

文章编号: 1001-4632 (2010) 06-0086-06

CTCS-3 级列控系统防撞协议的建模、设计和实现

李开成^{1,3}, 徐田华², 唐 涛²

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044;

2. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044; 3. 铁道部 C3 技术攻关组, 北京 100844)

摘 要: CTCS-3 级列控系统车载设备和 RBC 之间通过防撞协议进行协调控制。根据列车防撞安全需求, 采用安全 UML 中的安全用例图和安全类图表示防撞协议模型, 实现在任意时间间隔内, 列车运行速度不超过期望速度, 并且列车位置永远不能越过行车许可 (MA) 的安全功能。防撞协议的安全功能通过连续防撞策略和离散防撞策略的形式化精化实现。前者给出了列车速度和位置为连续变量的情况下, 防撞协议的静态结构、动态交互和连续控制策略; 后者利用离散逻辑实现了连续防撞策略的离散化。通过对离散防撞策略的进一步精化, 生成防撞协议的实时程序代码。严格的形式逻辑 WDC* 的推理保证了连续防撞策略、离散防撞策略和最终代码精化的正确性和安全性。

关键词: 列车控制系统; 防撞协议; 安全 UML; 防撞策略

中图分类号: U284.482 **文献标识码:** A

CTCS-3 级列控系统具有高度分布性、实时性和随机性等特征, 其安全性不仅需要采用测试和仿真手段验证, 也需要采用相应的建模语言和设计方法进行验证。

统一建模语言 (UML) 作为面向对象分析和设计的标准建模语言^[1]具有以下优势: ①统一了静态结构和动态行为等不同方面的描述; ②以不同视角构建模型, 克服了传统建模方法的单视图弱点^[2]; ③良好的可扩展机制。但在安全苛求系统开发领域, 传统的 UML 难以体现安全属性的约束, 为了更好地满足安全系统设计的需要, 安全 UML 应运而生^[3]。安全 UML 不仅具有一般 UML 的优势, 而且还将系统的安全属性融入系统的建模和设计过程之中。另外, 传统的 UML 建模方法缺乏严格的数学支持, 难以满足 CTCS-3 级列控系统的要求。根据 IEC61508 标准^[4], 对于安全完善度等级为 SIL4 的系统, 强烈推荐形式化方法, 即基于严格数学基础的安全特性推理和证明。因此, 建立在严格数学基础上的安全 UML 设计方法成为安全系统设计的选择。本文以 CTCS-3 级列控系统的防撞协议为例, 给出集成安全 UML 和形式化语言的系

统建模、验证和实现过程。

1 CTCS-3 级列控系统防撞协议

CTCS-3 级列控系统防撞协议原理如图 1 所示, 其中图 1 (a) 为 2 列车追踪运行的 CTCS-3 级列控系统车载设备与无线闭塞中心 (RBC) 之间信息交互示意图, 图中 ST (Start Talking) 为车载设备与 RBC 通信的起始位置, 其距离等于 6 s 内列车的运行距离, SB (Start Braking) 为车载设备实施制动的起始位置; 图 1 (b) 为 CTCS-3 级列控系统防撞协议阶段转移图。车载设备和 RBC 之间通过防撞协议的协调控制, 实现 CTCS-3 级列控系统的安全、高效运行。

根据参考文献 [5] 可知 CTCS-3 级列控系统防撞协议包括如下 2 方面内容: ① CTCS-3 级列控系统车载设备每 6 s 向 RBC 报告 1 次列车位置, RBC 收到列车位置报告后, 如果有新的行车许可 (Movement Authority, MA), 就向车载设备发送新的 MA 和线路描述信息, 否则只发送确认信息; ② 车载设备根据接收到的 MA 和线路描述信

收稿日期: 2010-05-20; 修订日期: 2010-09-09

基金项目: 国家“八六三”计划项目 (2009AA11Z221); 国家科技支撑计划项目 (2009BAG12A08); 国家自然科学基金资助项目 (60634010, 60736047)

