

doi: 10.7690/bgzdh.2016.03.015

## 联勤保障网络修复过程仿真

李超亚<sup>1</sup>, 曹彪<sup>2</sup>, 张金春<sup>3</sup>, 王帅磊<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院基础实验部, 山东 烟台 264001; 3. 海军航空工程学院基础部, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对现有网络修复的方式都是给予故障节点(边)一定的修复概率, 并没有介绍网络修复的方法及修复过程中评价标准的问题, 提出一种保障网络故障修复的具体方法以及修复过程评价指标方法。通过分析联勤保障网络的实际情况, 结合网络遭受后边毁伤不同结果, 分别建立了量化其修复的评价标准, 描述了保障网络的修复过程, 给出了该过程具体的算法步骤, 并将联勤保障网络抽象成双层立体加权网络模型进行仿真分析。仿真结果表明, 该算法能较好地量化保障网络的修复过程。

**关键词:** 联勤保障网络; 边介数; 修复性; 复杂网络

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A

## Repair Process Simulation of Joint Logistics Network

Li Chaoya<sup>1</sup>, Cao Biao<sup>2</sup>, Zhang Jinchun<sup>3</sup>, Wang Shuailei<sup>1</sup>

(1. *Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001 China;*  
2. *Department of Basic Experiment, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China;*  
3. *Department of Basic Sciences, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China*)

**Abstract:** Because the restoration of existing networks are giving way to the failed node (edge) a certain repair probability without studying the methods and repair process evaluation criteria, a method and evaluation criteria is proposed in this paper. By analyzing the actual situation of the joint logistics network, evaluation of the reparability is built up depending on the different situations which the network's edges are attacked. The restoration process of the network and its algorithm steps are put forward. For better understanding the network from the perspective of restorative properties, the network is abstracted into two-layer weighted network and is analyzed by simulation. Simulation results show that the algorithm can quantify the reparability process very well.

**Keywords:** joint logistics network; betweenness; reparability; complex network

### 0 引言

我军现在推行的联勤体制改革就是使各军种兵、内外部之间数量众多, 种类繁杂的后勤保障资源能够被统一组织、使用和调配, 形成一个规模庞大的联勤保障网络, 使整个保障系统具有网络效应, 能够对整个部队进行高效率配置和使用效果的网络化保障。联勤保障系统的复杂性决定了需要运用复杂网络理论来研究保障网络。

目前, 国内外复杂网络研究的主要方向集中在复杂网络的抗毁性<sup>[1-3]</sup>上, 即复杂网络对破坏的承受能力。研究表明, 网络结构的差异使得在不同的攻击方式下网络的抗毁性有很大不同: 在随机攻击下, 无标度网络比随机网络具有更好的抗毁性; 在重点攻击下, 无标度网络却要比随机网络脆弱得多。改变网络的拓扑结构可以在一定程度上提高网络的抗毁性<sup>[4-6]</sup>, 但随之而来的往往是网络中路径冗

余的增加, 将会进一步导致网络效率的降低。采用修复故障的方法可以在不增加网络冗余的情况下提高网络的抗毁性; 因此, 网络的修复性研究受到越来越多的关注。

国内外对复杂网络的修复性有一定的研究但不多, 池丽平等<sup>[7]</sup>首次提出网络遭到破坏后的修复策略, 并研究了不同网络结构在这种修复策略下拓扑结构的变化; 胡斌等<sup>[8]</sup>针对不同的拓扑结构网络分别给出了与其相对应的最有效修复策略; 崔强等<sup>[9]</sup>针对复杂网络的幂率分布特性提出了一种基于马太效应的复杂网络修复策略; Robert 等<sup>[10]</sup>研究了一种特殊的晶格网络, 发现了使平均修复费用达到最低的最易修复网络(ERNs)的存在, 并分析了其所具有的结构特征。在上述研究中, 网络修复的方式都是简单地给予故障节点(边)一定的修复概率, 并没有介绍网络修复的方法及修复过程中的评价标准; 因此, 笔者结合联勤保障网络的实际情况, 提出保障

