

# 基于国产 CPU 的非接触物体尺寸形态测量

**摘要:** 本项目通过利用 OpenCV 库函数和飞腾派硬件平台，开发了一套高精度、稳定的火花塞间隙测量系统。系统由飞腾派、测量装置和 PC 端三部分组成，其中 PC 端负责控制测量过程并展示结果，飞腾派负责处理图像数据，测量装置则提供稳定的图像信息。项目包括文献查询、方案设计、算法实现与优化、系统集成测试等多个阶段。最终系统实现了高精度 (0.01mm) 和高稳定度的测量效果，验证了在边缘计算平台上通过低算力算法进行精确测量的可行性。

**关键词:** 火花塞间隙测量; OpenCV; 飞腾派; 图像处理; 边缘计算

## Measurement of Non-Contact Object Dimensions and Shapes Based on Domestic CPU

**Abstract:** This project developed a high-precision, stable spark plug gap measurement system using OpenCV library functions and the Feiteng Pai hardware platform. The system is composed of three parts: the Feiteng Pai, the measurement device, and the PC. The PC is responsible for controlling the measurement process and displaying the results, the Feiteng Pai handles image data processing, and the measurement device provides stable image information. The project included several phases: literature review, scheme design, algorithm implementation and optimization, and system integration testing. The final system achieved high-precision (0.01mm) and high-stability measurement results, validating the feasibility of precise measurements using low-power algorithms on an edge computing platform.

**Keywords:** Spark plug gap measurement; OpenCV; Phytium; image processing; edge computing

### 1 引言

随着现代化工业制造技术的提高，人们对检测精度、效率和自动化程度的要求也越来越高。现代检测的要求包括高精度、非接触、高效率、在线测量和低成本等。

随着汽车行业的迅速发展，汽车零部件制造商也在迅速增长。现代汽车行业对制造和加工的要求越来越严格。这主要是因为汽车零部件的质量直接影响整车性能。因此，提高零部件的测量精度变得尤为重要。通常情况下，人工检测不仅会引入一些不可靠因素，而且还会影响生产效率，直接影响产品质量和生产成本。此外，许多检测过程需要对外观进行测量，例如零件宽度和孔径等，同时还需要进行数据跟踪。然而，人工检测往往难以准确快速地完成这些测量任务，传统的接触式测量方法也不利于实时测量，并可能对工件造成损坏。

