

文章编号:1001-8360(2011)02-0067-05

基于 SPN 的 CTCS-3 级列控系统 RBC 实时性能分析

梁 楠, 王海峰

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘 要: RBC(无线闭塞中心)实时性能指标是影响 CTCS-3 级列控系统运行的关键要素。本文将随机 Petri 网和马尔可夫随机过程理论结合起来,提出一种新的系统性能分析方法,剖析 CTCS-3 级列控系统的运行机制,建立 RBC 子系统周期处理和非周期处理的随机 Petri 网模型,并利用 ERTMS/ETCS 的参考数据,分析 GSM-R 通信环境下 RBC 的实时性能,在不同系统周期和列车交互数量下得出 RBC 子系统平均延时曲线。本文对我国 CTCS-3 级列控系统的规范制定和系统开发具有一定的借鉴意义。

关键词: 随机 Petri 网; CTCS-3; RBC; GSM-R

中图分类号: U284.48 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-8360.2011.02.011

Real-time Performance Analysis of RBC System for CTCS Lever 3 Using Stochastic Petri Networks

LIANG Nan, WANG Hai-feng

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The real-time performance index of the RBC (Radio Block Center) system is the key element in Operation of the CTCS-3 train control system. This paper proposes a new method for analyzing system performance according to the theories of the Markov random process and stochastic Petri Networks. It also analyzes the operating mechanism of the CTCS-3 system, constructs the stochastic Petri Networks model of RBC which is divided into the cycle time sub-model and non-cycle time sub-model, and makes use of the reference data of ERTMS / ETCS to analyze the real-time performance of RBC under the GSM-R communication environment. Finally, this paper gets the average delay curves of different parameters in terms of the system cycle and number of trains. The result supplies reference to specifications formulation and practical development of the CTCS-3 train control system.

Key words: stochastic Petri networks; CTCS-3; RBC; GSM-R

为适应我国高速铁路快速发展的需要,铁路部门提出发展适合我国国情的中国列车运行控制系统 CTCS(China Train Control System)的策略。CTCS-3 级列控系统是满足运行速度 350km/h 的技术平台体系。实时性能指标是列控系统正常运行、保证行车安全的关键。如何分析列控系统的实时性能是轨道交通运行控制领域研究的一个重点问题。列控系统不仅关心系统的可达性、活性等定性分析,而且关心系统的定量分析,如分析系统与时间有关的各种性能指标,包

括系统的信息流通率及信息传输的平均延时等。本文利用随机 Petri 网(SPN)与马尔可夫随机过程理论相结合的方法,在模型状态与状态的变迁中引入时间参数,分析 CTCS-3 级列控系统无线闭塞中心 RBC(Radio Block Center)模型的稳定状态概率及系统的平均延时特性。在分析延时时间的同时考虑 RBC 处理多辆列车的情况,在不同列车数量情况下引入不同的周期参数,研究 RBC 系统周期参数和交互列车数量对系统平均延时时间的影响。

1 CTCS-3 级列控系统构成

CTCS-3 级列控系统由地面设备和车载设备组

收稿日期:2009-04-01;修回日期:2009-05-04
基金项目:国家自然科学基金项目(60634010)
作者简介:梁楠(1985-),男,北京人,硕士。
E-mail: ln19@163.com

成^[1],系统构成如图 1 所示。RBC 是 CTCS-3 级列控系统地面设备的核心,它融合外部轨旁系统信息以及车载子系统的信息,主要功能是为其管辖范围内与 RBC 建立连接的多个车载设备提供行车许可 MA (Movement Authority),保证列车在 RBC 管辖范围内的线路上安全运行;此外 RBC 还包括以下列车运行安全功能:评估无线消息的有效性,更新列车数据,计算列车绝对位置,管理丢失的列车,处理回收进路的请求,处理紧急消息,处理 RBC 的越区交接和记录等^[2]。

