

## 防空通信系统性能评价及抗毁性分析\*

程光权, 黄金才, 赵峰, 陈洒然

(国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南长沙 410073)

**摘要:**分析了防空通信系统的组织结构和对抗特点,利用性能评价过程代数描述防空通信系统的状态演化,提出一种防空通信系统抗毁特性分析方法。通过具体案例,对通信系统的组织结构、抗击软硬杀伤的能力进行建模和仿真验证。实验结果表明,该方法适用于防空通信系统的建模与分析,能够实现对抗空通信系统的结构进行对抗过程的建模;通信系统的不同要素对抗毁性能的影响不同,可以采取有效策略以提高防空通信系统的抗毁能力。

**关键词:**防空通信系统;抗毁性;性能评价;过程代数

**中图分类号:**E919 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)05-162-06

## Invulnerability analysis of anti-air communication system

CHENG Guangquan, HUANG Jincan, ZHAO Feng, CHEN Saran

(Key Laboratory of Information System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:**The invulnerability characteristic of communication system is an important element in the study of military combat system. According to the organization structure and countermeasure of anti-air communication system, performance evaluation process algebra (PEPA) was introduced to describe the evolution process of anti-aircraft communication system by the state. PEPA-based invulnerability analysis method of communication system was proposed. A case study was given to testify the organization structure and the capacity against soft destruction or hard destruction of communication system by modeling and simulating. Experimental results show that PEPA is available for anti-aircraft communication systems' modeling and analyzing, which can realize the structural modeling in antagonistic process of anti-air communication system. The different elements of communication system have different influence on the invulnerability. Effective strategies can be taken to enhance the invulnerability of anti-aircraft communication system.

**Key words:** anti-air communication system; invulnerability; performance evaluation; process algebra

随着高新技术在战争中的广泛应用,地面防空火力的反应更加快速、打击更加精准、效果更加突出,这使得地面防空系统成为制空权争夺力量中的重要组成部分。而通信系统作为防空系统运行的基础,由各种通信设备以一定的网络拓扑结构组成,具有快速、准确地传递情报和命令的能力,能够有效辅助防空系统在对抗中占据优势。相对于防空系统的指控系统、火力单元而言,通信系统由于其自身特点,更容易遭受远距离电子压制,或近距离火力打击,成为敌方攻击的重点目标和优先选择,因此对防空通信系统抗毁性能的分析研究就显得极为重要。当前的通信系统抗毁性能分析更多的是基于复杂通信网络,对网络的连通性进行研究。这类方法只能用于分析复杂大系统的通信网络,面对简单小系统的节点通信不太

适用。本文认为,面对简单小系统,通信系统的抗毁性能分析应当更加关注于通信系统节点状态的演化过程,关注于火力毁伤和系统修复综合表现的抗毁能力。

为使防空系统在有效遏制敌飞行器进攻的同时,尽可能减少防空系统遭敌火力打击而能力下降的影响,需要根据双方对抗中的实际情况,科学地制定防空系统的整体构架,有针对性地提出增强防空系统抗毁能力的有效方案。提出了一种基于性能评价过程代数(Performance Evaluation Process Algebra, PEPA)的防空通信系统抗毁性能分析和建模方法,该方法能够描述防空系统能力发挥过程中的有效行为,使用随机进程代数的评价方法,分析并评价防空通信系统抗毁性能的发

\* 收稿日期:2013-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91024006,61201328);教育部博士点基金资助项目(20114307120021);湖南省自然科学基金资助项目(13JJ4011)

