



## 基于动态故障树的 LTE-R 通信系统可靠性分析

虎丽丽, 徐 岩, 陶慧青

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

**摘 要:** LTE-R 无线通信系统可为铁路通信网络提供数据传输支持, 实现列车安全可靠运行, 然而目前针对该系统的可靠性与失效动态特性分析较少。提出一种基于动态故障树(DFT)的 LTE-R 系统可靠性分析方法。通过分析网络结构和服务质量指标对列车运行的影响, 给出 LTE-R 可靠性特征量定义, 从而建立 DFT 分析模型, 并采用 Markov 方法和二元决策图(BDD)方法分别计算单网、双网和射频拉远单元 3 种交织冗余结构的可靠性指标。分析结果表明, 双网交织冗余结构可靠性最高, 稳态有效度达到 99.999 86%, 单网交织冗余结构可靠性最低, 稳态有效度为 99.993 69%。

**关键词:** LTE-R 通信系统; 可靠性; 动态故障树; 冗余网络; 二元决策图

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



**中文引用格式:** 虎丽丽, 徐岩, 陶慧青. 基于动态故障树的 LTE-R 通信系统可靠性分析[J]. 计算机工程, 2020, 46(9): 205-212.

**英文引用格式:** HU Lili, XU Yan, TAO Huiqing. Reliability analysis of LTE-R communication system based on dynamic fault tree[J]. Computer Engineering, 2020, 46(9): 205-212.

## Reliability Analysis of LTE-R Communication System Based on Dynamic Fault Tree

HU Lili, XU Yan, TAO Huiqing

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**[Abstract]** LTE-R wireless communication system can provide data transmission support for railway communication network and realize the stable operation of the train, but at present there is little analysis done on its reliability and failure dynamic characteristics. In view of this situation, this paper proposes a reliability analysis method of LTE-R system based on Dynamic Fault Tree(DFT). By analyzing the influence of network structure and Quality of Service(QoS) indexes on train operation, the definition of LTE-R reliability characteristic quantities are given, and the DFT analysis models are established. The reliability indexes of the three interweaved redundant structures, including of single network, dual network and Radio Remote Unit(RRU) are calculated by Markov method and Binary Decision Diagram(BDD) method respectively. Analysis results show that the reliability of dual network interleaved redundant structure is the highest, the steady-state effectiveness reaches 99.999 86%, and that of single network interleaved redundant structure is the lowest, the steady-state effectiveness is 99.993 69%.

**[Key words]** LTE-R communication system; reliability; Dynamic Fault Tree(DFT); redundant network; Binary Decision Diagram(BDD)

DOI:10.19678/j.issn.1000-3428.0056042

### 0 概述

LTE-R 无线通信系统是继 GSM-R 通信系统之后应用于铁路干线的下一代移动通信系统<sup>[1]</sup>, 其为列车运行提供数据传输支持。当列车行驶速度较快或处于较恶劣环境时, 为保证车辆运行安全与铁路

通信网络正常工作, 无线通信系统应具备更高的时效性和可靠性。因此, 需要对 LTE-R 系统安全性进行分析、评估与符合性验证。

目前, 国内外关于 LTE-R 系统安全性的研究较少。文献[2]采用专家打分法和灰色算法对 LTE-R 系统安全性进行评价, 发现专家打分法中较多人为

基金项目: 国家自然科学基金(61461024)。

作者简介: 虎丽丽(1993—), 女, 硕士研究生, 主研方向为铁路通信安全; 徐 岩(通信作者), 教授; 陶慧青, 硕士研究生。

收稿日期: 2019-09-18 修回日期: 2019-11-16 E-mail: 1427255513@qq.com

因素会影响系统结构计算准确性。文献[3]采用静态故障树和 Markov 法对 LTE-R 系统手持设备、链路和切换等影响因素进行安全性分析,但由于未考虑所有设备影响,因此其计算结果不能真实反映整个 LTE-R 系统的安全性。文献[4]从网络安全角度对铁路通信系统进行安全性分析,发现基于长期演进(Long Term Evolution, LTE)的方案对下一代铁路移动通信系统具有适用性。文献[5]采用静态故障树和 Markov 法相结合的方法对列车之间的 LTE-R 系统进行可靠性分析,但未研究整体 LTE-R 系统。

静态故障树法通常用于核能、电子等关键领域 LTE-R 系统的可靠性分析<sup>[6]</sup>,但其不能体现出系统设备失效时故障修复、时序相关的故障处理以及热冷储备等动态特性。Markov 方法虽然能对系统动态特性的随机过程进行描述,但是随着系统规模和状态空间指数级增长,计算过程会趋于复杂和无序<sup>[7]</sup>。将传统静态故障树和 Markov 模型相结合可形成一种新的研究方法,即动态故障树(Daynam Fault Tree, DFT)分析法,该方法引入具有时序逻辑关系的动态逻辑门来扩充传统静态故障树,再进行动态故障树分析,从而能对动态系统进行可靠性和安全性分析<sup>[8]</sup>。

本文提出一种基于动态故障树的 LTE-R 系统可靠性分析方法。对系统冗余网络建立 DFT 可靠性分析模型,采用 Markov 方法和二元决策图(Binary Decision Diagram, BDD)方法分别计算模型的动态和静态部分,根据两部分计算结果对整个系统进行可靠性分析。

