

张帆, 闫秀秀, 李栋, 等. 矿井 EPON 生存性与冗余可靠性研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2907–2912. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0311

Zhang Fan, Yan Xiuxiu, Li Dong, et al. Research on survivability and redundant reliability in the mine EPON[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2907–2912. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0311

矿井 EPON 生存性与冗余可靠性研究

张帆^{1,2}, 闫秀秀¹, 李栋², 李亚杰¹

(1. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 现代教育技术中心, 北京 100083)

摘要: 针对现有矿井通信网络在可靠性设计方面考虑不足、网络系统容灾能力较弱问题, 分析了网络链路冗余度对矿井网络可靠性的影响, 建立了矿井以太无源光网络(EPON)的网络生存性模型, 并在此基础上提出了矿井 EPON 的树形、总线形和环形网络冗余结构, 进而推导出上述结构的网络生存性计算方程。实验结果表明, 矿井 EPON 的网络生存性与灾害强度、覆盖范围和网络结构有关, 灾害强度和覆盖范围越大, 网络生存性越小。在相同灾害强度和网络覆盖范围条件下, 冗余结构网络的可靠性优于无冗余网络, 双总线形冗余结构的生存性最高, 双环形冗余结构的生存性次之, 树形冗余结构的生存性最差。这对数字化矿井通信网络的可靠性预测和性能评估提供了理论依据。

关键词: 矿井通信; 以太网无源光网络; 冗余结构; 网络生存性; 网络可靠性

中图分类号: TD655.3 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2016)11-2907-06

Research on survivability and redundant reliability in the mine EPON

ZHANG Fan^{1,2}, YAN Xiu-xiu¹, LI Dong², LI Ya-jie¹

(1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Modern Educational Technology Center, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The existing mine networks do not have a high disaster recovery capability because most of them ignore reliability design or critical fault caused by conventional mine communication networks. A survivability model for the mine EPON was built considering the effect of network link redundancy on mine network reliability, and the tree, bus and ring network redundant structures in the mine EPON was proposed based on the model. Thus, an algorithm to evaluate the survivability of above structures was derived. Several numerical experiments demonstrate that the survivability of the mine EPON is related to the disaster intensity, network coverage and structure, which becomes worse with the greater intensity of disaster and network coverage. On the condition of the same intensity of disaster and coverage area, the reliability of redundant structure is better than that of no-redundant structure. Also, at the same network coverage of the mine EPON, the survivability of the dual-bus structure is better than that of the dual-ring and tree-shaped redundant structure. The network survivability of dual-ring structure is better than that of the tree-shaped redundant structure. These conclusions can be used to forecast and evaluate the reliability of digital mine communication network.

Key words: mine communication; Ethernet passive optical network; redundant structure; network survivability; network reliability

收稿日期: 2016-03-16 修回日期: 2016-07-14 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51134024); 国家高技术研究发展计划(863) 资助项目(2012AA062203); 中央高校基本科研业务基金资助项目(2014YJ01)

作者简介: 张帆(1972—), 男, 甘肃白银人, 副教授, 博士。Tel: 010-62331953, E-mail: zf@cumt.edu.cn

随着我国煤炭开采机械化、自动化和信息化程度的不断提高,先进、可靠、高效的矿井通信网络及技术装备在数字化矿井安全生产和应急救援中越来越发挥重要作用^[1-2]。基于以太网的无源光网络(EPON)具有频带宽、传输距离远、可靠性高、抗电磁干扰等优点,适宜部署在煤矿井下高温、高湿、谐波和电磁干扰严重等恶劣工作环境,已成为未来数字矿山通信网络光纤接入技术的发展趋势^[3-5]。然而,目前矿井 EPON 通信网络在可靠性设计方面考虑不足,网络系统容灾能力较弱。煤矿一旦发生瓦斯爆炸、冒顶塌方等灾害事故,就会造成通信光纤断裂,导致井下通信中断、安全监控系统失效等故障,这给煤矿安全生产和井下应急救援工作带来巨大威胁。因此如何提高矿井通信网络的生存性、可靠性和容灾能力,避免因通信网络中断导致安全生产事故的发生,是数字化矿井通信中需要研究和解决的重要问题。

