

基于电源电流和输出电压的模拟电路故障模型研究

胡鸿志^{1,2}, 田书林¹, 郭庆²

(1. 电子科技大学 自动化工程学院, 成都 611731;

2. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 基于模拟电路电源电流和输出电压的协同分析, 研究了复数域的故障建模方法, 提出了一种 2D 故障模型的数学表达式, 该模型为复平面上的一簇圆轨迹; 为了扩大故障轨迹之间的距离, 在相同测量精度和元件容差条件下提高故障检测率和隔离率, 进一步提出了 3D 复数空间的优化故障模型; 两种故障模型都极大简化了测点选择算法和模拟故障状态仿真的复杂度, 理论上对模拟电路单故障的覆盖率为 100%; 基于滤波器电路的实验仿真结果验证了两种故障模型的有效性。

关键词: 故障建模; 模拟电路; 复数域; 电源电流; 输出电压

Fault Modeling for Analog Circuits Based on Supply Current and Voltage Response

Hu Hongzhi^{1,2}, Tian Shulin¹, Guo Qing²

(1. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: This paper provides a research on the fault modeling of analog circuits in the complex field, a mathematic phasor fault model is proposed based on collaborative analysis of supply current and output voltage, which is a family of circinal loci on the 2D complex plane. Furthermore, In order to increase the distances between each pair of loci, the fault model is improved in 3D complex space, which achieves a far better fault detection ratio (FDR) against the measurement error and parametric tolerance. Both of the fault models simplify greatly the algorithms of test point selection and potential faults simulation, and achieve very excellent fault coverage that are likely close to 100% for single fault. Moreover, results of some experimental applications are also given to validate the proposed techniques in this paper.

Keywords: fault modeling; analog circuits; complex field; supply current; voltage response

0 引言

模拟电路故障诊断和可测性设计技术, 是近年来电子系统和装备研究的热点^[1]。基于故障模型的故障字典法是一种有效的模拟电路故障诊断方法。而模拟元件参数的连续性和非线性, 导致通用的模拟电路故障模型难以建立, 普遍采用基于元件硬故障(开路 and 短路失效)和离散型软故障(元件参数故障)的故障模型, 但是这些模型通常都难以表征模拟电路的全部潜在故障。

模拟电路故障建模方法中, 电压、电流和频率等电路变量^[2-4], 以及小波分析和神经网络的等理论^[5-7]都被广泛应用于故障特征的获取。文献[2]提出了一种基于电压斜率的故障模型, 以任意两个测点的电压关系作为故障特征, 实现了线性电阻电路的软故障和硬故障检测, 但是该方法在动态电路中可能导致大量的掩盖故障和模糊组。文献[3-4]将建模方法扩展到复数域, 分别以被测电路节点电压的实部和虚部为参数提取故障特征, 构建了复数平面上的二维故障模型, 实现了模拟电路单元故障的完全覆盖。不过该方法在实际应用中, 由于测量误差和元件容差的存在, 可能因为相邻故障轨迹之间的

距离太近, 从而导致故障检测率(fault detection ratio, FDR)和故障分辨率(fault isolation ratio, FIR)下降。因此本文将通过被测电路电源电流和节点电压的协同分析, 优化基于复数域的故障模型, 分别在二维复平面和三维复空间构建新模型, 以提高被测电路故障诊断的 FDR 和 FIR。

1 基于电源电压和节点电压的 2D 故障模型

1.1 2D 故障模型理论

假设一个线性的无源模拟电路 N 包含 n 个元件, 其中某个元件 P_i ($1 \leq i \leq n$) 为失效元件。被测电路 N 的电源电压为 U_{dd} , 输入信号为 U_{sk} ($1 \leq k \leq m$), 则 N 的激励可以表示为一个 $m+1$ 维相量 U_S 。

$$U_S = (U_{dd} \quad U_{s1} \quad U_{s2} \quad \dots \quad U_{sm}) \quad (1)$$

另外假设被测电路 N 的电源电流为 I_{dd} , U_o 为任意可测节点的输出电压响应, 构建的 I_{dd} 和 U_o 的协同输出函数如(2)所示。

$$F_c(P_i) = U_o \quad I_{dd} \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中: c_0 和 c_1 为常数。根据电路分析理论, 如果失效元件 P_i 的阻抗为 Z_{P_i} , 端电压为 u_{P_i} , 则该元件对于协同输出 $F_c(\cdot)$ 等效为一个电压源 u_{P_i} , 因此 $F_c(\cdot)$ 可以表示为:

$$F_c(P_i) = (U_S H + u_{P_i} H_P) \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中: H 和 H_P 为相应的传递函数矩阵。

