

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.05.008

## 基于着色 Petri 网的混杂监控系统建模分析

于洪辉<sup>1</sup>, 严振华<sup>1,2</sup>, 王明哲<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学控制科学与工程系, 武汉 430074; 2. 空军雷达学院, 武汉 430019)

**摘要:** 针对现有建模分析方法在混杂系统中系统建模和性能分析中表现的不足, 提出一种基于离散事件监控框架的混杂系统仿真建模分析方法。应用着色 Petri 网技术构建混杂系统离散事件系统模型框架, 内嵌连续系统模型, 利用 Petri 网标识线性约束实现系统动态行为仿真分析和基于局部关联矩阵的 Petri 网监控设计。基于现有的离散事件动态理论的监控分析, 采用离散事件系统 Petri 网监控方法实现混杂系统监控行为分析。并通过导弹拦截系统案例进行验证, 实践结果证明了该混杂建模分析方法的可行性。

**关键词:** 混杂系统; 着色 Petri 网; 监控**中图分类号:** TP277.2 **文献标志码:** A

## Modeling and Analysis of Hybrid Supervisory Systems Based on Colored Petri Net

Yu Honghui<sup>1</sup>, Yan Zhenhua<sup>1,2</sup>, Wang Mingzhe<sup>1</sup>(1. Dept. of Control Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;  
2. Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** Aiming at the disadvantages of current modeling and analysis method for system modeling and performance analysis in hybrid system, a hybrids system simulation and modeling analysis method based on discrete event supervisor framework is put forward. Use colored Petri net technology to establish system model framework of hybrid system discrete event, embed continuous system model in it. Use Petri net identification linear restriction to realize system dynamic action simulation analysis and Petri net monitoring design based on partial conjunction matrix. Based on monitoring analysis of current discrete event dynamic theory, adopt monitoring method of discrete event system Petri net to realize hybrid system monitoring action. Then validate it by missile interception system. The results show that the method is feasible.

**Key words:** hybrid system; colored Petri net; supervisor control

### 0 引言

混杂系统是指由连续系统和离散事件系统相互作用而构成的一类动态系统, 系统中既包括连续变量过程, 又包括离散事件过程, 两者的相互作用使系统表现出更加复杂的动态行为<sup>[1]</sup>。

混杂系统具有广泛的工程应用背景, 其理论基础和应用研究都是当前的研究热点。由于系统中的连续变量和离散事件 2 类动态行为描述是建立在不同的数学基础上, 使得建立面向工程的混杂系统建模和系统性能分析面临极大的挑战。依据工程系统连续和离散事件系统的耦合程度和性能分析侧重点的不同, 大体可分为 2 类建模分析方法: 一类是在离散事件动态系统模型基础上, 提出一些扩充方法, 使之能表示连续动态, 构建混杂系统模型。另一类是在连续变量动态系统模型的基础上, 考虑离散行为, 引入逻辑处理机制, 实现混杂系统建模。文献[2]运用混杂自动机理论建立风力发电机组的模型, 并设计了混杂自动机模型的控制策略。文献[3]讨论

混合逻辑动态系统模型的建模方法, 并分析了该框架下系统的可控性, 稳定性和最优控制。

目前, 大多数研究混杂系统的工作都是把混杂系统看作一个连续系统, 由传统控制理论分析系统动态行为, 例如应用 Lyapunov 函数的方法研究混杂系统稳定性<sup>[4]</sup>。对于事件结构较为复杂的工程系统, 离散事件逻辑架构主控了混杂系统的动态行为, 前面 2 类建模分析方法突显不足, 缺乏深入研究。

着色 Petri 网 (colored Petri net, CPN) 是当前建立混杂系统模型和分析系统性能的有效工具。它结合了数据结构和层次分解, 有效地解决了复杂工程系统模型庞大而无法实际应用的问题<sup>[5]</sup>。因此, 笔者借鉴混杂 Petri 网理论<sup>[6]</sup>, 扩展 CPN 替代变迁的组织属性, 完成连续系统模型内嵌, 构建了混杂系统模型。

### 1 混杂监控仿真建模

混杂系统建模仿真分析的目标是寻找好的控制策略以保证系统满足特定的性能指标。目前的混杂

收稿日期: 2011-12-19; 修回日期: 2012-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(60874068)