关于网络生存性问题国内外已有许多研究成果。文献[6]对可生存性问题给出了定义,并提出了对于给定的逻辑拓扑与物理拓扑实现可生存性映射的充要条件。文献[7]提出了在逻辑拓扑上增加相应的链路来增强网络拓扑的可生存性,该文献提出了只要在增加物理拓扑上相应链路相对应的虚链路即可实现逻辑拓扑的可生存性映射。文献[8]提出了一种基于备选路由的蚁群优化方法,并比较了不同蚁群优化系统间的效率。

然而,需要指出的是以前的研究^[6-15]大多数以光纤以太网逻辑拓扑为研究对象,主要集中在静态映射和网络规划问题。陈虹等^[6]对树形拓扑结构的 EPON 接入网生存性做了定量分析,得出网络生存性与破坏强度之间的关系。但迄今为止,关于数字化矿井 EPON 生存性与可靠性方面的研究很少,因此,针对矿井巷道特殊环境下 EPON 树形、环形和总线形结构的生存性,需要进一步分析不同拓扑结构的矿井业务动态性变化给生存性问题研究提出的新要求。基于此,笔者通过研究矿井灾害强度与通信链路故障对网络生存性的影响,进而提出了数字化矿井 EPON 网络生存性模型,研究了不同拓扑结构及冗余方式下的网络生存性,并通过理论计算和仿真实验进行验证,以期对矿井通信网络可靠性预测和性能评估提供理论指导。

1 数字化矿井网络可靠性理论

网络生存性是评估网络通信系统性能可靠性的重要因素^[5-6]。根据文献[6]提出网络可靠性理论,作为表征网络可靠性参数,网络生存性可以用概率估

算法来度量。网络的生存性指网络对故障引起的业务中断和干扰的抵抗能力,即在灾害作用下,网络节点或链路在一定概率失效的条件下,网络完成正常通信的概率。因此,一般来说,导致井下通信网络发生故障的原因有链路故障和节点故障。链路故障发生在井下电缆或光纤断裂的情况下,而节点故障指网络节点上的设备发生故障。

在矿井 EPON 系统中,位于井上监控中心的光线路终端(OLT)以及井下巷道工作面的光网络终端(ONU)节点设备,节点故障容易修复,可通过提高节点设备的固有可靠性来增加网络可靠性,其对网络连通度影响很小。而矿井 EPON 系统的分光器(POS)所在的分级位置与分路数及链路的冗余度对网络连通度影响很大,井下光纤断裂的链路故障难以定位和修复。当发生链路故障导致输入光信号丢失或输入通道信道劣化(如:井下输入光信号功率过高或过低、误码率越限)时,必须通过冗余备份机制对井下光纤链路保护,以提高通信网络可靠性^[5,7,15]。研究表明^[17-21],当网络节点数一定时,只有增加通信链路的冗余度,才能提高网络的连通度和可靠性。

2 数字化矿井的网络生存性模型

考虑到井下巷道 ONU 各节点的上行链路都集中到井上 OLT 中心节点,而且矿井 EPON 通信网络在井下巷道呈树状分布,因此,建立矿井 EPON 树拓扑的生存性模型如图 1 所示。

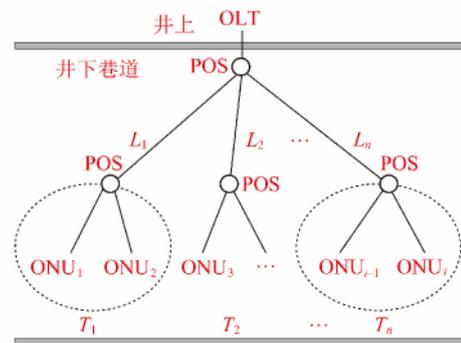


图 1 矿井 EPON 树拓扑的生存性模型

Fig. 1 Model for tree topology survivability of mine EPON

图 1 中,根节点通过 POS 与光链路 L_1, L_2, \dots, L_n 分别连接着子树 T_1, T_2 以及 T_n ,每个子树由 POS、光链路和多个叶子节点构成。其中,OLT 为矿井 EPON 的根节点; T_n 为第 n 个子树; $ONU_1, ONU_2, \dots, ONU_i$ 为树的叶子节点。

