

# Illumination Method for Non-Invasive Detection of Egg's Boiled Degree

Haoran Shen<sup>1</sup>, Biao Zhou<sup>2</sup>, Jinyu Zhao<sup>1</sup>, Fang Lin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

Email: \*linfang@scu.edu.cn

Received: Aug. 11<sup>th</sup>, 2018; accepted: Aug. 25<sup>th</sup>, 2018; published: Aug. 30<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

An egg's boiled degree is always estimated and controlled qualitatively by experience in daily lives; however, when it needs quantitative measurement and precise control, the common methods have their limitation. An illumination method for non-invasive detection of an egg's boiled degree is proposed in this paper. Due to the protein denaturation of egg while being boiled, its luminousness gradually changes when illuminated by LED lamp. By photographing the egg and analyzing the grayscale of the photos, the egg's central temperature and boiled degree can be determined and controlled quantitatively. This method may be generalized to monitoring some solid-liquid conversion process.

## Keywords

Illumination Method, Boiled Degree of Egg, Non-Invasive Measurement

---

# 用光照法无损检测鸡蛋煮熟程度

申浩然<sup>1</sup>, 周彪<sup>2</sup>, 赵金瑜<sup>1</sup>, 林方<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都

<sup>2</sup>四川大学空天科学与工程学院, 四川 成都

Email: \*linfang@scu.edu.cn

收稿日期: 2018年8月11日; 录用日期: 2018年8月25日; 发布日期: 2018年8月30日

---

## 摘要

目前, 人们通常依靠生活经验来判断和控制鸡蛋煮熟程度, 缺乏定量检测与精确控制手段。本文提出了\*通讯作者。

一种结合光学与图像分析无损检测鸡蛋煮熟程度的定量方法。鸡蛋煮熟过程中, 蛋白质变性使其透光率逐渐变化。用LED光源照射鸡蛋, 运用图像处理技术分析投射灰度, 结合鸡蛋参数可测算鸡蛋中心温度, 从而定量判断并控制煮熟程度。此方法具有精度高、操作便捷和普通性好等优点, 可以推广用于非侵入式监测固液转化过程。

## 关键词

光照法, 鸡蛋煮熟程度, 无损检测

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

煮鸡蛋是一种非常普遍的鸡蛋烹饪方式。不同熟度的鸡蛋不仅口感和营养价值迥异, 部分菜式更要求较为精确地掌控鸡蛋熟度。人们通常通过控制烹煮时间来大致掌握鸡蛋熟度, 存在较大偏差; 常见的旋转法[1]、手摇法、盐水漂浮法等方法也无法做到定量检测鸡蛋熟度, 只能定性判别鸡蛋是否全熟。金志强等人在 2008 年提出利用核磁共振测量鸡蛋自由水与结合水比例的方法来检测鸡蛋熟度, 达到了较高精度; 然而, 此方法成本高昂, 缺乏日常实用性[2]。2017 年第 30 届 IYPT (International Young Physicists' Tournament) 第 15 题则要求参赛者提出非侵入式检测鸡蛋熟度的方法, 并探讨这些方法的灵敏度[3]。

光照分析法在食品、化学以及光学仪器分析检测中应用广泛。BJ Kemps 等人研究了鸡蛋新鲜度与其对光的反射和透射特性之间的关系[4], 得到鸡蛋透光率与其新鲜度指标(哈夫单位)的关系, 但只能将鸡蛋划分为合格与不合格两个等级, 精度较低且存在约 15% 的误筛漏筛概率, 难以满足食品工业要求。由于鸡蛋内部结构较为复杂, 目前对鸡蛋在光源照射下透光性质的研究大都停留在定性分析层面。

本文采用多熟度食品熟度的一般定义方法, 以鸡蛋中心温度来标定熟度, 将鸡蛋熟度划分为 6 个等级: 35℃ 以下为生, 35℃~45℃ 为一成熟, 46℃~55℃ 为三成熟, 56℃~65℃ 为五成熟, 66℃~85℃ 为七成熟, 86℃ 以上为全熟。本文提出一种通过分析鸡蛋透光度与鸡蛋中心温度关系从而定量检测鸡蛋熟度的方法。根据此方法, 作者设计了一种快速检测鸡蛋熟度的装置, 成本低廉、操作简便, 适合日常使用。

