，通常采用数字图像处理技术。简单来说，这一过程包括对图像进行分割，获取描述火灾图像的信息特征，检测可能的火灾区域生长，并结合图像语义实现火灾的识别。基于可见光相机的检测具有低误报、短延迟、即时显示现场图像、自主独立录像、现场资料保存度高等优点。目前，可见光相机在多类火灾监测上都有广泛应用。例如，小兴安岭等类似森林区，可以利用可见光相机建立网络化监测体系，实现对林区可能火险的较及时的监控与处理。再如目前矿业地区的地下作业，也在逐步投入使用类似的可见光传感器，可以对矿井火灾实现大范围高分辨率，高清晰度的监控，同时可见光相机的使用维护成本也较低，对矿区的环境适应性好，适合这种大规模工作使用。

然而，在火灾监测中，可见光相机仍然面临着一些亟需解决的问题。比如，燃料的材质不同，火焰的颜色就可能发生一些肉眼可见的变化，燃烧时的烟雾过于浓密，可见光谱图像中的火焰区域就可能被遮盖，从而导致一些无法预见的影响。相较之下，红外相机工作原理是对火焰的红外辐射进行检测，就可以弥补可见光类传感器的上述不足。**Burnett** 等人在工作中为红外相机添加了特殊波段的前端滤光片，从而实现了对火焰波长的高度响应。但是，红外相机对环境的适应性就远不如可见光类传感器，常常需要使用者人工手动调整，其成本也远超可见光相机，往往要适当地降低分辨率来大规模布局投入使用，阳光的红外等波段也对它的工作有着不小的影响。

所以，为了弥补两者的不足，本次工作引入了事件相机这一新型传感器，它能在自动剔除无用信息，具备低功耗优势的同时，为火焰检测工作提供更高动态范围与采样率，期望它能够在未来的火焰检测中大放异彩，带来新机遇。

二、火焰特征研究

早期的火焰特征研究主要集中在对火焰颜色特征的提取和描述上。这些工作包括在 RGB 空间等多个不同颜色空间对各通道的火焰颜色分布进行统计与分析。之后,有研究者基于提高火焰识别准确度的目的,逐步将一系列的火焰静态特征引入到火焰检测工作中。如, Yamagishi 等人的研究中,他们在 HSV 空间中分析火焰轮廓,利用极坐标傅里叶变换的方法,提取了波动频率。Bedo 等人的研究中,通过 MPEG-7 视觉描述符,从形状,纹理等角度对相关特征进行了提取工作。此外,为了提取到更加广泛的火焰特性, Rossi 等人利用双目视觉相机拍摄火焰,既可以获取纹理、边缘等此类平面性特征,还能够通过重构分析的方式,分析一些三维信息,如火焰倾斜度和深度。同时,也有一些学者通过逐帧提取的方法,分析火焰的动态特征。例如, Chen 等人提出一种基于火焰多种特征结合的视频火焰识别方法,采用 RGB 和 HIS 模型提取火焰候选区域 k ,结合火灾的动态闪烁性算法加以识别。Dimitropoulos 等人在他们的工作中,综合时空特征,研究纹理的动态变化,且构建能量方程模型对燃烧加以描述。

在基于可见光相机的研究工作开展的同时,红外相机技术也在投入应用。在近红外立体视觉系统的帮助下, Rossi 等人对火点进行三维建模,初步可实现对位置,表面,速度等几何特征的提取。秦重双对红外图像进行了滤波和形态学处理,实现对偏心率等的提取。杜志伟利用 K 主曲线拟合,进行了轮廓提取工作,并基于此构建隐马尔可夫模型,预测火焰闪烁的动态过程。

三、火焰数据集

火焰数据集,往往被认为是火焰特征提取分析工作和检测识别的核心所在,目前的火焰数据集绝大部分是可见光相机拍摄的。常见的有: BoWFire 数据集,该数据集包含了 199 张火焰图像和 267 幅正常图像,是最常用的火焰数据集; Flickr-Fire 数据集,该数据集从网络收集了 5962 张图片,每幅图像都由人工标注是否包含火焰,并将存在火焰的图像分为车辆火灾、房屋火灾和森林火灾三类。同时,为了对实时拍摄这一场景进行更加准确的模拟, MIVIA, FurgFire 这两个数据集又收集了很多真实火灾视频,这些视频大多数是使用手持设备或无人机拍摄的,其中包含了多类的光照环境、不同的拍摄距离、大量的运动方式等,这些情况都会给识别工作带来新的影响与挑战。