上述模型中,考虑矿井灾害强度与链路出现故障的概率之间的关系,在灾害作用下,设井下随机发生的灾害强度概率为 k ,并且均匀作用在矿井 EPON 通

信网络链路 l 上的故障概率为 $P(l)$, 当网络链路 l 分段长度 ΔL 趋近于 0 时, 则在长度为 ΔL 的链路上发生故障概率可表示为

$$P(\Delta L) = k\Delta L \quad (1)$$

由极限定理, 矿井 EPON 通信链路 l 上发生的故障概率进一步表示为

$$P(l) = \lim_{\Delta L \rightarrow 0} [1 - (1 - k\Delta L)^{l/\Delta L}] = 1 - e^{-kl} \quad (2)$$

在矿井发生灾害情况下, 则通信链路正常工作的概率为

$$p_s = 1 - P(l) = e^{-kl} \quad (3)$$

参照图 1 所示树拓扑生存性模型, 若矿井 EPON 通信网络中有 n 条链路, 故障等概率独立地发生在网络中任意链路上, 则当灾害发生时, m 段链路发生故障的概率分布为 $P(m) = C_N^m (1 - p_s)^m p_s^{N-m}$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。在矿井灾害作用下, 设链路 L_i 的正常通信概率为 p_i , 则在灾害条件下矿井 EPON 树能完成正常通信的概率为

$$S_T(k) = \sum_i p_i S_{T_i}(k) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

若矿井 EPON 以 OLT 为根节点的树形结构包括 m 个叶子节点 $\{ONU_1, ONU_2, \dots, ONU_m\}$, 其完成正常通信的概率为 $P(E_i) = p_1 p_2 \dots p_m$, 设网络覆盖半径为 L , 叶子节点与根节点 R 的通信距离均匀分布 $[0, L]$ 之间, 则式(4)可表示成

$$S_T(k) = \sum_m P(ONU_i) = \int_0^L P(ONU_i) dl \quad (5)$$

则矿井 EPON 树的生存性可通过式(6)计算, 即

$$S_T(k) = \int_0^L \frac{e^{-kl}}{L} dl = \frac{1}{kL} (1 - e^{-kL}) \quad (6)$$

式中 k 为矿井灾害强度; L 为网络覆盖半径。

3 矿井 EPON 冗余结构可靠性分析

3.1 树形冗余

如图 2 所示, 矿井 EPON 树形结构的网络冗余设计采用共享 ODN 链路冗余备份方案, 矿井 EPON 树形网络结构主要由 OLT, ODN(由若干 POS 和主干光纤、分支光纤构成) 和 ONU 组成。其中, 实线表示一条主光纤链路, 通过多级 POS 连接 OLT 和井下各节点 ONU 构成主链路, 虚线表示另一条备用光纤链路, 通过另一组 POS 连接 OLT 和各节点 ONU 构成备份链路。上述设计方案对 OLT 设备的 PON 口和 ODN 网络的主干光纤进行冗余备份, 其中 OLT 和每一个 ONU 均配置两个光纤接口, 通过双光纤链路及多个无源分光器连接。

对矿井 EPON 树形网络, OLT 到根节点 R 的距离为 d , 假设根节点 R 与叶子节点 ONU_i 的距离 l 均匀分

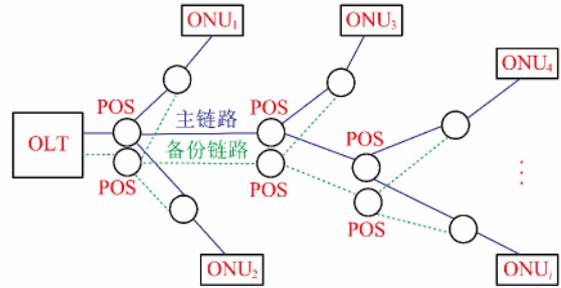


图 2 矿井 EPON 树形冗余结构

Fig. 2 Tree-shaped structure with redundancy of mine EPON

布于 $[0, L]$, 在灾害情况下, 考虑当主、备两路光纤同时出现故障时对 ONU_i 正常通信的影响, 则从 OLT 到根节点 R 的链路正常工作概率为

$$P_0(ONU_i) = 1 - (1 - p_s)^2 = 2e^{-kd} - e^{-2kd} \quad (7)$$

从 R 到 ONU_i 的链路正常工作概率为

$$P_1(ONU_i) = p_s = e^{-kl} \quad l \in [0, L] \quad (8)$$

在灾害条件下 ONU_i 正常完成通信的概率为

$$P(ONU_i) = P_0(ONU_i) P_1(ONU_i) \quad (9)$$

将式(9)代入式(6), 有

$$S_u(k) = \frac{(2e^{-kd} - e^{-2kd})(1 - e^{-kL})}{kL} \quad (10)$$

式中 $S_u(k)$ 为网络生存性; d 为无量纲参数, d 足够小时 $\lim_{d \rightarrow 0} e^{-kd} \approx 1 + d$ 。