## 2. 理论分析

### 2.1. 鸡蛋热传导模型

将鸡蛋简化为存在密度分布的球体, 建立其热传导方程[5]:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{K} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

热扩散率  $K$  与介质密度  $\rho$  存在以下关系:

$$K = \frac{k}{\rho c} \quad (2)$$

其中  $k$  为热传导率,  $c$  为比热容。鸡蛋的  $k$ ,  $c$ ,  $\rho$  值见表 1。

将(1)式变换到球坐标系下, 化简并结合初始条件和边界条件, 可得:

**Table 1.** Parameters of egg yolk and egg white  
**表 1.** 蛋黄与蛋白相关参数

	$c / \text{Jg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\kappa / 10^{-3} \text{W} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
蛋黄	2.7	3.4	1.032
蛋白	3.7	5.4	1.038

$$\begin{cases} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{K} \frac{\partial T}{\partial t} \\ T(r, t)|_{r=0} = T_0 \\ T(r, t)|_{r=R} = T_w \end{cases} \quad (3)$$

从而得到温度的通解为:

$$T(r, t) = T_w - \frac{2R(T_w - T_0)}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{(-1)^{n+1}}{n} \right) \sin \frac{n\pi r}{R} e^{-\frac{Kn^2\pi^2 t}{R^2}} \quad (4)$$

则蛋黄中心温度  $T_C$  为:

$$T_C(t) = \lim_{r \rightarrow 0} T(r, t) = T_w - 2(T_w - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} e^{-\frac{Kn^2\pi^2 t}{R^2}} \quad (5)$$

根据 SK Foong 对鸡蛋加热的研究[6], 结合鸡蛋导热系数和大量实验的修正结果可得:

$$T_C(t) = T_w - 2(T_w - T_0) e^{-\frac{6000t}{9R^2}} \quad (6)$$

其中  $R$  为鸡蛋的平均半径。如果将鸡蛋近似看成一椭球体, 则  $R = (a + b)/4$ , 其中  $a, b$  分别为鸡蛋的长短轴。

## 2.2. 光照法原理

对非强激光源, 透射光光强可由布格定律表示:

$$I_t = I_0 e^{-a_t l} \quad (7)$$

其中  $a_t$  为光的吸收系数,  $l$  为介质厚度。光的散射与吸收满足类似规律:

$$I_s = I_0 e^{-a_s l} \quad (8)$$

其中  $a_s$  为光的散射系数,  $l$  为介质厚度。同时存在散射与透射时则有:

$$I = I_0 e^{-a l} \quad (9)$$

$$a = a_t + a_s \quad (10)$$

由此可以得到利用强光照射物体时, 其透射光强度与物体厚度满足指数关系。

## 3. 实验测定鸡蛋熟度与透射光强定量关系

### 3.1. 实验整体流程

1、将一鸡蛋在 98℃ 水中加热累计 12 分钟, 每隔 1 分钟取出透光拍照并用数学软件得到中心灰度平均值, 求出煮熟程度与灰度的关系趋势;

- 2、对蛋黄蛋清吸收系数单独分析，检验其透光度与厚度的关系是否满足光的吸收定律；
- 3、通过理论分析与测量数据综合给出不同参数鸡蛋(尺寸、蛋黄体积比、蛋壳颜色)的熟度与图像灰度值的关系。

### 3.2. 实验装置与步骤

#### 1、实验装置(如图 1 示意):

- 1) 强光手电筒: 持续照度约为 100,000 Lux;
- 2) 摄像设备: Casio® ZR1500 相机;
- 3) 照度计: 量程 200,000 Lux, 精度 0.1 Lux。

#### 2、操作步骤:

- 1) 用游标卡尺测量待测鸡蛋的长轴  $a$  与短轴  $b$ , 取鸡蛋平均半径为  $R = (a+b)/4$ ;
- 2) 将蛋壳颜色与比色卡对比读出对应颜色系数  $a$ ;
- 3) 将鸡蛋水平置于装置凹槽中, 调整相机使鸡蛋位于镜头中心, 固定相机参数为 ISO: 1600; 快门速度: 1/30 s; 放大倍率: x2.3; 光圈大小: f4.5;
- 4) 拍摄鸡蛋并将图像导入 Matlab®分析得到中心灰度  $g$  与鸡蛋平均半径  $R$  和蛋黄半径  $r$  的关系。

