

7-30-2020

## Optimization Model of CIS Network Architecture Based on Information Flow

Jianhua Li

*School of Information and Navigation Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;*

Junwei Zhao

*School of Information and Navigation Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Optimization Model of CIS Network Architecture Based on Information Flow

### Abstract

**Abstract:** In order to explore the internal relationship between Command Information System (CIS) network and combat system, a *layered combat system model* was built, including organizational relationship layer, information interaction layer and communication link layer. Conception of the *system coupling intensity* was defined, which reflected the influence of network architecture to combat system. An *optimization model of CIS network architecture* aimed at maximizing the ratio of system coupling intensity to cost coefficient was built. A *route programming genetic algorithm* was designed and applied into simulation of Air Offensive Campaign (AOC) system network. The results show that the model and algorithm can optimize network architecture well.

### Keywords

CIS, network architecture, system coupling intensity, genetic algorithm

### Recommended Citation

Li Jianhua, Zhao Junwei. Optimization Model of CIS Network Architecture Based on Information Flow[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(12): 3076-3081.

# 基于信息流的指挥信息系统网络结构优化模型

李建华, 赵军伟

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

**摘要:** 为了探索指挥信息系统(CIS, Command Information System)网络与作战体系的内在关系, 构建了由组织关系层、信息交互层和通信链路层组成的作战体系分层模型。定义了反映网络结构对作战体系影响的体系耦合强度概念, 以体系耦合强度与成本系数比值最大化为目标, 建立了网络结构优化模型。设计了一种路径规划遗传算法, 针对空中进攻作战(AOC, Air Offensive Campaign)系统网络进行了仿真。仿真结果表明, 模型和算法可对网络结构进行优化。

**关键词:** 指挥信息系统; 网络结构; 体系耦合强度; 遗传算法

中图分类号: TP391.9      文献标识码: A      文章编号: 1004-731X (2015) 12-3076-06

## Optimization Model of CIS Network Architecture Based on Information Flow

Li Jianhua, Zhao Junwei

(School of Information and Navigation Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to explore the internal relationship between Command Information System (CIS) network and combat system, a layered combat system model was built, including organizational relationship layer, information interaction layer and communication link layer. Conception of the system coupling intensity was defined, which reflected the influence of network architecture to combat system. An optimization model of CIS network architecture aimed at maximizing the ratio of system coupling intensity to cost coefficient was built. A route programming genetic algorithm was designed and applied into simulation of Air Offensive Campaign (AOC) system network. The results show that the model and algorithm can optimize network architecture well.

**Key words:** CIS; network architecture; system coupling intensity; genetic algorithm

## 引言

指挥信息系统(CIS, Command Information System)网络将作战单元连接一体, 形成按照特定机理运行的作战体系, 系统网络结构则影响着作战体系效能的发挥。组织权变理论认为, 只有当组织关系与任务环境相匹配时才能发挥最佳运作效果,

系统网络结构必须具备适应组织关系变化的优化能力才能为作战体系提供最佳的支撑。在 CIS 的作战运用中, 立足具体任务的组织关系结构构建体系耦合能力强, 资源消耗较低的网络是提高系统作战运用效能的关键。

目前, 国内外关于 CIS 网络结构的研究大致分为两类: 一是将 CIS 网络抽象为节点与边的集合, 从图的抗毁性、可靠性、涌现性等统计特性出发, 建立模型, 对网络结构实施优化<sup>[1-4]</sup>, 但对网络的通信特性描述不足; 二是利用体系结构框架技术构建 CIS 体系结构的多种视图产品, 描述系统接口的通信细节, 从网络设计的角度对网络结构实施



收稿日期: 2014-07-24      修回日期: 2015-04-08;  
基金项目: 全军军事学研究生课题(2010JY0813-022);  
作者简介: 李建华(1965-), 男, 陕西白水, 博士, 教授, 博导, 研究方向为空天信息系统建设与运用; 赵军伟(1986-), 男, 陕西咸阳, 硕士, 研究方向为空军信息系统建设与运用。

