

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.03.008

## 基于 Arena 和 Petri 网的雷达系统仿真

方益, 王明哲, 廖晶静

(华中科技大学 控制科学与工程系, 武汉 430074)

**摘要:** 为研究雷达系统的逻辑行为和系统性能, 提出一种基于 Petri 网和 Arena 的综合仿真方法。利用 Petri 网提供的工具, 对系统逻辑行为进行单次仿真, 分析系统的可行性; 运用 Arena 对系统进行多次仿真, 分析系统的性能。结果表明 Petri 网和 Arena 相结合是一种实用的系统建模分析方法, 可以应用于系统逻辑行为分析和性能分析。

**关键词:** Petri 网; Arena; 仿真

**中图分类号:** N945.13; TN956 **文献标志码:** A

## Radar System Simulation Based on Arena and Petri Net

Fang Yi, Wang Mingzhe, Liao Jingjing

(Dept. of Control Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A new method combining Petri nets and Arena to analyze radar system for studying logic behavior and system performances is presented. At first, the tool of Petri nets is utilized to simulate and detect the feasibility of models; then the Arena is utilized to simulate and analyze the performance of the system. The result shows the method is a useful approach for modeling and analyzing systems and can be used to logic behavior analysis and performance analysis.

**Keywords:** Petri nets; Arena; simulation

### 0 引言

Arena 是目前应用比较广泛的离散事件仿真软件, 它提供了强大的数据统计工具和模型优化工具, 可以帮助用户更好地分析模型。利用 Arena 模型的局部和全局仿真可以分析系统的动态及静态性能。仿真完成后, 所有仿真过程中的数据都保存到数据库中, 可以通过 Arena 自带工具绘制单次仿真的图形。同时, 它采用 SIMAN 建模语言, 提供离散事件仿真中所需要的基本组件<sup>[1]</sup>。但 Arena 也有一些不足, 如它的概述性语言停留在模块层次, 不能验证 Arena 模型逻辑行为的正确性<sup>[2]</sup>。

Petri 网正好解决了 Arena 的这个问题。Petri 网是由卡尔·爱得曼·佩特利 (Carl A Petri) 博士在上世纪六十年代初期创建的, 目前已出现几十甚至上百种的变形和扩展。Petri 网采用可视化简单图形和形式化语言来描述离散事件系统的状态变化过程。另外, Petri 网具有较好的数学描述, 便于分析复杂系统的逻辑行为。

笔者提出一种将 Petri 网和 Arena 相结合的仿真方法, 既可利用 Petri 网分析系统的逻辑行为, 又可以利用 Arena 分析系统的性能。

### 1 Petri 网与 Arena 综合仿真方法

Arena 在建模方法上与 Petri 网有所不同, 主要区别如下:

1) Arena 中淡化了库所的概念;

2) Petri 网中的变迁在 Arena 中被具体化为不同的模块, 如: 决定模块 (Decide Block)、分离模块 (Separate Block)、过程模块 (Process Block) 等。

但 Petri 网与 Arena 作为离散事件仿真工具本质上是相同的, Arena 模型与 Petri 网模型可以相互转化, Petri 网模型中的 T 不变量在 Arena 中有对应的表现形式, Petri 网中的进程与 Arena 中的流程是一致的。

1) Petri 网中的 T 不变量在 Arena 中表现为循环结构;

2) Petri 网中的进程与 Arena 中事件流程一致。

综合分析方法主要是利用 Petri 网的结构分析方法分析模型的结构, 利用进程网分析模型的事件进程; 同样, 利用 Arena 强大的仿真统计工具分析系统的性能指标等。综合分析方法的另一个优势是模型的校验, 如: 利用 Petri 网的 T 不变量可以校验 Arena 模型中的循环结构; 利用 Petri 网中的进程网可以分析 Arena 中的事件流程的正确性。对同一

收稿日期: 2010-10-25; 修回日期: 2010-12-15

基金项目: 国家自然科学基金 (60874068)

