

文章编号: 1672-8785(2020)07-0011-07

## 红外系统调焦组件的回程间隙对自动调焦的影响分析与算法优化

张 倩 刘纪洲

(中国电子科技集团第十一研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 介绍了红外系统中自动调焦技术的基本原理, 详细分析了调焦组件的机械回程间隙对传统自动调焦算法效果的影响。就此提出了不同优化方案并充分考虑了算法的适用性及稳定性。最后, 通过设计实验验证了算法的可行性, 实现了快速、稳定、精确的自动对焦, 并将其应用于工程实践中。

**关键词:** 自动调焦; 回程间隙; 评价函数; 爬坡算法

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.07.003

## Effect of Focusing Mechanism Backlash on Auto-Focus and Algorithm Optimization in Infrared System

ZHANG Qian, LIU Ji-zhou

(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

**Abstract:** This paper introduces the basic principle of auto-focus technology in infrared systems, and analyzes in detail the influence of focusing mechanism backlash on the traditional auto-focus algorithm. A variety of optimized schemes are proposed, and the applicability and stability are fully considered. Finally, an experiment is designed to verify the feasibility of the algorithm which realizes fast, stable and accurate auto-focus, and the algorithm can be used in engineering practice.

**Key words:** auto-focus; backlash; evaluation function; mountain climb algorithm

### 0 引言

随着电子技术和计算机科学技术的飞速发展, 红外热成像系统被广泛应用于电子科技领域。作为红外系统中的关键技术, 自动调焦技术不仅突破了人眼操作时主观因素的限制并提升了调焦的快速性和精确性, 而且还大大扩展了红外系统的应用范围(如无人机侦查系统、

边海防自控检测系统、工业生产线自动监测系统)等), 使得红外系统向着智能化、通用化和民用化的方向发展<sup>[1]</sup>。

在成像系统中, 能否准确聚焦决定了成像质量, 也会直接影响系统后续图像处理和应用的有效性。因此, 在红外系统应用和自动调焦过程中, 准确聚焦功能是需要解决的首要问

**收稿日期:** 2020-07-07

**作者简介:** 张倩(1992-), 女, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式软件开发、红外热像仪微电机控制等方面的研究。E-mail: zhangqianbuaa922@163.com

题<sup>[2]</sup>。

红外系统中的自动调焦是指用光电元件代替人眼，并通过一系列的图像处理来观察成像是否清晰，然后再结合调焦电机的控制算法来驱动电机以找到最清晰成像位置的过程<sup>[3]</sup>。在此过程中，系统的硬件结构、电机的控制以及图像处理与传输的精密配合决定了自动调焦的速度、精度、稳定性以及最终的成像效果。

然而过去的研究大多从图像处理算法着手而较少考虑机械结构，尤其忽视了调焦组件的回程间隙对自动调焦的影响。它们虽然可以实现系统自动调焦的基本功能，但不具有广泛的适用性。不同的调焦结构会产生不同的成像效果，图像质量也会因为机械结构或安装方法的不同而产生差异。本文分析了调焦组件的回程间隙对红外系统自动调焦效果的影响，提出了不同的优化方案，搭建了实验环境并验证了这些方案的可行性，最终将其应用于工程实践。

## 1 红外系统的自动调焦方法

红外系统的自动调焦技术主要是在对图像

进行预处理的基础上，采用数字式或半数字式控制方法对图像进行能量分析与计算，并判断图像的清晰程度，使调焦电机带动光学镜头运动到合理位置上，从而达到图像从模糊变清晰的目的。自动调焦系统的结构框图如图 1 所示。

由于图像或信号的大部分能量集中在中低频段，高频成分决定了图像的丰富程度。将一帧图像中的高频成分值作为图像的评价函数。评价函数越大，图像越清晰<sup>[4]</sup>。自动调焦就是通过控制电机驱动来引起图像评价函数的变化，并求取评价函数最大值的过程。