### 3.3. 参数标定

实验得到同一鸡蛋水煮不同时间的透射图像(如图 2 所示), 用数学软件 MATLAB 对图像中心进行灰

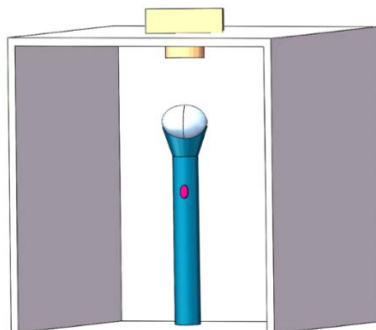


Figure 1. Schematic diagram of the experimental device

图 1. 实验装置示意图

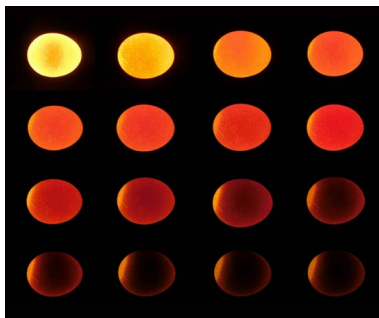


Figure 2. The photographs of an egg in different boiled duration of time. The boiled duration of the first photograph is 1 minute and increases by 1 minute in each photograph from left to right, top to bottom

图 2. 水煮时间逐渐增长的同一鸡蛋实验图像。第一幅图片水煮时间为 1 分钟; 从左往右、从上往下水煮时间逐渐增加, 相邻两幅图片水煮时间增加 1 分钟

度分析，灰度线性反映光照强度。依据前文分析可预测，图像中心灰度与鸡蛋水煮时间应呈指数关系：

$$g = Ae^{-Bt} \tag{11}$$

为使得拟合系数更加准确，将上式等号两边取对数并对实验数据进行线性拟合(如图 3 所示)，可得

$$\ln(g) = -0.15306t + 2.44855$$

即有

$$g = e^{-0.15306t+2.44855} = e^{2.44855} \cdot e^{-0.15306t}$$

实验得到的  $B$  值取值在 0.17 至 0.21 之间，可取  $B$  值为 0.2 以简化计算，联立(6)、(11)式可得中心温度与中心透光灰度值的关系式：

$$T_C(t) = T_w - 2(T_w - T_0) \left( \frac{g}{A} \right)^{\frac{30000}{9R^2}} \tag{12}$$

其中， $A$  与鸡蛋平均半径  $R$  和蛋黄半径  $r$  相关，对三者进行非线性拟合(如图 4 所示)，可得

$$A = 2093 + 57.49r - 99.5R - 1.13r^2 + 0.2315rR + 0.8142R^2$$

最后得到鸡蛋中心温度表达式：

$$T_C(t) = T_w - 2(T_w - T_0) \left( \frac{g}{2093 + 57.49r - 99.5R - 1.13r^2 + 0.2315rR + 0.8142R^2} \right)^{\frac{30000}{9R^2}} \tag{13}$$