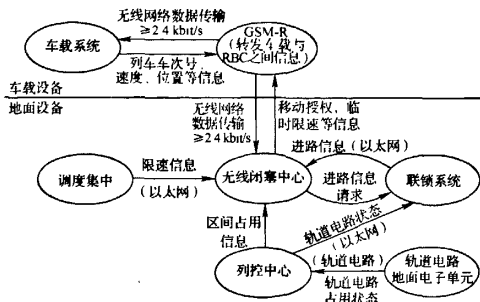


图 1 CTCS-3 级列控系统构成图

2 随机 Petri 网与马尔可夫过程

2.1 定义

定义 1 一个变迁从可实施到实施需要延时,即从一个变迁 t 变成可实施的时刻到它实施时刻之间被看成是一个连续随机变量 X_t (取正实数值),且服从于一个分布函数 $F_t(x) = P\{x_t \leq x\}$,称为随机 Petri 网^[3]。

定义 2 一类随机过程概率分布函数有如下特性

$$P\{X(t) \leq x | X(t_n) = x_n, X(t_{n-1}) = x_{n-1}, \dots, X(t_0) = x_0\} = P\{X(t) \leq x | X(t_n) = x_n, t > t_n > t_{n-1} > \dots > t_0\} \quad (1)$$

上述条件称为马尔可夫特性。一个具有马尔可夫特性的随机过程 $\{X(t), t \in T_n\}$ 称为马尔可夫过程 (T_n 为系统周期),也称为马尔可夫链 MC (Markov Chain)^[4]。

定义 3 设随机过程 $X_T = \{X(t), t \geq 0\}$ 的状态空间为 $I = \{0, 1, 2, \dots\}$ 。若对任意 $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n$, $\tau > 0$ ($n \in N$ 且 $n \geq 2$) 及任意 $i_1, i_2, \dots, i_n, j \in I$, 有

$$P\{X(t_n + \tau) = j | X(t_1) = i_1, X(t_2) = i_2, \dots, X(t_n) = i_n\} = P\{X(t_n + \tau) = j | X(t_n) = i_n\} \quad (2)$$

则称随机过程 X_T 为连续时间马尔可夫链 CTMC (Continuous Time Markov Chain)。

2.2 基于 SPN 与 MC 的系统性能分析

马尔可夫随机过程为模型的评价提供了坚实的数

学基础。大多数基于 SPN 的性能分析建立在其状态空间与马尔可夫链同构的基础上。SPN 提供了良好的描述手段,MC 为模型的评价提供坚实的数学基础。SPN 较之一般 Petri 网的最大特点就是可以借助马尔可夫随机过程的理论分析系统模型的性能指标,本文对 CTCS-3 级列控系统 RBC 的性能分析采用如下步骤:

- (1) 建立系统的 SPN 模型;
- (2) 构造与该 SPN 同构的连续时间马尔可夫链;
- (3) 基于 CTMC 的稳定状态概率进行所要求的系统性能分析。

3 RBC 实时性能建模

3.1 建模方法

CTCS-3 级列控系统运行过程中, RBC 遵循一套特有的消息收发与存储机制来完成车-地之间消息传递,其中消息主要分为周期性消息和非周期性消息。周期性消息包括列车位置报告消息(车载发给 RBC)、行车许可 MA 消息(RBC 发给车载)、一般消息(RBC 发给车载)。非周期性消息即场景功能消息,是列车启动或运行到某个状态时触发的一套消息流程。如注册与启动流程,是由车载主动发起通信会晤开始消息, RBC 收到后确认一切正常发送系统配置消息。车载收到后发送通信会晤已建立消息。

RBC 对消息的发送采用重发机制,由于不能每一周期都判断是否上一周期发送的消息得到回复(这样的限制过于严格),所以规定一定的时间间隔重新发送一次信息。重发三次后,设置一个较大的时间间隔,如果在此时间间隔内仍然没有收到车载回复确认消息,则认为通信失败。

对周期性消息, RBC 收到消息后不需要发送应答消息,并且发送给车载的消息不需要重发。如果消息丢失则等待下一周期性消息,不需对链路正常与否进行判断。而对非周期性消息,由于是某个具体场景下必须经过的流程,因此 RBC 必须对 GSM-R 链路正常与否做出判断^[5]。

