

基于改进 Otsu 算法的生猪热红外图像耳根特征区域检测

周丽萍¹ 陈志² 陈达² 苑严伟¹ 李亚硕¹ 郑建华¹

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 中国机械工业集团有限公司, 北京 100080)

摘要: 为研究规模化生猪养殖场中非接触式体温检测方法, 以自行设计的热红外图像采集器采集生猪图像, 选取 HSV 颜色空间对图像进行变换, 生成 S 层图像, 应用形态学特征闭运算对二值化图像去噪。用改进后的 Otsu 算法, 分别对仔猪、育肥猪和妊娠猪图像耳根特征区域进行检测。结果表明, 该方法可以 100% 正确检测具有完整耳根部特征的仔猪、育肥猪、妊娠猪图像; 对于耳根部特征不完整的仔猪图像 23% 可正确进行检测, 育肥猪图像 25% 可正确进行检测, 妊娠猪图像 33% 可正确进行检测; 无法检测不具有耳根部特征的图像。

关键词: 生猪体温; 温度特征; 生猪耳根; Otsu 算法; 图像处理

中图分类号: TP391.41; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0228-05

Pig Ear Root Detection Based on Adapted Otsu

Zhou Liping¹ Chen Zhi² Chen Da² Yuan Yanwei¹ Li Yashuo¹ Zheng Jianhua¹

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. China National Machinery Industry Corporation, Beijing 100080, China)

Abstract: In order to find the method of auto detecting body temperature in pig's cultivation, the homemade thermal infrared imager was used to acquire the infrared thermograms of pigs. The imager was loaded on the arm of the auto-inspection trolley with the camera lens toward pigs, so it can clearly collect the images of pig ear roots. When the thermograms were collected, they were firstly transformed by HSV colorspace into the S-layer images. Furthermore, the morphological closing operation was used for binary image denoising. Finally, adapted Otsu was applied to ear roots detection of piglets, finishing pigs and pregnant pigs separately. The objective function was selected, because it was simple to find a grayscale to maximize η with the minimum computation at the same time. The results showed that the method can be perfectly used to analyze images with complete ear roots for piglets, finishing pigs and pregnant pigs. When the method was applied to those images with incomplete ear roots, the detection rates were 23% for piglets, 25% for finishing pigs and 33% for pregnant pigs. The method cannot be used to analyze images without any ear roots of pigs. The method was applied to the auto-inspection system which can help to find the high temperature pigs in the cultivation. When the abnormal pigs were found, the auto inspection trolley would alert, and then stopped inspecting and began to spray.

Key words: pig body temperature; temperature feature; pig ear root; Otsu algorithm; image processing

引言

养猪业正逐步由小规模向集约化、规模化、自动

化发展, 2009 年底我国规模化养殖场数量已达到 253.8 万个^[1], 而养猪业的生产管理仍处于发展初期水平^[2], 对于养殖场舍内的生猪疫情巡检几乎全

收稿日期: 2015-11-20 修回日期: 2016-01-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B07)和北京市科技计划项目(D141100003814003)

作者简介: 周丽萍(1979—), 女, 高级工程师, 博士生, 主要从事检测技术与自动化设备研究, E-mail: 309691348@qq.com

通信作者: 陈达(1979—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事农业机械关键技术与科技项目管理研究, E-mail: da37167@sohu.com

