



面向多层次、多指标的光网络规划与评估方法

曹晓宏¹, 徐思雅¹, 周桂平², 王英杰³, 于波涛³

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876;

2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006;

3. 北京国电通网络技术有限公司, 北京 100070)

摘要: 首先深入分析了影响业务可靠性的关键指标, 并建立了面向可靠性和建设成本的网络规划模型, 然后设计了自适应免疫算法以求解网络规划方案。进而, 建立了面向多层次、多指标的网络规划方案评估模型, 并使用神经网络算法获得指标权重, 实现对网络规划方案的全面、有效评估。通过仿真可知, 提出的面向多层次、多指标的光网络规划与评估方法能够提高光缆资源利用率和站点成环率、降低网络建设成本以及保障网络可靠性, 有助于提高运维人员的工作效率和运维水平。

关键词: 光网络; 网络规划; 评估模型; 自适应免疫算法; 神经网络算法

中图分类号: G304

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019206

Multi-level and multi-index planning and evaluation method for optical network

CAO Xiaohong¹, XU Siya¹, ZHOU Guiping², WANG Yingjie³, YU Botao³

1. China State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China

3. Beijing Guodiantong Network Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China

Abstract: The key indicators affecting business reliability were analyzed in depth, and a network planning model for reliability and construction cost was established. Then an adaptive immune algorithm was designed to solve the network planning model. Then, a multi-level and multi-index oriented evaluation model for network planning method was established, and the weights of the indexes were obtained by using neural network algorithm, so as to achieve a comprehensive and effective evaluation of the network planning method. The simulation results show that the multi-level and multi-index oriented optical network planning and evaluation method proposed can improve the utilization of optical cable resources and the site ring rate, reduce the network construction cost, ensure the network reliability, and help to improve the efficiency and quality of network operation and maintenance.

Key words: optical network, network planning, evaluation model, adaptive immune algorithm, neural network algorithm

收稿日期: 2018-09-20; 修回日期: 2019-09-02

通信作者: 徐思雅, 1608764726@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2016YFB0901200)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2016YFB0901200)

1 引言

光网络规划是指在网络建设初期对网络拓扑结构中站点、光缆和承载业务的传输路线进行合理部署。通过设计合理的网络规划方法以优化网络拓扑结构、保障网络的负载均衡是降低网络建设和改造成本以及获得高性能、可扩展网络的有效途径。然而,随着网络规模的不断增长、网络拓扑结构的日益复杂、业务种类和数量的不断增加,现有的面向单一优化目标的网络规划方法难以支撑网络的低成本、高质量的改造需求。并且,现有光网络规划方法大多针对物理层的站点、光缆,缺乏对业务层可靠性的考察,使运维人员无法全面地了解承载业务的分布情况,不能准确地评估网络所承载业务的运行风险。因此,设计一套高效、合理的网络规划方法,针对不同场景、不同需求生成针对性的网络改造方案,对优化网络拓扑结构、提高可靠性和降低网络建设成本具有重要作用。

网络规划方案评估是从网络架构的稳健性、网络可靠性和业务可靠性等方面对算法生成的网络规划方案进行性能评估。网络规划方案的评估结果可以直观地反映网络规划方案的合理性,并为网络规划方案的改进指明方向。然而,目前针对光网络规划方案评估的指标体系大多只面向物理层、网络层以及业务层中的两层,缺乏全面涵盖3个层次的评估方法,致使运维人员难以全面评估网络规划方案的有效性。因此,建立一套全面、科学的网络规划方案的评估方法,帮助运维人员准确、直观地评估网络规划方案,对验证网络规划方案的合理性、提高运维工作效率具有指导意义。

通过对国内外研究现状进行分析可知,各大运营商均在网络规划方案设计和网络规划方案评估分析方面进行了较为深入的研究^[1-7]。针对网络规划方法,参考文献[2]提出了面向网络生存性的

光网络规划方法,但缺乏对承载业务可靠性的考察;参考文献[3]从用户需求的角度出发,针对光网络的主干层、分配层、引入层进行规划设计,满足了用户对业务可靠性的要求,但网络建设成本较高;参考文献[4]从网络拓扑结构和网络可扩展性出发,针对佛山的地理环境和业务传输需求,设计了一种符合当前网络环境特点的网络规划方案;参考文献[5]给出了一套EPON终端通信接入网组网原则,并构建了以主干、汇聚和接入3层为标准的网络结构模型,阐述了网络结构、网络路径优化原则和方法。最后通过在电信息采集系统通道建设中的实践,证明了所提网络规划和优化方法的有效性。针对网络质量评估,参考文献[1]从网络性能角度,给出了光纤信息实时传输的具体指标;参考文献[6]提出了一种基于网络可靠性的光网络建模思想,对影响网络可靠性的关键性指标如信息流传输时延、分组丢失率等进行深入分析,并构建了一种在网络性能约束条件下的最大传输能力的网络模型;参考文献[7]针对网络环境的动态变化,提出了一种基于自治系统(autonomous system, AS)之间最优路径评估各个AS重要程度的方法,可以有效地发现AS中连接较少但重要程度较高的点,使得评估的重要性和实际重要性更吻合。基于以上参考文献的分析可知,针对光网络运行质量的研究主要集中在网络性能研究或业务质量的评估上,缺乏对二者结合的考虑,难以实现对网络规划的全面评估。