作者简介:程光权(1982—),男,安徽舒城人,讲师,博士,E-mail:cgq299@163.com

## 1 PEPA 性能评价方法

PEPA 是一种随机过程代数方法,由爱丁堡大学 Hillston 在 1994 年的博士论文中提出<sup>[1]</sup>,是对经典过程代数(如 Calculus of Communicating Systems, CCS)时间和概率的扩展<sup>[2]</sup>,能够用于分布、并发、动态的系统性能评价。PEPA 方法使用前缀(prefix)、选择(choice)、协作(cooperation)、隐藏(hiding)和常量定义(constant)等操作符,对系统的过程进行详细的描述,进而对系统的性能进行定性和定量的分析<sup>[3]</sup>。其语法定义如下:

$$P \triangleq (a, r). P \mid P + Q \mid P \parallel_L Q \mid P/L \mid C$$

1) 前缀(prefix):  $(a, r). P$

组件  $(a, r). P$  表示该组件执行  $(a, r)$  活动变成组件  $P$ 。

2) 选择(choice):  $P + Q$

组件  $P + Q$  表示了系统将执行组件  $P$  或  $Q$  中的一个,提供了系统运行的不确定机制。

3) 协作(cooperation):  $P \parallel_L Q$

组件  $P \parallel_L Q$  表示了组件  $P$  和  $Q$  将通过协作活动集  $L$  协同运行。

4) 隐藏(hiding):  $P/L$

组件  $P/L$  表示  $P$  将隐藏活动集  $L$  内的活动。隐藏操作符对系统不关心的活动进行了隐藏。

5) 常量(constant):  $P \triangleq C$

方程  $P \triangleq C$  表示将组件  $P$  赋值给常量  $C$ 。

基于 PEPA 模型的分析方法通常有两种:第一种方法基于系统活动的连续、可重复,即可从当前状态通过一系列演进返回当前状态。该方法的使用基于两个前提条件:①可以通过假设,将系统活动构建为连续时间马尔科夫过程(Continuous Time Markov Process, CTMC);②PEPA 模型的过程一定是强连通的,即 CTMC 是遍历的。满足假设条件后,则可对系统模型进行稳定状态分析<sup>[1]</sup>:

$$\pi Q = 0; \sum_i^n \pi_i = 1 \quad (1)$$

其中,稳定状态概率  $\pi$  是一个行向量,  $Q$  为连续时间马尔科夫过程的转移速率矩阵。

Hillston 等针对这类模型的解析进行了大量论证,并先后推出了一系列模型解析工具,如 PEPA Workbench<sup>[3]</sup>、PEPA Eclipse<sup>[4]</sup>等。

第二种方法则基于系统活动的不可逆转,即系统的 PEPA 模型不可能再返回初始状态。由于不能进行稳定状态分析,此时需要通过流近似的方法对系统的状态进行计算<sup>[5-7]</sup>。假设某 PEPA

模型中某个组件  $P$  共有  $n$  个派生,其中  $P_i(t)$  表示  $t$  时刻组件  $P$  的第  $i$  个派生的状态( $1 \leq i \leq n$ )。函数  $\rho_a(P_i, System_t)$  表示系统在  $t$  时刻,组件  $P$  执行活动时,派生  $P_i$  的状态变化的速率。由此,在经过  $\delta_t$  时间后,派生  $P_i$  的状态变化情况:

$$P_i(t + \delta_t) - P_i(t) = - \sum_{P_i \xrightarrow{a} P_j} \rho_a(P_i, System_t) \delta_t + \sum_{P_j \xrightarrow{a} P_i} \rho_a(P_j, System_t) \delta_t \quad (2)$$

式(2)表示了派生  $P_i$  通过活动迁移至其他派生而状态减少的情况,和其他派生通过活动迁移至派生  $P_i$  而状态增加的情况。令  $\delta_t \rightarrow 0$ ,则可得微分方程:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = - \sum_{P_i \xrightarrow{a} P_j} \rho_a(P_i, System_t) + \sum_{P_j \xrightarrow{a} P_i} \rho_a(P_j, System_t) \quad (3)$$

根据系统的初始状态,通过对微分方程组求解,即可得到模型组件的状态演化过程。

PEPA 方法是对系统的过程进行描述和分析的方法:其操作符能够有效构建系统过程中发生的各类状况,其分析方法能够根据相应的模型描述系统状态的演化过程。这些特点使得 PEPA 方法特别适用于本文定义的简单系统通信抗毁性能的分析。