## 1 LTE-R 通信系统

### 1.1 LTE-R 系统网络结构

LTE-R 系统主要由演进分组核心网(Evolved Packet Core Internet, EPC)、演进通用陆基无线接入网(Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN)、用户终端设备(User Equipment, UE)等组成<sup>[3]</sup>,其网络结构如图 1 所示。其中:EPC 主要由移动管理实体(Mobility Management Entity, MME)、服务网关(Serving Gateway, SGW)、分组网关(Packet Gateway, PGW)、归属地用户服务器(Home Subscriber Server, HSS)、策略与计费规则功能(Policy and Charging Rules Function, PCRF)、GPRS 服务节点(Serving GPRS Support Node, SGSN)以及公共数据网(Public Data Networks, PDNs)服务等组成,其主要功能是实现业务承载与 LTE 接入<sup>[2]</sup>;E-UTRAN 由射频拉远单元(Radio Remote Unit, RRU)和基带处理单元(Building Baseband Unit, BBU)等 eNodeB 功能实体组成,用以支持 LTE-R 系统的无线网络覆盖。为实

现 LTE-R 系统无线网络对铁路干线的完全覆盖,RRU 和 BBU 采用光纤进行带状连接后安置在铁路两侧,RRU 之间采用交织冗余方式连接,RRU 和 BBU 之间存在环型、星型和线型 3 种组网方式<sup>[9]</sup>。

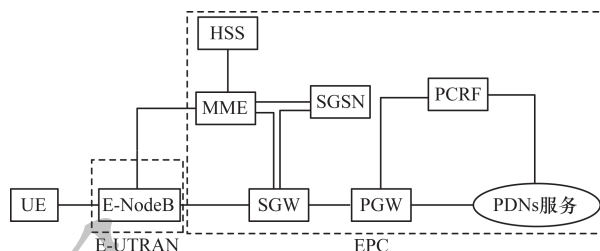


图 1 LTE-R 系统网络结构

Fig. 1 LTE-R system network structure

在列车高速行驶情况下, LTE-R 系统在技术要求范围内可接入下行峰值速率为 100 Mb/s 的无线宽带<sup>[10]</sup>。由于 LTE-R 系统为扁平化结构,因此其相较 GSM-R 系统故障发生率更低、传输时延更短,且组成的网络更有弹性。LTE-R 系统的高可靠性可通过冗余组网来实现。

### 1.2 LTE-R 系统冗余结构

#### 1.2.1 单网交织冗余结构

单网交织冗余结构是指在单网覆盖基础上,通过增加铁路干线周边相邻小区网络重叠覆盖面积而形成的冗余覆盖结构,如图 2 所示。若某个基站发生故障,则由相邻 2 个基站协作处理该失效基站承载的业务,列车不受单个基站故障的影响,仍能正常运行。

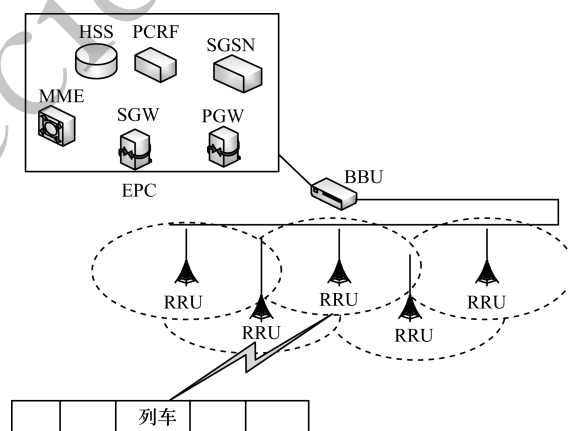


图 2 单网交织冗余结构

Fig. 2 Single network interleaved redundant structure

#### 1.2.2 双网交织冗余结构

为增加 LTE-R 系统可靠性<sup>[11]</sup>,铁路干线两边使用双网交织冗余结构进行网络覆盖,如图 3 所示。LTE-R 系统利用 2 套基站子系统进行布网,采用 1+1 EPC 冗余组网方式,2 个 EPC 互为备份且与 eNodeB 共同连接,若其中 1 个基站出现失效,则启用另 1 个基站以保证通信系统正常服务。

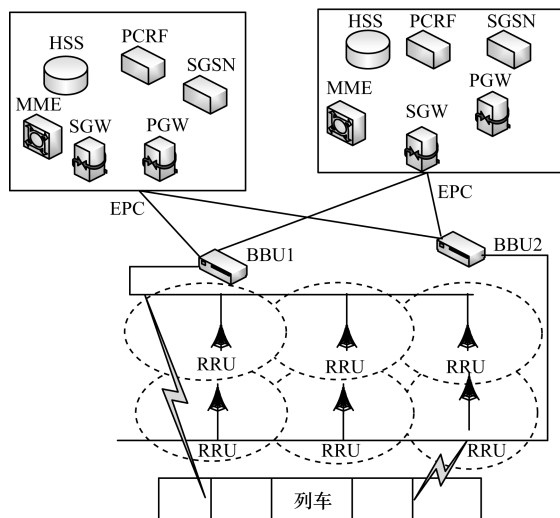


图 3 双网交织冗余结构

Fig. 3 Dual network interleaved redundant structure

### 1.2.3 RRU 交织冗余结构

RRU 交织冗余结构是指相邻 RRU 之间场强覆盖形成能满足越区切换重叠区的结构,其中,每个 RRU 场强可独立完成全覆盖<sup>[12]</sup>。假设铁路可使用频率资源为  $n$  MHz,则同频交织冗余结构中 RRU 频率相同,其信道带宽为  $n$  MHz,异频交织冗余结构中 RRU 频率不同,其信道有 2 个,带宽分别为  $n_1$  MHz 和  $n_2$  MHz,且  $n_1 + n_2 = n$ <sup>[13]</sup>。同频交织冗余结构和异频交织冗余结构的差别主要是网络结构不同。

