

蒸发液滴空间实验研究的图像反馈控制系统

于 强¹ 宁 乔^{1,4} 朱志强^{2,4} 袁章福³

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

²(中国科学院力学研究所)

³(中国科学院过程研究所)

⁴(中国科学院研究生院)

摘 要 提出了一种利用图像反馈控制系统测量液滴蒸发速率的方法. 该系统主要由图像采集、图像处理、反馈控制三个部分组成. 其工作原理是对 CCD 采集到的液滴图像进行分析, 得到液滴的物性参数, 利用控制注液器动态注入来维持液滴的大小, 由此得到单位时间内的注入量, 即液滴蒸发速率. 或通过对液滴图像几何尺寸的计算, 得到单位时间内液滴的变化量, 进而得到液滴的蒸发速率. 为了从动态变化的图像中准确找到液滴的轮廓, 简单介绍了基于拉普拉斯方程, 运用牛顿法和龙格库塔法等数值方法, 对图像轮廓进行拟合的算法理论. 以拟合得到的液滴轮廓为基础, 利用数值积分计算液滴的表面积和体积, 从而由体积的变化量确定蒸发速率. 介绍了图像反馈控制系统的软件结构和硬件结构, 并给出了利用其进行液滴蒸发测量得到的实验结果. 该系统是为我国 SJ-10 返回式卫星上蒸发与流体界面效应空间实验研究项目专门开发的.

关键词 蒸发速率; 图像处理; 反馈控制

中图法分类号 V524

Image Feedback Control System in the Space Drop Evaporation Experiment

YU Qiang¹ NING Qiao^{1,4} ZHU Zhiqiang^{2,4} YUAN Zhangfu³

¹(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

³(Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences)

⁴(Graduate University of Chinese Academy of Sciences)

Abstract In this paper, a method to measure the drop evaporation velocity by image feedback control system is presented. The system is constituted of 3 parts: image acquisition, image processing, and feedback control. Analyzing drop pictures from the CCD camera, the physical features of the drop could be obtained, and evaporating volume could be calculated from the geometry differences between two pictures. To maintain the drop volume, drive the injector to inject dynamically. The evaporation velocity could be calculated by the evaporating volume per unit time. In order to determine the accurate contour of the dynamically changed drop, the contour approach principle is investigated and some numerical algorithms such as Laplace equation, Newton-Raphson method

2007-08-22 收到原稿, 2007-11-15 收到修定稿

and Runge-Kutta method are introduced. Based on the drop contour determined from the contour approach, the volume and the surface area of drop could be calculated by numerical integral. The software structure and hardware structure of the system are described, an experiment result is given finally. The system is developed for the liquid experiment in SJ-10 recoverable satellite.

Key words Evaporation velocity, Image processing, Feedback control

1 引言

空间流体蒸发实验中蒸发速率的测量是主要的实验内容之一. 针对空间液滴蒸发实验而构建的图像反馈控制系统, 由图像采集系统^[1]、图像处理软件系统和反馈控制系统三个模块组成. 系统的总体结构如图 1 所示. 其主要功能是在液滴蒸发实验过程中, 监控液滴的状态, 分析采集到的液滴图像, 并进行反馈控制, 由此得到液滴的蒸发速率.

图像采集系统和反馈控制系统是主要的硬件模块, 前者是液滴图像的来源, 后者负责液滴注入系统的控制. 图像处理软件系统的功能是针对采集到的液滴图像进行分析处理, 衔接两个硬件模块并提供用户接口. 本文研究的蒸发液滴图像采集、实时分析计算和反馈控制系统, 是实现空间蒸发液滴热毛细对流和接触角测量实验的一项关键技术, 也是直接为我国十一五返回式科学实验卫星上的蒸发与流体界面效应空间实验研究项目而开发的专用流体实验设备, 同时也可以用于地面的流体科学实验.

2 算法和原理

2.1 轮廓拟合原理

液滴轮廓的求取可以直接采用图像处理的方法进行边缘提取, 图 2(a) 所示为模拟液滴用的钢珠, 图

2(b)~(f) 分别为用 Robert 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Kirsch 算子和 Guass-Laplace 算子^[2]提取的钢珠轮廓. 由图 2 可知, Kirsch 算子和 Guass-Laplace 算子引入了较多的噪声干扰, Robert 算子提取的边界比较模糊, Sobel 算子和 Prewitt 算子提取的轮廓较为清晰, 且 Sobel 算子检测得到的边缘对比度最强. 本系统采用 3×3 的 Sobel 算子进行边缘检测, 然后提取最外围的轮廓作为液滴的轮廓.

