

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.06.023

## 基于多信号流模型的雷达 BIT 监测点优化与诊断策略

胡文华<sup>1</sup>, 尚朝轩<sup>1</sup>, 李永军<sup>2</sup>

(1. 军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003; 2. 军械工程学院 导弹工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘要:** 针对如何用最少的 BIT 状态监测点实现对雷达运行状态的有效检测问题, 提出基于多信号流模型的优化策略。介绍多信号流模型的定义和表示, 分析了运用该模型对雷达模块(电路)的建模、相关矩阵简化、监测点的选取及诊断策略设计方法, 以某型雷达 2 km 波门形成电路为例进行验证。结果表明, 该方法可减小监测系统的复杂性, 避免诊断推理过程的盲目性, 提高故障诊断效率, 并得到成功应用。

**关键词:** 多信号流模型; 状态监测点; 诊断策略; 雷达 BIT

**中图分类号:** TN956 **文献标识码:** A

## Monitoring Points Optimization and Diagnosis Strategy in Radar BIT Based on Multi-Signal Flow Model

HU Wen-hua<sup>1</sup>, SHANG Chao-xuan<sup>1</sup>, LI Yong-jun<sup>2</sup>

(1. Dept. of Optics &amp; Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Dept. of Missile Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In order to monitor the radar work condition and decrease the BIT monitoring points, a new optimization strategy based on multi-signal flow model is proposed. Introduces the definition and representation of multi-signal flow model, analyzes the method about modeling, predigesting dependency matrix, selecting monitoring points and designing diagnosis strategy by using this model. The validity of this method is verified in the radar's 2km gate BIT circuit. The result shows that the method can reduce the complexity of monitoring system, avoids the blindness of diagnosis inference course, and raises the efficiency of fault diagnosis.

**Keywords:** Multi-signal flow model; Condition monitoring points; Diagnosis strategy; Radar BIT

### 0 引言

随着测试技术、微电子技术、计算机技术的发展, 雷达的功能越来越强大, 其体制、构成及信号关系也越来越复杂, 对雷达机内测试(Built-In Test, BIT)的要求也越来越高。因此, 要对雷达 BIT 中所有故障模式实现在线监测与诊断是不可能的, 如果为了实现高的故障检测率隔离率而把监测诊断系统的复杂化, 会影响雷达系统本身的性能。如何用最少的监测点实现对雷达系统运行状态的有效监测, 做到故障隔离、定位准确是监测诊断系统实现的关键<sup>[1]</sup>。

多信号流模型方法是由 Somnath Deb, K.R.Pattipati 等人于 1994 年提出的, 并由 Queltech 公司利用这种模型和相关理论开发了测试性工程与维修系统(Testability Engineering And Maintenance System, TEAMS)。该方法是一种利用分层有向图表示系统属性(结构、规格等)的相关关系, 仅对故障传播建模的模型方法, 可应用于复杂系统的测试性设计、故障模式影响与危害度分析、TPS 开发、故障诊断和测试性评估等<sup>[2-3]</sup>, 因此该模型适合雷达

BIT 监测点的选取。

### 1 多信号流模型的表示<sup>[4-5]</sup>

#### 1.1 多信号流模型的形式化定义

多信号模型的组成如下:

- 1) 系统构成元件的有限集  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_L\}$ ;
- 2) 系统的独立信号集  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_K\}$ ;
- 3) 可用测试的有限集  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ ;
- 4) 可用测试点(或探针测试点)的有限集

$$TP = \{TP_1, TP_2, \dots, TP_p\};$$

- 5) 测试点  $TP_p$  对应的测试集  $SP = (TP_p)$ ;

- 6) 元(部)件  $c_i$ , 作用信号集  $SC(c_i)$ ;

- 7) 测试  $t_j$  检测信号子集  $ST(t_j)$ 。

从概念上看, 一个多信号相关模型类似于在结构模型上叠加(单信号)相关模型集。因此, 模型与系统的原理图近似。这里的“信号”等同于传递函数中的独立变量, 或者组成系统性能规范的相互区分的属性。因此, 可能的信号数量是一个可数集。只要可能, “信号”之间应当区分明显和相互独立,