作者简介: 方益 (1985—), 男, 湖南人, 硕士研究生, 从事复杂系统建模与仿真分析研究。

系统的 Arena 模型及 Petri 网模型，必然存在以下关系：

命题 1：Petri 网模型中的 T 不变量对应于 Arena 模型中的循环结构；

命题 2：Petri 网的进程网必须与 Arena 模型中的事件流程一致。

综合分析方法具体步骤如下：

1) 利用 Petri 网的结构分析方法得到系统的 S 不变量、T 不变量、进程网等；

2) 设定 Arena 模型中的特定仿真条件，验证 Arena 模型的流程是否与 T 不变量和进程网一致；

3) 采用正交试验方法分析系统性能指标及其关键因素等。

## 2 案例及其分析

跟踪制导雷达主要负责目标监视、捕获、跟踪、

识别、火控支持和杀伤评估等功能。按工作的不同阶段可以将跟踪制导雷达分为：搜索、截获、跟踪成像、杀伤评估等。下面分别采用 Petri 网和 Arena 两种不同的建模方式对跟踪制导雷达系统进行建模。

### 2.1 仿真模型

根据其功能描述，跟踪制导雷达系统模型可分为搜索、截获和跟踪成像 3 个模块。

#### 1) 搜索模块模型

跟踪制导雷达的搜索过程为：跟踪制导雷达在控制指挥中心的引导指示下开始搜索目标，在搜索过程中发送搜索脉冲波扫描指示空域，如果搜索到目标则转截获过程，否则就继续搜索目标。在搜索时间内没有搜索到目标则搜索失败。对应的 Arena 和 Petri 网模型分别如图 1、图 2。