## 2 评价函数及爬坡算法

评价函数是自动调焦过程中的重要参考依据。常用的评价函数有灰度梯度函数、频域函数、信息学函数和统计学函数<sup>[5]</sup>。我们选用灰度梯度函数并选取拉普拉斯像素模板作为评价算子。选取的拉普拉斯像素模板矩阵为

$$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

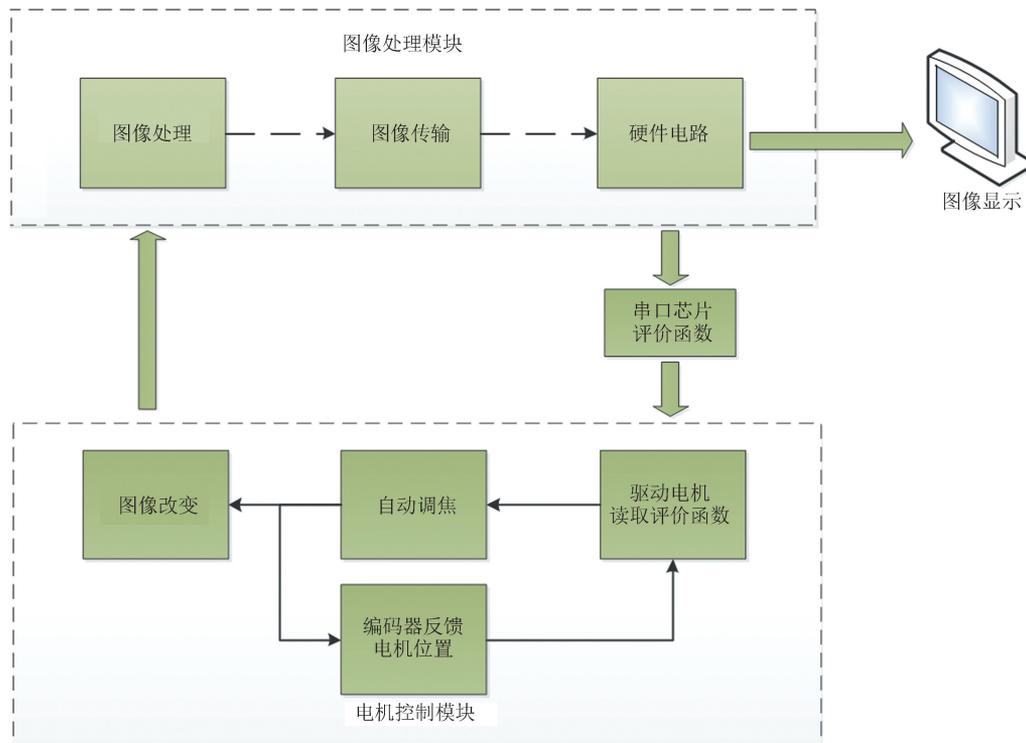


图 1 自动调焦系统的基本框图

则一帧目标图像的评价函数为

$$D_{EV} = \sum_M \sum_N [4f(i, j) - f(i, j-1) - f(i, j+1) - f(i-1, j) - f(i+1, j)] \quad (1)$$

式中,  $f(x, y)$  表示调焦区域中第  $x$  行第  $y$  列像素的灰度值,  $D_{EV}$  为图像窗口的评价函数值,  $M$  和  $N$  表示图像的尺寸。不同的图像尺寸可以实现窗口大小的调整。由此可以得到整个调焦区间内所有图像的评价函数(见图 2)。

评价函数具有单峰性和实时性等特点。其中, 单峰性是指评价函数在调焦范围内有且只有一个最大值, 而且最大值两边是单调的。这是评价函数最重要的特性。利用该特性设计自动调焦算法并完成自动调焦过程。

爬坡算法是寻找图像评价函数极值的常用算法。它是一种局部择优的方法, 可避免遍历并通过选择部分节点来达到提高效率的目的。首先, 控制调焦电机及调焦镜组件往一个方向运动, 同时计算图像评价函数。即电机每走一步, 就计算一帧图像的评价函数。自当前节点开始, 将其评价函数值与周围节点进行比较。

若呈现递增趋势, 则认为调焦电机处于爬坡的过程; 若呈现递减趋势, 则认为调焦电机处于下坡的过程, 并驱动调焦电机反向运动。最后将调焦电机驱动至图像评价函数最大时的位置来完成自动调焦。

### 3 回程间隙对爬坡算法的影响

由于调焦镜由电机驱动, 两者之间通过多个齿轮组件啮合而形成调焦组件, 从而实现调焦镜的前后移动。而在一系列的调焦组件系统中, 机械结构的制造误差和各个齿轮之间的装配误差带来了传动系统中的回程间隙(见图 3), 导致电机发生变向运动时其反向转动并没有带动调焦镜发生位移, 从而造成一定角度的空回。待电机转过一定角度后, 调焦镜的位置才会随着电机的转动而改变<sup>[5]</sup>。也就是说, 电机编码器在这个过程中一直记录着电机转动角度, 但是图像的清晰程度及评价函数却没有发生相应改变。因此, 每帧图像的评价函数所对应的都是错误的电机位置。