<http://www.china-simulation.com>

• 3076 •

优化<sup>[5-7]</sup>, 但优化的精度不高。

本文将认知域的组织关系投影为信息域的信息流, 将物理域通信链路的排队和路由等基本特性转化为信息流的时延和带宽等约束, 以网络的效费比最大化为目标, 建立优化模型, 设计路径规划遗传算法寻找最优网络结构, 对指导指挥信息系统网络组织构建和探索系统网络结构与作战体系的内在关系具有一定意义。

## 1 作战体系分层网络模型

在图论中, 网络  $G$  由节点集  $V$  和边集  $A$  构成, 将各作战单元抽象成为指控、情报、火力、保障 4 类功能节点, 以认知域的组织关系  $R$  为边形成组织关系网络  $G_R$ ; 以信息域的信息流  $F$  为边形成信息交互网络  $G_F$ ; 以物理域的通信链路  $C$  为边形成通信网络  $G_C$ 。作战体系可视为由  $G_R$ ,  $G_F$  和  $G_C$  构成的 3 层网络整体视图。

### 1.1 组织关系网络

体系作战获取对抗优势主要依靠高效灵活的组织关系来组合有限的作战单元、物理资源和信息资源, 以及敏捷地作战单元之间的协作、资源配置部署和组织运行策略。各节点之间的组织关系可分为指控关系  $r^1$ 、情报关系  $r^2$  和协同关系  $r^3$ , 令  $R = \{r^1, r^2, r^3\}$ , 则作战体系的组织关系网络可表示为  $G_R = (V, R)$ 。

### 1.2 信息交互网络

在信息交互层, 以信息流承载组织关系, 组织关系层中作战节点之间的  $r^1$ ,  $r^2$  和  $r^3$  分别投影为指控信息流  $f^1$ 、情报信息流  $f^2$  和协同信息流  $f^3$ , 不同类型的信息流对应着相关功能业务的需求信息, 支撑组织关系产生影响, 保证系统节点之间协调一致工作。节点  $V_i$  和  $V_j$  之间的  $k$  类信息流  $f_{ij}^k$  定义为:

$$f_{ij}^k = L(r_{ij}^k) = r_{ij}^k \cdot \alpha_k \cdot \theta \quad (1)$$

其中  $r_{ij}^k=1$  表示为节点  $V_i$ ,  $V_j$  之间存在  $k$  类组织关系, 否则为 0;  $\alpha_k$  为信息流比重系数,  $\theta$  为信

息量系数, 则  $V_i$  和  $V_j$  之间的信息流为  $f_{ij} = \sum_{k=1}^3 f_{ij}^k$ 。

近期研究认为互联网中局域网的信息流量服从自相似分布, 主干网信息流量服从泊松分布<sup>[8]</sup>, 为简化问题, 在此认为网络链路间流量均服从泊松分布, 节点之间各类不同类型的信息流在统计上是相互独立的, 则两个节点之间信息流服从均值  $\lambda = f_{ij}$  的泊松分布, 令  $F = \{f_{ij}=1 | i, j \leq N\}$ ,  $N$  为节点总数, 则作战体系的信息交互网络可表示为  $G_F = (V, F)$ 。

### 1.3 通信链路网络

在通信网络层, 节点间的信息流转化成各类电、磁、光等物理信号在网上传输, 受到战场复杂情况外部因素, 以及通信网络拓扑结构、链路带宽等内部因素的影响制约。节点  $V_i$  和  $V_j$  间的通信链路  $c_{ij}$  不仅能够传输直连节点间的信息流, 还可能为其他节点间的信息流提供迂回路由。综合考虑信息在网路上的路由排队转发与链路的带宽限制传输特点, 将每条通信链路路由节点视为一个排队系统, 则节点间的通信链路视为以容量  $cl_{ij}$  为平均处理速度的服务器, 信息流为业务流, 服务时间服从泊松分布的单窗口先来先服务, 延时拒绝服务的  $M/M/1$  排队系统(图 1), 则平均服务率为  $\mu_{ij} = cl_{ij} / \bar{d}$ ,  $\bar{d}$  为平均分组长度。