对图 2(c) 所示的 Sobel 处理进行域值处理后, 得到图 3(a) 所示的二值图, 提取二值图最外围轮廓, 得到图 3(b) 所示的液滴轮廓, 此即为实验轮廓点. 由于拍摄的图像难免有噪声干扰, 图像处理的精度有限, 提取到的最外围轮廓很容易包含噪声点和虚假轮廓, 反光强烈时还会产生边缘断裂的情况. 为了精确地确定液滴的边缘, 需要以实验轮廓点为基础, 对液滴轮廓进行曲线拟合处理.

液滴轮廓拟合的方法是以如下拉普拉斯方程^[5]为基础的:

$$\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \Delta P. \quad (1)$$

其中, γ 为表面张力, R_1 和 R_2 为边缘点的第一和第二曲率半径, ΔP 为表面上的压力差. 式 (1) 提供了液滴几何特性 (曲率半径) 和物理特性 (表面张力) 之间的转换关系, 通过对式 (1) 进行变换, 并结

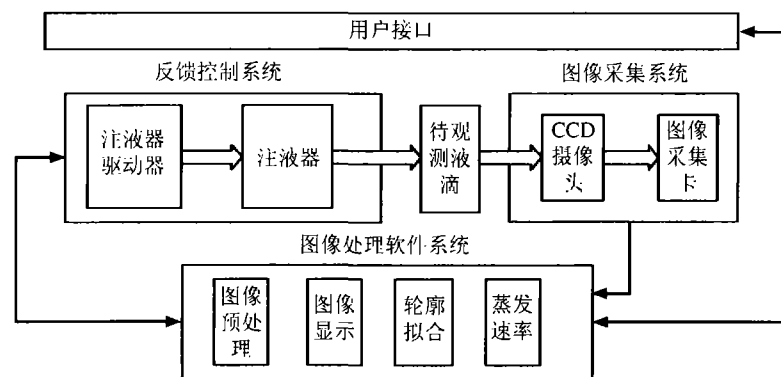


图 1 系统总体结构

Fig.1 System construct

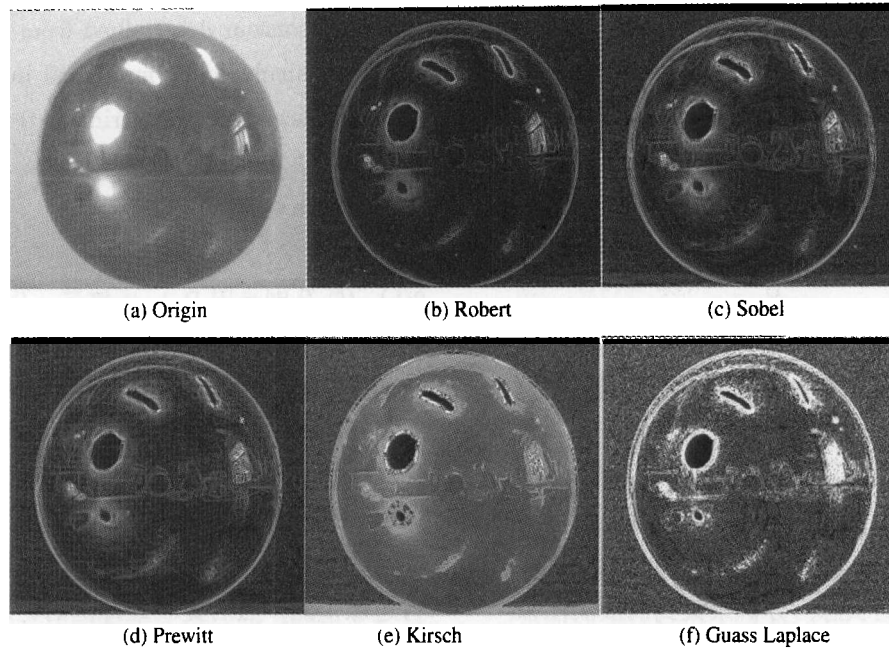


图2 边缘检测

Fig.2 Edge detection graph

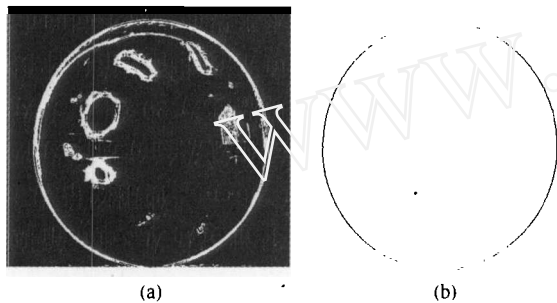


图3 提取实验轮廓点

Fig.3 Pick-up experiment point

合图像中的坐标关系, 可以利用牛顿法和龙格库塔法^[6]等数值方法, 对图像轮廓进行拟合, 并在轮廓逼近的过程中, 求取液滴的表面张力和接触角^[4]. 由拟合得到的轮廓和已知的图片放大率, 利用数值积分可以计算液滴的表面积和体积.

2.2 蒸发速率的求取

有了轮廓拟合的基础, 能够直接从液滴的图像计算出液滴的尺寸, 根据液滴尺寸的变化, 可以得到液滴单位时间内的蒸发速率.

液滴的蒸发速率是指液滴表面单位面积和单位时间内的蒸发量. 由轮廓拟合得到的液滴轮廓, 很容易得到以像素为单位的液滴高度 H 和每一行的像素个数, 即横截面直径 D_i ($i = 1, 2, \dots, N$). 根据数值积分的方法, 可以叠加圆台的侧面积 C_i 得到