收稿日期: 2014-10-23; 修回日期: 2014-12-04。

基金项目: 广西教育厅高等学校重大科研资助项目(201201ZD010); 桂林市科技攻关项目(20120101-6)。

作者简介: 胡鸿志(1977-), 男, 四川乐山人, 副教授, 博士研究生, 主要从事模拟电路故障诊断与可测性设计方向的研究。

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_{1dd}(s) & H_{11}(s) & \cdots & H_{1m}(s) \\ H_{2dd}(s) & H_{21}(s) & \cdots & H_{2m}(s) \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_P = (H_{1P}(s) \quad H_{2P}(s)) \quad (5)$$

根据电路分析中的戴维南定理, u_{P_i} 又可以进一步的表示为:

$$u_{P_i} = u_{oc} \frac{Z_{P_i}}{Z_0 + Z_{P_i}} \quad (6)$$

其中: u_{oc} 为元件所对应的戴维南等效电压, Z_0 为等效阻抗, 则 (3) 变换为:

$$F_c(P_i) = U_S \mathbf{H} \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \end{pmatrix} + u_{oc} \mathbf{H}_P \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \end{pmatrix} \frac{R_{P_i}}{Z_0 + R_{P_i}} \quad (7)$$

如果将 (7) 中的变量定义为复数形式:

$$U_S \mathbf{H} \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \end{pmatrix} = a_1 + jb_1 \quad (8)$$

$$u_{oc} \mathbf{H}_P \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \end{pmatrix} = a_2 + jb_2 \quad (9)$$

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (10)$$

将公式 (8) 到 (10) 带入 (7), 利用复数相等必须要实部和虚部分别相等的原理, 消去变量 Z_{P_i} 并整理可得:

$$(\operatorname{Re}[F_c(P_i)] - c_r)^2 + (\operatorname{Im}[F_c(P_i)] - c_j)^2 = r^2 \quad (11)$$

其中:

$$\begin{cases} c_r = \frac{-b_2 R_0 + 2a_1 X_0 + a_2 X_0}{2X_0} \\ c_j = \frac{a_2 R_0 + 2b_1 X_0 + b_2 X_0}{2X_0} \\ r^2 = \frac{(a_2^2 + b_2^2)(R_0^2 + X_0^2)}{4X_0^2} \end{cases} \quad (12)$$

公式 (11) 表明, 当失效元件 P_i 的参数变化时, 如果以电源电流 I_{dd} 和电路的输出 U_o 为变量, 其协同输出函数 $F_c()$ 是 2D 复平面上的一个圆轨迹。因此在理论上只需要仿真 P_i 的任意 3 个失效状态, 就可以拟合出全部的故障状态。这不仅大大减少了建立模型的复杂度, 而且无需增加电路内部测点。

1.2 实例与仿真

以图 1 所示的二阶巴特沃兹滤波器电路为例, 电路采用频率 3 kHz 的正弦波为激励信号, 在 PSPICE 中对所有元件的失效状态进行仿真, 参数变化范围为 $p_i \times 10^{-4} \sim p_i \times 10^4$ (p_i 为元件 P_i 的标称值)。部分仿真结果的协同输出数据 $F_c(P_i)$ 如表 1 和表 2 所示, 图 2 为故障仿真结果在复平面上的图形化显示, 所有的故障曲线都是复平面上的某个圆轨迹, 每条轨迹表征一个元件的全部潜在故障状态, 包括硬故障和软故障。所有轨迹必定交汇于电路的正常工作状态 A, 并随着元件参数的漂移而远离 A 点, 部分轨迹将交汇于输出零点 B, 从而导致部分