#### 1) 同频交织冗余结构

同频交织冗余结构采用多个 RRU 形成冗余,若结构中某个 RRU 出现失效,则相邻 RRU 将代替其为基站提供服务,不会使业务出现中断。其中,冗余 RRU 无线信号频率相同会给终端设备造成同频干扰,而由于无线信号来自不同小区,BBU 在每个逻辑小区中只有 1 台,小区内 BBU 在失效或检修时会影响整个网络的可用性和可靠性,因此采用多点协作和分布式基站共小区等方法避免同频干扰。

#### 2) 异频交织冗余结构

异频交织冗余结构中 BBU 和 RRU 数量与同频交织冗余结构不同,其均采用冗余技术。根据异小区原理对 RRU 进行冗余布置,若某个 RRU 失效,则由相邻 RRU 代替其承担传输业务;若 BBU 失效,则由冗余 BBU 代替其提供业务,从而避免发生通信中断。图 4 为 RRU 异频交织冗余结构,其中,标号为 1、3、5 小区的 RRU 频率相同,标号为 2、4、6 小区的 RRU 频率相同,在 1、3、5 小区和 2、4、6 小区分别使用不同频率 RRU 是为了避免在无线信号覆盖重叠区产生同频干扰,同时简化网络配置,保障小区边缘速率<sup>[14]</sup>。与同频交织冗余结构相比,采用异频交织冗余结构可减少设备成本和维护工作量,因此,本文对 RRU 异频交织冗余结构的可靠性进行建模分析。

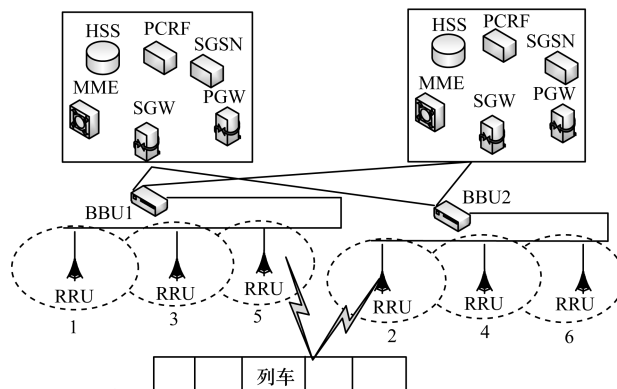


图 4 RRU 异频交织冗余结构

Fig. 4 RRU cross frequency interleaved redundant structure

## 2 改进的动态故障树分析法

### 2.1 动态故障树分析

在工业功能安全标准 IEC 61508、IEC 61511 中<sup>[15]</sup>,故障树分析法使用最广泛。故障树分析法包括静态故障树分析法和动态故障树分析法。其中,静态故障树分析法较常用,但该方法不能体现失效相关、序列相关和冗余等特性。动态故障树分析法虽然可描述出系统可靠性的动态特点,但该方法在系统规模增加时,其动态过程的复杂度会呈指数级增长,并引发状态组合空间爆炸问题,从而使计算难度加大。针对上述问题,本文建立 DFT 分析模型,对该模型中的动态和静态模块分别采用 Markov 方法和 BDD 方法进行计算和分析,最终结合两部分结果得出整个系统的可靠性。采用上述方法可减少系统可靠性的建模复杂度,提高分析效率,而且该方法结合了冷热备份、故障处理等多种动态特征,使得 LTE-R 系统的可靠性分析更加全面。

### 2.2 BDD 分析

BDD 分析是指将函数不交化图形的 2 个不同分支组成 1 个节点,该节点表示为  $(V, N)$ ,其中,  $V$  为节点集,  $N$  为指标集<sup>[16]</sup>。节点包括叶结点和非叶结点,叶节点有明确节点值,表示为  $\text{value}(v) \in \{0, 1\}$ ;非叶节点只有指标值  $\text{index}(v) \in N$ ,无明确节点值。将根据节点指标形成的对应关系映射到布尔变量中,对 BDD 中的  $(V, N)$ ,设  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ,给定布尔变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,若  $\text{index}(v_i) = j \in N$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ ,则  $v_i$  对应的布尔变量为  $x_j$ ,BDD 和布尔函数  $f = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$  相对应。

BDD 可用香农(Sannon)方法分解,计算公式为:

$$f(X) = x_i f_1 + \bar{x}_i f_0 \quad (1)$$

其中,  $f_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$ ,  $f_0 = f_0(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$ ,  $x_i$  为父节点,  $f_0$ 、 $f_1$  分别为二叉树结构的左、右分支。

### 2.3 Markov 状态分析

建立 LTE-R 系统 DFT 模型时引入逻辑门,逻辑门包括“与”门和“或”门等静态逻辑门,以及热储备

门和冷储备门等动态逻辑门<sup>[17]</sup>。上述逻辑门的符号和功能如表 1 所示。

表 1 不同逻辑门的符号和功能

Table 1 Symbols and functions of different logic gates

逻辑门名称	符号	功能
“与”门		输入事件 X、Y 都发生时,事件 Z 发生
“或”门		输入事件 X、Y 至少有 1 个发生时,事件 Z 发生
热储备门		事件 X 正常发生,事件 Y 热备,当 X、Y 都发生故障时,事件 Z 发生
冷储备门		事件 X 正常发生,事件 Y 冷备,当 X、Y 都发生故障时,事件 Z 发生

