

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306653

基于自适应峰值提取算法的水表梅花针 计数方法研究*

王 威 徐志鹏 汤建斌 曹松晓 周 彬

(中国计量大学浙江省流量计量技术研究重点实验室 杭州 310018)

摘要:针对水表出厂检定过程中的被检表梅花针在接近于采集频率 1/2 的高速转动下识别效果差的问题,提出了一种基于自适应峰值提取算法的水表梅花针计数方法。首先对图像进行预处理转化为二值化图像,再利用背景异或法对当前帧图像与起始帧图像进行异或运算得到梅花针运动轨迹,统计梅花针转动过程中的白色像素占比大小变化,最后通过自适应峰值提取算法统计转动齿数。通过实验,证明了该算法克服了伪波峰对峰值提取算法的干扰,相较于传统统计方法,该方法对梅花针转动齿数识别效果显著,误差不超过 1%。

关键词: 计量学;梅花针;峰值检测;背景异或;水表检定;机器视觉

中图分类号: TP391.4;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on plum blossom needle of water meter counting based on adaptive peak picking algorithm

Wang Wei Xu Zhipeng Tang Jianbin Cao Songxiao Zhou Bin

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Flow Measurement Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor recognition effect of the plum blossom needle of the water meter in the process of factory calibration when it rotates at a high speed close to half of the acquisition frequency, a counting method of the plum blossom needle of the water meter based on the adaptive peak picking method is proposed. Firstly, the image is preprocessed and converted into a binary image. Then, the background XOR method is used to perform XOR operations on the current frame image and the starting frame image to obtain the motion trajectory of the plum blossom needle, and the change in the proportion of white pixels is calculated during the rotation process of the plum blossom needle. Finally, the number of rotating teeth is counted through the adaptive peak picking algorithm. The experimental results show that the algorithm overcomes the interference of false wave peaks on the peak picking algorithm. Compared with traditional statistical methods, this method has a significant recognition effect on the number of rotating teeth of plum blossom needles, with an error of no more than 1%.

Keywords: metrology; plum blossom needle; peak detection; background XOR; water meter calibration; machine vision

0 引言

水表作为民用三表之一,使用安装前必须按规定进行强制检定,合格后方可投入使用。且水表拥有限期使用、到期轮换的特点,轮换周期一般为 4 年和 6 年^[1],每年首次强制检定的水表可达 $6\ 000 \times 10^4$ 只,并且检定流程还具有时间长、工作量大的特点。因此为提高水表的检定效率,减少读数误差对检定结果的影响,对水表示值

进行自动识别是十分必要的。

通常来说,对水表进行读数,需要对水表上的多个指针和字轮上显示的数字分别进行判读,并结合起来得到水表的最终读数。在指针读数方面,可分为经典方法和深度学习法。程良利等^[2]提出使用最小二乘法定位圆心,Shi-Tomas 角点检测确定针尖位置,计算针尖、圆心所在的直线和水平线夹角得到指针读数。盛庆华等^[3]提出使用霍夫空间双重投票的方法计算圆心,极坐标分割指针和刻度,并通过指针投影在相邻刻度的距离比值判断

收稿日期: 2023-06-20 Received Date: 2023-06-20

* 基金项目:浙江省自然科学基金(LY18E050009)项目资助

读数,但是当表盘存在阴影时会严重影响读数准确性。Wen 等^[4]提出使用 Canny 算子提取图像边缘信息,再使用 Hough 圆变换确定圆心和半径,采用 Hough 直线变换确认指针,并识别指针计量器的读数,该方法对图像采集的角度要求很高。Meng 等^[5]根据图像灰度值的差异将指针与刻度分离,并使用 Bresenham 算法计算偏转角得到读数,但对光线条件十分敏感,对采集的图像质量要求较高。宫倩等^[6]和 Zhang 等^[7]通过神经网络得到的关键点信息,前者使用角度法完成读数计算,后者则基于关键点建立坐标系实现指针读取。陶金等^[8]和胡鑫等^[9]均采用 YOLO 对表盘进行识别,前者通过特征匹配和透视变换的方法得到读数,后者采用 Hough 变换,但都需要进行大量的样本学习。在字轮读数方面,王志威等^[10]和 Peng 等^[11]均使用深度残差神经网络,通过对完整字符图像和双半字符图像的数据集进行训练,需要对被训练的数据集有较高的要求。翟娅娅等^[12]利用深度可分离卷积改进 YOLOv4,并引入注意力机制和瓶颈结构,使得模型的参数量和计算量降低 5/6。林阳等^[13]和 Li 等^[14]均采用 OCR 算法对字符进行识别,这也需要用一些未参与训练的字轮图像来测试模型的性能,包括数字可能出现的黏连噪声和缺失的情况。

在水表检定过程中,需要识别检定前后被检表的示值,相减后得到水表指示装置上增加的通水体积^[15]。那么就需要对被检表进行两次读数,因此对指针字轮读数的方案计算量较大,且存在两次读数误差。