可以通过一些装配手段(如提高齿轮的加

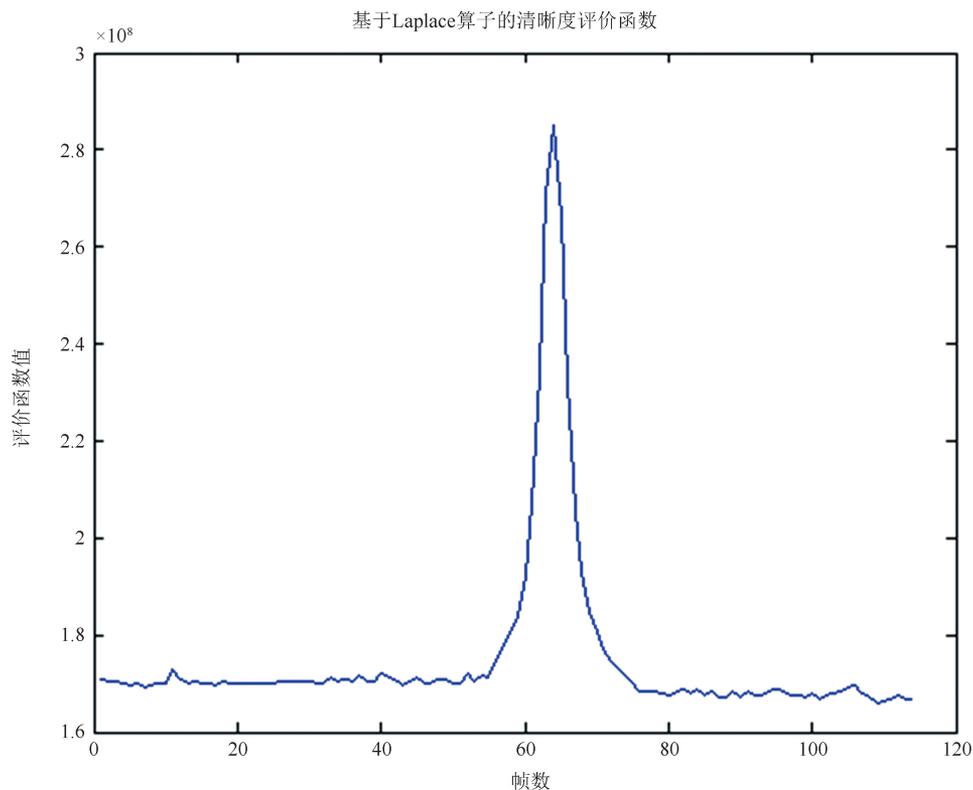


图 2 评价函数

工精度、提高机械组件之间的配合精度)来减小间隙。但是这些方法不仅会大大提高加工成本,而且也容易受外界环境(如温度与湿度)和使用次数的影响而降低系统的可靠性,故局限性较大。而且组件之间的回程间隙是固定存在的,提高装配精度也无法将其彻底消除。因此,本文通过优化自动调焦算法(即用软件控制)来消除回程间隙对调焦的影响。

在机械结构已完成精密加工的基础上,通过实验来研究仍然存在的回程间隙对自动调焦系统的影响。基于调焦电机的正向和反向运动得到了两组曲线(见图4)。这两组曲线在理想状态下应该重合,但实际上并没有。电机正向运动时评价函数的峰值位置(即图像最清楚的