作者简介: 李开成 (1966—), 男, 广西北流人, 副教授。

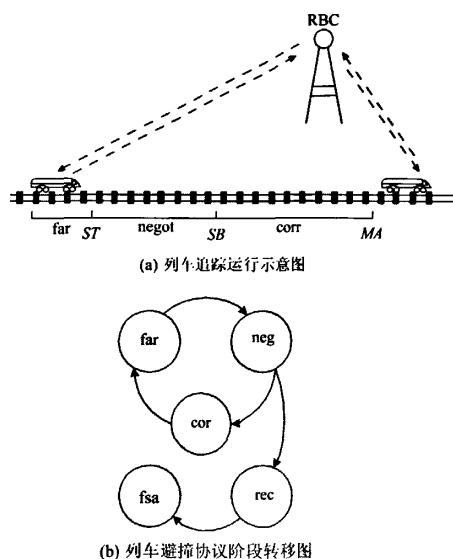


图1 CTCS-3 级列控系统防撞协议原理示意图

息计算动态速度曲线,结合动态速度曲线和列车位置,确定是否需要输出制动命令。结合图1进行列车控制的过程如下:当列车位置 z 小于 ST 时,系统处于远离状态(far),车载设备监控列车运行;当检测到列车速度超出允许速度,发出减速制动命令;当列车位置 z 越过 ST 点,但没有超过 SB 点,即 $ST < z < SB$,车载设备进入通信协商状态(neg),这标志着车载设备与RBC通信的开始,以获得 MA 的延伸。车载设备与RBC开始通信后:如果在规定的通信时间间隔(20 s)内,车载设备接收到RBC发出的 MA 延伸信息,则进入调整状态(cor),若在此过程中,车载设备实施制动,则进入恢复状态(rec),车载设备向列车发出制动命令,系统进入安全状态(fsa);如果在规定的通信时间间隔(20 s)内车载设备没有收到RBC的信息,或者列车到达 SB 点,RBC仍没有延伸 MA ,则在 SB 点车载设备实施制动,直至列车在行车许可终点(EoA)前完全停稳,系统进入到安全状态(fsa)。由于目的在于验证CTCS-3级列控系统的安全性,所以本文只研究车地通信超时后不转入后备系统、而是继续工作在CTCS-3级的情况。

2 CTCS-3 级列控系统防撞协议模型

CTCS-3 级列控系统防撞协议的模型用安全UML中的安全用例图表示,如图2所示。用例图描述系统外部的执行者与系统提供的用例之间的某

种联系。在需求分析阶段,用例图用于描述待开发系统的功能需求;在需求分析之后,驱动后续设计阶段保证系统功能的实现,同时可用于验证和检验所开发系统的功能和安全属性。

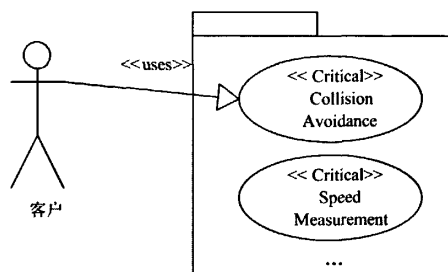


图2 CTCS-3 级列控系统用例图

图2给出了CTCS-3级列控系统防撞协议用例图。考虑到文章的篇幅,图2中仅给出防撞和速度测量2个用例,以及防撞协议的2个基本功能和安全属性。注意,这2个安全用例均使用构造型模版《Critical》进行约束,即速度测量功能和防撞功能均为安全苛求功能,若其失效将会导致列车出现重大的人员和财产损失。

CTCS-3 级列控系统的防撞协议所体现出的功能(简称CA(Collision Avoidance, CA)安全属性)用基于WDC*的形式描述如下^[6]

$$Req \triangleq \square(\llbracket 0 \leq v \leq v_{des} \rrbracket \wedge \llbracket 0 \leq z \leq m \rrbracket) \quad (1)$$

式(1)中安全需求 Req 表示为:在任意时间间隔(\square)内列车运行速度 v 不能超过期望速度 v_{des} ,并且列车位置永远不能超出 MA 终点(EoA)的距离 m 。这里,期望速度 v_{des} 由轨道区段限速和RBC发送的 MA 信息计算得出。

3 防撞协议的形式化精化

防撞协议的形式化精化分为连续防撞策略的精化和离散防撞策略的精化。下面分别进行说明。

3.1 连续防撞策略

连续防撞策略主要实现如下目的:在列车速度和位置为连续变量的前提下,设计列控系统的静态结构和动态交互、连续控制策略,使其满足CA安全属性。连续防撞策略设计分为静态结构和动态交互设计、连续防撞策略设计两部分。