为解决以上问题,本文提出了一种面向多层次、多指标的光网络规划与评估方法,从成本、可靠性等角度对网络建设质量进行全面提升。首先,基于可靠性和建设成本构建网络规划模型,并从物理层、网络层、业务层3个维度构建网络规划方案评估模型。然后,设计自适应免疫算法以求解最优网络规划方案,并采用神经网络算法获得评估模型权重,实现对网络规划方案的全面、有效评估。



2 网络规划与评估模型

本文所涉及的光网络规划方法是基于现有的网络拓扑结构,根据新增的业务需求和待选的光缆、站点,设计满足网络可靠性、经济性等约束要求的网络规划部署方案。网络规划与评估模型包括网络规划最优化问题模型和网络规划方案评估模型,本文将对两个数学模型进行分析。

2.1 网络规划最优化问题模型

由光网络的构成可知,光网络规划的对象为光纤和终端节点。光网络中的节点分布主要受用户分布影响,光纤分布主要由节点分布和节点间的互联关系决定。因此应针对用户需求,规划节点数量、位置和连接关系,并保障光缆纤芯余量率和光缆带宽冗余率等指标以满足网络可靠性的要求。

2.1.1 可靠性函数

本文从网络可靠性和业务可靠性两个方面建立可靠性函数,考察的参数包括光缆资源闲置率(光缆带宽冗余率和光缆纤芯余量率)、站点成环率和成环站点度加权值。

(1) 站点成环率

网络中节点成环是指该拓扑结构中存在一个包含该节点的环,站点成环率为网络拓扑中成环的站点个数与站点总数的比值:

$$x = \frac{1}{s_{\text{sum}}} \sum \text{value} \quad (1)$$

其中, s_{sum} 表示网络拓扑中的站点总数。当站点处于环中时, value 的值为 1, 否则为 0。

(2) 成环站点度加权值

网络拓扑中站点 i 的度 k_i 为与该站点相连的站点数目。采用 min-max 标准化方法(min-max normalization, 离差标准化)对网络拓扑中所有站点的度进行归一化处理:

$$\text{deg}_j = \frac{d_j - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (2)$$

其中, deg_j 表示编号为 j 的站点度进行归一化处理后的值, d_j 表示编号为 j 的站点度数, $d_{\min}$ 表示网络拓扑中度数最小的站点度, $d_{\max}$ 表示网络拓扑中度数最大的站点度。

假设全网拓扑中站点集合为 S , $S = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, $d_j \in S$, 则成环站点度加权值可表示为:

$$Y = \sum_{j=1}^n e_j \text{deg}_j \quad (3)$$

其中, $e_j \in \{0,1\}$, 如果其值为 1, 表示站点在环内; 否则站点不在环内。

(3) 光缆资源闲置率

光缆资源闲置率包括光缆带宽冗余率和光缆光纤余量率。从应急迂回和未来业务发展需求考虑, 光缆带宽冗余率应不低于 30%; 从网络可扩展性角度考虑, 光缆光纤余量数应高于 4 根。

光缆带宽冗余率 A 为:

$$A = \frac{b_{\text{rem}}}{b_{\text{sum}}} \quad (4)$$

其中, b_{rem} 表示光缆中未使用的带宽值, b_{sum} 表示光缆中可用的最高带宽值。

光缆光纤余量率 B 为:

$$B = \frac{O_{\text{rem}}}{O_{\text{sum}}} \quad (5)$$

其中, O_{rem} 表示光缆中未使用的纤芯数, O_{sum} 表示光缆中的总纤芯数。

光缆资源闲置率 Z 为:

$$Z = \lambda \cdot A + \mu \cdot B \quad (6)$$

其中, λ 和 μ 是权重系数, 且满足 $\lambda + \mu = 1$ 。

根据式 (1)、式 (3) 和式 (6), 可得到可靠性函数 R :

$$R = \alpha \cdot X + \beta \cdot Y + \gamma \cdot Z \quad (7)$$

其中, X 表示站点成环率, Y 表示成环站点度加权值, Z 表示光缆资源闲置率。而 α 、 β 和 γ 则为相应的权重系数, 且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

2.1.2 网络建设成本函数

网络建设成本是指在网络规划方案的实施过程中,需要新增光缆、站点的建设成本:

$$C = \sum_{i=1}^{i=n} e_i m_i + \sum_{j=1}^{j=m} s_j m_j \quad (8)$$

其中, $i \in [1, n]$ 表示待选光缆条数为 n , e_i 的值为 1 时表示第 i 条光缆被选中, e_i 值为 0 时表示第 i 条光缆未被选中; m_i 表示建设第 i 条光缆的成本; s_j 的值为 1 表示第 j 个站点被选中, s_j 值为 0 表示第 j 个站点不被选中; m_j 表示建设第 j 个站点的成本。

