

# 基于冗余编码系统的循环冗余校验方法

夏伟 蒋建金 傅林泰 张磊

(卡斯柯信号有限公司,200071,上海//第一作者,工程师)

**摘要** 提出了一种基于冗余编码系统的循环冗余校验(CRC)方法。该方法应用于轨道交通信号控制系统中可解决冗余编码系统与其他类型冗余编码或非冗余编码系统的通信问题,通过将冗余码校验信息融合到CRC计算过程中,在无故障的情况下得出的冗余码CRC与标准CRC完全一致,保证了系统与外界系统的正常通信功能;在系统发生故障的情况下能够将错误信息反馈到冗余码CRC中,外界冗余/非冗余系统可校验出故障信息,提高了系统的安全性和故障可检测率。

**关键词** 轨道交通;通信系统;冗余编码系统;CRC校验

**中图分类号** U231.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.08.031

## CRC Verification Method Based on Redundant Coding System

XIA Wei, JIANG Jianjin, Fu Lintai, Zhang Lei

**Abstract** A CRC (cyclic redundancy check) verification method based on redundant coding system is presented, the application of this method to the rail traffic signal control system will solve communication problems between the redundant coding system and other types of redundant coding or the non-redundant coding system. By integrating the redundancy check information into the CRC computing process, the redundant coding CRC obtained in fault-free situation is exactly the same as the standard CRC, and could ensure the normal communication function. While in case of system failure, the error information can be fed into the redundant coding CRC, the external redundancy / non-redundant system will verify the fault information, thus improve the system security and the fault detection rate.

**Key words** rail transit; communication system; redundant coding system; CRC verification

**Author's address** CASCO Signal Co., Ltd., 200071, Shanghai, China

列车自动控制(ATC)系统是由列车自动保护(ATP)系统、列车自动监控(ATS)系统、列车自动运行(ATO)系统和计算机联锁系统组成<sup>[1]</sup>,对列车

运行速度、运行间隔和运行方向等进行控制,保证列车安全、高效运行。这些系统大多在设计时需要采用安全冗余编码技术来提高系统的安全性,使系统达到SIL4安全完整性等级。

循环冗余校验(CRC)是通信领域常用的一种校验码,用于检测数据在传输过程中是否发生了被篡改的错误。一般的方法是通信双方定义好计算多项式和CRC的计算方法(包括宽度、起始值、结果异或值、输入输出数据反转等),发送方在对数据计算后将得出的CRC值附在消息帧后面一起发送;接收方收到后对数据进行同样的计算,并将结果与原始的CRC进行比较,来校验数据的正确性与完整性。

当冗余编码的列车自动控制系统与其它类型冗余编码或非冗余编码系统通信时,需要采用CRC来保证传输数据的完整性,且只需传输高位数据,低位冗余码不参与传输。当列车自动控制系统无故障时计算出的冗余码CRC与标准CRC结果完全一致,外界系统可校验通过;当列车自动控制系统存在故障时,计算出的冗余码CRC需要包含故障信息且该故障能被外界检测出而拒绝接收。现有的技术在发送消息时,仅对高位数据进行CRC计算,那么会导致外界系统无法检测到低位数据中可能存在的随机性失效或故障;收到外界消息时,如果只是根据高位数据直接计算出低位冗余码,那么当CRC校验过程失效时,故障信息将不体现在低位冗余码中而无法被当前系统检测。为此,提出了一种安全性高、错误可检测率高、基于冗余编码的CRC校验方法。

## 1 冗余编码技术

冗余编码技术虽然种类多样,但是编码形式、安全原理大致相同。每个变量都是由高位与低位组成,高位为数据的信息位,低位为数据的校验位,其中低位是由高位、签名、时间戳等信息通过预定

义的公式计算得出,因此每个变量的高低位之间存在确定的对应关系。系统在运行的每个周期都会对关键变量的高位、低位正确性进行校验,用于判断是否存在内存错误、随机性失效等故障。本文采用 AN 码、分离码相结合的编码方式<sup>[2-3]</sup>。对于简单变量  $x$ ,设计其编码后的形式为:

$$X = Ax + B_x + D_T$$

式中:  
 $A$ ——编码时选择的大素数;  
 $B_x$ ——编码时为变量  $x$  分配的大素数;  
 $D_T$ ——时间戳。  
在实际编码中,将长度为  $k$  个字节( $k = 1, 2, 3, 4$ )的变量分成了高  $k$  位和低  $k$  位,高  $k$  位为数值域,存放数据的原始值,低  $k$  位为校验域。  
按照这种编码方法,对每个操作数分配一个固定的签名,可以检测操作数寻址签名错误和操作符错误;时间戳可以检测循环变量值没有被更新的错误,或者循环变量值失效使用上周期变量值的错误。