是人工操作,不能及时发现猪群患病^[3],不仅工作强度大、巡检和筛选效果差,也会造成疫情的人畜交叉感染。近年来,很多学者围绕生猪健康养殖中的检测方法开展了不同程度的研究。朱伟兴等^[4]针对群养猪行为,设计了疑似病猪行为自动监测系统,监测具有异常行为的疑似病猪。YE等^[5]采用热红外图像分析群养小猪的行为特征。段玉瑶等^[6]采用目标跟踪和行为检测方法,依据生猪所处位置来判断生猪行为。刘波等^[7]针对生猪红外热图像和光学图像的融合,提出一种基于非子采样轮廓波的图像融合算法。蒲雪峰等^[3]为克服传统人工观察方法的缺点,通过对育肥期大约克夏猪的排泄行为进行研究,设计了一种病猪行为自动监测系统。刘波等^[8]提出了一种基于射线轮廓特征点匹配的红外与可见光图像自动配准方法,研究生猪体表温度与生猪异常的关系特征。为快速准确测量猪的体温,KRIZANAC等^[9]把带有3个探头的测温传感器插进猪呼吸道来监测体温,该方法需要事先麻醉,会对猪有一定的伤害。ANDERSON等^[10]利用耳标式温度传感器和摄像头研究了猪耳部温度与行为的关系,研究表明,猪耳部温度昼夜变化规律为晚上最高,下午最低,休息时耳温比活动时高。HENTZEN等^[11]在实验室内采用手术将无线胶囊温度传感器植入小猪体内,研究小猪体温与行为的关系。马丽等采用改进几何活动轮廓模型,在养殖场猪圈中从母猪红外图提出母猪轮廓^[12]。朱伟兴等^[13]研究了基于改进主动形状模型的猪耳部目标区域检测方法,为研究生猪规模养殖中非接触式体温检测打下了基础。CARSTEN等^[14]对生猪头部的热红外图像采用差分 ROI 法检测猪头部表面温度分布。高利波等^[15]随机抽取宰前猪 1 000 头,分别用水银温度计测量肛温,用红外体温仪测量耳根表面温度,结果显示红外体温仪的检测结果与水银温度计检测结果符合率达到 93.11%。上述研究表明生猪耳根部可作为体温筛检的特征区域。本文采用红外技术,结合计算机视觉技术分析生猪热红外图像,提取生猪

耳根部区域特征,用于检测生猪体温,为规模化生猪养殖场中非接触式体温检测提供一种解决方案。

1 材料与方法

1.1 生猪图像获取

选取白毛猪为研究对象,采用中国农业机械化科学研究院机电技术应用研究所设计的热红外图像采集器拍摄生猪图像。生猪养殖场位于北京市房山区,于 10:00—15:00 光线比较充足的时间段拍摄图像。热红外图像采集器安装于移动饲料车上,饲料车移动速度为 0.15 m/s。为了保证每头猪都能取到图像并且不重复,录制视频后每隔 72 帧读取一次图像。

1.2 热红外图像采集器标定

热红外图像采集器是利用红外探测器和光学成像物镜接受被测目标的红外辐射能量分布图形反映到红外探测器的光敏元件上,从而获得红外热像图,这种热像图与物体表面的热分布场相对应。热图像上面的不同颜色代表被测物体的不同温度,通过热图像,可以观察到被测目标的整体温度分布状况,研究被测目标的发热情况,从而进行相应判断。

温度标定系统是一种温度内标定装置,依靠这一装置就可以从红外图像上定量地计算出实际辐射温度,如图 1 所示。标定时,采用史蒂芬-波兹曼定律^[16-17]所给出的黑体辐射能量与其温度的关系式

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式中 W ——辐射度

ε ——灰体的发射率,若 $\varepsilon = 1$,则该物体为黑体,灰体的发射率介于 0~1 之间

σ ——史蒂芬-波兹曼比例常数,取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

T ——热力学温度, K

在设定的环境条件下,用一定数量已知温度的黑体进行标定。多个黑体放置成半圆形,热红外图像采集器放在中心能转动的台子上,并与标定系统的自动控制中心相连。热红外图像采集器依次对准



(a) 黑体标定试验台



(b) 热红外图像采集器的校准曲线

图 1 热红外图像采集器标定

Fig. 1 Calibration of infrared thermal imager

各黑体,每个黑体都会在热红外图像采集器中产生一个辐射信号,标定系统将此信号与其温度对应起来。

2 生猪耳部特征区域检测

热红外图像采集器所拍摄的图像中,具有显著温度差异的猪前景区域和环境背景区域呈现不同的颜色,易于分割出猪所在区域;另外,生猪耳根部颜色与身体其他部位颜色也存在较大差异,有利于检测出耳根部特征区域。如图2所示,生猪耳根部呈高亮颜色。



