

文章编号: 1001-4632 (2010) 05-0108-06

基于正弦内插的 UM2000 信号解码算法

贺广宇, 范明

(中国铁道科学研究院 通信信号研究所, 北京 100081)

摘要: UM2000 数字轨道电路采用调频方式传输 28 位码组信息。UM2000 信号解码时间按长、短窗设计, 解码算法主要由带通滤波、过零检测、滑窗 DFT、门限判决和 CRC 校验组成, 其中过零检测解调算法采用正弦内插法对 UM2000 信号的过零时刻进行计算。影响解码性能的主要因素有信号采样时间、插值算法和正弦内插法使用的采样点数和插值点数。对不同信噪比条件下的仿真信号和测试箱生成信号进行解码测试。仿真信号的测试结果表明: 当带内谐波干扰信噪比分别为 3, 4 和 5 时, 1.562 5 s 短窗的安全译码率分别为 80%, 81% 和 86%, 3.125 0 s 长窗的安全译码率分别为 99%, 100% 和 100%。测试箱生成信号的测试结果表明: 1.562 5 s 短窗的安全译码率为 95.27%, 3.125 0 s 长窗的安全译码率分别为 98.06%, 99.91% 和 98.23%。说明 UM2000 信号解码算法在满足信号系统实时性要求的条件下, 实现了 UM2000 信号的安全译码。

关键词: 数字轨道电路; UM2000 信号; 正弦内插法; 过零检测; 安全译码

中图分类号: U284.238 **文献标识码:** A

UM2000 无绝缘数字轨道电路采用调频方式对 28 位低频调制信号进行数字编码, 码组包括速度等级、线路坡度、目标距离、路网码和校验码。国内对 UM2000 数字轨道电路进行了相关研究^[1-3], 但均与 UM2000 信号的解码要求有一定差距。本文提出基于正弦内插的 UM2000 解码算法, 在满足系统实时性的条件下可实现 UM2000 信号的安全译码。

1 UM2000 信号表示

UM2000 数字轨道电路采用调频方式传输 28 位信息, 由 28 个频率、幅度和相位确定的正弦信号进行数字编码, 基带信号根据发送的数字信息码选取相应的正弦信号叠加, 然后进行载波调制。上行载频分别为 2 000 和 2 600 Hz, 下行载频分别为 1 700 和 2 300 Hz, 其调制信号生成公式为

$$s(t) = A \sin\left(2\pi f_0 t + 2\pi \int_0^t m(u) du\right) \quad (1)$$

$$m(t) = \sum_{n=1}^{28} s_n A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (2)$$

式中: $s(t)$ 为 UM2000 调制信号; A 为调制信号的

幅度; $m(t)$ 为基带信号; f_0 为信号载频; $s_n = 0$ 或 1, 表示第 n 位信息码; $f_1 \sim f_{28}$, $A_1 \sim A_{28}$ 和 $\varphi_1 \sim \varphi_{28}$ 分别为 28 位正弦信号各自对应的频率、幅度和相位; $f_n = 0.08(3 + 8n)$, 其中 $n = 1, 2, 3, \dots, 6$ 表示 6 位 CRC 校验码, $n = 7, 8, 9, 10$ 表示 4 位坡度信息, $n = 11, 12, 13, \dots, 16$ 表示 6 位目标距离, $n = 17, 18, 19, \dots, 24$ 表示 8 位速度信息, $n = 25, 26, 27$ 表示 3 位路网码, $n = 28$ 作为 1 位列车占用检查信息。

UM2000 信号的频域特性如图 1 所示, 由图 1 可知信号带宽为 120 Hz。

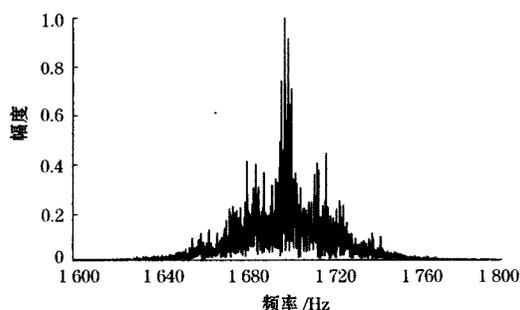


图 1 UM2000 信号频域特性

收稿日期: 2009-11-04; 修订日期: 2010-03-02

基金项目: 科技部科研院所技术开发研究专项资金资助项目 (2008EG223199)