与复杂网络方法构建通信网络,建立不同指标研究通信系统的抗毁性的思路不同,PEPA 方法通过形式化语言对通信系统毁伤、修复等过程进行了详细描述,通过性能评价方法对通信系统各类节点的变化情况进行抗毁性分析,考虑了通信系统要素之间的相互协作,体现了其分布并发的特点;同时,要相对容易地分析出通信系统模型中节点数量变化规律以及抗毁性能的变化趋势,针对系统规模不大,具有定性定量相结合的特点,PEPA 方法更具优势。

## 2 防空系统通信抗毁能力评价

### 2.1 通信网络性能分析

面对一个简单的防空系统,其作战的一般流程为:情报单元不间断侦察空情,以一定概率发现来袭敌机,并将敌情信息通过通信站上报给指挥机构;指挥机构等待情报单元的敌情信息,及时判断敌情、生成作战方案,通过通信站下达指令给导弹阵地;导弹阵地接收指挥机构的作战指令,做好防空导弹发射准备,攻击目标。使用 PEPA 方法分别构建防空系统中各组件模型,如情报单元

(Radar)、通信节点 (SignalStation)、指挥所 (Commander)、导弹阵地 (Missile), 如下所示:

```

Radar = ( radar_search_success, rss ). Radar1 ;
Radar1 = ( information_wait, T ). Radar ;
SignalStation = ( information_wait, siw ).
SignalStation1 + ( order, sow ). SignalStation ;
SignalStation1 = ( information_transfer, T ).
SignalStation ;
Commander = ( information_wait, T ). Commander1 ;
Commander1 = ( information_transfer, cit ).
Commander2 ;
Commander2 = ( estimate, ce ). Commander3 ;
Commander3 = ( order, T ). Commander ;
Missile = ( order, T ). Missile1 ;
Missile1 = ( attack, ma ). Missile ;

```

最后根据防空作战的一般流程, 构建系统组件关系的 PEPA 模型如下:

```

Commander [ i ] < information_wait, information_transfer, order > ( Radar [ r ] < information_wait >
SignalStation [ j ] < order > Missile [ k ] )

```

模型的参数等于相应动作的期望时间除以分钟的数值, 则上述 PEPA 模型的参数取值如表 1 所示。

表 1 模型参数取值  
Tab. 1 Parameter values (次/min)

参数	rss	cit	siw	ce	sow	ma
取值	300	30	600	6	28.57	2.4

为了对防空系统的通信抗毁性能进行分析, 先对防空系统进行一系列假设: 某防空系统接收来自上级的空情信息, 能够同时对 5 个目标进行跟踪、分析, 通过 5 个通信节点, 指控 12 个火力阵地。在整个防空系统通信网络设计中, 可以为每个指挥流程配备专用的通信节点用来通信 (方案 1), 也可以使每个指挥流程使用任意空闲通信节点进行通信 (方案 2)。为了对上述两类通信网络设计方案进行评价, 以该防空系统单位时间有效发射导弹的数量作为评价指标, 以两类方案中通信节点数量为对象, 使用 PEPA-Eclipse 仿真工具, 依次测度系统能力发挥情况, 如图 1 所示。

通过比较, 方案 1 中由于指挥流程关联固定的通信节点, 通信节点失效必然导致相关的指挥流程失效, 直接影响系统的指控能力, 与系统能力发挥的影响呈线性相关; 方案 2 中, 指挥流程可以使用任意空闲通信节点, 少数通信节点的失效并不会使系统能力的大幅度下降, 通信节点之间互

相备份、接替, 极大地提高了系统的通信可靠性。因此, 在实际设计中, 方案 2 是最可靠的设计。

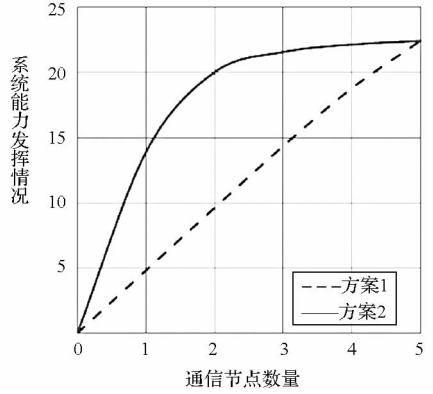


图 1 通信节点数量对系统能力发挥的影响  
Fig. 1 The system capacity against the number of communication nodes