事件相机,作为一种新型传感器,我们在摘要中也提及到了目前缺乏在火灾

检测领域的应用与研究，也就更不必说效果优良的公开数据集。所以，制作基于事件相机的火焰数据集并讨论其应用价值，是很必要的。

四、火焰检测算法

早期的学者研究工作中，主流是利用颜色特征实现对图像中火焰的识别，例如人为对颜色空间设置一个区分阈值。此外，还有一部分研究工作使用光流法，帧差法以及高斯混合模型等，以最直接的方法进行识别。但是以上两类都共同存在低分割精度的缺陷，前者会被相似颜色物体干扰，后者会被一系列移动物体干扰。要解决这些问题，需要基于学习的一系列方法，如 Nalawade 利用 Chan-Vese 算法对全局属性进行提取（强度、区域面积等），并通过设置能力最小方程完成了火焰和背景的分离；Tian 等人在研究工作中，利用高斯混合模型和 SVM 对图像区域进行分类识别；Toreyin 等人在研究工作中构建了马尔可夫模型，以火焰的颜色运动与闪烁为参照标准实现区分。

随着深度学习方法在各个领域掀起深刻的变革，很多学者尝试将其引用到火灾检测工作中。Wang 等人先在 RGB 通道进行初步的筛选，得到一系列可能有火焰的候选区，在训练 CNN 模型的基础上对其分类。张大胜等人的研究中，则利用 YOLO 网络，按照可能区域提取，火焰特征提取，基于提取特征进行判断的顺序进行了检测工作。按照类似的工作思路，kim 利用 Faster R-CNN 和 LSTM 进行了分类检测工作。基于学习的工作思路是确定的，在提取初步候选区后，间接将相关特征参数或者直接将图象送入模型进行分类识别。而事件相机由于其独特的工作原理机制，排除了大量无关干扰，提取候选区的工作被大大简化，这方面有着独特的先天优势。

第三节 研究目标和内容

本文是对事件相机在火灾检测领域应用的探索，期望达到如下目标：

1. 拍摄一定规模的数据集，实现利用事件相机对火焰特征进行提取，包括静态特征和动态特征。
2. 基于 1 中特征建立初步的，针对事件相机的较完整的火焰检测算法框架。
3. 对建立的火焰检测算法的准确度与效率进行评估，探讨事件相机在火灾检测领域的可行性与应用价值。

第四节 论文章节安排

本文内容安排如下所示：

第一章，绪论，对目前火焰检测领域的多方面研究现状进行了总结，同时介绍了引入事件相机的优势。

第二章，相关理论概述，对事件相机的基本原理作了一个较详细的阐述。

第三章，基于事件相机的数据集构建，对本次工作利用的事件相机数据集的拍摄构建过程进行了较详细的介绍。

第四章，基于事件相机的火焰特征提取，详细介绍了本次工作如何从事件数据中还原火焰区域并提取常用的火焰静态和动态特征，构建提取算法框架，同时也对其中的一些特征进行了初步分析。

第五章，基于事件相机的火焰检测算法，详细介绍了本次工作基于三个方向对火焰检测算法框架的构建以及同时对算法进行的准确度与效率上的客观指标评估。

第六章，工作总结与展望，对本次工作的实验结果与创新点进行总结，同时对其中的缺陷不足提出未来的改进展望。

第二章 相关理论概述

1970 年 Fukushima 等人在对生物视网膜结构的研究工作中,展示了首个电子视网膜离散模型,这种新颖的获取信息的方式很快引起了相关领域学者们的兴趣,但是由于陌生的异步逻辑领域以及像素响应特征的不均匀性,事件相机的发展一直处处受限,一直到 2008 年首部事件相机(DVS)问世,也是世界上第一台商用事件相机。此后,在经过了数十年的发展,事件相机已经开发出了多种版本款式,应用针对不同的工作任务与场景,如 ATIS,DAVIS,CeleX,本次我们引入工作的是型号为 DAVIS346 的事件相机,后续都会在这款相机的基础上进行工作的开展,后续不再进行累述。