3.2 双环形冗余

矿井 EPON 环形冗余网络为共享 ODN 的双环形结构, 如图 3 所示, 双环形网络是由一条主光纤和一条备份构成的双链路冗余^[3]。其中, 主光纤链路沿顺时针方向, 通过多级 POS 连接 OLT 和井下各节点 ONU 构成主环, 另一条备用光纤链路, 沿逆时针方向, 通过另一组 POS 连接 OLT 和各节点 ONU 构成备份环。此设计保证 ONU 所有终端能与 OLT 进行通信, 若某一链路失效对网络覆盖和平均路径长度的影响也很小, 当井下任意节点处 ONU 失效时不会影响其他 ONU, 能保护网络通信链路, 有效地解决传统光纤以太网环形网络的链路故障, 实现

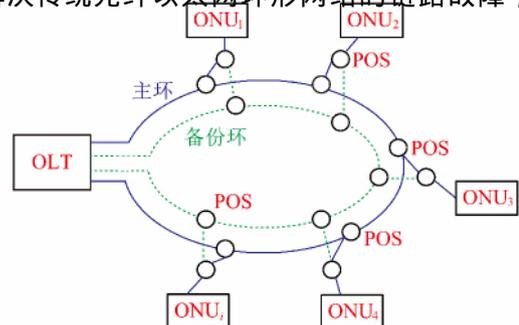


图 3 矿井 EPON 环形冗余结构

Fig. 3 Dual-ring structure with redundancy of mine EPON

光纤链路愈合和快速收敛,更好地提高链路故障的容错能力。双环网络结构虽然以增加节点的度为代价,但在可靠性和容错性能等网络性能方面都带来了很大的好处^[12-13]。

以 OLT 为根节点、ONU_i为分支节点的环形网络,考虑当主、备两路光纤同时出现故障时对 ONU_i正常通信的影响。设节点 ONU_i距离中心节点 OLT 的距离为 l_i 均匀分布在 $[0, L]$, 则其备份节点距离中心节点的距离为 $l'_i = L - l_i$ 。为方便计算,记环网链路中 ONU_i距最近的 POS 距离为 d ,此链路正常工作概率为 $p_d = 1 - e^{-kd}$ 。在灾害情况下,ONU_i主链路正常工作时概率为 $p_{si} = 1 - P(l_i) = e^{-kl_i}$,ONU_i备份链路正常工作时概率为 $p_{si'} = 1 - P(l'_i) = e^{-k(L-l_i)}$ 。在灾害条件下 ONU_i正常完成通信的概率为

$$P(\text{ONU}_i) = p_d [p_{si} + (1 - p_{si}) p_{si'}] \quad (11)$$

将式(11)代入式(6),有

$$S_u(k) = \frac{(2e^{-kd} - e^{-2kd})(3 - 4e^{-kL} + e^{-2kL})}{2kL} \quad (12)$$

3.3 双总线形冗余

矿井 EPON 总线形冗余网络结构,如图 4 所示,此结构是由两个链状网组合构成的总线形网络,所有井下 ONU 设备都连接在网络的支路末端^[3]。其中,实线表示一条主光纤链路,通过多级 POS 连接 OLT 和井下远端各节点 ONU 构成主链路,虚线表示另一条备用光纤链路,通过另一组 POS 连接 OLT 和井下各节点 ONU 构成备份链路。此设计对 OLT 设备和 ODN 网络的主干光纤进行冗余备份,其中 OLT 和每一个 ONU 均配置双光路传输接口,所有光通道均为双光纤及多个无源分光器。一条工作主光纤链路通过多级分光器连接 OLT 和各节点 ONU 的光接口;另一条备用光纤通过另一组分光器连接 OLT 和各 ONU 构成备份链路。其优点是:井下任意节点 ONU 失效时对其他 ONU 不造成影响,能有效保护矿井