因此，探索新的视觉检测方法具有重要的研究意义。

本项目选择火花塞作为研究对象，旨在探讨一种基于机器视觉测量技术的测量方法。

### 2. 系统架构与设计

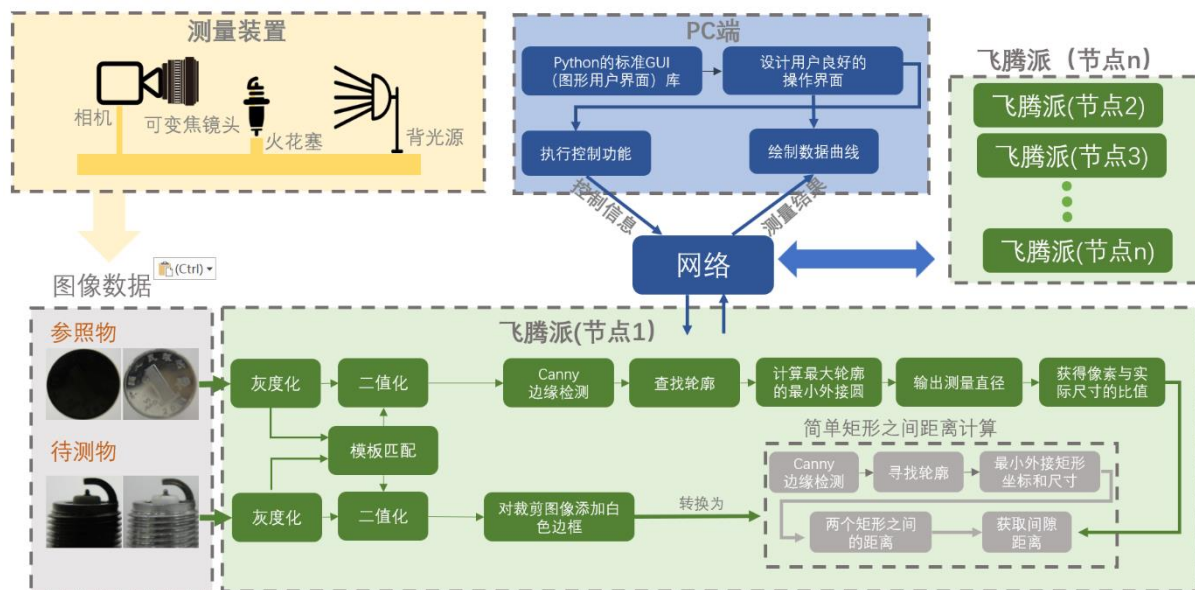


图 1 系统框架

系统架构如上图，主要分为 4 个主要部分：

**飞腾派：**用于图像数据的处理。我们选择飞腾派作为嵌入式计算平台，利用其强大的计算能力和低功耗特性来实现图像处理算法。

**视觉检测装置：**提供稳定的图像信息。测量装置包括输出像素 2K 的 HF500 可变焦摄像头和背光源以及稳定的支架，确保在测量过程中图像的清晰和稳定。

**PC 端：**负责控制测量的开始和结束，并展示测量结果。PC 端通过用户友好的界面控制整个测量流程，并实时显示处理结果。

**PC 端和飞腾派之间的通信方式：**相较于选择蓝牙通信或者 UART 串口通信，使用 TCP 套接字通信有高速和稳定性的优势，更主要的是网络化的优势，TCP 套接字通信通过网络连接，可以实现远程控制和远程监控等功能，适用于需要远程访问和管理的应用场景。

## 2.1 飞腾派的简单介绍

飞腾派开发板是由萤火工场研发的一款面向行业工程师、学生和爱好者的开源硬件。

主板处理器采用飞腾嵌入式四核处理器，该处理器兼容 ARMV8 指令集，包含 2 个 FTC664 核和 2 个 FTC310 核，其中 FTC664 核主频可达 1.8GHz，FTC310 核主频可达 1.5GHz。主板板载 64 位 DDR4 内存，分 2G 和 4G 两个版本，支持 SD 或者 eMMC 外部存储。主板板载 WiFi 蓝牙，陶瓷天线，可快速连接无线通信。主板操作系统支持 Ubuntu、Debian 等国外主流开源操作系统，也支持国内 OpenKylin、OpenHarmony、SylixOS、RT-Thread 等国产操作系统。

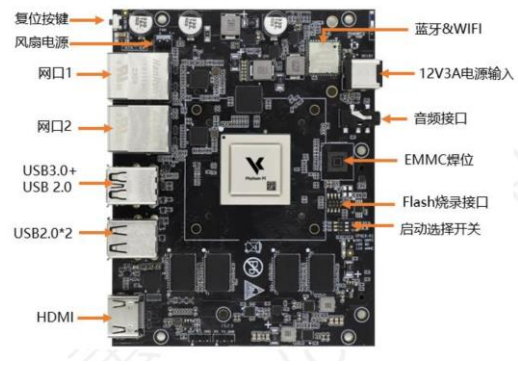


图 2 飞腾派板卡布局

## 2.2 视觉检测装置搭建

测量装置有 5 部分组成：输出像素 2K 的 HF500 可变焦摄像头、背光源、待测物体（火花塞）、参照物（已知尺寸）、支架。

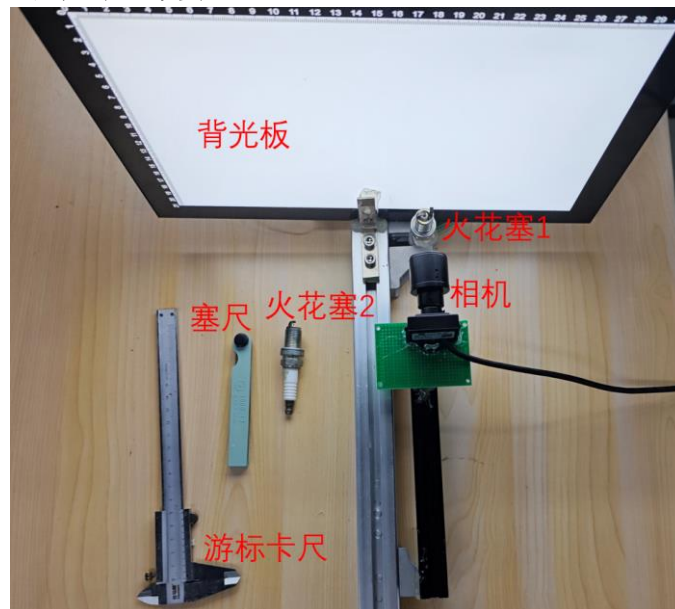


图 3 测量装置（俯视）





图 4 测量装置（左视）（摄像头拍摄）

### 2.2.1 HF500 可变焦摄像头

选择这么高分辨率镜头的原因是为了实现高精度的测量。考虑到火花塞间隙一般为 0.8 毫米左右，若我们希望达到 0.01 毫米的精度，根据选取的参照物（2.5 毫米）和以下计算公式：