### 2.2 通信抗毁性能分析

在实际作战条件下, 相对于指挥所和导弹阵地, 由于通信的自身特点, 通信链路更容易受到敌方的攻击, 如软杀伤手段: 电子压制、电磁攻击等; 硬杀伤手段: 导弹攻击、地面打击等。由于受到的攻击手段不同, 通信节点的状态将分为 4 类: 良好状态 (L)、受压制状态 (S)、被破坏状态 (P) 和被摧毁状态 (C)。通信节点状态间的转换如图 2 所示: 良好状态下, 通信节点由于受到软杀伤而被压制, 被压制后, 系统能力有所下降, 但可以通过技术手段短时间内可以恢复至良好状态; 通信节点受到硬杀伤会被破坏或摧毁, 被破坏后可以人工修复, 被摧毁则不可修复; 在受到压制或被破坏状态下, 由于系统能力下降, 通信节点受到硬杀伤的概率上升, 系统受到攻击的概率增加。

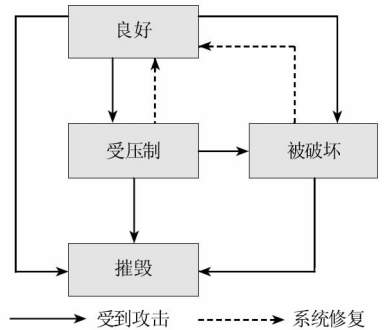


图 2 通信节点状态转换图

Fig. 2 The state transition graph of a communication node

由于通信节点被摧毁后, 无有效手段进行补充, 因此通信网络最终将被完全摧毁, 则系统模型状态不能返回初始状态, 故不能进行稳定状态分析; 且考虑多个节点的情况, 若能进行稳定状态分

析,整个系统的状态空间较大,故而使用 PEPA 的流近似方法对该流程进行分析,模型构建如下:

$$L = (\text{attackLS}, ls).S + (\text{attackLP}, lp).P + (\text{attackLC}, lc).C$$

$$S = (\text{attackSP}, sp).P + (\text{attackSC}, sc).C + (\text{repairS}, sl).L$$

$$P = (\text{attackPC}, pc).C + (\text{repairP}, pl).L$$

利用式(3)可以得到上述 PEPA 模型的常微分方程组:

$$\begin{cases} \frac{dL(t)}{dt} = -(ls + lp + lc) \times L(t) + sl \times S(t) + pl \times P(t) \\ \frac{dS(t)}{dt} = ls \times L(t) - (sp + sc + sl) \times S(t) \\ \frac{dP(t)}{dt} = lp \times L(t) + sp \times S(t) - (pc + pl) \times P(t) \\ \frac{dC(t)}{dt} = lc \times L(t) + sc \times S(t) + pc \times P(t) \end{cases} \quad (4)$$

假定该通信网络由 10 个通信节点组成,整个作战过程将持续 200s。本节将通过 Matlab 软件,利用龙格-库塔法仿真计算,对常微分方程组(4)进行验证。在仿真实验中,部分模型参数取值如表 2 所示。

表 2 模型参数取值  
Tab.2 Parameter values (次/s)

参数	ls	sp	pc	lp	sc	pl	lc	sl
取值 ( $\times 10^{-3}$ )	500	5	2	4	1.67	1.33	1.33	$2 \times 10^3$

由于通信网络受到的攻击分为软杀伤和硬杀伤两大类,本节将分别进行分析。

### 2.2.1 抗软杀伤性能分析

面对敌方的软杀伤手段攻击,我方通信网络应尽可能地隐藏己方通信链路的相关数据,防止敌人探测,同时做好电磁对抗应对准备。在已有预设方案的情况下,假设我方修复受压制通信节点的期望时间为 0.5s,我方通信网络受到敌方软杀伤的期望时间依次为 0.1s、0.5s、2s、10s。在敌方攻击持续的 200s 时间内,良好状态(实线部分)和受压制状态(虚线部分)的通信节点数量变化情况如图 3 所示。