收稿日期: 2010-01-15; 修回日期: 2010-03-01

作者简介: 胡文华(1970-), 男, 湖北人, 军械工程学院导航、制导与控制专业博士研究生, 从事武器系统性能检测与故障诊断研究。

确保一个信号存在故障而不影响其他信号。

## 1.2 多信号流模型的节点构成及表示方法

多信号模型方法以有向图的方式表示故障影响传播路径。多型号模型图有4类不同的节点:

1) 模块 (module) 节点。表示一个具有特定功能集 (依据信号划分) 的硬件。模块允许分层建模, 即一个模型图中的模块可以用另一个包含其子模块和其他节点的图加以详细描述。

2) 测试点 (test point) 节点。表示物理的或逻辑的测量操作位置。一个测试点允许有多项测试, 可分类为安全测试、性能测试和诊断测试。

3) 并联 (AND) 节点。表示冗余连接, 应用于容错系统建模中。

4) 转换 (switch) 节点。表示条件连接或因模型调整而内部连接的变动, 应用于动态和反馈系统建模。

与上面的节点相对应, 多信号流程图模型可用一个特定的有向图来表示, 具体的表示方法描述如下:

1) 模块, 用方框表示, 每个节点代表实际系统的一个功能模块;

2) 测试点, 用圆圈表示;

3) 与节点, 用电路中与门的符号表示引入与节点的目的在于有效地表达实际系统中的冗余结构。与节点的特点是: 只有其故障输入数目与总输入数目之比小于给定的  $M:N$  时, 输出才为故障 (假定  $M=N$ , 即输入全部故障, 与节点输出才故障);

4) 开关节点, 用电路中开关的符号表示, 由于实际系统可能具有多种工作模式, 各工作模式的故障传递关系各不相同, 开关节点可有效地表达;

5) 连线, 带单向箭头的连线由  $A$  指向  $B$ , 表示故障由  $A$  向  $B$  传递。

## 2 监测点优化与诊断策略设计

基于多信号流模型的雷达监测点优化与诊断策略设计方法如图1。对于给定的系统, 先熟悉结构和功能, 再进行电路的原理分析, 分析系统各模块之间交联关系, 找出故障传递关系, 在合适位置添加与分配测试, 构建系统的多信号流模型。由多信号流模型可完成反馈回路分析, 生成故障—测试相关矩阵。相关矩阵是一种能反映各故障组元与测试信号之间相关性的模型, 是相关模型的矩阵表示。在建立被测系统多信号相关矩阵之后, 应首先进行简化, 并同时识别未检测故障、冗余测试点和故障

隔离模糊组。当相关矩阵简化以后, 就可以进行状态监测点的优化选择与故障诊断策略的形成。

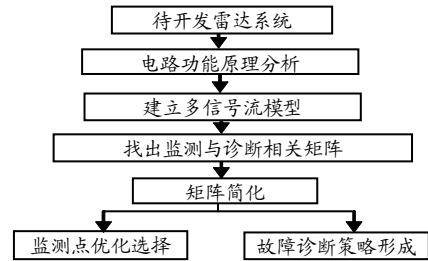


图1 监测点优化与诊断策略设计方法

### 2.1 多信号流模型的建立

对给定的雷达系统, 多信号相关性建模过程为:

1) 分析系统各模块之间交联关系, 画出故障传递关系;

2) 在合适的位置添加测试;

3) 模块与各测试分配信号;

4) 得出相关矩阵。

在一般情况下, 多信号建模在 TEAMS 软件中进行, 系统的结构模型能从 VHDL、EDIF 模型中自动导入生成, 或由图形用户界面构建。

多信号模型的构建具有以下2个特点:

1) 多信号模型的构建可以由简而繁, 逐步完善, 即在开始阶段先根据一些常识性的知识和系统结构组成构建系统的初步模型, 随着对系统认识的深入和应用需求的提出, 通过在已有模型上增加定义信号等逐步完善模型;