## 2 CRC 技术

CRC 校验技术是一种十分有效的错误检测技术,能检验一位错、双位错、所有的奇数错、所有长度小于或等于所用的生成多项式长度的错误。如采用 16 位生成多项式的 CRC 校验,对 17 位以上的检错率高达 99.997%<sup>[4]</sup>,32 位生成多项式的出错概率比 16 位低  $10^{-5}$  倍<sup>[5]</sup>,因此 CRC 32 更适用于重要数据的传输,在轨道交通列车自动控制系统中得到广泛应用。文献[6-8]中对查表法 CRC 校验的原理做了详细阐述。

## 3 基于冗余编码的 CRC 校验方法

针对现有技术无法实现对列车信号控制系统中冗余码进行 CRC 校验以及无法利用 CRC 校验码与外界冗余/非冗余编码系统进行通信的问题,提出一种基于冗余编码系统的 CRC 校验方法:

1)对发送消息进行编码。通过将冗余码校验信息融合到 CRC 校验计算过程中,在无故障的情况下得出的 CRC 校验码与标准 CRC 完全一致,保证了正常的通信功能;在列车信号控制系统发生故障的情况下能够将错误信息反馈到编码 CRC 校验码中,外界冗余/非冗余系统可校验出故障信息。

2)收到外界消息,根据消息中的 CRC 校验码和高位数据对该消息进行解码校验,校验结果加入

最终生成的低位冗余码,保证了传输过程中任何故障可以被编码系统及时检测出。

该方法实现步骤包括离线数据准备模块、编码模块和解码模块三个部分。

### 3.1 离线数据准备模块

离线配置工具输入的文件有 msgType.xml(定义所有消息的格式,每条消息中包含的具体变量,每个变量的长度)和 signature.txt(包含所有变量的签名)。

离线配置工具需要根据输入文件计算每条消息中每个变量签名数据的补偿值。由于在计算 CRC 时需要同时进行低位冗余码的计算,因此需要根据具体 CRC 的多项式和计算方法,计算每个变量的签名补偿值表,用于在 CRC 计算时抵消低位冗余码信息。签名补偿值的计算公式如下:

$$S_{\text{mod}} = (S \wedge M) \times P^{k-1}$$

式中:  
 $S$ ——原始签名;  
 $S_{\text{mod}}$ ——签名补偿值;  
 $M$ ——CRC 32 多项式对应的掩码;  
 $P$ ——多项式转换成的 32 位矩阵;  
 $k$ ——变量长度,支持 1-4 B。

签名计算完成需要进行校验,校验的方法是进行反向计算,逆推原签名。如果校验失败,则终止输出;校验成功后输出的 bin 文件中应包含:每条消息的格式,每条消息中每个变量对应的签名补偿值,临时接收签名 TempSig\_rcv(跟 Sig\_nature 保持常量差 Constant\_1)。离线配置工具处理如图 1 所示。

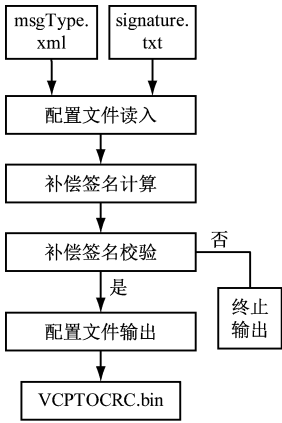


图 1 离线配置工具处理流程图

### 3.2 编码模块

冗余编码系统中所有待发送消息的变量均采用编码技术,包含高位和低位数据。由于冗余码无

法直接转换为 CRC,在编码时(即计算 CRC 的过程),会同时对每个变量的高位、低位进行校验,如果发现冗余码故障或在编码过程中发生随机性失效,那么该错误信息将会被融合于 CRC 计算过程,得到错误的 CRC 校验码,外部系统可以检测出该故障信息。处理流程如图 2 所示。