第一节 事件相机

一、工作原理

我们在前面也粗略地提起到了事件相机与传统可见光相机在原理与机制上的巨大不同。传统的可见光传感设备为一次成像,图象是以一个固定的帧率被设备输出,每次成像过程中,相机的各个相素会进行电荷收集并在曝光流程结束后将像素上的电荷信息转化为数字信号输出至外界。这种工作原理下,拍摄高速运动物体时缺陷就极为明显,图像很容易就会出现模糊与失真。事件相机就是这样一部为了解决该问题的,仿生物视网膜结构模型的传感设备,它由生物视网膜细胞具有对亮度瞬变的高敏感性获得启发,每一个像素独立地,仅会在对数亮度值的变化超出阈值时进行一次输出。这种机制,给予了这类传感器更广的动态范围,也自动消除了环境中非变化物体等产生的冗杂信息。

事件相机内部主要工作模块的电路逻辑图如图所示,主要由差分电路,感光器和比较仪三部分组成,实现对生物视网膜结构的模拟。对于生物而言,感受到光线后,它视网膜上的受体细胞受到相应的刺激,就会自发将光信息转变成神经信息,后段细胞还会分别筛选出亮部和暗部,经过神经节细胞的处理后,信息就传递到了大脑皮层,呈现为视觉。而在事件相机中,光信息在感光器电路中会转换成电信号,它会通过放大器,最终由比较器根据亮度变化进行分离,将光信息转化为“事件”信息,最后在经过一系列的后续处理后,转为图像输出。

假定亮度为 I , 事件相机中的亮度定义都是其对数值,即 $L=\log(I)$, 那么在某

一个时刻,某一个像素点处的亮度改变就可以记为

其中,是一个极小的时间间隔,如果亮度的变化超出了相机所设定的阈值 C ,事件就会触发,这个过程也可以表示为

其中,表示极性,也就是亮度发生了正向(ON)或者负向(OFF)变化,我们的事件数据就以这样一个形式输出出来,可以看到,我们后续工作中所提起的“事件”,往往就是这样的一个四维向量(空间坐标,时间坐标,极性)。

二、对事件数据的处理

由上面我们的叙述可见,事件数据是一种新颖的数据储存类型,对其的处理和使用方式也是使用事件相机的核心。其中一种常用方法便是根据事件的空间和时间坐标将其一一映射为 3D 点云,这里,如图所示,我们展示了这种“事件”最为直观的视觉效果,取一段时间范围内所有的事件点云(其中颜色是对极性的表示),将其全部映射堆叠后,可以很直观地看出,成功地呈现了图像的视觉效果。这里值得一提的是,3D 事件点云是不满足旋转不变性假设的,事件之间在时空上是存在着因果联系。

另一种方法是舍弃掉时间维度,从而将三维空间转换为二维图像,这种方法会为传统的图像处理算法带来极大便利。我们可以每次按照一定的时间间隔提取一定数量的事件,类似传统的可见光传感器,按照前后次序定义帧数,从而也可以得到一帧帧的图象,如图所示,从而实现对传统算法的适配。

此外还有一些很独特,针对性较强的方法,例如将事件作为脉冲信号,送入相应的网络,这里不再详细介绍。这些独特的方法也在一些特定的场景发挥着优秀作用,为事件相机应用带来了更多契机。

三、事件相机的独特优势

基于上述我们介绍的事件相机的独特机制,事件相机相对于传统可见光传感器有着下列的先天优势:

1. 高时间分辨率。由于各相素独立工作的机制,省去了传统可见光相机的很多中间流程,可以达到微秒级分辨率,几乎不会出现运动模糊。
2. 低数据量。每个像素当且仅当变化超出阈值才会输出一次,很多无用的干扰信息都会被机制自动剔除,因此事件相机的输出数据远远低于传统设备,在处理速度等很多方面就有着很大优势。
3. 低功耗。由于 2 的原因以及事件相机不需要模数转换器读取像素,后续的

处理功耗也自然较低，往往是毫瓦级，与传统设备有百倍以上的差距。

4. 高动态范围。由于采用对数制光强，事件相机往往可以达到传统相机 2 倍以上动态范围，可以适应很多欠曝和过曝场景。

第二节 本章小结

本章我们详细介绍了事件相机的工作原理，介绍了它的独特机制和数据形式，介绍了应用工作中对事件数据的一些常见处理方法，并且介绍了其相对于传统相机的几个显著优点。后面的章节，我们将利用事件相机开展并介绍本次的主要工作进程。

