

试
验
检
测

移频键控信号测量系统误差分析与补偿

马帅旗, 鲍存会

(陕西理工学院 电气工程系, 陕西 汉中 723003)



作者简介: 马帅旗 (1977—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为工业自动控制及信号处理。

摘 要: 为了提高轨道电路移频键控信号(FSK)的测量精度, 给出了一种基于FPGA+ARM处理器的移频键控信号测量与误差补偿方法。该方法在FPGA中利用量化时钟实时测量载波信号的周期, 并将测量数据经过缓存后传输给ARM处理器。ARM处理器对测量的载波信号周期数据及产生测量误差的主要原因进行分析, 并对载频信号上、下边频切换时产生的畸变数据和时间间隔测量误差进行补偿。经试验测试表明, 该系统能够准确地测量低频调制和高频载波信号频率, 具有较好的抗扰能力, 能够满足一般工业现场测试速率和精度的要求。

关键词: 轨道电路; 移频键控; 时间间隔误差; 畸变数据; 信号; 测量系统

中图分类号: U284.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)05-0059-03

Error Analysis and Compensation of Frequency Shift Keying Signal Detection System

MA Shuai-qi, BAO Cun-hui

(Department of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723003, China)

Abstract: A method was developed to improve the measurement accuracy of track circuit frequency shift keying (FSK) signal by using FPGA and ARM processor. The quantization timer was used to measure the periods of FSK signal in FPGA, and then data was translated to ARM after temporarily stored in dual-port RAM. The ARM processor analyzed the period of the high frequency carrier signal and the main reasons for causing FSK error, and compensated the distortion data which caused by switching of up frequency and down frequency. The results show that this system can precisely measure the low frequency modulation and high frequency carrier signal frequency, and it can satisfy the requirement of speed and precision in industry environment.

Key words: track circuit; FSK; time interval error; distortion data; signal; measurement system

0 引言

在铁路交通系统中, 通常利用移频键控FSK(Frequency-Shift Keying)信号检查轨道上有无列车或者传递列车占用轨道信息, 实现地面与列车之间交互信息。FSK信号是一种用调制信号的高低电平分别选通载频信号的上边频、下边频形成。目前, 国内主要采用的轨道移频电路^[1]有国产18信息移频轨道电路和法国UM71无绝缘轨道电路。国产移频轨道电路的低频调制频率从7 Hz到26 Hz中选取了18种频率作为低频调制信号频率, 上行载频信号的中心频率为650 Hz和850 Hz, 下行载频信号中心频率为550 Hz和750 Hz, 频偏为55 Hz。引进UM71低频调制频率从10.3 Hz到29 Hz中选取了18种频率作为低频调制频率, 上行载频信号的中

心频率为2 000 Hz和2 600 Hz, 下行载频信号的中心频率为1 700 Hz和2 300 Hz, 频偏为11 Hz。对于FSK信号, 载频信号的上边频为中心频率和频偏之和, 下边频为中心频率和频偏之差。由于国产18信息相邻载频信号存在边带重叠, 而引进的UM71相邻载频信号变化范围较小。因此, 对实时、准确地检测现代铁路轨道移频信号提出了更高要求。

文献[2-3]利用频谱分析方法对FSK进行分析, 若要提高频率的分辨率, 需要增加FFT长度或者降低AD转换器的采样速率, 而增加FFT长度会影响频谱分析的实时性, 降低AD采样速率会影响到采样的真实性, 从而影响到系统的可靠性。为了提高分辨率, 文献[3]利用欠采样技术来提高分辨率, 但是低频调制频率比较小, 虽然在整个数轴上分辨率有了一定的提高, 在能量相对集中的那一小段分辨率变化还是很小。文献

收稿日期: 2010-10-11; 收修改稿日期: 2011-03-25

[4] 利用 ZOOM-FFT 方法对能量集中的部分频率进行细化, 考虑到 18 信息和引进 UM71 信号特征, 系统的实时性仍然受到很大影响, 因而应用频率分析方法测量 FSK 信号有一定的局限。文献 [5-6] 给出了一种时间间隔测量 FSK 信号的方法, 基本上能够满足系统实时性和精度要求。

本文利用 FPGA 实时测量 FSK 信号周期, 根据载频信号周期长度和周期变化结果确定低频调制信号和高频载波信号, 并对 FSK 信号主要的测量误差进行分析和补偿。

