

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005363

边缘 AI 的霜雪识别系统设计与实现<sup>\*</sup>胡 敏<sup>1</sup> 裴晓芳<sup>2,3</sup> 顾平月<sup>4</sup> 花卫东<sup>4</sup>

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 滨江学院 无锡 214105;

3. 南京信息工程大学 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044;

4. 江苏省无线电研究所有限公司 无锡 214073)

**摘 要:** 为提高霜雪识别系统的识别率,开展了基于边缘 AI 的霜雪识别系统设计。综合海思嵌入式处理器 Hi3559A 高算力、低功耗特点,硬件部分采用模块复用的方法降低功耗和资源消耗,软件部分,从模型训练、模型量化、模型部署入手对 MobileNetV2 图像分类网络和 ISP 自适应处理算法进行改进,最终识别率 99.7%,预处理时间 0.3 s,图像分类时间 0.8 s,模组平均功率 2 W,鲁棒性好、性能稳定。由此可见 Hi3559A 智能相机模组可有效纠正雪深探测仪的疑误数据。

**关键词:** 边缘 AI; Hi3559A; 低功耗; MobileNetV2; ISP 自适应处理; 模组

**中图分类号:** TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.2

## Design and implementation of frost and snow recognition system for edge AI

Hu Min<sup>1</sup> Pei Xiaofang<sup>2,3</sup> Gu Pingyue<sup>4</sup> Hua Weidong<sup>4</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Binjiang College, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 214105, China;

3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

4. Jiangsu Radio Research Institute Co., Ltd., Wuxi 214073, China)

**Abstract:** In order to improve the recognition rate of the frost and snow recognition system, a frost and snow recognition system powered by edge AI was designed. The design comprised the character of Hi3559A both excellent computation and low power consumption. The hardware used reduce power and resource consumption by Module reuse. For the software, by integrating the characteristics of the high computing power of Hisi, embedded processors Hi3559A and IMX334, and starting from model training, model quantization and model deployment, the author improved the MobileNetV2 image classification network and ISP adaptive processing algorithm. The final recognition rate reached 99.7%, pre-processing time reached 0.3 s, image classification time reached 0.8 s, module average power was 2 W, and has its properties being robustness and stable. Hence, the Hi3559A intelligent phase machine module can effectively correct the inaccuracy of the data from the snow depth detector.

**Keywords:** edged AI; Hi3559A; low power consumption; MobileNetV2; ISP adaptive processing; module

## 0 引 言

随着气象现代化的迅猛发展,观测雪的方法多种多样,具有代表性的方法有:通过渐近辐射传输(asymptotic radiative transfer, ART)模型反演积雪反照率<sup>[1]</sup>、分析雪的辐射特性识别积雪<sup>[2]</sup>、采用激光相位法探测雪深<sup>[3]</sup>、根据积

雪的光谱反射特性识别雪面覆盖情况<sup>[4]</sup>,许多地区都采用江苏无锡无线电研究所有限公司自主研发的降水降雪地面探测(ground-based instrument shower-snow, DSS1)型雪深探测仪<sup>[3]</sup>。通过激光测距单元利用激光单点测距原理测量积雪深度,可测量范围是 0~200 cm,最大允许误差为 ±1 cm,分辨力为 0.1 cm<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2020-11-16

<sup>\*</sup> 基金项目:南京信息工程大学滨江学院课题(2019bjyng006)项目资助

• 142 •

一方面雪深探测仪对于 0~1 cm 的雪深测量误差较大,另一方面冬季气温降至冰点附近会出现冻雨现象,随着土壤的结冰,土壤表面的水势逐渐下降,大量水分集中在土壤表面形成厚厚的冰晶体发生冻胀作用。冻胀效应的发生导致测雪板被轻微顶起,激光雪深探测仪测量结果出现少许误差。

本文介绍了一种基于边缘人工智能(edged artificial intelligence, edged AI)的霜雪识别技术,能够自动识别测雪板上是否有雪,为雪深观测仪提供是否存在积雪的信息,从而解决雪深误报问题,提高雪深观测数据的可靠性。

## 1 系统硬件设计

如图 1 所示,本文设计的微型、低功耗智能 AI 模组由 Hi3559A、电源模块、串口模块、图像传感器模块、以太网模块、时钟电路、随机存储器(random memory, RAM)、闪存(Flash)模块组成。整个设计均采用小型元器件极大减小了 PCB 体积。

