

# 基于时间自动机的自主化 ATP 等级转换功能建模与验证

叶安君

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安//高级工程师)

**摘要** 自主化 ATP(列车自动保护)系统在国产化 ATP 系统的基础上,增加了一些新的功能需求。针对自主化 ATP 系统安全关键功能的安全性和正确性保障的问题,以自主化 ATP 系统中典型的 C2 等级转换 C3 等级的等级转换功能为研究对象,采用时间自动机形式化地分析等级转换功能的安全性、活性和实时性。研究时间自动机的数学理论基础,分析自主化 ATP 系统等级转换功能的逻辑和与其他系统的数据交互;采用时间自动机建模方法,从 ATP、RBC(无线闭塞中心)和应答器 3 个方面,建立 C2 等级转换 C3 等级的时间自动机模型;研究自主化 ATP 系统等级转换功能需要满足的安全性、活性和实时性要求,利用 UPPAAL 软件验证等级转换功能的系统性质。结果表明,自主化 ATP 系统 C2 等级转换 C3 等级功能满足期望的系统需求。

**关键词** 高速铁路;时间自动机;ATP;等级转换;安全性;形式化验证

**中图分类号** U283.2

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.07.007

## Modeling and Verification of ATP Level Transition Process Based on Timed Automata

YE Anjun

**Abstract** Focusing on the safety and correctness of ATP (automatic train protection), on the basis of localized ATP, new functional requirements are added. Taking C2 level to C3 level transition process of ATP as the research object, timed automata is used to analyze its safety, activity and real-time performance. The mathematical foundation of timed automata is researched, the logic and interaction of ATP level transition functionality with other systems are analyzed; Using time automata modeling method, a C2 level to C3 level transition model is established from three aspects of ATP, RBC (radio block center) and the balise; The safety, activity and real-time requirements are extracted and verified by UPPAAL software. The result shows that the C2 level to C3 level transition process of ATP could meet expected system requirements.

**Key words** high speed railway; timed automata; ATP;

level transition; safety; formal verification

**Author's address** China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

我国现运营的高速铁路采用的是国产化 CTCS-3 级列车运行控制系统(以下简称“列控系统”)。中国铁路总公司是 2014 年开始开展自主化 CTCS-3 级列控系统技术研究的,研发了一批具有自主知识产权的自主化 C3 等级列控系统安全关键设备<sup>[1-2]</sup>。其中,自主化 ATP(列车自动保护)系统是我国铁路的重要技术装备,是保证高速列车行车安全、提高运输效率的关键设备<sup>[3-4]</sup>。

自主化 ATP 系统在国产化 ATP 系统的基础上,增加和优化了一些安全功能需求,具有 SIL4 级的安全需求,一旦失效可能导致列车出轨等行车事故。目前,自主化 ATP 系统的研究主要集中在需求规范和系统测试方面<sup>[5-6]</sup>,理论研究相对较少。

时间自动机<sup>[7]</sup>具有严谨的数学基础,能够分析实时系统的功能逻辑需求及时间性能,在铁路信号安全关键系统中得到了广泛应用<sup>[8-9]</sup>。文献[10]采用时间自动机对 ATP 系统的超速防护功能进行形式化建模,验证了 ATP 系统的安全性和活性;文献[11]采用时间自动机分析了 ATP 系统的 2 乘 2 取 2 结构,验证了冗余结构的安全属性;文献[12-13]基于时间自动机分析了 C3 等级列控系统等级转换的系统需求;文献[14]基于时间自动机建立了等级转换时间自动机网络模型,验证了等级转换过程中的安全性和实时性;文献[15]采用时间自动机分析了自主化 C3 列控系统码序校验以及 RBC(无线闭塞中心)切换等场景。研究表明,采用时间自动机对铁路信号系统进行建模和验证,对系统的需求分析和设计具有良好的指导作用。本文采用时间自动机方法,以自主化 ATP 系统的 C2 等级转换到 C3

等级功能为例,从理论上分析 ATP 系统需求的安全性、正确性和实时性,对自主化 ATP 系统的研究具有一定的理论意义。

## 1 自主化 C3 列控系统概述

### 1.1 自主化 C3 列控系统发展过程

2007 年,原铁道部成立 C3 技术攻关组开展 C3 列控系统的研发工作,在引进国外技术的基础上,实现了 ATP 和 RBC 设备的国产化,并成功应用于武广、郑西和京沪等高速铁路,这项研究对我国列控系统的发展和铁路装备现代化发挥了重要作用。

