

文章编号：1005-8451（2013）05-0061-05

城市轨道交通CBTC系统RAM指标评价方法研究

李高科，于 鑫，吴 卉

（中国铁道科学研究院 电子计算技术研究所，北京 100081）

摘要：城市轨道交通CBTC系统在提高运输效率、保证行车安全及旅客舒适度等方面发挥着重要作用，因此对其RAM指标具有很高的要求。本文针对CBTC系统建立科学规范的RAM指标分析方法并进行计算验证，这对于保证信号系统的可靠性及安全性具有重要的现实意义。

关键词：城市轨道交通；CBTC；RAM

中图分类号：U231.7 **文献标识码：**A

Research on evaluation method for RAM index of CBTC System in Urban Transit

LI Gaoke, YU Xin, WU Hui

（Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China）

Abstract: The CBTC System of Urban Transit played an important role in transport efficiency, traffic safety, passenger comfort and so on. So it was stringently required RAM indicators. This paper established a scientific and standardized method to analysis the RAM index of the CBTC System. The method was verified. It had important significance for ensuring the reliability and security of the Signaling System.

Key words: Urban Transit; CBTC; RAM

铁路信号系统的管理指标（RAMS）明确了铁路信号系统从前期的需求分析到软硬件的设计开发再到安装调试和运行维护等各个阶段的管理任务，而且要求在信号系统的全生命周期进行RAMS管理，针对影响RAMS指标的危险源进行管理。

在城市轨道交通信号领域，失效（failure）、差错（error）或故障（fault）都是描述设备、部件、系统或者单元功能非常态的术语。通常情况下，系统可靠性的威胁主要包括差错、故障、失效。这3者在整个系统中的关系形成了一条威胁链，贯穿在整个系统的每个阶段。因此采用科学合理的评价手段对系统的RAM进行研究十分必要。

1 CBTC系统RAM评价方法

CBTC系统包含的子系统、设备数量多，结

构复杂，各子系统的内部和外部接口较多，要科学地对CBTC系统进行RAM指标评价，就必须根据各个单元对上层系统的RAM影响程度及与其他单元的关系，采用系统可靠性框图分析法对系统自上向下逐层分解并建立系统可靠性框图模型，然后，依据最底层单元既有或经过计算得到的RAM数据评价。

对于CBTC系统而言，由于其为一个可修复系统，如果系统的各个单元的寿命和维修时间均服从指数分布，则可用马尔可夫模型进行系统的可靠性分析，因为在实际信号系统中，不同设备对系统可靠性的影响是独立的，比如信号机的故障不会影响到ATP的故障，所以在工程实际中利用这一点，可采用单元可用度相互独立假设条件下的近似计算方法，采用的手段主要有压缩模型与系统分解。

在通过分解与压缩手段建立CBTC可靠性框图时，为了讨论方便，做以下假设^[1~2]：

（1）系统内每个单元只有2种状态：正常

收稿日期：2012-09-19

作者简介：李高科，研究实习员；于 鑫，副研究员。

/故障，各个单元之间正常和故障是相互独立的，且在时间 Δt 内不出现2次或2次以上故障或修复；

(2) 系统各单元的寿命分布和修复时间分布均为指数分布；

(3) 只分析硬件的可靠性，认为软件和人员可靠性100%，并且认为硬件之间没有相互影响，不考虑节点和连线可靠性。

1.1 可靠性计算

可靠性的定义为：在规定的时间和规定的条件下，无故障完成规定功能的概率^[3]。平均无故障时间是指相邻2次故障之间的平均工作时间，记作MTBF（Mean Time Between Failure）。一般将MTBF作为2次故障间的统计平均数值。轨道交通信号系统通常选择系统的平均无故障时间作为可靠性参数。

在对信号系统的可靠性分析时，采用的压缩模型与系统分解手段，通常用下面2种最常用的模型，也是分析解决复杂系统可靠性模型的基础。

(1) 串联结构可靠性模型

串联结构，如图1所示，是常见的复杂系统分解到最小系统的典型结构，也是CBTC可靠性框图法分析整个系统的基本单元。

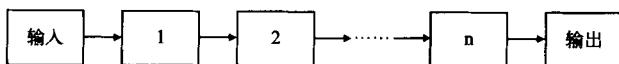


图1 串联结构可靠性框图

串联系统的可靠性数学模型为^[2]：

$$R_s(t) = R_1(t) * R_2(t) * \dots * R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (1)$$