维修系统设备是提高系统可靠性常用方法之一, LTE-R 系统大部分元件都具有可修复性,可靠性指标的计算与元件失效率和修复率有关。当多个元件故障可修复时,根据其失效率是否相同,设元件失效率  $\lambda$  和元件修复率  $\mu$  均为常数且  $\mu$  相同,  $\Delta t$  为元件修复时间间隔,分 2 种情况进行 Markov 状态分析如下:

1) 失效率相同。假设 2 个元件失效率  $\lambda$  相同, 存在  $e_0, e_1, e_2$  3 种状态:  $e_0$  状态表示 2 个元件和整个系统都处于正常状态;  $e_1$  状态表示其中 1 个元件处于失效状态,但对系统无影响;  $e_2$  状态表示 2 个元件都处于失效状态并导致系统失效。失效率相同时 Markov 状态转移过程如图 5 所示。其中,各状态之间箭头上的表达式为状态转移概率。

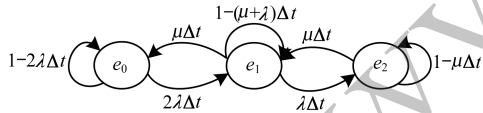


图 5 失效率相同时 Markov 状态转移图

Fig. 5 Markov state transition diagram with same failure rate

由图 5 得到如下表达式:

$$P_{e_0}(t + \Delta t) = P_{e_0}(t)P_{e_0e_0}(\Delta t) + P_{e_1}(t)P_{e_1e_0}(\Delta t) + P_{e_2}(t)P_{e_2e_0}(\Delta t) \quad (2)$$

$$P_{e_1}(t + \Delta t) = P_{e_0}(t)P_{e_0e_1}(\Delta t) + P_{e_1}(t)P_{e_1e_1}(\Delta t) + P_{e_2}(t)P_{e_2e_1}(\Delta t) \quad (3)$$

$$P_{e_2}(t + \Delta t) = P_{e_0}(t)P_{e_0e_2}(\Delta t) + P_{e_1}(t)P_{e_1e_2}(\Delta t) + P_{e_2}(t)P_{e_2e_2}(\Delta t) \quad (4)$$

对式(2)~式(4)求极限,得到矩阵如下:

$$[P'_{e_0}(t) \ P'_{e_1}(t) \ P'_{e_2}(t)] = [P_{e_0}(t) \ P_{e_1}(t) \ P_{e_2}(t)]Q \quad (5)$$

其中,  $P(t)$  为转移概率矩阵,  $Q$  为转移强度矩阵。  $Q$  表示为:

$$Q = \begin{bmatrix} -2\lambda & 2\lambda & 0 \\ \mu & -\lambda - \mu & \lambda \\ 0 & \mu & -\mu \end{bmatrix} \quad (6)$$

2) 失效率不同。假设存在 2 个元件,元件 1 失效率为  $\lambda_1$ ,元件 2 失效率为  $\lambda_2$ ,存在  $e_0, e_1, e_2, e_3, e_4$  5 种状态:  $e_0$  状态表示 2 个元件和整个系统都处于正常状态;  $e_1$  状态表示元件 1 处于正常状态,元件 2 处于失效状态,系统处于正常状态;  $e_2$  状态表示元件 1 处于失效状态,元件 2 处于正常状态,系统处于正常状态;  $e_3$  状态表示元件 1 处于维修状态,元件 2 处于待修状态,系统处于失效状态;  $e_4$  状态表示元件 1 处于待修状态,元件 2 处于在修状态,系统处于失效状态。当失效率不同时 Markov 状态转移过程如图 6 所示。

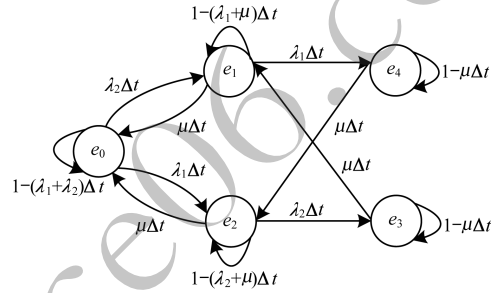


图 6 失效率不同时 Markov 状态转移图

Fig. 6 Markov state transition diagram with different failure rates

由图 6 得到如下表达式:

$$P_{e_0}(t + \Delta t) = P_{e_0}(t)P_{e_0e_0}(\Delta t) + P_{e_1}(t)P_{e_1e_0}(\Delta t) + P_{e_2}(t)P_{e_2e_0}(\Delta t) + P_{e_3}(t)P_{e_3e_0}(\Delta t) + P_{e_4}(t)P_{e_4e_0}(\Delta t) \quad (7)$$

$$P_{e_1}(t + \Delta t) = P_{e_0}(t)P_{e_0e_1}(\Delta t) + P_{e_1}(t)P_{e_1e_1}(\Delta t) + P_{e_2}(t)P_{e_2e_1}(\Delta t) + P_{e_3}(t)P_{e_3e_1}(\Delta t) + P_{e_4}(t)P_{e_4e_1}(\Delta t) \quad (8)$$

$$P_{e_2}(t + \Delta t) = P_{e_0}(t)P_{e_0e_2}(\Delta t) + P_{e_1}(t)P_{e_1e_2}(\Delta t) + P_{e_2}(t)P_{e_2e_2}(\Delta t) + P_{e_3}(t)P_{e_3e_2}(\Delta t) + P_{e_4}(t)P_{e_4e_2}(\Delta t) \quad (9)$$

$$P_{e_3}(t + \Delta t) = P_{e_0}(t)P_{e_0e_3}(\Delta t) + P_{e_1}(t)P_{e_1e_3}(\Delta t) + P_{e_2}(t)P_{e_2e_3}(\Delta t) + P_{e_3}(t)P_{e_3e_3}(\Delta t) + P_{e_4}(t)P_{e_4e_3}(\Delta t) \quad (10)$$

$$P_{e_4}(t + \Delta t) = P_{e_0}(t)P_{e_0e_4}(\Delta t) + P_{e_1}(t)P_{e_1e_4}(\Delta t) + P_{e_2}(t)P_{e_2e_4}(\Delta t) + P_{e_3}(t)P_{e_3e_4}(\Delta t) + P_{e_4}(t)P_{e_4e_4}(\Delta t) \quad (11)$$

