

文章编号: 1005-0523(2016)04-0061-06

高速铁路无线闭塞中心(RBC)核心单元安全评估

刘子英, 尹楠, 张利华

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:无线闭塞中心对高速列车进行间隔控制和下达移动授权,是保证高速铁路信号系统高效、稳定、准确工作的关键因素。文章介绍了无线闭塞中心的系统配置结构以及与外部接口之间信息的交互,并以此为基础对无线闭塞中心进行分层和模块化,使用 SIMFIA 安全评估软件构建无线闭塞中心模型。对模型进行参数设置后,运用 SIMFIA 软件的 SAFETY 功能生成模型的故障树以及各模块节点的故障概率,并以此进行系统的安全性分析,达到安全评估的目的。

关键词:高速铁路;无线闭塞中心;SIMFIA;故障树;建模仿真;安全评估

中图分类号:U284.92

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.04.010

高速铁路的列车运行控制系统在提高铁路运输效率和保障列车运行安全方面发挥了重要作用,与人民群众生命财产和铁路行车安全密切相关。作为我国高速铁路最常用的列控系统,CTCS-3 级列控系统采用无线通信的方式(如 GSM-R)传输信息,并由地面子系统和车载子系统两个部分构成。无线闭塞中心(radio block center, RBC)作为我国高速铁路列控系统中地面子系统的核心设备,主要用于接收车载子系统和其他相邻地面子系统等发出的车道占用情况、高速列车行驶状态、铁路车站联锁进路数据以及临时的限速命令等数据。RBC 通过对接收到的数据处理计算给出控车所需的控制信息,如线路的静态信息、临时限速以及行车许可等,再由铁路专用的 GSM-R 无线通信系统发送给列车上的车载子系统^[1-3]。

无线闭塞中心的仿真研究一般使用 SPNP 软件和 UPPAAL 软件工具,国内外学者对此做了大量工作,并取得一定的成果。文献[4]以 SPNP 软件作为建模工具,以 Petri 网分层技术为基础,创造性的将 RBC 系统划分为底层模型和顶层模型。文献[5]在文献[4]的基础上,通过结合马尔可夫随机过程和随机 Petri 网的方法,对 RBC 系统的实时性进行了分析研究。文献[6]以 UPPAAL 软件作为实时建模仿真工具,以时间自动机理论为基础,对 RBC 系统进行分析建模,并对模型进行了验证。而 SIMFIA 安全分析软件与 SPNP、UPPAAL 及其他类似的软件相比:在建立模型时简便快捷,输入系统的状态转移模式、故障的传播方式以及相关的系统数据后, SIMFIA 软件就可以对该系统建立模型;在对模型进行安全性分析时,所需的故障树和可靠性框图均可以由软件自动生成,不再需要手工的进行绘制,模型有关的 RAMS(可靠性、可用性、可维修性、安全性)结果也都可以由软件自动的生成,并且可以对模型进行动态的仿真分析。

因此,使用 SIMFIA 软件可以方便快捷的对系统建立模型并对模型进行相应的安全性计算分析。本文基于中国高速铁路建设的实际需要,以 RBC 为具体研究对象,在查找数据资料的基础上,对 RBC 系统结构建立相应的模型并对模型的相关参数进行设置;基于 SIMFIA 软件的安全分析功能,对 RBC 模型进行系统的安全性分析。

收稿日期:2016-03-08

基金项目:江西省研究生创新专项资金项目(YC2014-S246)

作者简介:刘子英(1964—),女,教授,硕士,主要研究方向为轨道交通电气化与自动化。

1 MBSA 方法及在铁路中的应用

1.1 MBSA方法概述

目前国际上较为流行的 RAMS(可靠性、可用性、可维修性、安全性)分析研究方法是基于模型的安全分析(MBSA)方法。SIMFIA 即是基于该方法的基础上,适用于复杂系统 RAMS 的综合建模仿真分析的一款软件。与传统的安全分析如故障树分析方法不同,MBSA 是在一个形式化的模型上对系统的故障状态和正常状态进行描述,再通过各个部件的相互逻辑关系和联系,得到系统特性。MBSA 与传统安全方法目标一致,但 MBSA 更像是一类安全分析方法。