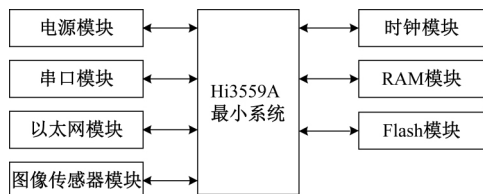


图 1 系统原理

### 1.1 Hi3559A 模块

Hi3559A 模组分为 2 部分:Hi3559A 和 IMX334。如图 2 所示,Hi3559A 收到雪深探测仪发送的偶数脉冲信号之后自启动并控制 IMX334 自动聚焦、调节曝光、设置图像大小获取最优质的图像,然后将图像放入芯片神经网络推理引擎(neural network inference engine, NNIE)模块与样本图像进行匹配找出所属类别,最后将分类结果通过通用型输入输出接口(general purpose input/output, GPIO)发送给雪深探测仪,等待雪深探测仪发送的奇数脉冲信号自动关机。

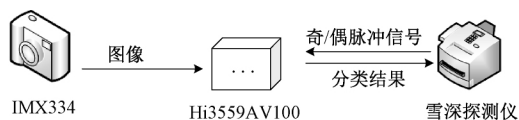


图 2 Hi3559A 结构示意图

Hi3559A 最小系统由嵌入式处理器 Hi3559ARFCV100、时钟电路、RAM 模块、FLASH 模块、组成。如图 3 所示,仅使用了系统工作所需的时钟,晶振为 24 MHz。

RAM 模块提供了程序运行所需要的临时空间<sup>[6]</sup>,沿用海思官方原始设计由 4 个 16 bit DDR 组成,保证了系统处理大量数据时的稳定性和高速度;Flash 内存用于存储

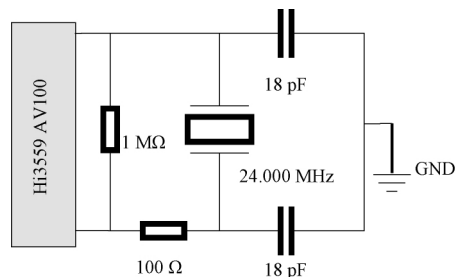


图 3 工作时钟电路原理

引导加载程序、操作系统、应用程序,在断电条件下仍能保持所存储的数据信息<sup>[7]</sup>。Hi3559A 的 FLASH 控制器支持串行通信接口(serial peripheral interface not or flash, SPI NOR FLASH)、地址复用串行通信接口(serial peripheral interface not and flash, SPI NAND FLASH)、并行 NAND FLASH 和嵌入式多媒体控制器(embedded multimedia controller, EMMC)<sup>[8]</sup>。本系统使用的是 SPI NOR FLASH,从片外 eMMC 存储空间启动,芯片型号为 MT40A512M16JY-075E,16 GB 存储空间,1.8 V 电压供电,接口为 SPI 接口,工作温度范围为-40℃~85℃。

### 1.2 电源模块

电源模块负责提供系统所需的各路电压<sup>[9]</sup>。本文设计的相机模组需要 12、5、3.3、2.5、1.8、1.2、0.8 V 共 7 种电压规格,用以维持系统正常工作,系统中各直流电压用途如表 1 所示。

表 1 直流电压使用表

电压/V	描述
12.0	外接直流电源
5.0	稳压直流电源
3.3	图像传感器、串口、CPU 的 IO 供电
2.5	为 DDR 供电
1.8	为 CPU 的 PMC 供电
1.2	为 DDR 供电
0.8	为 CPU 供电

如图 4 所示,本文采用 12 V 可充电锂电池作为系统供电来源,12 V 锂电池通过降压转换芯片 MP8759 和 MP1495S 得到 5 V 和 3.3 V 直流电压。3.3 V 直接给 imx334 供电,5 V 通过 RT9065 转换为 2.5 V,通过 MP2162 转换为 1.2 和 1.8、2.5 与 1.2 V 同时给 DDR 供电。5 V 通过 MP8759、MP2145、MP2143 转换为 0.8、1.8、1.2 和 0.8 V 同时给 Hi3559A V100 内核供电。

MP8759GD 是一款完全集成的高频,同步整流,降压型,开关模式转换器。4.5~26 V 的宽输入范围,输出可在 0.6 V 范围内调节,超声波模式(ultrasonic mode, USM),117 μA 的低静态电流,8 A 连续输出电流,10 A 峰值输出