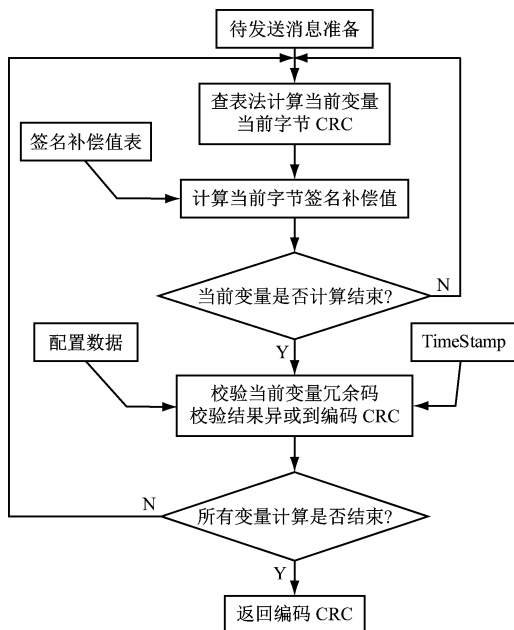


图 2 发送消息编码处理流程图

具体步骤为:

- 1) 从配置 bin 文件中获取当前变量的长度。
- 2) 查表法依次计算当前变量的每个字节的 CRC 值。
- 3) 查找签名补偿值表,计算当前变量当前字节签名对应的补偿值。
- 4) 根据当前变量的长度判断当前变量 CRC 计算是否结束,如未结束则执行步骤 2),如结束则根据当前变量的整体签名补偿值、高位数据、低位冗余码、时间戳(TimeStamp)进行校验。当数据正确时校验结果应为 0;如果校验结果非 0,则表示存在故障。将每个变量的校验结果信息异或到编码 CRC 值。

5) 判断当前消息所有变量是否都已计算结束,如未结束执行步骤 1),如已结束则返回编码 CRC 值作为最终结果。

其中步骤 3)中一个变量的某个字节 CRC 补偿值的计算公式为:

$$S_{\text{cmp}}[x] = (T[x_k]^{-1} \times 2^{k_1 \times 8}) \text{MOD}(A)$$

式中:

$x_k$ ——该字节的数值,范围为[0, 255];

$T$ ——查表法 CRC32 计算表;

$k_1$ ——变量的第几个字节,范围为[0, 3]。

### 3.3 解码模拟

由于接收到的消息只有高位数据和 CRC,需要根据高位数据和 CRC 生成有效的冗余码。如果数据在传输过程被篡改或解码过程发生随机性失效,将导致校验结果异常,生成的冗余码包含错误信息,该错误会被系统检出。在解码时,先对消息进行临时编码,将临时编码 CRC 与接收 CRC 进行比较,并将校验结果融合到最终冗余码的计算过程。具体为:

1) 根据配置信息中的 TempSig\_rcv 和收到消息中的高位数据计算出每个变量的临时冗余码 Temp\_Redcode,且不包含 TimeStamp 信息。

2) 根据 Temp\_Redcode 对收到的消息进行临时编码,得到临时编码 CRC。

3) 将步骤 2)中的临时编码 CRC 与接收 CRC 进行校验比较,并去除步骤 1)中常量差 Constant\_1。如果两者相等,则校验通过,校验结果为 0;如果两者不等,则校验不通过,校验结果非 0。

4) 如果步骤 3)校验通过,修改步骤 1)中每个变量的 Temp\_Redcode,异或 3.2 中步骤 3)校验结果,并加上 TimeStamp,作为最终冗余码结果输出。

5) 如果步骤 3)校验不通过,返回错误,不输出冗余码;如果发生随机性失效,进入步骤 4),输出的冗余码会携带步骤 3)中的错误校验结果,当前系统会检测出该故障,处理流程如图 3 所示。

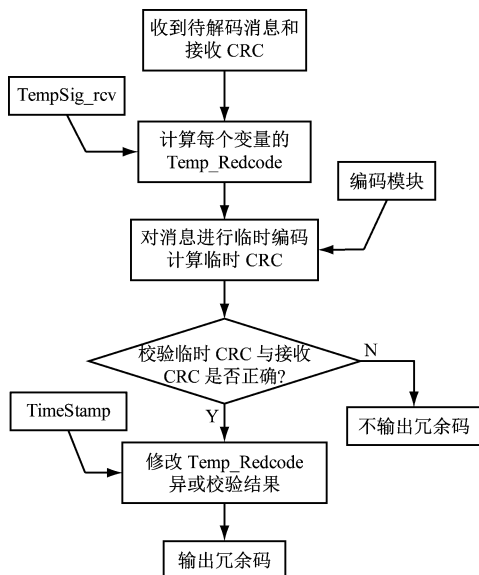


图 3 接收消息解码处理流程图

表 1 故障模拟条件下各支电路输出一览表		
序号	电路名称	诊断结果
1	电源电路	OK
2	时钟信号电路	OK
3	振荡信号电路	OK
4	检波信号电路	OK
5	信号调理电路	OK
6	温度调理电路	OK
7	通信电路	Failure

