

CTCS-3 列控系统 RBC 切换的 形式化建模、分析与验证*

潘 登, 郑应平

(同济大学 控制科学与工程系, 上海 201804)

摘 要: 针对影响 RBC 切换质量的列车速度、RBC 切换时间等诸因素, 以及澄清对 RBC 交接协议安全性在认识上的一些误区, 利用随机 Petri 网形式化描述工具, 建立了 CTCS-3 列控系统 RBC 切换模型。通过理论分析和仿真实验, 验证了不同速度条件下高速列车越区运行 RBC 交接协议 A、B 的可靠性、安全性和合理性。交接协议 B 作为协议 A 的冗余措施, 由于考虑了 RBC 切换过程中通信中断时间, 从 RBC 切换成功概率上讲, 并不存在安全上的问题, 但降低了 RBC 切换效率, 对行车效率有所影响; 列车速度进一步提高时, RBC 切换的可靠性下降, 可考虑适当增加 RBC 重叠覆盖区域、场强和列车间隔时间裕量。

关键词: CTCS-3 列控系统; RBC 切换; 通信协议; 形式化建模; Petri 网; 分析与验证

中图分类号: TP29; U28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)02-0443-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.034

Formal modeling, analysis and verification of RBC handover for CTCS-3 train control system

PAN Deng, ZHENG Ying-ping

(Dept. of Control Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to understand the influence of train speed, RBC handover time, etc. on the quality of RBC handover, and clarify the misunderstanding on the safety of RBC handover protocols, it chosen the stochastic Petri net as the formal description tool to establish the RBC handover model of Chinese train control system level 3. By theoretical analysis and simulations, verified the reliability, safety and rationality of RBC handover protocol A, B under the condition of high-speed train running in RBC handover area with different speed. Because the interruption interval had been taken into account by the RBC handover protocol B, as a redundant measure of protocol A, it has no safety problem in terms of the success probability of RBC handover, but the reduction of RBC handover efficiency has a negative impact on the efficiency of train operation. On the other hand, as the train speed increases, the reliability of RBC handover will go down. To keep the reliability meeting with requirements of the related standards, increasing the overlapping coverage areas between the adjacent RBCs, radio-field strength and the time margin of train headway can be taken into account.

Key words: Chinese train control system level 3; radio block center (RBC) handover; communication protocols; formal modeling; Petri net; analysis and verification

0 引言

铁路线路采取 GSM-R 无线网络 RBC 分区链式覆盖方式, RBC 切换质量已经成为制约列车安全、高效运行的主要因素之一。文献[1]针对 ETCS-2 列控系统建立了 RBC 交接失败概率模型, 分析了列车运行速度、RBC 重叠范围对交接成功概率的影响, 并得出“300 km/h 车速条件下切换成功率达 99.5%, 交接协议 A 需设 60 s 交接区域、交接协议 B 需设 80 s 交接区域”的结论, 从而对遵循交接协议 B 进行 RBC 切换的安全性提出质疑, 并建议 CTCS-3 使用交接协议 A。没有注意到任意一部车载无线电台故障时, 交接协议 B 作为交接协议 A 冗余措施的必要性, 这对减轻故障影响列车安全、高效运行的程度无疑是非常重要的。文献[2]研究了 CTCS-3 列控系统车地数据通信在越区切换时的传输可靠性, 给出了

列车速度与越区切换成功率的关系, 以及列车在 350 km/h 的速度条件下, 越区切换时间与越区切换成功率之间的关系。如果列车速度进一步提高, 如何采取措施保证列车越区切换的成功率, 文中并没有给出更富建设性的意见。文献[3]分析了无线通信系统中列车运行速度、列车位置报告周期对列车时间间隔的影响, 给出了对应的列车安全间距指标, 但是没有针对交接协议 A 和 B 分别进行讨论。文献[4]对高速列车在移动闭塞条件下越区切换的无线通信进行了形式化建模和可靠性分析, 给出了对通信故障定位的表示方法, 对采取措施提高设备运行可靠性、安全性有着重要意义; 并针对时速 500 km/h 的高速列车提出了调整无线通信基站地理分布的建议, 这无疑可以提高车地通信质量问题和 RBC 切换成功率, 但全面运用于我国高铁线路的技术改造, 成本可能会非常巨大。文献[5]针对 RBC 的安全需求, 提出安全计算机