## 4. 灵敏度与有效性检测

### 4.1. 灵敏度检测

透光法灵敏度定义为单位熟度变化引起的透光图像灰度变化。灵敏度满足：

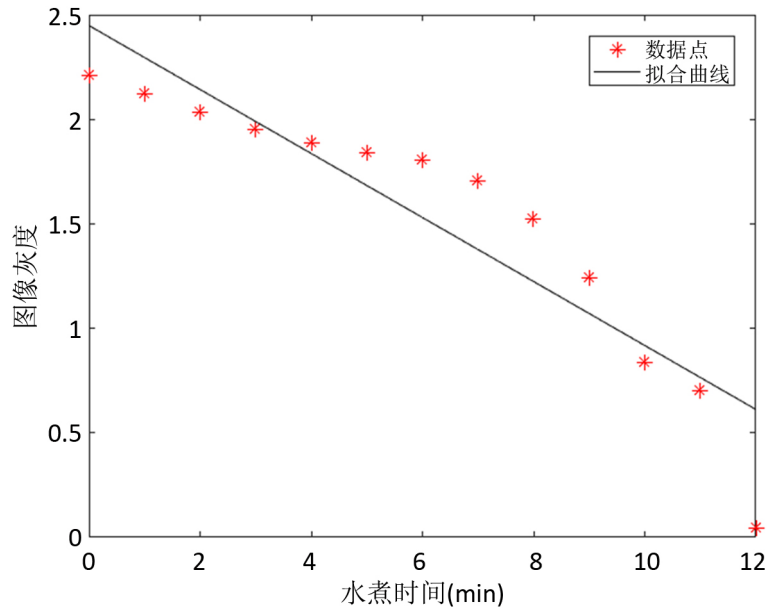
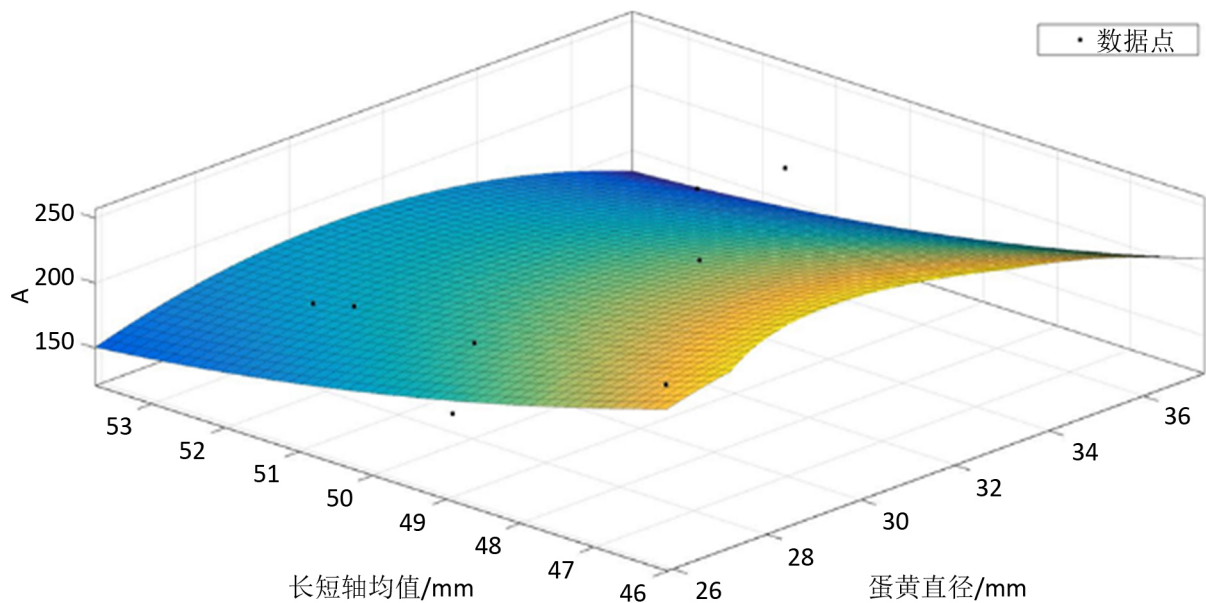


Figure 3. The fitting curve of boiled duration of time and grayscale of the egg's central part

图 3. 鸡蛋水煮时间与鸡蛋中心灰度值的拟合图像



**Figure 4.** The fitting surface of parameter  $A$  and the diameters of the egg and the yolk  
**图 4.** 参数  $A$  与鸡蛋长短轴平均值(鸡蛋有效直径)、蛋黄直径的拟合图像

$$E = g_{\max i} - g_{\min i} \quad (14)$$

其中  $g_{\max i}$  为最高灰度值,  $g_{\min i}$  为最低灰度值。由(12)式反解出:

$$g = A \left[ \frac{2(T_w - T_0)}{T_w - T_c} \right]^{-0.0003R^2} \quad (15)$$

结合(13)式, 可得该方法灵敏度公式:

$$E = A \left\{ \left[ \frac{2(T_w - T_0)}{T_w - T_{c\max i}} \right]^{-0.0003R^2} - \left[ \frac{2(T_w - T_0)}{T_w - T_{c\min i}} \right]^{-0.0003R^2} \right\} \quad (16)$$

其中  $T_{c\max i}$  为最高灰度值,  $T_{c\min i}$  为最低灰度值。可见随着温度升高, 该方法灵敏度增大。

#### 4.2. 有效性验证

- 1) 选取多个鸡蛋按 3.2 步骤测量并将所得参数带入(12)式计算得到理论中心温度;
- 2) 将探头式温度计插入鸡蛋测量实际中心温度;
- 3) 将理论温度与实际温度进行比较并计算误差。

