DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.040

# 基于模态叠加法的静电微泵吸合现象

应 济 李 俊 林谢昭 徐 亮 (浙江大学机械工程学系,杭州 310027)

【摘要】 利用数值计算和模态叠加法建立了静电致动泵膜的降阶模型,使复杂的吸合过程求解简单化。通过 与已有文献中的结果和三维有限元计算值的比较,表明降阶模型能减少求解时间并且具有很高的精度。利用降阶 模型参数化研究了残余应力、泵膜厚度、泵膜半径、极板初始间隙对泵膜吸合电压和吸合位置的影响,得到了泵膜 设计的准则,为静电微泵的优化设计提供理论基础。

关键词:微泵 吸合 静电 模态叠加 降阶模型 中图分类号:TH703;TN405 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2010)05-0198-06

# Investigation of Electrostatic Micropump Pull-in Phenomena Based on Mode Superposition Method

Ying Ji Li Jun Lin Xiezhao Xu Liang

(Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

#### Abstract

Electrostatically actuated circular diaphragm exhibits an instability known as pull-in phenomena, short circuit caused by pull-in with contact is destructive to electrostatic micropump operation. In order to avoid pull-in instability caused by high driving voltage, pull-in voltage should be calculated accurately. Therefore a reduced order model (ROM) based on numerical calculation and mode superposition method was constructed, which could take account of residual stress and geometric nonlinearity. The pull-in voltage and pull-in position computed by ROM have been compared with the existed results and the results calculated by 3-D finite element analysis. It showed that the ROM sped up computational process without sacrificing the accuracy. The effects of different parameters such as residual stress, initial gap, diaphragm radius, diaphragm thickness on pull-in voltage and pull-in position were also investigated by the ROM. In addition, the design criteria of pump diaphragm were obtained, which provided an effective theoretical basis for the optimization design of electrostatic micropump.

Key words Micropump, Pull-in, Electrostatic, Mode superposition, Reduced order model

#### 引言

在微机电系统(micro-electro-mechanical system, 简称 MEMS)中,静电力作为一种非线性分布力,在 驱动结构运动时容易产生吸合现象。这种现象非常 不利于静电微泵的正常工作,因为发生吸合会造成 泵膜与固定极板刚性碰撞,引起泵腔体积突变,无法 精确供给流体,更严重的是发生短路,引起驱动电路 中的电流突然增大,最终造成静电微泵损坏而无法 工作。在泵膜与固定极板之间增加绝缘挡块,可以 避免吸合时电极接触而发生短路。然而泵膜与挡块 接触后,随着驱动电压的减小,静电驱动单元会出现 迟滞现象,这同样影响流体的精确供给。所以通过 计算泵膜的吸合电压与吸合位置,确定微泵的驱动

收稿日期: 2009-04-02 修回日期: 2009-05-04

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50475104)和浙江省自然科学基金重点资助项目(Z106519)

作者简介: 应济, 副教授, 主要从事微系统的动态特性分析以及热控制研究, E-mail: yingji\_zju@yahoo. cn

电压上限和稳定工作范围,有利于确保静电微泵的 稳定正常工作。

直接利用有限元、有限差分或边界元等数值计 算软件求解时,必须多次加载电压并通过观测位移 是否突变来确定吸合电压的范围,由于吸合位置为 临界的不稳定平衡点,必须通过反复迭代才能获得 收敛值,上述方法计算耗时太大,不适合用于参数化 研究。本文以数值计算和模态叠加法为基础建立静 电致动泵膜的降阶模型(reduced order model,简称 ROM),该模型的求解耗时较少,并且能够准确地考 虑残余应力和几何非线性对吸合过程的影响,利用 ROM 研究各种设计参数对静电微泵吸合电压和吸 合位置的影响。