收稿日期: 2012-06-30; 修回日期: 2012-07-30 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174183)

作者简介: 潘登(1969-), 安徽怀远人, 博士, 主要研究方向为智能自动化理论及其应用、智能交通 (pandengreal@126.com); 郑应平(1941-), 男, 教授, 硕士, 主要研究方向为智能控制理论及其应用、复杂系统、Petri 网。

平台设计方法,并进行了仿真研究,为 RBC 切换交接协议的安全性分析提供了参考。上述研究成果为 RBC 切换持续研究奠定了良好的基础。

1 基本概念

1.1 RBC 切换时间

RBC 切换时间是指列车的管辖权由当前 RBC 分区切换为下一 RBC 分区行使、从切换开始至切换完毕为止这段时间。图 1 描述了列车两部通信电台同时工作的情形。

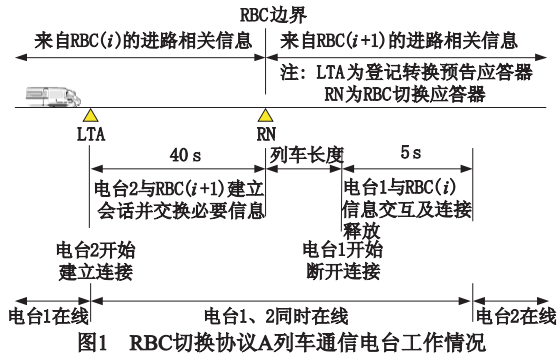


图1 RBC切换协议A列车通信电台工作情况

列车行驶至预告应答器 LTA 时遵循交接协议 A 启动 RBC 切换,待列车行驶至切换应答器 RN 时,进路信息完全由 RBC ($i+1$) 提供,从而完成了列车管辖权由 RBC (i) 到 RBC ($i+1$) 的切换。由于移动授权 MA 与列车位置属于周期性消息,列车越过切换应答器的瞬间,列车可能仍然按照 RBC (i) 告知的延伸移动授权运行,但列车获取的进路信息全部来自 RBC ($i+1$),RBC ($i+1$) 实际上已经被授予了对列车的管辖权,即使 RBC ($i+1$) 还未对列车实施管辖权;至于列车与 RBC ($i+1$) 断开通信连接,已不涉及管辖权问题,这正是交接协议 A 在 RBC 切换过程中基于双电台并发工作能够对列车的管辖权“先换后切”的特点所致。

与交接协议 A 不同,交接协议 B 在列车只有一部电台正常工作时被遵循。对于协议 B,列车尾部越过切换应答器后,必须先断开与 RBC (i) 的连接后才能与 RBC ($i+1$) 建立起通信,即“先切后换”。考虑到断开与 RBC (i) 连接的时间,注册开始时间滞后 τ s,如图 2 所示。假设 t_A 、 t_B 为交接协议 A、B 的 RBC 切换时间,《CTCS-3 级列控系统 GSM-R 网络需求规范 (v 1.0)》(铁道部科技运[2008]168 号)规定,列车注册下一 RBC 分区的时间必须在 40 s 内完成,即 $t_A \leq 40$ s、 $t_B \leq 40$ s。其中, τ 为交接协议 B 中从列车开始与 RBC (i) 断开连接时起至开始向 RBC ($i+1$) 注册或连接这段时间。

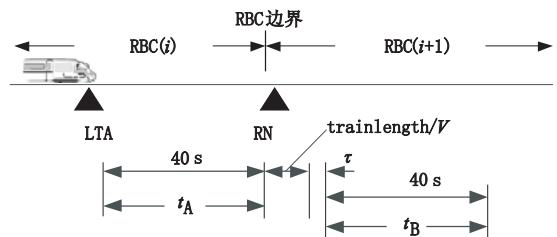


图2 交接协议A、B的RBC切换时间示意图

正是两种交接协议的存在以及等级转换,文献[6]规定相邻 RBC 重叠覆盖区域为 80 ~ 85 s 的列车运行距离。由于两部通信电台并发工作可以实现 RBC 对列车越区的无缝管辖,协议 A 较协议 B 的切换时间更短,而协议 B 只是作为协议 A 的冗余措施在其中一部电台故障时才使用。