通过梅花针对学生表进行读数,目前研究的主要有传感器法和机器视觉法。孔明等^[16]通过自研光电反射传感器对梅花针进行计数,提高了水表误差小流量区的检测效率。Yan 等^[17]提出了一种利用三帧差分法准确定位梅花针,提高了不同形态梅花针的适配性但图像差分效果受光照环境影响较大。陈硕等^[18]采用的 Harris 算法提取模板角点以部分 Hausdorff 距离作为度量匹配度的梅花针定位方法。但是提取角点的精度不高并且不具备尺度不变性。林柯楠等^[19]提出以图像叠加方法为基础,通过梅花转子图像获取被检表的指示体积的方法,可以减小气泡或脏污影响,但无法应对大流量情况。郑博文^[20]和陈硕等^[21]通过在梅花针区域设置标记点的方式记录脉冲,但容易受到气泡、水雾、震动等干扰影响,可靠性和稳定性不佳^[22],并且需要使用到高速工业相机,且为保证梅花针转动齿数计数的准确性,相机的采集帧率都需要达到被测表 Q3 流量点时梅花针转速的 3 倍以上。

由此,本文针对梅花针在计数过程中提出一种基于自适应峰值提取算法的水表梅花针计数方法,使用背景异或法提取梅花针运动轨迹,并通过自适应峰值提取算法获取梅花针转动齿数。该方法解决了梅花针在接近于采集频率 1/2 的高速转动下识别效果差的问题,提高了

水表检定的准确性。

1 原理与技术路线

目前市面上常见水表大多为指针字轮式水表,如图 1 所示,在水表示值显示区域由指针,字轮以及梅花针 3 个部分组成。水表通水过程中,梅花针作为水表的始动元件,带动指针和字轮开始转动。

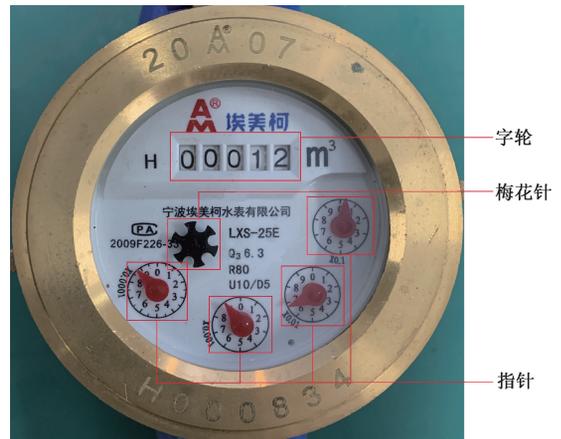


图 1 指针字轮式水表

Fig. 1 Pointer wheel water meter

根据机械式水表的结构特点,采取对水表上的始动元件梅花针进行识别,直接测量检定过程中的梅花针转动的齿数,乘上被检表的脉冲当量,间接得到检定过程中的通水体积。关键在于如何准确的得到梅花针的转动齿数。

本文采用机器视觉方案,通过相机采集梅花针的转动图像。将图像依次经过预处理、二值化得到黑白梅花针图像。再将当前帧与起始帧进行异或运算,得到梅花针运动轨迹,统计其中的白色像素占比,得到一条周期变化的曲线。最后使用本文提出的自适应峰值提取算法,准确统计出梅花针的转动齿数。总体流程如图 2 所示。

2 基于背景异或法的梅花针运动轨迹提取

通过相机对检定过程中的水表梅花针图像进行采集。首先对采集后的图像进行预处理操作,生成可靠、易于处理的二值化图像。再使用背景异或法对梅花针图像序列中的当前帧与起始帧进行异或运算操作,得到梅花针运动轨迹。对梅花针运动轨迹图像序列中,每帧图像的白色像素进行统计,得到白色像素占比的离散变化曲线。

2.1 图像预处理

通过摄像头采集到的梅花针图像是彩色的,为提高

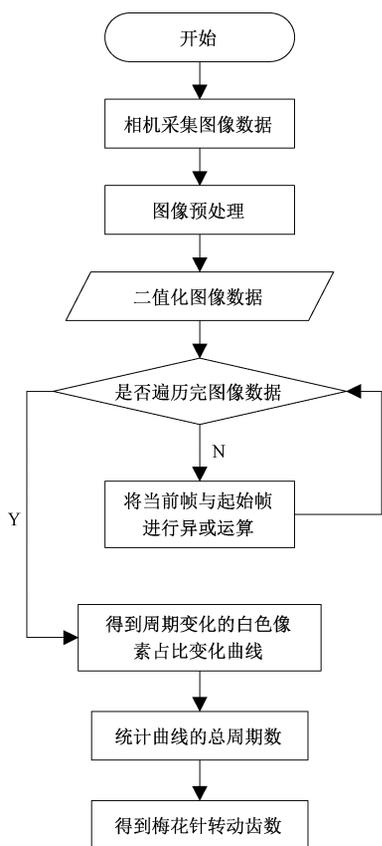


图 2 总体流程

Fig. 2 Overall flow chart

后续识别计数算法的速度和准确性,对图像采取预处理操作,包括灰度化、高斯滤波、二值化、膨胀以及腐蚀。

彩色梅花针图像通过灰度化操作转换成灰度图像,再通过高斯滤波滤除灰度图像上的噪声,并采用大津法将灰度图像转换成二值化图像,最后采用闭运算,让梅花针图像先膨胀后腐蚀,关闭梅花针图像内部的小白点,使得梅花针图像正确、完整。