软杀伤攻击一般是在火力对抗的战场之外进行的远距离、大范围的攻击。因此,由于功率的限制,电磁攻击一般集中在某一个频段范围之内,需要捕获对方的通信频段以用于攻击,而另一方可以通过跳频、增大功率等手段来反击,这就使得电磁之间的对抗成为可能。由于捕获通信频段的效

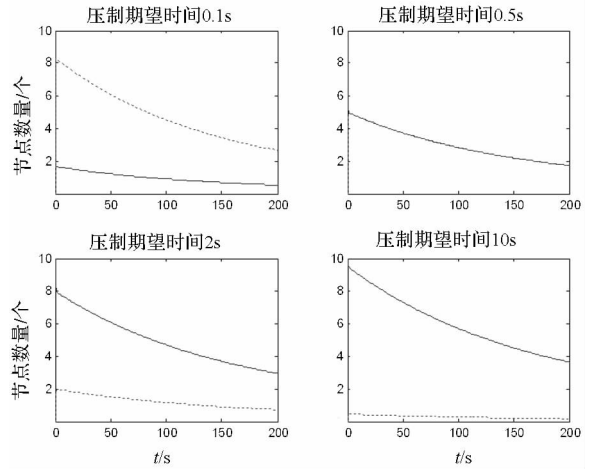


图 3 不同压制情况下,通信节点数量变化  
Fig.3 The number of communication nodes in different suppressions

率不同,敌方相临两次攻击之间的时间间隔也不同。由图 3 可以看出,良好状态节点和受压制状态节点之间的数量比例,刚好与我方修复受压制通信节点的期望时间和敌方两次攻击间隔的期望时间的比例呈反比。

### 2.2.2 抗硬杀伤性能分析

敌方的硬杀伤手段一般为敌远程导弹攻击、空对地导弹攻击或特种作战攻击等。面对上述手段,我方应尽可能地隐藏有线通信线路的相关信息,加强通信站点的空中和地面防卫,加固工事,并做好相应的修复补救准备工作。在敌不同手段攻击的情况下,假设我方修复被破坏通信节点的期望时间为 12.5min,我方通信网络受到敌硬杀伤的期望时间依次为 20s、40s、60s、80s。在敌方攻击持续的 200s 时间内,良好状态(实线部分)、被破坏状态(虚线部分)和被摧毁状态(长划线部分)的通信节点数量变化情况如图 4 所示。从图 4 可以看出,遭受敌硬杀伤的期望时间决定了良好状态通信节点下降的速率,期望时间越长,良好状态节点下降得就越慢,被摧毁的节点相对就越少。

就实际情况而言,敌方软杀伤能力只能瘫痪部分良好通信节点,并不能将其破坏;而敌人的硬杀伤只能分辨遭受硬杀伤破坏后的通信节点,不得不同时打击良好的和被压制的通信节点。而由图 3 可以看到,当敌方硬杀伤能力相同时,良好状态节点初始后的数量虽然随软杀伤能力的不同而迅速下降至不同的量级,但其与 200s 后的幸存数量之间的比例是一致的,约为 2:1;由图 4 可以看到,当敌方软杀伤能力相同时,良好状态节点的数量虽然随硬杀伤能力的不同而下降的速率不同,