对式(7)~式(11)求极限并化简后得到转移强度矩阵如下:

$$Q = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 & 0 \\ \mu & -(\lambda_1 + \mu) & 0 & 0 & \lambda_1 \\ \mu & 0 & -(\lambda_2 + \mu) & \lambda_2 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & -\mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu & 0 & -\mu \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 3 可靠性特征量定义

#### 3.1 系统有效度

有效度是系统在某个时刻  $t$  正常运行的概率,通常用  $A(t)$  表示,是表征系统性能的重要指标之一。有效度分为瞬时有有效度和稳态有效度。本文假设元件失效率  $\lambda$  为常数,各元件生命周期为指数分布。

**定义1(瞬时有有效度)** 在某个时刻  $t$ ,待修元件正常工作的概率为瞬时有有效度,其与  $t$  时刻下元件状态有关,反映了该时刻下元件有效性<sup>[18]</sup>。瞬时有有效度的表达式为:

$$A(t) = P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (13)$$

**定义2(稳态有效度)** 在稳态条件下,系统达到相对稳定运行状态时的概率为稳态有效度,其表达式为:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \sum_{i \in W} \pi_i \quad (14)$$

其中,  $\pi_i$  表示当系统在  $i$  状态时的概率,  $\pi_i (i \in W)$  满足如下条件:

$$\begin{cases} (\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_n) Q = (0, 0, \dots, 0) \\ \pi_0 + \pi_1 + \dots + \pi_n = 1 \end{cases} \quad (15)$$

对于1个元件,其稳态有效度表示为:

$$A = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (16)$$

当2个元件失效率相同时,系统的稳态有效度表示为:

$$A = \pi_0 + \pi_1 = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2} \quad (17)$$

当2个元件失效率不同时,系统的稳态有效度表示为:

$$A = \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 \quad (18)$$

#### 3.2 故障频度

**定义3(故障频度)** 故障频度指在  $[0, t]$  时间段内,系统发生的故障总次数除以总时间,用符号  $M(t)$  表示,其表达式为:

$$M = \sum_{k \in W} \pi_k \sum_{k \in F} q_{kj} \quad (19)$$

其中,  $\pi_k (k = 1, 2, \dots, w)$  由式(15)计算得到,  $q_{kj}$  为矩阵  $Q$  中的元素。

#### 3.3 其他指标

**定义4(平均开工时间)** 平均开工时间 (Mean

Up Time, MUT) 是系统在稳定状态下保持正常运行的平均时间。

**定义5(平均故障时间)** 平均故障时间 (Mean Down Time, MDT) 是系统在稳定状态下发生故障的平均时间。

**定义6(平均故障间隔时间)** 平均故障间隔时间 (Mean Time Before Failure, MTBF) 是系统发生多次可修复故障,在每次故障维修后正常运行的平均时间。

**定义7(平均故障修复时间)** 平均故障修复时间 (Mean Time To Repair, MTTR) 是系统从发生故障到完成修复故障之间的平均时间<sup>[15]</sup>。

在使用 DFT 模型计算时,将可修复系统动态故障子模块的 MUT、MDT 指标转换为 MTBF、MTTR 指标后进行迭代计算。各指标之间的关系可表示为:

$$MUT = \frac{A}{M} \quad (20)$$

$$MDT = \frac{1 - A}{M} \quad (21)$$

### 4 计算结果与分析

由于目前国内 LTE-R 系统主要应用于朔黄铁路和京沈铁路试验段,在其他铁路干线应用较少,而朔黄铁路主要以货运为主,因此本文以京沈铁路试验段为研究对象调查 LTE-R 系统产生故障的原因。京沈铁路 LTE-R 试验段全长约 170 km,从乌兰木图站出发,途经阜新站、黑山北站、新民北站到达沈阳西站。LTE-R 系统失效主要由 EPC、eNodeB、UE、车地之间无线传输链路等失效引起。在车地之间无线传输链路中,根据列车通信系统列控业务建立车地通信系统服务质量 (Quality of Service, QoS) 指标<sup>[19-21]</sup>,该指标对列车运行的影响如表 2 所示。其中,不同指标衡量因素不同,横杠表示该项指标参数不存在。

表 2 QoS 指标对列车运行的影响

QoS 指标	对列车行车影响	通信中断时间/s	中断概率
连接建立时延	对列车注册启动、列控等级变换产生影响,但对正常行车不会产生影响	<8.5	—
连接建立失败率	影响连接建立的次数	≤10.0	<1.0 × 10 <sup>-4</sup>
无线链路中断	使得通信中断,致使列控系统降级	—	≤1.0 × 10 <sup>-2</sup>
传输时延	车地传输形成时延,不影响行车	≤0.5	—
传输干扰	不影响列控系统正常运行	<0.8	—
越区切换失败率	切换失败致使链路中断需要重新建立连接,使得通信超时	<1.0	<5.0 × 10 <sup>-3</sup>