#### 1 模型的建立

在 MEMS 中,静电驱动单元的吸合过程可分为 静态吸合与动态吸合。前者把结构的运动看成一个 准静态的过程,通过缓慢加载电压直至极板失稳而 相互接触,对应的电压值就是静态吸合电压;而后者 考虑了惯性力和阻尼的影响,一般通过反复加载阶 跃电压,直至极板发生接触,加载的阶跃电压值就是 动态吸合电压。由于考虑了惯性力,动态吸合电压 略微低于静态吸合电压,在气体介质中,两者的相对 差值在5%以下<sup>[1]</sup>;在液体介质中,较大的阻尼会使 这种差异更小<sup>[2]</sup>。通过 CFD-ACE<sup>+</sup>进行三场全耦合 数值模拟也证实了上述结论<sup>[3]</sup>,这是因为 MEMS 的 尺度效应使表面力起主导作用,以惯性力为代表的 体积力影响很小,而流体的粘性阻尼作用会进一步 降低惯性力的影响。静电泵膜的一侧与空气接触, 而另一侧与液体介质接触,泵膜往复振动时阻尼影 响较大。因此可以通过泵膜的静态吸合电压近似确 定其动态吸合电压,以避免直接求解涉及三场耦合 的动态吸合过程。

静电微泵的结构如图 1 所示,取未变形泵膜的 中心为系统的极坐标原点。泵膜半径为 R,泵膜厚 度为 h,边缘固定,泵膜与固定极板间的初始间隙为 g<sub>0</sub>,电极之间的介质为空气,空气的介电常数为 ε。 当电极之间施加驱动电压 V 时,泵膜发生弹性变





形,挠度为w(r),r为泵膜半径方向的位置点。

在泵膜的准静态变形过程中,可以忽略阻尼和 惯性力的影响,所以系统的总势能 U 为泵膜的弹性 变形能 U<sub>m</sub> 与驱动电极之间的静电能 U<sub>e</sub>之和。对 于保守系统,总势能的变分始终为零

$$\delta U = \delta U_m + \delta U_e = \delta U_m - \delta U_e^* = 0 \qquad (1)$$

其中 
$$U_e^* = \frac{1}{2} V^2 C = \pi \varepsilon V^2 \int_0^R \frac{r}{g_0 - w} dr$$
 (2)

式中 U<sub>e</sub><sup>\*</sup> ——系统的静电共能

C——驱动电极间的电容

泵膜可以等效为厚度一致,质量均匀的各向同 性薄板,弹性模量为 E,泊松比为  $\nu$ 。根据非线性弹 性理论,当弹性薄板的挠度与自身的厚度同阶大小 时,即 w(r) > 1/3h,必须考虑中面位移引起的中面 应变和中面内力的影响,此时泵膜的变形能  $U_m$ 等 于弯曲变形能  $U_b$ 与中面拉伸引起的变形能  $U_o$ 之 和,即  $U_m = U_b + U_o$ 。由于泵膜边缘固定,弯曲变形 能  $U_b$ 可以通过泵膜的挠度表示<sup>[4]</sup>

$$U_{b} = \pi D \int_{0}^{R} \left[ r \left( \frac{\mathrm{d}^{2} w}{\mathrm{d} r^{2}} \right)^{2} + \frac{1}{r} \left( \frac{\mathrm{d} w}{\mathrm{d} r} \right)^{2} \right] \mathrm{d} r \quad (3)$$

泵膜的中面拉伸引起的变形能 U。可表示为<sup>[4]</sup>

$$U_{o} = \frac{12\pi D}{h^{2}} \int_{0}^{R} \left\{ \left[ \frac{\mathrm{d}u_{r}}{\mathrm{d}r} + \frac{1}{2} \left( \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}r} \right)^{2} \right]^{2} + \frac{u_{r}^{2}}{r^{2}} + 2\nu \frac{u_{r}}{r} \left[ \frac{\mathrm{d}u_{r}}{\mathrm{d}r} + \frac{1}{2} \left( \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}r} \right)^{2} \right] \right\} r \mathrm{d}r$$
(4)