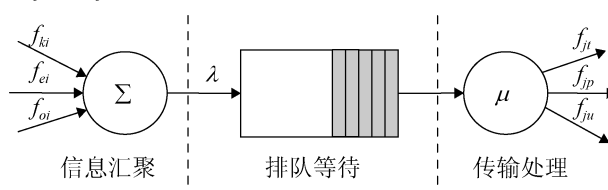


图 1 通信链路的排队特征

只考虑信息流在链路排队系统中主要存在排队延时和传输延时, 根据排队理论可知,  $M/M/1$  排队系统的平均时延为:

$$t = \frac{\rho}{\lambda(1-\rho)} \quad (2)$$

平均服务时间为  $\mu^{-1}$ , 平均拒绝服务的概率为  $P(P > q) = \rho^{q+1}$ , 其中  $\rho = \lambda / \mu$ ,  $q$  为队列最大长度, 则链路  $c_{ij}$  在一定丢包概率下的延时为  $t_{ij}$ , 信息

流  $f_{ab}$  在路径  $ro_{ab}$  上的总延时为:

$$T_{ab} = \sum_{c_{ij} \in ro_{ab}} t_{ij} \cdot c_{ij} \quad (3)$$

$ro_{ab}$  是  $V_a$  到  $V_b$  由通信链路组成的路径。通信网络层由通信节点、用户节点和通信链路构成, 通信节点提供通信链路按照特定的拓扑结构将各类系统用户节点联通, 形成通信网络可表示为  $G_C=(V, C)$ 。

## 2 网络结构优化模型

**定义 1** 链路成本系数: 一般链路的成本与其通信类型有很大关系, 无线单跳通信距离固定, 只与信道容量成正比, 有线的链路成本与链路长度和信道容量成正比, 因此设通信链路的成本系数(cc, cost coefficient)为:

$$cc = \frac{K \cdot LE^g \cdot cl}{ce} \quad (4)$$

其中  $K$  是通信链路类型系数(卫星、短波、光纤等),  $LE$  是链路长度,  $g$  是通信手段系数(无线  $g=0$ , 有线  $g=1$ ),  $cl$  是链路容量,  $ce$  是成本归一化标量, 则网络的总体成本系数为:

$$CC = \sum_{i,j=1}^N cc_{ij} \quad (5)$$

**定义 2** 关系强度: 由于信息流受到通信网络结构的整形作用, 对信息传输造成延时、丢失等不良的影响, 从而在组织关系层, 将降低组织的敏捷性和组织协调的顺利实施, 故设关系强度(RI, Relation Intensity)为:

$$RI_{ab} = \begin{cases} 0, & T_{ab} > T' \\ \frac{T' - T_{ab}}{T' - T''}, & T' \geq T_{ab} \geq T'' \\ 1, & T_{ab} < T'' \end{cases} \quad (6)$$

$T'$  是信息流的时延上限,  $T''$  是时延下限。

作战体系的所有组织关系的 RI 对作战体系的耦合性和聚合能力产生影响, 将整个组织的体系耦合强度(CI, Coupling Intensity)视为所有关系强度的均值:

$$CI = \sum_{i=1}^{N_R} RI_i / N_R \quad (7)$$

式中:  $N_R$  为关系数量。

### 2.1 优化目标

流量的规划方案  $P$  是一个  $N \times N \times M$  三维矩阵, 每个元素  $P(i, j, f_{ab})=1$ , 则表示信息流  $f_{ab}$  经过链路  $c_{ij}$ , 否则为 0。N 是节点个数, M 是信息流个数。有信息流经过的路径构建通信链路, 通信网络由通信链路搭建而成。优化 CIS 网络结构必须综合考虑网络的成本和对体系的支撑能力<sup>[9]</sup>, 故目标函数设为:

$$\text{Max } F(P) = \frac{CI^\alpha}{CC^\beta} \quad (8)$$

式中:  $\alpha, \beta$  为偏好系数。

### 2.2 约束条件

(1) 信息流路径约束。对于信息流  $f_{ab}$  从  $a$  出发, 经过  $k$ , 到  $b$  结束, 必须保证信息流  $f_{ab}$  的从源节点发出, 目的节点正常接收, 中间节点保持出入相等。

$$\sum_{j=1}^N p(a, j, f_{ab}) = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N p(i, b, f_{ab}) = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N p(i, k, f_{ab}) =$$

$$\sum_{j=1}^N p_{ab}(k, j, f_{ab}), \quad k \neq a, b \quad (11)$$

(2) 链路带宽约束。流经链路  $c_{ij}$  的信息流量必须小于其链路的信道容量。

$$\lambda_{ij} \leq cl_{ij}, \lambda_{ij} = \sum_{m=1}^M L(p(i, j, m)) \quad (12)$$

(3) 丢包率约束。为了满足丢包率  $P_{re}$  在一定范围, 则链路  $c_{ij}$  上的平均流量必须满足:

$$\lambda_{ij} \leq \sqrt[q+1]{P_{re}} \quad (13)$$

(4) 信息流时延约束。信息流通过路径传输必须小于允许的时延上限, 否则信息将失效。

$$T_{ab} \geq \sum_{i,j=1}^N t_{ij} \cdot p(i, j, f_{ab}), \quad t_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_{ij}(\mu_{ij} - \lambda_{ij})} \quad (14)$$

### 3 路径规划遗传算法

遗传算法是一种启发式智能优化算法, 具有并行性和全局寻优能力, 适合寻找基于信息流 CIS 网络结构优化的整体最优解, 本文提出信息路径规划遗传算法, 在可行解空间内进行初始化及遗传操作, 能够避免算法过程中产生大量非可行解降低算法收敛速度和运行效率<sup>[10]</sup>。

#### 3.1 编码

针对流量规划方案  $P$  进行编码, 将每一种方案视为一条染色体, 每一条信息流的路径视为一个基因, 为降低编码长度, 可以将三维矩阵  $P$  转化为信息流从 1 到  $M$  编号与链路从 1 到  $NL$  编号的二维矩阵, 染色体编码可表示为  $[p_1, p_2, p_3, \dots, p_t, \dots, p_{M \times NL}]$ , 若流量  $f_m$  经过链路  $C_{nl}$ , 则  $P(m, nl)=1$ , 在染色体的位置为  $m \cdot NL + nl$ , 染色体中位置  $t$  对应  $P(m, nl)$ , 其中  $m=\text{ceil}(t/NL)$ ,  $nl=\text{rem}(t, NL)$ ,  $\text{ceil}$  和  $\text{rem}$  分别为 Matlab 中的求整和求余函数。

#### 3.2 种群初始化

为了提高算法的收敛速度和运行效率, 对于种群中每条染色体采用以下方法进行初始化:

第 1 步: 生成  $P_{M \times NL}$  全零矩阵, 令  $m=1$ 。

第 2 步: 信息流  $f_m$  的源节点为  $a$ , 目的节点为  $b$ 。随机生成路径长度  $W$  (小于最大路径长度), 随机选择一个节点  $e$  作为中间节点, 检验信息流  $f_m$  经过链路  $c_{ae}$  (编号为  $nl$ ) 是否满足带宽约束, 如果不满足则重新选择节点, 若满足则令  $a=e$ ,  $P(m, nl)=1$ 。重复以上操作选择  $W-2$  个中间节点, 与源节点、目的节点构成信息流  $f_m$  的路径, 判断信息流时延约束, 若不满足则重新规划路径, 若满足, 则令  $m=m+1$ 。