收稿日期: 2015-11-23; 修回日期: 2015-12-18

作者简介: 李超亚(1990—), 男, 河南人, 硕士研究生, 从事复杂系统建模与仿真研究。

网络故障修复的具体方法及修复过程评价指标。

### 1 复杂网络的统计描述

复杂网络的统计特征值从不同角度对网络的拓朴性质进行了描述,这些值对了解网络的结构特征,进一步深入研究网络的特性具有十分重要的意义。笔者选择度、平均路径长度、介数这 3 个统计参数进行介绍。

#### 1.1 节点度

节点  $v_i$  的度  $k_i$  定义为与该节点相连的边数。在无向无权网络中,节点度  $k_i$  等于邻接矩阵二次幂  $A^2$  的对角元素  $a_{ii}^{(2)}$ , 即  $k_i = a_{ii}^{(2)}$ 。一般来说,节点的度越大,该节点在某种意义上就显得更加重要。网络中所有节点度的平均值称之为网络的平均度,用  $\langle k \rangle$  表示,且  $\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i$ , 平均度在一定程度上反应了网络的稀疏程度。

#### 1.2 平均路径长度

对无权无向网络而言,网络中任意 2 个节点  $v_i$ 、 $v_j$  之间的最短路径上的边数定义为这 2 点之间的距离,用  $d_{ij}$  表示。对无向有权网络而言,  $d_{ij}$  表示 2 个节点  $v_i$ 、 $v_j$  之间的最短路径上边的权值之和。网络的平均路径长度是网络中任意 2 个节点之间距离的平均值,用  $L$  表示,  $L = \frac{1}{C_N} \sum_{1 \leq i < j \leq N} d_{ij}$ 。

#### 1.3 介数

介数分为点介数和边介数,介数作为一个全局变量,反映了节点(边)在整个网络的作用和影响力。点介数  $B_i$  定义为  $B_i = \sum_{\substack{j < i \\ j \neq i, l \neq i}} [N_{jl}(i) / N_{jl}]$ 。式中:  $N_{jl}$  表示节点  $v_j$ 、 $v_l$  之间的最短路径条数;  $N_{jl}(i)$  表示  $v_j$ 、 $v_l$  之间的最短路径经过节点  $v_i$  的条数。类似地,边的介数  $\tilde{B}_{ij}$  定义为网络中所有最短路径中经过边  $e_{ij}$  的数量比例,公式表示为  $\tilde{B}_{ij} = \sum_{\substack{l < m \\ e_{lm} \neq e_{ij}}} [N_{lm}(e_{ij}) / N_{lm}]$ , 其中:  $N_{lm}$  表示节点  $v_l$  和  $v_m$  之间的最短路径条数,  $N_{lm}(e_{ij})$  表示节点  $v_l$  和  $v_m$  之间的最短路径经过边  $e_{ij}$  的条数。

## 2 攻击与修复策略分析

### 2.1 攻击策略

目前,对于复杂网络的各种攻击策略主要是针对节点而言的,如随机攻击、重点攻击、不完全条件下的选择攻击等等。针对节点的攻击在保障网络的研究中有一定的局限性:保障网络都存在一定数目的源节点,这些源节点的度以及介数往往较大,是攻击的首选目标;但是源节点一旦遭袭,整个网络不再有负载流通,就会失去研究的意义。鉴于此,针对保障网络边毁伤与修复的研究就显得更有价值。与节点的攻击策略相似,笔者主要研究在不考虑级联效应的情况下,网络的边在随机攻击、重点攻击下的静态修复过程。

所谓随机攻击就是指保障网络中的边以相同的概率被随机破坏,或网络中边由于自身原因引起的故障性失效;重点攻击,也称选择性攻击,则是网络中的边按照一定的策略被有顺序地破坏,从攻击方的角度就是有选择性地攻击,例如,在敌我双方对抗模式下,双方往往是优先选择对方重要的军事目标进行毁伤,而不是盲目地随机破坏。

将联勤保障网络抽象成双层立体加权网络模型进行建模分析,如图 1 所示。图 1 中上层网络代表组织网络,用  $G_o = (V, E_o)$  表示,其中,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  是节点集,用来表示保障网络中的各级实体,  $E_o$  是组织网络的边集,  $e_o(i, j) = 1$  表示节点  $v_i$ 、 $v_j$  之间存在直接的保障关系,  $e_o(i, j) = 0$  则表示节点  $v_i$ 、 $v_j$  之间不存在保障关系;下层网络代表路程网络,用  $G_r = (V, E_r)$  表示,  $e_r(i, j) \in [0, \infty)$  用来表示各个节点之间的实际路程距离,就算节点  $v_i$ 、 $v_j$  之间不存在保障关系,其路程距离  $e_r(i, j) \neq 0$ 。遭袭后网络的路程网络不变,组织网络发生变化,组织网络失效边的集合为  $E_o'$ ,与失效边相对应的节点集为  $V'$ 。在复杂网络的研究中,通常用边介数作为网络边的负载流量;因此,组织网络中任一边  $e_r$  上所经过的最短路径条数作为该边上的流量  $u_e$ 。