1 FSK 信号测量原理

轨道移频电路信号是一种利用低频信号调制载波信号产生的正弦交流信号。图 1 给出了相位连续的移频电路信号示意图, 低频调制信号 f_m 的高、低电平分别选通调制信号的上边频 f_u 和下边频 f_d , 并使之交替选通。其中, 调制信号频率为 f_m , 载波信号的频率为 f_0 , 频偏为 Δf , 上边频 $f_u = f_0 + \Delta f$, 下边频 $f_d = f_0 - \Delta f$ 。利用时间间隔法对调制信号频率和载波信号频率进行测量时, 首先将轨道移频信号 (正弦信号) 中载频信号变换成方波信号, 然后利用测频法对信号的周期进行测量, 然后依据测量的方波周期及周期变化数据, 计算调制信号及载波信号的上、下边频的周期, 最后对畸变数据及测量误差进行补偿, 获取准确的测量值。

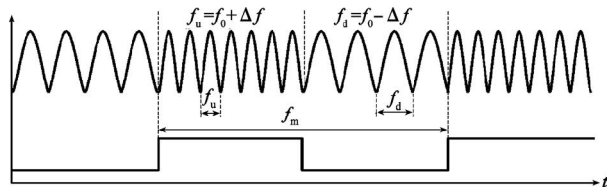


图 1 轨道移频电路信号

2 测量系统设计

如图 2 所示, FSK 信号测量系统主要由前端信号调理电路, FPGA 测量电路和 ARM 处理电路 3 部分组成。首先通过前端信号调理电路对 FSK 信号进行处理, 实现低通滤波和陷波电路, 并利用高速开关管电路将正弦载波信号变换成方波信号; 然后利用 FPGA 内部锁相环产生的高频时钟对方波信号进行量化, 实时对载波信号的周期进行测量, 为保证调制信号测量数据的有效性, 应至少测量 3 个调制信号周期内的载波周期数据; ARM 处理器对测量数据进行分析, 获取低频调制信号和高频载波信号参数。根据系统实时性要求, 每次计算低频调制信号时, 至少需要获取 1 024 组载波信号测量值, 将载波信号测量值存入 FPGA 内部设计的双口 RAM 单元中。ARM 处理器读取测量结果, 根据相邻等周期内的高频载波信号数据确定低频调制信号的上、下边频。计算参数的关键在于正确判断上、下边频的边界, 若上边频与下边频的切换点已确定, 那么通过

对任意 3 个边频切换点之间数据进行统计, 可确定低频调制频率。



图 2 FSK 信号测量原理图

3 测量系统误差分析与补偿

在实际测量过程中, 系统受到较多干扰, 系统测量的精度也取决于对干扰信号的剔除和对畸变数据的处理。

3.1 前端噪声处理

FSK 信号容易受到外部干扰源的影响, 当系统处于交流电气化区段时, 牵引电流工频干扰、谐波干扰、邻线干扰以及高频电磁波的辐射干扰都可能使 FSK 信号受到影响; 在非电气化区段, 电传动内燃机车牵引电机干扰、邻线干扰、高频电磁波辐射干扰以及供电电网接地时的 50 Hz 干扰等容易引起 FSK 信号失真。前端信号处理电路完成滤除 50 Hz 工频干扰及高频谐波的干扰, 提高信号的信噪比, 平滑信号波形。首先采用有源 RC 双 T 网络进行 50 Hz 工频干扰的滤除; 然后设计低通滤波器滤除高频谐波, 从而获取较为干净的 FSK 载频信号; 最后将 FSK 信号经过高速开关管电路变换成方波信号, 并将该方波信号输出进行后级处理。

3.2 畸变数据处理

FSK 信号中的载波频率 (上边频、下边频) 切换是一种非整周期切换, 可能发生在调制信号的任意位置, 因而导致调制频率切换点处的测量数据出现畸变。如图 3 所示, 载波信号的上、下边频信号分别为 f_u 与 f_d , 量化时钟频率为 30 MHz, 量化时钟的正常计数值分别为 C_u 、 C_d , 则 $C_u = 3 \times 10^7 / f_u$, $C_d = 3 \times 10^7 / f_d$ 。上边频与下边频切换处的畸变数据为 C_s , 畸变的结果可能是前一频率的后半部分和后一频率的前半部分结合 [7], 即 $C_s = C_u' + C_d'$, 其中 C_u' 为畸变数据中属于上边频部分计数值, C_d' 为畸变数据中属于下边频部分计数值。若对畸变数据处理不当, 则会对载波和调制频率的测量造成较大误差。根据轨道移频信号相位连续, 可以得到

得到 $\frac{C_u'}{C_u} + \frac{C_d'}{C_d} = 1$, 因而交界点处畸变值属于不同载频

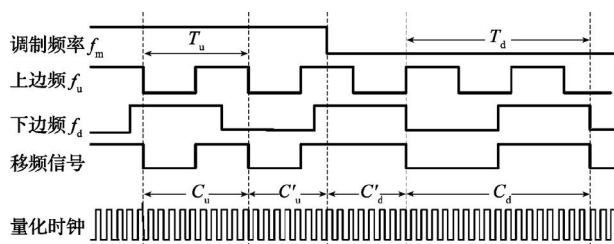


图 3 畸变数据分析

信号的分量为： $C_u' = \frac{C_u(C_d - C_s)}{C_d - C_u}$, $C_d' = \frac{C_d(C_s - C_u)}{C_d - C_u}$ 。