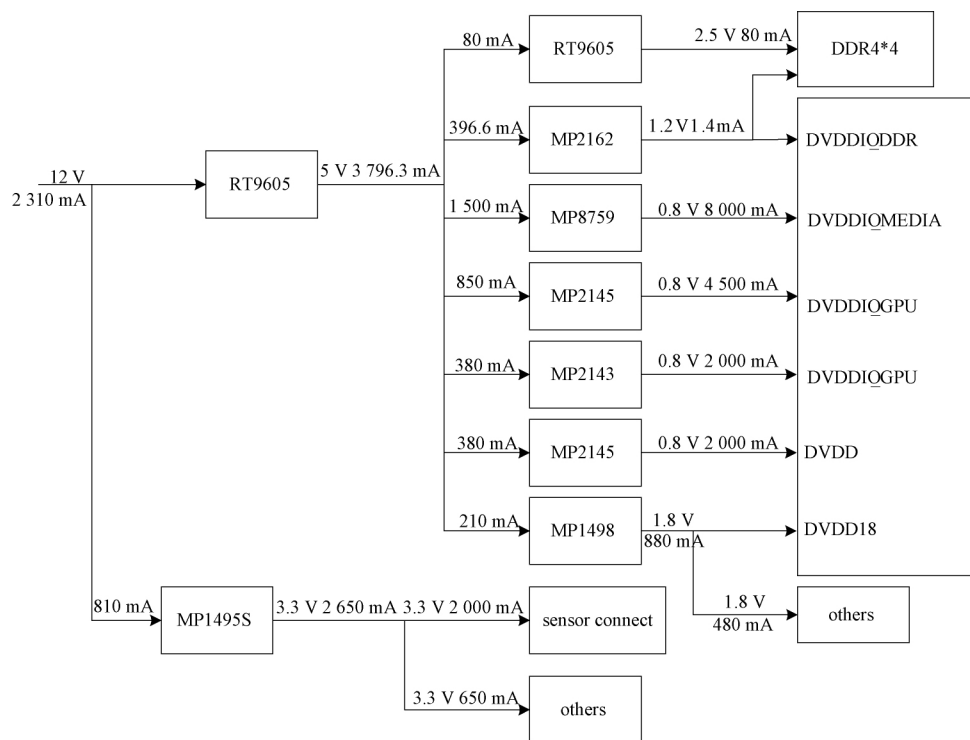


图 4 电源结构

电流,快速瞬变的自适应固定开启时间(constant on time, COT),域控(domain control, DC)自动调谐循环,内部软

启动。如图 5 所示,为 MP8759GN 将 12 V 转成 5 V 电路图。

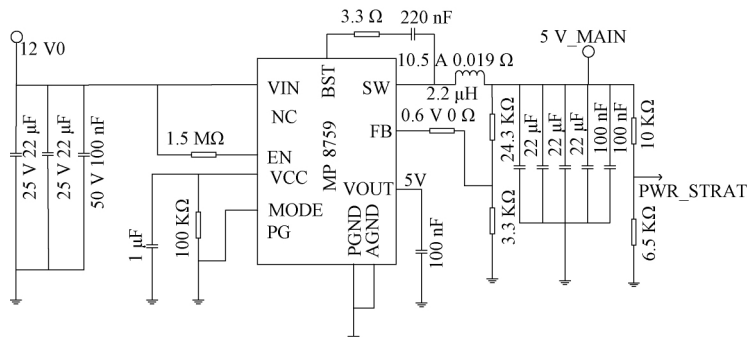


图 5 12 V 转 5 V 电路原理图

通过调整滤波电感,可以有效提高电压转换效率,由图 6 可知,电压转换效率随着滤波电感和输出电压的改变而改变,当输入电压 12 V,输出电流 5.7 A 时,电感值越大,电压转换效率越高,本文通过调整图 5 反馈引脚 FB、开关输出引脚 SW、GND 之间的 T 型电阻网络的电阻值实现不同电压之间的转换。

### 1.3 串口模块与图像传感器模块

异步串行接 (universal asynchronous receiver/transmitter, UART)简称串口<sup>[10]</sup>。Hi3559AV100 通过串口与计算机进行通信,片内的串口属于 TTL 电平,用于实现系统开发阶段的程序调试、根文件系统显示、命令显示、

命令输入、以及打印程序流程进度。

本文通过嵌入式处理器 Hi3559AV100 完成对图像传感器信息的采集,采用的图像传感器为 imx334。索尼 IMX334LQR-C 是一个对角线 8.86 mm CMOS 有源像素型的固态图像传感器,使用时需要手动调节,具有方形像素阵列 3840×2160 和 8.42 M 有效像素。这款芯片采用模拟电源 2.9 V、数字电源 1.2 V 和并行接口 1.8 V 三联电源,平均功耗 7 W、高灵敏度、低暗电流。