1.2 MBSA 在铁路中的应用

安全通信标准 EN50159 作为欧洲铁路信号安全标准系列之一,与安全硬件 EN50129、RAMS 标准 EN50126 相互关联。国/铁标 GB/T24399 由 EN50159 衍生而来,两者互为等价标准,主要应用于铁路信号、通信以及处理系统技术安全领域。铁路领域的安全评估工作主要遵循的是安全苛求系统开发 V 模型,为了支持 MBSA 在铁路安全领域的应用,传统的“V”型安全性流程被修改,从而使得安全性分析活动植根于形式化的系统与故障模式中。铁路安全领域中 MBSA 的过程是:

- 1) 对系统进行抽象化:对系统的结构、功能、层次、输入输出进行分析和抽象化,确保能完整的描述系统各方面情况;
- 2) 对系统进行形式化建模;
- 3) 定义失效模式,建立故障模型,配置各个组件失效的逻辑关系;
- 4) 扩展模型:在 MBSA 中不仅需要考虑元件(系统)的正常工作模式(状态),还需要考虑其失效模式(状态);
- 5) 得出安全性分析结果,如 FTA、FMEA 等。

2 RBC 系统结构

2.1 RBC 系统配置

RBC 是以信号故障安全计算机为基础的系统,作为高速铁路列控系统的核心,其遵循故障-安全的原则。应用软件采用 N 版本冗余技术,对表决和运算采用不同的策略^[7-8]。无线闭塞单元(radio block unit, RBU)由安全故障处理软件、操作系统、硬件平台以及网络系统等部分组成,是 RBC 整体系统中非常重要的逻辑处理单元。RBC 维护终端的作用是向操作人员提供获取 RBC 系统文件的接口,操作人员通过该接口将存放在 RBU 中的系统诊断数据和日志文件下载并进行分析,达到监视整个 RBC 系统的目的。RBC 本地维护终端是为了方便操作人员对 RBC 进行登录与注销,使其直接对 RBC 进行诊断和维护工作。司法记录单元(RBC juridical recorder unit,R-JRU)负责对 RBC 系统中的接口信息、控制信息等进行记录并提供司法依据。接口服务器 (versatile interface adapter, VIA)是实现 RBC 与 R-JRU、CTC、RBC 本地维护终端之间信息交互的通话路由。RBC 的系统配置如图 1 所示^[9]。

2.2 RBC 的外部接口

RBC 与外部接口连接图如图 2 所示。

RBC 与调度集中(CTC)设备接口:CTC 与 RBC 的接口服务器设置在 CTC 系统调度中心,服务器的一端

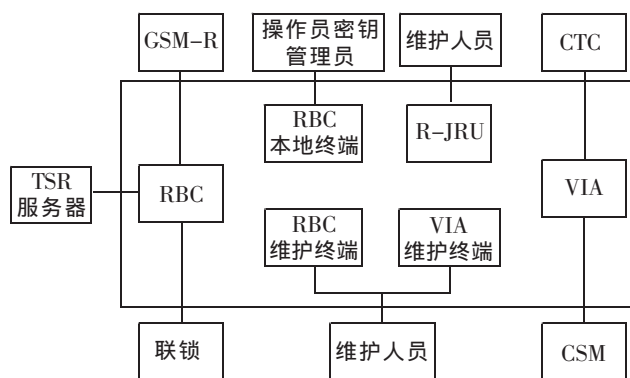


图 1 RBC 系统配置图

Fig.1 The system configuration of RBC

通过以太网端口接入到 CTC 调度中心的内网,再将另一端接入 RBC 网络。CTC 系统经协议转换器(VIA)设备后和 RBC 系统建立通信连接,并进行数据的交换。列车处于运行或静止状态时,RBC 负责将列车的实时状态信息发送给 CTC 系统,CTC 系统也可以自主选择要求 RBC 发送的列车信息,这些信息包括 RBC 各设备之间连接的状态信息、列车的动态和静态信息以及报警信息等。此外,CTC 还可以向 RBC 发送无条件的紧急停车命令^[10]。