作者简介: 于洪辉(1984—), 女, 内蒙古人, 硕士研究生, 从事混杂系统的建模与仿真分析研究。

系统行为分析通常是转化为已知的连续系统或离散系统的分析综合。为了侧重于离散事件对混杂系统的影响, 笔者首先面向离散事件框架, 研究基于离散事件逻辑结构的混杂监控系统形式化描述, 具体的建模分析步骤如图 1 所示。

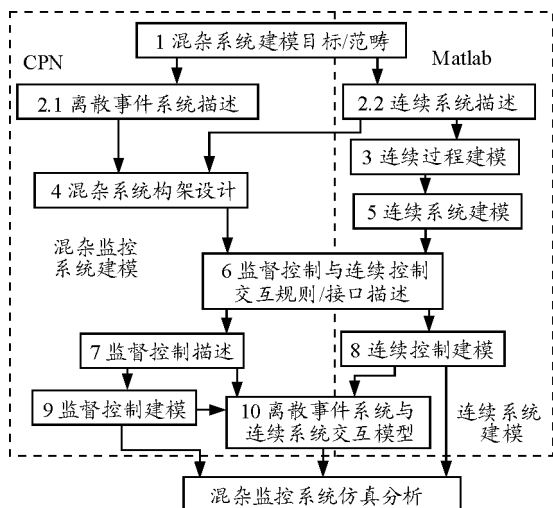


图 1 混杂监控系统建模分析流程

基于系统建模目的和性能要求, 明确混杂监控系统动态行为和离散事件系统与连续系统交互特性要求, 并进一步将混杂交互规则抽象为逻辑事件 CPN 模型; 遵循离散事件监控目标要求, 分析混杂系统的属性, 验证监控行为是否达到要求。应用 CPN 分层技术容易构建混杂监控系统一体化模型框架; 应用 CPN 的元语言 (mate language, ML) 创建逻辑控制规则模型。例如, 基于事件的导弹拦截系统的初制导控制规则 Rule1:

If(拦截弹装订指示. 助推元=有)

then(拦截弹状态反馈报告. 拦截弹所处阶段=三级助推中制导)and(拦截弹状态反馈报告. 拦截弹运动参数=弹目距离), 由 ML 表示为 CPN 模型的弧函数: FirGui1:

if(BINF. BoosterParameter=yes)

then(SFReport. GbiCurrentStep = tbmidcourse guidance)and(SFReport. GbiTrajectoryParameter = Distance)。针对物理资源的禁止状态或控制规范, 可以由 Petri 网中令牌数目表示, 采用线性矢量约束来描述, 使其满足一组不等式约束。如: 控制对象资源有限性取决于相应各库所的令牌数目。每个不等式具有下列形式。

$$\sum_{i=1}^n l_i M(p_i) \leq (\text{或} \geq) b \quad (1)$$

其中:  $n$  为库所数目;  $m$  变迁数目, 假设在该线性

不等式约束中有  $k$  个约束库所  $p_i$ ;  $M(p_i)$  是库所  $p_i$  的令牌数目;  $l_i$  是约束库所标识的加权系数;  $b$  是一个整数常数。

在离散事件框架中内嵌的连续系统通常由参数化连续变量表示, 如赋予时间和概率分布函数; 而传统的动力学系统则由微分方程表示。例如, 简化的拦截弹质心运动学方程由下式表示:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V_m \cos \theta_m \\ \frac{dy}{dt} = V_m \sin \theta_m \\ \frac{dz}{dt} = -V_m \cos \theta_m \psi_m \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $x, y, z$  为当前质心位置, m;  $V_m$  为速度, m/s;  $\theta_m$  是速度在铅垂面上的倾角, rad;  $\psi_m$  为速度在水平面上的倾角, rad。

混杂监控系统的离散事件与连续系统交互通过混杂框架中的端口库所和槽库所中标识来描述, 连续系统则相当于框架中的一个扩展替代变迁, 由端口/槽库所实现与 Matlab 的数据交互。

## 2 实例分析

### 2.1 导弹拦截顶层 CPN 架构模型

笔者以一个简化的导弹拦截系统为例阐述混杂监控系统建模仿真方法。导弹拦截系统是一个多系统集成“系统的系统”, 由拦截弹制导和地基指挥控制构成混杂监督控制系统的主体。拦截弹的位置、速度、轨道和姿态控制过程和指挥、监控、识别、末寻的和碰撞摧毁目标, 需要在一个统一的模型框架中协同完成。