## 2 系统软件设计

软件部分包括:自适应图像处理(image signal auto

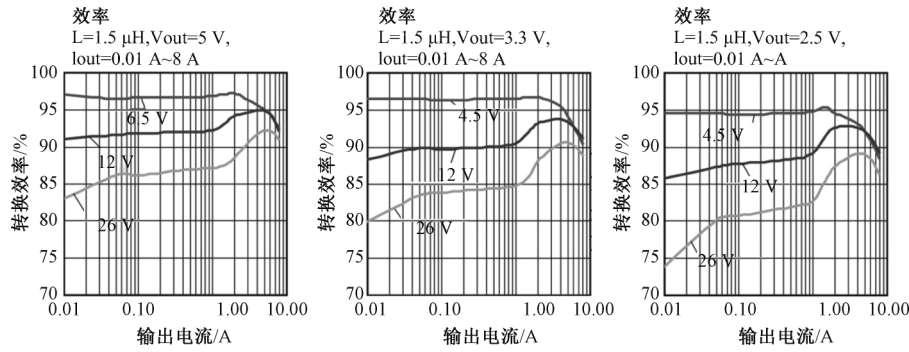


图 6 MP8759GD 输出电流与电压转换效率的关系

processing, Auto ISP) 模块、视频图形子系统 (video graphic sub-system, VGS) 模块、深度学习模块、GPIO 模块组成。如图 7 所示, 模组收到偶数脉冲信号自启动并获取当前环境下的 ISO 和曝光参数, 根据捕捉到的信息启动 ISP 自适应模块调节 sensor 获取最优图像, 然后将图像放入 VGS 模块重置为合适尺寸, 将图像重新编码为 YUV420SP 放入 NNIE, 最后将分类结果通过 GPIO 输出到雪深探测仪, 等待雪深探测仪的下一条指令。

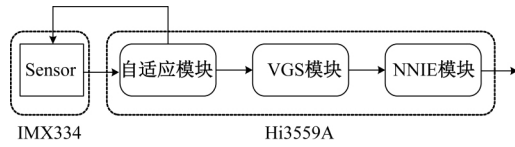


图 7 系统软件结构

## 2.1 ISP 自适应模块

多次实验发现, 在外界拍摄照片时会遇到诸多不可控因素, 例如: 霜、露水、雨后异物等附着在镜头上、夜间拍摄光线较弱、大风场景下镜头抖动等问题, 使得拍摄到的照片出现模糊、光线不均, 海思自适应调节模块在启动视觉输入端口 (visual input, VI) 之前, 芯片中的 ISP 模块会根据当前场景中的光线明暗变化以及预先设置的码率自动更新自动曝光 (automatic exposure, AE)、锐化 (sharpen)、自动白平衡 (automatic white balance, AWB)、数字降噪 (3 digital noise reduction, 3DNR) 等参数, 以达到采集得到的图像效果相对于当前场景最优。如图 8 所示, 为自适应模块的工作流程图。系统初始化之后打开图像传感器, 根据相关参数调节像素值获取最佳图像, 其中 ini 文件用于存储校准后的 AE、sharpen、AWB 等参数, 拍摄照片时系统将 ini 文件中的参数临时写入寄存器并保存一帧图像, 拍摄完成后寄存器清零。中间断电, ini 文件中的数据自动保存, 等待下次启动时校准。

如图 9 所示, 为自适应模块的工作原理示意图, 首先获取 sensor 中的初始参数 (本文使用的初始参数为出厂设置), 然后开启另一个线程循环检测当前场景中的感光度 (light sensibility ordinance, ISO) 和曝光值, 当数值没有变