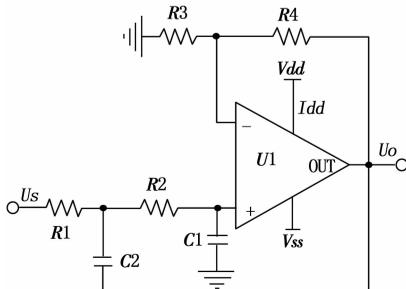


图 1 二阶巴特沃兹滤波器电路

故障状态 (硬故障) 相互掩盖。

表 1 部分元件故障仿真数据

元件参数变化率/%	R2	C1	C2
1	2.366+j0.251	1.184+j1.328	0.674-j0.929
5	2.450+j0.167	1.289+j1.370	0.684-j0.954
8	2.513+j0.095	1.375+j1.401	0.692-j0.974
10	2.553+j0.044	1.436+j1.420	0.697-j0.986
40	2.854-j1.116	3.122+j1.226	0.786-j1.248
60	2.424-j2.001	4.182-j0.930	0.842-j1.498
70	2.031-j2.296	3.486-j2.240	0.867-j1.674
80	1.599-j2.450	2.345-j2.769	0.880-j1.865
90	1.190-j2.477	1.424-j2.695	0.874-j2.125
100	0.838-j2.412	0.838-j2.412	0.838-j2.412
110	0.553-j2.295	0.481-j2.106	0.739-j2.788
120	0.332-j2.153	0.275-j1.848	0.548-j3.210
130	0.165-j2.005	0.146-j1.632	0.168-j3.724
150	-0.053-j1.725	0.007-j1.301	-1.455-j4.514
200	-0.253-j1.215	-0.087-j0.847	-3.803-j0.440
300	-0.274-j0.725	-0.092-j0.496	-1.257+j0.602
400	-0.234-j0.507	-0.076-j0.340	-0.693+j0.435
500	-0.198-j0.388	-0.064-j0.265	-0.470+j0.328
800	-0.132-j0.227	-0.042-j0.156	-0.242+j0.188
1 000	-0.107-j0.177	-0.034-j0.123	-0.181+j0.145
3000	-0.037-j0.055	-0.012-j0.039	-0.052+j0.045
6000	-0.019-j0.027	-0.006-j0.019	-0.025+j0.022
10 000	-0.011-j0.016	-0.004-j0.011	-0.015+j0.013

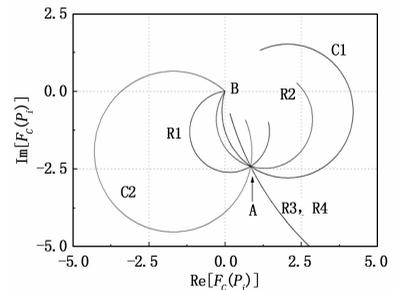


图 2 基于复数域的 2D 故障模型

图 2 中的复数故障模型在理论上实现了单个元件所有故障状态的全覆盖, 但是某些故障轨迹之间的距离比较小, 利用现有的电子测量技术, 由于测量误差的存在, 不能保证所有的故障状态都能被隔离。极限情况下, 由于元件参数变化灵敏度之间的线性相关性^[8], 导致其故障轨迹位于相同的圆上, 例如图 1 中的电阻 R3 和 R4, 表 2 中的数据也显示出相同的趋势, 这些元件的故障将相互掩盖而无法隔离, 进而形成模糊组。

表 2 R3 和 R4 的故障仿真数据对比

R3 仿真值/ Ω	协同输出 $F_c(R3)$	R4 仿真值/ Ω	协同输出 $F_c(R4)$
5k	18.909+j2.151	1k	0.191-j0.809
6.67k	2.929-j5.138	2k	0.223-j0.912
7.5k	1.776-j3.891	5k	0.354-j1.301
10k	0.838-j2.412	6.67k	0.461-j1.585
13.3k	0.534-j1.761	7.5k	0.532-j1.756
15k	0.463-j1.587	10k	0.838-j2.412
20k	0.352-j1.297	13.3k	1.784-j3.901
50k	0.223-j0.912	15k	2.894-j5.106
100k	0.191-j0.809	20k	18.898+j2.150