$$A = \frac{S}{P} \quad (1)$$

其中  $A$  为测量精度， $S$  为物体的实际尺寸， $P$  为图像中物体的像素大小。

据此，为了达到 0.01 毫米的精度，对于尺寸为 2.5 毫米的参照物，该物体在图像中的尺寸应该为 250 像素。然而，在一般的高清摄像头（1280x720 分辨率）中，该物体在图像中宽约占近 20%，长约占近 35%。这样的情况下，调试会变得异常困难，同时很难将参照物和待测物体同时拍摄在一个镜头里。此外，这也对摄像头的变焦能力提出了过高的要求。因此，我们选择使用输出图像分辨率为 2K（2560x1440）的 HF500 可变焦摄像头。这一选择使得调试过程更加便捷，同时也能够满足 0.01 毫米的测量精度要求。



图 5 HF500 可变焦摄像头

### 2.2.2 背光源



图 6 背光源

选择在测量装置中添加背光源的原因有：

- 增强对比度：背光源可以在待测物体和背景之间产生明显的对比，从而更清晰地显示

物体的轮廓和细节，有助于准确测量物体的尺寸和间隙。

- 降低反射影响：背光源能够减少光线在物体表面的反射，防止反射光干扰测量结果。
- 提供干净的背景：背光源可以提供均匀的光照，确保测量过程中背景都有足够的亮度，避免背景影响测量结果。



图 7 有无背光源对比图

2.3 用户友好的控制界面（PC 端）

通过 Python 的标准 GUI 库编写用户友好的控制界面，既方便对飞腾派进行控制，又能便捷地展示测量结果。

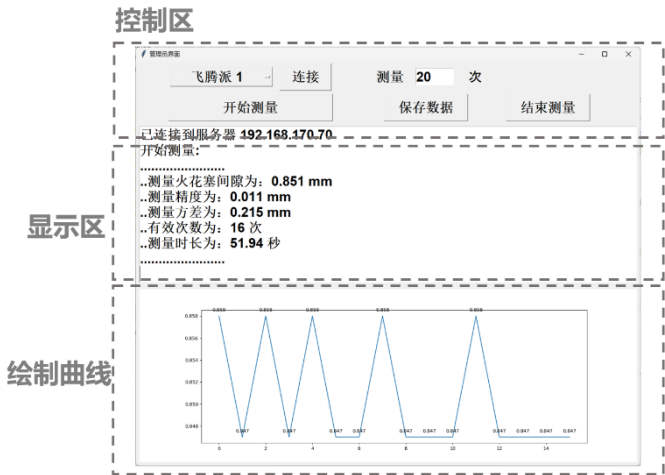


图 8 用户友好的控制界面

该控制界面功能为：

- 选择飞腾派建立 TCP 连接，发送开始测量信号以及测量次数；
- 接收并显示测量得到的数据，数据包括：测量平均值、测量精度、测量方差、有效测量次数、测量时长；
- 保存每次测量的数据，将数据保存为 excel 格式，方便查看与分析；
- 绘制每次测量的数据曲线；

测量次数	测量火花	测量精度	测量方差	有效次数	测量时长
1	0.875 mm	0.009 mm	0.288 mm	15 次	37.54 秒
2	0.875 mm	0.009 mm	0.367 mm	15 次	23.41 秒
3	0.875 mm	0.009 mm	0.521 mm	15 次	23.46 秒
4	0.875 mm	0.009 mm	0.769 mm	15 次	23.38 秒