由表 2 可以看出,当列车在正常行驶状态下,影响列车运行的主要因素是无线链路中断和越区切换失败,其他因素对列车运行影响较小,在对系统可靠性指标进行计算时可忽略不计。结合 LTE-R 系统网络结构,运用 DFT 对 LTE-R 系统进行建模。根据文献[2,4]及大唐移动通信设备公司所提供的 LTE-R 系统设备失效率,对 LTE-R 系统单网、双网与 RRU 交织冗余结构可靠性指标进行对比分析。平均故障修复时间为 0.5 h, LTE-R 系统中不同设备失效率如表 3 所示。

表 3 LTE-R 系统中不同设备失效率

Table 3 Failure rates of different equipments in LTE-R system

设备名称	失效率	设备名称	失效率
EPC	$2.63 \times 10^{-6}$	UE	$1.00 \times 10^{-5}$
BBU	$3.33 \times 10^{-6}$	RRU	$5.00 \times 10^{-6}$
无线链路	$2.78 \times 10^{-6}$	越区切换	$5.00 \times 10^{-3}$
MME	$5.00 \times 10^{-6}$	HSS	$5.00 \times 10^{-6}$
PGW	$5.00 \times 10^{-6}$	SGW	$5.00 \times 10^{-6}$
PCRF	$5.00 \times 10^{-6}$		

#### 4.1 单网交织冗余结构可靠性指标计算

图 7 为单网交织冗余结构可靠性 DFT 模型框架。使用动态逻辑门描述各子系统的交互部分故障,图 7 中圆框表示底事件,方框表示顶事件或中间事件。其中,B1 模块~B2 模块、C1 模块~C5 模块为故障树底事件,B3 模块~B4 模块为故障树中间事件,A1 模块为故障树顶事件。在该结构中系统故障主要由 EPC、UE、RRU、BBU、越区切换及链路等失效引起。假设各设备修复率  $\mu = 2$ 。在该模型中,交织冗余的 BBU 和 RRU 数量分别为 1 和 6,不同 RRU 之间采用环型结构连接,光纤链路失效率为 0。由式(2)~式(6)计算得到 B3 模块失效率为  $1.11 \times 10^{-5}$ ,将该模型中所有设备失效率代入式(1)可得单网交织冗余结构失效率为  $3.15 \times 10^{-5}$ ,稳态有效度为 99.993 69%。

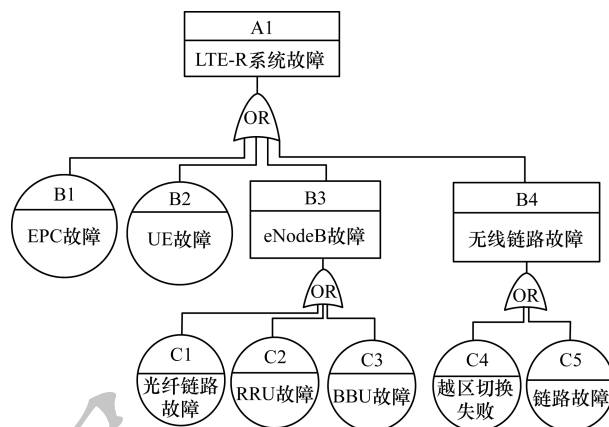


图 7 单网交织冗余结构可靠性 DFT 模型框架

Fig. 7 Framework of DFT model for reliability of single network interleaved redundant structure

#### 4.2 双网交织冗余结构可靠性指标计算

图 8 为双网交织冗余结构可靠性 DFT 模型框架。其中,C1 模块~C4 模块、C7 模块~C8 模块、D1 模块~D6 模块为故障树底事件,B1 模块~B4 模块、C5 模块~C6 模块为故障树中间事件。将 LTE-R 系统中不同设备失效率代入式(6)、式(15)和式(17)~式(21)得到:B1 模块平均开工时间为  $1.44 \times 10^{11}$  h,平均故障时间为 0.5 h,失效率为  $6.93 \times 10^{-12}$ ;B2 模块平均开工时间为  $1.00 \times 10^{10}$  h,平均故障时间为 0.5 h,失效率为  $1.00 \times 10^{-10}$ 。B3 模块冗余子网 A、B 分别采用环型、星型结构,其 RRU 和 BBU 数量均分别为 6 和 1,由式(2)~式(4)、式(11)计算得到冗余子网 C5 的失效率为  $1.11 \times 10^{-9}$ ,冗余子网 C6 的失效率为  $1.30 \times 10^{-9}$ ,按照上述计算方法得到 B3 模块的平均开工时间为  $6.81 \times 10^{17}$  h,平均故障时间为 0.5 h,并分别作为平均故障间隔时间与平均故障修复时间代入式(1)进行迭代计算,得到双网交织冗余结构失效率为  $2.78 \times 10^{-6}$ ,稳态有效度为 99.999 86%。