式中 u<sub>r</sub>——泵膜中面上位置 r 处的位移

将式(2)~(4)代人式(1)中,可得到泵膜在分 布式静电力作用下的平衡方程。由于考虑了中面位 移的影响,引入了非线性项 $u_r^2$ ,再加上静电力固有 的非线性项 $1/(g_0 - w)^2$ ,很难获得平衡方程的解析 解。所以利用模态叠加原理,将泵膜的实际挠度展 开成模态振型的线性组合

$$w(r) \approx w_e(r) + \sum_{i=1}^{m} q_i \varphi_i(r) \quad (m \ll n) \quad (5)$$

式中,  $\varphi_i(r)$  为泵膜的第 *i* 阶模态振型, 即特征向量, 可以通过有限元软件中的模态分析提取;  $q_i$  表示第 *i* 阶模态振型对实际变形的影响系数, 即模态(广义) 坐标; *m* 为截断项数, 即实际选取的模态阶数, *m* 通 常远小于泵膜的总模态阶数 *n*;  $w_e(r)$  表示泵膜的初 始平衡位置, 用以考虑残余应力的影响, 残余应力包 括热应力和内应力两种, 热应力是由于薄膜和基底 热膨胀系数的差异引起的, 而内应力也称为本征应 力, 主要由晶格失配引起的, 其起因比较复杂, 因此 本文只考虑热应力造成的影响。 为了获得泵膜在模态坐标下的平衡方程,需要将系统的弹性能和静电共能都以 $q_i$ 的形式表达。 由式(2)~(4)可知,弹性变形能及静电共能都与挠 度存在非线性关系,并且中面位移u,难以获得w(r)的显式表达,所以无法直接写成模态坐标的形式。 为此,利用 Latin Hypercude 采样方法,通过有限元 计算对弹性变形能和电容同时进行模态坐标方向上 的采样,结合 Levenberg – Marquardt 非线性算法<sup>[5]</sup>, 拟合得到弹性变形能 $U_m(q)$ 和电容C(q)在m个模 态坐标 $q_i$ 下的多项式函数<sup>[6]</sup>

$$U_m(q_i) = \sum_{i_1=0}^{l_1} \sum_{i_2=0}^{l_2} \cdots \sum_{i_m=0}^{l_m} a_{i_1 i_2 \cdots i_m} q_1^{i_1} q_2^{i_2} \cdots q_m^{i_m} \quad (6)$$

$$C(q_{i}) = \frac{\sum_{i_{1}=0}^{i_{1}} \sum_{i_{2}=0}^{i_{2}} \cdots \sum_{i_{m}=0}^{i_{m}} a_{i_{1}i_{2}\cdots i_{m}} q_{1}^{i_{1}} q_{2}^{i_{2}} \cdots q_{m}^{i_{m}}}{\sum_{i_{1}=0}^{k_{1}} \sum_{i_{2}=0}^{k_{2}} \cdots \sum_{i_{m}=0}^{k_{m}} b_{i_{1}i_{2}\cdots i_{m}} q_{1}^{i_{1}} q_{2}^{i_{2}} \cdots q_{m}^{i_{m}}}$$
(7)

式中, $l_i(i=1,2,\dots,m)$  和 $k_i(i=1,2,\dots,m)$ 表示第 *i*个模态坐标方向上的多项式阶数; $a_{i_1i_2\dots i_m}$ 和 $b_{i_1i_2\dots i_m}$ 为拟合得到的多项式系数。

将式(2)、(6)、(7)代入式(1)中,得到泵膜在 模态坐标下的平衡方程

$$\frac{1}{2}V^2 \frac{\partial C(q_i)}{\partial q_i} - \frac{\partial U_m(q_i)}{\partial q_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \cdots, m)$$
(8)