2) 多信号模型的构建与测试点的设置无关。

### 2.2 相关矩阵及简化原则

多信号模型的矩阵表示为“组成单元故障类—信号检测”相关性矩阵, 在一个系统中, 可能的故障源有  $m$  个, 同时有着  $n$  个被测信号, 其相关性矩阵  $D$ -matrix 就是一个  $m \times n$  的矩阵,  $d_{ij}$  表示第  $i$  个故障发生时第  $j$  个被测信号应有的输出。当系统有多个故障发生时, 被测试信号的输出为  $D$ -matrix 中相应故障列元素相“或”以后的结果。多信号模型的矩阵如下式<sup>[6]</sup>:

$$D_{m \times n} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix}$$

其中第  $i$  行矩阵为  $F_i = [d_{i1} \ d_{i2} \ \cdots \ d_{in}]$ 。

表示第  $i$  个组成单元 (或部件) 故障在各测试点上的反应信息。它表示了  $F_i$  与各个测试点  $T_j$  ( $j=1,$

2, ..., n) 的相关性。而第 j 列矩阵为:

$$T_j = [d_{1j} \ d_{2j} \ \dots \ d_{mj}]^T$$

表示第 j 个测试点可测得各组成部件的故障信息。它表明了与 T<sub>j</sub> 各组部件 (j=1, 2, ..., m) 的相关性。其中:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当 } T_j \text{ 能测得 } F_i \text{ 故障 (相关)} \\ 0 & \text{当 } T_j \text{ 不能测得 } F_i \text{ 故障 (无关)} \end{cases}$$

在建立被测对象的多信号相关性矩阵之后, 可进行简化, 简化过程为<sup>[6]</sup>:

1) 找出相关矩阵 D 中为 0 的行, 并在 D 中取消该行; 2) 比较相关矩阵 D 中各列, 如果有两列或者两列以上元素相同, 则对应信号互为冗余测试, 只选用其中容易实现或者测试费用少的一个即可, 并去掉为选用的列; 3) 比较相关矩阵 D 各行, 如果有两行或者两行以上元素相等, 则对应的故障类型是不可分的, 可作为一个故障隔离模糊组处理, 并在相关矩阵中合并这些相等的行。

### 2.3 状态监测点的优化选择

雷达 BIT 中状态监测的主要目的是判断被测单元是否存在故障, 因此应选择组成单元故障类多的信号优先进行检测, 从而以最少的测试判定被测单元中是否存在故障。

由上面分析可得简化后的被测单元“组成单元故障类—信号检测”相关矩阵为: D<sub>m×n</sub>, 则第 j 个测试 (信号检测) 的故障检测权值 (提供故障检测用信息的相对度量) WFD<sub>j</sub> 可用下式计算<sup>[7]</sup>:

$$WFD_j = \sum_{i=1}^m d_{ij}$$

计算出各个测试的 WFD 之后, 选用其中 WFD 值最大者为优先故障检测用测试。用其对应的列矩阵 T<sub>j</sub> 把矩阵 D 一分为二, 得到 2 个子矩阵:

$$D_p^0 = [d]_{z \times (n-1)} \quad D_p^1 = [d]_{(m-z) \times (n-1)}$$

式中, D<sub>p</sub><sup>0</sup> 为 T<sub>j</sub> 中等于“0”的元素所对应的行构成的子矩阵; D<sub>p</sub><sup>1</sup> 为 T<sub>j</sub> 中等于“1”的元素所对应的行构成的子矩阵; z 为 T<sub>j</sub> 中等于“0”的元素的个数; p 为选用测试点测试所检测信号的序号。

选出第一个测试后, p=1。如果 D<sub>p</sub><sup>0</sup> 的行数不等于零 (z≠0), 则对 D<sub>p</sub><sup>0</sup> 再计算 WFD 值, 选其中 WFD 值最大者为第二个故障检测用测试, 并再次用其对应的列矩阵分割 D<sub>p</sub><sup>0</sup>。重复上述过程, 直到选用故障检测测试对应的列矩阵中不再有为“0”的元素为止。如果在选择检测用测试的过程中, 出现的 WFD 最大值对应多个测试, 那么可从中选择一个容易实现的测试。

### 2.4 诊断策略设计

故障诊断策略是指故障检测和故障隔离的测试顺序。基于多信号模型的诊断策略是在被测对象多信号模型的基础上, 根据相应的测试优选算法, 以测试优选后的先后顺序来制定的。