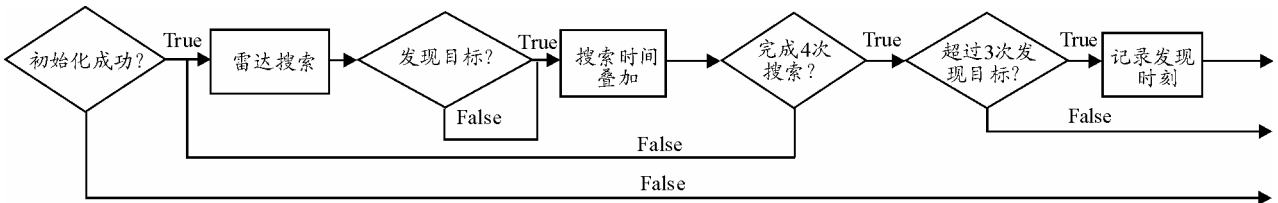


图 1 Arena 模型的搜索模型

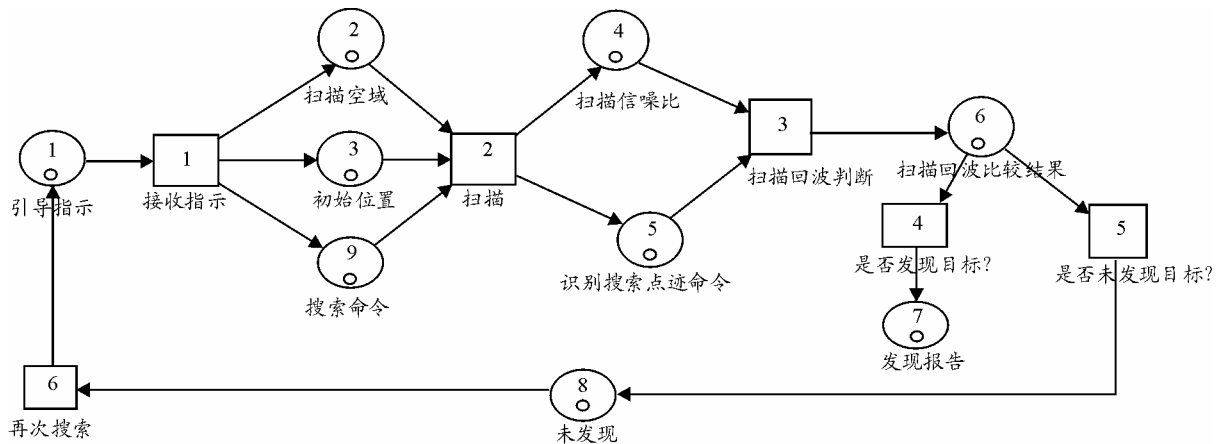


图 2 Petri 网模型的搜索模型

#### 2) 截获模块模型

如果跟踪制导雷达搜索到目标，则应对目标进行截获，以确认目标是否存在。截获目标的工作流程为：跟踪制导雷达通过不断发射截获脉冲和接收回波信号检测目标是否存在，如果目标存在，跟踪制导雷达转跟踪阶段，否则继续搜索目标，当搜索目标超时则停止搜索。对应的 Arena 和 Petri 网模型如图 3、图 4。

#### 3) 跟踪成像模块模型

如果跟踪制导截获到目标，则转跟踪状态。在

跟踪过程中，雷达还要负责对目标成像，识别真假目标。在跟踪过程中，跟踪制导雷达对目标稳定跟踪时间足够长时间才能成像<sup>[3]</sup>，这是由于对回波信号作傅氏变换时，两点可分辨的条件是两点相位差大于等于  $2\pi$  时<sup>[4]</sup>，也即跟踪制导雷达对目标的脉冲累积要求达到一定的精度。根据文献[4]的数据，在来袭弹飞行过程中，转过  $2\pi$  的角度所要求的时间为 25 s 左右<sup>[5]</sup>，具体还看有无姿态调整，在仿真过程中取跟踪时长  $T_i$  为 U(25,35)。根据以上过程得到其 Arena 和 Petri 网模型分别如图 5、图 6。