2.2 基于背景异或法的梅花针运动轨迹提取

根据在梅花针计数中,摄像头固定且定焦于梅花针的特点,选择使用预处理后的梅花针图像序列的第 1 帧作为背景帧。当前帧和背景帧采用异或叠加运算,即当两幅图像相同位置上的像素相同均为 255 或 0 时,异或后得到图像的该位置像素记为 0,否则记为 255。

通过异或运算后,得到的梅花针运动轨迹图像为当前帧和起始帧两张二值化图像不一致的那部分图像数据,如图 3 所示。并且由于异或运算的特点,使得在水表上的静止脏污、水泡在通过异或运算后会被消除。

2.3 梅花针运动轨迹分析

在梅花针转动过程中,通过当前帧与背景帧异或运算得到的梅花针运动轨迹图像序列如图 4 所示。可以看

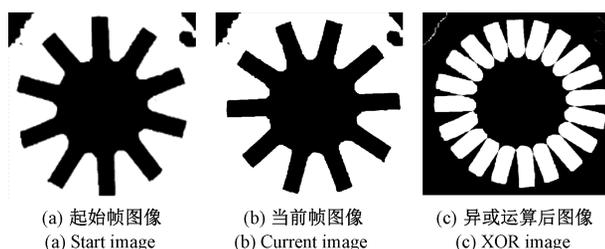


图 3 梅花针背景异或效果

Fig. 3 Background XOR effect of plum blossom needle

到,当梅花针在运动 1/2 齿之前,白色占比逐渐增大,在梅花针运动到 1/2 齿时达到最大值,再从 1/2 齿运动到 1 齿时,白色占比逐渐减小,在 1 齿时达到最小值。

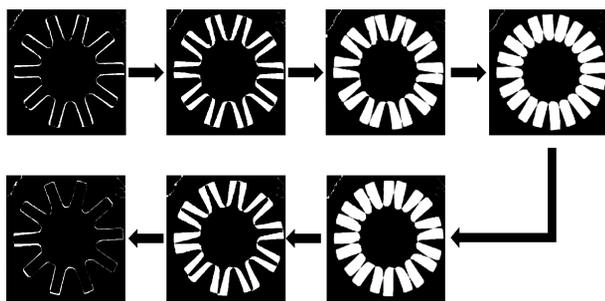


图 4 运动轨迹图像序列

Fig. 4 Motion track image sequence

由此可见,在梅花针转动过程中,梅花针运动轨迹图像中的白色像素所占区域大小随时间发生周期性变化,可以通过统计白色像素占比的变化趋势来统计梅花针转动的齿数。图像中的白色像素占比计算公式如式(1)所示。

$$A = \frac{\sum N}{W \times H} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A 为白色像素占比; N 为白色像素点个数; W 为梅花针运动轨迹图像宽度; H 为梅花针运动轨迹图像高度。

3 梅花针计数算法

针对梅花针转动齿数的计数,采用通过对异或运算后的梅花针运动轨迹图像数据中的白色像素变化趋势进行统计的方式。提出一种改进后的自适应峰值提取算法,结合峰值提取算法和快速傅里叶变换的优势,消除白色像素占比变化趋势中伪波峰对峰值提取算法的影响,可以对梅花针转动的齿数进行准确的计数。

3.1 运动轨迹图像中白色占比变化趋势

将检定时间设为 x 轴,异或运算后的梅花针运动轨迹图像序列的白色像素占比大小为设 y 轴,绘制 $x-y$ 的曲线。以梅花针转速约 1.5 齿/s 的白色像素变化曲线为例,如图 5 所示。

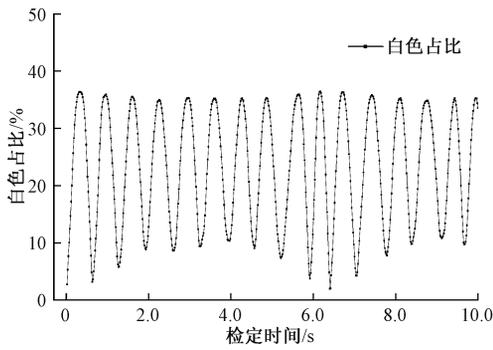


图 5 1.5 齿/s 的白色占比变化曲线

Fig. 5 1.5 tooth/s white ratio change curve

可以看到该 $x-y$ 曲线是一条先增后减的周期变化曲线。白色像素占比曲线变化一个周期即为梅花针转过一齿,因此可以通过对周期个数的统计来间接获取梅花针转动的齿数。

3.2 常见统计方法

1) 自适应阈值法

采用大津阈值分割法 (OSTU) 的思路对白色占比变化的离散数据进行二值化。用类间方差判断分割阈值的最佳点,并通过该阈值对白色占比数据进行二值化处理,效果如图 6 所示,对脉冲进行计数得到梅花针转过的齿数。