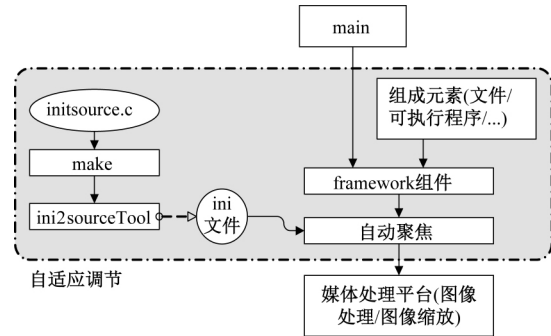


图 8 自适应模块工作流程

化时, 根据检测到的数值修改 Sharpen、AE、3DNR 等参数并写入寄存器, 最后从 VI 获取一帧 YUV。

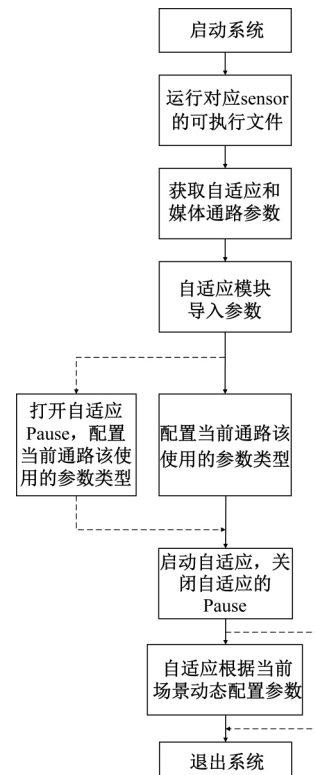


图 9 自适应处理模块工作原理

## 2.2 VGS 模块

图像采集与缩放过程,如图 10 所示。

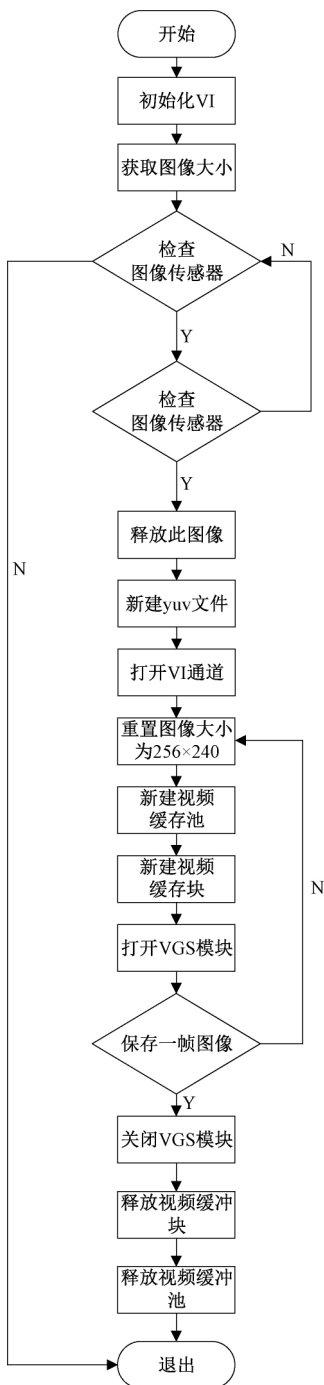


图 10 预处理流程

从图 10 可以看出,第一个循环用于从 VI 获取 sensor 的信息和图像大小,直到确定获取到正确的信息为止,当系统检测到获取的信息正确则跳出循环,另一个循环用于保存和缩放图片,首先给图片分配内存,通过接口启动硬件将新设置的图片的长和宽映射到对应的地址,最后将获取的像素值存储到对应的地址上,不需要的像素丢掉,保

存图片。为了放置像素丢失或混淆,这两个循环中间必须设置一个缓冲池,用于临时存储获取的像素。此外,程序在每一个步骤之后,均设置判断代码,如果发现某一操作失败会立即报错并退出,有效提高了程序的调试效率。

## 2.3 深度学习模块

在海思 SDK 中,已经部署完成 Caffe1.0<sup>[11]</sup> 框架的图像分类模型,与本实验使用的框架完全相同,使用默认设置即可,但是并不完整,没有打印输出结果,本实验共修改 4 部分:待测图片和 WK、输出结果、退出系统,在传入 bgrp 文件和 wk 模块中,待测图片直接从 VI 获取,并替换原有的 wk;在输出结果模块中根据自己的需求打印出待测试图片与各类样本的相似度,退出系统模块中,输出退出步骤,具体步骤如图 11 所示。

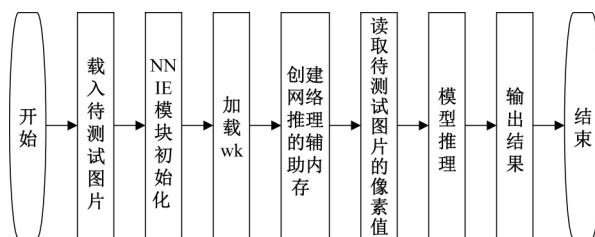


图 11 NNIE 工作流程

传统机器学习包括:训练和推理,完全在云端运行,然而这种模式数据传输成本高、不允许高延时,较难做到数据保密,因此受到诸多限制<sup>[12]</sup>,Hi3559A 是海思在 2018 年推出的低功耗、轻量化的边缘侧方案,采用云端训练边缘推理的作业方式,边缘端根据实际应用需求独立处理预先设定的命令完全脱离服务器,有效降改善了传统机器学习的弊端。

如图 12 所示,为 NNIE 软件开发流程,在离线条件下使用 Caffe1.0 训练,设置 RuyiStudio 不同的模式将 \*.caffemodel 转化为 \*.wk, wk 文件可在板端运行。开发前期,需要对模型的精度性能带宽进行初步评估,符合基本需求之后转移到 RuyiStudio 量化仿真,确定功能完整之后,才能移植到板端。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验环境