国防科技大学吴俊等<sup>[11]</sup>将复杂网络攻击信息获取过程抽象成无放回的不等概率抽样问题。类似地,将对于边的随机攻击抽象为无放回等概率的抽样问题,  $E_o$  中的元素以相同的概率移除并放入  $E_o'$  中,直至攻击结束;将对于边的重点攻击抽象为无

放回不等概率的抽样问题， $E_o$ 中的元素按照边的介数高低进行排序，依据边介数由高到低的次序依次移除相应的边，直至攻击结束。特别地，按照攻击后是否重新计算网络中剩余边的介数还可以将重点攻击分为：初始网络边介数攻击和当前网络边介数攻击，由于是计算网络的静态特性；所以在此选择初始网络边介数攻击作为重点攻击策略。

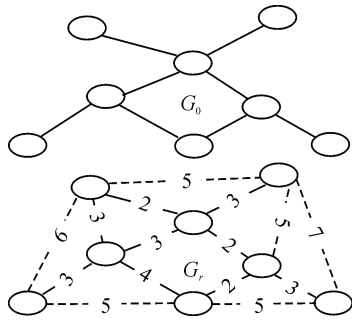


图1 双层立体加权网络模型

### 2.2 修复策略

网络边遭受攻击后根据网络的连通性有无变化分为2种情况：1) 删除某些边，网络仍然保持连通，遭受后网络某些边上的流量发生变化；2) 网络不再连通，出现子图甚至是孤立节点。按照这2种不同情况，采取不同的修复策略，制定不同的修复费用评价指标。

在遭受后，任意边  $e_r(i, j) \in E_o'$  损毁，若组织网络保持连通，找到  $v_i$ 、 $v_j$  之间的最短路径  $d_{ij}$  分担  $e_r(i, j)$  上的流量  $u_{ij}$ ，从而完成此次修复。对于此类修复的费用按照修复后网络中流量变化的大小与流量变化相对应路径长度的乘积计算，具体定义如下。

定义1 边  $e_r(i, j)$  在遭受后网络自身连通性不发生变化，修复费用  $\Delta c_{ij}$  为修复前后网络上负载流量变化的大小与负载变化所对应的路径长度的乘积，公式表示为  $\Delta c_{ij} = \sum_{d_k \in d_{ij}} (u_{ij} \times d_k)$ ，其修复费用占整个网络的修复费用的比率称之为修复耗费比，用  $\eta$  表示，且

$$\eta = \frac{\Delta c_{ij}}{\Delta c} = \frac{\sum_{d_k \in d_{ij}} (u_{ij} \times d_k)}{\sum_{e \in E_o'} \Delta c_e} \quad (1)$$

其中： $u_{ij}$  表示损毁边上的流量； $d_k$  表示分担  $u_{ij}$  的最短路径长度。

遭受后，任意边  $e_r(i, j) \in E_o'$  损毁致使网络整体

不再连通，从路程网络边集  $E_r$  中选取距  $v_i$  的距离最短一点  $v_g$  进行连边，使网络恢复连通性， $u_{ij}$  转移到  $u_{ig}$  上，此时网络的修复费用定义如下。

定义2 边  $e_r(i, j)$  遭受后网络整体连通性丧失，用  $e_r(i, g)$  进行修复时修复费用  $\Delta c_{ij}$  的公式表示为  $\Delta c_{ij} = \sum_{e_q \in d_\phi} (u_{ij} \times d_q)$ ，此次修复其网络修复耗费比  $\eta$  为

$$\eta = \frac{\Delta c_{ij}}{\Delta c} = \frac{\sum_{d_q \in d_\phi} (u_{ij} \times d_q)}{\sum_{e \in E_o'} \Delta c_e} \quad (2)$$