3.1.1 连续防撞策略的静态结构和动态交互设计

系统的静态结构设计由安全UML类图表示,

如图 3 所示。

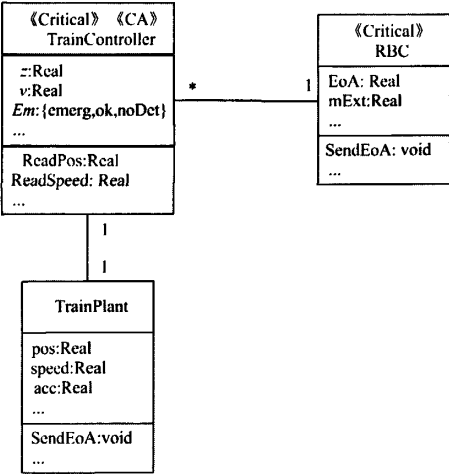


图 3 连续避撞策略的静态结构

图 3 中, TrainController 表示车载设备的主机, 负责读取列车位置、速度, 并根据 RBC 发送的 MA 和线路描述信息, 计算与 RBC 通信的起始点 ST 、制动起始点 SB , 向列车发送制动命令, 控制列车安全运行; TrainPlant 实现列车测速功能, 向 TrainController 发送速度和位置信息, 并接收 TrainController 发出的制动命令; RBC 通过向 TrainController 发送 MA 和线路描述信息, 协调其管辖区间内的列车运行。

列控系统的安全属性通过安全 UML 的构造型模版进行约束。图 3 中, TrainController 由《Critical》和《CA》限制, 分别标明其为安全苛求系统, 并且需要满足 CA 安全属性的约束。其他的模版与此类似, 这里不再一一说明。

根据列控系统避撞协议 (参见第 2 节), 图 4 给出其连续避撞策略的状态转移 (即动态交互)。

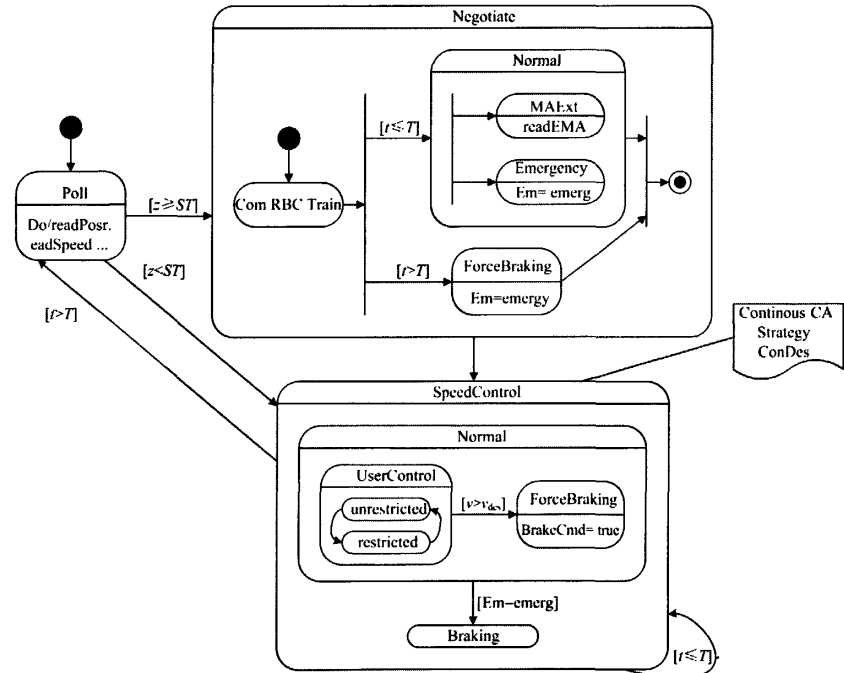


图 4 连续避撞策略的状态转移 (即动态交互)

TrainContoller 在 poll (轮询) 状态, 读取列车的位置 z 、运行速度 v 和加速度 a 信息, 根据收到的 MA 信息和线路描述, 计算 ST 和 SB 。当列车位置大于 ST ($z > ST$), 车载设备向 RBC 发起协商 (Negotiate) 请求, 进入协商状态 (Negotiate); 在正常情况下 (Normal), 即在规定的通信时间间隔内, RBC 发出 MA 延伸信息, 则列控系