实验采用的计算机环境是 Ubuntu14.04,基于 x64 的处理器,CPU 是 Intel(R) Core(TM) i5-8250 CPU@1.60 GHz 1.80 GHz 内存 4 GB,编程语言 C/C++,Caffe1.0 (CPU)+VisualStudio+OpenCV+himm+RuyiStudio+Python+Caffe1.0。

### 3.2 实验数据

样本数据来源于江苏省无锡市滨湖区未名路 28 号江苏省无线电科学研究所有限公司观测场。样本的采集分为:降雪<sup>[13]</sup>、积雪<sup>[14]</sup>、融雪<sup>[15]</sup>、无雪及其他类别,拍摄草坪

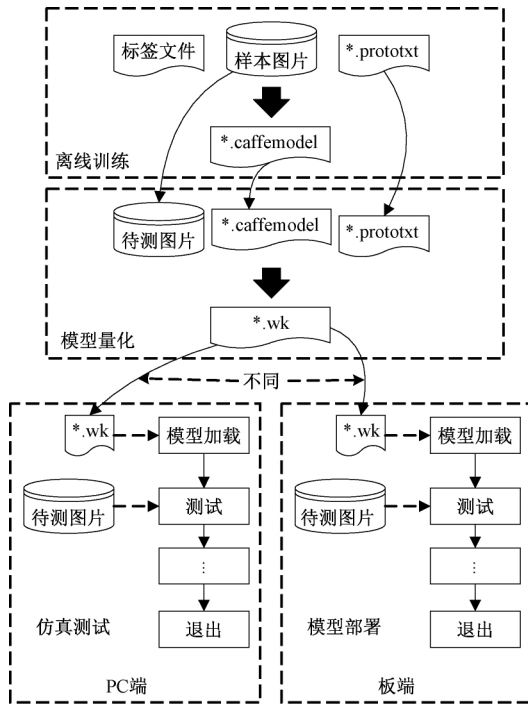


图 12 NNIE 软件开发流程

测雪板上的图像,采集时间为:6:00~18:00,拍摄距离为:1~2 m,天气情况分为:晴天、多云、降雪、降雨、风,经过多次筛选,选出 4 种类型,共计 7 500 张  $256 \times 240$  大小相同具有代表性的样本图片。

### 3.3 实验结果

如图 13 所示 Hi3559A 智能模组内嵌到雪深探测仪中,辅助判别疑误数据。



图 13 雪深探测仪

如图 14 所示,为不同环境下遇到的诸多问题,经 ISP 自适应调试后的效果对比。

样本格式为 JPG,像素存储方式 BGR,总数 7 540,70%训练,20%测试,10%验证共 4 类:降雪、积雪、融雪、无雪,如图 15 所示。

MobilenetV2 的模型大小为 3.4 M 专用于移动端,提取的特征值较少<sup>[16]</sup>,测试集识别率 99.7%,验证集识别率

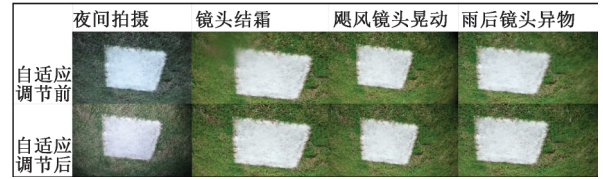


图 14 ISP 自适应调试效果对比

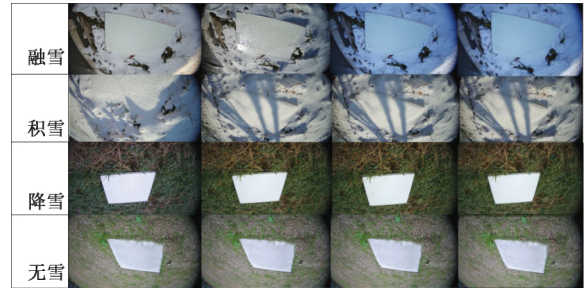


图 15 样本展示

99.0%,图 16 所示的学习率逐渐减小,可以看出模型正常训练,如图 17 所示,测试集的损失率(loss)和识别率(acc)变化曲线,模型开始训练的时候权重不稳定,所以 loss 抖动较大,后期逐渐趋于稳定。