遵循上节阐述的混杂系统建模步骤, 首先选择 CPN 层次建模方式, 抽取拦截系统的关键逻辑事件集合, 实现混杂系统离散事件建模, 并进一步扩展替代变迁的组织属性, 实现连续系统的内嵌。通过 CPN 接口函数与 Matlab 通讯执行与内嵌的连续系统的交互, 即由 Matlab 完成系列运动学和动力学微分方程组的求解, 再通过内嵌接口将阶段性拦截弹状态数据回送给 CPN 框架模型。图 2 是拦截系统顶层框架 CPN 模型。

其中, 库所 bind information 表示拦截弹从指挥中心获得的装订数据; 库所 launch information 表示发射指令, 变迁 bind\_launch 为发射操作, 由此进入库所 boost parameter 状态和库所 midcouguid parameter 状态, 进而执行初制导变迁 (first

guidance), 这是一个扩展的替代变迁。该变迁的行为由在 Matlab 建模的子页模型来决定, 在 Matlab 平台中定义相应的变量接收由输入槽库所 boost parameter 传送来的数据, 计算运动学和动力学方程, 并将拦截弹状态信息发送给输出槽库所 stafeedback report, 当接收到地面指挥中心更新的中制导指示依次进入三级助推中制导段(变迁 third\_boost midcourse guidance)和 EKV 中制导阶段(变迁 EKVmidcourse guidance); 执行末制导变迁(terminal guidance)的条件是目标库所(target)、目标信息库所(target information)和库所(stafeedback report)状态具备, 即拦截弹开启红外导引头, 截获目标, 进入末制导段, 最终以直接撞击方式摧毁来袭导弹。

顶层 CPN 架构模型中的替代变迁 first guidance(初制导)、third\_boost midcourse guidance(三级助推中制导), EKVmidcourse guidance 和 terminal guidance(末制导)都可扩展为 1 个 CPN 子页, 因篇幅关系, 这里以 EKV 末制导的机动过程为例阐述混杂系统的分析方法。

图 3 为拦截弹 EKV 末制导作战阶段的 CPN 模型。拦截弹进入 EKV 末制导段, 拦截弹已经截获来袭目标, 并进一步应用红外导引头提供的目标信息, 识别出威胁的要害部位, 根据拦截弹的状态报告(库所 stafeedback report)提供的运动信息和最终目标信息(库所 final objectinf)解算 EKV 末制导指令(变迁 calculate EKV terminalguid orders), 接下来当接收到 EKV 控制指令(库所 EKV controlorder)后, 拦截弹按指令调整姿、轨发动机, 制导拦截器(变迁 EKV terminalguid divert\_measure), 最后, 通过直接碰撞击毁目标, 通过脱靶量的计算判断是否拦截成功。

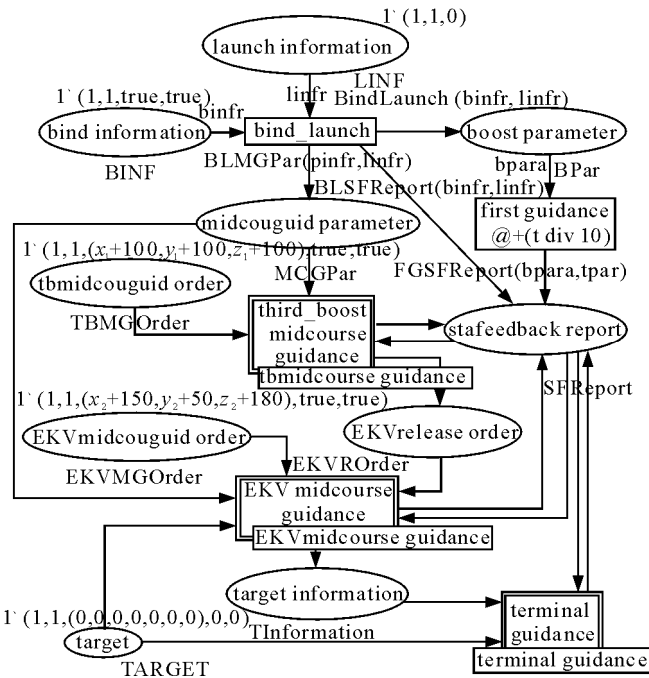


图 2 拦截系统顶层 CPN 模型

### 2.2 导弹拦截混杂监控建模

分析导弹拦截系统的作战要求, 拦截弹在末制导段导引头已锁定所要拦截的确定弹头目标, 当前状态下识别的目标只有一个, 且拦截弹系统在整个飞行过程能按作战需要切换工作状态和将自身信息及时给传送给地面指挥系统。导弹拦截系统基于 CPN 和 Matlab 平台完成建模后, 通过在 CPN Tools 中运行, 发现系统会出现一些状态, 如系统同时触发了三级助推段中制导和 EKV(exoatmospheric kill vehicle)中制导。在这种情况下, 需要制定控制策略, 设计监控系统模型避免这些禁止状态的出现, 使拦截弹系统的所有子模块按序进行, 以获得期望的系统行为轨迹。导弹拦截