第 3 步: 判断  $m \leq M$ , 是则重复第 2 步, 直到所有基因都初始化完毕。

#### 3.3 遗传操作

选择, 采用轮盘赌加精英选择的方式, 如果上

一代最大适应度染色体大于本代最大适应度染色体, 则用上一代大于本代最大适应度的染色体随机替换本代的染色体。

交叉, 随机选择父染色体的一条基因  $P(m, :)$  替换母染色体中对应位置的基因  $P'(m, :)$ , 并判断链路带宽约束, 若满足则交叉, 若不满足, 则重新选择父母和基因进行交叉操作。

变异, 对种群中某个染色体的随机一条基因进行重新初始化, 能够防止算法“早熟”, 跳出局部最优。

#### 3.4 适应度函数

以目标函数为适应度函数, 对各染色体的适应度进行评价,  $NP$  是种群规模。

$$F(P_e) = \frac{CI^\alpha}{CC^\beta}, \quad e=1,2,\dots, NP \quad (15)$$

## 4 基于 AOC 的网络结构优化仿真

#### 4.1 实例及参数设置

空中进攻作战(AOC, Air Offensive Campaign) 主要依托天基信息系统和空中信息系统, 将各类情报、指控、保障和打击作战节点连接成基于指挥信息系统网络的作战体系, 对敌防区内的关键地面目标实施空袭打击。基本的空中进攻作战案例设想划分为 25 类作战节点, 包含 6 类指控节点, 4 类情报节点, 8 类打击节点, 5 类通信节点, 2 类保障节点。指控关系呈现出分层树状的结构如图 2。

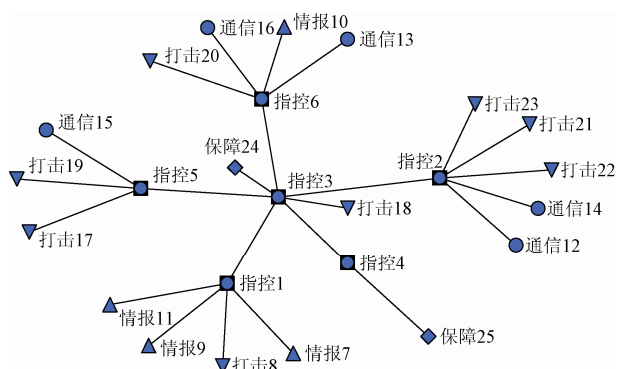


图 2 指控关系网络

情报关系构建按照情报节点区域保障,综合上报情报中心融合处理,通信节点实施分发;协同关系构建按照概率 0.1 在没有指控关系的节点间随机加边。某时刻的组织关系转化为图 3 的信息流网络(线条粗细表示信息流量对比)。

种群数量设为 400,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.05,最大运行代数为 4 000,每条信息流的时延上限为 0.06 s,下限为 0.011 s,拒绝服务概率为  $10^{-8}$ ,信息量系数为 200 kb,指控、情报、协同信息量比为 2: 6: 2,成本归一化标量  $ce$  为 50,链路容量设为 2 000 kb/s,分组长度为 20,队列长度为 50,偏好系数  $\alpha, \beta$  均设置为 1。

## 4.2 仿真结果

(1) 经过 4000 代进化,算法选择的最优信息流路径方案适应度为 1.7724,以图 3 为网络结构的适应度为 1.3569,相比之下有较大的提高。图 4 为运用 Ucinet6.0 绘制的优化网络结构,网络明显简化,部分信息流通过迂回的方式进行传输,在保证信息顺利传递的基础上,降低了资源开销。图 5 是历代最佳染色体适应度变化情况,可见随着种群不断迭代,最优适应度呈阶跃式递增,体现了种群在选择、交叉和变异中不断进化。