诊断策略的制定以测试的优选结果为基础, 首先优选故障检测用测试, 如测试结果正常 (以“0”表示), 继续进行优选故障检测用测试, 如果测试结果不正常 (以“1”表示), 转入故障隔离程序, 优选故障隔离用测试。当已知被测对象存在故障, 则直接优选故障隔离用测试进行故障隔离<sup>[7]</sup>。

### 3 应用实例

以某型雷达 2 km 波门形成电路为例来介绍监测点的优化选择与诊断策略设计。

2 km 波门形成电路如图 2, 2 km 前沿脉冲经输入级后去触发 2 km 方波产生器, 从 JC1A 的 13、4 端分别输出正、负 13.3 μs 的方波, 利用两方波的上升沿分别触发窄脉冲产生器 JC2A、JC2B, 产生时间相差 13.3 μs 的 2 个窄脉冲, 从或门 JC3A 输出 2 km 波门脉冲, 经过电位器 W2 取样后输出。

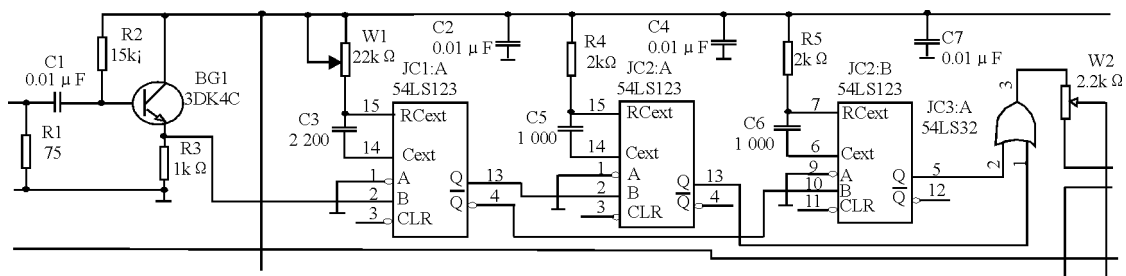


图 2 2km 波门形成电路

根据 2 km 波门形成电路原理及信号流向, 可建立多信号流程图模型如图 3。

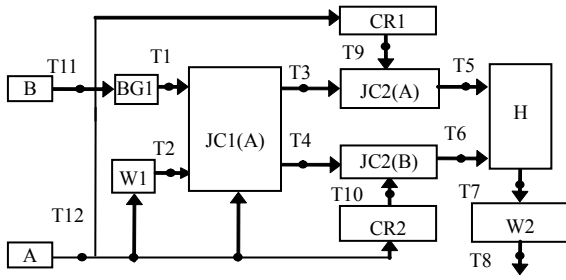


图 3 2 km 波门形成电路多信号流图

从图 3 中得到比较详细的相关信息, 可得到该电路的形式化定义为:

组成单元:  $C = \{A, B, BG1, W1, \dots, H, W2\}$ ;

(A: 5 V 电源; B: 2 km 前沿脉冲); 组成单元故障类集:  $F = \{A(G), A(F), B(G), B(F), \dots, W2(G), W2(F)\}$  (G—一般性故障, F—毁灭性故障); 测试点:  $TP = \{T1, T2, T3, \dots, T12\}$ 。

T1: 测试信号是否与 2 km 前沿脉冲同步; T2: 测试 W1、C2 是否为标准值; T3: 测试信号是否与 2 km 前沿脉冲同步; T4: 测试信号相对 2 km 前沿脉冲是否延时 13.3  $\mu s$ ; T5: 测试信号是否与 2 km 前沿脉冲同步; T6: 测试信号相对 2 km 前沿脉冲是否延时 13.3  $\mu s$ ; T7: 测试是否一信号与 2 km 前沿脉冲同步, 一信号相对 2 km 前沿脉冲延时 13.3  $\mu s$ ; T8: 测试是否一信号与 2 km 前沿脉冲同步, 一信号相对 2 km 前沿脉冲延时 13.3  $\mu s$ ; T9: 测试 R4、C5 是否为标准值;