2) 峰值提取算法

采用求取变化曲线导数的思想来寻找白色占比离散变化曲线的峰值点,每一个峰值点就代表梅花针转过 1/2 齿的位置,统计峰值点的个数即梅花针转过的齿数。

通过对梅花针运动图像序列前后连续 3 张图像的白色像素占比进行计算,得到峰值点位置,并对峰值点的个数进行统计,得到梅花针转过的齿数。

3) 快速傅里叶变换

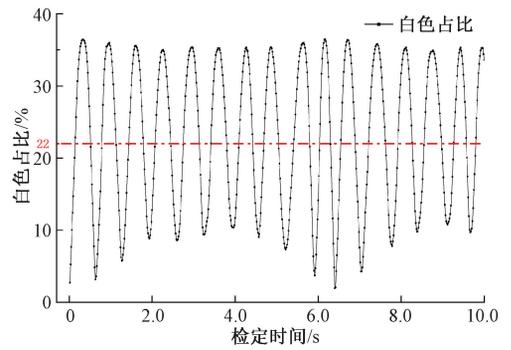
快速傅里叶变换是离散傅里叶变换的快速算法。通过快速傅里叶变换对白色占比变化的离散数据进行处理,将时域信息转化为频域信息,找到幅值最大的频率点,通过式(2)计算得到周期,进而计算出梅花针转过的齿数。

$$B = \frac{F_c}{m} \times p \times t \quad (2)$$

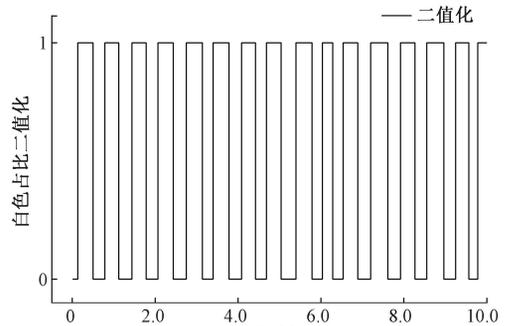
式中: B 为梅花针转动的总齿数; F_c 为相机的采样帧率; m 为进行快速傅里叶变换的白色占比数据个数; p 为经过傅里叶变换后幅值最大处的点; t 表示水表检定的时间。

4) 识别效果

使用采集帧率为 60 fps 的相机对检定过程中的不同转速的水表梅花针进行 20 s 的采集,以上 3 种方法和采



(a) 自适应二值化阈值
(a) Adaptive binarization threshold



(b) 二值化效果
(b) Binary rendering

图 6 自适应阈值法效果

Fig. 6 Rendering of adaptive threshold method

用文献[21]中人为设置采样点的方法对梅花针计数,较真值的相对误差如表 1 所示。

表 1 各识别方法较真值的相对误差

Table 1 Relative errors between true values of various recognition methods

转速/ (齿/s)	自适应阈 值法/%	峰值提 取法/%	FFT (256)/%	FFT (512)/%	采样点 法/%
1.5	0	19.35	19.35	9.68	0
4.8	0	4.21	3.16	1.05	0
8.0	0	1.88	2.50	0.63	0
10.8	0	0.46	1.39	0.92	0
13.6	0	0	1.47	1.10	0
16.2	0	0	1.23	0.62	0
19.8	0	0	0.76	0.76	2.27
22.2	0.45	0	0.68	0.68	3.58
25.4	15.18	0.19	1.18	0.79	6.02
27.2	16.16	0.55	0.18	0.92	8.82

由表 1 可见,自适应阈值法在转动速度达到相机采集帧率的 1/3 以下时,对梅花针计数十分准确,但对转动速度接近于相机采集帧率的 1/2,即接近奈奎斯特频率的梅花针无法准确计数。这是由于相机采样频率不足,白色占比变化曲线周期性很差,在一定区间上的变化不

明显,导致在使用自适应阈值进行二值化分割时,丢失了大量的真实周期,让识别结果较真值偏小,如图 7 所示。

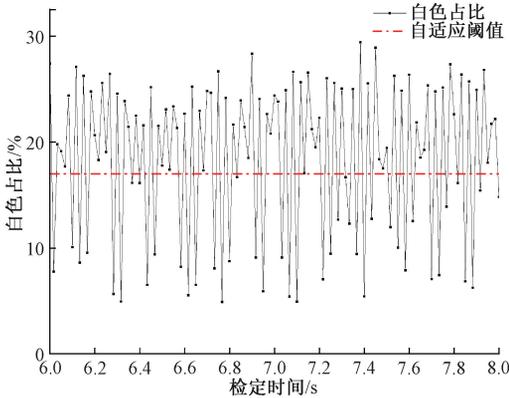


图 7 27.2 齿/s 的白色占比曲线

Fig. 7 27.2 teeth/s white ratio change curve

峰值提取算法在梅花针转动速度在相机采集帧率的 1/6 以上时,对梅花针真计数十分准确,特别是在梅花针接近相机采集帧率的 1/2 的转速下进行识别的误差不超过 1%。但是由于水表在检定过程中的水流导致的震动,梅花针转动中心不固定等因素,导致在梅花针转动速度不足相机采集帧率的 1/6 时,白色占比离散变化曲线上会出现伪波峰和伪波谷的情况,如图 8 所示。该问题会导致峰值提取算法误将伪波峰当作正常波峰进行提取,导致识别结果不准确,较真值偏大。