RBC 与车站联锁设备接口: 为了实现 RBC 与联锁设备之间信息的安全规范传输,将联锁系统和 RBC 的专用安全通信网连接形成一个封闭的局域网,并且采用信号授权的方式进行信息的交互。RBC 将列车的时速、长度和距离下一个授权区的距离等信息以对象的方式,发送给车站联锁设备。联锁则将进路状态、进路类型、授权区号等一些信息以信号授权方式,发送给 RBC^[11]。

RBC 与临时限速服务器(TSRS)设备接口: 临时限速服务器通过以太网和 RBC 建立连接后,向 RBC 发送临时限速命令等数据。RBC 对限速命令进行处理,并将限速状态等数据反馈给临时限速服务器。

RBC 与信号集中监测(CSM)设备接口: RBC 将其内部各个设备的运行状况和故障维护等数据发送给 VIA,VIA 接收到这些数据后,对数据进行汇总、处理计算,在应用层通信协议的基础上,由接口服务器向终端计算机传输 RBC 的监测信息,之后终端计算机通过信号集中监测网络将处理后的 RBC 监测信息发送给各级维修中心。其中,RBC/CSM 接口服务器通过以太网和 VIA 进行连接通信^[9-10]。

RBC 与 GSM-R 网络之间的接口: RBC 的系统主机和 ISDN 服务器之间通过使用 VLAN 交换机的 TCP/IP 方式,建立两者的通信连接。RBC 通过和 ISDN-PRI 接口与 GSM-R 网络移动交换机相互连接^[9,12]。

RBC 与相邻 RBC 接口: RBC 与相邻 RBC 接口:相邻的无线闭塞中心之间,使用常用的 Subset-098 协议建立相互的数据交换连接。相邻的无线闭塞中心之间数据交换主要包括轨道交界处的线路占用信息、列车的限速命令以及列车本身的状态数据等。