位置)并不是反向运动时的峰值位置。这个位置差就是由回程间隙产生的。

我们由此可以得出以下结论:调焦组件的回程间隙对自动调焦过程产生了不可忽视的影响。若在此基础上执行简单的爬坡算法,效果不理想,甚至会导致自动调焦失败。

#### 4 自动调焦算法优化

根据上述分析,我们提出了以下优化方案。

##### 4.1 软件补偿

一般而言,由调焦组件回程间隙引起的误差属于系统误差,只有在电机发生变向运动时才发生。因此,我们可以采用软件补偿的方法

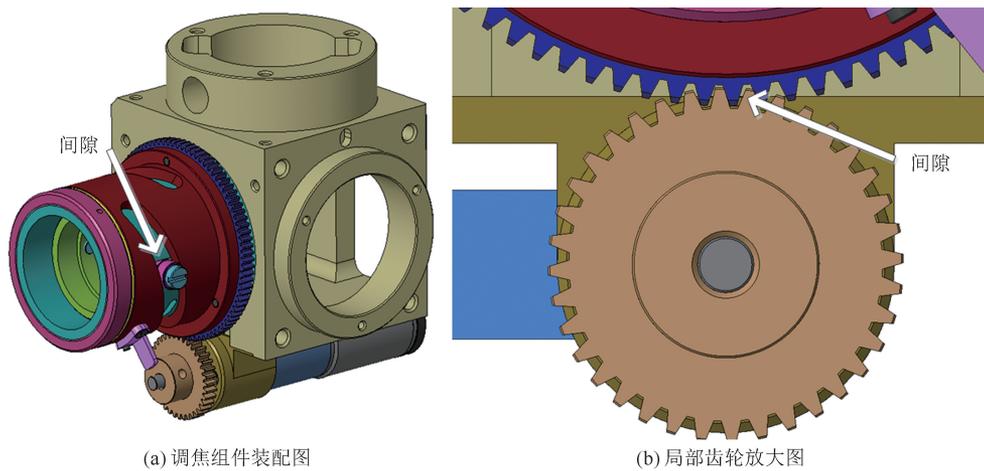


图3 调焦组件间隙图

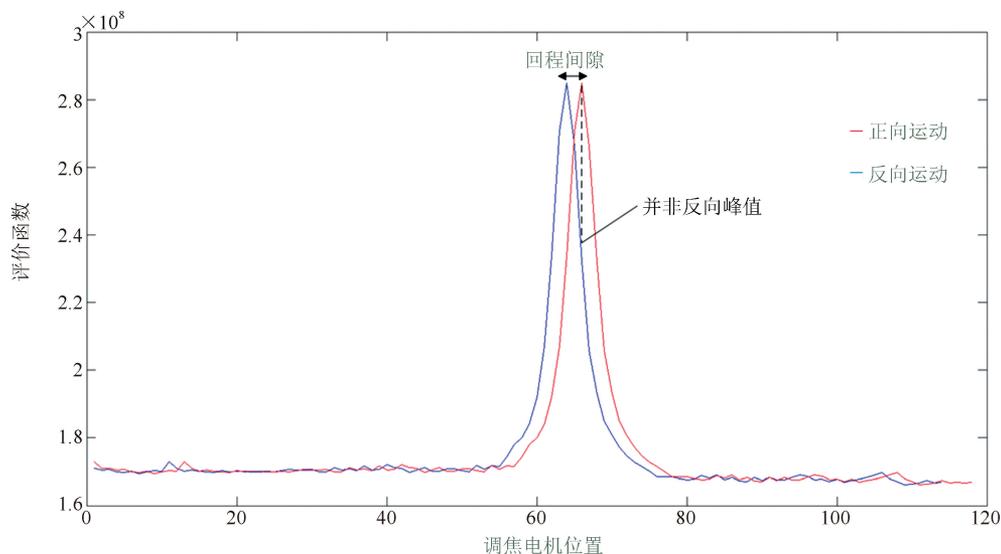


图4 实际爬坡算法过程

将回程间隙换算为电机相应的位移量, 并在电机反向运动时进行相应的补偿, 即

$$y' = y + \Delta y \quad (2)$$

式中,  $y'$  为电机反向位置,  $y$  为编码器反馈位置,  $\Delta y$  为回程间隙补偿。可以采用专业的测量方法来计算  $\Delta y$ 。用精密仪器测量两齿轮啮合处的间隙距离, 并将其转换为编码器的码数, 用于电机控制闭环回路中的补偿。但由于环境温度的变化、使用次数的增多以及组件机械结构的不同, 调焦组件的齿轮啮合会发生变化, 回程间隙也会相应地产生不同程度的改变。所以不能将  $\Delta y$  作为固定参数来保存。

本文提出一种软件测量方法来检测回程间隙。根据前面的分析, 评价函数的峰值在电机正向和反向运动中产生的位移偏差即为整个调焦组件的回程间隙。依据这个特性, 可以在同一红外系统的初始化过程中或者待环境条件稳定后, 直接使用软件计算出相应的位移量, 并将其换算成电机编码器的值, 从而在自动调焦时进行补偿。