由于 U<sub>m</sub>(q)和 C(q)是 q<sub>i</sub> 的多项展开式,最终得到 是 m 个模态坐标下的代数方程组,而不是原来的变 形和静电力互相耦合的偏微分方程,求解难度得到 很大程度的降低。



(c) 第4、5 阶模态振型 (d) 第6 阶模态振型

通过求解式(8),将得到的 m 个模态坐标 q<sub>i</sub>代 入式(5)中,可以获得泵膜上任意位置点的挠度。 在研究泵膜的吸合现象时,主要关注的是泵膜中心 的挠度,因为在分布式静电力作用下,泵膜中心的挠 度最大,如果电压增加到吸合电压以上,泵膜中心最 先与固定极板接触。实际加载的静电力很难激励出 泵膜的高阶模态响应,并且第2~5阶模态振型在泵 膜中心处的幅值为零,即φ<sub>i</sub>(0)=0 (*i*=2~5),如 图2所示。因此只需要选取第1阶模态振型,就能 准确地表达泵膜中心的实际挠度。一个无限多自由 度的连续系统,通过有限元采样和模态叠加,最终被 简化为只有单个节点(泵膜中心点)、单个自由度 (第1阶模态坐标方向)的 ROM。

#### 2 小变形下的计算结果

为了验证 ROM 计算吸合过程的准确性,以文 献[7]提供的参数建立 ROM,计算得到的吸合电压 与文献[7~8]中的结果进行了比较,如表1所示, 表中  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$ , 分别表示 ROM 的结果相对 FDM (finite difference method), FEM (finite element method)结果的误差百分数。可以看出, ROM 和 FEM 的结果非常吻合,相对误差在1%以下,并且 ROM 能够准确地考虑残余应力的影响;而 ROM 相 对 FDM 结果的误差略大,主要是由于 FDM 采用了 逐步线性化近似处理了非线性项  $1/(g_0 - w)^2$ 。由 于文献[7]中提供的泵膜厚度为20 μm,电极的初始 间隙只有1µm,吸合之前,泵膜中心的极限挠度约 为 0.46 µm,远小于泵膜的厚度,变形在线弹性范围 内,几何非线性效应可以忽略,小变形弯曲理论下得 到的控制方程能够准确地描述泵膜的变形。然而, 泵膜的变形经常会超出线弹性范围,有必要进一步 研究在大变形下 ROM 计算吸合过程的适用性。

表 1 3 种模型下的吸合电压 Tab.1 Pull-in voltage of three models

残余应力 $\sigma_0/MPa$	吸合电压 V <sub>p</sub> /V			相对误差/%	
	FDM	FEM	ROM	$\Delta_1$	$\Delta_2$
- 20	313.37	311	308.7	1.49	0.74
0	315.51	314	311.8	1.18	0.70
40	319.73	319	317.4	0.73	0.50

## 3 大变形下的计算结果

实际应用中的静电微泵,需要较大的输出流量 和压力,泵膜振动时的挠度通常会超过自身的厚度, 此时必须考虑中性面拉伸引起的位移和应力,小变 形弯曲理论不再适用。有必要研究 ROM 在大变形 范围内计算吸合过程的适用性,静电微泵的相关材 料和尺寸参数如表 2 所示。

仍然选择泵膜的第1阶模态作为广义坐标,模态坐标方向上的采样次数通常为6~11,因为采样次数太少会造成拟合函数的精度不高,而过多的采

表 2 模型的基本参数

Tab. 2 Parameters of model for simulation

参数	数值
泵膜厚度 h/μm	10
泵膜半径 R/μm	2 000
初始间隙 g <sub>0</sub> /μm	30
泵膜密度 ρ/kg·m <sup>-3</sup>	2 310
弹性模量 E/GPa	163
泊松比 <i>ν</i>	0. 22
介电常数 ε/C <sup>2</sup> ・(N・m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup>	8.854 $\times 10^{-12}$