假定列车长度取典型值 400 m,从图 1、2 均可看出,“ETCS-2 列控系统 300 km/h 车速条件下切换成功率达 99.5%,交接协议 A 需设 60 s 交接区域、交接协议 B 需设 80 s 交接区域”的结论^[1],并不适用于 CTCS-3 列控系统。

1.2 RBC 切换成功率

RBC 切换成功率是指列车运行过程中 RBC 切换成功的概率。车地通信存在时滞、丢包等因素,列车速度越快,上述因素的作用愈显著,因此合理的 RBC 切换时间是 RBC 切换成功的前提,同时也是列车安全、高效运行的保障。

2 RBC 切换协议及动态切换过程

列车两部无线通信电台均可正常工作时,车地通信遵循 RBC 交接协议 A;只有一部无线通信电台能够正常工作时,车地通信遵循 RBC 交接协议 B。

2.1 列车无线通信电台的切换模型

图 3 描述了列车无线电台的状态变迁。

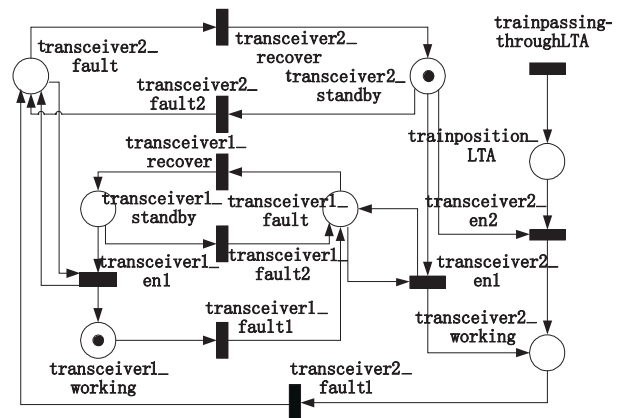


图3 列车无线电台状态变迁的混合Petri网模型

各库所、变迁的功能及特性说明如表 1 所示。其中,变迁 trainpassingthroughLTA 由列车行为控制,属于事件触发类型的变迁。列车实际运行过程中,通信电台故障是随机发生的,因此车地通信 RBC 交接必须具备由协议 A 随机自动转换为交接协议 B 的功能。

表 1 图 3 中各库所、变迁的含义及特性说明

库所或变迁	含义	发射概率	发射速率 λ/s^{-1}
transceiver1_working	电台 1 工作状态		
transceiver1_fault	电台 1 故障状态		
transceiver1_standby	电台 1 待备状态		
transceiver2_working	电台 2 工作状态		
transceiver2_fault	电台 2 故障状态		
transceiver2_standby	电台 2 待备状态		
trainposition_LTA	列车通过预告应答器		
transceiver1_fault1	电台 1 工作期间发生故障		9.259×10^{-9}
transceiver1_fault2	电台 1 待备期间发生故障		9.259×10^{-9}
transceiver1_recover	电台 1 故障恢复	0	
transceiver1_fire1	电台 1 激活 1	1	
transceiver2_fault1	电台 2 工作期间发生故障		9.259×10^{-9}
transceiver2_fault2	电台 2 待备期间发生故障		9.259×10^{-9}
transceiver2_recover	电台 2 故障恢复	0	
transceiver2_fire1	电台 2 激活 1	1	
transceiver2_fire2	电台 2 激活 2	1	
trainpassingthroughLTA	列车通过预告应答器		

假定列车由 $RBC(i)$ 管辖并正常运行,电台 1 处在工作状态负责与 $RBC(i)$ 的通信,列车经过预告应答器时,激活电台 2 使其能够与 $RBC(i+1)$ 通信,此时 RBC 切换遵循交接协议 A。只有一部电台能够正常工作,RBC 切换遵循交接协议 B。如果电台 2 因故障不处在待备状态,电台 1 将一直工作下去,除非出现故障;如果电台 1 故障,由电台 2 投入工作负责车地通信。

2.2 信道传播模型

车地通信难免会受到各种干扰及失去通信连接,图 4 描述了信道良好(channel good)、突发降质(channel burst)和失去连接(channel disconnect)三种状态及演变规律。