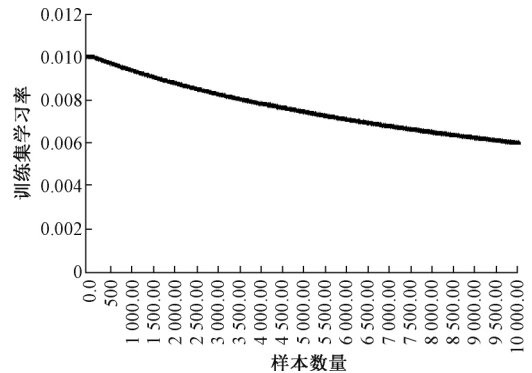


图 16 学习率变化曲线

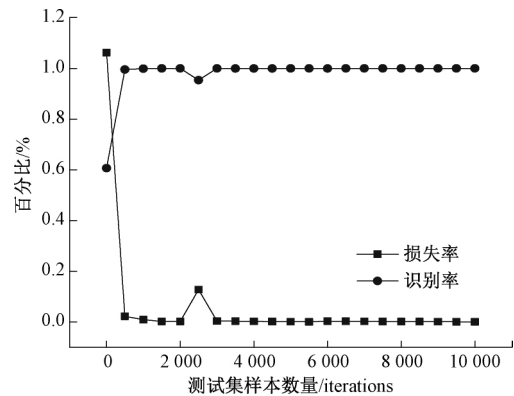


图 17 测试集参数变化曲线

经测试可知,系统总体工作时间平均 1.1 s,图像预处理时间平均 0.3 s,图像分类时间平均 0.8 s;如果使用 libyuv 进行图像缩放,系统总体工作时间平均 2.6 s,图像预处理时间平均 0.8 s,图像分类时间平均 0.8 s;测试过程中总体工作时间会有  $\pm 0.1$  s 的波动,由此可见 Hi3559AV100 具有很好的图像处理能力。

2020 年 9 月 3 日,测试融雪识别率,实验地点为实验室,测试环境和测试方法不变,相对于测雪板来说,雪对光线的反射能力较强,因此,测雪板上的融雪最容易识别,表 2 所示为各类方法平均识别率对比。

表 2 霜雪检测平均准确率

检测方法	准确率/%
CNN <sup>[17]</sup>	90.45
Dense Net <sup>[18]</sup>	94.16
ResNet50 <sup>[19]</sup>	88.00
MobileNetV2	99.70

表 3 所示为电源电压测试结果,可以看出各电源均满足设计要求,板卡电源模块工作正常。

表 3 电压测试结果

设计值	测量值/V
5	5.06
3.3	3.28
2.5	2.57
1.2	1.20
1.8	1.80
0.8	0.80
12	12.25

表 3 中的 0.8、1.2、1.8 V 为 Hi3559ARFCV100 工作电压,供电模块正常的条件下,实验将继续测试系统晶振,测试时,使用示波器探头直接测量时钟电路的输出端,对于差分输出时钟,只测量其单端信号以确定时钟电路是否工作即可,测试结果如图 18 所示,可以判断系统时钟正常工作。

时钟信号正常表示处理器可以正常工作,SecureCRT 成功打印出系统完整启动信息表示各模块之间可以正常启动和通信、工作电压正常表示供电正常,当 3 个条件同时满足的条件下可以判断系统正常工作。

在系统正常工作的条件下,使用数字直流电源测试模组功率,设置模组的供电电压 12 V,测试出开机电流 0.031 A~0.2 A,待机电流恒定 0.185 A,最大工作电流 0.32 A,关机后的漏电流恒定 0.031 A,最大功率 3.6 W,平均功率 2.6 W。通过多次环境可靠性测试得知,Hi3559A 模组工作温度为  $-10^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$ ,工作湿度为 RH40%~RH90%

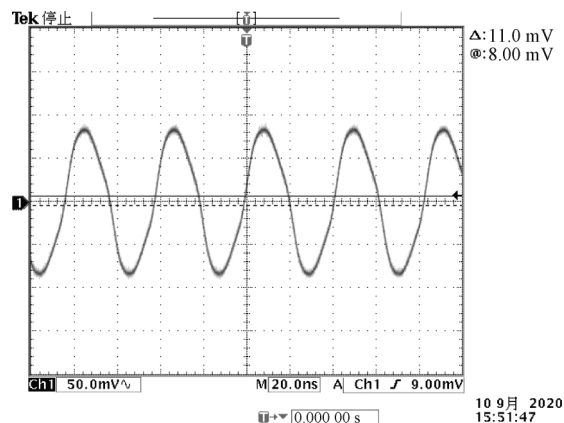


图 18 Hi3559AV100 系统时钟

(不结露),与其他测量仪器相比<sup>[20-22]</sup>,具有明显优势,可用于气象观测领域。

## 4 结 论

围绕边缘 AI 的高算力、低功耗要求,实验基于 Hi3559ARFCV100 多媒体系统级芯片(system of chip, SoC)的方案实现图像压缩功能、自适应调节功能和深度学习功能,分别从软件和硬件 2 个角度出发最大程度降低功率。软件上通过图像压缩和图像编码减少需要计算的数据,硬件上依据“高内聚,低耦合”设计思路,简化不需要的分支,功率明显低于其它系统,可用于辅助激光雪深探测仪识别 1 cm 内的雪。但是边缘 AI 的低鲁棒性、高计算量目前仍是有待解决的技术难点,本文将继续探索 Hi3559A 稳定工作的极限环境,如温湿度、高空坠落、高压、腐蚀等,找出潜在漏洞,硬件上增加保护电路,同时降低功耗,软件上将根据 Hi3559A 的结构特点修改 MobileNetV2 的网络结构,简化数据的计算过程,提高分类的可靠性及准确度<sup>[23]</sup>。