2.1.3 目标函数

在对网络规划方案进行设计时,通常以可靠性指标均达到最低阈值时的建设成本为基准,因此本文选择 min-max 算法对目标函数进行优化。为了以较低的建设成本获得较高性能的网络,本文将可靠性和建设成本的差作为优化变量 F ,将站点和链路的建设费用作为成本向量 C ,并根据网络规划方案的设计目标要求构成目标函数 $S(F, C)$ 。目标函数的定义如下所示:

$$\begin{cases} F = \omega_1 \cdot R - \omega_2 \cdot \theta \cdot C \\ R = \alpha \cdot X + \beta \cdot Y + \gamma \cdot Z \\ C = \sum_{i=1}^{i=n} e_i \cdot m_i + \sum_{j=1}^{j=m} s_j \cdot m_j \\ S(F, C) = [(S_1(F, C_1)), (S_1(F, C_2)), \dots, (S_1(F, C_n))]^T \\ \phi(F^*) = \min \max (S_1(F, C_i)), (i=1, 2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (9)$$

其中, ω_1 和 ω_2 表示建设成本函数 C 和可靠性函数 R 的权重系数,权重系数可根据不同使用场景对网络建设成本和可靠性的重视程度进行调整; θ 为常数,用于调整网络建设成本 C 和可靠性 R 之间的数量级差异。

2.1.4 约束条件

首先,从可靠性函数分析,站点成环率应高于 60%;网络节点度尽量保持在 4 以下;根据部分业务的特定要求,比如为减少传输时延,需要在两个站点间直连光缆,从而导致某些待选光缆、

站点成为必选。关于建设成本,可根据具体场景需求设置阈值。

2.2 网络规划方案评估模型

本文从物理层、网络层、业务层 3 个维度对影响网络规划方案质量的关键性指标进行深入分析,其中物理层从健康度、修复性、扩展性 3 个方面对站点和光缆进行评估;网络层从网络架构稳健度、网络性能对网络环境进行评估;业务层从故障保护、业务风险两个方面对传输业务质量进行评估。表 1 按评估维度给出了各级指标的定义、计算方法和正常指标值。

针对物理层,网络规划的对象主要为光缆和站点,因此本文将物理拓扑中光缆和站点可统计的属性信息作为本层的评估指标,评估指标包括健康度、修复性和扩展性 3 个方面。其中,健康度评估的是站点和光缆的完好率和故障历史,修复性评估的是光缆故障消除的及时率,扩展性评估的是站点和光缆的冗余情况。

针对网络层,其指标可分为网络架构稳健度和网络性能两大类。网络架构稳健度评估了网络拓扑的脆弱程度,网络性能表征了网络层的业务传输能力。针对网络架构稳健度,本文选取的评估指标包括网络边介数、网络关键点百分比、网络平均直径、网络成环率等;针对网络性能,本文选取的评估指标包括误码率、吞吐量、抖动时间、网络时延等。

针对业务层^[11],本文选取了通用的业务质量指标集合^[6]中对业务可靠性影响程度较大的因素作为评估指标,并从故障保护和业务风险两个角度进行分析。故障保护可评价业务传输路线的冗余保护情况;业务风险评估了站点、链路的负载均衡情况。指标模型中各层次指标定义及计算方式见表 1^[12-14]。