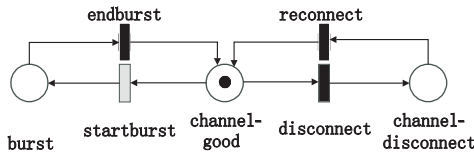


图4 信道传播状态演变模型

突发降质包括丢包、乱序、损坏和延时等几种。《CTCS-3 级列控系统 GSM-R 网络需求规范(v 1.0)》(铁道部科技运[2008]168 号)规定,GSM-R 突发降质产生周期大于 7 s 的概率为 99%,降质持续时间小于 1 s 的概率亦为 99%,移动用户主叫的连接建立时延应满足 $< 8.5\text{ s}$ (95%), $\leq 10\text{ s}$ (100%),大于 10 s 则认为连接失败。因此,突发降质的时间长于 10 s 时,无论是信息重发还是信息丢失,均与信道中断无异,故本模型将其归于信道中断处理。

各库所、变迁的功能及特性说明如表 2 所示。

表2 图4中各库所、变迁的含义及特性说明

库所或变迁	含义	发射概率	备注
channel good	信道良好		
channel burst	信道突发降质		
channel disconnect	信道中断		
startburst	发生突发降质	0.070 7	Guard Function: random(10) s 含 >10 s 的 突发降质干扰
endburst	突发降质结束	1	
disconnect	信道发生中断	2.780×10^{-5}	
reconnect	通信连接重建	0.962	

2.3 交接协议模型

图 5 描述了信道状态良好时车地通信跨区 RBC 切换的一般情形。其中,■代表周期信息。

周期信息主要有列车位置和移动授权 MA 等。RBC 切换之前,列车将自身位置信息发送给 $RBC(i)$; $RBC(i)$ 则根据列车位置、线路信息和信号授权等生成 MA 并发送给列车,作为列车运行控制的依据;RBC 切换时及整个切换过程不仅涉及到周期性信息,而且存在非周期性信息在车地之间传递。

非周期性信息主要由列车与预告应答器(LTA)和切换应答器(RN)的动态空间关系 trainpassingthroughLTA、headpassingthroughRN、tailpassingthroughRN 激发产生,并进一步驱动 RBC 切换过程。

各库所、变迁的功能及特性说明如表 3 所示。其中发射时延约为 1.05 s,由数据发送时间 0.05 s(CTCS-3 列控系统首选 4.8 kbps 异步透明数据传输方式,以 30 Byte 及计算而得)、发送时延 0.5 s^[6]、端到端传播延时最大 0.24 ms(以数据光速传播 70 km 距离计算)以及数据处理时间 0.5 s^[6]组成。

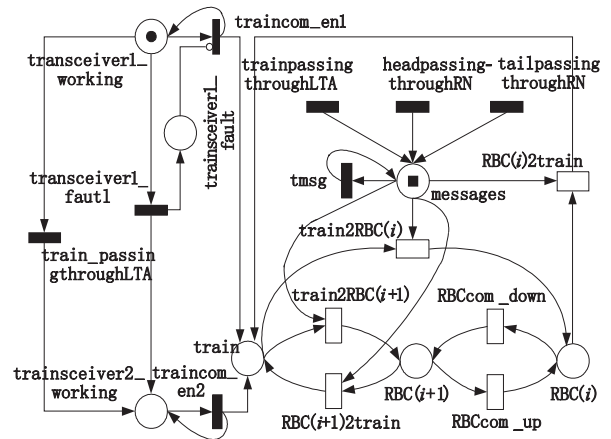


图5 信道状态良好时车地通信混合Petri网模型

表3 图5中各库所、变迁的含义及特性说明

库所或变迁	含义	发射概率	发射时延/s	发射速率/ λ/s^{-1}	哨函数
transceiver1_working	电台 1 工作状态				
transceiver2_working	电台 2 工作状态				
transceiver1_fault	电台 1 故障状态				
train	列车				
messages	车地交互信息库所				
$RBC(i)$	第 i 个 RBC				
$RBC(i+1)$	第 $i+1$ 个 RBC				
trainpassingthroughLTA	列车通过预告应答器				
train_passingthrougroughLTA	列车通过预告应答器				
transceiver1_fault1	电台 1 工作期间发生故障			9.259×10^{-9}	
traincom_en1	列车通信功能使能 1	1			
traincom_en2	列车通信功能使能 2	1			
train2RBC(i)	列车与 $RBC(i)$ 通信		1.05		M42 等
$RBC(i)2train$	$RBC(i)$ 与列车通信		1.05		M131, MA 等
train2RBC(i+1)	列车与 $RBC(i+1)$ 通信		1.05		M155, M159 等
$RBC(i+1)2train$	$RBC(i+1)$ 与列车通信		1.05		M32 等
RBCcom_down	$RBC(i)$ 与 $RBC(i+1)$ 通信		1.05		M11, MA_request 等
RBCcom_up	$RBC(i+1)$ 与 $RBC(i)$ 通信		1.05		M15, M21, M27 等
headpassingthroughRN	列车头部越过切换应答器				
tailpassingthrougroughRN	列车尾部越过切换应答器				
tmsg	信息变迁	1			