其中： $u_{ij}$  表示损毁边上的流量； $\phi$  表示  $e_r(i, j)$  以及  $e_r(i, g)$  所在的  $v_i$ 、 $v_j$  之间最短路所组成的闭环； $d_\phi$  表示闭环长度。由定义可知：损毁边致使网络断路的情况中修复费用比相同条件下的网络无断路要高，这是因为网络需要重新生成一条边，网络的修复费用会增长的比较多，这符合一般的实际情况。

### 3 算法步骤

对于一个给定的保障网络，上述的修复耗费比这一指标量化了网络在静态条件下的修复费用，下面就来描述网络在基于边介数的重点攻击下其修复过程的算法步骤。

- 1) 根据保障网络的实际情况构建对应的组织网络  $G_o$  以及路程网络  $G_r$ ，计算组织网络中  $E_o$  内各条边的边介数。
- 2) 按照边介数从高到低的顺序依次对边进行毁伤，毁伤后的边  $e_r(i, j)$  移入集合  $E_o'$ ，其对应的节点对移入  $V'$ ，判定攻击是否结束，如果没有结束进行3)；如果结束则计算各次攻击后的修复耗费比，算法结束。
- 3)  $e_r(i, j)$  毁伤后判断组织网络是否连通，如果连通进行4)；如果不连通则跳转到5)。
- 4) 找到节点  $v_i$ 、 $v_j$  之间的最短路，计算出其最短路径长度  $d_{ij}$ 。按照定义1计算出此次攻击的修复费用，此次攻击结束，返回2)。
- 5) 将路程网络  $G_r$  中剩余的完好节点按照距离  $v_i$  从近到远的顺序依次与  $v_i$  连边，判断组织网络的连通性，直到找到一点  $v_g$ ，连接  $e_r(i, g)$  后，网络恢复连通。
- 6) 找到节点  $v_i$ 、 $v_j$  之间的最短路，计算出其最

短路径长度  $d_o$ 。按照定义 2 计算出此次攻击的修复费用，此次攻击结束，返回 2)。

随机攻击过程的算法步骤除了 2)中对  $E_o$  中边随机进行毁伤外其他步骤与上述过程雷同，在此不再赘述。下面就结合具体的联勤保障网络对其修复过程进行仿真分析。

### 4 实例分析

针对上述的算法步骤，结合联勤保障网络进行实例分析。由 50 个节点构成的联勤网络，其组织网络  $G_o$  如图 2，其中保障中心节点 1 个，区域保障中心节点 10 个，部队需求点 34 个，交通枢纽 5 个。

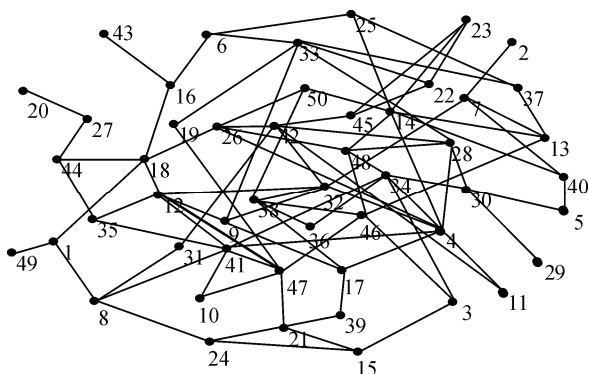


图 2 组织网络的拓扑结构

组织网络  $G_o$  中任意边上的负载流量  $u_e$  为其相应边上经过的最短路的条数，路程网络  $G_r$  为 [1,10] 之间随机整数生成的  $50 \times 50$  邻接矩阵，该网络共有 89 条边，网络的平均路径长度  $L = 4.6067$ ，平均度  $\langle k \rangle = 3.5600$ ，表 1 列举了该网络介数排在前 15 位的边。

表 1 前 15 位的边介数

序号	节点对(边)	介数
1	(30,34)	0.295 5
2	(34,36)	0.250 8
3	(38,46)	0.247 8
4	(36,38)	0.223 9
5	(18,26)	0.204 5
6	(32,38)	0.182 1
7	(7,32)	0.143 3
8	(42,45)	0.141 0
9	(38,50)	0.129 9
10	(16,18)	0.125 4
11	(34,41)	0.116 4
12	(28,30)	0.098 5
13	(41,47)	0.098 5
14	(32,42)	0.094 8
15	(2,7)	0.089 6