第三章 基于事件相机的火焰数据集构建

第一节 火焰数据集

第二节 本章小结

第四章 基于事件相机的火焰特征提取

第一节 火焰特征

- 一、提取前的去噪还原
- 二、火焰的静态特征
- 三、火焰的动态特征

第二节 本章小结

第五章 基于事件相机的火焰检测算法

第一节 规则化检测算法

第二节 基于机器学习的检测算法

第三节 基于深度学习的检测算法

第四节 评估与比较

第五节 本章小结

第六章 工作总结与展望

第一节 工作总结

第二节 创新点

第三节 工作展望

第七章 引用文献的标注

模板使用 `natbib` 宏包来设置参考文献引用的格式，更多引用方法可以参考该宏包的使用说明。

第一节 顺序编码制

一、角标数字标注法

<code>\cite{knuth86a}</code>	⇒	[1]
<code>\citet{knuth86a}</code>	⇒	Knuth ^[1]
<code>\cite[42]{knuth86a}</code>	⇒	[1] ⁴²
<code>\cite{knuth86a,tlc2}</code>	⇒	[1-2]
<code>\cite{knuth86a, knuth84}</code>	⇒	[1,3]

二、数字标注法

<code>\cite{knuth86a}</code>	⇒	[1]
<code>\citet{knuth86a}</code>	⇒	Knuth [1]
<code>\cite[42]{knuth86a}</code>	⇒	[1] ⁴²
<code>\cite{knuth86a,tlc2}</code>	⇒	[1-2]
<code>\cite{knuth86a, knuth84}</code>	⇒	[1, 3]

第二节 著者-出版年制标注法

<code>\cite{knuth86a}</code>	⇒	Knuth (1986)
<code>\citep{knuth86a}</code>	⇒	(Knuth, 1986)
<code>\citet[42]{knuth86a}</code>	⇒	Knuth (1986) ⁴²
<code>\citep[42]{knuth86a}</code>	⇒	(Knuth, 1986) ⁴²
<code>\cite{knuth86a,tlc2}</code>	⇒	Knuth (1986); Mittelbach et al. (2004)
<code>\cite{knuth86a, knuth84}</code>	⇒	Knuth (1986, 1984)

参 考 文 献

- [1] KNUTH D E. Computers and typesetting: A the \TeX book[M]. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1986.
- [2] MITTELBACH F, GOOSSENS M, BRAAMS J, et al. The \LaTeX companion[M]. 2nd ed. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 2004.
- [3] KNUTH D E. Literate programming[J]. The Computer Journal, 1984, 27(2): 97-111.
- [4] LAMPORT L. \LaTeX : a document preparation system[M]. 2nd ed. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1994.
- [5] 孙立广. 极地科学前沿与热点: 顶级期刊论文摘要汇编 (1999—2010) [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2016: 222.
- [6] 李永池. 张量初步和近代连续介质力学概论[M]. 2 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2016: 61.
- [7] 刘景双. 湿地生态系统碳、氮、硫、磷生物地球化学过程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2014.
- [8] CRAWFORD W, GORMAN M. Future libraries: Dreams, madness, & reality [M]. Chicago: American Library Association, 1995.
- [9] International Federation of Library Association and Institutions. Names of persons: National usage for entry in catalogues[M]. 3rd ed. London: IFLA International Office for UBC, 1977.
- [10] 程根伟. 1998 年长江洪水的成因与减灾对策[M]//许厚泽, 赵其国. 长江流域洪涝灾害与科技对策. 北京: 科学出版社, 1999: 26-32.
- [11] 陈晋镛, 张惠民, 朱士兴, 等. 蓟县震旦亚界研究[M]//中国地质科学院天津地质矿产研究所. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 1980: 56-114.
- [12] BUSECK P R, NORD G L, Jr., VEBLEN D R. Subsolidus phenomena in pyroxenes[M]//PREWITT C T. Pyroxenes. Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 1980: 117-212.
- [13] FOURNEY M E. Advances in holographic photoelasticity[C]//American Society of Mechanical Engineers. Applied Mechanics Division. Symposium on Applications of Holography in Mechanics, August 23-25, 1971, University of Southern