根据串联系统可靠性原理可得到公式(2)：

$$MTBF_s = 1/(1/MTBF_1 + 1/MTBF_2 + \dots + 1/MTBF_n) \quad (2)$$

显然，串联系统的可靠性低于系统内的每个单元的可靠性，随着串联单元数量的增大，其可靠性会迅速降低。因此可采用减少系统中单元个数或提高系统中可靠性最低的那个单元的可靠性来提高串联系统的可靠性^[3]。

(2) 并联结构可靠性模型

并联结构，如图2所示，是常见的复杂系统分解到最小系统的另一种典型结构，也是CBTC可靠性框图法分析整个系统的基本单元。

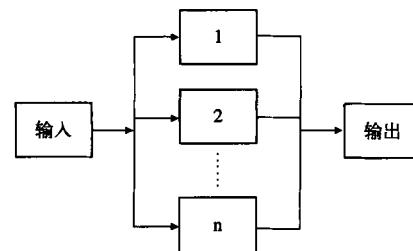


图2 并联结构可靠性框图

并联系统的可靠性数学模型为：

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (3)$$

根据并联系统可靠性原理可得到公式(4)：

$$MTBF_s = MTBF_1 + \frac{1}{2} MTBF_2 + \dots + \frac{1}{n} MTBF_n \quad (4)$$

由公式(4)可以看出，随着并联单元的增加，系统可靠性相应的增加量却在减少，一般轨道交通信号系统最多采用3单元并联。

(3) 混联系统结构可靠性模型分析

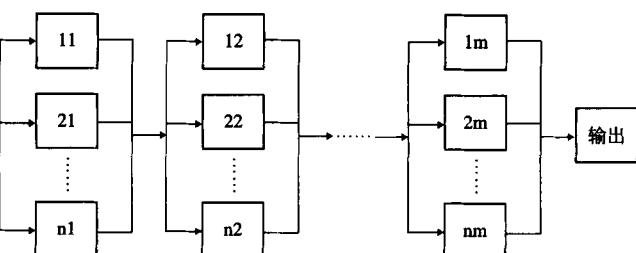


图3 串并联结构可靠性框图

图3为典型串并联系统结构，其可靠性数学模型为：

$$R_s(t) = \prod_{j=1}^m \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_{ij}(t)) \right] \quad (5)$$

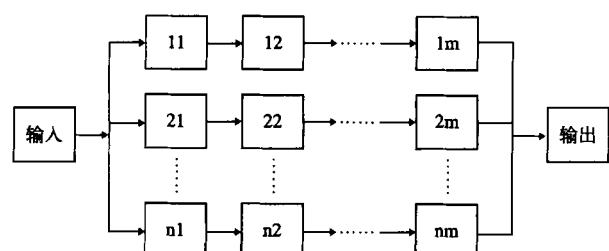


图4 并串联结构可靠性框图

图4为典型并串联系统结构，其可靠性数学模型为：

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^m R_{ij}(t) \right] \quad (6)$$

各个单元模块相同的情况下，一般串并联系

统的可靠性高于并串联系统的可靠性。由此可见，采用部件冗余结构比系统冗余结构的可靠性要高，因此在系统设计时多采用部件冗余结构设计技术。

(4) 三取二结构可靠性模型分析

对于 k/n (n 取 k) 结构，在表决器可靠度为 1 的情况下其可靠性为：

$$MTBF = \sum_{i=k}^n \frac{1}{i\lambda} \quad (7)$$

所以 $2/3$ 结构（如图 5 所示）的可靠度为：

$$MTBF = \frac{1}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} = \frac{5}{6\lambda} \quad (8)$$