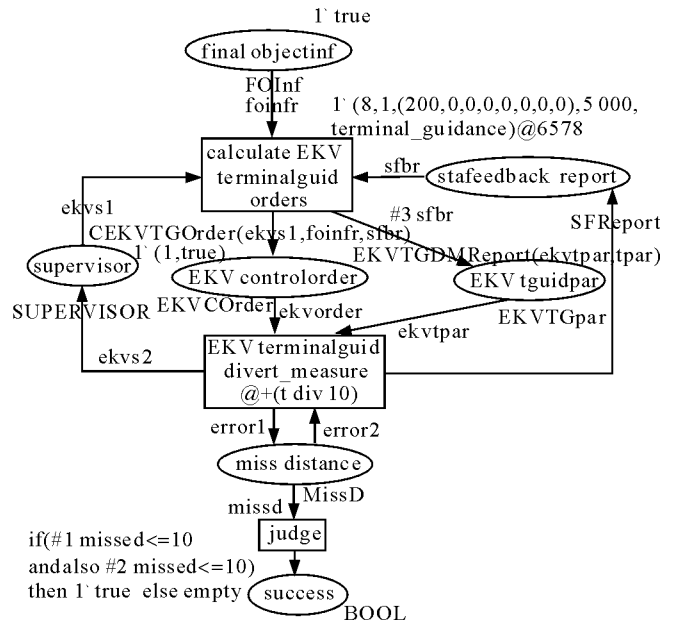


图 3 拦截系统 EKV 末制导过程的 CPN 模型

在拦截弹 EKV 末制导阶段, 依据红外导引头给出的目标信息和惯性测量装置提供的信息, 及时通过姿控发动机和轨控发动机对拦截弹进行制导控制, 在当前时刻, 要求 EKV 的控制指令是唯一确定的控制信息, 这一控制约束可用线性不等式来表示, 如式 (3)。

$$\mu_{cpn-EKVcontrolorder} \leq \lambda_{ekvcorder} \quad (3)$$

在拦截弹 EKV 末制导过程的 CPN 模型中, 变迁 EKV terminalguid divert\_measure 是一个扩展替代变迁, 其输入槽库所将数据发送给 Matlab 中对应

的变量, 将动力学和运动学微分方程计算得到的拦截弹及时的状态数据发送给对应的输出槽库所, 同将该子页在求解方程的时间性质抽取出来, 实现连续性子系统模型的抽象离散化。

由库所 EKV controlorder (设为  $p_1$ ) 和变迁 calculate EKV terminalguid orders (设为  $t_1$ )、变迁 EKV terminalguid divert\_measure (设为  $t_2$ ) 组成一个子网其关联矩阵为:

$$D^{cpn} = p_1 \begin{bmatrix} t_1 & t_2 \\ CEKVTGOrder() & -ekvcorder \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, 颜色集 EKVCOrder= product GbiMidGuideOrder\*EkvCtrlOrder, GbiMidGuideOrder=INT, EkvCtrlOrder=BOOL, ekvcorder 为 EKVCOrder 类型的变量, Distance1 和 Distance2 是常量。函数 fun CEKVTGOrder(a:FOInf,b:SFReport)=if (a=true andalso #1(#3b)>Distance1 then l'(#1b,true) else if(a=false andalso #1(#3b)>Distance1 andalso #1(#3b)<=Distance2) then l'(#1b,true) else if(a=false andalso #1(#3b)>Distance1 andalso #1(#3b)<=Distance2) then l'(#1b,true) else if (#1(#3b)<=Distance1) then l'(#1b,false)

else empty; 用来根据最终目标红外信息及来袭目标和拦截弹的距离大小, 判断是否需要释放 EKV 控制指令。

根据约束不等式, 首先依据文献[8]介绍的 CPN 展开规则, 将该 CPN 模型展开为 OPN 模型, 参考文献[9]应用基于局部关联矩阵的 Petri 网监控方法设计混杂监控系统。上述 CPN 子网对应的 OPN 关联矩阵为:

$$D^{opn} = p_1 \begin{bmatrix} t_1 & t_2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