表 1 2 km 波门形成电路相关矩阵

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
BG1 (G)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BG1 (F)	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
W1 (G)	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
W1 (F)	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
JC1A (G)	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
JC1A (F)	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
JC2A (G)	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
JC2A (F)	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
JC2B (G)	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
JC2B (F)	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
H (G)	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
H (F)	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
C (G)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
C (F)	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
D (G)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
D (F)	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0
A (G)	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
A (F)	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
B (G)	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
B (F)	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
W2 (G)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
W2 (F)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

T10: 测试 R5、C6 是否为标准值; T11: 测试电源输出是否为标准值; T12: 测试 2 km 前沿脉冲是否正常。根据上述定义, 得到该电路的多信号流

图模型的相关矩阵如表 1。

根据其简化原则, 简化后的矩阵如表 2。

表 2 2 km 波门形成电路简化矩阵

	T1	T2	T5	T6	T7	T9	T10	T11	T12
F1 BG1 (F)	1	0	1	1	1	0	0	0	0
F2 W1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
F3 JC1A	0	0	1	1	1	0	0	0	0
F4 JC2A	0	0	1	0	1	0	0	0	0
F5 JC2B	0	0	0	1	1	0	0	0	0
F6 H	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F7 C	0	0	1	0	1	1	0	0	0
F8 D	0	0	0	1	1	0	1	0	0
F9A (G)	0	0	0	1	1	0	0	1	0
F10A (F)	0	0	1	1	1	0	0	1	0
F11 B	0	0	1	1	1	0	0	0	1
F12 W2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

通过对其建立多信号流图模型进行测试性分析可知, 共选用了 9 个测试点, 比初选时节省了 3 个点, 分别为 T1、T2、T5、T6、T7、T9、T10、T11、T12, 基本上达到了优化的目的。

诊断策略的制定以测试的优选结果为基础, 在 2 km 波门形成电路的测试性模型及其优化后的相关矩阵的基础上, 根据测试优选的原则, 可制定诊断策略如图 4。

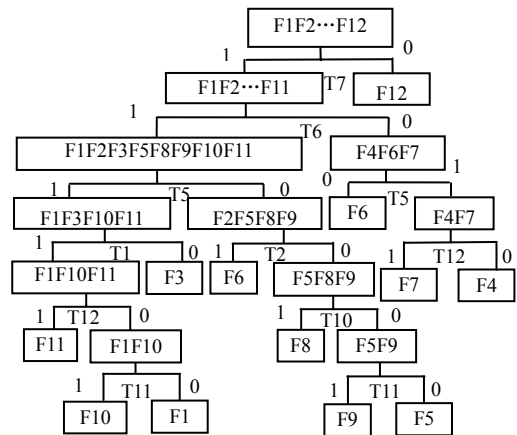


图 4 2 km 波门形成电路诊断策略

#### 4 结束语

该方法以多信号流模型的理论为依据, 针对给定的功能模块(电路), 建立关于测试性的多信号流模型, 求出相关矩阵并进行简化, 从而对状态监测点进行优化选择, 根据测试的优选为原则设计诊断策略。该方法有利于监测诊断系统的实现, 能提高诊断推理的效率, 并已在笔者设计开发的雷达 BIT 状态监测与诊断系统中得到了成功应用。

#### 参考文献:

- [1] 肖小锋, 蔡金燕, 湛叶飞. 基于故障树分析的监测点选取[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(9): 24-26.
- [2] 赵建军, 梁翔宇, 张小枫, 等. 基于多信号模型的武器

装备故障诊断系统设计[J]. 电子测量技术, 2008, 31(11): 103-107.

[3] Somnath Deb, Krishna R, Pattipati et.al. Multi-signal flow graphs: A novel approach for system testability analysis and fault diagnosis[c]. IEEE Auto Test conference 1994: 361-373.

[4] 彭培, 周沫. 基于多信号模型的舰船电子装备测试性分析和评估[J]. 舰船电子工程, 2008, 172(10): 187-120.

[5] 温熙森, 徐永成, 易晓山, 等. 智能机内测试理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[6] 曹志伟, 周晓东, 王成刚, 等. 基于多信号模型的电路板 TPS 开发方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(11): 1533-1535.

[7] 杨智勇, 许化龙, 许爱强. 基于多信号模型的故障诊断策略设计[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(12): 1616-1619.