2014 年,中国铁路总公司依托科研开发重点课题“列控系统设备自主化及技术要求研究”,开发具有自主知识产权的列控系统关键设备。2015 年中国铁道科学研究院集团有限公司立项“CTCS-3 级列控系统关键设备自主化研究”,专项对 C3 列控系统自主化研究进行重点研究。在中国铁路总公司的组织下,2016 年 6 月至 2017 年 1 月,依托大西线综合试验段,对自主化 C3 列控系统进行了现场试验。2018 年 6—10 月,以京沈高铁辽宁段为试验平台对自主化 C3 列控设备进行了综合试验,动态检测了自主化 C3 列控设备的功能及性能<sup>[17]</sup>。

### 1.2 自主化 C3 列控系统的特点

自主化 C3 列控系统在国产化 C3 列控系统的基础上,对硬件、软件和功能需求都提出了新的要求。

1) 硬件、软件方面:自主化 C3 列控系统设备采用并列系工作,在保障系统安全性的同时增加设备可用性,拥有完全自主知识产权。

2) 功能方面:自主化 C3 列控系统设备在国产化 C3 列控系统设备的基础上,增加了一些新的功能需求。以自主化 ATP 系统为例,新增加的功能需求包括:①C3 行车许可融合轨道电路信息。C3 主控单元计算轨道电路信息许可,并根据列车当前位置确定轨道电路信息许可终点。②在应答器报文中增加开门侧提示。③等级转换时,不需要司机进行确认。④使用 JRU(司法记录单元)给各个主要模块进行校验时,保证各模块的系统时间保持同步。

## 2 自主化 ATP 系统等级转换功能

按照功能要求和设备配置划分,我国列控统划分为 C0—C4 共 5 个应用等级。同条线路上可以有多种应用等级,以满足不同线路速度的需求。自主

化列控系统等级转换即是 C3 等级和 C2 等级之间的转换。

### 2.1 C2 等级向 C3 等级转换场景分析

自主化 ATP 系统等级转换功能包括 C2 等级向 C3 等级转换和 C3 等级向 C2 等级转换两种场景。这属于自主化 ATP 系统运行过程中重要的安全功能。列车如果未在指定的位置或时机转换到正确的运行等级,轻则可能造成行车中断影响行车效率,重则可能导致行车事故造成人员伤亡。从理论上分析和验证等级转换功能逻辑的安全性和准确性,对保证列车行车安全具有重要意义。

自主化 ATP 系统在 C3 等级控车时,系统接收轨道电路的编码信息,并与 RBC 发送的 MA(移动授权)进行对比,判断是否一致。自主化 ATP 系统与 RBC、轨道电路和应答器信息交互关系如图 1 所示。

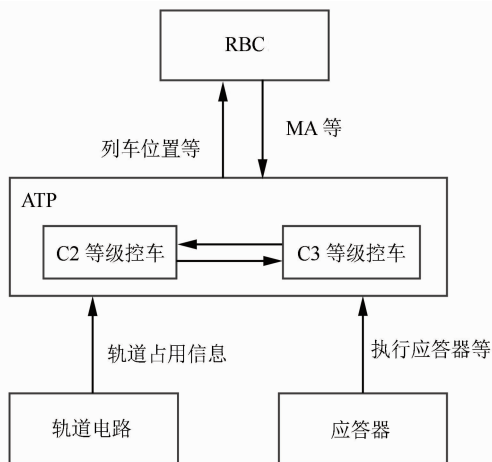


图 1 自主化 ATP 系统信息交互关系

本文以 C2 等级向 C3 等级转换为例进行分析。C2 等级向 C3 等级转换典型运营场景包括:

1) 列车由 C2 等级运营线路进入 C3 等级运营线路,如列车驶出 C2 等级的动车段进入 C3 等级的运营线路。

2) 列车由于无线通信中断等原因由 C3 等级降级到 C2 等级后,需要重新转换到 C3 等级控车。

为保障等级转换功能的顺利进行,运营线路在地面设置了 RBC 连接点(RE)、等级转换预告(LTA)和等级转换执行点(LTO)3 个转换点。当列车前端通过 RE 时,ATP 根据应答器信息呼叫 RBC 并进行注册。当列车前端通过 LTA 点时,ATP 将向 RBC 报告所在位置,RBC 向 ATP 提供行车许可及等级转换命令。当列车前端通过 LTO 点时,ATP

执行控车转换。

## 2.2 C2 等级向 C3 等级转换功能分析

C2 等级向 C3 等级转换的过程主要包括列车与 GSM-R 网建立连接、与 RBC 建立通信会话、获取 C3 等级区域的 MA 和执行等级转换 4 个阶段,转换逻辑如图 2 所示。