样次数会增加采样时间,同时高阶多节点的多项式 容易出现振荡现象。所以确定第1阶模态方向上的 采样次数为6,利用有限元采样得到的数据,拟合得 到的弹性变形能和电容函数为5阶 Lagrange 多项 式,如图3所示,可以看出拟合结果非常理想,在泵 膜的变形范围0~30μm内都不存在振荡现象。



Fig. 3 Fit functions of capacitance and strain energy

将拟合得到的电容和弹性变形能代入式(8), 得到第1阶模态坐标  $q_1$ 和驱动电压 V的关系式,利 用该关系式和模态分析得到的第1阶模态振型在泵 膜中心处的幅值  $\varphi_1(0)$ ,最后结合式(5)求得泵膜 中心挠度与加载电压的关系曲线,如图4所示。其 中 FEM 结果是在 ANSYS 中建立三维有限元模型, 通过顺序耦合法求得的。由图4可知,在整个电压 加载过程中,ROM 和 FEM 的结果几乎完全吻合。





根据泵膜中心挠度与加载电压的关系得到吸合电压和吸合位置,数据结果如表 3 所示,表中  $\Delta$  为 ROM 计算结果相对 FEM 结果的误差百分数。可以 看出吸合电压下的泵膜中心挠度  $w_p$ ,即吸合位置已 经超过了泵膜的厚度,此时的变形已经属于大变形 范畴,几何非线性效应十分明显。但是 ROM 仍然 能够准确地获得吸合电压与吸合位置,与 FEM 结果 的相对误差在 1% 以下,并且 ROM 还能准确地估 计残余应力对吸合过程的影响。其中 ROM 的主 要误差来源为:只选用了 1 阶模态而忽略了高阶 模态的影响;用于提取模态振型和采样结果的有 限元模型网格密度不够;利用采样结果拟合得到 的多项式函数与电容、弹性变形能的实际变化规 律存在差异。

表 3 两种模型下的吸合电压和吸合位置 Tab. 3 Pull-in voltage and pull-in voltage of two models

残余应力	吸合电压 $V_p/V$		吸合位置 w <sub>p</sub> /μm	
$\sigma_0/\mathrm{MPa}$	FEM	$\operatorname{ROM}(\Delta/\%)$	FEM	ROM(Δ/%)
0	427.2	430.1(0.68)	19.69	19.76(0.36)
10	548.1	548.5(0.07)	17.29	17.32(0.17)
20	652.4	653.2(0.12)	16.09	16.17(0.50)

ROM 的求解速度很快,逐渐加载电压直到发生 吸合,整个求解过程只需要几十秒钟,而更多时间耗 费在 ROM 的构建过程中,包括提取模态振型、在模 态坐标下对弹性变形能和电容的采样、将采样结果 拟合成模态坐标下多项式函数、以及通过总势能的 变分获得模态坐标下的平衡方程。ROM 建立过程 的时间耗费主要由选取的模态阶数 m 决定,因为 m 直接影响了模态分析需要提取的模态振型数,更重 要的是还决定了采样次数为 6<sup>m</sup>~11<sup>m</sup>。

本文的 ROM 只有1 阶模态,通过有限元采样和 提取模态振型只需要几分钟,所以完成一次 ROM 的构建和吸合过程的求解在 10 min 左右。相比之 下,在 ANSYS 中通过顺序耦合法求解,需要多次加 载电压并通过观测位移是否突变来确定吸合电压的 范围,由于吸合位置为临界的不稳定平衡点,在该位 置附近必须提高收敛监测精度,增加平衡迭代次数 和子步数来获得准确的收敛值,完成一次吸合过程 的求解往往需要数小时。可以看出 ROM 同时具有 很高的计算精度和较少的求解时间,可以利用该方 法高效地估计各种设计参数对静电微泵吸合电压及 吸合位置的影响。