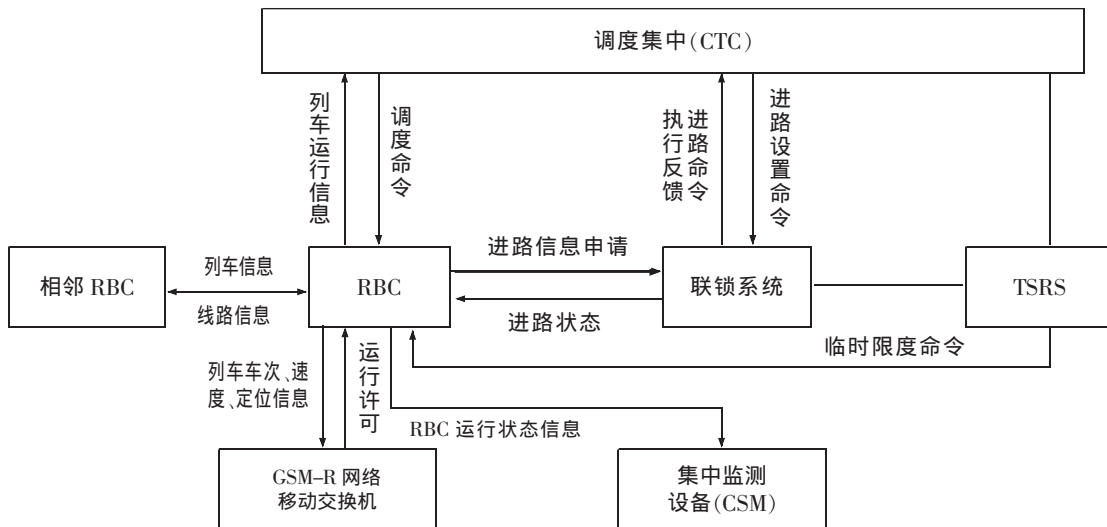


图 2 RBC 与外部接口连接图

Fig.2 The external interface of RBC

3 无线闭塞中心(RBC)的 SIMFIA 建模

3.1 SIMFIA 软件建模流程

APSYS SIMFIA 软件是 APSYS 公司设计的一款基于模型的对设备、产品、过程进行功能分析的知识获取的软件。SIMFIA 软件主要有 FMECA 功能、SAFETY 功能、RELDIAG 功能(可靠性框图)、SIMTET 功能和 SIMUL 功能^[11]。SIMFIA 软件的模型建立步骤可以分为:创建模块;建立连接;定义模块输入输出;定义模块内部状态;定义输入和内部状态与该模块自身输出状态的关系;验证模型。

3.2 RBC 的 SIMFIA 建模

对无线闭塞中心进行建模时,主要根据信息流的传输来定义各个模块,无线闭塞中心信息流传输过程如图 2 所示,由此建立的 RBC 模型包括本地维护终端设备模块;临时限速服务器模块;车站联锁设备模块;调度集中设备模块;无线闭塞中心模块;相邻 RBC 模块;GSM-R 网络设备模块;CSM 设备模块。SIMFIA 软件中,对模块建立连接时需首先定义各个模块连接点的类型,本次 RBC 建模过程中,统一将各个模块的连接点设置成 default_nominal_failed。在对 RBC 模型中处于最顶层的各个模块的 Logical causes 进行设置时,结合 RBC 系统本身的结构特点,将接口板失效与自身失效的模块的输出接口,其输出状态均设置为 failed;其它模块的设置类似。由此建立的 RBC 系统整体模型如图 3 所示。RBC 模块内部结构模型如图 4 所示。

3.3 RBC 模型的验证

将故障源加入到模型的某一个节点后,可以方便地观察到故障源信号在整个模型中的分部式传递过程。在故障源信号传播的过程中,受其影响不能正常工作的模块显示为红色;故障信息正在传播的模块显示为绿色;受故障信号影响不能导通的节点显示为红色;未受故障信号影响或受到故障信号影响后依旧处于导通状态的节点显示为蓝色。由此可以验证出模型的完整性和有效性符合预期设定,模型正确。CTC 设备模块引入故障源后,故障的传递过程如图 5 所示。