作者简介: 贺广宇 (1985—), 男, 湖南娄底人, 研究实习员。

2 UM2000 信号解码算法

2.1 算法框架

为了满足系统实时性的要求, UM2000 信号的解码时间按长、短窗设计, 分别为 3.125 0 和 1.562 5 s, 其频率分辨率分别为 0.32 和 0.64 Hz。

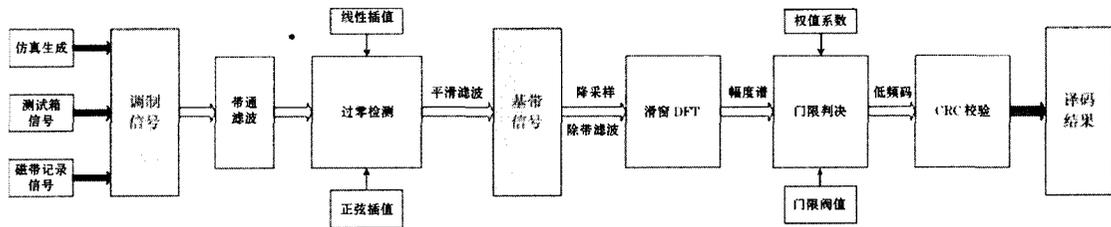


图2 UM2000 信号解码算法框图

(1) 带通滤波: 对于利用钢轨作为信息传输通道的轨道电路来说, 传导性干扰中的不平衡牵引电流是影响最严重的因素之一^[4], 为了滤除载频带宽以外的 50 Hz 基波和谐波干扰, 带通滤波采用了 4 组 Butterworth 滤波器, 其通带上、下载频分别为 f_0+25 和 f_0-25 , 阻带上、下载频分别为 f_0+96 和 f_0-96 , 通带衰减为 0.6 dB, 阻带衰减为 38 dB, UM2000 信号带宽为 120 Hz, 带通滤波器可以滤除通带以外的干扰信号。

(2) 过零检测: 采用正弦内插法对 UM2000 信号进行解调, 其中信号采样频率为 6 400 Hz, 过零检测分析窗长度为 25 个采样点, 为了抑制干扰对解调算法性能的影响, 过零检测必须考虑信号带有噪声时可能产生的计数误差。

(3) 滑窗 DFT: 对过零检测后的信号进行平滑滤波可以得到解调后的基带信号。为了提高系统的实时性, 将其采样频率设置为 64 Hz, 1.562 5 s 时间窗对应的基带信号采样点数为 100, 由于 25.68 Hz 信号具有较大的幅值, 为了减小其频率分量和旁瓣泄露, 对基带信号进行带阻滤波, 提高了 27 位低频信号的频谱分辨能力, 经过 800 点滑窗 DFT 处理后可以得到 27 位低频信号的幅度谱, 其显示分辨率为 0.08 Hz, 且随着频率值的增大, 幅值呈上升趋势。

(4) 门限判决: 为了使滑窗 DFT 处理后的频谱幅度保持一致, 以便于进行门限判决, 首先将各个低频幅度谱线乘以相应的权值系数, 得到幅值均匀的频谱, 然后对其进行限幅处理。根据系统仿真, 限幅参数短窗取值为 60, 长窗取值为 120; 最

由于窗函数的突然截断, 低频谱线变成了具有一定宽度的谱峰, 同时频谱中存在多余的高频分量, 降低了频率的分辨率。因此, 为了保证在长、短窗条件下 UM2000 信号的安全译码, 解码算法主要包括带通滤波、过零检测、滑窗 DFT、门限判决和 CRC 校验步骤, 其算法框图如图 2 所示。