软件补偿方案具有速度快特点, 但对于回程间隙的标定则具有一定的局限性。当峰值位置位于调焦范围的极限时, 会出现只有一个峰值的情况。因此, 软件补偿只适用于局部范围内的快速微调。

#### 4.2 电机运动控制方案的优化

在整个自动调焦过程中, 保证极值点出现时电机的运动方向与最后一步电机位置到极值位置的方向相同。首先, 驱动电机正向运动。

若开始为上坡运动, 则先越过极值点并记录, 待电机下坡运动后再反向。当电机又进行下坡运动后, 再正向驱动电机至第一次记录的极值位置(见图 5(a))。若开始为下坡运动, 则立刻反向并驱动电机爬坡, 直到电机又进行下坡运动时再驱动电机正向运动, 从而确保越过极值点后反向置位至极值点(见图 5(b))。

该方案可以准确地消除回程间隙所产生的误差。但是由于电机反向次数增多, 自动调焦的速度会变慢。

#### 4.3 最终方案

以上两种方案都有一定的局限性, 因此将它们结合起来。首先, 在方案二的基础上改变电机速度, 即在评价函数不同的位置上改变电机速度: 在函数变化平缓区将电机速度加快; 在函数变化陡峭区降低电机速度。在降速的同时, 可以准确地找到回程间隙  $\Delta y$ 。同时使用方案二对局部场景进行微调, 保证了自动调焦的速度和精度。

调焦电机的运动过程及控制流程如图 6 所示。

### 5 实验结果与分析

为了验证经上述优化后的自动调焦算法, 我们选用制凝视型中波红外热像仪设备(1280×1024), 将 FPGA 作为硬件平台来进行图像处理及评价函数运算, 并选取 STM32 来实现爬坡算法的峰值搜索和调焦电机的驱动控制。采用 Faulhaber 直流电机和同系列编码器来完成电机闭环控制。