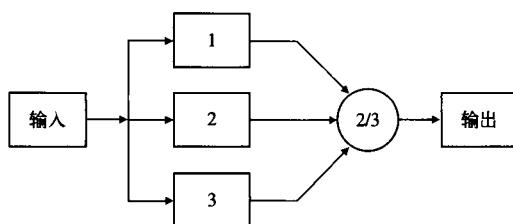


图5 2/3结构示意图

对于可修复系统，服从指数分布的 MTBF 与失效率互为倒数，即：

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$

1.2 可维护性计算

可维护性定义为：产品在规定条件下和规定时间内，按规定的程序和方法进行维修时，保持或恢复到其规定状态的能力。轨道交通信号领域内常用平均故障修复时间作为其衡量指标 (Mean Time to Repair, MTTR)。平均修复时间是指可修复的产品的平均修理时间，其估计值为修复时间总和与修复次数之比：

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \tau_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (10)$$

(10) 式中： n 为单元模块或子系统的数目； λ_i 为第 i 个单元模块或子系统的故障率； τ_i 为第 i 个单元模块或子系统的修复时间。

若修复时间服从指数分布，则平均修复时间是修复率的倒数，即：

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (11)$$

因此，通过最小可更换单元的故障率再根据

实际情况，预计模块的单元修复时间，通过式 (11) 便可得到系统的修复时间。

1.3 可用性计算

可用性是指系统在规定时间内能够履行职能的概率，其指标为可用度 A 。可用性是产品处于工作状态和可工作状态的能力，是产品可靠性与可维护性的综合反映。

系统的可靠性、可用性、可维护性之间的关系即系统可用性可表示为：

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (12)$$

2 CBTC系统RAM评价指标计算

2.1 CBTC系统可靠性模型分析

CBTC 系统是一个复杂系统，系统的可靠性框图模型为混联系统结构。ERTMS / ETCS 标准认为衡量一个系统的可靠性，应根据故障对系统完成功能的影响程度来分别进行要求和考核。所以，必须根据系统实体范围确定系统的边界，只有明确系统边界，才能区分故障是否发生在系统范围内，便于进行故障统计，只有明确了系统功能，才有可能根据故障对功能的影响程度进行可靠性指标的测定与验证。

制定信号系统的可靠性指标，不同于设备的可靠性指标。它强调从系统提供服务的角度来衡量系统完成其功能的能力。因此，根据用户对系统的需求，对系统完成功能的影响程度即失效级别不同，ERTMS / ETCS 标准将系统分为车载设备、轨旁分布设备和室内集中设备 3 个子系统，其考虑了技术实现的可能性，工作环境、维修条件不同，系统所能达到的可靠性也必然不同。这种指标制定的思路值得借鉴，但需要针对可靠性要求的对象具体分析。

(1) 在通过逐层分解建立 CBTC 系统可靠性框图的过程时，必须充分考虑各子系统间的关系，又要考虑和子系统对于上层系统的影响。正确的将各单元或子系统串联或并联到上层系统可靠性框图内，确保结果数据的正确，如果某一单元故障影响到系统相应的功能失效则串联接入，如不影响则并联接入。

(2) 在将 CBTC 系统逐层分解时，对层次的

划分要综合考虑功能层次关系和硬件结构关系^[2]。从系统总体上可以将CBTC系统看作是地面子系统和车载子系统串联的模型系统。分别针对这2个子系统再次分解建立子系统可靠性框图，这样基于上一层可靠性框图的子系统进一步向下分解到最小可更换单元。从而形成一个以车载子系统、地面信息接收子系统等子系统构成的串并混联结构的可靠性框图，如图6所示。

2.2 CBTC系统RAM指标计算

一般情况下，器件的故障率通常由模型估算法得出或者由器件厂商出具的可靠性指标进行计算得出，电路模块单元通常认定为由所有器件构成的串联结构，因而模块级的故障率就等于模块内所有器件故障率相加之和。根据单元内器件的故障率计算出各单元模块的故障率，然后根据公式（9）计算出单元或系统的可靠性参数MTBF，