#### 4 参数化分析结果

以表 2 中的参数为基础,在 ANSYS 中通过 APDL(ANSYS parametric design language)建立不同 参数下的有限元模型,利用这些有限元模型提取泵 膜的第1阶模态振型、弹性变形能、电容,然后建立 相应参数下的 ROM,利用这些 ROM 参数化地研究 残余应力、泵膜厚度、泵膜半径、极板初始间隙对静 电微泵准静态下吸合电压和吸合位置的影响。

由图 5、6 可知,电极初始间隙和泵膜厚度对吸 合电压的影响较大,几乎成线性递增的关系。这是 由于静电力与初始间隙的平方成反比,而泵膜的弯 曲刚度与厚度成正比,随着初始间隙、泵膜厚度的增 大,需要更高的电压使泵膜产生相同幅值的变形。 吸合位置则随着初始间隙的增大而增大,随着泵膜 厚度的增大而减小,其中初始间隙的影响较大,当  $g_0 = 22 \ \mu m \mbox{ t}, y_p \ q f \ 13. 69 \ \mu m, m \ g_0 = 30 \ \mu m,$  $w_p$  增大为 19. 69 \ \mu m; 相比之下, 厚度 h \ h \ 8 \ \mu m \ 增至 原来的两倍, w\_p QQ从 20. 24 \ \mu m 减至 18. 11 \ \mu m。



图 5 吸合电压、吸合位置与电极初始间隙的关系

Fig. 5 Pull-in voltage and pull-in position vs initial gap



diaphragm thickness

由图 7、8 可知,随着泵膜半径的增加吸合电压降低很快,而吸合位置几乎没有变化。这是因为静电力作为一种表面力与驱动极板半径的平方成正比,同时静电力产生的弯曲作用与泵膜半径成正比。 残余应力的存在对吸合电压的影响很大,这是由于 沿半径方向的拉应力增大了泵膜的法向刚度,而压 应力则产生了相反的效果,这种残余应力造成结构 刚化或软化的现象在薄膜式结构中格外明显。残余 应力对吸合位置也有较大的影响,当  $\sigma_0 = 20$  MPa 时,吸合位置增大为 21.18  $\mu$ m。

根据上述参数化分析结果,为了改进和提高静 电微泵的工作性能,泵膜设计应遵循下列重要准则:



Fig. 8 Pull-in voltage and pull-in position vs residual stress

增大初始间隙有利于增大泵膜的稳定工作范围,从 而增大输出流量和压力,但是需要以更高的驱动电 压为代价;相比之下,在薄膜制备工艺和结构强度允 许的情况下,减小泵膜的厚度,既能增大泵膜的稳定 工作范围又能降低驱动电压;增大泵膜半径可以很 大程度地降低驱动电压,并且能通过增大体积变形 来获得较大的输出流量和压力;对于残余应力的控 制,需要依靠加工工艺的温度控制和泵膜基底掺杂 等手段,并且要尽量避免产生残余拉应力。

### 5 结束语

以有限元计算和模态叠加法为基础,充分利用 了静电致动泵膜结构的周期对称性,将一个无限多 自由度的静电微泵驱动单元,简化成泵膜第1阶模 态坐标下的单自由度 ROM,该模型的建立和吸合过 程求解只需要 10 min 左右,然而在 ANSYS 中通过 顺序耦合法求解通常需要数个小时。ROM 在减少 求解耗时的同时还保证了很高的求解精度,并且能 够准确地考虑残余应力和几何非线性效应对吸合过 程的影响。利用 ROM 参数化研究了静电微泵各种 设计参数对吸合电压和吸合位置的影响,为确定泵 膜的稳定工作范围及驱动电压上限提供了依据,并 且得到了泵膜设计的准则,为静电微泵的优化设计 提供理论基础。 参考文献