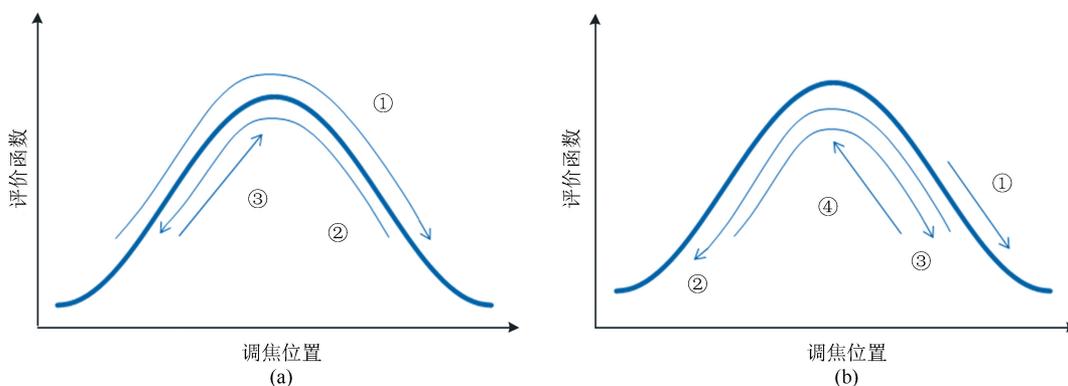


图 5 调焦驱动过程

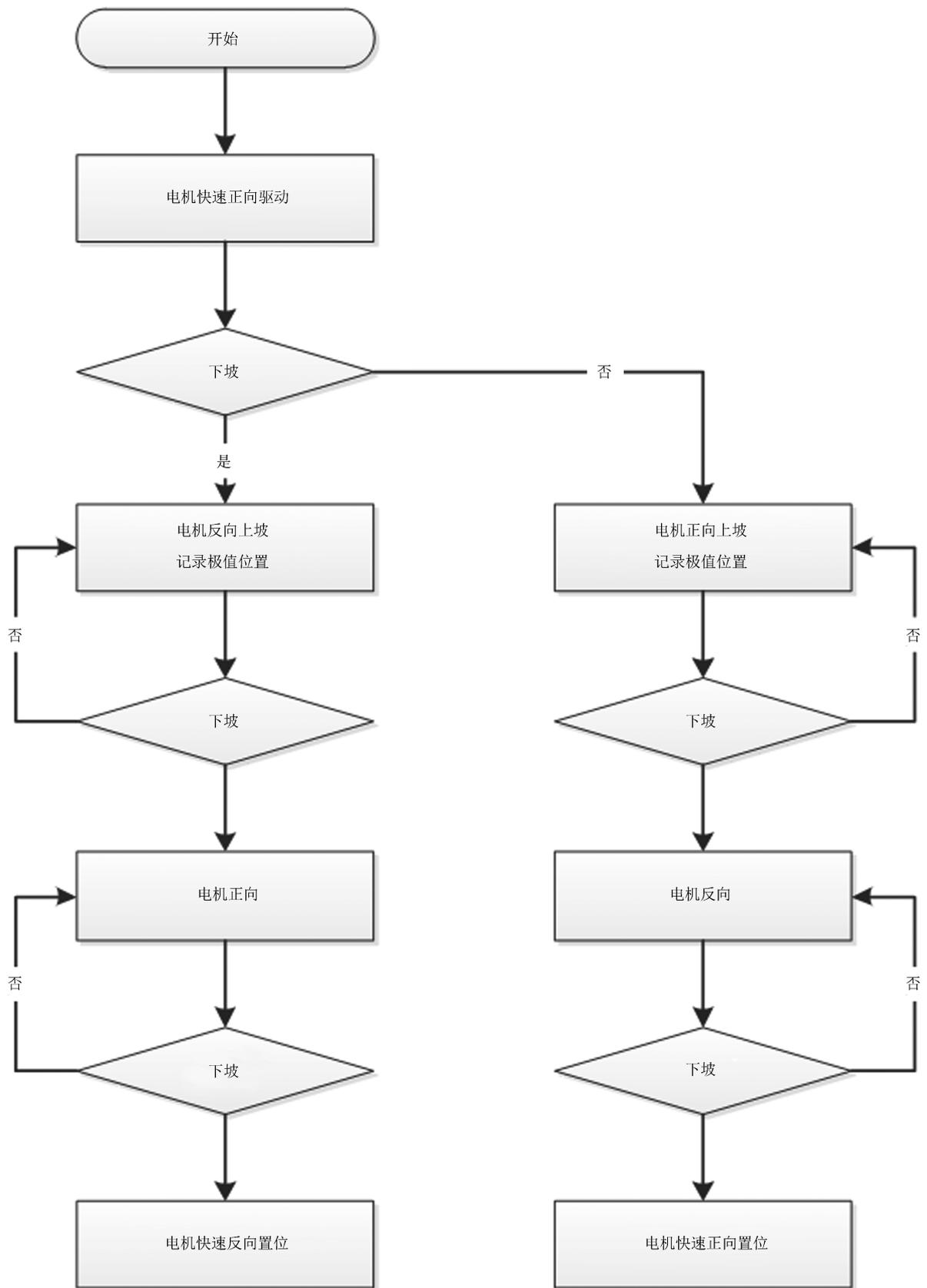


图 6 电机控制流程图



图 7 自动调焦效果图

实验结果(见图 7)表明,优化后的自动调焦方案基本消除了调焦组件的回程间隙对自动调焦的影响,而且调焦速度得到了提升。该方案适用于不同环境下的红外系统以及不同结构的调焦设备,大大提高了红外系统自动调焦功能的稳定性和适用性。

## 6 总结

本文分析了红外系统中调焦组件的回程间隙对自动调焦的影响,在传统爬山算法的基础上提出了几种不同的自动调焦优化方案,并将优化后的算法应用于实验中。结果表明,调焦组件的回程间隙对自动调焦的影响基本被消除,自动调焦的效率得到了提高。该算法适用于不同的环境以及不同的红外设备,提高了自动调焦功能的稳定性和可靠性。最后将其应用于实际的工程项目中,并获得了十分理想的效

果,为今后工程中实现实时自动对焦功能打下了基础。

## 参考文献

- [1] 陶金有. 基于图像处理的自动调焦算法的研究及系统实现 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2014.
- [2] 黄德天. 基于图像技术的自动调焦方法研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
- [3] 许兆林, 赵育良, 张玉叶, 等. 基于光学自准直的航空相机自动调焦系统 [J]. 光学仪器, 2011, 33(2): 52-56.
- [4] 郑玉珍. 自动对焦中的优化爬山搜索算法 [J]. 浙江科技学院学报, 2005, 17(3): 171-174.
- [5] 张辉. CCD 图像检测系统自动调焦的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.