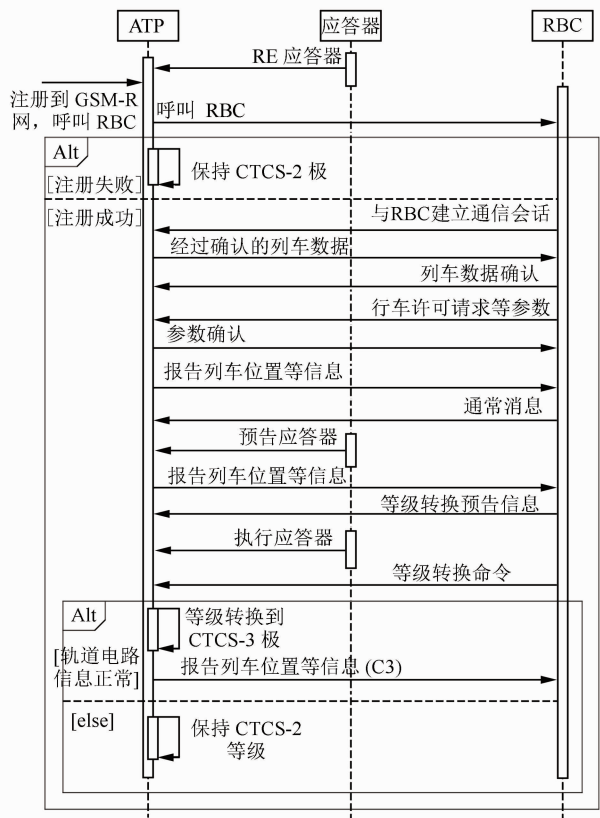


图 2 C2 等级向 C3 等级转换序列图

1) 与 GSM-R 网建立连接。列车从 C2 等级向 C3 等级转换,首先要建立与 GSM-R 电台的连接。当 ATP 无线电台检测到 GSM-R 网后,自动与 GSM-R 网络建立连接。

2) 与 RBC 建立通信会话。与 GSM-R 网连接成功后,ATP 呼叫 RBC,向 RBC 发送列车位置报告。RBC 向车载设备发送位置报告参数信息和 MA 请求参数信息。车载设备收到配置参数后向 RBC 发送确认信息。

3) 获取 MA。列车前端通过预告应答器 LTA 后,RBC 向车载设备发送包含 C3 等级区域的 MA 和等级转换命令。若 ATP 不能收到 MA 和等级转换命令,列车保持 C2 等级继续运行。当列车重新获得 MA 后,进行等级转换处理。在 C3 等级完全模式下,自主化 ATP 系统接收轨道电路信息的行车

许可,因此,自主化 ATP 系统需要判断 C2 级行车许可和 RBC 发送的 MA 是否均越过等级转换边界。

4) 等级转换。列车前端通过预告应答器 LTO 后,ATP 向 RBC 发送基于应答器组的位置报告;RBC 判断列车位置后,发送列车转换到 C3 的控制命令,ATP 转换到 C3 等级。列车通过 LTO,但未收到执行应答器信息时,当列车估计前端通过预告指定执行位置时,列车转换为 C3 等级控车<sup>[17]</sup>。

根据自主化 ATP 系统 C2 等级向 C3 等级转换的功能,正常转换过程涉及应答器、RBC、C2 行车许可、C3 MA 等对象,转换过程中可能出现应答器丢失、无线通信中断、行车许可不一致(MA 越过转换边界,但 C2 行车许可未越过)等故障场景。

## 3 时间自动机

时间自动机<sup>[18]</sup>(TA)是针对带有时间因素的状态转换关系,在传统的有限状态自动机的基础上引入时间约束,提出的一种基于严谨的数学理论的描述方法,在实时系统的规范说明和形式化分析中占据重要地位。

定义 1:时间约束

对于一个时钟变量集合  $X$ ,时间约束  $\delta$  的集合  $\Phi(X)$  定义如下:

$$\delta: = x \leq c \mid c \leq x \mid \delta_1 \wedge \delta_2,$$

其中, $x \in X, c \in Q, \delta_1, \delta_2$  表示时钟约束。

定义 2:时间自动机

一个时间自动机 TA 是一个六元组  $\{S, S_0, \Sigma, X, I, E\}$ , 其中:

$S$  是一个有限位置的位置集合;

$S_0$  是一个初始位置的位置集合,且  $S_0 \subseteq S$ ;

$\Sigma$  是一个有限字符的字符集合;

$X$  是一个有限时钟的时钟集合;

$I$  是一个映射,将  $S$  中的每个位置映射到  $\Phi(X)$  中的某个时间约束;