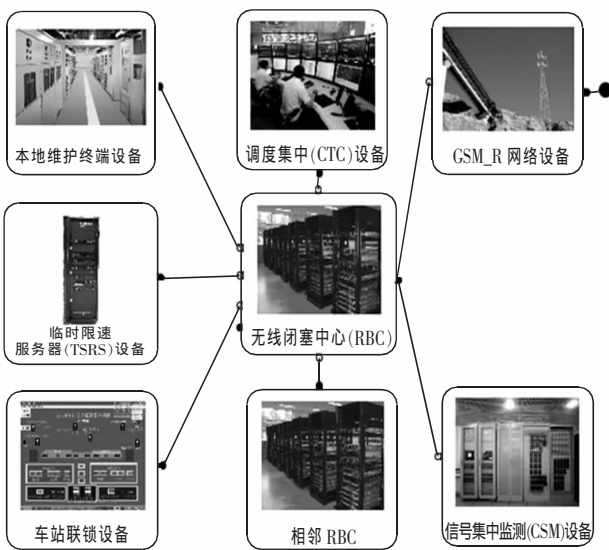


图 3 RBC 系统整体模型
Fig.3 The model of RBC system

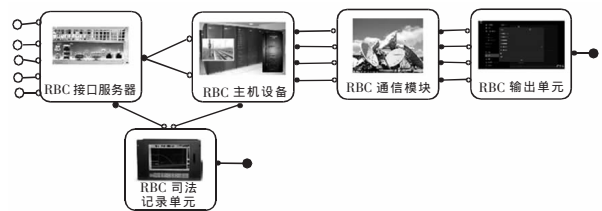


图 4 RBC 模块内部结构模型图
Fig.4 The internal structure model of RBC module

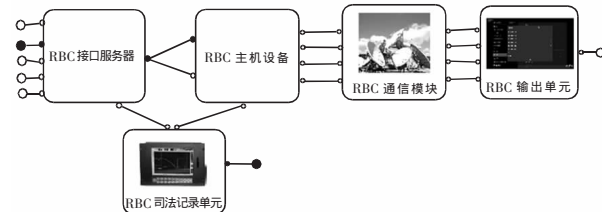


图 5 RBC 模型故障传递图
Fig.5 The failure propagation of RBC

3.4 RBC 模型分析

运用 SIMFIA 软件的 SAFETY 功能对模型进行分析时需要各个模块的 Lambda 值进行设置,Lambda 值可以通过对以往发生事故的数据记录以及系统模块所用设备的产品信息分析计算得到,设置符合实际的 Lambda 值,可以较好的模拟系统的实际故障状态,对系统进行安全分析,本文对 RBC 模型的 Lambda 值进行了简单设置。RBC 整体模型中无线闭塞中心模块的故障树如图 6 所示。从故障树图中可以看到,“O.failed”,即无线闭塞中心模块发生故障”,作为该故障树的顶事件,它失效的概率为 $5.999700034855759e-6$,引起无线闭塞中心模块失效的原因可能来自传输的每一条路径,最后可以追溯到事件“接口服务器.states.failure”,失效率为 $9.99947000132056e-7$ 。由图 6 的故障树可以得到,每个底事件与底事件之间存在着“或”和“与”的逻辑关系,由此引起顶事件的失效,并且“接口服务器.states.failure”事件、“车站联锁设备.states.failure”事件以及“O5.wrong”事件的失效的概率均为 $9.9e-7$,最终得到的顶事件“O.failed”失效的概率为 $5.9e-6$,

大于 9.9×10^{-7} , 满足铁路系统安全评估的相关标准。若 RBC 的结构需要调整, 只要重新生成故障树, 就可以对失效要素进行分析计算, 可以很大程度上提高工作的效率。图 6 中各事件失效的概率值均由 SIMFIA 软件的安全计算功能得到。