液滴的表面积 S , 有

$$S = \sum_{i=1}^N C_i = \pi l_i \sum_{i=1}^N (r_i + r_{i+1}) = \frac{1}{2} \pi l_i \sum_{i=1}^N (D_i + D_{i+1}). \quad (2)$$

其中, 圆台母线长度 $l_i = \sqrt{(r_i - r_{i+1})^2 + \Delta H^2}$, $\Delta H = 1$. 同样, 叠加横截面积 A_i 可以得到液滴的体积,

$$V = \sum_{i=1}^N A_i = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^N D_i^2 \Delta H. \quad (3)$$

这样, 由式 (2) 和式 (3) 计算得到 t 时刻液滴的表面积 S_1 和体积 V_1 , 经过 Δt 时间, 再次采集液滴的图像, 并计算液滴的表面积 S_2 和体积 V_2 , 从而得到液滴在这段时间内的平均蒸发速率

$$\nu = \frac{\Delta V \rho}{\Delta t S_m} = \frac{(V_1 - V_2) \rho}{\Delta t (S_1 + S_2) / 2}. \quad (4)$$

其中, S_m 为 Δt 内的平均表面积. 具体流程如图 4(a) 所示.

同样, 可以用闭环控制的方法求蒸发速率, 其控制系统如图 4(b) 所示. 闭环控制形成动态注入, 为了维持液滴处于一个给定的体积上, 必须不断控制注液器进行注液, 由单位时间内注入液体的量, 即可得到液滴的蒸发速率.

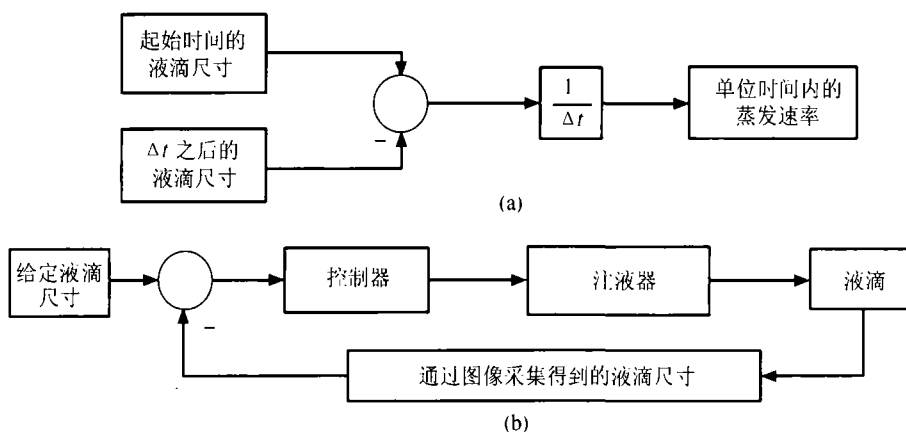


图 4 求取蒸发速率流程

Fig.4 Evaporation velocity flow graph

3 软件结构

图像反馈控制系统的软件结构如图 5 所示. 主要包括图像预处理、图像显示、轮廓拟合及蒸发速率四个模块.