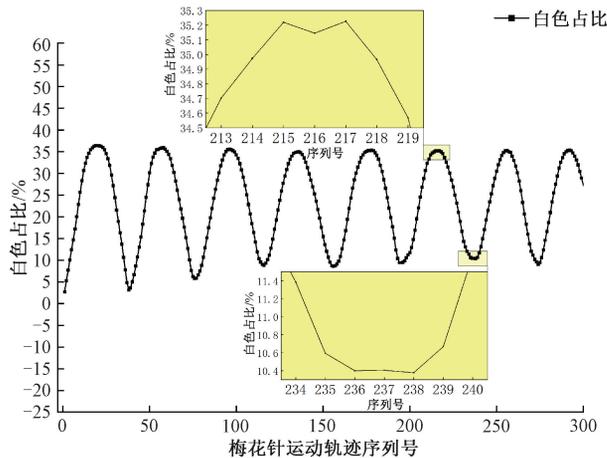


图 8 1.5 齿/s 的白色占比曲线中出现的伪波峰

Fig. 8 False peaks in the white ratio curve of 1.5 teeth/s

由表 1 可知,快速傅里叶变换选取 256 个点以及 512 个点,既没有像自适应阈值法在高转速下计数偏小,也没有像峰值提取法在低转速较真值偏大。但是对梅花针的各个转速识别上与真值比较均有偏差,无法对梅花针转动齿数进行精确计数。

人为设置采样点的方法,通过对采样点的黑白变化

进行计数,识别效果与自适应阈值相似,均为在低速时,能够准确计数,但在高速转动的情况下,得到结果与真值相差较大。

3.3 改进后峰值提取算法

前文 4 种算法在对梅花针转动齿数进行统计时,均有各自的劣势。而其中峰值提取法除在梅花针转速在相机采集帧率的 1/6 以上时,具有很好的识别准确性。因此选取对峰值提取算法进行改进,消除伪波峰在梅花针低转速下对识别结果的影响。

1) 自适应峰值提取算法

白色占比离散变化曲线中伪波峰的出现存在两种情况,一种为在真实波峰处出现伪波峰,另一种为在真实波谷处出现伪波峰。由图 8 可知,在真实波峰处,序列号为 216 的白色占比比较相邻的两个点偏小,导致在序列号为 215 和 217 均判断为峰值点。在真实波谷处,序列号为 237 的白色占比比较相邻的两个点偏大,导致该点被判断为峰值点。根据伪波峰出现的特征,为消除伪波峰对识别结果的影响,采用自适应波峰间最小间距判断相邻峰值点之间的时间间隔,以去除伪波峰的干扰。

2) 检测各波峰位置

对于离散白色占比曲线 $g(x)$,使用一阶导数来表示 $g(x_i)$ 与 $g(x_{i+1})$ 的数值变化关系,并使用符号函数进行简化,即:

$$g'_{\text{sgn}}(x_i) = \text{sgn}(g(x_{i+1}) - g(x_i)) \quad (3)$$

式中:符号函数 $\text{sgn}(x)$ 用于判断正负性。如果 $x > 0$, $\text{sgn}(x)$ 的值为 1;如果 $x = 0$, $\text{sgn}(x)$ 的值为 0;如果 $x < 0$, $\text{sgn}(x)$ 的值为 -1。即当 $g'_{\text{sgn}}(x_i) = -1$ 时,表示 $g(x)$ 在 x_i 处为递减,反之为递增。

为获得 $g(x)$ 的所有潜在峰值点 $g_p(x_i)$,对 $g'_{\text{sgn}}(x_i)$ 再进行求导,用公式表示为:

$$g_p(x_i) = g''_{\text{sgn}}(x_i) = g'_{\text{sgn}}(x_{i+1}) - g'_{\text{sgn}}(x_i) \quad (4)$$

以 $g_p(x_i) = -2$ 为条件,即 $g(x)$ 在 x_i 处先增后减,对所有潜在峰值点 $g_p(x_i)$ 进行筛选,并将潜在峰值点的个数记为 P 。此时,该潜在峰值点不仅包括正确峰值点,还包括波峰处的伪波峰和波谷处的伪波峰。

使用波峰间最小间距 C 找到符合 $g_p(x_i) = -2$ 的 x_i 附近,半径为 C 以内的伪波峰位置点,将数量记为 P_1 并删除。此时,已去除真实波峰处的伪波峰对结果的影响。

3) 去除波谷处伪波峰

但是由于梅花针在转动过程中,在一部分水表中会出现梅花针中心不固定,也在以一定位置做圆周运动,使得不同周期差距较大,最大差距接近两倍。因此若在最大周期的波谷处出现伪波峰时,该伪波峰与前后两个波峰的间距与最小周期相近,使得仅判断波峰间距就无法将该伪波峰去除通过对波谷处伪波峰出现特点的研究,发现当出现伪波峰时一定会出现伪波谷,即在图 8 的序