3 算法分析

网络规划是一个具有多目标性、多阶段性、



表 1 指标模型中各层次指标定义及计算方式

评估维度	二级指标	三级指标	计算方法	正常指标值
物理层	健康度	设备完好率	完好的台时数/日历工作台时数。 完好台时数等于日历工作台时减去故障及其修理的总台时数	$\geq 95\%$
		平均故障间隔时间	设备的寿命单位总数/故障总次数	寿命为 10 年的设备, 其故障次数应小于 100 次
		设备紧急故障次数	统计	≤ 28 次
		设备重大缺陷次数	统计	≤ 21 次
		光缆完好率	完好台时数/日历工作台时数	$\geq 99.93\%$
		平均故障时间	光缆的寿命单位总数/故障总数	$\geq 43\ 800\text{ h}$
		光缆重大缺陷次数	统计	≤ 3
		光缆紧急缺陷次数	统计	≤ 5
	修复性	光电复合缆故障消除及时率	排除光电复合缆故障的时间/光缆故障排除标准时间	$\leq 94.25\%$
		普通光缆故障消除及时率	排除普通类型光缆故障的时间/光缆故障排除标准时间	$\leq 82.25\%$
		光缆段故障平均修复效率	总修复时间/总故障设备数目	≤ 98.6
		光电复合缆故障消除及时率	光电复合缆故障时间/修复故障时间	$\geq 87.5\%$
	扩展性	核心板卡冗余率	空闲板卡数/设备总板卡数	$\leq 4\%$
		业务槽位冗余率	可增加业务槽位数目/总槽位数目	$\geq 20\%$
		光缆带宽冗余量率	剩余带宽/可用最高带宽	$\geq 30\%$
		光缆光纤冗余量率	未用光纤数目/总光纤数目	光纤冗余量 ≥ 4 根
网络层	网络架构稳健度	网络关键点百分比	关键点个数/总节点数	$\leq 4\%$
		网络平均直径	两点间距离总和/节点数	[5.9, 6.1]
		网络成环率	有效成环的设备数量/总设备数量	$\geq 60\%$
		网络边介数	$\text{Math.sum}(v \text{ 和 } w \text{ 之间经过边 } p \text{ 的最短路径数目}/v \text{ 和 } w \text{ 之间最短路径总数目})$ (v : 站点 v (与 w 相连); w : 站点 w (与 v 相连); p : 链路 p)	≤ 0.1
		网络平均度	网络总度数/节点总数	[2.4, 3.6]
	网络性能	平均路径长度	网络路径总长度/路径条数	[2, 6]
		误码率	传输的误码/传输的总码数	$\leq 10^{-6}$
		抖动时间	最大时延-最小时延	$< 100\text{ ms}$
		吞吐量	每秒请求次数	$\geq 1\ 000$
		过载分组丢失率	分组丢失数/发送分组数	$\leq 1\%$
		网络时延/ms	发送时延+传播时延	(0,30)极快 (30,50)良好 (50,100)普通 (100,100+)差

(续表)

评估维度	二级指标	三级指标	计算方法	正常指标值
业务层	故障保护	故障保护率	故障保护成功次数/故障发生次数	$\geq 99.3\%$
		波长冗余率	消耗的保护波长/总的占用波长总和	$\geq 95\%$
		重光率	$0.95 \times (\text{平均重光传输设备数量}/\text{光传输设备数量}) + 0.05$ (平均重光缆数/光缆总数)	$\geq 99.9\%$
		路径跳数变化率	$\text{Math.abs}(\text{故障前业务平均跳数} - \text{故障后业务平均跳数})/\text{故障后业务平均跳数}$	$\leq 24\%$
	业务风险	边风险值	链路承载业务数量	≤ 4
		节点风险值	站点承载业务数量	≤ 5
		网络风险值	链路风险值+节点风险值	—
		业务风险均衡度	业务发生风险性 $\times$ 风险发生的严重性	0.630 1

不确定性等特点的系统优化问题, 免疫算法作为一种将生成和检测作为迭代过程的智能搜索算法, 较适用于求解网络规划问题。但是, 免疫算法的交叉、变异算子相对稳定, 导致容易陷入局部最优的平衡态, 并且进化后期常出现停滞不前的问题, 从而很难获得所求问题的全局最优解。因此, 本文设计了自适应免疫算法^[9-10], 该算法始终采用最佳的交叉、变异算子, 较好地平衡了收敛性和可行解多样性。同时本文采用神经网络算法获得评估模型权重, 实现对网络规划方案的有效评估。

3.1 算子设计

(1) 抗体编码

首先对光网络的网络规划过程中涉及的光缆、站点编号, 编号从 1 开始, 到 $N+M$ (待建设光缆、站点数目分别为 N 、 M)。抗体基因采用二进制编码方式, 基因位数为 $N+M$ 。当第 i 号基因位为 1 时, 表示第 i 条光缆需要被建设; 当第 i 号基因位为 0 时, 表示第 i 条光缆不需要被建设。网络规划中的站点标记采用同样方式。假设最终输出抗体上的基因序列为(101011100), 且低三位表示待建设站点信息, 则网络规划方案中待建设光缆有 6 条, 待建设站点有 3 个, 且需要被建设的光缆为第 1 条、第 3 条、第 5 条和第 6 条, 站点为第 1 个。

(2) 计算抗体亲和力

免疫算法中, 抗体亲和力表示优化问题可行解的质量, 故本文中抗体亲和力表示光网络规划方案的质量, 且由式 (9) 网络建设成本函数 C 和式 (8) 可靠性函数 R 共同决定。由于可行解质量的改进应朝着抗体亲和力增加的方向进行, 故光网络规划问题中抗体亲和力可定义为:

$$\text{Aff}_i = \frac{k_8 + s_i}{k_9} \quad (10)$$

其中, k_8 、 k_9 为常数, s_i 为所求问题的目标函数。

(3) 抗体克隆

本算法中克隆尺寸由抗体亲和力决定, 并未采用等比例克隆方式。亲和力越高的抗体克隆子代数越多。根据式 (11), 假设编号为 i 的抗体 $\text{Aff}_i = 0.1$, 且常数 $k_1 = 1$, 则对抗体 i 进行克隆后, 会生成包含 10 个子代的集合 Set_i , $\text{Set}_i = \{\text{Set}_{i1}, \text{Set}_{i2}, \dots, \text{Set}_{i10}\}$ 。

$$N_i = \text{Floor}[k_1/i] \quad (11)$$

其中, i 表示抗体标号, N_i 表示标号为 i 的抗体克隆后的个数, Floor 表示向下取整, k_1 为常数。

(4) 抗体交叉

抗体间基因序列的交叉可以将父代的优良基因得到保存, 获得具有更好基因序列的子代。

交叉概率为:



$$c_1 = \begin{cases} k_4 \cdot \sin\left(k_2 \cdot \frac{a_{\max} - a_i}{a_{\max} - a_{\text{avg}}}\right), & a_i > a_{\text{avg}} \\ k_3, & a_i \leq a_{\text{avg}} \end{cases} \quad (12)$$