统进入 MAExt 状态, 同时读取接收到的延伸 MA (readEMA), 然后进入速度控制状态 (SpeedControl); 或者在正常状态 (Normal), 车载设备发出制动命令, 进入 Emergency 状态, 将变量 Em 置为制动 ($Em = emerg$)。在进入 SpeedControl 状态后, 实施列车制动 (Braking); 如果 RBC 在时间间隔内没有响应, 则进入 Force-

Braking 状态, 同样, 将 Em 置为制动状态 ($Em = emerg$), 进入 SpeedControl 状态后, 实施列车制动 (Braking)。

速度控制状态 (SpeedControl) 由正常状态 (Normal) 和制动状态 (Braking) 构成。后者当检测到 $Em = emerg$, 则发出制动命令, 直至列车完全停稳。Normal 由 2 个子状态 UserControl 和 ForceBraking 组成, 分别表示正常行车和制动。

3.1.2 连续控制策略设计

考虑如下的连续状态变量 $v_h \triangleq v \geq v_{des} - A\theta$ ($v_l \triangleq v \leq b\theta$), 分别表示列车速度 v 大于速度上限值 $v_{des} - A\theta$ (或小于速度下限值 $b\theta$)。A 为最大加速度; b 为最大减速度; θ 为列控系统的最大响应时间。其他参数的说明如下。

Em 为发出制动消息, 取值为 $emerg, ok, NoDet$, 分别表示制动状态、正常状态和不确定状态; a 为列车加速度; $Brake \triangleq a = -b$ 为列车处于制动状态时的加速度取值; $Acc \triangleq a = A$ 为列车处于加速状态时的加速度取值; L 为列控系统 with RBC 建立通信的最大延迟时间; T 为 CTCS-3 级列控系统的控制周期。

假设列车速度范围为 $[0, v_{des}]$, 加速度 a 的取值范围 $[-b, A]$, 参数 z, EoA, m 和 θ 均为非负实数, 并且期望速度为 v_{des} , RBC 建立会话起始点为 ST , 起始制动点为 SB , 速度上限为 v_h , 速度下限为 v_l , 则构成的避撞控制策略的环境 B 用公式可表示为

$$\begin{aligned} B \triangleq & (0 \leq v \leq v_{des}) \wedge (-b \leq a \leq A) \wedge \\ & (z \geq 0) \wedge (m \geq 0) \wedge \\ & (\theta \geq 0) \wedge (v_{des} \leq 2b(m - z)) \wedge \\ & (SB \geq \frac{v^2}{2b} + \frac{A^2\theta}{2} + \omega\theta) \wedge \\ & (ST \geq Lv + \frac{v^2}{2b}) \wedge \\ & (v_{des} - (T + \theta)b \geq v_l) \wedge \\ & (A(T + \theta) \leq v_h) \wedge (T > \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

在上述环境下, 设计的连续控制策略必须完成如下功能。

(1) 保持期望的速度。如果列车的速度超过期望的速度, 速度监控部件需要选择减速; 相反, 如果列车速度低于期望的速度, 速度监控部件选择列车加速, 直至速度达到期望的值。

(2) 制动。只要车载设备检测到列车有超越 EoA 的可能, 则实施制动, 直至列车在 EoA 前端

完全停稳。

根据上述功能要求和连续避撞策略环境, 得到的连续控制策略为

$$ConDes \triangleq ConDes_1 \wedge ConDes_2 \wedge ConDes_3 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} ConDes_1 = & (0 \leq z \leq ST) \wedge (((v_h \triangleright_{\theta} Brake) \\ & \wedge l = T) \vee ((v_l \triangleright_{\theta} Acc) \wedge l \\ & = T)) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} ConDes_2 = & (ST \leq z \leq SB) \wedge (((Em = \\ & emerg) \wedge l < L) \vee ((Em = \\ & NoDet) \wedge l = L)) \wedge ((v > \\ & 0 \triangleright_{\theta} Brake) \wedge l = T)^* \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} ConDes_3 = & (((SB \leq z \leq m \wedge v > \\ & 0) \triangleright_{\theta} Brake) \wedge l = T)^* \end{aligned} \quad (6)$$

具体地说, 连续控制策略 $ConDes_1$ 描述了系统在 far 状态 ($0 \leq z < ST$) 时的控制方式, $ConDes_2$ 描述了系统在 $negot$ 状态 ($ST \leq z < SB$) 时的控制方式, $ConDes_3$ 描述了系统在 rec 状态 ($SB \leq z < m$) 时的控制方式。连续控制策略 $ConDes$ 表现为 SpeedControl 的约束, 如图 4 所示。