表 2 通信电路故障诊断结果报告				
参数	被测传感器型号	串行数据传输波特率/(bit/s)	测试点编号	实测情况波特率/(bit/s)
悬浮间隙	TSM-1	700	T811	697
悬浮间隙	TSM-1	650	T812	无信号
速度	TSM-1	875	T813	655
加速度	TSM-1	875	T814	871

理电路输出均正常,由此可以判断 FPGA 的输入信号是正确的,故障仅发生在 FPGA 输出到 RS 485 通信电路这条支路上。

### 3 结语

本文依据上海磁浮工程示范线的实际运行情况,提出了一种离线的悬浮导向传感器故障定位系统,实现了传感器故障的快速定位,大幅缩短了维修周期,节约了维修成本。

### 参考文献

[1] 赵悦,沈青松,佟玉军. 电路板的测试技术[J]. 辽宁工学院学报. 2003,23(2):19.

(上接第 143 页)

### 4 结语

采用基于冗余编码系统的 CRC 校验方法,可实现冗余编码系统与非冗余编码系统的正常通信,提高系统的通信兼容性,并且有效保证了对传输过程中的错误信息和系统的随机性失效的检出率。目前该方法已成功应用于 ATP、ATS 等多个安全产品中。

### 参考文献

[1] 张俊峰. 城市轨道交通信号 ATC 系统的选择策略[J]. 铁路通信信号工程技术,2013,10(3):40.  
[2] 曹杰,汪明新,孙军峰. 一种基于冗余编码的变量签名唯一

[2] 湛仪. 电路板自动测试系统的设计与实现[D]. 北京:北京交通大学硕士学位论文,2006.  
[3] 朱大奇. 电子设备故障诊断原理与实践[M]. 北京:电子工业出版社,2004:23.  
[4] 王德合,尹光. 数字电路板故障诊断探讨[J]. 电子工程师,2001,27(1):44.  
[5] 蒋邦方. 通用自动测试系统硬件分析和软件设计[J]. 通信与广播电视,2000(4):50.  
[6] 韩雪峰,黄炎,杨涛. 基于 PCI 总线的高速数据采集接口的设计与实现[J]. 微计算机信息,2005(12):71.  
[7] 邓素萍. 串行通信 RS232/RS485 转换器[J]. 国外电子元器件,2001(7):62.  
[8] 任晓东,文博. 基于神经网络的电路板故障诊断专家系统的研究[D]. 北京:电子工业出版社,2003.  
[9] 王承. 基于神经网络的模拟电路故障诊断方法研究[D]. 成都:成都电子科技大学,2005.  
[10] ZHOU X L, YU S T, MAO X J, et al. On-board diagnosis of the drive circuit of an electronically controlled injector[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(5):815.  
[11] SEVGI L. Synthetic radar-signal environment: computer generation of signal, noise, and clutter[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2007, 49(5):192.  
[12] SAWAN M, MOUNAIM F, LESBROS G. Wireless monitoring of electrode-tissues interfaces for long term characterization [J]. Analog Integrated Circuits & Signal Processing, 2008, 55(1):103.  
[13] CHAKRABARTY S, RAJAN V, YING J, et al. A virtual test-bench for analog circuit testability analysis and fault diagnosis [C]// Autotestcon 98. IEEE Systems Readiness Technology Conference. IEEE, 1998:337.

(收稿日期:2019-04-25)

性安全保证方法[J]. 铁道通信信号,2015,51(9):55.  
[3] 李刚,丁佳,梁盟磊等. 安全编码预编译器的设计与实现[J]. 计算机工程,2011,37(3):230.  
[4] 赵希权,曾志新,李勇. 循环冗余校验在单片机无线通信中的应用[J]. 微计算机信息,2005(增刊):69.  
[5] 李继东,王博,袁晨光. 在通过程中用 C 语言实现 CRC 校验[J]. 内燃机与动力装置,2009(S1):43.  
[6] 马群,王会燃. 基于查表法的嵌入式系统 CRC 算法研究[J]. 软件导刊,2014,13(10):51.  
[7] 陈红,谢勤岚. 用查表法实现微处理器的快速 CRC 计算[J]. 交通与计算机,2003,21(3):73.  
[8] 董高云,孙军峰. CRC 查表法的推广及其在 iLOCK 联锁系统中的应用[J]. 铁路计算机应用,2015(1):40.

(收稿日期:2018-07-24)