\*\*\*\*\*  
(上接第 69 页)

通过仿真可以看出, 不论机器人探测半径的大小, 基于滚动预测原理的路径规划方法均能很好地完成路径规划任务。但是不同的探测半径会对规划的路径性能有一定的影响, 具体数据如表 2。

表 2 探测半径对路径的影响

探测半径	路径长度	规划步数
r=2.0	23.824 7	13
r=4.0	24.133 4	7
r=6.0	24.981 1	5

从表 2 中可以看出, 探测半径越小, 规划的路径越短且越优, 但是规划的步数就越多, 系统的计算负荷就越大。随着环境的愈加复杂, 探测半径的大小对规划步数的影响将会越明显。因此, 在滚动路径规划中需要选择合适的探测半径。

### 3 动态未知环境中的机器人路径规划

#### 3.1 问题描述

在 3.1 中所给出的描述与定义的基础上, 假定所给出的工作环境 WS 中, 还存在有限个随机运动的障碍物  $DO_{b1}, DO_{b2} \dots DO_{bN}$ , ( $i=1,2 \dots N$ ), 在路径规划过程中, 机器人不但要躲避静态障碍物, 同时还要防止与运动障碍物相碰撞。

#### 3.2 解决方案阐述

在局部路径规划过程中, 机器人每规划一步之前, 都要先对动态障碍物的下一步运动进行预测, 并及时采取措施避碰。

采用“扩展障碍”法实现机器人避碰, 具体措施如下<sup>[6]</sup>:

机器人每运动一步之前, 首先判断运动障碍物是否进入当前探测区域; 若进入, 则对其下一步的运动范围进行预测, 假设运动障碍物当前位置为  $(x_{do}(t), y_{do}(t))$ , 其半径为  $r_{do}$ , 运动速度为  $v_{do}$ , 那么该运动障碍物在  $\Delta\tau$  时间段内可能达到的区域范围可由下述方程描述:

$$(x - x_{do}(t))^2 + (y - y_{do}(t))^2 = (r_{do} + v_{do} \cdot \Delta\tau)^2 \quad (5)$$

若当前时刻机器人与该区域边界的距离  $\leq 1m$ , 则把该区域看作当前时刻的静态障碍物, 应用第 3 节中的方法进行避障。

#### 3.3 仿真结果

图 6 是一个  $20m \times 20m$  的仿真环境, 根据 3.2 中的算法进行路径规划, 得到如图 6(a)和(b)的仿真结果。

可以看出, 应用滚动窗口法可以很好地完成在动态不确定环境中的路径规划。

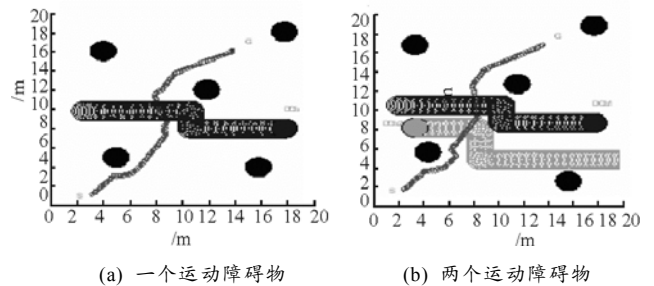


图 6 动态环境中的路径规划仿真

### 4 结论

借鉴预测控制原理, 采用基于滚动窗口的规划方法, 解决了全局环境静态未知以及动态未知环境下的路径规划问题, 通过仿真验证了该方法的有效性。

#### 参考文献:

[1] Leon J L. Automatic path planning for a mobile robot among obstacles of arbitrary shape[J]. IEEE Trans SMC, 1993, 28(3): 467-471.

[2] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

[3] 席裕庚. 动态不确定环境下广义控制问题的预测控制[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(5): 665-670.

[4] 从岩峰. 基于滚动优化原理的路径规划方法研究[D]. 吉林: 吉林大学硕士学位论文, 2007.

[5] 李立, 刘林. 一种多移动机器人局部避碰算法[J]. 兵工自动化, 2002, 28(6): 62-65.

[6] 张纯刚, 席裕庚. 动态未知环境中移动机器人的滚动路径规划[J]. 机器人, 2002, 24(1): 71-75.