$E \subseteq \Sigma \times 2^{\Phi(X)}$   $S$  是转移的集合。

一个状态转移  $\{s, a, \lambda, \delta, s'\}$  表示当系统输入字符  $a$  并满足时钟约束  $\delta$  时,位置  $s$  迁移到位置  $s'$ 。 $\lambda$  表示状态转移时,所有重置的时钟变量的集合。

UPPAAL 软件是由瑞典 Uppsala 大学和丹麦 Aalborg 大学联合开发的时间自动机集成工具环境。UPPAAL 软件对经典的时间自动机进行了扩展,包括编辑器、模拟器和验证器,支持时间自动机的建

模、仿真和验证。UPPAAL 软件采用 on-the-fly 技术,对时间自动机的可达性进行分析,进而能够验证系统的安全性和活性等系统属性。

#### 4 C2 等级向 C3 等级转换建模

根据 C2 等级向 C3 等级的转换逻辑,考虑到转换过程的复杂性以及转换过程中设备可能的故障,自主化 ATP 系统主要从正常转换和故障场景两个方面进行建模,如图 3 所示。对于应答器丢失故障采用故障注入的方式,将应答器丢失行为注入到正常转换模型中;对于无线通信中断和行车许可不一致故障单独建立时间自动机模型。

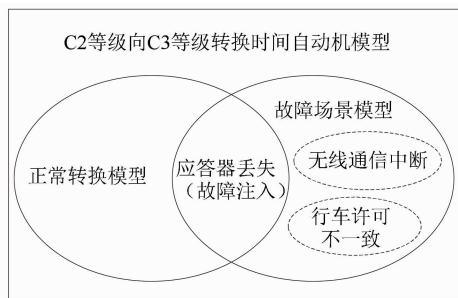


图3 自主化 ATP 系统时间自动机建模方法

C2 等级向 C3 等级转换的时间自动机模型  $C2toC3_{TA}$  划分为 ATP 时间自动机模型  $ATP_{TA}$ 、RBC 时间自动机模型  $RBC_{TA}$ 、Balise 时间自动机模型  $Balise_{TA}$ 、通信状态时间自动机  $Connect_{TA}$  和行车许可时间自动机模型  $MA_{TA}$  5 个部分,则 C2 等级向 C3 等级转换的时间自动机模型为以上 5 个时间自动机模型的积,即:

$$C2toC3_{TA} =$$

$$ATP_{TA} \parallel RBC_{TA} \parallel Balise_{TA} \parallel MA_{TA} \parallel Connect_{TA}.$$

C2 等级向 C3 等级转换的时间自动机模型如图 4 所示,模型中主要状态、变量的含义如表 2 所示。其中, $ATP_{TA}$  模型中注入了应答器丢失的场景, $Connect_{TA}$  描述了无线通信中断的故障情况, $MA_{TA}$  描述了 MA 越过等级转换边界,但 C2 级行车许可未越过的故障情况。

C2 等级向 C3 等级转换的时间自动机模型具有 1 个时钟变量  $x$ ,所有通道信号均为 broadcast chan 类型,所有变量均为 int 类型。以“?”结尾的标记表示接收到该信号时转换发生,以“!”结尾的标记表示发射该信号时转换发生。

1)  $ATP_{TA}$  模型。主要描述 ATP 和 RBC 之间的交互信息,主要包括请求与 RBC 建立通信会话、发

送列车数据、请求 MA 和执行等级转换等过程。当等级转换所有条件满足时, $ATP_{TA}$  转移到 Switch 状态,表示等级转换成功, $ATP_{TA}$  向  $RBC_{TA}$  发送确认信息。 $ATP_{TA}$  根据  $Connect_{TA}$  中 Connect 的值判断连接状态,连接失败时,转入 SwitchFail 状态,放弃等级转换。列车通过 LTO 时, $ATP_{TA}$  根据  $MA_{TA}$  中 OverLTO 的值判断是否存在制动,如果存在制动状态, $ATP_{TA}$  不进行等级转换。

2)  $RBC_{TA}$  模型。主要描述 RBC 和 ATP 之间的交互信息,包括 ATP 与 RBC 建立连接、发送 MA 和发送等级转换命令 3 个部分。 $RBC_{TA}$  根据  $Connect_{TA}$  的连接状态,判断 ATP 是否与 RBC 建立连接。在 RBC 与 ATP 成功建立连接的情况下, $RBC_{TA}$  与  $ATP_{TA}$  交互列车数据、行车参数等数据, $RBC_{TA}$  根据列车位置及运行状态,向  $ATP_{TA}$  发送等级转换命令。当列车通过 LTO,但未接收到执行应答器信息时,即 PassLTOState 为 2, $ATP_{TA}$  发送等级转换信号 Switch。