对联勤保障网络在分别遭受 50 次的持续随机攻击以及重点攻击后修复耗费比的变化情况进行仿真，其结果如图 3 所示。

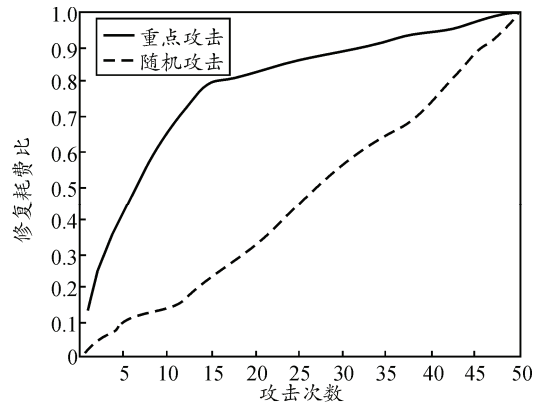


图 3 网络修复耗费比随攻击次数变化曲线

由图 3 可知，2 种攻击方式下，网络的修复费用都随攻击次数的增加而增长。在重点攻击方式下网络修复费用的增长明显呈分段增长趋势，攻击一开始，只用了占总攻击 30% 的攻击次数就使网络修复费用到达总费用的 80% 以上，其后 20% 的修复费用却用了 70% 的攻击次数；在随机攻击下，网络修复费用的增长趋势没有明显的特征。表明网络在重点攻击过程中的前期，修复耗费会急剧上升，也就说明了介数高的边对网络的修复性有重大的影响，是网络的脆弱部分。这一结果符合保障网络中介数高的边其相应承载的流量往往较大，对应网络中的交通要道或者是连接保障中心枢纽的实际情况，一旦它们被破坏，对网络将是致命的打击。该结果表明该算法能准确描述网络的修复过程。

为了进一步验证该算法步骤的有效性，将该网络与同等规模的随机网络进行对比。构建节点数  $N = 50$ ，平均度  $\langle k \rangle = 3.500$  的随机网络。为了方便对比研究，笔者不再考虑保障网络的权重，也即将组织网络边上的距离及流量全部置 1，随机网络做同样处理。按照上述的算法步骤对 2 个网络在重点攻击下的网络修复耗费比进行仿真，其结果如图 4。

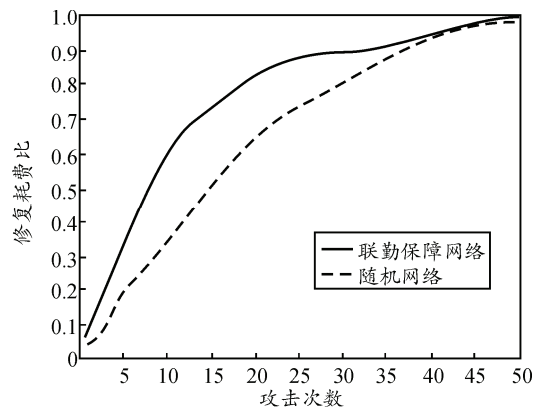


图 4 重点攻击下 2 种网络对比

由图4可知：经过去权值处理的保障网络在重点攻击下的修复性不如随机网络，修复耗费比基本上一直处于较高水平，这也就表明了相比于随机网络无重要边，保障网络中介数较高的边重要性十分突出。保障网络的这一仿真结果进一步验证了上述的算法步骤能准确描述保障网络的修复过程。

## 5 结束语

笔者研究了保障网络静态条件下的修复过程。仿真结果表明：该算法能较好地量化保障网络的修复过程，但对保障网络在动态条件下的修复过程还有待于做进一步研究。

## 参考文献：

- [1] Holme P, Kim B J, Yoon C N, et al. Attack vulnerability of complex networks [J]. *Physical Review E*, 2002, 65(5): 056109.
- [2] Callaway D S, Newman M E J, Strogatz S H, et al. Network robustness and fragility: percolation on random graphs[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(25): 5468-5471.
- [3] Sun S, Liu Z X, Chen Z Q. Error and attack tolerance of evolving networks with local preferential attachment[J].