下述定理保证了连续避撞策略 $ConDes$ 满足 CA 安全的需求, 其证明可参阅文献 [4]。

定理 1: $ConDes \Rightarrow Req$

3.2 离散避撞策略

控制软件本质上是离散的, 为了得到最终的实时控制程序, 需要将连续避撞策略向离散避撞策略转化, 离散避撞策略是对连续避撞策略的精细化。离散避撞策略设计同样分为静态结构和动态交互设计、离散控制策略设计两部分, 与连续避撞策略设计类似, 唯一的区别在于将连续的避撞策略 $ConDes$ 精化为离散的避撞策略 $DisDes$ 。下面仅对离散避撞策略的设计进行说明。

设 z_d 为对列车位置 z 的取样, 二者的关系为 $z_d \approx_{\delta} z$, 这里 δ 为取样间隔。引入控制状态 $state$, 其取值范围为 $\{Acc, Brake\}$, 分别对应列车的加速和制动, 列车加速和制动命令的公式分别为 $Acc_{cmd} \triangleq state = Acc$, $Brake_{cmd} \triangleq state = Brake$ 。离散状态变量 Acc_{cmd} 和 $Brake_{cmd}$ 与连续状态变量 Acc 和 $Brake$ 的关系为 $Acc_{cmd} \triangleright_{\tau} Acc$ and $Brake_{cmd} \triangleright_{\tau} Brake$, 用 τ 表示列车加速和减速的响应时间, 则离散避撞策略公式为

$$DisDes \triangleq \varphi_c^* \quad (7)$$

$$\varphi_c \triangleq l = \delta \wedge (DisDes_1 \vee DisDes_2 \vee DisDes_3) \quad (8)$$

其中,

$$DisDes_1 = \llbracket (0 \leq z_d > ST) \wedge (((v_d \geq v_h) \wedge Brake_{cmd}) \vee ((v_d \leq v_l) \wedge Acc_{cmd})) \wedge l = T \rrbracket \quad (9)$$

$$DisDes_2 = \llbracket (ST \leq z_d < SB) \wedge (((Em = emerg) \wedge (l < L)) \vee ((Em = NoDet) \wedge (l = L))) \wedge (v_d > 0) \rrbracket \wedge \llbracket (v_d > 0) \wedge Brake_{cmd} \wedge l = T \rrbracket \cdot \quad (10)$$

$$DisDes_3 = \llbracket (SB \leq z_d < m) \wedge (v_d > 0) \wedge Brake_{cmd} \wedge l = T \rrbracket \cdot \quad (11)$$

离散控制策略设计 $DisDes$ 的直观解释类似于连续控制策略, 上述公式的 $DisDes_1$, $DisDes_2$ 和 $DisDes_3$ 分别对应 far, negot 和 rec 控制阶段, 其中 v_d 表示离散的速度变量。另外, 需要注意的是, $l=\delta$ 表示了列车速度和位置的取样间隔。

下述定理证明了离散避撞控制策略满足 CA 安全属性, 即实现了连续设计的精化, 证明可参阅文献 [4]。

定理 2: $B \vdash DisDes \Rightarrow ConDes$

4 代码生成

精化的正确性要求证明实时程序满足离散避撞控制策略 $DisDes$ 。由离散设计精化得到的实时程序代码如下。

```

 $P_{Cont} \triangleq Em := NoDet$ 
while  $v_d > 0$  do
   $(Pos, Spd)?(z_d, v_d) \rightarrow$ 
     $v_{des} := \sqrt{2b(m - z_d)}$ ;
     $SB := v_{des}^2/2b + A\theta^2/2 + v\theta$ ;
     $ST := Lv + v^2/2b$ ;
     $[0 \leq z_d < ST \rightarrow$ 
       $[v_d \geq v_h \rightarrow SC!Brake_{cmd}; \text{delay } T;$ 
         $[v_d \leq v_l \rightarrow SC!Acc_{cmd}; \text{delay } T;$ 
      ]
    ]
     $[ST \leq z_d < SB \rightarrow [MAstatus,$ 
       $MAext)?(Em, m_{ext}) \rightarrow [Em = ok \rightarrow$ 
         $m := m + m_{ext}$ 
         $[Em = emerg \rightarrow$ 
          While  $v_d > 0$  do