后将幅度谱转化为功率谱以进行双门限判决, 短窗的门限值为 -3 和 -6 dB, 长窗的门限值为 -3 和 -9 dB, 当低频信号的功率谱位于相应的门限值之间时, 解码算法进行安全译码防护处理。

(5) CRC 校验: CRC 采用 (27, 21, 6) 缩短循环码, 与原循环码 (31, 25, 6) 具有相同的检错和纠错能力, 可以对门限判决得到的低频码进行差错控制, 以保证解码算法的可靠性和安全性。

2.2 过零检测

UM2000 基带信号为具有固定幅值和初始相位的 28 位低频正弦信号之和, 采用调频方式进行调制, 过零检测解调算法通过直接计数的方法进行瞬时测频^[5], 将测频值减去调制载频就可以得到当前时刻的基带信号幅度值, 其中直接计数测频法通过计量一定数量的信号周期总共占有多长时间来推算信号频率。设采样量化的时间频率为 f_s , 计量信号的 a 个半周期, 即计算一段信号极性变化 a 次的时间, 发现总共的信号时间为 b 个时间周期, 则信号频率 f 为

$$f = \frac{a}{2b} f_s \quad (3)$$

由于信号时间 b 通常并不是整数个采样时间周期, 为了确定过零点的时刻, 必须在采样点之间进行插值 (波形重构), 因此, 过零检测解调算法采用正弦内插对 UM2000 信号的过零时刻进行计算, 其表达式为^[6]

$$c\left(n + \frac{m}{M+1}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \frac{\sin\left[\left(n + \frac{m}{M+1} - k\right)\pi\right]}{\left(n + \frac{m}{M+1} - k\right)\pi} \quad (4)$$

式中： x 为时域原始信号； N 为正弦内插法使用的采样点数； M 为 2 个采样点之间的插值数； n 为采样点序号； m 为插值点序号； c 为插值后的信号序列； k 为采样点数，取值为 0 到 $N-1$ 之间。

取 UM2000 信号载频为 1 700 Hz，采样频率为 6 400 Hz，正弦内插法使用的采样点数为 8，2 个采样点之间的插值数为 63，正弦信号波形重构效果如图 3 所示。

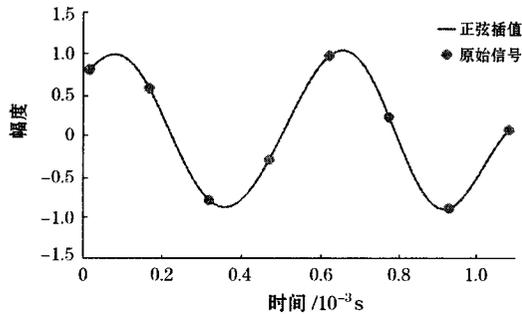


图3 正弦内插法结果仿真分析

当信号时间 b 的数值较小时，计数法的测频误差较大，因此可以通过增加 b 的数值来减小测频误差，即提高采样频率和延长信号分析窗长度，为此 UM2000 信号过零检测分析窗长度取值为 25 个采样点，采用正弦内插法计算过零时刻，以提高信号解调的精度。原始信号和过零检测恢复基带信号对比如图 4 和图 5 所示。

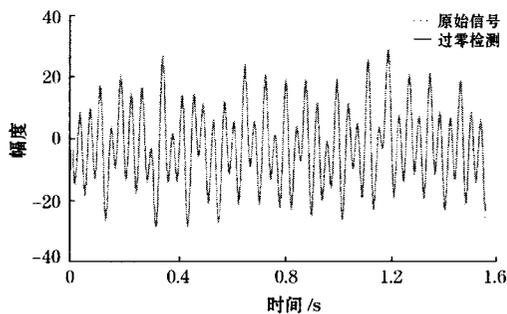


图4 原始信号和过零检测恢复基带信号对比图(1 700 Hz)