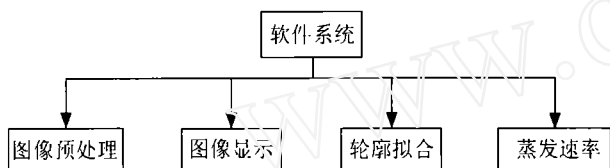


图 5 软件结构

Fig.5 Software structure graph

图像预处理模块为系统提供数据来源, 是图像分析的基础. 图像预处理模块和图像采集设备接口, 直接从设备处得到待分析的图像, 并进行相应的分析和处理. 为了得到比较清晰的图像轮廓点, 需要首先利用 Sobel 算子对灰度图进行边缘检测, 得到灰度变化剧烈的区域, 这些区域包括液滴的真实轮廓、噪声干扰及由于液滴反光造成的内部虚假轮廓; 然后域值化处理, 根据统计直方图合理选择域值, 去除噪声干扰; 最后进行外围轮廓提取, 滤除由于反光造成的内部虚假轮廓.

图像显示模块负责显示由其采集到的灰度图像和图像处理的中间过程及轮廓拟合的最终结果. 具体而言, 是先从图像采集模块中采样得到液滴的单帧灰度图并将其显示在窗口中, 然后显示灰度图预处理的结果; 轮廓拟合时显示轮廓拟合的每一步过程, 标记最终的拟合结果, 并显示特性分析所得的

各种特性参数.

轮廓拟合模块是根据图像预处理模块提取的液滴轮廓和用户设定的参数, 对液滴轮廓进行逼近, 找到最接近真实轮廓的拟合曲线. 利用前面提到的牛顿迭代法, 逼近液滴轮廓的同时求取参数, 计算液滴的表面张力和接触角. 利用最终得到的液滴轮廓, 计算该液滴的表面积和体积.

蒸发速率模块的功能是测量液滴的蒸发速率. 该模块的实现是以轮廓拟合模块为基础, 利用前面提到的两种计算蒸发速率的方法: ①由单位时间内液滴体积的变化量计算出液滴的蒸发速率; ②利用图像处理模块的处理结果, 与设定的液滴体积进行比较, 得出一个差值 ΔV . 控制注液器注入 ΔV 的液体, 以此维持液滴的体积不变. 根据单位时间内液体的注入量, 即可得到液滴的蒸发速率.

4 硬件结构

控制系统硬件结构如图 6 所示. 闭环结构突出了反馈控制的特点: 液滴由 CCD 摄像头监控摄像, 捕捉到的 PAL 制式模拟视频流传送到图像采集卡, 图像采集卡对模拟视频流进行解码和同步分离之后, 将数字液滴图像信号传送至上位机.

上位机针对单帧图像进行分析处理, 得到蒸发速率后, 通过串口向注液器驱动器发送控制指令, 从而推动注液器进行液滴补充. 步进电机驱动器采用以 MCS8051 为核心的最小系统进行控制, 通过串口与上位机通信, 上位机与单片机通信的数据格式如表 1 所示. 协议分为四个部分, 分别是地址码、