```

```

       $SC!Brake_{cmd}; Spd?v_d; \text{delay } T;$ 
    od
  ]
   $[delay L \rightarrow Em = NoDet \rightarrow$ 
    While  $v_d > 0$  do
       $SC!Brake_{cmd}; Spd?v_d; \text{delay } T;$ 
    od
  ]
   $[SB \leq z_d < m \rightarrow$ 
    While  $v_d > 0$  do
       $SC!Brake_{cmd}; Spd?v_d; \text{delay } T;$ 
    od
  ]
od

```

令 E 表示 P_{Cont} 的循环体, 定理 3 给出离散设计到程序代码精化的正确性, 即如果列车位置和速度满足前提条件, 则每次 P_{Cont} 的循环都会正常结束, 且满足 $DisDes$ 。

定理 3: 三段式

$$\{(0 \leq z_d \leq m) \wedge (0 \leq v_d \leq v_{des})\} [E, \varphi_C] \\ \{(0 \leq z_d \leq m) \wedge ((v_d = 0) \vee (0 \leq v_d \leq v_{des}))\}$$

成立

定理 3 证明可参阅文献 [7]。

通过从 CA 安全需求, 到连续闭撞策略、离散闭撞策略, 直至最后的实时程序, 实现了 CTCS-3 级列控系统避撞协议从安全属性到代码的精化, 精化的正确性由严格的形式逻辑 WDC* 推理得到保证。

5 结 语

本文结合安全 UML 和形式化模型转换方法, 提出了 CTCS-3 级列控系统避撞协议的设计方法。首先根据安全需求, 给出了避撞协议的安全 UML 建模, 然后给出了避撞协议的形式化精化, 包括连续避撞策略和离散避撞策略直至最后的代码生成。由于提出的设计方法建立在严格的数学基础上, 从而保证了 CTCS-3 级列控系统避撞协议的建模、设计和实现过程的正确性和安全特性。

参 考 文 献

- [1] Object Management Group. Version 2.1.1 Unified Modeling Language: Superstructure [S]. <http://www.omg.org/spec/UML/2.1.2/Superstructure/PDF>.
- [2] 徐田华, 唐涛. 列车控制系统中数据通信子系统的帧丢失概率 [J]. 中国铁道科学, 2008, 29 (3): 110-114.
(XU Tianhua, TANG Tao. Frame Loss Probability of Data Communication Subsystem in Train Control System [J]. China Railway Science, 2008, 29 (3): 110-114. in Chinese)
- [3] JAN J. Secure Systems Development with UML [M]. Berlin: Springer Academic Publishers, 2004.
- [4] International Electrotechnical Commission. IEC61508-2000 Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems [S]. Seattle: <http://www.iec.ch>.
- [5] 张曙光. CTCS-3 级列控系统总体技术方案 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [6] XU Tianhua, TANG Tao, GAO Chunhai, et al. Logic Verification of Collision Avoidance System in Train Control Systems [C] //2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium; IEEE IV. Xi'an: Xi'an IEEE Intelligent Transportation Systems Society, 2009: 918-923.
- [7] SHANE S, WOJTEK K. Model Transformation: the Heart and Soul of Model-Driven Software Development [J]. IEEE Software, 2003, 20 (5): 42-45.

The Modeling, Design and Implementation of the Collision Avoidance Protocol in CTCS-3 Train Control System

LI Kaicheng^{1,3}, XU Tianhua², TANG Tao²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. C3 Group, Ministry of Railways, Beijing 100844, China)

Abstract: The coordination between the on-board equipment of Chinese Train Control System Level 3 (CTCS-3) and the Radio Block Center (RBC) is realized by the collision avoidance protocol (CAP). According to the safety requirement for train collision avoidance, the model of CAP is represented by safety use case diagram and safety class diagram in the safety UML to implement the following safety functions: the train speed can never exceed the desired speed in any interval and the train position is never beyond the end of Movement Authority (MA). The safety function of CAP is implemented by the formal refinement of the continuous and discrete collision avoidance strategies. The former gives the static structure, the dynamic interaction and the continuous control strategy of CAP in the case that the speed and the position of the train are continuous variables. Otherwise, the latter has achieved the discretization for the continuous collision avoidance strategy by discrete logic. The CAP real-time program code is generated through the further refinement of the discrete collision avoidance strategy. The correctness and the safety of the refinement for the continuous and discrete collision avoidance strategies as well as the final code generation have been guaranteed by the rigorous reasoning based on the formal logic-Weakly monotonic time extension of iterative Duration Calculus (WDC*).