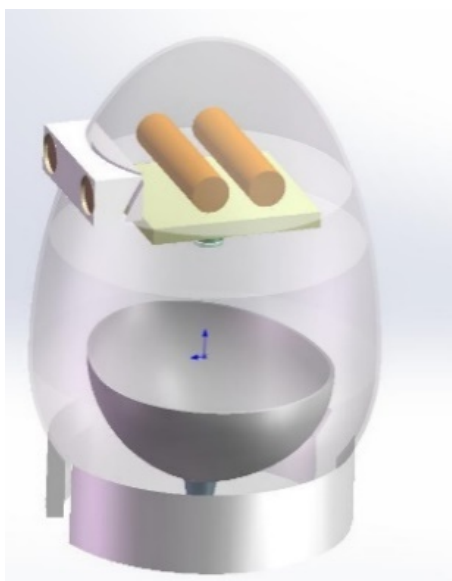
实验测定了 7 组数据, 如表 2 所示, 可见理论温度与实际温度相对误差较小。由于鸡蛋中心温度最终被转化为鸡蛋熟度, 而熟度定义以  $10^\circ\text{C}$  为步进, 故可认为该方法可以较为准确地无损测量鸡蛋中心温度, 从而得到并控制鸡蛋熟度。

#### 5. 产品化设计

作者根据本文提出的方法设计了一款可调熟度全自动煮蛋器。该煮蛋器为一体化产品, 制造简单, 使用方便。该煮蛋器采用光敏电阻测量鸡蛋透光照度值, 经由单片机处理得到灰度值, 通过固化于单片机中的公式计算出熟度, 据此控制电源开关和加热功率, 从而达到实时检测并控制鸡蛋熟度的目的。该煮蛋器概念设计如图 5 所示。

**Table 2.** The theoretical and actual central temperature of the egg  
**表 2.** 鸡蛋理论与实际中心温度对比

鸡蛋编号	理论温度/°C	实际温度/°C	相对误差/%
1	83.0	82.5	0.6
2	92.1	86.6	6.0
3	52.8	48.3	8.5
4	58.5	59.1	1.0
5	63.6	65.7	3.3
6	60.3	60.1	0.3



**Figure 5.** Three-dimensional rendering for conceptual design of an adjustable egg cooker  
**图 5.** 可调熟度全自动煮蛋器概念设计三维渲染图

## 6. 结论

本文提出用光照法检测鸡蛋熟度。鸡蛋煮熟过程中，蛋白质变性使其透光率逐渐变化，因此可以通过强光源照射下鸡蛋图像的灰度及鸡蛋参数推算出鸡蛋的中心温度，即煮熟程度。

本文一方面从热传导方程出发，推导鸡蛋中心温度与其他参量的关系式，并通过拟合实验数据确定公式中的经验参数；另一方面通过软件处理鸡蛋透光图像获得了灰度与烹煮时间的关系。联立两部分结果得到鸡蛋中心温度与透光图像灰度的关系并进行了实验验证。

本文提出的新方法与以往方法相比，可以较为精确地定量测量鸡蛋中心温度从而得到鸡蛋熟度，操作便捷且普适性较好，可以推广用于非侵入式测量物体固液态转化过程中的凝固程度。

## 参考文献

- [1] 王栓巧, 郁志宏. 基于机器视觉鸡蛋品质检测机构的研究[J]. 机械设计与制造, 2009(12): 84-86.
- [2] 金志强, 张锦胜. 利用核磁共振及成像原理研究鸡蛋的煮熟过程[J]. 食品工业科技, 2008, 29(8): 112-114.

- 
- [3] Problems of IYPT. <http://archive.iypt.org/problems/>
- [4] Kemps, B.J. and Bamelis, F.R. (2006) Visible Transmission Spectroscopy for the Assessment of Egg Freshness. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, **86**, 1399-1406.
- [5] Durarte, F.J. (1979) Heat Diffusion in a Solid Sphere and Fourier Theory, an Elementary Practical Example. *American Journal of Physics*, **47**, 981-983.
- [6] Foong, S.K. (2006) How Long Does It Take to Boil an Egg? *European Journal of Physics*, **27**, 119-131.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)