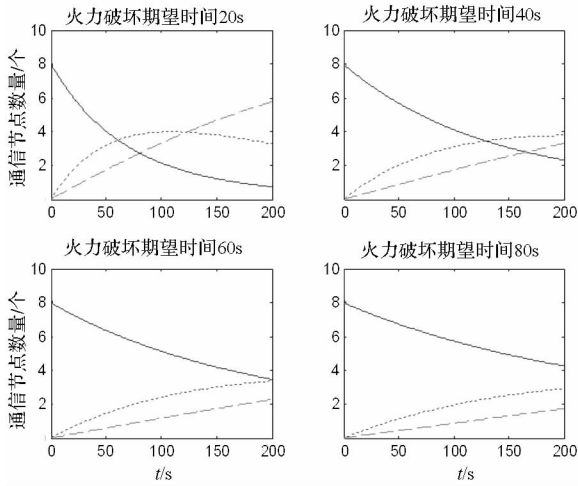


图 4 不同火力打击情况下,通信节点数量变化

Fig. 4 The number of communication nodes in different fires

但其在攻击开始后迅速下降至的量级是相同的,约为 8。因此,综合图 3 和图 4 来看,软杀伤能力决定了攻击开始后几秒钟良好状态通信节点的数量,硬杀伤能力则实际决定了良好状态通信节点数量的下降速率。

### 2.3 通信网络稳定性分析

2.2 节仅仅描述了该防空系统的通信网络遭受一次攻击的测度,而在实际情况中,这种情况一般是不存在的。当多批次攻击依次来临,若无有效的防护和修复手段,通信网络将被摧毁,防空系统将完全瘫痪。而有效的防护和修复手段也仅仅是将系统瘫痪的时间向后推迟,而不能避免,这就使得我们必须有足够的力量重新构建通信链路,以维持系统的稳固,如图 5 所示。

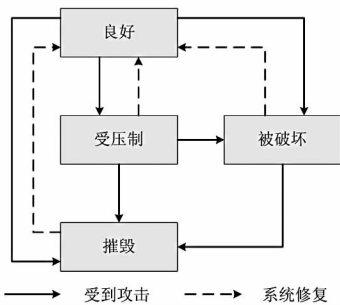


图 5 稳固的通信网络示意图

Fig. 5 The stable communication net

也就是说,系统需要有足够的替代方案,将被摧毁的通信节点替换成良好的通信节点,则该模型构建如下:

$$L = (\text{attackLS}, ls).S + (\text{attackLP}, lp).P + (\text{attackLC}, lc).C$$

$$S = (\text{attackSP}, sp).P + (\text{attackSC}, sc).C +$$

$$(\text{repairS}, sl).L$$

$$P = (\text{attackPC}, pc).C + (\text{repairP}, pl).L$$

$$C = (\text{repairC}, cl).L$$

利用式(3)可以得到上述 PEPA 模型的常微分方程组:

$$\begin{cases} \frac{dL(t)}{dt} = -(ls + lp + lc) \times L(t) + sl \times S(t) + pl \times P(t) + cl \times C(t) \\ \frac{dS(t)}{dt} = ls \times L(t) - (sp + sc + sl) \times S(t) \\ \frac{dP(t)}{dt} = lp \times L(t) + sp \times S(t) - (pc + pl) \times P(t) \\ \frac{dC(t)}{dt} = lc \times L(t) + sc \times S(t) + pc \times P(t) - cl \times C(t) \end{cases} \quad (5)$$

假设替换被摧毁通信节点的期望时间为 30min,其余参数使用表 2 中数据,使用 Matlab 对常微分方程组 5 进行仿真,结果如图 6 所示。可以看到,各类通信节点的数量在 1700s 处呈现了稳定态势,保持在一个固定的比例上。