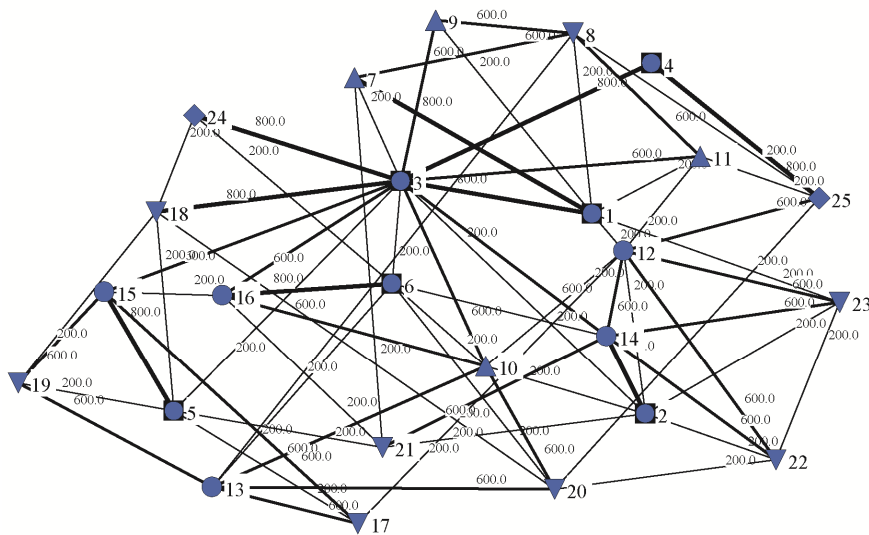


图 3 信息流网络

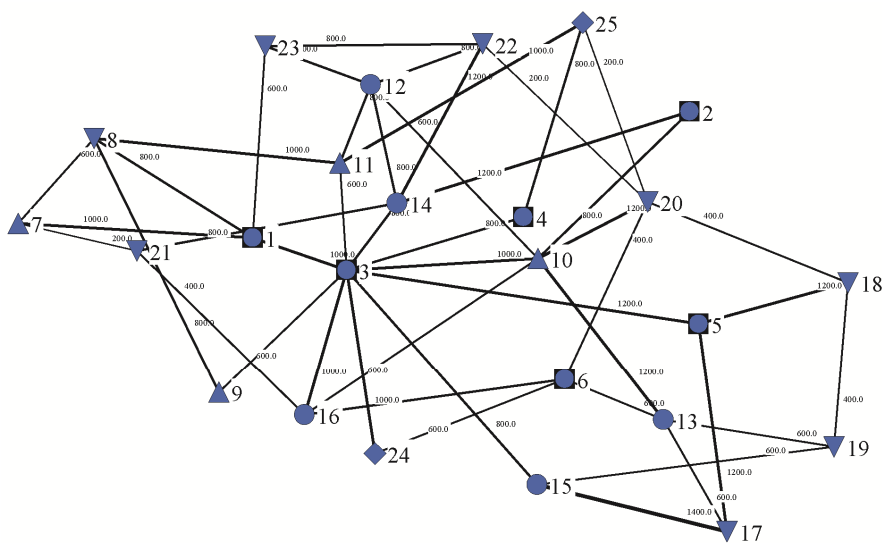


图 4 优化网络结构

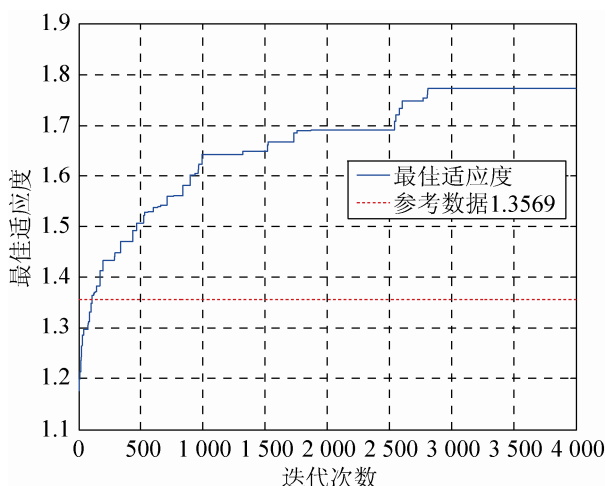


图 5 适应度变化

(2) 图 6 为图 3 和图 4 网络的体系耦合强度、成本系数的对比, 可看出随着信息路径的不断优化, 成本逐渐降低, 而体系耦合强度则随着网络成本的下降, 对信息流时延的增加, 呈现出在上下波动中轻微补偿性的降低, 这是因为算法是从保证信息流可达可用为基础进行优化的。

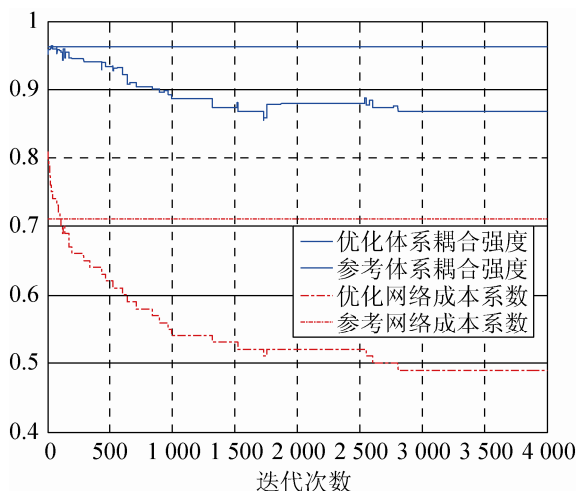


图 6 体系耦合强度与成本系数

在实战中, 系统节点间的组织关系和信息交互关系动态变化, 可根据实际需求分阶段实施多次优化调整的方式实现网络结构的动态优化。

## 5 结论

系统科学认为, 系统的结构决定了系统的功

能, 系统结构的优化能够提高系统的运行效率。从指挥信息系统网络结构对作战体系影响出发, 提出了基于信息流的网络结构优化模型, 并设计了路径规划遗传算法, 针对空中进攻作战进行了静态仿真实验。面对信息化战争的高度动态的特性, 模型和算法还需继续改进。

## 参考文献:

- [1] 王步云, 赵晓哲, 王军. 水面舰艇编队反舰作战中作战网络结构的优化 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(9): 2354-2361.
- [2] 吴俊, 谭索怡, 谭跃进, 等. 基于自然连通度的复杂网络抗毁性分析 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2014, 11(1): 77-86.
- [3] Dekker A H. Network topology and military performance [C]// 2005 International Congress on Modeling and Simulation, Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand. Australia: MODSIM, 2005: 2174-2180.
- [4] 赵娟, 郭平, 邓宏钟, 等. 基于信息流动力学的通信网络性能可靠性建模与分析 [J]. 通信学报, 2011, 32(8): 159-164.
- [5] DOD-Architecture Working Group. DOD Architecture Framework Version 2.0 [R]. Washington, DC, USA: US Department of Defense, 2009.
- [6] 王磊, 罗雪山, 舒振. C4ISR 体系结构服务视图及其演化的形式描述方式[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(3): 134-139.
- [7] Han Feng, Wang Jianxin, Xiao Gang, et al. Description and analysis methods of information system architecture based on DODAF [C]// 2008 International Symposium on Information Science and Engineering. USA: IEEE, 2008: 637-642.
- [8] 陈鸣, 斐凌波, 梁文. 网络流量分布的双模态模型 [J]. 通信学报, 2008, 29(5): 100-106.
- [9] 符小卫, 程思敏, 高晓光. 无人机协同中继过程中的路径规划与通信优化 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(5): 890-894.
- [10] Dalila B, Belaid B, Habiba D. Scatter search and genetic algorithms for MAX-SAT problem [J]. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms (S2214-2495), 2008, 7(2): 101-124.