列号为 236 和 238 的两个点均判断为波谷。因此通过统计真实波谷处伪波谷的数量来得到在波谷处出现的伪波峰,并予以剔除。

以 $g_p(x_i) = 2$ 为条件,即 $g(x)$ 在 x_i 处先减后增,对所有潜在峰值点 $g_p(x_i)$ 进行筛选,并使用波峰间最小间距 C 找到 x_i 附近,半径为 C 以内的伪波谷位置点,将数量记为 P_2 并删除,得到准确的波峰数量,即:

$$P_r = P - \sum P_i \quad (5)$$

式中: P_r 为正确波峰点数量, P 为潜在波峰点数量, P_i 伪波峰数量。

为了让所选取的波峰间最小间距能够适应不同的梅花针转速,采取使用对前 64 个点的快速傅里叶变换的方法得到梅花针转过的齿数粗略值,并且根据伪波峰出现的特征经过以及大量实验选定采用式(6)来得到用于去除伪波峰的自适应波峰间最小间距。

$$C = \lfloor \frac{n}{5B_f} + 1 \rfloor \quad (6)$$

式中: C 为自适应波峰间最小间距; B_f 为对前 64 个点进行 FFT 得到的梅花针在总时间内转过的齿数; n 为梅花针运动轨迹图像序列的图像个数。

算法流程如图 9 所示。

4 实验测试

为了检验本文提出的算法精度,选取了重复性较好的水表作为验证水表作为被检表。实验环境为浙江省计量院的水表检定装置,如图 10 所示,通过外置采集帧率 60 fps 的相机在水表检定过程中进行图像采集,如图 11 所示。

该被检表为 DN15 的机械式水表,脉冲当量为 0.011 111 L,以通水流速为 60 L/h 的前 10 s 白色像素变化曲线为例,通过自适应峰值提取算法对梅花针计数效果与如图 12 所示。

由图 12 可以看到,自适应峰值提取算法可以在小流量的情况下,克服在正常波峰和波谷处出现的伪波峰对梅花针计数结果的影响。

实验结果如表 2 所示,其中测量值通过式(7)得到。

$$V_c = \delta \times Q \quad (7)$$

式中: V_c 为测量值; δ 为被测表的脉冲当量; Q 为不同算法下梅花针的计数结果。

从表 2 中可以看到本文提出的自适应峰值提取算法保留了峰值提取法在接近 1/2 相机采集帧率的转速下,有着较高的识别准确性的优势,如通水流量 1 088 L/h 时,梅花针转速为 27 齿/s。并且克服了在小流量下曲线中出现伪波峰对计数结果的影响,如通水流速 432 L/h 时,即梅花针转速在 10 齿/s 以下。在实际的水表检定装