2 基于电源电压和节点电压的 3D 故障模型

2.1 3D 故障模型的构建

公式 (11) 所描述的 2D 故障模型, 是基于电源电流 I_{dd} 和节点电压 U_o 的线性组合而构建的, 并且是将复数变量的实部 $\text{Re}(\cdot)$ 和虚部 $\text{Im}(\cdot)$ 作为独立变量。如果再引入复数模 (绝对值) $|\cdot|$ 作为提取故障特征的变量, 则可在 3D 空间中构建新的故障模型。

假设 $P_i (1 \leq i \leq n)$ 仍然为被测模拟电路 N 中的失效元件, 以 i, j, k 为单位轴向量构建 3D 复数空间, 并在此空间中建立函数 $F_{3D}(\cdot)$ 如公式 (13) 所示。

$$F_{3D}(P_i) = i \cdot \text{Re}[F_U(P_i)] + j \cdot \text{Im}[F_U(P_i)] + k \cdot |F_I(P_i)| \quad (13)$$

其中:

$$F_U(P_i) = c_0 U_o \quad (14)$$

$$F_I(P_i) = \frac{1}{(c_1 I_{dd})} \quad (15)$$

2.2 3D 故障模型仿真验证

基于公式 (13), 对于图 1 所示的二阶巴特沃兹滤波器电路, 仍然采用频率 3 kHz 的正弦激励, PSPICE 仿真结果如图 3 所示。所有的故障曲线仍然汇聚于无故障工作点 A; 而 2D 故障模型中的另一个曲线汇聚点 B, 也就是潜在的掩盖故障状态, 在 3D 模型中由于公式 (15) 的定义将是一个理论上的无穷大点。

图 3 所示的 3D 故障模型, 在由 i, j 为单位轴向量的 2D 复平面上的投影, 是与图 2 相似的一簇圆轨迹^[3-4]。

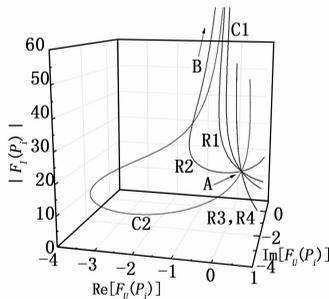


图 3 基于复数域的 3D 故障模型

3 故障模型对比分析

采用可测性设计是提高 FDR 和 FIR 的有效方法, 而优化故障模型, 增大故障曲线之间的距离也是提高 FDR 和 FIR 的可行方案。对于任意两个元件 P_i 和 $P_l (1 \leq i \neq l \leq n)$, 当 P_i 和 P_l 的参数相对于其标称值发生相同比例的漂移时, 基于欧氏距离公式, 可以将 3D 故障模型之间的距离 $D_{3D}(\cdot)$ 定义为:

$$D_{3D}(P_i, P_l) = \sqrt{[D_i(P_i, P_l)]^2 + [D_j(P_i, P_l)]^2 + [D_k(P_i, P_l)]^2} \quad (16)$$

$$D_i(P_i, P_l) = |\text{Re}[F_U(P_i)] - \text{Re}[F_U(P_l)]| \quad (17)$$

$$D_j(P_i, P_l) = |\text{Im}[F_U(P_i)] - \text{Im}[F_U(P_l)]| \quad (18)$$

$$D_k(P_i, P_l) = ||F_I(P_i)| - |F_I(P_l)|| \quad (19)$$

为 2D 故障模型定义类似的距离函数 $D_{2D}(\cdot)$:

$$D_{2D}(P_i, P_l) = \sqrt{[D'_i(P_i, P_l)]^2 + [D'_j(P_i, P_l)]^2} \quad (20)$$

$$D'_i(P_i, P_l) = |\text{Re}[F_c(P_i)] - \text{Re}[F_c(P_l)]| \quad (21)$$

$$D'_j(P_i, P_l) = |\text{Im}[F_c(P_i)] - \text{Im}[F_c(P_l)]| \quad (22)$$

由于电源电流 I_{dd} 通常较小, 合理选择常系数 (放大倍数) c_1 , 可以保证:

$$\left| \frac{1}{F_I(P_i)} \right| = |c_1 I_{dd}| < 1 \quad (23)$$

因此

$$\left| |F_I(P_i)| - |F_I(P_l)| \right| = \left| \frac{1}{\frac{1}{|F_I(P_l)|} - \frac{1}{|F_I(P_i)|}} \right| > \left| \frac{1}{|F_I(P_i)|} - \frac{1}{|F_I(P_l)|} \right| \quad (24)$$