图 9 将测量数据保存为 excel

3 测量算法

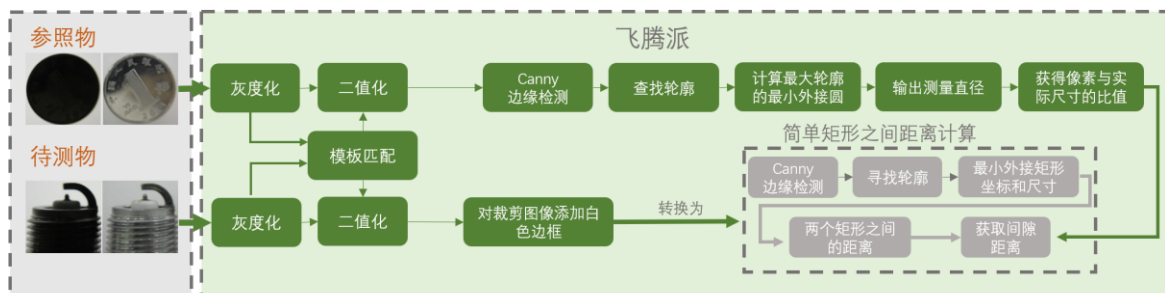


图 10 测量算法框图

如上图，整个测量过程分为两条分支，上面一支负责计算像素与实际尺寸的比值，下面一支负责计算火花塞间隙的像素值，最后按照公式(1)即可得出物体的实际尺寸，下面对两条分支具体说明。

首先对图像灰度化将彩色图像转换为灰度图像，去除了颜色信息，只保留了图像的亮度信息。然后通过模板匹配的方式，找到待测量对象并截取出来，进行进一步的测量，这里对模板匹配算法进行说明：

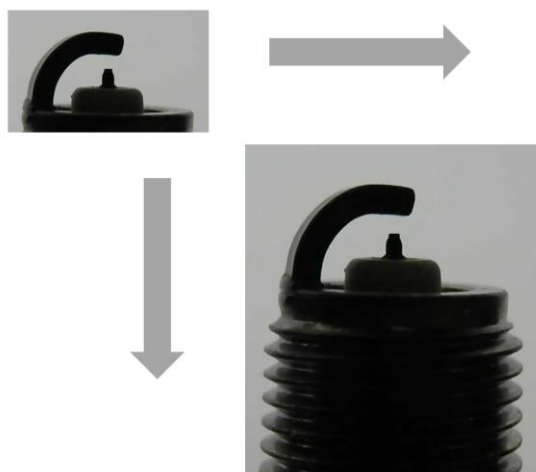


图 11 模板匹配的实现示意图

在源图像上从左到右，从上到下滑动模板，在每一个位置都计算一个指标以表明这个位置处两个图像块之间匹配程度的高低。

在每个 $(x,y)$ 位置，都会计算一个度量来表示匹配的“好”或“坏”。通常使用归一化的相关系数来确定两个图像块之间像素之间相似程度，归一化的相关系数计算公式如下：

$$R(x,y) = \frac{\sum_{x',y'} (T'(x',y') \cdot I'(x+x',y+y'))}{\sqrt{\sum_{x',y'} T'(x',y')^2 \cdot \sum_{x',y'} I'(x+x',y+y')^2}} \quad (2)$$

在这个公式中，最后计算得到的 $R$ 越接近 1，代表这两个像素之间越相似。

模板匹配算法有对算力要求低，实现简单，但是对于对光照、旋转、尺度变化等不稳定。针对这点我们对模板匹配算法在本项目中应用的鲁棒性进行的验证，通过对待测物体进行轻微缩放、旋转、横移等动作，结果发现通过该算法可以稳定找到待测量物体，因此**模板匹配算法在本项目中应用的鲁棒性得到了验证。**

完成模板匹配后，测量任务就可以转换为简单规则物体尺寸的测量问题，这里以下面的分支来说明，如何实现测量的。



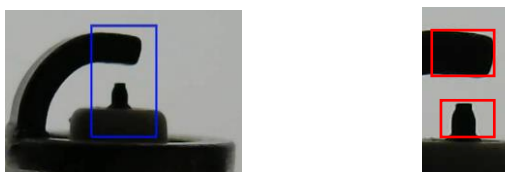


图 12 模板匹配方式找到火花塞间隙（示意图）

如示意图所示，这样间隙的测量就转变为计算两个矩形之间的距离，问题得到了简化。

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ (Y_{i1} - Y_{i2}) - \frac{1}{2} \times (W_{i1} + W_{i2}) \right] \quad (3)$$