3)  $MA_{TA}$  模型。描述 C2 级行车许可、C3 级 MA 和等级转换边界的关系。当 C2 级行车许可和 C3 级 MA 均越过等级转换边界时, $MA_{TA}$  将 OverLTO 变量置为 1;当 C2 级行车许可未越过等级转换边界时,OverLTO 为 2。 $ATP_{TA}$  根据 OverLTO 的值判断是否进行等级转换。

4)  $Connect_{TA}$  模型。描述列车与 RBC 的连接状态。当列车于 RBC 断开连接时, $Connect_{TA}$  将连接状态 Connect 变量置为 0,表示 ATP 与 RBC 连接失败。

5)  $Balise_{TA}$  模型。描述列车通过 RE、LTA 和 LTO 时的行为。当列车依次通过 RE、LTA 和 LTO 时, $Balise_{TA}$  分别广播 RE、LTA 和 LTO 信号, $ATP_{TA}$  接收到 RE 信号后发送 login 信号,请求 RBC 注册。

#### 5 C2 等级向 C3 等级转换形式化验证

为验证 C2 等级向 C3 等级转换的时间自动机模型是否满足自主化 ATP 系统的需求,本文从安全性、活性和实时性 3 个方面,利用 UPPAAL 软件提供的模型检测技术对  $C2toC3_{TA}$  模型进行形式化验证。

UPPAAL 形式化验证的基本原理是用时间自动机 M 描述系统行为,用 BNF 语法描述系统属性  $\varphi$ ,分析 M 是否为  $\varphi$  的一个模型  $M \models \varphi$ 。

UPPAAL 软件提供的 BNF 语法如下:



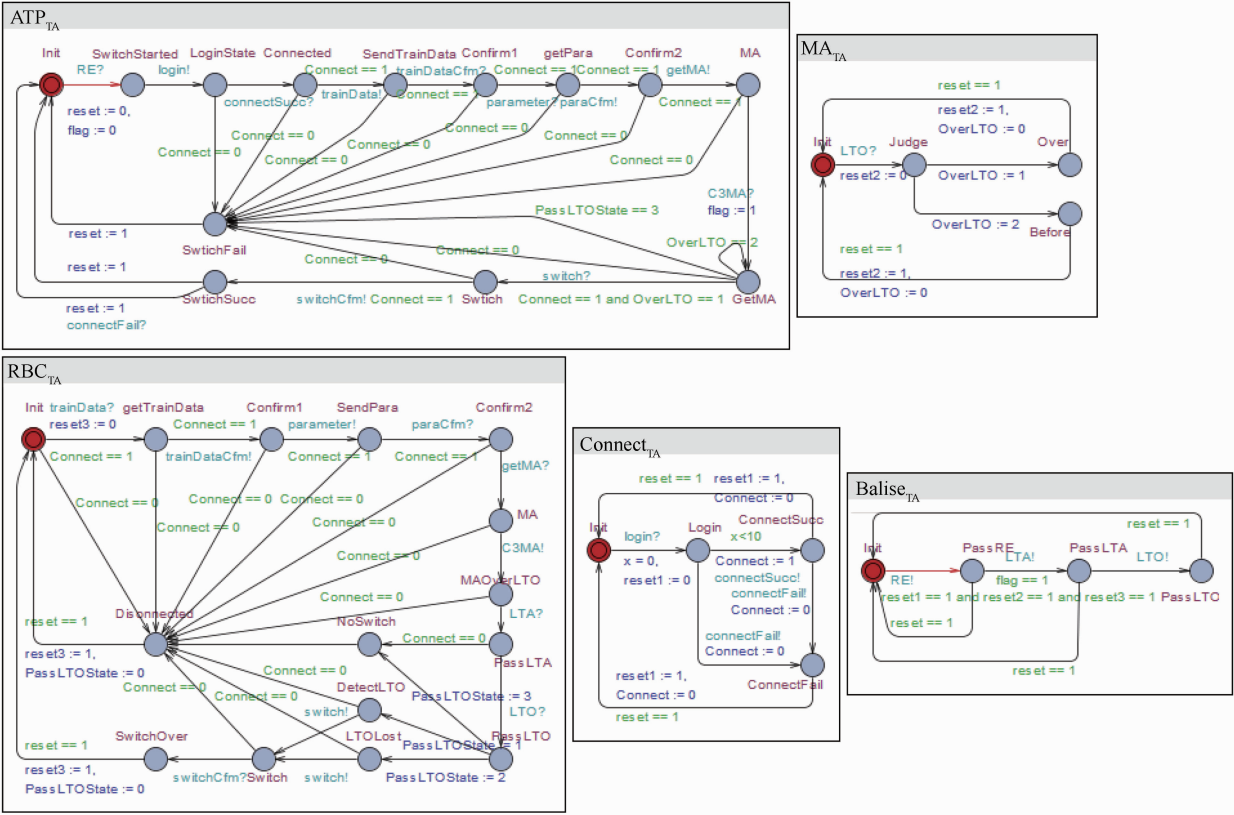


图 4 自主化 ATP C2 等级转换 C3 等级时间自动机模型截图

表 1 自主化 ATP C2 等级转换 C3 等级时间自动机模型主要变量

序号	状态	含义	序号	变量或信号	含义
1	getPara	获取行车参数	7	login	请求注册 RBC
2	Switch	等级转换过程中	8	Connect	通信状态,0 表示中断,1 表示正常
3	Over	C2 行车许可和 MA 均越过等级转换边界	9	switchCfm	通知 RBC 等级转换成功
4	Before	C2 行车许可未越过等级转换边界	10	reset	转换结束
5	PassLTO	RBC 检测列车通过 LTO 应答器组	11	LTO	列车通过 LTO 应答器组
6	LTOLost	LTO 应答器组丢失	12	PassLTOState	列车通过 LTO 应答器组时的状态,1 表示正常通过,2 表示 LTO 应答器组丢失

$\varphi ::= E <> p \mid A[]p \mid E[]p \mid A <> p \mid p \rightarrow q$ , 其中: $E <> p$  表示  $p$  在 1 个状态转移序列  $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow \dots \rightarrow s_n$  的某个状态下为真,则  $E <> p$  为真, $s_0$  表示初始状态; $A[]p \Leftrightarrow \text{not } E <> \text{not } p$ ;  $E[]p$  表示存在某个状态转移序列  $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow \dots \rightarrow s_n$ ,  $p$  在这个序列中的所有状态下都为真,则  $E[]p$  为真;  $A <> p \Leftrightarrow \text{not } E[]\text{not } p$ ;  $p \rightarrow q$  表示  $p$  为真则  $q$  为真。

根据自主化 ATP 系统需求,提取 C2 等级向 C3 等级转换过程中的安全性、活性和实时性要求。安全性指描述系统不期望发生的性质,如“连接 RBC 失败时,ATP 能转换到 C3 等级”,通常表示“坏的事情不会发生”。活性描述了系统必定发生的性质,

如“ATP 能够由 C2 等级转换到 C3 等级”,通常表示“好的事情会发生”。实时性主要描述自主化 ATP 系统中的时间约束,如根据自主化 ATP 与 RBC 之间的通信功能,ATP 与 RBC 连接超过 10 s,则通信超时。自主化 ATP 系统形式化验证需求提取方法如图 5 所示。

自主化 ATP 系统 C2 等级转换到 C3 等级需要满足安全性需求:连接 RBC 失败时,ATP 不能转换到 C3 等级,即 ATP 系统 C2 等级控车;未与 RBC 成功建立连接时,在任何情况下都不能转移到 C3 等级。根据 C2toC3<sub>TA</sub> 模型,该安全性需求的 BNF 描述如下:

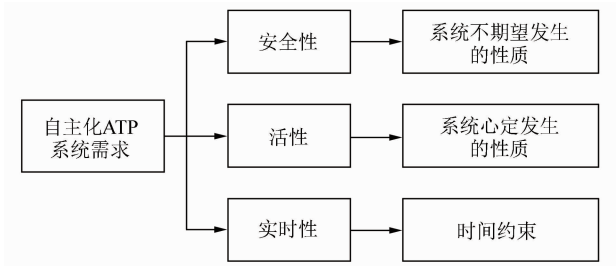


图 5 自主化 ATP 系统形式化验证需求提取方法

$A[ ]$  ConnectTA.      ConnectFail      imply      not

表 2 自主化 ATP 系统形式化验证内容和验证结果

验证要求	验证内容	BNF 描述	验证结果
1. 系统无死锁		$A[ ]$ not deadlock	通过
2. 连接 RBC 失败时,ATP 不能转换到 C3 等级		$A[ ]$ ConnectTA.ConnectFail imply not ATPTA. SwtichSucc	通过
3. C2 行车许可未越过边界时,ATP 不能转换到 C3 等级		$A[ ]$ MATA.Before imply ( not ATPTA.SwtichSucc)	通过
安全性	4. 无 RBC 的切换命令时,ATP 不能转换到 C3 等级	( not RBCTA.Swtich) and ( not RBCTA.SwtichOver)→ ( not ATPTA.SwtichSucc)	通过
	5. 未通过转换边界时,不能转换到 C3 等级	$A[ ]$ ( not BaliseTA.PassLTO) imply ( not ATPTA. SwtichSucc)	通过
	6. RBC 禁止转换时,ATP 不能转换到 C3 等级	$A[ ]$ RBCTA.NoSwitch imply ( not ATPTA. SwtichSucc)	通过
活性	7. ATP 能够转换到 C3 等级	$E<>$ ATPTA.SwtichSucc	通过
	8. RBC 能发送等级转换命令	$E<>$ RBCTA.Swtich	通过
	9. ATP 能通知 RBC 转换成功	$A[ ]$ ATPTA.SwtichSucc imply RBCTA.SwtichOver	通过
实时性	10. 超过 10 s 连接时间,ATP 连接 RBC 失败	$A[ ]$ ( ConnectTA.Login and $x>10$ ) imply ( not ATPTA. Connected)	通过