- 1 McCarthy B, Adams G G, McGruer N E, et al. A dynamic model, including contact bounce of, an electrostatically actuated microswitch [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11(3): 276 ~ 289.
- 2 Krylov S, Maimon R. Pull-in dynamics of an elastic beam actuated by continuously distributed electrostatic force[J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 2004, 126(3): 332 ~ 342.
- 3 林谢昭,应济,陈子辰.流体环境中静电微悬臂梁的多场耦合仿真分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 203~207. Lin Xiezhao, Ying Ji, Chen Zichen. Multi-physics analysis of an electrostatically actuated microcantilever in viscous fluids [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 203~207. (in Chinese)
- 4 Nayfeh A H, Pai P F. Linear and nonlinear structural mechanics [M]. New York: Wiley, 2004: 371~467.
- 5 Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. Numerical recipes in C: the art of scientific computing[M]. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 681 ~ 688.
- 6 林谢昭,应济,陈子辰.静电致动硅模板宏模型建立方法[J].光学精密工程,2008,16(5):839~843. Lin Xiezhao, Ying Ji, Chen Zichen. Macro modeling method for electrostatical drive silicon diaphragm [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(5): 839~843. (in Chinese)
- 7 Soleymani P, Sadeghian H, Tahmasebi A, et al. Pull-in instability investigation of circular micro pump subjected to nonlinear electrostatic force [J]. Sensors and Transducers Journal, 2006, 69(7): 622 ~ 628.
- 8 Raback P, Pursula A. Finite element simulation of the electromechanical pull-in phenomenon [C] // European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Jyvaskyla, 2004: 1 ~ 13.

#### (上接第181页)

参考文献

- 1 Das K, Evans M D. Detecting fertility of hatching eggs using machine vision II: neural network classifiers [J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(6): 2035 ~ 2041.
- 2 Das K, Evans M D. Detecting fertility of hatching eggs using machine vision I: histogram characterization method[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(4): 1335~1341,23.
- 3 杨秀坤.农产品品质检测中的人工智能方法研究[D].哈尔滨:东北农业大学,1997. Yang Xiukun. Research of artificial intelligence in quality detection of agricultural products [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 1997. (in Chinese)
- 4 陈佳娟,陈晓光,纪寿文.采用计算机视觉孵化鸡蛋成活性的自动检测[J].计算机应用与软件,2001,18(6):5~10. Chen Jiajuan, Chen Xiaoguang, Ji Shouwen. Automatic detecting fertility of hatching eggs by using computer vision[J]. Computer Application and Software, 2001, 18(6):5~10. (in Chinese)
- 5 郁志宏.基于机器视觉的种蛋筛选及孵化成活性检测研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2006. Yu Zhihong. Study on automatic identifying quality and fertility of hatching eggs based on machine vision system [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 6 周维忠.基于机器视觉的孵化生产质量检测技术研究[D].西安:西安交通大学,2000. Zhou Weizhong. Research of hatching quality detection based on machine vision[D]. Xi'an: Xian Jiaotong University, 2000. (in Chinese)
- 7 侯培国,赵静,刘明.基于小波变换和行扫描的车牌定位方法[J].系统仿真学报,2006,18(增刊2):811~813. Hou Peiguo, Zhao Jing, Liu Ming. Method of plate region detection based on wavelet transform and line scan[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(Supp.2): 811~813. (in Chinese)
- 8 仇恒志,钟鼎苏.一种视网膜血管的分割方法[J]. 江西医学院学报,2009,49(1):129~133. Qiu Hengzhi, Zhong Dingsu. Segmentation of retinal vessels[J]. Acta Academic Medicine Jiangxi, 2009, 49(1):129~133. (in Chinese)
- 9 高新波,李洁,姬红兵.基于加权模糊 C 均值聚类与统计检验指导的多阈值图像自动分割算法 [J].电子学报,2004, 32(4):661~664.

Gao Xinbo, Li Jie, Ji Hongbing. A multi-threshold image segmentation algorithm based on weighting fuzzy C-means clustering and statistical test[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(4): 661 ~ 664. (in Chinese)