同时, 对于复数 $c_0 U_o$ 和 $c_1 I_{dd}$, 其模存在关系式:

$$|c_0 U_o| + |c_1 I_{dd}| \geq |c_0 U_o + c_1 I_{dd}| \quad (25)$$

由公式 (24) 和 (25) 可以得知, 对于任意的两个元件 P_i 和 P_l , 3D 模型轨迹距离 $D_{3D}(\cdot)$ 必定大于 2D 轨迹距离 $D_{2D}(\cdot)$ 。

以二阶巴特沃兹滤波器中的 R2 和 C1 为例, 依据仿真数据计算不同故障模型中 R2 与 C1 轨迹之间的距离如表 3 所示。图 4 由表 3 数据绘制, 图中坐标轴采用对数坐标, 横轴为元件 P_i 参数变化率, 即元件潜在故障值与其标称值之比; 纵轴为故障轨迹之间的距离。曲线 $d1$ 为 3D 模型中 R2 与 C1 轨迹之间的距离, 虚线 $d2$ 为 2D 模型的轨迹距离; 作为对比, 文献 [3] 所提出的故障模型, 基于 R2 和 C1 的距离同样绘于图 4 中, 即为 $d3$ 。由图 4 所示仿真结果表明, 3D 故障模型对于故障轨迹之间的距离有明显优化, 在测量精度一定的情况下, 可以有效减少故障掩盖, 提高故障检测率 FDR。

表 3 R2-C1 故障曲线间距对比表

元件参数变化率/%	3D 模型距离 $d1$	2D 模型距离 $d2$	相量模型 ^[3] 距离 $d3$
1	1.5896	1.3836	1.1902
5	1.6000	1.4462	1.2463
8	1.6180	1.4971	1.2902
10	1.6342	1.5323	1.3186
40	2.0396	2.0343	1.7533
60	1.8384	1.7888	1.5321
70	1.3426	1.2716	1.0835
80	0.7912	0.7114	0.6037
90	0.3408	0.2814	0.2379
100	0	0	0
110	0.2808	0.1787	0.1509
120	0.5028	0.2743	0.2315
130	0.7061	0.3288	0.2776
150	1.1175	0.3778	0.3190
200	2.0800	0.3553	0.3004
300	3.8577	0.2570	0.2176
400	5.9997	0.2018	0.1709
500	7.6327	0.1596	0.1352
800	13.0905	0.0997	0.0846
1 000	16.7287	0.0795	0.0675
3000	52.9903	0.0263	0.0223
6000	107.3441	0.0131	0.0111
10000	179.9586	0.0079	0.0067

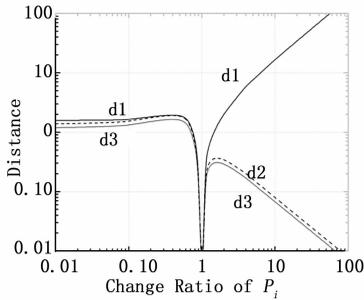


图 4 R2-C1 故障轨迹间距对比

4 结束语

本文在基于斜率的故障模型基础上, 基于被测电路电源电流和节点电压为变量提取故障特征, 分别在 2D 复平面和 3D 复空间建立故障模型, 实现了模拟电路单元件硬故障和软故障的检测和隔离。基于二阶滤波器电路的仿真结果表明, 本文提出的 2D 和 3D 故障模型具备良好的故障覆盖率, 理论上可以完全表征模拟元件的所有潜在故障, 并且有效提高了 FDR 和 FIR。后续的研究将采用旁路法^[9]等可测性设计方法, 对故障模型中的模糊组进行处理, 进一步优化 FIR。

参考文献:

[1] 马 岚, 王厚军. 基于输出电压和电源电流协同分析的故障诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (8): 1872-1878.