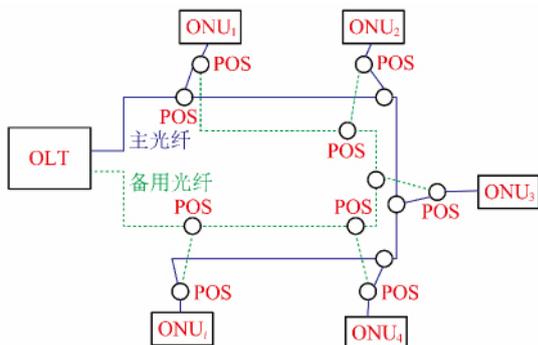


图 4 矿井 EPON 总线形冗余结构

Fig. 4 Dual-bus structure with redundancy of mine EPON

EPON 网络链路。

对矿井总线形 EPON 网络,存在 N 个叶子节点,叶子节点与根节点的距离可认为近似均匀分布。在灾害情况下,考虑当主、备两路光纤同时出现故障时对 ONU_i正常通信的影响。设叶子节点距离根节点的距离为 l_i ,则其备份节点距离根节点的距离为 $l'_i = L - l_i$,则 ONU_i主链路正常工作时概率为

$$p_{si} = 1 - P(l_i) = e^{-kl_i} \quad l \in [0, L] \quad (13)$$

ONU_i备份链路正常工作时概率为

$$p_{si'} = 1 - P(l'_i) = e^{-k(L-l_i)} \quad l \in [0, L] \quad (14)$$

在灾害条件下 ONU_i正常完成通信的概率为

$$P(\text{ONU}_i) = e^{-kl_i} + e^{-k(L-l_i)} - e^{-kL} \quad (15)$$

将式(15)代入式(6),有

$$S_u(k) = \frac{2(1 - e^{-kL})}{kL} - e^{-kL} \quad (16)$$

4 数值计算与实验分析

4.1 数值计算

为了分析比较矿井 EPON 系统的各种冗余方案的网络生存性,采用 VC 语言编程进行仿真计算。设 OLT 到根节点的距离 $d = 1$,受矿井灾害强度作用,当灾害强度分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 时,相应的网络覆盖范围从 15 ~ 60 变化时,3 种网络结构的网络生存性计算数值比较见表 1。

表 1 不同冗余结构的网络生存性

Table 1 Network survivability of different redundant structures

灾害强度	网络覆盖范围	冗余结构的生存性		
		树形结构	总线形结构	环形结构
0.1	15	0.525 2	0.845 5	0.786 1
0.1	20	0.403 8	0.682 2	0.560 8
0.2	25	0.192 1	0.390 6	0.287 5
0.2	30	0.124 3	0.265 9	0.186 4
0.3	35	0.089 1	0.199 9	0.133 7
0.3	40	0.077 6	0.169 9	0.121 4
0.4	45	0.053 1	0.143 3	0.089 6
0.4	50	0.042 7	0.114 3	0.063 9
0.5	55	0.034 8	0.096 8	0.052 3
0.5	60	0.028 8	0.087 9	0.046 2

通过表 1 中给出的数值计算结果比较发现,在同样灾害强度作用条件下,矿井 EPON 总线形冗余结构的网络生存性优于环形结构和树形冗余结构的网络生存性,总线形冗余结构的网络生存性最大,环形冗余结构的网络生存性次之,树形冗余结构网络生存性最差。

4.2 实验分析

为了验证网络生存性模型算法,采用 Matlab 软件对矿井 EPON 树形、环形和总线形网络冗余方案的网络生存性进行仿真测试。在网络节点个数相同情况下,分别对不同网络覆盖范围条件下 ($L = 5$ $L = 15$ $L = 40$ $L = 92$) 的矿井 EPON 树形、环形和总线形冗余结构的网络生存性测试。图 5 为不同冗余结构的网络生存性随矿井灾害强度变化情况。其中,横坐标表示矿井网络灾害强度, (即灾害发生的概率) 纵坐标表示不同网络结构的网络生存性。由图 5 可以看出,随着灾害强度的增大,网络的生存性减小。而且,网络的生存性与网络结构和网络覆盖范围有关,在相同的灾害强度作用下,网络覆盖范围越大,生存性越小。