2.3.1 交接协议 A

两部电台均可正常工作。如图 5 所示,当列车还未运行至预告应答器 LTA,电台 1 工作,列车通过电台 1 与 $RBC(i)$ 进行周期信息的交流;列车通过 LTA 时,变迁 trainpassingthroughLTA 向库所 messages 中注入非周期信息,变迁 train2RBC(i) 被

激活,列车将自身位置等信息告知 $RBC(i)$,同时启动电台2工作; $RBC(i)$ 再通过变迁 $RBCcom_down$ 告知 $RBC(i+1)$ 列车位置,预告 RBC 切换,并且向 $RBC(i+1)$ 请求移动授权 MA 的延伸, $RBC(i)$ 同时将 $RBC(i+1)$ 的 ID 等信息通过变迁 $RBC(i)$ $2train$ 发送给列车,从而电台2可呼叫 $RBC(i+1)$; $RBC(i+1)$ 通过变迁 $RBCcom_up$ 将信号授权、线路状况、进路信息等发送给 $RBC(i)$, $RBC(i)$ 据此计算 MA 等列控信息,并告知列车。当列车头部越过切换应答器 RN 时, $headpassingthroughRN$ 发射,列车分别通过电台1、2将自身位置告诉 $RBC(i)$ 、 $RBC(i+1)$,并且 $RBC(i)$ 亦将列车位置信息发至 $RBC(i+1)$ (作为一种冗余措施,在电台2无法正常工作时,电台1可以遵循交接协议B完成 RBC 切换),此时电台2已可承担列车与 $RBC(i+1)$ 的通信任务,即 $RBC(i+1)$ 已被赋予列车管辖权,但列车仍然按照 $RBC(i)$ 发送的 MA 等列控信息运行。因为列车管辖权的实施由于数据处理与通信延时等因素滞后于列车管辖权的赋予,列车尾部越过 RN 时, $tailpassingthroughRN$ 发射,列车将切断电台1与 $RBC(i)$ 的通信连接。 RBC 切换时,周期信息与非周期信息并存于车地通信过程中。

2.3.2 交接协议B

只有一部电台能够正常工作。鉴于 RBC 切换过程中电台动态发生故障的分析结论,这里只讨论列车行驶至预告应答器 LTA 之前只有一部电台能够正常工作的情况。

假如电台1始终负责车地通信,与交接协议A的区别主要在于:列车头部或尾部越过 RN 时,电台1无法同时与 $RBC(i)$ 、 $RBC(i+1)$ 进行通信。对前者 $RBC(i)$ 必须作为列车与 $RBC(i+1)$ 联系的桥梁,对后者则先切断列车与 $RBC(i)$ 的通信连接,再与 $RBC(i+1)$ 建立通信联系。如果电台1故障,两部电台角色互换,图5同样适用。

2.4 RBC交接协议与信道传播模型的融合

为清晰地说明 RBC 交接协议与信道传播模型的融合,将图4.5中相关联部分加以描述,如图6所示。列车与 $RBC(i)$ 之间、列车与 $RBC(i+1)$ 之间,以及 $RBC(i)$ 与 $RBC(i+1)$ 之间的数据通信,只有在信道状态良好的时候才能顺利地进行。

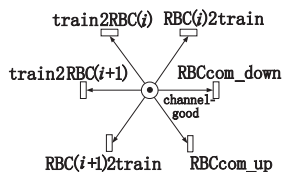


图6 RBC交接协议与信道传播模型的融合

3 性能分析与验证

3.1 交接协议的合理性分析、验证

列车无线通信电台平均无故障工作时间 (mean time between failure, MTBF) 至少为 $30\,000\text{ h}^{[7]}$, 电台故障发生符合泊松分布,其强度为