其中, a_i 表示第 i 号抗体的亲和度, a_{avg} 、 $a_{\min}$ 、 $a_{\max}$ 分别表示种群抗体亲和度的平均值、最小值、最大值, k_2 、 k_3 和 k_4 为常数。

(5) 抗体变异

抗体变异可以保证抗体种群的多样性。假设抗体 i 在繁殖后生成子代个数为 Child_i , 且此类抗体的变异概率为 r_i , 故此类抗体中需要参与变异操作的抗体个数为 $\text{Sum}_i = \text{Child}_i \cdot r_i$ 。

$$c_2 = \begin{cases} k_7 \cdot \cos\left(k_5 \cdot \frac{a_{\max} - a_i}{a_{\max} - a_{\text{avg}}}\right), & a_i > a_{\text{avg}} \\ k_6, & a_i \leq a_{\text{avg}} \end{cases} \quad (13)$$

其中, a_i 表示第 i 号抗体的亲和度, a_{avg} 、 $a_{\min}$ 、 $a_{\max}$ 分别表示种群抗体亲和度的平均值、最小值、最大值, k_5 、 k_6 和 k_7 为常数。

(6) 计算选择概率

为保证算法具有良好的全局收敛性和高效的稳定性, 需对良好抗体进行保存且保证种群抗体的多样性。因此在选择概率的定义中, 本文选择正比抗体亲和度。抗体选择概率 Sec 低于平均选择概率 Sec_{avg} 的抗体将被舍弃。抗体 i 的选择概率为:

$$\begin{cases} \text{Sec}_i = \frac{\text{Aff}_i}{\text{Sum}_{\text{aff}}} \\ \text{Sum}_{\text{aff}} = \sum_{j=1}^{j=n} \text{Aff}_j \end{cases} \quad (14)$$