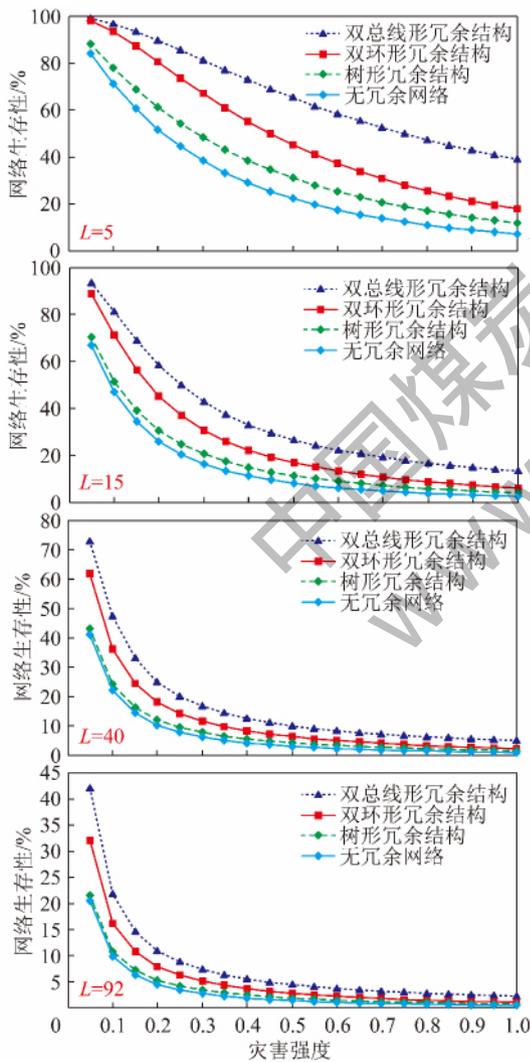


图 5 不同冗余结构的网络生存性比较

Fig. 5 Network survivability of different redundant structures

由图 5 可以看出,当网络覆盖范围 $L = 5$ 、灾害强度概率小于 0.2 时,矿井 EPON 不论采用冗余结构还是非冗余结构,网络生存率均大于 50%,因此,矿井

EPON 在发生小概率灾害条件下,网络可靠性较高,而且网络覆盖半径越小,生存性越强。在灾害强度不变的情况下,再分别考察 $L = 15$ $L = 40$ 及 $L = 92$ 时,不同冗余结构的网络生存性与网络覆盖范围之间的关系,可以发现,随着网络覆盖范围变大,网络生存性逐渐减小。而且随着灾害强度逐渐增大,双环形和树形冗余结构的网络生存性减小趋势明显,而双总线形冗余结构的网络生存性减小趋势缓慢。这主要是因为双总线形结构的生存性好,网络冗余备份能力较强,光纤链路发生断裂时切换愈合能力较强。

综合图 5 发现,在网络覆盖范围相同条件下,同样发生灾害时,双总线形冗余结构网络生存性最高,双环形冗余结构次之,而树形冗余和无冗余结构网络生存性最低。随着灾害强度逐渐增加,不论是双总线形、双环形、树形冗余结构还是无冗余网络,所有不同结构网络的生存性均呈减小趋势,但随着网络覆盖范围变大及灾害强度逐渐增强,网络生存性逐渐减小,而灾害强度小于 0.2 时,网络生存性下降趋势明显,而灾害强度在 0.2 以上,网络生存性下降开始呈现缓慢趋势。

综合上述数值计算和实验分析结果表明,提出的矿井 EPON 网络的生存性模型,数值理论计算与仿真实验结果基本吻合,由此得出总线形 EPON 网络结构的网络生存性高、冗余可靠性和健壮性较好。

5 结 论

(1) 数字化矿井通信网络的生存性与灾害强度、覆盖范围和网络结构有关。灾害强度和覆盖范围越大,网络生存性越小。在相同灾害强度和网络覆盖范围条件下,冗余结构的网络可靠性优于无冗余网络,双总线形冗余结构的生存性最高,双环形冗余结构的生存性次之,树形冗余结构的生存性最低。

(2) 总线形和环形网络结构的可靠性优于树形网络结构,链路冗余能力强,收敛时间短,能更好地保护矿井 EPON 通信链路和提高矿井通信网络生存性,有效提高了数字化矿井通信系统网络的可靠性。

参考文献:

[1] 孙继平. 煤矿安全生产监控与通信技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1925-1929.
Sun Jiping. Technologies of monitoring and communication in the coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1925-1929.