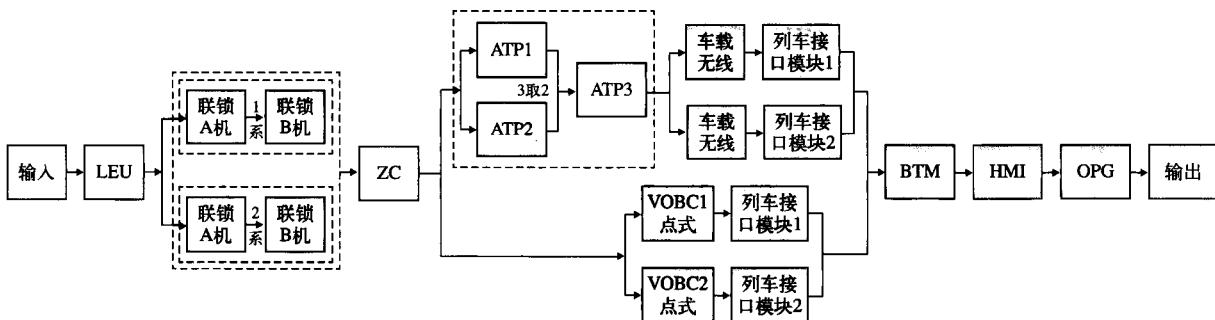


图6 CBTC系统可靠性框图

CBTC系统一般由ATS、ATP、ATO、DCS、CI 5大子系统构成，由于ATS是一个非安全系统，为了简化系统复杂性这里不予考虑。将CBTC系统划分为：轨旁电子单元(LEU)、联锁、车载控制单元(VOBC)、车载无线单元、列车接口单元、HMI单元、BTM单元及天线、速度传感器(OPG)等。其中，VOBC、列车无线单元、列车接口模块均为双系热备冗余结构，任何单一故障，系统仍能正常运行，根据结构特征可采用串并联结构模式；对于为双系冷备结构的OPG单元和BTM单元均当作单系考虑。针对目前比较常用系统冗余设计方式，这里分别用联锁系统说明2乘2取2冗余方式的可靠性和ATP子系统说明3取2冗余方式的可靠性，在联锁系统中1、2系为热备份即采用并联结构，各系分别采用了2取2冗余模式，该模式只有2个计算机都正常工作时系统才能正常运行，从可靠性分析，联锁A、B机应做串联结构考虑；对于3取2冗余的ATP系统，如果1个单元故障后就如同一个2取2结构系统可继续工作，所以采用2并1串的结构模型，并且认为其表决器是完全可靠的；对于其他子系统如ZC子系统，在实际的可靠性计算中可参照此模型，为了简化分析过程这里就不一一列举。点式系统作为CBTC系统的后背模式采用了并联模型。

系统修复时间可以通过最小可更换单元的故障率和维修时间得出。将复杂系统可靠性模型中相应的串、并联支路归并起来，从而使系统逐步得到简化，直到简化为1个等效模块。这个等效模块的参数也就代表了原始系统的可靠性参数^[4]，这里根据1.1节中各种结构模型框图的可靠性计算方法，对图6进行等效简化得到图7，即系统简化为一个串联结构模型。

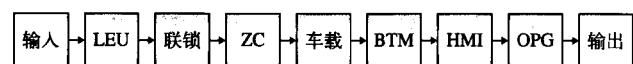


图7 CBTC系统可靠性简化框图

对应图7，表1中列出了某种CBTC各子系统的故障率，以及通过故障率和维修时间计算得来的平均无故障时间和平均修复时间。

表1 常见CBTC各子系统故障率

序号	设备名称	故障率	MTBF(h)	MTTR(h)
1	LEU	6.67×10^{-7}	1.50×10^6	1
2	联锁	5.00×10^{-7}	2.00×10^6	1
3	ZC	6.67×10^{-7}	1.50×10^6	1
4	车载设备	1.00×10^{-6}	1.00×10^6	0.5
5	BTM	7.00×10^{-8}	1.43×10^7	4.0
6	HMI	5.00×10^{-6}	2.00×10^5	0.5
7	OPG	2.50×10^{-9}	4.00×10^8	4.0