\*\*\*\*\*

(上接第60页)

笔者将基于模型预测控制的马赫数控制与基于传统PID控制的风洞流场控制进行比较，对PID参数进行了最优整定<sup>[6]</sup>。仿真结果显示：基于人工神经网络模型预测控制策略能够有效地用于风洞流场马赫数实时控制，仿真结果见图2。

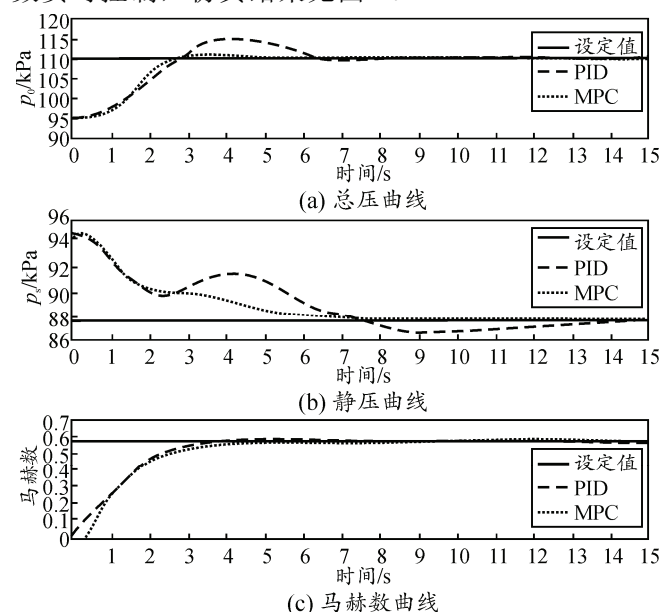


图2 基于PID和基于模型预测控制的风洞流场控制结果比较

- [4] Shargel B, Sayama H, Epstein I R, et al. Optimization of robustness and connectivity in complex networks[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(6): 068701.
- [5] Paul G, Tanizawa T, Havlin S, et al. Optimization of robustness of complex networks[J]. *The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems*, 2004, 38(2): 187-191.
- [6] Wang B, Tang H W, Guo C H, et al. Entropy optimization of scale-free networks robustness to random failures[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006, 363(2): 591-596.
- [7] 池丽平. 遭受复杂网络的修复策略与关联特征研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2006.
- [8] 胡斌, 黎放. 多种攻击策略下无标度网络修复策略[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(1): 86-89.
- [9] 崔强, 谭敏生, 王静. 复杂网络攻击与修复策略[J]. *网络安全技术与应用*, 2010(1): 35-37.
- [10] Farr R S, Harer J L, Fink T M A. Easily Repairable Networks: Reconnecting Nodes after Damage[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 26(9): 138701.
- [11] Wu J, Deng H Z, Tan Y J, et al. Vulnerability of Complex Networks under Intentional Attack with Incomplete Information [J]. *Phys A*, 2007(40): 266-267.

## 4 结论

笔者将基于神经网络模型的预测控制策略应用于2.4 m风洞流场的实时控制，采取了离线建模的方法，降低了计算负荷，提高了控制的实时性。在预测时域和控制时域内，模型的预测值通过数值优化的方法最小化指定的代价函数，并在每一控制周期内生成最优控制信号。仿真结果显示，该控制策略整体性能指标优于传统的基于PID控制。

## 参考文献：

- [1] 周晓刚, 杨海滨, 黄昊宇, 等. 风洞测控系统技术改造[J]. *兵工自动化*, 2012, 31(1): 65-70.
- [2] 许超, 陈治纲, 邵惠鹤. 预测控制技术及应用发展综述[J]. *化工自动化及仪表*, 2002, 29(3): 1-10.
- [3] 盛剑会, 肖冬荣, 郭伟, 等. 模型预测控制(MPC)系统仿真软件开发与实现[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2004, 23(2): 226-229.
- [4] 刘勇, 王德才, 冯正超. 离散事件系统仿真建模与仿真策略[J]. *西南师范大学学报*, 2005, 30(6): 1019-1024.
- [5] 高川, 刘烽, 周波. 某超声速风洞测控系统[J]. *兵工自动化*, 2013, 32(2): 63-66.
- [6] 张伟, 夏洪亚. 某高超声速风洞五自由度机构控制系统研制杨海滨[J]. *四川兵工学报*, 2015, 36(1): 102-105.