其中  $L$  为待求值， $Y_1$ 、 $Y_2$  分别为矩形的中心点的纵坐标， $W_1$ 、 $W_2$  分别为矩形的纵轴方向的长度。

#### 4 测量算法在飞腾派上的部署与优化

我们通过在飞腾派和 PC 端配置相同的环境：Python+Pycharm(IDE)，简化了算法的部署难度。

因为算力资源的不同，在将算法移植到飞腾派后，平均测量完成时长为 3-4 秒左右（一帧数据），为了加快测量速度与稳定度，我们对算法进行了优化：

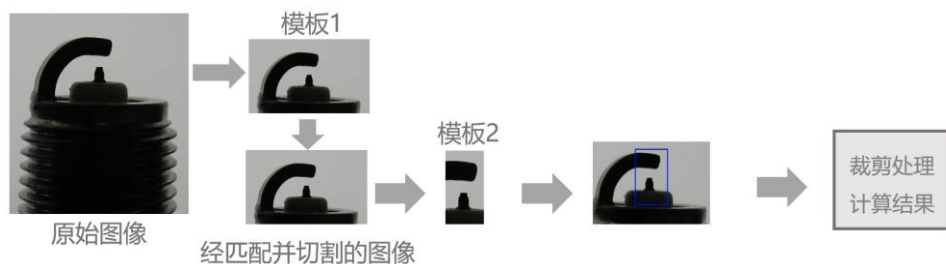


图 13 多重模板匹配的示意图

- **优化了重复的计算。**可以发现，参照物的尺寸是不发生变化的，因此我们对算法进行了优化，在完成一次参照物测量后，保存实际尺寸与像素比的数据，后续不进行重复计算。
- **减小通信开销。**在测量完成并上传测量数据后，保持 TCP 连接会增加不必要的开销，因此在完成测量后，应中断连接，待下一次测量时，再重新建立连接。
- **剔除异常值。**通过使用 z-score 算法，判断测量中的异常值，提高算法的稳定性，计算公式如下

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (4)$$

其中  $Z_i$  为第  $i$  次测量的 z-score， $X_i$  为第  $i$  次测量的结果， $\bar{X}$  为样本均值， $S$  为样本标准差。一般当  $Z_{score} = 3$  时就认为该次测量值远高于均值，属于异常值。

- **对模板匹配算法进行了优化。**优化后大大增加模型的稳定性，通过使用多重模板匹配，大大减少了模板匹配失败的情况。下图为多重模板匹配的示意图

如下是对比图：

---

..... ..测量火花塞间隙为: 0.851 mm ..测量精度为: 0.011 mm ..测量方差为: 0.215 mm ..有效次数为: 16 次 ..测量时长为: 51.94 秒	..... ..测量火花塞间隙为: 0.846 mm ..测量精度为: 0.011 mm ..测量方差为: 0.199 mm ..有效次数为: 19 次 ..测量时长为: 26.30 秒
--	--

图 14 优化前与优化后对比（测量 20 次）

## 5 结果与分析

通过项目实施，我们取得了以下主要成果：

**高精度测量：**经过实际测试和优化，系统可以实现精度为 **0.01mm** 的测量。

**系统稳定性：**系统运行稳定，能够提供连续、可靠的测量结果。

**算法优化：**在飞腾派平台上，算法经过优化后能够高效运行，满足嵌入式平台的资源限制。

## 6 总结与展望

本项目通过系统设计、算法实现和优化，成功开发出了一套高精度、高稳定度的火花塞间隙测量系统。整个过程中，我们不仅提升了技术能力，还积累了丰富的项目管理和团队合作经验。总结一下，项目有以下的优点和缺点：

优点：

**高精度：**使用 `opencv` 库函数和飞腾派硬件进行测量，可以实现 **0.01mm** 的测量精度。

**稳定度高：**项目中使用的测量装置提供稳定的图像信息，加上飞腾派的处理能力，可以保证测量系统的稳定性，减少测量误差。

**响应快：**PC 端控制测量开始并展示结果，整个系统响应速度较快，平均每次测量耗时 2-3 秒。

**可扩展性和可移植性强：**这套算法不需要样本进行训练，同时具有一定的鲁棒性，对算法进行一定的调试就可以在各平台使用。

**可通过网络远程控制：**PC 端可以通过 TCP 套接字与飞腾派之间建立通信，完成测量任务。

缺点：

**更换物体耗时：**每次测量完毕后，更换新的测量物体需要一定的时间，这会降低测量效率，特别是在需要连续测量多个物体时，无法像流水线一样实现高效率的自动化操作。

## 7 结语

通过本次创新实践项目的开展，我们成功地搭建了一个基于 `opencv` 库函数和飞腾派硬件的火花塞间隙测量系统。项目的可移植性可以适应不同的环境和场景，为实际生产和工程应用提供了便利，同时，项目的高精度、稳定性和快速响应能力在汽车制造、航空航天等领域具有广泛的应用前景

最后，我们要衷心感谢学校和指导老师对本项目的支持和指导，帮助我们顺利完成了这个项目。在未来，我们将继续努力，不断完善和优化这个系统，将项目分享至 **GitHub**，积极采纳新的技术和理念，为项目的持续发展和进步不懈努力。