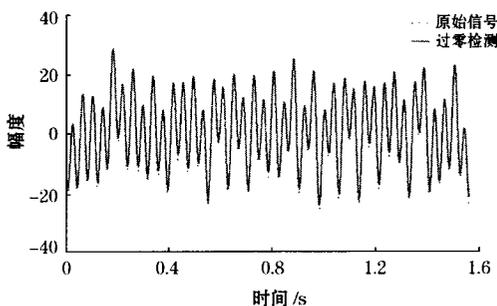


图5 原始信号和过零检测恢复基带信号对比图(2 600 Hz)

由图 4 和图 5 可知，正弦内插过零解调算法可以较好地恢复原始基带信号，且载频为 1 700 Hz 的调制信号解调精度高于载频为 2 600 Hz 的调制信号。

3 影响解码性能的因素

根据 UM2000 信号解调算法的基本原理可知，影响解码性能的主要因素有如下 3 个。

1) 信号采样时间

抽取连续信号的持续时间决定了频谱的分辨率，1.562 5 s 短窗的频谱分辨率为 0.64 Hz，3.125 s 长窗的频谱分辨率为 0.32 Hz，当信号采样时间越长时，其频谱分辨率越高，滑窗 DFT 处理后的谱线分量大小越明显，越有利于进行门限判别。长窗和短窗条件下的 DFT 幅度谱和功率谱对比如图 6 和图 7 所示，图中 T_d 为信号采样时间。

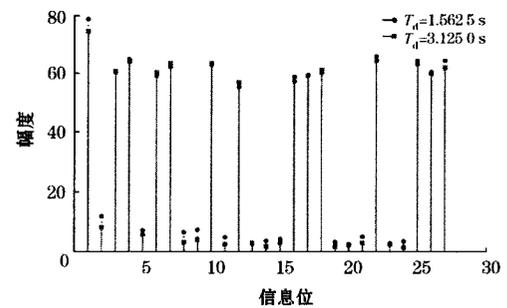


图6 不同采样时间下现场实录信号的 DFT 幅度谱(2 600 Hz)

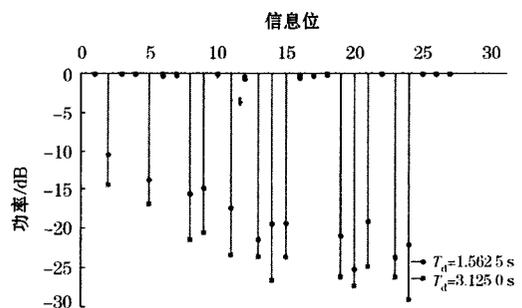


图7 不同采样时间下现场实录信号的 DFT 功率谱(2 600 Hz)

由图 6 和 7 可知，3.125 0 s 长窗的频谱分辨率高于 1.562 5 s 短窗，且谱线分量的大小区别更明显，有利于进行门限判别。

2) 插值算法

由于过零检测解调算法通过直接计数的方法进行瞬时测频解调，为了确定过零点的时刻，必须在

采样点之间进行插值,不同的插值算法具有不同的解调精度,而解调的精度势必会影响到低频信号的幅度谱,最终影响解码性能。线性插值法和正弦插值法的解码性能对比如图 8 和图 9 所示。