6 结论

本文针对自主化 ATP 系统的安全性、活性和实时性,采用时间自动机作为形式化建模和验证方法,以 C2 等级转换 C3 等级的安全关键功能为例,建立了自主化 ATP 系统 C2 等级转换 C3 等级的时间自动机模型;从安全性、活性和实时性 3 个方面,对时间自动机模型进行了形式化验证;从理论上分析了自主化 ATP 系统 C2 等级转换 C3 等级的功能逻辑。结果表明,自主化 ATP 系统满足期望的系统性质,基于时间自动机的形式化建模和验证方法对自主化 ATP 的系统需求分析具有一定的指导和应用价值。

参考文献

[ 1 ] 杨志杰. C3 等级列控系统关键设备自主化研究[ J ]. 中国铁路,2018( 7 ):1.  
[ 2 ] 江明,王建敏. 自主化 C3 等级列控系统技术创新及装备研制

ATPTA. SwtichSucc

采用 UPPAAL 软件的验证器进行形式化验证,验证消耗时间 0.001 s,消耗内存 6 884 KB。验证结果通过,表明 C2toC3<sub>TA</sub> 模型满足该安全性需求。

C2toC3<sub>TA</sub> 模型的安全性、活性和实时性需要及验证结果如表 3 所示。验证结果表明,自主化 ATP 系统 C2 等级转换 C3 等级的系统需求满足指定的安全性、活性和实时性要求。

[ J ]. 铁路通信信号工程技术,2018,15( 4 ):1.  
[ 3 ] 冯凯,程剑锋,岳林. 自主化 C3 等级列控车载设备标准规范研究[ J ]. 中国铁路,2018( 9 ):1.  
[ 4 ] 张友兵,王建敏,陈志强. 自主化 CTCS-3 等级列控车载设备的主要功能特点[ J ]. 铁路通信信号工程技术,2018( 2 ):6.  
[ 5 ] 冯凯,程剑锋,岳林. 自主化 CTCS-3 级列控车载设备标准规范研究[ J ]. 中国铁路,2018,675( 9 ):7.  
[ 6 ] 江明,王建敏. 自主化 CTCS-3 级列控系统技术创新及装备研制[ J ]. 铁路通信信号工程技术,2018,15( 4 ):1.  
[ 7 ] BENGTSOON J, YI W. Timed Automata; Semantics, Algorithms and Tools[ J ]. Lectures on Concurrency & Petri Nets, 2006, 3098:87.  
[ 8 ] 吕继东,唐涛,贾昊. 客运专线 C3 等级列控系统无线闭塞中心的建模与验证[ J ]. 铁道学报,2010,32( 6 ):34.  
[ 9 ] 韩笑,唐涛,吕继东,等. 基于失效日志的 C3 等级列控车载子系统需求错误导致的失效致因分析[ J ]. 铁道学报,2017( 3 ):63.  
[ 10 ] 蒋建军. 列车自动防护系统的形式化建模与验证[ D ]. 成都:西南交通大学,2014.  
[ 11 ] 华颖,张亚东,饶畅,等. 基于 UPPAAL 的二乘二取二逻辑建模与仿真[ J ]. 铁道标准设计,2018,62( 4 ):181.