图2 热红外温度传感器采集的生猪图像

Fig. 2 Infrared image of pig

2.1 图像信息处理

为更好地对图像进行识别检测,采用 HSV 颜色空间(图3), H 参数表示色彩信息,用一角度值来表示,红、绿、蓝分别相隔 120° ,互补色分别相差 180° 。 S 代表纯度,为一比例值,范围为 $0 \sim 1$,它表示所选颜色的纯度与该颜色最大纯度之间的比率。 V 表示色彩的明亮程度,范围为 $0 \sim 1$,它与光强度之间并没有直接的联系。

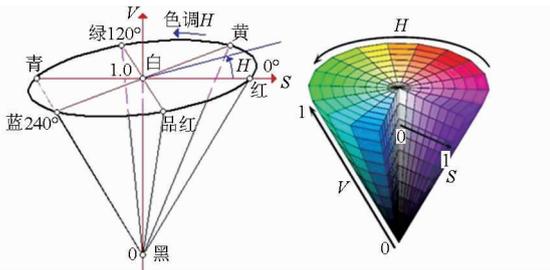


图3 HSV 颜色空间

Fig. 3 HSV color space

对于任意3个在 $[0, 1]$ 范围内的 R, G, B 值,其对应的 HSV 颜色空间的 V, S, H 分量计算公式为

$$V = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (2)$$

$$S = 1 - \frac{3 \min(R, G, B)}{R + G + B} \quad (3)$$

$$H = \arccos \frac{R - G + R - B}{2 \sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \quad (4)$$

为提高图像处理速度,将红外图像进行二值化

变化。对二值图像进行进一步的去除噪声干扰,突出生猪耳根部区域的特征,采用空间聚类技术对图像进行滤波消噪和区域联通处理。为更好地分割出高温区域,采用形态学特征闭运算对其进行去噪,以减少噪声干扰。

2.2 二维 Otsu 算法及其改进

最大类间方差 (Otsu) 由日本学者大津^[18]提出,是一种自适应的阈值确定方法。该算法遍历灰度级从 0 到 $M - 1$,其中 M 为图像原始灰度级,直到找到某个灰度级使得图像具有较好的分割效果。

设灰度级为 i 的像素点个数为 n_i ,对灰度直方图进行归一化的公式为

$$P_i = \frac{n_i}{M} \quad (5)$$

对于2类像素 C_0 和 C_1 ,每一类出现的概率分别为

$$P(C_0) = \sum_{i=0}^t P_i = w_0 \quad (6)$$

$$P(C_1) = \sum_{i=t+1}^{M-1} P_i = w_1 \quad (7)$$

每一类的平均灰度值计算公式分别为

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=0}^t iP_i}{\sum_{i=0}^t P_i} = \frac{\mu(t)}{w_0} \quad (8)$$

$$\mu_1 = \frac{\sum_{i=t+1}^{M-1} iP_i}{\sum_{i=t+1}^{M-1} P_i} = \frac{\mu_T - \mu(t)}{w_1} \quad (9)$$

其中

$$\mu(t) = \sum_{i=0}^t iP_i \quad (10)$$

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{M-1} iP_i \quad (11)$$

式中 $\mu(t)$ ——灰度级为 t 时的灰度累计值
 μ_T ——图像灰度级 $[0, M]$ 范围内灰度累计值
 对于每一类像素,其内部方差计算公式为

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=0}^t (i - \mu_0)^2 P_i / w_0 \quad (12)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=t+1}^{M-1} (i - \mu_1)^2 P_i / w_1 \quad (13)$$

为了衡量灰度级为 t 时的类间方差,定义

$$\begin{cases} \lambda = \sigma_B^2 / \sigma_w^2 \\ \eta = \sigma_B^2 / \sigma_T^2 \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$\sigma_w^2 = w_0 \sigma_0^2 + w_1 \sigma_1^2 \quad (15)$$

$$\sigma_B^2 = w_0 (\mu_0 - \mu_T)^2 + w_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 = w_0 w_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (16)$$

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=0}^M (i - \mu_T)^2 P_i \quad (17)$$