综上所述,考虑到消息的特殊性与一般性, RBC 与车载消息处理划分为两种消息模型,即周期性消息和非周期性消息模型。具体分析方式如下:

- (1) 分别对两种消息类型建立 SPN 子模型,并且根据规范得到各个变迁所需要的延时参数。
- (2) 构造出与该 SPN 同构的连续时间马尔可夫链。
- (3) 把 CTMC 中 n 个状态的稳定状态概率看作是一个行向量 X ,再根据马尔可夫链的理论列出线性方程求解各状态的稳定状态概率 $P(M_i) = x_i, 0 \leq i \leq n-1$ 。
- (4) 通过得到的各状态的稳定状态概率列出转移

速率矩阵。

(5)通过状态转移矩阵进一步分析以下性能指标：在每个状态 M_i 中的驻留时间；从状态 M_i 经变迁 t_k 转变到状态 M_j 时，在状态 M_i 的等待时间；标记概率密度函数；库所中的平均标记数；变迁的利用率；变迁的标记流速。

(6)有了以上性能指标后，可以求出系统其他的一些性能指标。例如系统的平均延时时间可根据 Little 规则，利用公式 $T_p = N/\lambda$ 求出，其中 N 为变迁利用率之和， λ 为变迁速率。

3.2 基于消息发送机制对控车流程建模

(1)建立对周期性消息处理模型

对周期性消息建立图 2 所示模型。

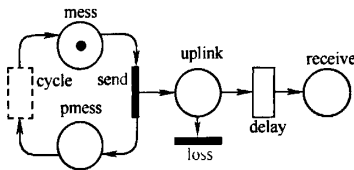


图 2 周期性消息模型

模型中库所的含义：

- ①mess：消息进入发送周期性消息状态，其中的 token 代表需要发送的周期性消息。
- ②pmiss：代表发送后的等待状态。
- ③uplink：代表消息进入上行链路。
- ④receive：代表消息正常到达接收端。

在 RBC 发送周期性消息时，变迁 send 发射，在 uplink 库所和 pmiss 库所分别产生一个 token，表示消息进入上行链路。如果此时 GSM-R 通信故障，则 loss 变迁将 token 消耗掉，表示消息丢失。否则 token 将经过传输延时时间变迁 delay 进入库所 receive。库所 pmiss 中 token 在固定重发周期时间变迁 cycle 重新回到起始库所 mess，此时可以进行下一周期的发送。消息模型中变迁的发射速率参见表 1^[6]。

表 1 消息模型变迁发射速率与延时时间

变迁	说明	延时时间/s	发射速率/(s/次)
send	发送周期性消息		0.1
loss/loss1/loss2	丢失消息		2.78×10^{-6}
cycle	周期性消息发送周期	$5 \times T_s$ T_s 为系统周期	
delay/delay1/delay2	消息传输的延迟	$2T_s$	
resend	重新发送消息		10^{-4}
send	发送非周期性消息		10^{-4}
Vc_answer	车载系统响应时间	$2T_s$	
STimer	小超时时间	$5T_s$	
LTimer	大超时时间	$10T_s$	

(2)建立对非周期性消息处理模型

对非周期性消息建立图 3 所示模型。

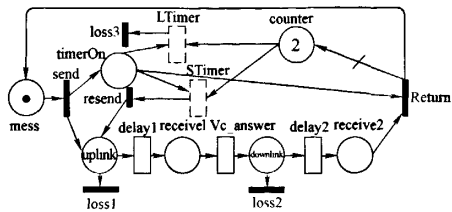


图 3 非周期性消息模型

模型中库所的含义：

- ①mess：消息进入发送状态，其中 token 代表需要发送的非周期性消息。
- ②uplink：代表消息进入上行链路。
- ③receive1：代表车载接收到 RBC 发的消息 a 。
- ④downlink：代表消息进入下行链路。
- ⑤receive2：代表 RBC 接收到消息 a 对应的回复消息。
- ⑥timerOn：代表进入计时开始状态。
- ⑦counter：计时累加器来判断消息是否重发。