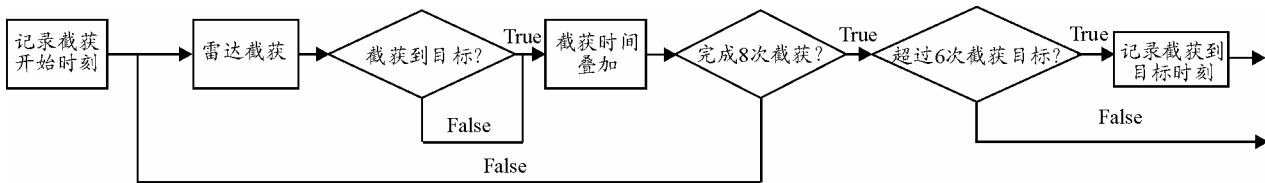


图3 Arena模型的截获模型

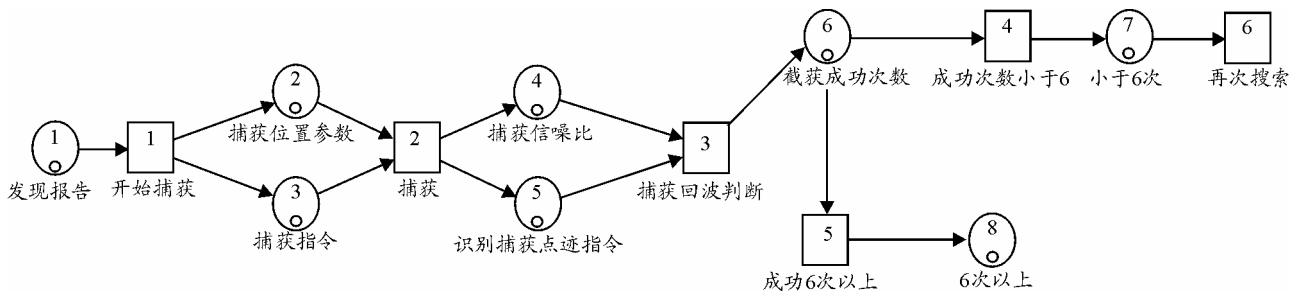


图4 Petri网模型的截获模型

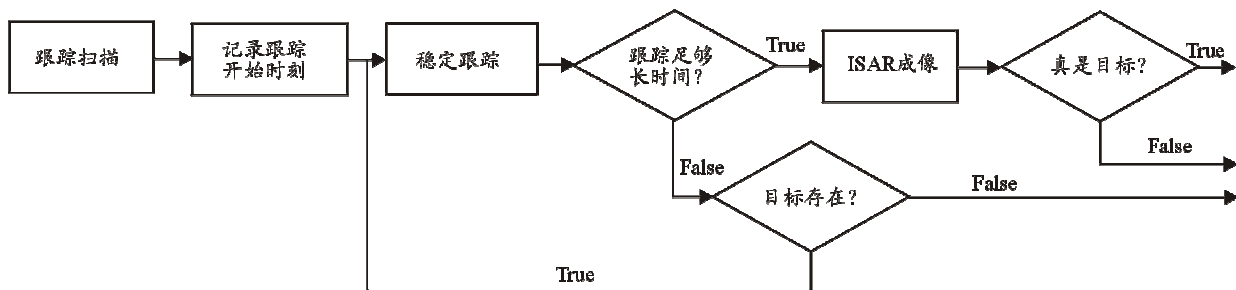


图5 Arena模型的跟踪成像模型

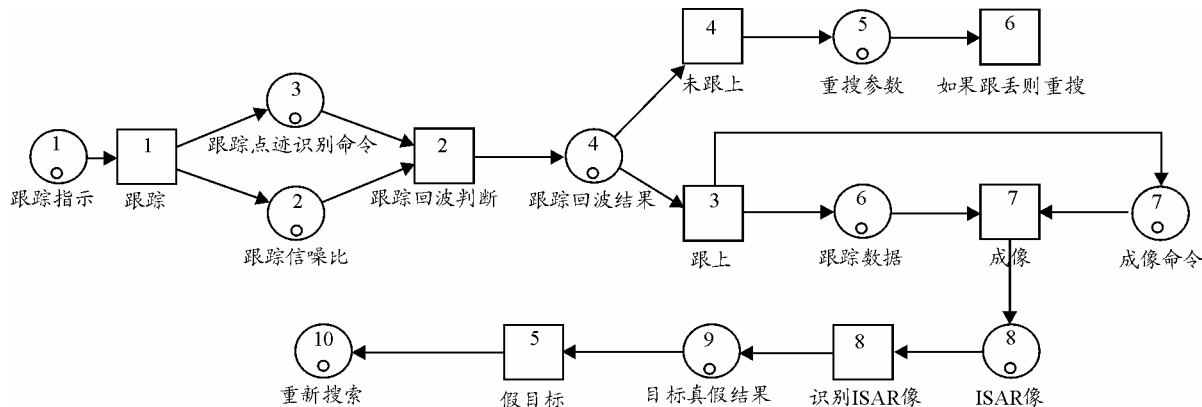


图6 Petri网模型的跟踪成像模型

### 3 仿真分析

#### 3.1 Petri网模型的仿真分析

跟踪制导雷达模型的结构分析主要是对 Petri 网模型的结果分析, 采用第二节中同样的分析方法可以得到系统 S 不变量和 T 不变量, 利用 Petri 网模型的数学描述方法可以得到模型的 S 不变量共有 10 条, 选择最有代表性的一条 S 不变量事件路径如下: 雷达指示→扫描回波→截获识别命令→截获成功次数→跟踪指示→跟踪回波信号→跟踪结果→重

新搜索→X 雷达报告。它表明跟踪制导雷达搜索目标、截获目标、跟踪目标以及重新搜索这条事件流是信息守恒的。

Petri 网的 T 不变量共有 4 条, 选择其中的 3 条事件路径如下:

T1: 扫描→接收回波→没发现? →重新搜索;