同时有

$$\sigma_w^2 + \sigma_b^2 = \sigma_t^2 \quad (18)$$

为获得分割的最优阈值,求出一个 t 使得 λ 或 η 最大即可。在以上的推导中,可知: σ_t^2 代表灰度范围内的所有方差,它与灰度级 t 无关; σ_w^2 是二阶统计值,类方差; σ_b^2 是一阶统计值,类均值。因此选取 η 为目标函数,求灰度级 t 使 η 最大的运算量最小,且较为容易,即求 t 使得 σ_b^2 最大。 σ_b^2 表示为

$$\sigma_b^2 = w_0 w_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 = \frac{\left(\sum_{i=0}^t P_i \sum_{i=0}^{M-1} iP_i - \sum_{i=0}^t iP_i \right)^2}{\sum_{i=0}^t iP_i \left(1 - \sum_{i=0}^t P_i \right)} \quad (19)$$

3 耳根特征区域检测

将改进后的 Otsu 算法在 Matlab 环境中编制代码,分别对采集的仔猪、育肥猪、妊娠猪图像进行检测。通过对 3 种生猪每种图像 20 幅,分别进行检测,统计得阈值的分布范围为 0.63 ~ 0.71,本文采用阈值为 0.66。仔猪为 1 ~ 2 月龄,育肥猪为 5 月龄,妊娠猪妊娠 2 月。