OPN 子网的初始标识为  $\mu_{opn_0} = [0 \ 0]$ , 将约束不等式 (3) 约束条件转化为如下形式:

$$\begin{cases} \mu_{opn-supervisor1} \leq 1 \\ \mu_{opn-supervisor2} \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中, 根据上述信息, 可以计算系统监控实现。可以得到 2 个控制库所 supervisor<sub>1</sub> 和 supervisor<sub>2</sub>, 其初始标识和关联矩阵分别为:  $\mu_{opn-supervisor1_0} = 1$ ,

$D_{opn-supervisor2} = [-1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1]$ ,  $\mu_{opn-supervisor2_0} = 1$ ,  $D_{opn-supervisor2} = [-1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1]$ , 由监控器的 OPN 关联矩阵和初始标识折叠为 CPN 形式, 可知  $D_{cpn-supervisor} = [-ekvs_1 \ ekvs_2]$ ,  $\mu_{cpn-supervisor_0} = l'(1, true)$ 。

根据上述运算得到拦截系统 EKV 末制导过程 CPN 模型中得控制库所 supervisor, 其关联矩阵为  $D_{cpn-supervisor}$ , 初始标识为  $l'(1, true)$ ,  $ekvs_1$ ,  $ekvs_2$  都是 SUPERVISOR 类型的变量。运行 CPN 模型, 可以发现该监控库所容量的限制, 证明了操作事件监控规则的有效性。

### 2.3 导弹拦截混杂监控系统仿真分析

对混杂监控系统进行仿真分析, 应用可达性分析技术分别验证系统离散轨迹和连续轨迹。

首先, 分析导弹拦截系统 CPN 模型的可达性, 得到系统的出现图, 如图 4 所示。

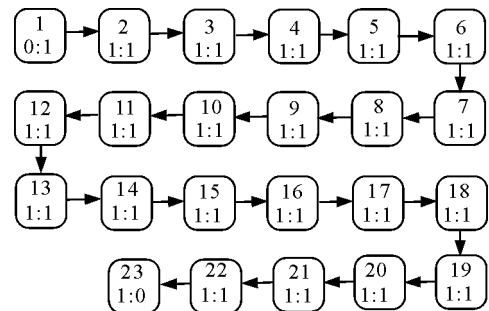


图 4 导弹拦截系统 CPN 模型出现图

图 4 中, 节点表示模型的一个状态, 弧表示一个变迁的绑定, 具体系统模型的标识, 其改变的序列依次为: 初始状态、进入绑定发射过程、进入初制导阶段、中制导阶段开始、三级助推中制导控制、三级助推中制导调整结果、EKV 中制导阶段开始、EKV 释放后更新的信息、EKV 中制导控制、姿轨调整后信息反馈、EKV 进行制导修正、姿轨调整后信息反馈、EKV 红外寻的阶段、探测目标信息反馈、修正变轨控制阶段、变轨机动后信息反馈、目标群捕获过程、跟踪目标群过程、EKV 末制导阶段开始、识别的目标信息反馈、EKV 末制导控制、直接碰撞拦截后信息反馈, 作战任务完成情况信息反馈。通过出现图描述了系统的行为, 验证了混杂系统系统模型是完整的, 没有禁止状态的出现, 可以正常地仿真作战过程。

在上述分析基础上, 确定模型的输入想定, 单步运行 CPN 模型, 可以得到拦截弹实时状态信息, 进而可以绘制拦截弹的飞行轨迹。仿真参数设定如

表 1 所示，仿真的基本条件为：设火箭具有良好的气动稳定性；设大气是平静的；忽略弹体的旋转运动；规定来袭目标的发射时刻为零时刻；弹体控制系统为理想系统，不存在滞后和超调。

表 1 仿真参数设定

| 参数           | 设定值    |
|--------------|--------|
| $t/s$        | 145    |
| $m/kg$       | 14 820 |
| EKV 发射时质量/kg | 120    |
| 燃料是否充足       | 是      |

从图 5 中可以看出，拦截弹可以成功拦截来袭弹，说明该导弹拦截系统的混杂系统模型可以仿真导弹拦截过程，且离散逻辑框架对连续子系统有很好的控制能力，验证了基于 Petri 网的监控理论的混杂监控系统建模方法的有效性。