## 参考文献

- [1] 邵东航,李弘毅,王建,等.基于多源遥感数据的积雪反照率反演研究[J].遥感技术与应用,2017,32(1):71-77,139.
- [2] 魏丽,钟强.中国西部云和积雪的多通道特征和识别[J].高原气象,1991(4):371-380.
- [3] 杨豪,卢兴来,胡利军,等.利用图像识别技术的积雪辅助判别[J].浙江气象,2016,37(4):29-33.
- [4] 朱榴骏.多时相高分辨率遥感图像山区积雪协同识别[D].南京:南京大学,2015.
- [5] 王柏林,花卫东,阳艳红,等.基于相位法激光测距原理的雪深传感器研究与应用[J].气象科技,2013,41(4):597-602.
- [6] 赵振宇.基于 Hi3519 的 360°无线全景监控系统的设计与实现[D].长春:东北师范大学,2018.

- [7] 张秋艳,张俊霞,白莹.一种低功耗多功能的水情监测器设计[J].国外电子测量技术,2018,37(11):125-129.
- [8] SIDDHARTH R K, NITHIN K Y B, VASANTHA M H. Power saving scheme for process corner calibrated standard cell based flash ADC in wireless surveillance applications[J]. SN Computer Science, 2020,1(6):310.
- [9] 孟青,杨勃,牛慧芳,等.基于 STM32 的全钒液流电池管理系统的设计与实现[J].计算机测量与控制,2020,28(9):163-167,195.
- [10] 黄璐璐,李国平,王国中.基于 BP 神经网络的并行编码码率控制研究[J].电子测量技术,2018,41(24):77-82.
- [11] 邱洪涛,孙裴,侯金波,等.基于 Caffe 的猪肉新鲜度分级的设计与实现[J].江苏农业学报,2019,35(2):461-468.
- [12] GOERTZ W, JUMP A, PRIESTLEY A.用于边缘设备的 AI 为设备制造商营造机会[J].电子产品世界,2018,25(3):5-8.
- [13] 李林蔚,官莉.基于 GPM 卫星双频降水雷达的地面降雪识别算法[J].地球物理学进展,2020,35(1):23-31.
- [14] 陈梦蝶,黄晓东,王玮,等. CIVCO 地形校正模型对青藏高原地区积雪判别的有效性检验[J].草业科学,2014,31(2):209-218.
- [15] 曹辉,翁理国,张德正.基于密集连接空洞卷积神经网络的青藏地区云雪图像分类[J].计算机测量与控制,2019,27(9):169-173.
- [16] 刘坤,赵帅帅,屈尔庆,等. R-AdaBoost 带钢表面缺陷特征选择算法[J].电子测量与仪器学报,2017,31(1):9-14.
- [17] 薛俊韬,马若寒,胡超芳.基于 MobileNet 的多目标跟踪深度学习算法[J/OL].控制与决策,2020-05-12, [2020-10-22]. <https://ssl1230a75e822c6f3334851117f8769a30e1c.vpn.nuist.edu.cn/10.13195/j.kzyjc.2019.14-24>.
- [18] 陈坤.基于 SOC 的图像压缩和目标跟踪模块设计[D].西安:西安电子科技大学,2019.
- [19] 刘梦伦,赵希梅,魏宾.基于 MobileNet V2-ELM 的肝硬化识别[J].青岛大学学报(自然科学版),2019,32(4):17-21.
- [20] 李昕,曲梦可,荣誉,等.基于 MSP430 单片机低功耗湿度计的设计[J].仪器仪表学报,2006,27(S2):1437-1438.
- [21] 范洪浩,刘新妹.基于 PLC 的药库多点温湿度本地监控系统设计[J].国外电子测量技术,2020,39(10):134-137.
- [22] 张业宝,徐晓龙.基于改进 SSD 的安全帽佩戴检测方法[J].电子测量技术,2020,43(19):80-84.
- [23] 张珂,张玮,成果,等.支持向量机评定同轴度误差测量不确定度[J].电子测量与仪器学报,2020,34(5):29-36.

#### 作者简介

裴晓芳,副教授,主要研究方向为信号处理与应用。

E-mail: xiaofangpei@163.com