3.1 图像检测结果

仔猪、育肥猪、妊娠猪图像的检测结果显示,对二值图像进行的消噪滤波处理,突出了生猪耳根部区域的特征,该方法能较好地分割出生猪耳根部高温区域。

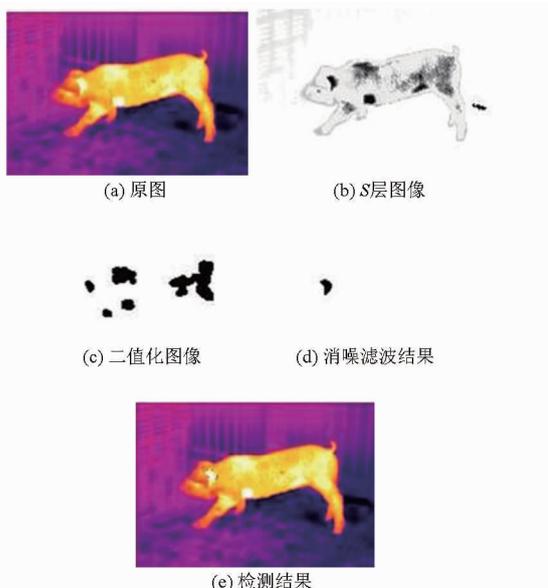


图4 仔猪耳根部图像检测结果

Fig. 4 Piglets ear root image detection result

3.2 实验结果

通过人为确认检测结果,分别对仔猪、育肥猪各检测 10 次,一次提取 15 幅图像;妊娠猪检测 10 次,一次提取 10 幅图像。实验结果如表 1 所示。该方

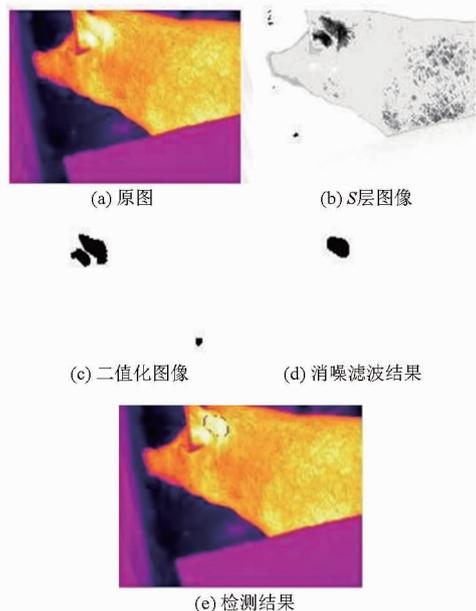


图5 育肥猪耳根部图像检测结果

Fig. 5 Finishing pig ear root image detection result

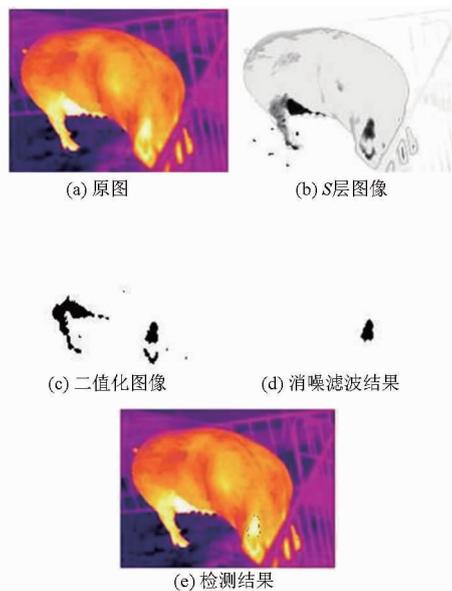


图6 妊娠猪耳根部检测结果

Fig. 6 Pregnancy pigear root image detection result

表1 实验检测结果

Tab. 1 Detection results of experiment

参数	仔猪	育肥猪	妊娠猪
完整耳根部图像数	120	130	70
正确检测耳根特征数	120	130	70
检测正确率/%	100	100	100
不完整耳根部图像数	13	8	18
正确检测耳根特征数	3	2	6
检测正确率/%	23	25	33
没有耳根部图像数	17	12	12
正确检测耳根特征数	0	0	0
检测正确率/%	0	0	0

法可以 100% 正确检测具有完整耳根部特征的仔猪、育肥猪、妊娠猪图像;对于耳根部特征不完整的

仔猪图像 23% 可进行检测, 育肥猪图像 25% 可进行检测, 妊娠猪图像 33% 可进行检测; 无法检测不具有耳根部特征的图像。

同时使用该方法对采集过程中对焦不准, 或图像像素过少的图像进行检测, 结果良好, 避免了因采集图像分辨率相对较低造成的检测区域不准确的问题^[19]。结果如图 7 所示。

4 结束语

对采集的生猪热红外图像, 选取 HSV 颜色空间对图像进行变换, 生成 S 层图像, 应用形态学特征闭运算对二值化图像去噪。用改进后的 Otsu 算法, 分别对仔猪、育肥猪和妊娠猪图像耳根特征区域进行检测。结果表明, 该方法可以 100% 正确检测具有完整耳根部特征的仔猪、育肥猪、妊娠猪图像; 对于

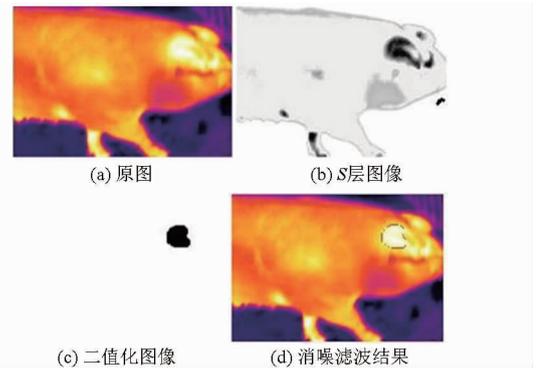


图 7 模糊图像检测结果

Fig. 7 Blurred image detection result

耳根部特征不完整的仔猪图像 23% 可正确进行检测, 育肥猪图像 25% 可正确进行检测, 妊娠猪图像 33% 可正确进行检测; 无法检测不具有耳根部特征的图像。