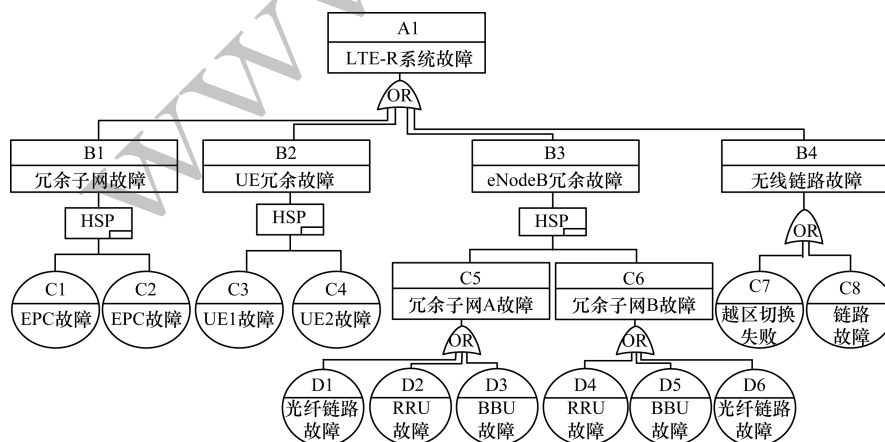


图 8 双网交织冗余结构可靠性模型框架

Fig. 8 Framework of DFT model for reliability of dual network interleaved redundant structure



### 4.3 RRU 交织冗余结构可靠性指标计算

图 9 为 RRU 交织冗余结构可靠性 DFT 模型框架。其中,B2 模块、C1 模块~C2 模块、C5 模块~C6 模块、D1 模块~D4 模块为故障树底事件,B1 模块、B3 模块~B4 模块、C3 模块~C4 模块为故障树中间事件。由于 RRU 与 BBU 之间以环型结构连接,因此光纤链路失效率为 0。EPC 采用热备动态冗余方式,由式(2)~式(6)和式(17)~式(21)计算得到 B1 模块平均开工时间为  $1.44 \times 10^{11}$  h,平均故障时间为 0.5 h。冗余子网 A、B 中 RRU 和 BBU 数量分别为 6 和 1,由式(7)~式(12)计算得到冗余子网 A、B 的失效率均为  $1.11 \times 10^{-9}$ ,由式(2)~式(6)、式(15)和式(17)~式(21)计算得到 B3 模块平均开工时间为  $9.00 \times 10^8$  h,平均故障时间为 0.5 h,并分别作为平均故障间隔时间与平均故障修复时间代入式(1)进行迭代计算,得到 RRU 交织冗余结构失效率为  $1.28 \times 10^{-5}$ ,稳态有效度为 99.997 44%。

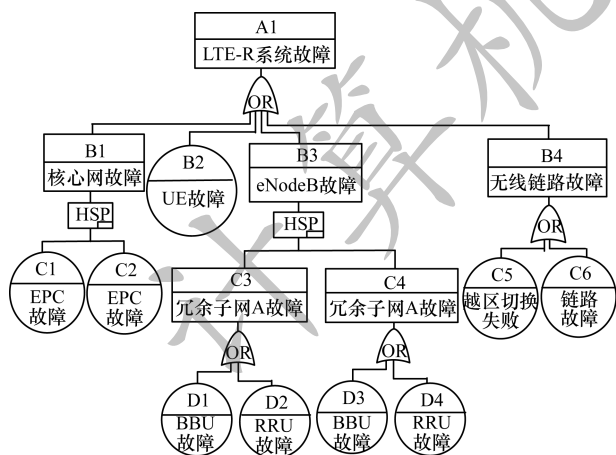


图 9 RRU 交织冗余结构可靠性模型框架

Fig.9 Framework of DFT model for reliability of RRU interleaved redundant structure

### 4.4 结果分析

由表 4 可以看出,在双网交织冗余结构中,EPC、eNodeB 和 UE 均为并行冗余结构,在 eNodeB 中 RRU 和 BBU 采用星型和环型结构,提高了网络可靠性,其稳态有效度在 3 种结构中最高,但该结构使用设备较多,会增加成本费用。此外,双网交织冗余结构以接入网为切入点进行冗余以增加系统可靠性,由于同站址双网交织冗余结构的 2 套基站在同一个站址中,而异站址双网冗余结构的网络中的 2 套基站安装在不同的地址,因此同站址的安装成本比异站址低。但如果 2 套基站在同一个站址中,则冗余的接入网在自然灾害发生时会出现故障,并导致该

区域内无线网络停止服务,且同站址模式存在站址选择困难、设备安装成本高等问题。如果 2 个基站安装在不同站址,则不仅在一定程度上增加系统容灾能力,还能提升系统可靠性。单网交织冗余结构的稳态有效度比其他 2 种结构低,一旦 EPC、UE 和 eNodeB 等设备出现故障,将会引起网络瘫痪。此外,在单网冗余交织覆盖下,相邻两个小区切换处存在 3 个基站的信号,会产生乒乓效应增加、越区切换等问题,但单网交织冗余结构简单,且成本较低。RRU 交织冗余结构的稳态有效度位于其他两种结构之间,该结构 eNodeB 中的 RRU 和 BBU 采用环型结构来保证网络可靠性,较单网交织冗余结构可靠性更高、系统更安全。

表 4 不同网络结构的可靠性指标结果  
Table 4 Reliability index results of different network structures

网络结构	失效率	稳态有效度/%
单网交织冗余结构	$3.15 \times 10^{-5}$	99.993 69
双网交织冗余结构	$2.78 \times 10^{-6}$	99.999 86
RRU 交织冗余结构	$1.28 \times 10^{-5}$	99.997 44

## 5 结束语

本文提出一种基于动态故障树的 LTE-R 通信系统可靠性分析法。针对 LTE-R 系统单网、双网和射频频远单元 3 种交织冗余结构建立可靠性 DFT 模型,采用 Markov 方法和二元决策图方法分别计算模型的静态和动态部分,根据计算结果得到整个系统的可靠性指标。分析结果表明:双网交织冗余结构可靠性最高,单网交织冗余结构可靠性最低。在未来 LTE-R 系统布网选择中,可根据铁路场景的不同要求选用相应冗余组网方式。随着 LTE-R 系统在铁路干线的全面运用,下一步将采用实测数据对其进行可靠性分析,以使结果更准确,同时还将结合铁路通信网络空间安全进行系统可靠性分析。