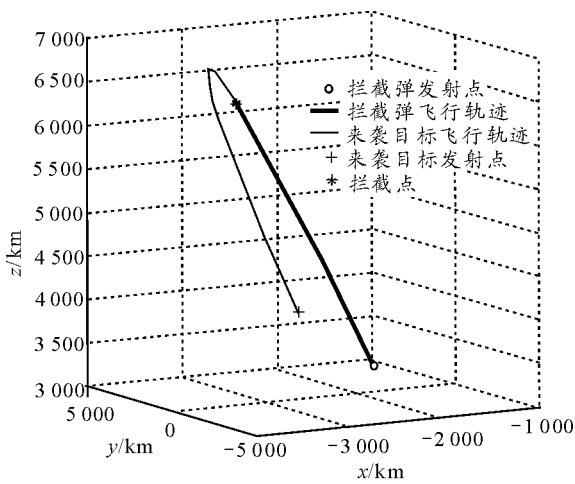


图 5 拦截弹和来袭目标的飞行轨迹

\*\*\*\*\*

(上接第 25 页)

### 3 结语

笔者建立了基于 ADAMS 的协调器虚拟样机模型，并对其进行了动力学分析，得到了平衡机活塞杆的受力，利用该结果对活塞杆进行了动态的压杆稳定校核，验证了该活塞杆符合压杆稳定的条件；同时，运用 ADAMS 的参数化建模和设计功能，分析了小平衡机的位置改变对驱动力矩的影响，确定了位置变化量与最大力矩间的关系，为平衡机的设计制造提供了可靠数据支持，具有一定的指导意义。

### 参考文献：

[1] 张培林, 李国章, 傅建平. 自行火炮火力系统[M]. 北京:

### 3 结语

笔者基于离散框架研究一类事件结构较复杂的混杂系统建模分析方法，并以建立导弹拦截系统混杂仿真模型为例，详细讨论和展示了基于 CPN 模型框架混杂系统行为仿真分析过程。通过实例系统验证分析，进一步说明和证实了该混杂监控建模方法的有效性和可行性，可为大型工程系统仿真分析提供一个切实可行的研究方向。

### 参考文献：

[1] 郑刚, 谭民, 宋永华. 混杂系统的研究进展[J]. 控制与决策, 2004, 19(1): 7-12.  
 [2] 徐大平, 高峰, 吕跃刚. 基于混杂系统的风力发电机组建模与控制[J]. 动力工程, 2009, 29(4): 369-374.  
 [3] 曾锋, 高东杰. 基于混合逻辑动态的混杂系统研究及应用[J]. 控制工程, 2006, 13(1): 60-65.  
 [4] Davrazos G N, Koussoulas N T. A Review of Stability Results for Switched and Hybrid Systems[C]. in Proc. of 9th Mediterranean Conference on Control and Automation. Dubrovnik, Croatia, 2001: 27-29.  
 [5] 吴圣义, 吕永健, 逯国亮, 等. 基于分层着色 Petri 网的飞机战伤抢修系统建模[J]. 兵工自动化, 2007, 26(5): 35-37.  
 [6] Bourjij A, Zasadzinski M, Darouach M, et al. On the use of hybrid Petri nets for control process safety: application to a steam-boilers network simulator[J]. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, 1993, 2: 197-202.  
 [7] 赵铮, 刘德刚, 段炼, 等. 模糊 petri 网在装备维修任务调度中的应用[J]. 四川兵工学报, 2011, 31(8): 16.  
 [8] 宋阿妮, 王明哲, 郭法滨, 等. 着色 Petri 网的结构展开方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 1(5): 125-133.  
 [9] 王寿光. 基于局部关联矩阵的 Petri 网监控器的综合[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2007, 6(3): 263-267.

兵器工业出版社, 2002.  
 [2] 侯保林, 樵军谋, 韩宏潮. 弹丸传输臂机构与控制的综合设计方法[J]. 兵工学报, 2006, 27(5): 788-791.  
 [3] 李伟, 马吉胜, 马杨. 协调器故障仿真及应用研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2009, 9(3): 36-39.  
 [4] 郑建荣. ADAMS - 虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
 [5] 侯保林, 樵军谋, 刘琮敏. 火炮自动装填[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010.  
 [6] 张功学, 侯东生. 材料力学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.  
 [7] 丘世因, 吴海涛, 刘泓滨. 基于 ADAMS 的导杆摇杆滑块冲压机构的优化设计[J]. 新技术新工艺, 2011(5): 42-45.