Key words: Train control system; Collision avoidance protocol; Safety UML; Collision avoidance strategy

(责任编辑 刘卫华)

作者: [李开成](#), [徐田华](#), [唐涛](#), [LI Kaicheng](#), [XU Tianhua](#), [TANG Tao](#)
作者单位: [李开成, LI Kaicheng \(北京交通大学, 电子信息工程学院, 北京, 100044; 铁道部C3技术攻关组, 北京, 100844\)](#), [徐田华, 唐涛, XU Tianhua, TANG Tao \(北京交通大学, 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京, 100044\)](#)
刊名: [中国铁道科学](#) **ISTIC EI PKU**
英文刊名: [CHINA RAILWAY SCIENCE](#)
年, 卷(期): 2010, 31(6)

参考文献(7条)

1. Object Management Group Version 2.1.1 Unified Modeling Language: Superstructure
2. [徐田华; 唐涛](#) 列车控制系统中数据通信子系统的帧丢失概率[期刊论文]-[中国铁道科学](#) 2008(03)
3. [JAN J](#) Secure Systems Development with UML 2004
4. International Electrotechnical Commission IEC61508-2000 Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems
5. [张曙光](#) CTCS-3级列控系统总体技术方案 2008
6. [XU Tianhua; TANG Tao; GAO Chunhai](#) Logic Verification of Collision Avoidance System in Train Control Systems 2009
7. [SHANE S; WOJTEK K](#) Model Transformation: the Heart and Soul of Model-Driven Software Development [外文期刊] 2003(05)

本文读者也读过(9条)

1. [邸丽清](#), [袁湘鄂](#), [王永年](#), [DI Liqing](#), [YUAN Xiang'e](#), [WANG Yongnian](#) CTCS-3级列控系统RAM指标评价方法研究[期刊论文]-[中国铁道科学](#) 2010, 31(6)
2. [蔺伟](#), [姜永富](#), [徐钧](#), [沈京川](#), [LIN Wei](#), [JIANG Yongfu](#), [XU Jun](#), [SHEN Jingchuan](#) CTCS-3级列控区段采用数字光直放技术延伸GSM-R基站覆盖方案研究[期刊论文]-[中国铁道科学](#) 2010, 31(6)
3. [徐乐英](#), [穆建成](#), [徐效宁](#), [宋志丹](#), [XU Leying](#), [MU Jiancheng](#), [XU Xiaoning](#), [SONG Zhidan](#) 基于ROPES的CTCS-3级列控系统车载设备的建模[期刊论文]-[中国铁道科学](#) 2010, 31(6)
4. [吕继东](#), [唐涛](#), [贾昊](#), [Lǚ Jì-dong](#), [TANG Tao](#), [JIA Hao](#) 客运专线CTCS-3级列控系统无线闭塞中心的建模与验证[期刊论文]-[铁道学报](#) 2010, 32(6)
5. [梁楠](#), [王海峰](#), [LIANG Nan](#), [WANG Hai-feng](#) 基于SPN的CTCS-3级列控系统RBC实时性能分析[期刊论文]-[铁道学报](#) 2011, 33(2)
6. [牛儒](#), [曹源](#), [唐涛](#) ETCS-2级列控系统RBC交接协议的形式化分析[期刊论文]-[铁道学报](#) 2009, 31(4)
7. [周晔](#), [程先东](#), [赵洪军](#), [王帅](#), [ZHOU Wei](#), [CHENG Xiangdong](#), [ZHAO Hongjun](#), [WANG Shuai](#) CTCS-3级列控系统动态测试优化方法[期刊论文]-[中国铁道科学](#) 2010, 31(5)
8. [徐田华](#), [唐涛](#), [XU Tianhua](#), [TANG Tao](#) 列车控制系统中数据通信子系统的帧丢失概率[期刊论文]-[中国铁道科学](#) 2008, 29(3)
9. [陈德旺](#), [唐涛](#), [郇春海](#), [穆瑞琦](#), [CHEN Dewang](#), [TANG Tao](#), [GAO Chunhai](#), [MU Ruiqi](#) 城轨列车在车站停车误差估计模型与在线学习算法的研究[期刊论文]-[中国铁道科学](#) 2010, 31(6)