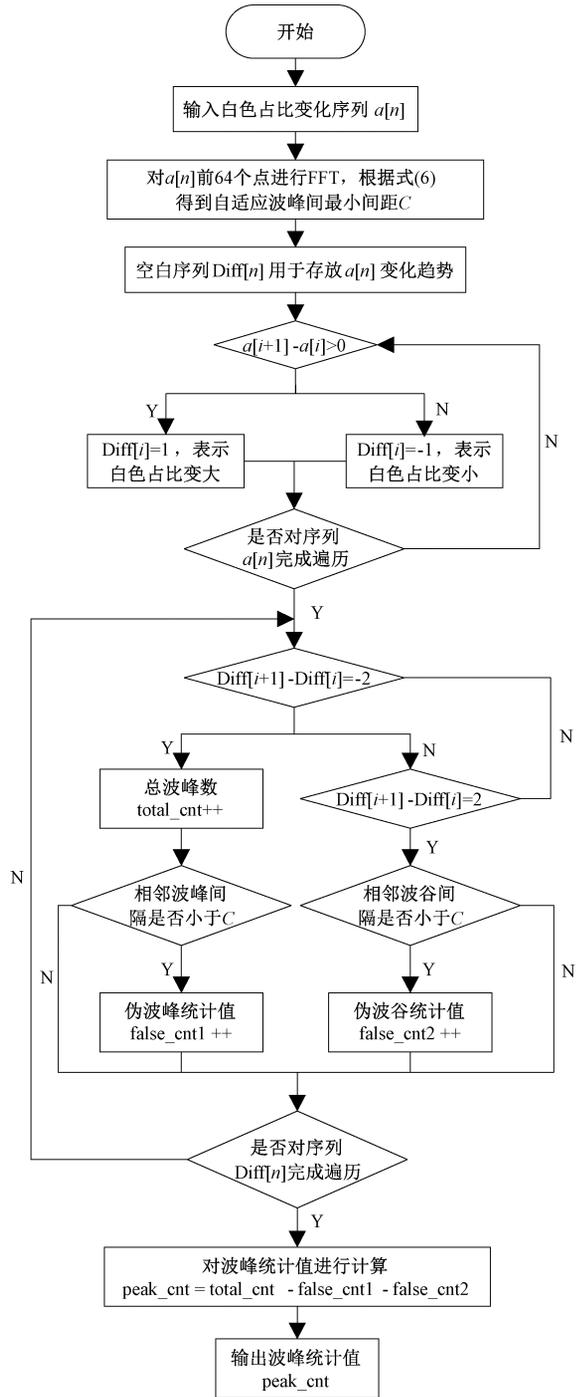


图 9 自适应峰值提取算法流程

Fig. 9 Flow chart of adaptive peak picking algorithm

置上能够准确地识别水表读数。

5 结论

针对水表梅花针在接近于采集频率 1/2 的高速转动下识别效果差的问题,提出了一种基于自适应峰值提取



图 10 水表检定装置

Fig. 10 Water meter calibration device



图 11 外置相机摆放位置

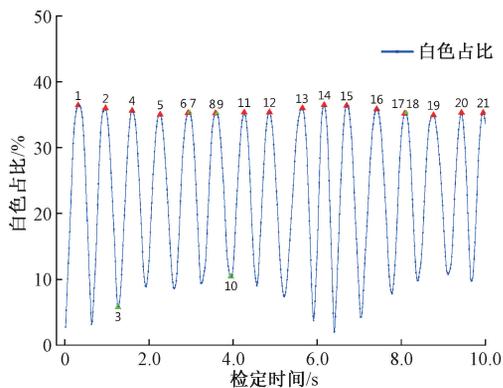
Fig. 11 External camera position

表 2 水表检定装置上识别效果

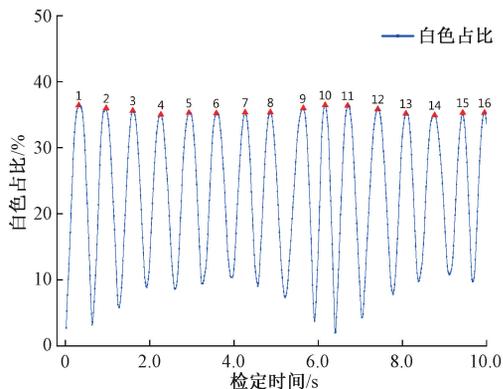
Table 2 Recognition on water meter calibration device

通水 流速/ (L·h ⁻¹)	水表 读数/L	峰值提取算法		自适应峰值提取算法	
		测量值/ L	相对误差/ %	测量值/ L	相对误差/ %
32	2.06	2.578	25.15	2.056	0.194
60	2.07	2.467	19.18	2.067	0.145
190	2.12	2.200	3.774	2.111	0.425
320	2.01	2.173	8.109	2.000	0.498
432	2.09	2.098	0.383	2.088	0.096
544	10.58	10.578	0.019	10.578	0.019
600	10.60	10.588	0.113	10.588	0.113
648	10.81	10.800	0.093	10.800	0.093
792	11.02	11.000	0.181	11.000	0.181
800	10.57	10.556	0.132	10.556	0.132
888	10.86	10.853	0.064	10.853	0.064
1016	10.72	10.703	0.159	10.703	0.159
1088	10.28	10.219	0.593	10.219	0.593

算法的水表梅花针计数方法,通过背景异或法获取梅花针运动轨迹,并统计白色占比曲线周期。选用峰值提取法并加入自适应波峰间最小间距判断峰值点间隔,以滤



(a) 峰值提取法
(a) Peak picking algorithm



(b) 自适应峰值提取法
(b) Adaptive peak picking algorithm

图 12 自适应峰值提取算法效果对比

Fig. 12 Comparison of adaptive peak picking algorithms

除伪波峰从而准确计算梅花针齿数。通过实际水表检定环境,对本文算法进行了定性和定量分析,结果表明该算法显著提高了梅花针识别效果,误差不超过 1%,具有工程应用价值。然而,图像可能受气泡和光线影响,且现有相机无法满足 Q3 流量点采集要求。未来研究方向将致力于消除气泡影响、增强抗光线干扰能力以及验证算法在高速工业相机下的效果。

参考文献

[1] JJG 162-2019 饮用冷水水表 [S]. JJG 162-2019 Cold Potable Water Meter [S].

[2] 程良利,唐旭晟,朱博文,等. 基于机器视觉的水表机芯灵敏度检测[J]. 电子测量与仪器报, 2021, 35(6): 88-95. CHENG L L, TANG X SH, ZHU B W, et al. Sensitivity detection of water meter movement based on machine vision [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(6): 88-95.

[3] 盛庆华,李竹,邵展坚,等. 基于双重霍夫空间投票的指针表自动读数方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 230-239.