[2] 张帆, 赵思羽, 邹安平. 多模式矿井移动应急通信系统设计及性能分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 583-590.
Zhang Fan, Zhao Siyu, Zou Anping. Analysis on performance of mul-

- timode-based scheme for mine mobile emergency communication system[J]. Journal of China Coal Society 2015 40(11): 583-590.
- [3] MT/T 1131-2011 矿用以太网[S].
- [4] 陈荣光, 闫晓峰, 李娟. 矿用 GE-PON 系统的研究与实现[J]. 工矿自动化 2008(5): 44-47.
Chen Rongguang, Yan Xiaofeng, Li Juan. Research of mine-used GE-PON system and its implementation[J]. Industry and Mine Automation 2008(5): 44-47.
- [5] Sun Jiping, Zhang Fan. Robustness analysis of M-EPON system architecture in the mine communication [A]. Proceedings of 2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks[C]. 2011: 392-395.
- [6] Modiano E, Narulata A. Survivable lightpath routing: a new approach to the design of WDM-based networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 2002 20(4): 800-809.
- [7] Liu C, Ruan L. A new survivable mapping problem in IP over WDM networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007 25(3): 25-34.
- [8] Kaldirim E. Ant colony optimization for survivable virtual topology mapping in optical WDM networks [A]. Computer and Information Sciences[C]. 2009: 334-339.
- [9] 蔡庭, 黄善国, 李新, 等. 基于蚁群优化的 IP over WDM 光网络动态生存性映射算法[J]. 光子学报 2012 41(12): 1400-1404.
Cai Ting, Huang Shanguo, Li Xin, et al. Dynamic survivable mapping algorithm based on ant colony optimization in IP over WDM Networks [J]. Acta Photonica Sinica 2012 41(12): 1400-1404.
- [10] Garsva E. Computer system survivability modeling by using stochastic activity network [J]. Lecture Notes in Computer Science: Computer Safety, Reliability, and Security 2006 41(6): 71-84.
- [11] Guo B, Gu W, Huang S, et al. Dynamic survivable mapping in IP over WDM Network [J]. Journal of Lightwave Technology 2011 29(9): 1274-1284.
- [12] Chan C, Attygalle M. Generation and separation of closely separated dual baseband channels for provisioning of independent services in WDM-PON [J]. IEEE Photon. Technol. Lett. 2007, 19(16): 1215-1217.
- [13] Yeh C H, Huang T T, Chien H C, et al. Tunable S-band erbium-doped triple-ring laser with single-longitudinal-mode operation [J]. Optics Express 2007, 15(2): 382-385.
- [14] Han S, Manseop L. Burst mode penalty of AC coupled optical receivers optimized for 8B/10B line code [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2004, 16(7): 1724-1726.
- [15] Sheldon F, Potok T, Krings A. Critical energy infrastructure survivability: inherent limitations, obstacles, and mitigation strategies [J]. International Journal of Power and Energy Systems 2004, 2: 86-92.
- [16] 陈虹, 苏厉, 史国伟, 等. EPON 接入网的生存性[J]. 清华大学学报(自然科学版) 2004 44(7): 933-937.
Chen Hong, Su Li, Shi Guowei, et al. Survivability of EPON access networks [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology) 2004 44(7): 933-937.
- [17] Zhang Fan, Li Ming. Wavelet analysis method of harmonics and electromagnetic interference in coal mines [J]. Mining Science and Technology 2010 20(4): 576-580.
- [18] Sun Jiping, Zhang Fan. A novel mine mobile communication system without blind zones [J]. Applied Mechanics and Materials 2011, 58-60: 249-254.
- [19] Sun X Q, Xu K, Shen X, et al. A new hierarchical architecture for ubiquitous wireless sensing and access with improved coverage using CWDM-ROF links [J]. OSA Journal of Optical Communications and Networking 2011, 10(3): 790-796.
- [20] Yan X H, Ahmet Y, Narayanan S. A survey of vertical handover decision algorithms in fourth generation heterogeneous wireless networks [J]. Computer Networks 2010 54(11): 1848-1863.
- [21] 孙继平, 张帆. 矿井移动通信系统 [P]. 中国专利: ZL201010109518.0 2010-07-28.
Sun Jiping, Zhang Fan. Mine mobile communication system [P]. China patent: ZL201010109518.0 2010-07-28.