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF} \times 3600} = 9.259 \times 10^{-9} \quad (1)$$

RBC 切换过程发生在列车穿越预告应答器 LTA 至切换应答器 RN 这段区域,需要检测列车是否越过 LTA ,或列车首、尾是否越过 RN ,并以该事件驱动整个 RBC 切换过程。高速列车车长典型值为 400 m ,可取 LTA 、 RN 的邻域长度均为 400 m ,不同速度条件下列车的运行时间如表4所示。

表4 不同速度条件下 400 m 车长距离列车运行时间

速度 km/h	运行时间 t/s	电台故障概率 $P(A_1), P(A_2)$	电台均故障概率 $P(A_1) \times P(A_2)$
200	7.200	6.666×10^{-8}	4.444×10^{-15}
250	5.760	5.333×10^{-8}	2.844×10^{-15}
300	4.800	4.444×10^{-8}	1.975×10^{-15}
350	4.114	3.809×10^{-8}	1.451×10^{-15}
400	3.600	3.333×10^{-8}	1.111×10^{-15}
450	3.200	2.963×10^{-8}	8.779×10^{-16}
500	2.880	2.667×10^{-8}	7.111×10^{-16}

令 A_1, A_2 分别代表电台1、2故障,则电台发生故障概率为

$$P(A_1) = P(A_2) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

从而可以计算出不同速度下电台发生的故障概率(表4)。在 LTA 或 RN 的邻域电台1、2同时发生的故障概率为

$$P(A_1 A_2) = P(A_1) \times P(A_2) \quad (3)$$

其值如表4所示。图7、8描述了不同速度条件下单部电台故障和两部电台同时的故障概率,以及故障概率随速度变化的趋势。

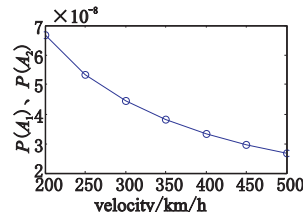


图7 $P(A_1), P(A_2)$

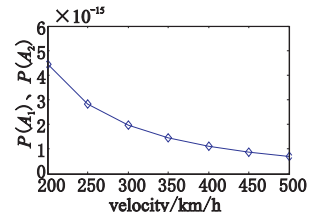


图8 $P(A_1) \times P(A_2)$

不难看出,列车速度越快,列车整体或列车头部、尾部越过 LTA 、 RN 的时间邻域就越小,因而故障概率就越小,同时对 RBC 切换过程中信息的发、收及可靠传播、处理提出了新的挑战;而且,无论是任意一部电台故障还是两部电台同时故障,其发生在 LTA 或 RN 的邻域概率均近乎为0,即在 LTA 或 RN 的邻域,几乎总有一部电台可以正常工作。可见,CTCS-3 列控系统 RBC 交接协议分为 A、B 两种,以“随机过程”为其理论基础,有很强的合理性。

3.2 RBC切换协议的可靠性分析

根据图3~6所建模型,以及表1~4所示的各种变迁的发射概率、发射速率、发射时延和电台故障概率,仿真 CTCS-3 列控系统 RBC 切换过程。

图9、10分别为 $t_A, t_B = 30\text{ s}, 35\text{ s}$ 时列车在不同速度条件下向 $RBC(i+1)$ 注册成功的仿真情况(t_A, t_B 如图2所示)。

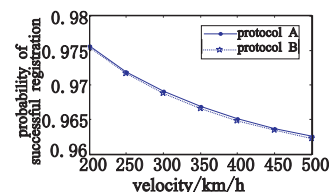


图9 列车向 $RBC(i+1)$ 注册
30 s内成功的概率

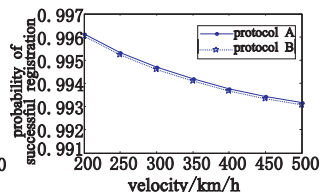


图10 列车向 $RBC(i+1)$ 注册
35 s内成功的概率

两种交接协议的 RBC 注册成功概率均能达到“GSM-R 网络注册时延应满足 $\leq 30\text{ s}$ (95%)、 $\leq 35\text{ s}$ (99%)”^[6] 的标准。图11、12描述了越区切换过程中列车主叫 $RBC(i+1)$ 的通信连接建立情况。