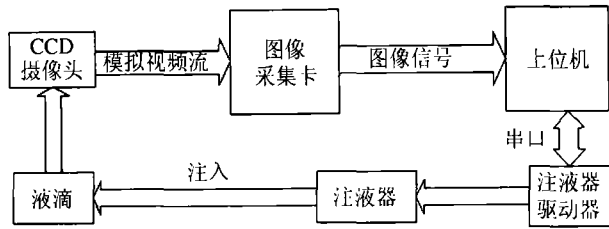


图 6 系统硬件结构

Fig.6 Hardware structure graph

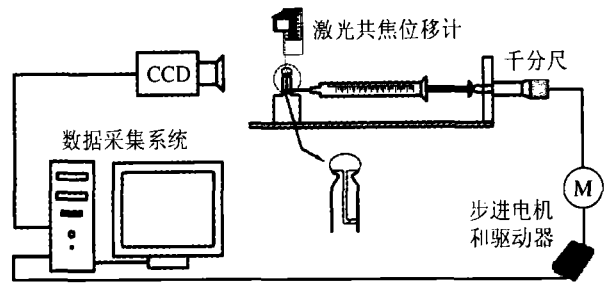


图 7 实验装置

Fig.7 Experiment device

表 1 串口通信协议

Table 1 Serial communication protocol

地址	数据个数	速率值	CRC 校验
01H	02H	2 Byte	2 Byte

数据个数、速率值、校验码。协议中的地址码为 01H, 数据个数为 02H, 速率值是要设定的注入速率值, 校验码为 CRC 校验。

5 实验结论和展望

实验证明, 在合理选择拟合步长的条件下, 可以得到精确的液滴轮廓、表面张力和液滴的体积。在图片效果较好, 原始液滴轮廓比较清晰的情况下, 拟合过程收敛较快。

利用图 7 所示的实验装置进行实验, 观测对象为 $\rho = 0.76 \text{ g/cm}^3$ 的硅油液滴, 利用激光共焦位移计和本系统同时进行蒸发速率的测试。测试时间间隔为 22 s, 得到液滴的两组参数数据为

$$\begin{aligned} V_1 &= 0.00499 \text{ cm}^3, & S_1 &= 0.0792 \text{ cm}^2; \\ V_2 &= 0.00363 \text{ cm}^3, & S_2 &= 0.0584 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

可计算蒸发速率

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{(V_1 - V_2)\rho}{\Delta t(S_1 + S_2)/2} = \\ &= \frac{(0.00499 - 0.00363) \times 0.76}{10^{-4} \times 22 \times (0.0584 + 0.0792)/2} = \\ &= 6.829 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}). \end{aligned}$$

利用激光共焦位移计测得的蒸发速率为 $\nu = 6.663 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。两者相差小于 3%。两者的差异是因为本系统测量的是整个液滴表面的蒸发速率, 而激光共焦位移计测量的是液滴顶点的蒸发速率。

要得到液滴精确的蒸发速率, 则要求控制系统有足够的精度, 包括测量精度、注入精度和控制精

度。为了提高注入精度, 注液器驱动器和注液器拟采用美国 KD Scientific 公司的 KDS200 智能注液泵, 其注液活塞的最小移动速率为 $5.7 \times 10^{-5} \text{ cm/h}$, 最大为 12.69 cm/min ; 最小注入速率可以达到 $0.001 \mu\text{L/h}$, 最大注入速率为 70.57 mL/min 。该注液泵可以按照通信协议识别 RS232 的串口命令, 执行注入和停止注入操作, 并能够实时修改注入速率和目标注入量。

依靠数字信号处理器 (DSP) 的强大功能, 可以将图像采集处理系统进一步微型化。利用嵌入式系统的实时高速处理, 可以得到适合于空间实验用的液滴蒸发反馈控制系统。

参考文献

- [1] Ren Guoqiang *et al.* High-speed CCD image sampling based on an embedded system. *Opto-Ele. Eng.*, 2004, **31**(12):64~67. in Chinese (任国强等. 基于嵌入式系统的高速 CCD 图像采集. 光电工程, 2004, **31**(12):64~67)
- [2] Zhang Yujin. *Image Engineering: Image Processing and Analysis*. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. in Chinese (章毓晋. 图像工程: 图象处理和分析. 北京: 清华大学出版社, 1999)
- [3] Takehiro Dan, Kohmei Halada, Yuji Muramatsu. Characteristics of image data processing techniques for sessile drop method. *J. Jap. Inst. Metals*, 1995, **59**(8):846~850
- [4] Rotenberg Y, Boruvka L, Neumann A W. Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interface. *J. Coll. Interf. Sci.*, 1983, **93**(1):169~182
- [5] Yuan Zhangfu, Mukai K, Takagi K *et al.* Surface tension and its temperature coefficient of molten tin determined with the sessile drop method at different Oxygen partial pressures. *J. Coll. Interf. Sci.*, 2002, **254**(2):338~345
- [6] Xu Shiliang. *Computer Algorithm in Common Use*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. in Chinese (徐士良. 计算机常用算法. 北京: 清华大学出版社, 2005)