其中, θ 为常数, Aff_i 表示抗体 i 的亲和度, Sum_{aff} 表示抗体亲和度总和。

3.2 算法流程

算法流程如图 1 所示。

算法的完整执行步骤如下。

步骤 1 系统初始化。

设定算法参数, 导入光网络规划数据, 包括站点、链路信息和相关常数等。

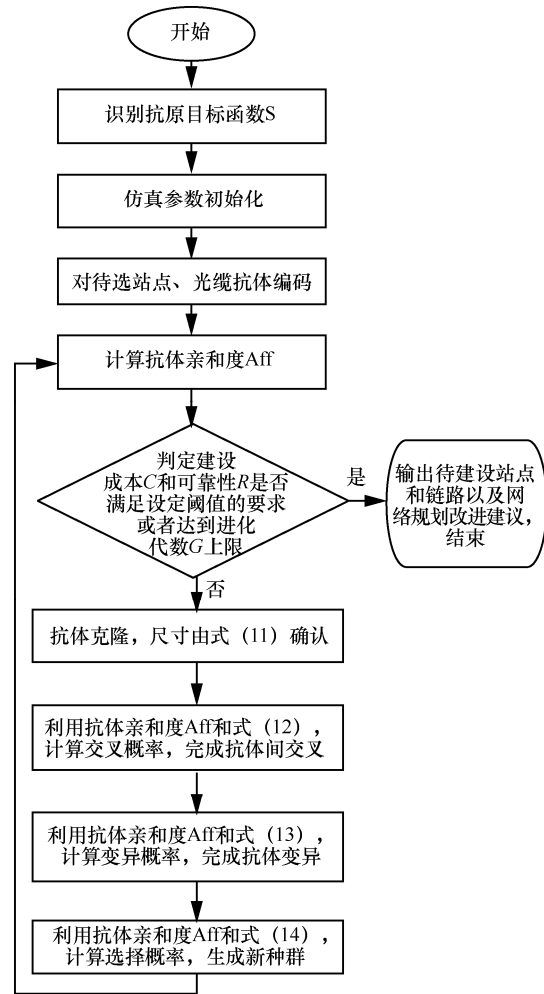


图 1 自适应免疫算法流程

步骤 2 抗原识别。

抗原即第 2.1 节中提及的目标函数和相关的约束条件。

步骤 3 产生初始抗体。

初始化抗体种群 P_{01} , 设定种群中抗体数为 N , 对抗体进行编码并对其注射全局疫苗使得某些待选光缆和站点成为必选, 设置进化代数 $G=1$ 。

步骤 4 计算抗体亲和度。

计算抗体亲和度 a_x , 根据 a_x 值对所有抗体降序排序。检测此时获得的种群是否收敛, 如果收敛则输出网络规划方案, 停止循环; 否则转步骤 5。

步骤 5 克隆操作。

抗体按亲和度降序排序, 克隆尺寸定义如式 (11), 形成新的种群 PO_2 。

步骤6 交叉操作。

根据式 (12) 计算抗体间的交叉概率, 形成新的种群 PO_3 。

步骤7 变异操作。

根据式 (13) 计算抗体的变异概率, 形成新的种群 PO_4 。

步骤8 计算选择概率。

根据式 (14) 计算抗体的选择概率, 形成新的种群 PO_5 。进化代数 $G = G + 1$, 转至步骤 4。

自适应免疫算法 (AI) 的伪代码如下。

输入: 站点和链路的抗体信息; 站点数量 N ; 链路数量 M ; 默认参数 Params; 最大迭代次数 G ; 建设成本函数 C ; 可靠性函数 R

输出: 网络规划模型 Seq

初始化: 站点和链路信息, 包括位置、预制资金等; 建设成本函数 C 、可靠性函数 R ; 算法中所有默认的常量值

算法迭代 (迭代次数 $\leq G$), 针对每次迭代可做如下操作:

If 当前抗体群, 做如下操作

如果 建设成本 C 和可靠性 R 和预置期望值一致 Then

End 算法并输出网络规划模型 Seq;

计算抗体亲和力 Aff_i ;

根据亲和力对所有抗体进行降序排序;

单个抗体按照如下计算式完成克隆:

$$N_i = \text{Floor}[k_i / i]$$

If $N_i \neq 1$ Then

获取克隆对象 a_i ;

根据定义计算式, 计算交叉、变

异、选择概率;

根据交叉、变异概率更新所有抗体;

计算选择概率 Sec_i ;

If $Sec_i < Sec_{avg}$ Then

删除所有与当前抗体类型相同

的抗体;

迭代次数 $G = G + 1$;

If $G = 1\ 000$ Then

End If 算法并输出网络规划评估模型 Seq。

4 网络规划方案仿真分析

4.1 参数设置

本文所使用的仿真数据来源于国内某区域光网络的部分网管数据。图 2 中, 网络拓扑结构包含 21 个已建设站点, 4 个待建设站点, 26 条已建设光缆, 18 条待建设光缆, 且链路[2-4]和[2-6]的光缆资源闲置率略高于 30%, 其余光缆的资源冗余率均高于 46%。

本节算法中涉及的通用参数见表 2, 两种算法参数对比见表 3。

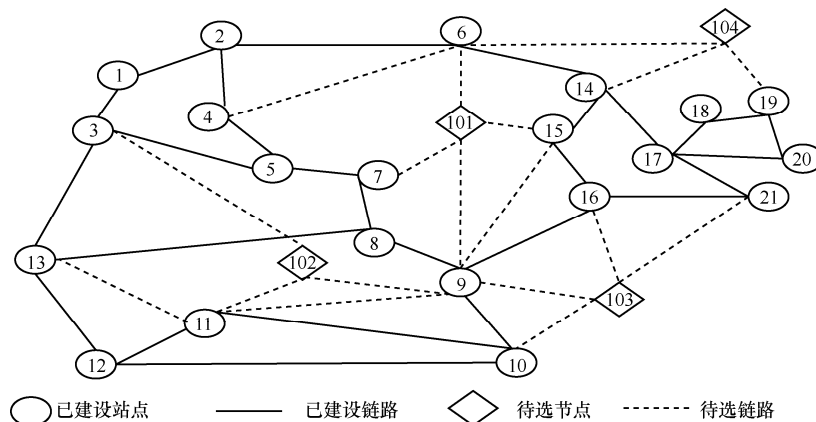


图2 初始网络规划拓扑图



表 2 通用仿真参数设置

参数类型	参数值
种群规模	70
抗体长度	22
光缆带宽冗余率权重 λ	0.5
光缆光纤冗余率权重 μ	0.5
成环率权重 α	0.4
度加权重 β	0.3
光缆资源闲置率 γ	0.3
目标函数权重 ω_1	0.6 (可调)
目标函数权重 ω_2	0.4 (可调)
克隆公式中常数 k_1	30
交叉公式中常数 k_2	0.1
交叉公式中常数 k_3	0.8
交叉公式中常数 k_4	0.3
变异公式中常数 k_5	0.2
变异公式中常数 k_6	10
变异公式中常数 k_7	0.9
抗体亲和度中常数 k_8	1 000
抗体亲和度中常数 k_9	1

4.2 实验结果与分析

本文采用免疫算法作为对比算法,对本文提

出的面向多层次、多指标的光网络规划与评估方法进行性能分析。由于不同应用场景对可靠性和网络建设成本的依赖程度不同,目标函数中的权重系数 ω_1 和 ω_2 被设为可调。现就权重系数 ω_1 和 ω_2 、网络建设成本、可靠性、站点成环率、成环站点度加权重、光缆资源闲置率之间的关系进行研究与仿真,仿真结果统计见表 4。