在 RBC 发送非周期性消息时，在未收到应答消息之前，间隔特定周期，需要通过重发机制继续前面的发送。在发送次数达到一定限制或收到应答后则停止发送。该过程可以用图 3 中的模型描述，需要建立通信时库所 send 发射，在 uplink 库所和 timerOn 库所分别产生一个 token。如果此时 GSM-R 无异常，token 会经过时间变迁 delay1（上行链路延迟）、时间变迁 Vc_answer（车载反应时间）和时间变迁 delay2（下行链路延迟）到达库所 receive2。两个条件同时满足后，变迁 Return 发射，消耗库所 timerOn 中的 token 停止定时器，并将一个 token 送回初始库所 msg。此时如果 GSM-R 网络故障，变迁 lose1 和 lose2 都会将其对应库所中的 token 消耗掉，消息丢失。如果 counter 中的 token 个数大于 0，定时变迁 STimer（控制重发小超时）到时后发射，token 回到 uplink 库所重新发送，定时变迁 LTimer（大超时）到时后，变迁 lose3 会将其对应库所中的 token 消耗掉，消息丢失。参照 ERTMS/ETCS 规范，发射模型中变迁的发射速率参见表 1。

4 系统实时性能分析

4.1 周期性消息模型分析

将图 2 模型转换为 MC，如图 4 所示。

表 2 周期性消息模型的状态矩阵表

	mess	pmess	uplink	receive
M_0	1	0	0	0
M_1	0	1	1	0
M_2	0	1	0	0
M_3	0	1	0	1

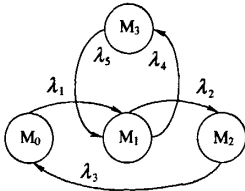


图 4 周期性消息模型的 CTMC

首先定义一个 $n \times n$ 阶的无穷小生成元(转移矩阵) $Q=[q_{i,j}]$, $1 \leq i, j \leq n$ 。

(1) $i \neq j$ 时, 如果 $\exists t_k \in T_s: M_i[t_k] > M_j$, 则

$$q_{i,j} = d(1 - e^{-\lambda_k}) / d\tau |_{\tau=0} = \lambda_k$$

否则, $q_{i,j} = 0$ 。

(2) $i = j$ 时

$$q_{i,i} = d \prod_k (1 - (1 - e^{-\lambda_k})) / d\tau |_{\tau=0} = - \sum_k \lambda_k$$

其中, $k \neq i$ 。

根据以上分析, $\lambda_1 = 10$, $\lambda_2 = 2.78 \times 10^{-6}$, $\lambda_3 = 5T_s$, $\lambda_4 = 2T_s$, $\lambda_5 = 5T_s$ 。

已知状态变迁的变迁速率 $\lambda_1, \dots, \lambda_5$ 。设 MC 中 n 个状态的稳定状态概率是一个行向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则根据马尔可夫过程有下列线性方程

$$XQ = 0; \quad \sum x_i = 1, 1 \leq i \leq n$$

解此方程组, 即可得到每个可达标志的稳定状态概率

$$P[M_i] = x_i, 1 \leq i \leq n$$

首先系统周期选取为 200 ms。

计算结果为: $P[M_0] = 0.46 \times 10^{-10}$, $P[M_1] = 0.167$, $P[M_2] = 0.46 \times 10^{-6}$, $P[M_3] = 0.83$ 。

对于 $\forall s_i \in S, u$ 表示在稳定状态下, 位置 s_i 在任一可达标记中平均所含有的标记数, 则有

$$u = \sum j \times P[M(s_i)] = j$$

一个位置集 $S_j \subseteq S$ 的平均标记数是 S_j 中每一个位置 $s_i \in S_j$ 平均标记数之和, 记为 $\bar{N}_j = \sum u_i = 1.99$ 。从而通过 Little 规则得到系统平均延时时间 $T_p = \bar{N} / \lambda = 0.115$ s。