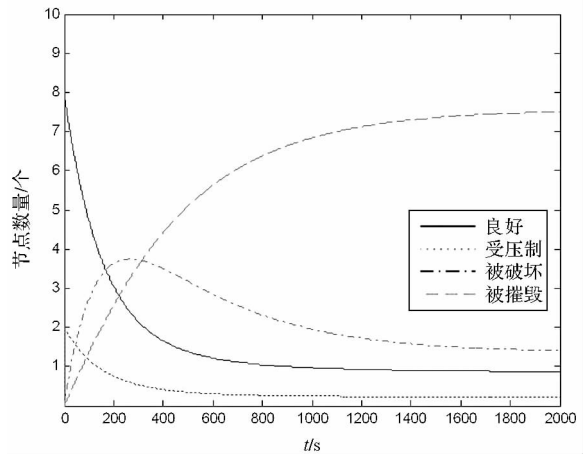


图 6 通信节点状态演化趋势

Fig. 6 Evolutionary trend of communication nodes

替换被摧毁通信节点的速率不同,对系统的影响也是不同的。以达到稳定状态后的良好状态通信节点数量为评价标准,替换被摧毁通信节点的不同速率对系统的影响如图 7 所示。

由图 7 可以看出,系统的替换速率对良好通信节点数量的影响在初期增长得最快,随后增长速度减慢,出现了增长的极限。也就是说,在敌方软硬攻击手段的作用下,系统对被摧毁节点的修复是有界限的,也就没有了追求系统性能最大的必要。而由图 1 可知,在通信网络方案 2 中,当通信节点不少于 2 个时,系统能力并没有大幅度地下降。由图 7 可以得出,为保证系统能力的发挥

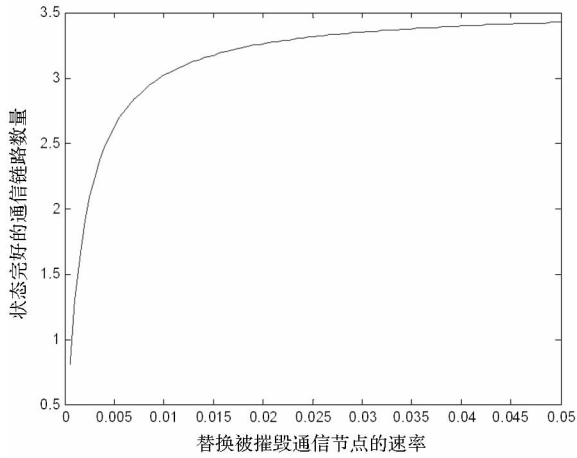


图7 替换速率对良好通信节点数量的影响

Fig. 7 The influence of replacement rates to communication nodes

不受通信的影响,假定通信网络中良好通信节点的数量不少于2个(3个)时,系统能力才不会大幅度下降,而相对应的系统替换速率分别为0.002 25(0.009 595)。也就是说,只有每一次替换被摧毁节点的时间间隔的期望不小于7.41min(1.74min),通信网络进入稳定状态后,良好的通信节点的数量才不会少于2个(3个)。这个结论将有利于维持当前系统能力的最大发挥。

### 3 结论

防空通信系统的抗毁性能研究,是一项复杂的工程,涉及的内容较多。本文研究了防空系统通信网络的组织结构,以及火力对抗中的特点,并针对上述问题采用随机过程代数 PEPA 方法进行

了分析,在此基础上,以简化的方式,针对防空通信系统的组织结构、火力抗击中面临的不同情况等内容,先后建模并进行了仿真计算。仿真实验结果清晰、内容明确,展示了系统不同要素之间的关系,并据此提出了有效的防护策略,有利于增强防空通信系统的抗毁性能。

### 参考文献(References)

- [1] Hillston J. A compositional approach to performance modeling[D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 1996.
- [2] Baeten J C M. A brief history of process algebra [J]. Theoretical Computer Science, 2005, 335(2-3): 131-146.
- [3] Gilmore S, Hillston J. The PEPA workbench: a tool to support a process algebra-based approach to performance modeling[C]. Computer Performance Evaluation Modelling Techniques and Tools Lecture Notes in Computer Science, 1994, 794: 353-368.
- [4] Tribastone M. The PEPA Plug-in Project[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Quantitative Evaluation of Systems, 2007, 53-54.
- [5] Galpin V. Continuous approximation of PEPA models and Petri Nets[J]. International Journal of Computer Aided Engineering and Technology, 2010, 2(4): 324-339.
- [6] 严博,吴晓平,廖巍,等.基于随机进程代数的P2P网络蠕虫对抗传播特性分析[J].电子学报,2012, 40(2): 293-299.  
YAN Bo, WU Xiaoping, LIAO Wei, et al. Propagation characteristic analysis of worm-anti-worm in P2P network based on stochastic process algebra [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(2): 293-299. (in Chinese)
- [7] 李登峰,许腾.海军作战运筹分析及应用[M].北京:国防工业出版社,2007.  
LI Dengfeng, XU Teng. Naval operational research analysis and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)