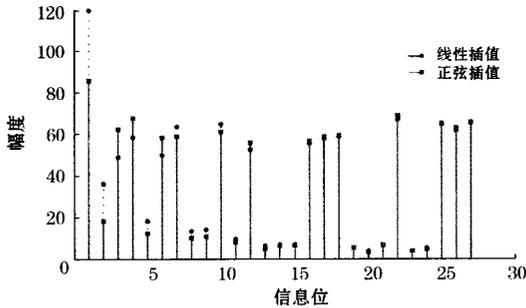


图 8 线性插值法与正弦插值法 DFT 幅度谱对比图

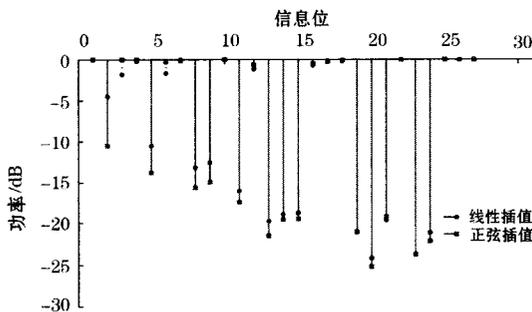


图 9 线性插值法与正弦插值法功率谱对比图

由图 8 和图 9 可知,线性插值过零检测恢复基带信号后,对现场实录信号 27 位低频码的译码结果为 1-11101100101000111000100111,其中-1 表示第 2 个低频信号的功率谱位于相应的门限值之间,解码算法进行安全译码防护,判决此次安全译码无效;正弦插值法使用的采样点数为 8,插值点数为 63,对现场实录信号 27 位低频码的译码结果为 101101100101000111000100111,安全译码正确有效,因此,正弦插值法的译码性能优于线性插值法。

3) 正弦内插法使用的采样点数和插值点数

过零检测解调算法采用正弦内插法对 UM2000 信号的过零时刻进行计算,而正弦内插的精度受采样点数 N 和插值点数 M 的影响,不同采样点数和插值点数条件下信号的幅度谱对比如图 10 和图 11 所示。

由图 10 和图 11 可知,基带信号的幅度谱与正弦内插所使用的采样点数有关,受插值点数的影响较小,因此正弦内插所使用的采样点数取为 8,插值点数取为 63。

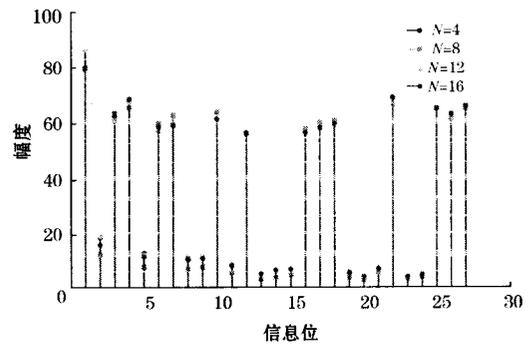


图 10 不同采样点数下正弦内插法解调基带信号幅度谱 (2 600 Hz)

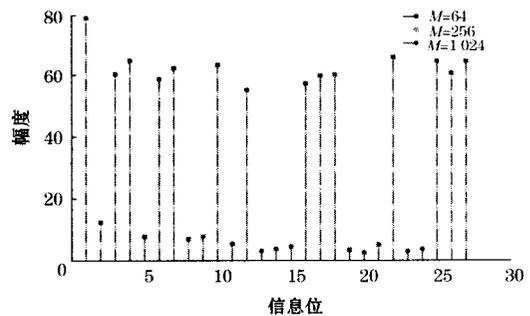


图 11 不同插值点数下正弦内插解调基带信号幅度谱 (2 600 Hz)

4 实验结果

为了分析基于正弦内插的 UM2000 信号解码算法的抗干扰能力,引入带内谐波干扰信号,在短窗 1.562 5 s 和长窗 3.125 0 s 的条件下进行仿真信号解码。结果表明,当带内谐波干扰信噪比分别为 3, 4 和 5 时,1.562 5 s 短窗的安全译码率分别为 80%, 81% 和 86%, 3.125 0 s 长窗的安全译码率分别为 99%, 100% 和 100%。

在 UM2000 仿真信号解码的基础上,自主研发了 UM2000 信号解码算法分析软件 V1.0,软件通过采集测试箱发送的实际 UM2000 信号,在人机界面上实时地显示 UM2000 调制信号、解调基带信号、幅度谱、功率谱和解码结果,并以日志文件的形式实时地记录在线解码结果。分析 UM2000 信号的在线解码测试结果,对应测试序号为 1, 2, 3 和 4 的安全译码率分别为 95.27%, 98.06%, 99.91% 和 98.23%, 其中测试序号 1 的解码时间窗为 1.562 5 s, 测试序号 2, 3 和 4 的解码时间窗为 3.125 0 s。