(上接第 2265 页)

表 1 各种算法处理时间

待检测图像尺寸	处理时间/s		处理时间/ms	
	基于区域约束的 HT	霍夫梯度法	改进的 RHT	本文算法
342 * 421	0.52	0.03	1.23	0.43

从表 1 中可以看出, 本文提出的算法速度最快, 达到了所要求的实时性, 且相比较文献 [10] 中的方法, 速度也有所提升。

4 结论

为了解决不同背光条件下桥吊吊绳摆动识别的问题, 本文提出了基于局部梯度变化和标准差的图像增强处理方法, 以及两次下采样和梯度法的改进的霍夫圆检测算法, 准确地检测标定小球及球心, 实现了吊车系统重物摆角的视觉测量。对比实验研究, 结果表明, 文中所提出的算法能够更加快速地识别出小球的位置, 满足控制的实时性要求。由于该方法是一种基于视觉识别技术的非接触式测量方法, 消除了摆角检测噪声和其它干扰, 提高了吊车摆角检测的精度。

参考文献:

[1] Hirata, K. Kimura, Y. Sugimoto, K. Visual feedback control of cart-pendulum systems with webcam [A]. in Proc. Int. Conf. Mechatron [C]. May 2007, pp. 1-6.
 [2] 郭源博. 基于视觉伺服的吊车防摆控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[2] 汪 鹏, 杨士元. 基于斜率故障模型的模拟电路软故障字典法 [J]. 微计算机信息, 2006, 22 (31): 1-2.
 [3] Hu H Z, Tian S L, Wang H J, et al. Fault Diagnosis of Analog Circuits Based on Phasor Circle Model [A]. ICEMI' 2013 [C]. 2013: 810-813.
 [4] Tian S L, Yang C L, Chen F, et al. Circle Equation-Based Fault Modeling Method for Linear Analog Circuits [J]. IEEE Transactions on Instrument and Measurement, 2014, 63 (9): 2145-2159.
 [5] 王月海, 程 冉, 蒋爱民, 等. 模拟电路故障特征提取的小波基选取方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1329-1334.
 [6] 龚茜茹, 李巧君. 遗传神经网络在模拟电路故障诊断中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (11): 2926-2928.
 [7] Long B, Tian S L, Wang H J. Feature vector selection method using Mahalanobis distance for diagnostics of analog circuits based on LS-SVM [J]. Journal of Electronic Testing, 2012, 28 (5): 745-755.
 [8] Stenbakken G N, Souders T M, Stewart G W. Ambiguity Groups and Testability [J]. IEEE Transactions on Instrument and Measurement, 1989, 38 (5): 941-947.
 [9] Esfandiari E, Marium N B. Bypassing the short-circuit faults in the switch-ladder multi-level inverter [A]. ISIEA' 2011 [C]. 2011: 128-132.
 [3] 倪 菲, 叶 军, 等. 基于机器视觉的吊具位姿检测系统 [J]. 起重运输机械, 2011 (10): 43-47
 [4] Kawai H, Kim Y B, Choi Y W. Anti-sway system with image sensor for container cranes [J]. IEEE Trans, on industrial Electronics, 2007.5 (4): 1954-1957.
 [5] Huang K C. The Implementation of a Visual Sensing System for 3-D Control of the RTG Crane [A]. Proceedings of the First International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC' 06) [C]. 2006.
 [6] Lee L H, Huang P H, Shih Y. Sung-Chih Ku and Cheng-Yuan Chang, Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control to Overhead Crane by CCD Sensor [A]. IEEE International Conference on Control Applications [C]. 2011, pp. 474-478.
 [7] 秦长海, 基于视觉定位的起重机智能化控制系统 [J]. 建筑机械化, 2009, 30 (5): 50-52.
 [8] 张 翼, 孙永荣, 王 艳, 等. 圆形运动目标的快速检测方法研究 [J]. 计算机应用与软件. 2014 (1): 211-213.
 [9] Cauchie J, Fiolet V, Villersa D. Optimization of an Hough transform algorithm for the search of a center [J]. Pattern Recognition, 2008, 41 (2): 567-574.
 [10] 张显全, 苏 勤, 等. 一种快速的随机 Hough 变换圆检测算法 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 4 (22): 62-64.
 [11] Arsenio A, Santos-Victor J. Robust visual tracking by an active observer [A], in Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Robots Syst, Sep [C]. 1997, vol. 3, pp. 1342-1347.
 [12] 桑林琼, 邱明国, 王 莉. 图像局部增强的算法研究及实现 [J]. 价值工程, 2010 (20): 110-111.