由表 4 可知,网络建设成本所占比重越小,可靠性越高,成环站点度数越低,光缆资源闲置率越高,站点成环率可达 60%以上,同时权重系数 $\omega_1:\omega_2$ 的取值在 $[1/9, 7/3]$ 之间均能满足光网络正常运行的最低标准。

图 3 是仿真后的网络拓扑结构。链路[4-6]成为待建设链路,原因是链路[2-4]和[2-6]的光缆资源闲置率接近 30%,需要通过新增链路的方式降低其上负载业务的运行风险。站点 103 未成为待建设站点,其原因是建设该站点将导致新增 4 条链路,建设成本明显增大,并且原有的拓扑结构能够满足现有业务和可靠性的需求。通过与图 2 对比可知,光缆资源闲置率提升了 9%,网络平均度上升了 0.43,但仍低于阈

表 3 两种仿真算法参数对比

算法名称	交叉概率 C_1	变异概率 C_2	克隆尺寸 N_i	进化代数 G_i	其他参数
自适应免疫算法	见表 2	见表 2	见表 2	1 000	见表 2
免疫算法	0.7	0.01	1:1	1 000	见表 2

表 4 某区域光网络仿真结果数据

(ω_1, ω_2)	网络建设成本 C	可靠性 R	站点成环率	成环站点度加权重	光缆资源闲置率
(0.1,0.9)	310	95.2%	100%	0.12	0.89
(0.2,0.8)	295	90.1%	100%	0.22	0.80
(0.3,0.7)	260	83.9%	100%	0.28	0.77
(0.4,0.6)	235	79.5%	98%	0.32	0.6
(0.5,0.5)	195	71%	91%	0.44	0.55
(0.6,0.4)	170	69%	88%	0.49	0.43
(0.7,0.3)	135	60.7%	74%	0.53	0.39
(0.8,0.2)	110	54%	66%	0.61	0.34
(0.9,0.1)	98	48%	52%	0.78	0.23

值4,故本次仿真获得的最优化网络规划方案在保证建设成本较低的情况下提高了业务可靠性和网络可靠性。

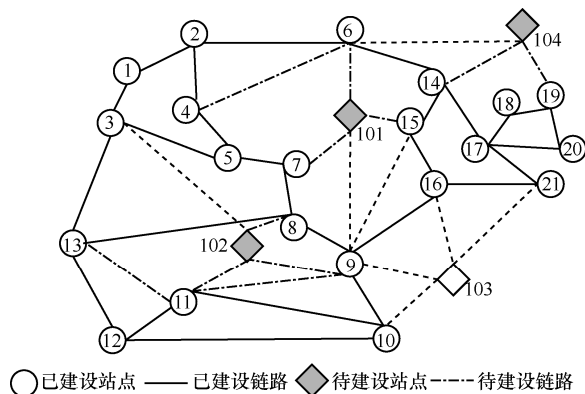


图3 规划后网络拓扑结构

由图4可知,进化代数接近200时,两种算法获得的网络规划方案建设成本相同;低于200时,免疫算法获得的网络规划方案成本更低;超过200时自适应免疫算法获得的网络规划方案成本更低,且建设成本比免疫算法低30%左右。进化代数接近400时,两种算法获得的网络规划方案可靠性相同;超过400时自适应免疫算法获得的网络规划方案可靠性更高,并且可靠性比免疫算法高出接近10%;低于400时则相反。造成上述现象的原因是本文采用的自适应免疫算法改进了免疫算法的交叉、变异算子,具有更好的全局收敛性,但收敛速度稍低于传统的免疫算法。

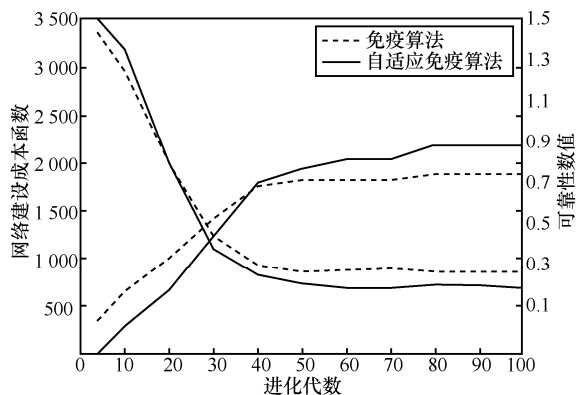


图4 网络规划模型子函数与进化代数关系

通过对以上仿真结果的分析 and 对比可知,本文设计的网络规划与评估模型能够根据不同场景下对可靠性和网络建设成本的不同需求,设计出符合实际需要的网络规划方案。并且,本文采用的自适应免疫算法始终采用最佳的繁衍参数,能够在有限的时间内达到收敛且得到全局最优解,具有较高的准确性和稳定性。