- SHENG Q H, LI ZH, SHAO ZH J, et al. Automatic reading method of pointer meter based on double Hough space voting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 230-239.
- [4] WEN K, LI D, ZHAO X, et al. Lightning arrester monitor pointer meter and digits reading recognition based on image processing [C]. IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2018: 759-764.
- [5] MENG L, CHENG J. Research on the visual recognition method of pointer water meter reading [C]. IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2021: 909-914.
- [6] 宫倩, 别必龙, 范新南, 等. 基于关键点检测的指针仪表读数算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 66-73.
- GONG Q, BIE B L, FAN X N, et al. Pointer meter reading algorithm based on key point detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 66-73.
- [7] ZHANG Q Q, BAO X A, WU B, et al. Water meter pointer reading recognition method based on target-key point detection [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 81: 102012.
- [8] 陶金, 林文伟, 曾亮, 等. 基于 YOLOv4-tiny 和 Hourglass 的指针式仪表读数识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(5): 1-10.
- TAO J, LIN W W, ZENG L, et al. Pointer meter reading recognition based on YOLOv4-tiny and Hourglass [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(5): 1-10.
- [9] 胡鑫, 欧阳华, 尹洋, 等. 一种改进的指针式仪表读数识别方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(13): 132-137.
- HU X, OUYANG H, YIN Y, et al. An improved recognition method of pointer [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(13): 132-137.
- [10] 王志威, 郑恭明. 改进残差网络的字轮式数字表盘识别算法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2357-2362.
- WANG ZH W, ZHENG G M. Improved residual network recognition algorithm for digital dial [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(6): 2357-2362.
- [11] PENG Y, CHEN Z. Application of deep residual neural network to water meter reading recognition [C]. IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), 2020: 774-777.
- [12] 翟娅娅, 朱磊, 张博. 基于改进 YOLOv4 网络的水表读数识别方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9207-9214.
- ZHAI Y Y, ZHU L, ZHANG B. Reading recognition of water meter based on improved YOLOv4 network [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21): 9207-9214.
- [13] 林阳, 郭丙轩, 肖雄武, 等. 利用多种投票策略的水表读数字符分割与识别[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(10): 50-57.
- LIN Y, GUO B X, XIAO X W, et al. Water-meter character segmentation and recognition method by using several voting strategies [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(10): 50-57.
- [14] LI X J, GAO Y. Digitization of conventional water meters using automated number recognition [C]. IEEE Region 10 Conference (TENCON), 2021: 470-475.
- [15] 张圆明, 卢其伦, 司徒臻, 等. 基于激光传感器的机械式水表自动检定装置设计[J]. 广东科技, 2021, 30(10): 85-88.
- ZHANG Y M, LU Q L, SITU CH, et al. Design of automatic verification device for mechanical water meter based on laser sensor [J]. Guangdong Science & Technology, 2021, 30(10): 85-88.
- [16] 孔明, 王欢, 郭天太. 一种小流量区水表检测系统的开发[J]. 中国计量学院学报, 2014, 25(2): 134-138.
- KONG M, WANG H, GUO T T. Development of a fast water-meter detection system in small flow zones [J]. Journal of China University of Metrology, 2014, 25(2): 134-138.
- [17] YAN G, SUN J, LU T. Research on monocular vision positioning technology used in water meter verification [C]. International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering. IEEE, 2018: 60-64.
- [18] 陈硕, 骆腾斌, 刘丰, 等. 应用于水表检定的机器视觉技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(1): 144-149.
- CHEN SH, LUO T B, LIU F, et al. Research on machine vision technology applied in water meter verification [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(1): 144-149.
- [19] 林柯楠, 庄园, 黄咏梅. 基于机器视觉的水表小流量检定方法研究[J]. 计量学报, 2021, 42(9): 1167-1171.
- LIN K N, ZHUANG Y, HUANG Y M. Research on small flow verification method of water meter based on machine vision [J]. Acta Metrologica Sinica, 2019,

42(9): 1167-1171.

[20] 郑博文. 基于机器视觉技术的全自动水表检定装置研制[J]. 中国测试, 2021, 47(S2): 149-152.

ZHENG B W. Development of automatic water meter verification device based on machine vision technology [J]. China Measurement & Test, 2021, 47(S2): 149-152.

[21] 陈硕, 刘丰, 唐旭晟, 等. 基于机器视觉技术的水表在线检定系统研究[J]. 计量学报, 2017, 38(4): 473-476.

CHEN SH, LIU F, TANG X SH, et al. Research on on-line water-meter verification system based on computer vision technology [J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(4): 473-476.

[22] 张圆明, 卢其伦, 樊强, 等. 水表检定装置自动读数设备国内外研究现状分析[J]. 中国计量, 2021(9): 89-92.

ZHANG Y M, LU Q L, FAN Q, et al. Analysis on the research status of automatic reading equipment for water meter verification device at home and abroad [J]. China Metrology, 2021(9): 89-92.

作者简介



王威, 2016 年于浙大城市学院获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为流量计量。

E-mail: wangwei_934@cjlu.edu.cn



Wang Wei received his B. Sc. from Hangzhou City University in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at China Jiliang University. His main research interest includes flow metrology.

徐志鹏(通信作者), 2004 于浙江大学获得学士学位, 2010 年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学副教授, 主要研究方向为气动元件与系统、流量计量技术、气动传热学。

E-mail: xuzhipeng@cjlu.edu.cn

Xu Zhipeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhejiang University in 2004 and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2010, respectively. Now he is an associate professor in China Jiliang University. His main research interests include pneumatic components and systems, flow measurement technology and pneumatic heat transfer.