考虑到 RBC 处理多辆列车的能力, 在模型中应在 mess 库所加入多个标记数, 代表同一时间有多个周期性消息同时到达, 可以解释为 RBC 在其管辖范围内与

多辆车进行通信, 在一周期内需要对多辆列车发送周期性消息。根据处理车辆的多少具体分析对应的系统平均延时时间。

周期性消息模型平均延时时间曲线如图 5 所示。

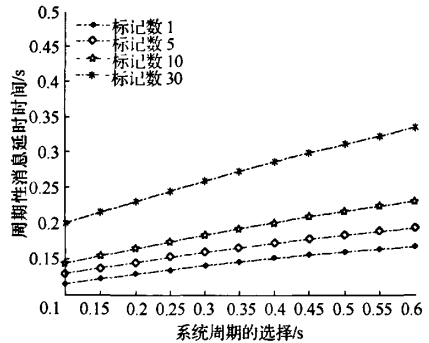


图 5 周期性消息模型系统平均延时曲线

结果表明, 在系统周期不变的情况下, 随着模型中标记数的增多, 即列车数量增多, 系统延时时间变长。在模型标记数不变的情况下, 系统的平均延时与周期基本成正比关系, 但随着系统周期的增大, 延时时间缓慢增长。图 5 中 4 条曲线的斜率变化均不大, 说明对周期性消息的处理, 延时时间的上升速率基本不受 RBC 处理列车的数量的影响。因此, 对周期性消息而言, 在选取 RBC 系统周期时, 以最多 30 辆列车为例, 不用过多考虑周期太大对处理多辆列车时的延时时间所造成的影响。

4.2 非周期性消息模型分析

将图 3 模型转换为 CTMC, 如图 6 所示。

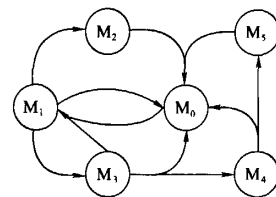


图 6 非周期性消息模型的 CTMC

通过 snnp 分析工具得到稳态下平均标记数 \bar{N} 与变迁 send 的变迁速率 λ , 并通过 Little 规则得到 $T_p = \bar{N} / \lambda = 0.127$ s。

同样, 将非周期性模型中库所 mess 加入多个标记数, 代表 RBC 在其管辖范围内与多辆列车进行通信。非周期性消息模型的平均延时时间曲线如图 7 所示。

结果表明, 在系统周期不变的情况下, 随着非周期性模型中标记数的增多, 系统延时时间变长。在模型标

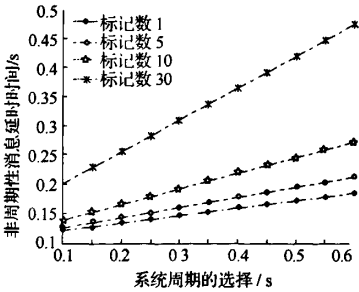


图 7 非周期性消息模型系统平均延时曲线

记数较少,即 RBC 处理列车数量较少的情况下,随着系统周期的增大,系统延时时间呈线性等比增长,曲线斜率较小;当模型标记数较大时,即 RBC 处理列车数量较多的情况下,曲线斜率较大,数据随着周期增大迅速增长。因此,处理多辆列车时,非周期模型受到周期的影响较大,在选取 RBC 系统周期时,根据列车不同,考虑安全前端与实际位置相差一定距离,车速按 350 km/h 计算,可以得出的周期最多不应超过 500 ms 时系统实时性能要求。

5 结论

本文利用 SPN 和马尔可夫随机过程相结合的方法,对 CTCS-3 级列控系统 RBC 子系统的实时性能进行分析。在周期性和非周期性 SPN 模型下,得到对应不同参数和列车交互数量的 RBC 平均延时时间曲线,结果表明:

(1) 对于周期性模型,RBC 系统的实时性能受系

统周期变化影响不大。
(2) 对于非周期性模型,当 RBC 系统同时控制的列车数量较多时,系统的实时性能对系统周期变化非常敏感。

参考文献:

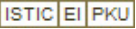
[1] 范丽君. ETCS 技术在列控系统中应用的探讨[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(3): 11-16.
FAN Li-jun. Application of ERTMS/ETCS in Train Control System[J]. China Railway Science. 2003, 24(3): 11-16.
[2] ERTMS/ETCS Subset-076-5-2: Test Cases Related to Features[EB/OL]. http://www.era.europa.eu/core/ertms/Pages/Approved_Documents_List_of_informative_specifications.aspx.
[3] Lin C, Marinescu D C. Stochastic High-level Petri Nets and Applications [J]. IEEE Transmission Computer, 1988, 37(7): 815-825.
[4] Dynkin E B. Markov Representations of Stochastic Systems[J]. Russian Math Surveys, 1975, 30(1): 65-104.
[5] IEC 62280 Railway Application - Communication, Signaling and Processing Systems - Part2: Safety-related Communication in Open Transmission Systems [S]. 2002.
[6] ERTMS/ETCS Subset-093: GSM-R Interfaces - Class 1 Requirements [EB/OL]. http://www.era.europa.eu/core/ertms/Pages/Approved_Documents_List_of_informative_specifications.aspx.

(责任编辑 崔忠文)

《铁道学报》自 2011 年起改为月刊

为加快铁道科研成果的传播速度,提高传播效率,让优秀稿件更快地与读者见面,经北京新闻出版局批准,本刊从 2011 年起刊期由双月刊改为月刊。欢迎投稿,欢迎订阅!

基于SPN的CTCS-3级列控系统RBC实时性能分析

作者: 梁楠, 王海峰, LIANG Nan, WANG Hai-feng
作者单位: 北京交通大学, 电子信息工程学院, 北京, 100044
刊名: 铁道学报 
英文刊名: JOURNAL OF THE CHINA RAILWAY SOCIETY
年, 卷(期): 2011, 33(2)
被引用次数: 2次

参考文献(6条)

1. 范丽君 [ETCS技术在列控系统中应用的探讨](#)[期刊论文]-[中国铁道科学](#) 2003(03)
2. [ERTMS/ETCS Subset-076-5-2:Test Cases Related to Features](#)
3. Lin C,Marinescu D C [Stochastic High-level Petri Nets and Applications](#)[外文期刊] 1988(07)
4. Dynkin E B [Markov Representations of Stochastic Systems](#) 1975(01)
5. IEC 62280 Railway Application -Communication,Signaling and Processing Systems -Part2:Safety-related Communication in Open Transmission Systems 2002
6. [ERTMS/ETCS Subset-093:GSM-R Interfaces -Class 1 Requirements](#)

本文读者也读过(8条)

1. 谢雨飞, 唐涛, 徐田华, 赵林, XIE Yu-fei, TANG Tao, XU Tian-hua, ZHAO Lin [CTCS-3级列控系统规范的建模与形式化验证方法研究](#)[期刊论文]-[铁道学报](#)2011, 33(7)
2. 吕继东, 唐涛, 贾昊, Lǚ Ji-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)
3. 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)
4. 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)
5. 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)
6. 邸丽清, 袁湘鄂, 王永年, DI Liqing, YUAN Xiange, 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)
7. 王俊峰, 王化深, 汪希时, WANG Jun-feng, WANG Hua-shen, WANG Xi-shi [一种新型CTCS-2级列车控制系统研究](#)[期刊论文]-[铁道学报](#)2008, 30(1)
8. 李开成, 徐田华, 唐涛, LI Kaicheng, XU Tianhua, TANG Tao [CTCS-3级列控系统碰撞协议的建模、设计和实现](#)[期刊论文]-[中国铁道科学](#)2010, 31(6)

引证文献(2条)

1. 张爱玲, 徐智, 宗岩, 康健 [基于CPN的切换模式下行车许可生成过程研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2012(4)
2. 袁磊, 王俊峰, 康仁伟, 吕继东 [CTCS-3级列控系统临时限速建模与验证](#)[期刊论文]-[西南交通大学学报](#) 2013(4)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_tdx201102011.aspx