5 结束语

为提高光网络可靠性并降低运维成本,提出了一种面向多层次、多指标的光网络规划与评估方法。首先,构建了以提高可靠性、降低建设成本为目标的网络规划模型,并利用自适应免疫算法求解最优化网络规划方案。然后,构建了基于物理层、网络层、业务层3个层次的网络规划方案评估模型,并通过神经网络算法获得指标模型权重,从而全面、客观地评估网络规划方案。通过仿真可知,本文提出的光网络规划与评估方法能够提高网络可靠性和业务可靠性、降低网络建设成本,是提高网络管理水平、改善工作效率的有效途径。

参考文献:

- [1] 胥辉旗,朱平云,潘莉莉,等.基于高速光纤实时网的弹上信息传输技术研究[J].通信学报,2010(S1):161-165.
XU H Q, ZHU P Y, PAN L L, et al. Research on transmit technology for the missile system based on ultrahigh-speed real-time network[J]. Journal on Communications, 2010(S1): 161-165.
- [2] 谭红君,解亚敏,刘业君.可生存光纤—无线融合宽带接入网规划方法[J].电信科学,2016,32(5):138-145.
TAN H J, JIE Y M, LIU Y J. Planning approach of survivable fiber-wireless broadband access network [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 138-145.
- [3] 乔元志.城市光纤接入网的规划与设计[J].电信科学,2000,16(4):22-25.
QIAO Y Z. The research about optical access network planning in city[J]. Telecommunications Science, 2000, 16(4): 22-25.
- [4] 李文权,赵奇禄,林位株.接入网技术及佛山接入网规划建设[J].电信科学,1998,14(12):33-35.
LI W Q, ZHAO Q L, LIN W Z. Access network technology and



- planning and construction of Foshan access network [J]. Telecommunications Science, 1998, 14(12): 33-35.
- [5] 江龙才. 终端通信接入网规划建设与优化管理[J]. 电力系统通信, 2012(11): 21-26.
JIANG L C. Plan construction and optimization management of terminal communication access network[J]. Ower System Communication, 2012(11): 21-26.
- [6] 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(8): 159-164.
ZHAO J, GUO P, DENG H Z, et al. Modeling and analysis of performance reliability for communication networks based on traffic dynamics[J]. Journal on Communications, 2011(8): 159-164.
- [7] 刘红军, 胡晓峰, 邓文平, 等. 基于首选路由的 AS 重要性评估方法[J]. 软件学报, 2012(9): 2388-2400.
LIU H J, HU X F, DENG W P, et al. Technique of evaluating AS importance based on preferred route[J]. Journal of Software, 2012(9): 2388-2400.
- [8] MEHDI M, BIJAN R, AHMAD A. Improving linear discriminant analysis with artificial immune system-based evolutionary algorithms[J]. Information Science, 2011: 219-322.
- [9] GOMEZ-GARDENES J, ECHENIQUE P, MORENO Y. Immunization of real complex communication networks[J]. The European Physical Journal B, 2006(2): 259-264.
- [10] 徐杨, 袁峰, 林琪, 等. 基于混合人工免疫算法的流程挖掘事件日志融合方法[J]. 软件学报, 2018(2): 396-416.
XU Y, YUAN F, LIN Q, et al. Merging event logs for process mining with a hybrid artificial immune algorithm[J]. Journal of Software, 2018 (2): 396-416.
- [11] ROSSIGNOLI F, LIONZO A. Network impact on business models for sustainability: case study in the energy sector[J]. Software & Systems Modeling, 2018, 2 (3): 694-704.
- [12] 电力骨干光传输网络规划与运行质量评价系统用户手册[R]. 2016.
User manual of power backbone optical transmission network planning and operation quality evaluation system[R]. 2016.
- [13] 终端接入网规划和运维技术需要分析和评价机制研究报告[R]. 2018.
Research report on the mechanism of analysis and evaluation of terminal access network planning and operation and maintenance technology needs[R]. 2018.
- [14] 大容量光传输网络指标体系与质量评估研究报告[C]//中国电机工程学会电力通信专业委员会学术会议. 2013.
Research report on index system and quality assessment of large capacity optical transmission network[C]//Academic Meeting of

the Electric Power Communication Professional Committee of China Electrical Engineering Society. 2013.

[作者简介]



曹晓宏 (1991-), 女, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室硕士生, 主要研究方向为网络管理与通信软件。



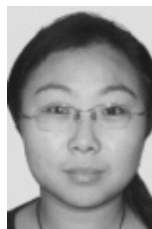
徐思雅 (1988-), 女, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室讲师, 主要研究方向为智能电力通信网络管理。



周桂平 (1981-), 男, 博士, 国网辽宁省电力有限公司高级工程师, 主要研究方向为设备状态监测及故障诊断。



王英杰 (1964-), 男, 北京国电通网络技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力信息通信技术。



于波涛 (1977-), 女, 北京国电通网络技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信信息管理。