参 考 文 献

- 1 沈银书, 吴敬学. 我国生猪规模养殖的发展趋势与动因分析[J]. 中国畜牧杂志, 2011, 47(22): 49-52.
- 2 沈银书, 吴敬学. 美国生猪规模养殖的发展趋势及与中国的比较分析[J]. 世界农业, 2012(4): 4-8.
- 3 浦雪峰, 朱伟兴, 陆晨芳. 基于对称像素块识别的病猪行为监测系统[J]. 计算机工程, 2009, 35(21): 250-252.
PU Xuefeng, ZHU Weixing, LU Chenfang. Sick pig behavior monitor system based on symmetrical pixel block recognition[J]. Computer Engineering, 2009, 35(21): 250-252. (in Chinese)
- 4 朱伟兴, 浦雪峰, 李新城, 等. 基于行为监测的疑似病猪自动化识别系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 188-192.
ZHU Weixing, PU Xuefeng, LI Xincheng, et al. Automatic identification system of pigs with suspected case based on behavior monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 188-192. (in Chinese)
- 5 YE Wenyu, XIN Hongwei. Thermographical quantification of physiological and behavioral responses of group-housed young pigs[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(6): 1843-1851.
- 6 段玉瑶, 马丽, 刘刚. 猪舍场景下的生猪目标跟踪和行为检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 187-193.
DUAN Yuyao, MA Li, LIU Gang. Target tracking and behavior detection method in piggery scenarios[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 187-193. (in Chinese)
- 7 刘波, 朱伟兴, 霍冠英. 生猪轮廓红外与光学图像的融合算法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 113-120.
LIU Bo, ZHU Weixing, HUO Guanying. An image fusion algorithm of infrared thermal and optical images for pig contour[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17): 113-120. (in Chinese)
- 8 刘波, 朱伟兴, 纪滨, 等. 基于射线轮廓点匹配的生猪红外与可见光图像自动配准[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 153-160.
LIU Bo, ZHU Weixing, JI Bin, et al. Automatic registration of IR and optical pig images based on contour match of radial line feature points[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 153-160. (in Chinese)
- 9 KRIZANAC D, HAUGK M, STERZ F, et al. Tracheal temperature for monitoring body temperature during mild hypothermia in pigs[J]. Resuscitation, 2010, 81(1): 87-92.
- 10 ANDERSEN H M L, JØRGENSEN E, DYBKJÆR L, Et al. The ear skin temperature as an indicator of the thermal comfort of pigs[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2008, 113(1): 43-56.
- 11 HENTZEN M, HOVDEN D, JANSEN M, et al. Design and validation of a wireless temperature measurement system for laboratory and farm animals[J]. Proceedings of Measuring Behavior 2012, 2012: 466-471.
- 12 马丽, 段玉瑶, 宗泽, 等. 基于改进几何活动轮廓模型的母猪红外图像分割算法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 180-186.
MA Li, DUAN Yuyao, ZONG Ze, et al. Segmentation of thermal infrared image for sow based on improved convex active contours[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 180-186. (in Chinese)
- 13 朱伟兴, 刘波, 杨建军, 等. 基于改进主动形状模型的生猪耳部区域检测方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 288-295.
ZHU Weixing, LIU Bo, YANG Jianjun, et al. Pig ear area detection based on adapted active shape model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 288-295. (in Chinese)
- 14 CARSTEN S, SVEN D, SUSANNE K, et al. Difference method for analyzing infrared images in pig the levated body temperatures[J]. Medicine Physics, 2014, 24(1): 6-15.

- Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 64–68. (in Chinese)
- 11 黎义斌,李仁年,王秀勇,等. 混流泵内部流动不稳定特性的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(5):384–389.
LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, et al. Numerical simulation of unstable characteristics in head curve of mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 384–389. (in Chinese)
 - 12 裴吉,王文杰,袁寿其,等. 低比转数离心泵内部非正常流动特性数值预测[J]. 农业机械学报,2014,45(1):79–83.
PEI Ji, WANG Wenjie, YUAN Shouqi, et al. Numerical prediction of inner flow unsteadiness in a low-specific speed centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 79–83. (in Chinese)
 - 13 JINTAO L, SHUHONG L, YULIN W, et al. Numerical investigation of the hump characteristic of a pump-turbine based on an improved cavitation model [J]. Computers & Fluids, 2012, 68: 105–111.
 - 14 施卫东,李通通,张德胜,等. 轴流泵叶轮区域空化特性数值模拟[J]. 农业工程学报,2012,28(13):88–93.
SHI Weidong, LI Tongtong, ZHANG Desheng, et al. Numerical simulation on cavitating characteristic in impeller of axial-flow pump [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 88–93. (in Chinese)
 - 15 司乔瑞,袁寿其,李晓俊,等. 空化条件下离心泵泵腔内不稳定流动数值分析[J]. 农业机械学报,2014,45(5):84–90.
SI Qiaorui, YUAN Shouqi, LI Xiaojun, et al. Numerical simulation of unsteady cavitation flow in the casing of a centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 84–90. (in Chinese)
 - 16 卢家兴,袁寿其,任旭东,等. 离心泵小流量工况不稳定空化特性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(8):54–58.
LU Jiaying, YUAN Shouqi, REN Xudong, et al. Investigation of instabilities of cavitation at low flow rate of centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 54–58. (in Chinese)
 - 17 YAMANISHI N, FUKAO S, QIAO X, et al. LES simulation of backflow vortex structure at the inlet of an inducer [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2007, 129(5): 587–594.
 - 18 YOKOTA K, MITSUDA K, TSUJIMOTO Y, et al. A study of vortex structure in the shear layer between main flow and swirling backflow [J]. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, 2004, 47(3): 541–548.
 - 19 GOLTZ I, KOSYNA G, DELGADO A. Eliminating the head instability of an axial-flow pump using axial grooves [J]. Proc. IMech E, Part A: Journal of Power and Energy, 2012, 227(2): 206–215.
 - 20 杨华,孙丹丹,汤方平,等. 叶轮进口挡板改善轴流泵非稳定工况性能研究[J]. 农业机械学报,2012,43(11):138–141.
YANG Hua, SUN Dandan, TANG Fangping, et al. Research on the performance improvement of axial-flow pump under unstable condition using CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 138–141. (in Chinese)
 - 21 牟介刚,李思,许明远,等. 离心泵锥形吸水室内置隔板对水力性能的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(3):80–84.
MU Jiegang, LI Si, XU Mingyuan, et al. Influence on hydraulic performance of suction chamber with built-in baffles in centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 80–84. (in Chinese)
 - 22 JABERG H. Modifying unstable headcurves of swept and unswept pump bladings by means of casing treatment [J]. Proc. IMech E, Part A: Journal of Power and Energy, 2012, 226: 479–488.
 - 23 冯卫民,程千,郭志伟,等. 前置导叶可调式轴流泵低频压力脉动特性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(10):62–67.
FENG Weimin, CHENG Qian, GUO Zhiwei, et al. Characteristics of low frequency pressure fluctuation in axial flow pump with variable inlet guide vane [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 62–67. (in Chinese)
 - 24 MENTER F R. A comparison of some recent eddy-viscosity turbulence models [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1996, 118(3): 514–519.
 - 25 童秉纲,尹协远,朱克勤. 涡运动理论[M]. 2版. 合肥:中国科学技术大学出版社,2009.

(上接第 232 页)

- 15 高利波,段纲,尹革芬,等. 红外线体温仪在生猪屠宰场体温筛检中的试用效果[J]. 中国畜牧兽医,2010,37(9):235–237.
GAO Libo, DUAN Gang, YIN Gefen, et al. Trial results of infrared thermometer in the application of ante-mortem body temperature screening in the pig slaughterhouse [J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2010, 37(9): 235–237. (in Chinese)
- 16 陈柏州. 冷卻梁板空調系統热流场特性之数值模拟分析[D]. 台北:台北科技大学,2012.
CHEN Bozhou. Numerical study of thermal-fluid field of chilled-beam air-conditioning system [D]. Taipei: National Taipei University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 17 杨慧杰,郭立波,沈洁,等. 热成像仪在玻璃行业的应用初探[J]. 玻璃,2012,39(5):3–6.
- 18 OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Trans. on SMC, 1979, 9(1): 62–66.
- 19 WIRTHGEN T, ZIPSER S, FRANZE U, et al. Automatic segmentation of veterinary infrared images with the active shape approach [C] // Proceedings of the 17th Scandinavian Conference on Image Analysis, 2011: 435–446.