按照上述各个子系统的相关参数分别根据公式（2）、（10）、（12）得到整个CBTC系统的

RAM 指标结果为：

$$MTBF=1.26 \times 105(h) ;$$

$$MTTR=1.71(h) ;$$

$$A=99.99\%.$$

3 结束语

城市轨道交通 CBTC 列控系统由多个相互关联且相对独立的子系统构成，本文通过对整个系统自顶向下根据各子系统和单元模块所完成的功能进行划分，建立了系统可靠性框图，再自下向上由器件级别到系统级别逐层计算得出 CBTC 列控系统的 RAM 指标。该方法也适用于 CBTC 系

统中各个子系统的 RAM 分析。

参考文献：

- [1] 金星,洪延姬.系统可靠性与可用性分析方法 [M].北京:国防工业出版社, 2007.
- [2] 邱丽清,袁湘鄂,王永年.CTCS-3 级列控系统 RAM 指标评价方法研究 [J].中国铁道科学, 2010, 31 (6).
- [3] 程荫杭.铁路信号可靠性与安全性 [M].北京:中国铁道出版社, 2010 (3).
- [4] 高婷婷.CTCS-3 级列控系统通信可靠性研究 [D].北京:北京交通大学, 2011 (11).

责任编辑 方圆

·信息·

“2013第五届北京国际城市轨道交通建设运营及装备展览会”新闻发布会在京召开

经中华人民共和国商务部正式批准，由中国交通运输协会城市轨道交通专业委员会主办，中国铁道科学研究院、中国国际贸易中心股份有限公司、北京市地铁运营有限公司、北京轨道交通建设管理公司、北京市基础设施投资有限公司共同承办的“2013 第五届北京国际城市轨道交通建设运营及装备展览会（METRO CHINA 2013）”将于 2013 年 11 月 19 日至 11 月 22 日在北京中国国际展览中心举办。2013 年 5 月 17 日，该展会主、承办单位在京召开了新闻发布会。

在新闻发布会上，主办方就中国城市轨道交通行业发展现状、规划和技术装备等热点问题以及本届展览会的筹备情况进行了详细介绍。中国交通运输协会会长钱永昌出席发布会并致辞，中国交通运输协会城市轨道交通专业委员会主任高毓才介绍了展览会的筹备情况。本次发布会由中国铁道科学研究院副院长赵有明主持，有近 30 家新闻和专业媒体应邀参加了发布会。

据主办方介绍，近年来，中国城市轨道交通行业发展迅速，截止到 2012 年 12 月 31 日，我国内地已有北京、上海、天津、重庆、广州、深圳、武汉、南京、沈阳、长春、大连、成都、西安、昆明、苏州、杭州等 16 个城市累计开通 64 条城市轨道交通运营线路（含地铁、轻轨线路，不含磁浮），总运营里程达到 1 980 Km，运营车站 1 291 座。2012 年，全国 30 个城市在建设轨道交通线路，已批准建设规划的城市 35 个，规划里程近 6 000 km，投资规模有望达到 13 000 亿元左右。与此同时，中国城市轨道领域的相关装备企业也步入了发展的黄金时期，城市轨道交通产业的繁荣为城市轨道交通展会提供了发展的机遇。该展会已成功举办了 4 届，

凭借其主、承办单位的专业性，已迅速发展为全球知名轨道交通展览会，其显著特点是专业性强、影响力广、权威性高、展出面积大。本次展览面积预计达 20 000 m²。展览内容将涵盖城市轨道机车车辆、通信信号、供配电力系统、机电系统、安保系统、信息化系统、维修与检测系统、自动售检票系统、勘察设计、建设施工、抗震防灾、工程咨询与监理等行业内最先进的技术及装备。我国自主研发的城市轨道设备实物和低地板实车展示，也将成为本届展会的最大亮点之一。展会同期，主办方将广邀行业有关领导、专家学者就“城轨低地板车辆技术”、“城市轨道交通 CBTC 信号系统技术”进行专题研讨，探讨城市轨道交通新技术、新趋势。同时，还将举办多种形式的专题技术交流会，向展商和业界同仁传递最新的行业信息，帮助展商获得更多合作共赢的机会。



文 / 摄影 / 本刊记者 国敢