- California, Los Angeles, California. New York: ASME, 1971: 17-38.
- [14] 孔庆勇, 郭红健, 孔庆和. 我国科技期刊的金字塔分层模型及发展路径初探[J]. 中国科技期刊研究, 2015, 26(10): 1100-1103.
- [15] 杨洪升. 四库馆私家抄校书考略[J]. 文献, 2013(1): 56-75.
- [16] 于潇, 刘义, 柴跃廷, 等. 互联网药品可信交易环境中主体资质审核备案模式[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(11): 1518-1521.
- [17] DES MARAIS D J, STRAUSS H, SUMMONS R E, et al. Carbon isotope evidence for the stepwise oxidation of the proterozoic environment[J]. Nature, 1992, 359: 605-609.
- [18] HEWITT J A. Technical services in 1983[J]. Library Resource Services, 1984.
- [19] 丁文详. 数字革命与竞争国际化[N]. 中国青年报, 2000-11-20(15).
- [20] 姜锡洲. 一种温热外敷药制备方案: 中国, 88105607.3[P]. 1989-07-26.
- [21] 万锦坤. 中国大学学报论文文摘(1983-1993)(英文版)[DB/CD]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1996.
- [22] MLOT C. Plant physiology: Plant biology in the Genome Era[J]. Science, 1998, 281: 331-332.
- [23] 孙玉文. 汉语变调构词研究[D]. 北京: 北京大学, 2000.
- [24] CAIRNS B R. Infrared spectroscopic studies of solid oxygen[D]. Berkeley: Univ. of California, 1965.
- [25] 中国力学学会. 第3届全国实验流体力学学术会议论文集[C]. 天津, 1990.
- [26] ROSENTHALL E M. Proceedings of the Fifth Canadian Mathematical Congress, University of Montreal, 1961[C]. Toronto: University of Toronto Press, 1963.
- [27] BAKER S K, JACKSON M E. The future of resource sharing[M]. New York: The Haworth Press, 1995.
- [28] 尼葛洛庞帝. 数字化生存[M]. 胡泳, 范海燕, 译. 海口: 海南出版社, 1996.
- [29] 杨宗英. 电子图书馆的现实模型[J]. 中国图书馆学报, 1996(2): 24-29.
- [30] 刘斌. 力学[M]. 合肥, 2014: 24-29.
- [31] 刘文富, 顾丽梅. 网络时代经济发展战略特征[J/OL]. 学术研究, 2000, 21(4): 35-40. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C44YLTIOAiTRKgchrJ08w1e79zTD32bjb4xSTlZqRyr7rTlf7ok1AFpatLUPx8UT1OWFBNkw65sK7UwjBq66SQOt&uniplatform=NZKPT>.
- [32] 肖渡, 沈群红, 张芸, 等. 知识时代的企业合作经营[M/OL]. 北京: 北京大学出

- 版社, 2000: 67-69. <https://book.douban.com/subject/1632549/>.
- [33] The White House. Technology for economic growth[R/OL]. Washington, 1993. <https://clintonwhitehouse6.archives.gov/1993/11/1993-11-04-technology-for-economic-growth-table-of-contents.html>.
- [34] HUTSON J M. Vibrational dependence of the anisotropic intermolecular potential of argon-hydrogen chloride[J/OL]. J Phys Chem, 1992, 96(11): 4237-4247[2023-05-31]. <https://doi.org/10.1021/j100190a026>.

附录 A 补充材料

第一节 补充章节

补充内容。

致 谢

在研究学习期间，我有幸得到了三位老师的教导，他们是：我的导师，中国科大 XXX 研究员，中科院 X 昆明动物所马老师以及美国犹他大学的 XXX 老师。三位深厚的学术功底，严谨的工作态度和敏锐的科学洞察力使我受益良多。衷心感谢他们多年来给予我的悉心教导和热情帮助。

感谢 XXX 老师在实验方面的指导以及教授的帮助。科大的 XXX 同学和 XXX 同学参与了部分试验工作，在此深表谢意。

2024 年 4 月

在读期间发表的学术论文与取得的研究成果

已发表论文

1. A A A A A A A A A
2. A A A A A A A A A
3. A A A A A A A A A

待发表论文

1. A A A A A A A A A
2. A A A A A A A A A
3. A A A A A A A A A

研究报告

1. A A A A A A A A A
2. A A A A A A A A A
3. A A A A A A A A A