T2: 扫描→接收回波→发现? →开始截获→截获判断→成功次数不大于 6→重新搜索;

T3: 扫描→接收回波→发现? →开始截获→截获判断→成功次数大于 6→目标不存在→重新搜

索。

以上 3 条 T 不变量反应了跟踪制导雷达系统工作过程中的循环过程, Petri 网的进程网可以表述模

型工作过程中的事件流程。图 7 列出了跟踪制导雷达系统的进程网, 对存在 T 不变量结构的循环已用相应的 T 不变量代替。

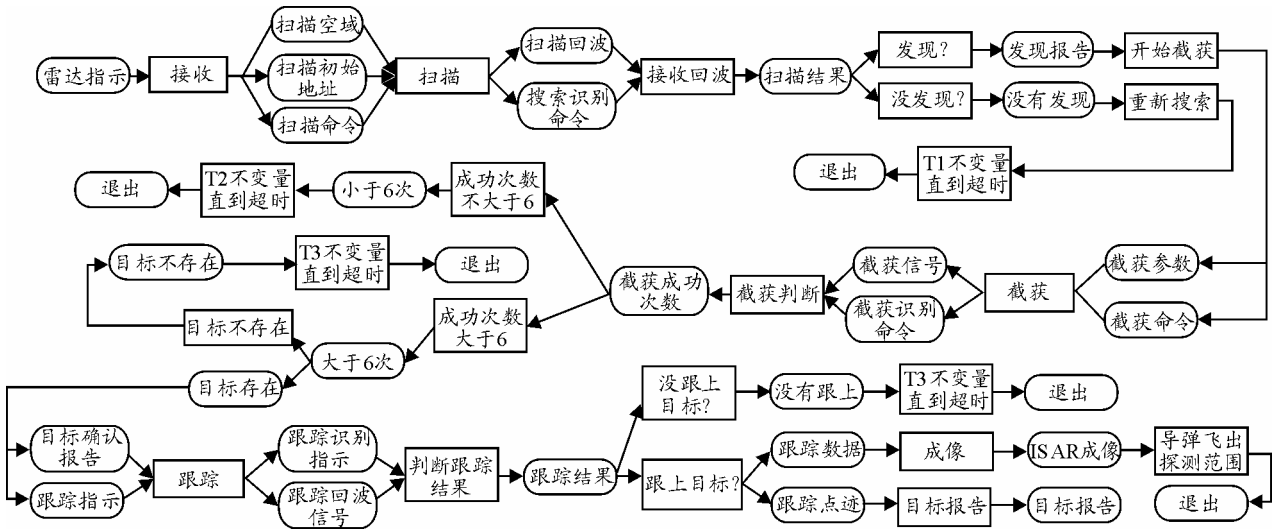


图 7 跟踪制导雷达系统的进程网

### 3.2 Arena 模型的仿真分析

Arena 分析分为校验 Petri 网中的逻辑行为、雷达系统性能分析 2 步。

1) 取跟踪制导雷达各摄动因素如下:

(干扰开始时刻, 持续时间设, 干扰, 管道误差) = (800 s, 100 s, 100 mW, 0.01 km)

仿真 Arena 模型, 得到跟踪制导雷达的工作进程如图 8。从图 8 中可以看出跟踪制导雷达的 Arena 模型进程为: 目标到达→搜索目标→连续 4 次都没有搜到目标→继续搜索→超时退出。它表明跟踪制导雷达系统在没有搜索到目标的情况下重新搜索目

标, 与 Petri 网模型中第一条 T 不变量一致。

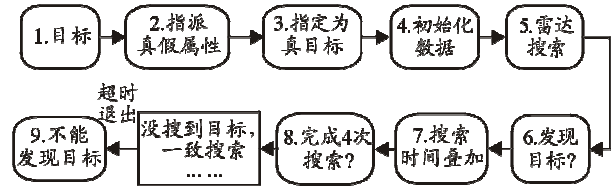


图 8 Arena 模型工作进程 1

2) 取跟踪制导雷达各摄动因素如下:

(干扰开始时刻, 持续时间设, 干扰, 管道误差) = (805 s, 100 s, 2 W, 0.01 km)。

仿真 Arena 模型, 得到跟踪制导雷达的工作进程如图 9。

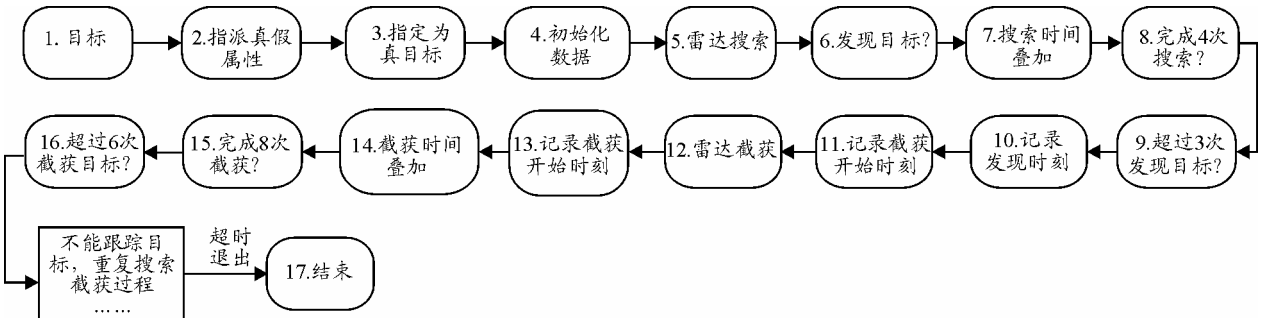


图 9 Arena 模型工作进程 2

从图 9 中可以看出, 跟踪制导雷达的 Arena 模型进程为: 目标到达→搜索目标→搜索到目标→截获目标→截获到目标→跟踪目标→不能稳定跟踪目标→一直重复搜索截获过程→超时退出。它表明跟踪制导雷达系统在没有跟上目标的情况下重新搜索目标, 与 Petri 网模型中第三条 T 不变量一致。

3) 对跟踪制导雷达各摄动因素取为 5 个等级, 采用正交试验方法分析跟踪制导雷达系统性能和关键因素, 得到仿真结果如图 10。

从 10 可以看出, 跟踪制导雷达的各性能指标受干扰施加时刻影响最明显, 当干扰开始时刻等级处于第一等级时 (干扰开始时刻第一等级代表跟踪制

导雷达搜索阶段), 跟踪制导雷达的发现目标概率、确认目标概率等几乎为 0。即干扰开始时刻对跟踪制导雷达系统影响最大, 当干扰施加在跟踪制导雷达系统的搜索阶段, 跟踪制导雷达系统的各项性能指标明显降低。干扰施加越晚, 各性能指标越高。

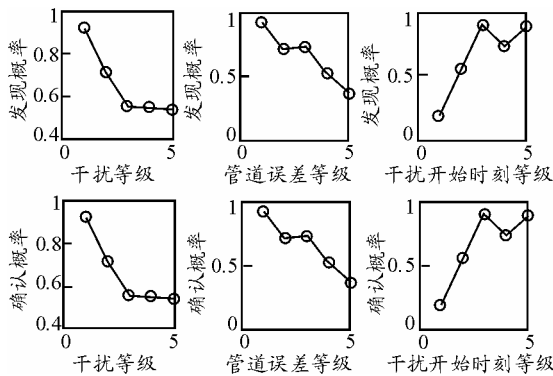


图 10 Arena 模型仿真模型仿真结果图

### 4 结束语

结果表明, Petri 网和 Arena 综合建模法能更好地分析真实系统。同时, Petri 网模型的结构化分析可以对 Arena 模型工作流程进行校验, 使模型与实际系统更加贴近。通过 Petri 网模型 S 变量、T 不变