列车呼叫 $RBC(i+1)$ 连接成功的概率无论交接协议 A 或 B,均满足 $< 8.5\text{ s}$ (95%)、 $\leq 10\text{ s}$ (100%)^[6] 的要求。

上述分析表明,我国 CTCS-3 列控系统关于网络注册时延、连接建立时延的标准,在 GSM-R 网络覆盖和通信质量满足要求的条件下,完全能够满足列车安全、高效运行的要求。但是 RBC 切换的可靠性随列车速度提高呈下降趋势,说明列车进一步提速后有必要考虑适当增加列车间隔时间的裕量。

(下转第453页)

Load 组合有 3+4+5, 7+8+9, 11+12+13, 并且 Store 指令与 Load 指令之间没有访存冲突, 可以进行 Load 先行, 如图 5(b) 中深色部分所示, L3、L4 先行与 S1 访存。通过仿真验证, 内核执行完 $4 \times N$ 条指令需要 $1+3+3 \times N+2=3 \times N+6$ 个时钟周期, $CPI = (3 \times N+6)/(4 \times N) = 0.75 + 6/(4 \times N)$, 其中主要避免了 Store 指令和 Load 指令间的访存等待。

显然, 使用了 Load 先行机制后快了 N 个时钟周期, CPI 少了 0.25。Load 先行可以加快运算数据的准备, 进而使 IP 中的算数运算尽早完成, 而 IP 流水线的工作饱和度由具体的指令序列来确定。

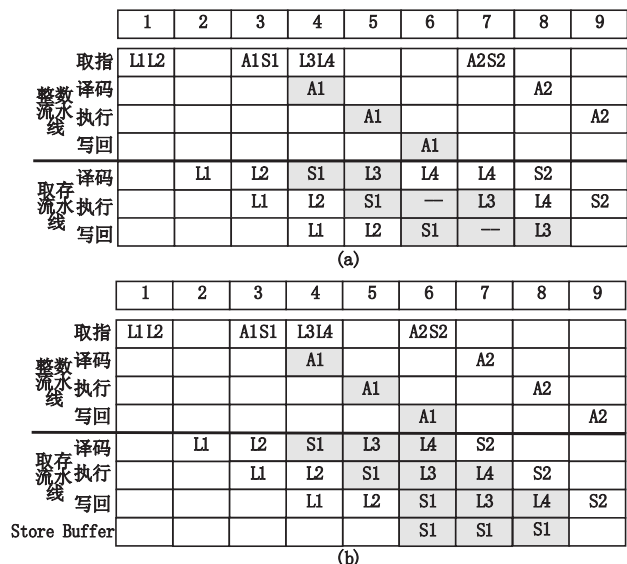


图5 流水线状态

4 结束语

本文在静态超标量 MCU-DSP 融合内核的基础上, 提出了

在存取流水线中动态调度访存指令顺序的 Load 先行机制。在存取流水线的特殊设计下, Load 先行机制通过提高流水线中 Load 指令的优先级, 尽可能早地访问数据存储器获得算数运算的操作数, 从整体上加快流水线的处理速度。Load 先行是通过调整存取指令的访存顺序来获得一定的加速, 要获得更高的加速比需要加大存取指令的存取带宽, 提高存取的吞吐率。

参考文献:

- [1] EYRE J, BIER J. The evolution of DSP processors[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000, 17(2): 43-51.
- [2] GYGER A C, MASGONTY S, MORGAN J M, et al. Low-power 32-bit dual-MAC 120uW/MHz 1.0V icyflex DSP/MCU core[C]//Proc of the 34th European Solid-State Circuits Conference. 2008: 190-193.
- [3] KOLAGOTLA R K, FRIDMAN J, HOFFMAN M M, et al. A 333-MHz dual-MAC DSP architecture for next-generation wireless applications[C]//Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 2001: 1013-1016.
- [4] MARTIN D, OWEN R E. A RISC architecture with uncompromised digital signal processing and microcontroller operation[C]//Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1998: 3097-3100.
- [5] UTHUS J, STRΦMΦ. MCU architectures for computer-intensive embedded applications[R]. San Jose: Atmel Corporation, 2005.
- [6] MAHJUR A, TAGHIZADEH M, JAHANGIR A H. Lazy instruction scheduling: keeping performance, reducing power[C]//Proc of ACM/IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design. 2008: 375-380.
- [7] TATE D, STEVEN G, STEVEN F. Static scheduling for out-of-order instruction issue processors[C]//Proc of the 5th Australasian Computer Architecture Conference. 2000: 90-96.
- [8] HENNESSY J L, PATTERSON D A. 计算机系统结构: 量化研究方法[M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2007: 298-300.