### 参考文献

- [1] ZHANG Yi. Evolvement of railway communication system to LTE-R system[J]. Railway Signalling and Communication Engineering, 2016, 13(1): 18-20. (in Chinese)  
张怡. 简谈铁路通信系统向 LTE-R 的发展与演进[J]. 铁路通信信号工程技术, 2016, 13(1): 18-20.
- [2] GAO Zhiyuan. The analysis of communication reliability of LTE-R system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)  
高志远. LTE-R 通信系统可靠性分析与研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

- [3] TENG Hui. Research on safety design and evaluation technology of LTE-R communication system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)  
滕辉. LTE-R 通信系统安全设计与评估技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [4] SUN Bin, DING Jianwen, LIN Siyu, et al. Comparison analysis on frangible solutions for LTE based next generation railway mobile communication system[J]. ZTE Communications, 2019, 17(1): 56-62.
- [5] MA Detu. Study on the train to train direct communication technology and reliability base on the LTE-R[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018. (in Chinese)  
马得途. 基于 LTE-R 的车车通信技术及可靠性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- [6] HUANG Zhiqiu, XU Bingfeng, KAN Shuanglong, et al. Survey on embedded software safety analysis standards, methods and tools for airborne system[J]. Journal of Software, 2014, 25(2): 200-218. (in Chinese)  
黄志球, 徐丙凤, 阚双龙, 等. 嵌入式机载软件安全性分析标准、方法及工具研究综述[J]. 软件学报, 2014, 25(2): 200-218.
- [7] WAN Weijian, XIE Jian, GE Xiaoyu. Analysis method for aeroengine reliability based on dynamic fault tree[J]. Computing Technology and Automation, 2019, 38(2): 1-7. (in Chinese)  
宛伟健, 谢健, 葛晓瑜. 基于动态故障树的航空发动机可靠性分析方法研究[J]. 计算技术与自动化, 2019, 38(2): 1-7.
- [8] DUGAN J B, BAVUSO S J, BOYD M A. Dynamic fault tree models for fault tolerant computer systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1992, 41(3): 363-377.
- [9] SHEN Yu, WANG Xinxin. Research on key technologies of LTE-R communication system[J]. Automation and Instrumentation, 2017, 37(11): 143-145. (in Chinese)  
沈瑜, 王新新. LTE-R 通信系统的关键技术研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2017, 37(11): 143-145.
- [10] BAI Guoyan. Research on the reliability of LTE system[J]. Scientist, 2016, 4(8): 44-45. (in Chinese)  
白国岩. LTE 系统的可靠性研究[J]. 科学家, 2016, 4(8): 44-45.
- [11] LI Peng. LTE-R technology application research[J]. Automation and Instrumentation, 2014, 34(3): 11-12. (in Chinese)  
李鹏. LTE-R 技术应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2014, 34(3): 11-12.
- [12] LI Li. Research on redundancy schemes of GSM-R radio network[J]. Railway Signalling and Communication Engineering, 2015, 12(2): 29-33. (in Chinese)  
李莉. GSM-R 无线网冗余方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2015, 12(2): 29-33.
- [13] WANG Fang, PANG Mengmeng. Research on the application of RRU interleaving redundancy in LTE-R network[J]. Railway Signalling and Communication Engineering, 2017, 14(6): 44-46. (in Chinese)  
王芳, 庞萌萌. RRU 交织冗余在 LTE-R 组网中的应用研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2017, 14(6): 44-46.
- [14] LIANG Yiqun, WU Lianbin, LIN Wei. Research on redundant networking technology of railway LTE-R network[J]. Railway Signalling and Communication, 2018, 54(10): 40-43. (in Chinese)  
梁轶群, 吴连斌, 蔺伟. 铁路 LTE-R 网络冗余组网技术研究[J]. 铁道通信信号, 2018, 54(10): 40-43.
- [15] JIAN Jie, WANG Lide, JIN Jianyu, et al. Reliability analysis of train communication network redundancy based on Ethernet[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(2): 76-83. (in Chinese)  
简捷, 王立德, 靳建宇, 等. 基于以太网的列车通信网络冗余结构可靠性分析[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(2): 76-83.
- [16] FENG Fenling, NIU Tiancong. Risk evaluation for operational requirements of CR express with BDD-based method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(12): 3281-3287. (in Chinese)  
冯芬玲, 牛天聪. 基于二元决策图的中欧班列运营风险评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(12): 3281-3287.
- [17] ZHANG Wentao. Reliability research on ATP of high speed railway based on dynamic fault tree[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014. (in Chinese)  
张文韬. 基于动态故障树的高速铁路 ATP 系统可靠性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [18] WANG Jinwu. Fundamentals of reliability engineering[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)  
王金武. 可靠性工程基础[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [19] XIONG Xuelai. Analysis of GSM-R network failure and its influence on CTCS-3[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)  
熊雪莱. GSM-R 网络失效性分析及其对 CTCS-3 的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [20] XING Xiaoqin. Research on key technology about inspecting and monitoring data analysis of GSM-R for high speed railway[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014. (in Chinese)  
邢小琴. 高速铁路 GSM-R 网络检测/监测数据分析关键技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
- [21] DING Xun, CHEN Xin, JIANG Wei. The analysis of GSM-R redundant network and reliability models on high-speed railway[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Electronics and Information Engineering. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 154-158.