量、进程网等分析方法可以分析跟踪制导雷达工作流程, 通过设定 Arena 模型中的不同摄动因素, 可以得到在不同想定条件下 Arena 模型的工作流程, 通过 Arena 模型中仿真步骤 1)、2)证实了 Arena 流程与 Petri 网中对应的 T 不变量一致, 证明了 Arena 流程与 Petri 网模型的进程网一致, 从而验证了前述 2 个命题。

### 参考文献:

[1] Shaun P. Hayes. SYSTEMS ARCHITECTURE FOR A TACTICAL NAVAL COMMAND AND CONTROL SYSTEM[D]. CALIFORNIA: NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL, 2009.  
 [2] Carla Bacchus, Ian Barford, David Bedford, et al. Digital Array Radar for Ballistic Missile Defense and Counter-Stealth Systems Analysis and Parameter Trade off Study[D]. CALIFORNIA: NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL, 14 Sep, 2006.  
 [3] 谢代华, 张伟. 弹道导弹中段飞行 ISAR 成像转角条件仿真与分析[J]. 电讯技术, 2009, 49(1): 67-71.  
 [4] 田野, 高建军, 宿富林. 导弹目标逆合成孔径雷达成像的仿真[J]. 计算机仿真. 2006, 23(06): 49-51.  
 [5] 冯德军, 王雪松, 肖顺平, 等. 弹道目标中段雷达成像仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2511-2516.

\*\*\*\*\*

(上接第 7 页)

曲线变化趋于平稳, 即对于各种介质目标侵彻面积对侵彻深度的影响减弱。在确定弹丸侵彻面积后, 通过对应阻力面积点画垂线, 与曲线组相交, 交点即为对应各目标介质的侵彻深度。

### 2.3 时间对侵彻深度的影响

当侵彻时间小于最大侵彻时间时, 随着侵彻时间的增加侵彻深度增大。当侵彻时间大于最大侵彻时间后, 弹丸速度为零, 侵彻深度达到最大深度, 不再变化。其变化趋势如图 4。

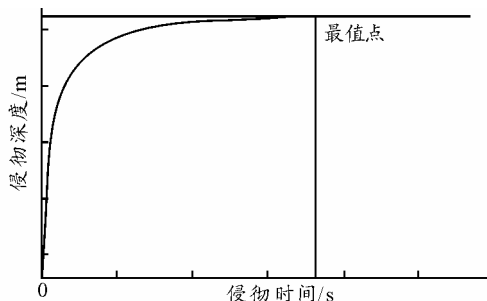


图 4 侵彻深度与侵彻时间的关系图

### 2.4 弹头形状对侵彻深度的影响

弹头形状对侵彻深度的影响可以通过影响因子系数的形式写入侵彻深度表达式中<sup>[5]</sup>。

对于某型弹丸可以通过调整引信起爆时间来控制侵彻时间。当引信作用时间极短时, 弹丸侵彻深度小, 但此时弹丸末速较大, 对破片的飞散影响很大, 相当于沿弹丸运动方向给破片一个初速, 直接影响破片的毁伤效能, 应综合考虑。

### 3 结束语

运用数值分析的方法研究某型弹丸侵彻深度的主要影响因素, 得到了相关影响因素曲线图, 为控制战斗部爆轰位置提供了重要依据, 对弹丸设计也有一定的参考价值。

### 参考文献:

[1] Heuze F E. An Overview of Projectile Penetration into Geologic Materils, with Emphasis on Rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1990, 27(2):151-158.  
 [2] 赵晓利, 王军波. 弹药学[M]. 北京: 解放军出版社, 1998: 12.  
 [3] 王军波, 李彦学, 高敏. 引信系统分析与设计原理[M]. 北京: 解放军出版社, 2001.  
 [4] 李占雄, 等. 引信工程设计手册[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2004.  
 [5] 程兴旺, 王富耻, 李树奎, 等. 不同头部形状长杆弹侵彻过程的数值模拟[J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 930-933.