5 结 论

针对 UM2000 信号的安全译码问题, 本文提出了基于正弦内插的 UM2000 信号解码算法, 分析了信号采样时间以及不同插值算法对解码性能的影响, 研究了算法的抗干扰能力, 并对不同信噪比条件下的仿真信号和测试箱生成信号进行了解码测试。仿真信号测试结果表明: 当带内谐波干扰信噪

比分别为 3, 4 和 5 时, 1.562 5 s 短窗的安全译码率分别为 80%, 81% 和 86%, 3.125 s 长窗的安全译码率分别为 99%, 100% 和 100%。测试箱信号测试结果表明: 1.562 5 s 短窗的安全译码率为 95.27%, 3.125 s 长窗的安全译码率分别为 98.06%, 99.91% 和 98.23%。说明该 UM2000 信号解码算法在满足信号系统实时性要求的条件下, 实现了 UM2000 信号的安全译码。

参 考 文 献

- [1] 田芬, 李开成. MEM 在铁路 UM2000 轨道电路信号接收中的应用 [J]. 北方交通大学学报, 2003 (6): 107-110. (TIAN Fen, LI Kaicheng. Application of MEM in Railway UM2000 Track Circuit Signal Receipt [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003 (6): 107-110. in Chinese)
- [2] 孙巍, 魏学业. 谐振隔离式频率编码轨道电路解码研究 [J]. 北京交通大学学报, 2005, 29 (2): 88-90. (SUN Wei, WEI Xueye. Study on Track Circuit Decoding of Resonant Isolated Frequency Coding [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29 (2): 88-90. in Chinese)
- [3] 刘荣, 程荫杭. 频率编码数字轨道电路的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2006 (6): 3-4. (LIU Rong, CHENG Yinhang. Research on Frequency Coding Digit Track Circuit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006 (6): 3-4. in Chinese)
- [4] 杨世武, 吴运熙. 轨道电路传导性干扰抗扰度试验的设计 [J]. 北方交通大学学报, 2001 (6): 99-102. (YANG Shiwu, WU Yunxi. Design of Conductive Interference Immunity Test for Track Circuit [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2001 (6): 99-102. in Chinese)
- [5] 胡来招. 瞬时测频 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 151-155.
- [6] 林茂六, 尹宝智, 刘治宇. 高速采样信号数字内插理论与正弦内插算法研究 [J]. 电子学报, 2000, 28 (12): 8-10. (LIN Maoliu, YIN Baozhi, LIU Zhiyu. Digital Interpolation Theory and Sinc Interpolation Algorithm on High-Speed Sampling Signals [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28 (12): 8-10. in Chinese)

The UM2000 Signal Decoding Algorithm Based on Sine Interpolation

HE Guangyu, FAN Ming

(Signalling and Communications Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The UM2000 digital track circuit adopts the frequency modulation method to transmit 28 bit code group information. The short and long time windows are designed for demodulating UM2000 signal codes. The decoding algorithm is mainly composed of the bandpass filter, the zero-crossing detection, the sliding window DFT, the threshold decision and the CRC verification. Among which, the zero-crossing detection demodulation algorithm uses the sine interpolation to carry out the computation of the UM2000 signal zero crossing time. The primary factors which influence the decoding performance are the signal sampling time, the interpolation algorithm and the sampling points and the interpolation points used by the sine interpolation. The decoding tests are applied to the test box production signal and the simulation signal with different signal-to-noise ratio. The simulation signal test results show that the short time (1.562 5 s) window's safe decoding rate is 80%, 81%, 86% and the long time (3.125 0 s) window's safe deco-

ding rate is 99%, 100% and 100%, when the signal-to-noise ratio of the in-band harmonic interference is 3, 4 and 5 respectively. The test box production signal decoded results show that the safe decoding rate of the short time (1.562 5 s) window is 95.27% and the safe decoding rate of the long time (3.125 0 s) window is 98.06%, 99.91% and 98.23%. The test results show that the UM2000 signal decoding algorithm not only can satisfy the request of the real-time feature of the signal system, but also can achieve the safe decoding of the UM2000 signal.