( 下转第 37 页 )

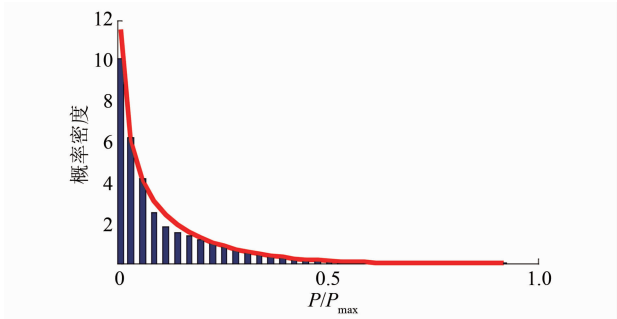


图 10 新南门牵引所牵引负荷概率密度拟合曲线

表 4 城市轨道交通运营时段牵引负荷分布参数与拟合误差统计

牵引变电所名称	$K_0$	$a_1$	$a_2$	拟合误差/%
白云文化广场	1.322 4	0.944 7	4.661 7	1.64
火车南站	1.400 5	0.736 9	4.235 5	3.79
东大路	1.830 6	0.345 3	5.702 1	3.37
太平园	1.694 9	0.417 3	5.000 2	9.84
新南门	1.516 7	0.561 5	5.093 4	9.01

4 结论

本文通过对城市轨道交通牵引负荷的负荷过程与概率特性进行分析,得到以下结论:

- 1) 正常供电运行时,城市轨道交通高峰时段负荷率大多位于 11%~23%,高峰时段的负载率一般位于 10%~40%,说明现阶段城市轨道交通牵引负荷具有较大的冲击性,现阶段整流机组利用率较低。
- 2) 本文通过对牵引负荷进行分类,采用  $\beta$  密度函数对牵引负荷的概率密度函数进行拟合,拟合误差均在 0.1 以内,表明本文采用的负荷分类方法以

及用  $\beta$  密度函数拟合城市轨道交通牵引负荷概率密度函数的方法是可行的。在仅掌握少数负荷参数时,本方法可为城市轨道交通牵引负荷过程分析提供更详尽的信息,有利于掌握城市轨道交通牵引负荷特性,为城市轨道交通牵引变电所的容量设计和安全高效运营提供依据。

参考文献

[ 1 ] TANG K L, LI Q Z, ZHANG L Y. Probability distribution of feeder current of electrified railway traction[ J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System & its Automation, 2010( 6 ): 1.

[ 2 ] 张丽艳,李群湛,解绍锋,等. 牵引变电所馈线电流的概率模型[ J]. 西南交通大学学报,2009,44( 6 ): 848.

[ 3 ] 张丽艳. 基于实测数据的牵引负荷统计预测[ C] //中国系统工程学会.第 35 届中国控制会议论文集.成都:中国系统工程学会,2016:6.

[ 4 ] 王斌,张民,高仕斌,等. 高速铁路牵引供电系统负荷率概率模型[ J]. 电力系统及其自动化学报,2015( 6 ): 56.

[ 5 ] 张丽艳,李群湛,朱毅. 新建电气化铁路牵引负荷预测[ J]. 西南交通大学学报,2016( 4 ): 743.

[ 6 ] YE Z, LO E, YUEN K H, et al. Probabilistic characterization of current harmonics of electrical traction power supply system by analytic method[ C] //IEEE. The 25th Annual Conference of the IEEE. San Jose:IEEE, 1999:360-366.

[ 7 ] CHANG G W, WANG H L, CHU S Y. Probabilistic approach for passive harmonic filter planning in a power system[ C] //IEEE. International Conference on Power System Technology. Chongqing: IEEE,2006:1-5.

[ 8 ] 秦永超. 新建电气化铁路负荷预测及其有效性评估[ D]. 成都:西南交通大学,2014.

[ 9 ] 康婕. 电气化铁路牵引负荷的概率分布模型及其应用[ D]. 成都:西南交通大学,2011.

( 收稿日期:2017-09-11)

(上接第 32 页)

[ 12 ] 胡雪莲,陶彩霞. 基于 MSC 与 UPPAAL 的列控系统等级转换场景形式化验证[ J]. 铁道标准设计,2015( 2 ): 122.

[ 13 ] 胡雪莲. 基于 UML 和 UPPAAL 的 CTCS-3 等级列控系统等级转换场景建模与验证[ D]. 兰州:兰州交通大学,2015.

[ 14 ] 康仁伟,王俊峰,吕继东. 基于 UPPAAL 的高铁列控系统等级转换过程建模与验证[ J]. 北京交通大学学报,2012, 36( 6 ): 63.

[ 15 ] 成雅婧. 自主化 CTCS-3 级列控系统复杂场景建模与验证

[ D]. 北京:北京交通大学,2018.

[ 16 ] 杨志杰. CTCS-3 级列控系统关键设备自主化研究[ J]. 中国铁路,2018( 7 ): 1.

[ 17 ] 中国铁路总公司. 自主化 C3 等级列控车载设备暂行技术条件: TJ/DW 205—2018[ S]. 北京:中国铁路总公司,2018.

[ 18 ] ALUR R, DILL D L. A theory of timed automata[ J]. Theoretical Computer Science, 1994, 126( 2 ): 183.

( 收稿日期:2019-04-22)