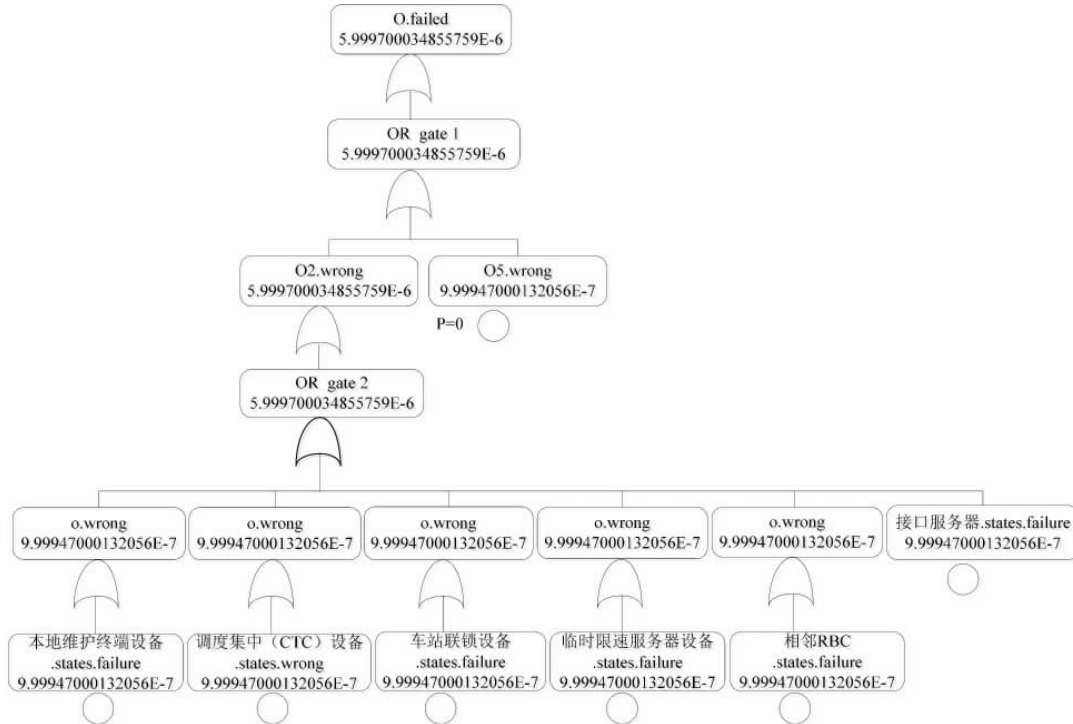


图 6 无线闭塞中心模块的故障树

Fig.6 The fault tree of RBC module

4 结论

本文采用 SIMFIA 软件对无线闭塞中心系统建立 RBC 系统模型, 可自动生成故障树进行安全性分析。通过对 SIMFIA 软件自动生成的故障树进行分析, 找到故障树中顶事件的最小割集和失效概率, 有助于在无线闭塞中心设备的日常维修中快速定位出故障源, 找到故障传播的路径; 根据各底事件失效的概率调整其维护周期, 达到提高工作效率和确保系统安全运行的目的。在对 RBC 系统进行功能失效状态等安全性方面的分析中, SIMFIA 软件的分析结论与传统故障树方式相比是一致的。将 SIMFIA 软件应用到铁路系统的安全研究领域中, 可以大幅度提高安全评估的效率。

参考文献:

- [1] 杨浩. 面向领域特征的列控 RBC 系统建模方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [2] 吕继东, 唐涛, 贾昊. 客运专线 CTCS-3 级列控系统无线闭塞中心的建模与验证[J]. 铁道学报, 2010(6): 34-42.
- [3] 刘丹, 杜晓鑫. 京广高铁无线闭塞中心双系重启故障探讨[J]. 铁道通信信号, 2015(2): 81-84.
- [4] 梁楠. 基于随机 petri 网的 CTCS-3 级 RBC 系统控车流程建模与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [5] 梁楠, 王海峰. 基于 SPN 的 CTCS-3 级列控系统 RBC 实时性能分析[J]. 铁道学报, 2011(2): 67-71.
- [6] 童超. 基于时间自动机的 RBC 控车流程研究[D]. 重庆: 西南交通大学, 2009.
- [7] 郭荣. 高速铁路无线闭塞中心软件设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [8] 王希庆, 冯国良, 杨国荣. 无线闭塞中心和计算机联锁安全通信研究[J]. 信息技术, 2015(8): 79-82.

- [9] 聂超. CTCS-3 列控无线闭塞中心研究与仿真[D]. 重庆:西南交通大学,2010.
- [10] 李宏伟. 高速铁路无线闭塞中心(RBC)核心单元的研究与设计[D]. 兰州:兰州交通大学,2009.
- [11] 陈建球,唐涛,袁磊. 改进 ANP 的无线闭塞中心管控能力评价模型[J]. 交通运输工程学报,2015(1):108-118.
- [12] 张友兵,刘岭,何祖涛. 基于随机 Petri 网的 GSM-R 越区切换成功率的形式化分析[J]. 华东交通大学学报,2012,30(4):73-80.

Security Assessment of Key Unit of Radio Block Center for High-Speed Railway

Liu Ziying , Yin Nan ,Zhang Lihua

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Radio block center, mainly used for the movement authority and train interval control of the high-speed trains, plays an important role in ensuring the control accuracy, efficiency, reliability and security of the high-speed railway signaling system. On the basis of the analysis of the structure and function of RBC and the information exchange between RBC and external systems, this article emphasizes the stratifying and modular process of RBC. Then a simulation model of the RBC is established by the software-SIMFIA, which obtains fault tree and failure probability of the model after setting the model parameters. It analyzes the security of the RBC system so as to achieve the purpose of safety assessment.

Key words: high-speed railway; radio block center; SIMFIA; fault tree; modeling and simulation; security assessment

(责任编辑 姜红贵)