(上接第 446 页)

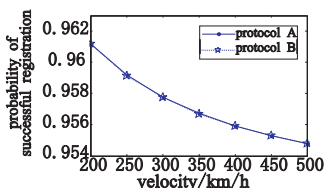


图11 列车呼叫RBC(i+1) 8.5 s 内连接成功的概率

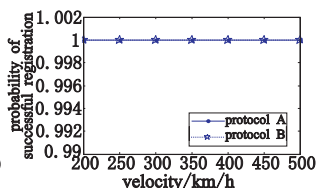


图12 列车呼叫RBC(i+1) 10 s 内连接成功的概率

4 结束语

高速列车越区 RBC 切换质量是制约列车安全、高效运行的关键因素之一。通过对我国 CTCS-3 列控系统建模、分析与仿真研究, 验证了不同速度条件下交接协议 A、B 的合理性和安全性。无论交接协议 A 还是交接协议 B, 列车在不同速度下的 GSM-R 网络注册成功时延和连接建立时延基本相同。前者的优势在于两部电台可并发工作, 具有“先换后切”的特点; 后者则是“先切后换”, 列车在其尾部越过切换应答器 RN 时, 必须先切断与 RBC(i) 的通信连接, 再与 RBC(i+1) 通信, 车地通信中断时间为 τ ($0.2 \text{ s} \leq \tau \leq 0.3 \text{ s}$, 一般取 0.3 s)。与交接协议 A 相比, 完成 RBC 切换在时间上滞后了 $\text{trainlength}/V + \tau + t_B$, 如图 1、2 所示。为了列车在正常情况下不减速运行, CTCS-3 列控系统在列车间隔时间上预留了 RBC 注册时间^[6]和通信折算时间^[8], 约 52 s, 其中也考虑了交接协议 A、B 切换时 $\tau = 0.3 \text{ s}$ 的车地通信中断时间。可见, 交接协议 B 作为协议 A 的冗余措施, 并不存在安全上的问题, 但 RBC 重叠覆盖区域在协议 A 的

基础上作了延伸, 达到 $80.3 \text{ s} + \text{trainlength}/V$ ($= t_A + \text{trainlength}/V + \tau + t_B$), 这是协议 A 可以正常进行且在无法正常进行时切换至协议 B 顺利完成车地通信必要的 GSM-R 覆盖区域(时间), 因而 RBC 切换效率有所降低, 行车效率也受到一定影响。提速情况下, 可考虑适当增加 RBC 重叠覆盖区域、场强和列车间隔时间裕量, 进一步增强 RBC 交接的可靠性。

参考文献:

- [1] 牛儒, 曹源, 唐涛. ETCS-2 级列控系统 RBC 交接协议的形式化分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(4): 52-58.
- [2] 曹源, 牛儒, 唐涛, 等. 基于 SPN 的越区切换模型分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(4): 104-107.
- [3] 徐田华, 唐涛. 基于有色 Petri 网的 ETCS 通信系统与列车间隔分析[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(21): 5038-5041.
- [4] 陈永, 王晓明, 党建武, 等. 基于 SPN 的 CTCS 无线通信形式化建模与分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(8): 63-68.
- [5] 刘中田, 孙伟亮. 基于安全计算机平台的无线闭塞中心仿真研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 1017-1019.
- [6] 铁道部. 科技运[2008]168 号, CTCS-3 级列控系统 GSM-R 网络需求规范(v 1.0)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [7] 铁道部. 科技运[2009]28 号, GSM-R 数字移动通信网设备技术规范 第二部分: 机车综合无线通信设备(v 2.0)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [8] ZIMMERMANN A, HOMMEL G. A train control system case study in model-based real time system design[C]//Proc of International Parallel and Distributed Processing Symposium. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003: 118-130.