Key words: Digital track circuit; UM2000 signal; Sine interpolation; Zero-crossing detection; Security decoding

(责任编辑 刘卫华)

(上接第 101 页)

22 客运专线动态检测有关技术标准的研究

收集和分析与客运专线动态检测指标相关的国外标准,主要是检测方法和性能参数等;研究有关与轨道、接触网、通信信号动态检测有关的主要技术标准。通过对合宁铁路动态检测综合试验数据的分析,对 $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度客运专线的轨道、接触网、通信和信号系统动态检测相关技术标准进行了总结提升。通过京津城际铁路动态检测综合试验数据的总结、分析,对 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的客运专线轨道、接触网、通信和信号系统动态检测相关技术标准进行试验验证,修改完善了 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 高速铁路的验收标准。

主要研究成果包括:①客运专线轨道动态检测的技术指标及标准值的分析研究;②接触网性能测试和弓网受流性能技术指标及标准值的分析;③通信动态检测技术指标及标准值的分析研究;④CTCS-2 级 ETCS-1 级列控系统动态检测内容与评价方法、评价指标。

该研究提出的客运专线铁路工程竣工动态验收判定指标和方法,为新建客运专线竣工验收动态检测提供了理论依据,使动态检测评价指标更加科学、适用,对我国铁路客运专线建设和质量控制具有重大意义。2009 年 1 月通过了铁道部建设司组织的技术评审。

23 客运专线铁路 CRTS I 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件——严寒地区补充规定

CRTS I 型板式无砟轨道是我国高速铁路建设中采用的主要轨道结构形式之一,其中砂浆垫层和凸台树脂的性能对轨道结构的平顺性、列车运行的舒适性与安全性、轨道结构耐久性和运营维护成本有重大影响,是客运专线(高速铁路)建造的关键工程材料之一。在对温暖、寒冷地区水泥乳化沥青砂浆、凸台树脂的研究和应用基础上,针对严寒地区低温环境条件,从严寒地区水泥乳化沥青砂浆劣化机理分析入手,广泛筛选优质原材料,通过大量的室内试验、关键原材料的工业化生产和现场灌注试验,深入研究原材料的种类和性能、材料的配比、制备设备和工艺等因素对砂浆和凸台树脂性能(特别是低温力学性能及耐久性能)的影响规律,创新性提出了低温条件下砂浆性能的分析测试方法,并在严寒地区的滨绥线成高子站试验段进行了工程应用实践以及运营通车后 1 个严寒冬季的跟踪测试和考察。

在 2008 年 6 月颁布实施的《客运专线铁路 CRTS I 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件》(科技基 [2008] 74 号)的基础上,依据自主创新的严寒地区 CRTS I 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆最新研究成果、滨绥线成高子站试验段工程实践经验以及国内外相关标准和规范,编制了客运专线铁路 CRTS I 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件——严寒地区补充规定,此规范明确合理,可操作性和针对性强,对于指导严寒地区 CRTS I 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆的生产和施工、确保水泥乳化沥青砂浆的质量,具有极其重要的意义。经铁道部科技司审查后,已于 2009 年 7 月 13 日颁布实施。

该项目的研究成果在 2009 年 6 月通过了铁道部科技司组织的技术评审。

24 客运专线铁路常用跨度桥梁结构刚度和基频标准研究

客运专线铁路桥梁的主要功能是为高速列车提供平顺、稳定的桥上线路,确保列车运营安全和旅客乘坐舒适。与普通铁路相比,客运专线铁路提高了对桥梁刚度的要求,以使结构的各种变形很小,同时避免列车通过时结构出现共振或过大振动。随着高速铁路发展,以德、日为主的国家针对高速铁路桥梁性能与特点,通过对“车—线—桥”耦合振动体系进行动力响应分析及室内、外动力试验验证,提出了高速铁路桥梁的设计原则和控制指标。国外规范对梁体基频、挠跨比等指

(下转第 118 页)