3.3 系统误差补偿与修正

系统误差是由于量化时钟和待测频率不同步引起的测量误差。如图 4 所示，量化时钟频率为 f_m ，对应的周期 $T = 1/f_m$ ，在待测信号两个相邻边沿间量化脉冲的计数个数 n ， t_1 、 t_2 为待测信号边沿与量化时钟脉冲上升沿之间的时间间隔，则待测脉冲的实际时间间隔 t 为 $t = nT + t_1 - t_2$ 。

故测量过程中存在一个门限周期内的原理性误差 $E = |t_1 - t_2|$ ，误差小于等于一个时钟周期 T 。上边频原理性误差 $E_u = \frac{f_0 + \Delta f}{2 \cdot f_m} |t_1 - t_2|$ ，下边频原理性误差 $E_d = \frac{f_0 - \Delta f}{2 \cdot f_m} |t_1 - t_2|$ ，低频调制信号原理性误差 $E_u = \frac{f_0}{f_m} |t_1 - t_2|$ 。

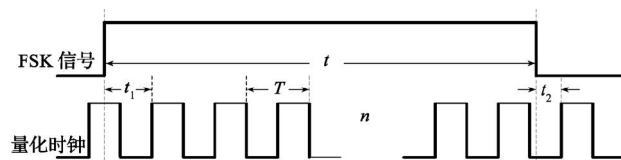


图 4 原理性误差分析

若对系统原理性误差处理不当，则会对测量结果产生影响。克服原理性误差主要有 3 类方法：①提高量化时钟频率；②对量化误差 t_1 和 t_2 扩展后进行二次量化；③将量化误差 t_1 和 t_2 转换成其他物理量进行量化。根据试验测试数据和对 FSK 信号特征分析可知：①减小量化时钟周期及微小间隔 t_1 和 t_2 的测量是提高间隔计数器精度的关键。采用 30 MHz 的时钟进行量化，当频率再大时，信号的存储空间和传输速率将会受较大

影响。②低频调制信号 f_m 给定时，载波信号中心频率 f_0 越高，测频误差越大。通过对低频调制信号 f_m 高电平和低电平期间内计数值统计，然后利用加权平均值法求取上、下边频，可以使上边频 f_u 、下边频 f_d 和调制频率 f_m 的原理性测量误差减小到 $2|t_1 - t_2|$ 。由于上、下边频误差的期望值为 $E(E_u) = E(E_d) = 1$ ，通过对每个周期内的上、下边频计数值加 1 进行误差补偿。

3.4 其他测量误差

采用计数法测量信号周期，还应考虑计数器误差、标准频率误差和计算误差等对系统的影响。在 FPGA 中，计数器的建立时间 t_s 和 t_h 保持时间由 FPGA 的 IO 标准模式决定，通过软件将 FPGA 的 IO 端口设置成适当模式可以减小计数误差；标准频率是时钟经过分频或倍频后的频率，因而标准频率误差取决于晶振的准确度。本文在设计时，通过 FPGA 内部锁相环输出量化时钟，这样可减小标准频率误差 [8]；在数据运算过程中，由于数据类型选择不当或计算过程中省略部分小数产生的误差，因而在数据处理时选择适当的数据类型和数据长度，解决存储与效率之间矛盾，减小计算过程中产生的误差。

4 试验测试结果

由于在试验过程中，涉及到 36 种调制频率和 8 种中心频率（国产 18 信息和法国 UM71），表 1 给出了国产 18 信息和法国 UM71 移频信号在调制信号和载波信号均取极大值和极小值的情况下的一组测量值和测量误差。

根据测量数据可以看出，在调制频率和载波频率取极值情况下，测量误差均能够满足要求，因而在整个调制频率和载波频率取值范围内时，误差都能够满足系统要求。

表 1 试验测量数据

频率 / Hz		量化时钟计数值			误差 / ‰		
f_0	f_m	C_u	C_d	C_m	E_u	E_d	E_m
550	7.0	49 586.8	60 605.9	4 286 051.2	0.091 9	0.232 8	7.861 8
550	26.0	49 629.2	60 556.4	1 160 929.9	0.854 8	0.819 7	6.139 2
850	7.0	33 159.8	37 736.1	4 291 500.2	0.319 8	0.006 3	1.350 0
850	26.0	33 149.5	37 696.6	1 160 921.3	0.010 9	1.040 3	6.131 8
1 700	10.3	17 535.2	17 762.6	2 930 032.2	0.089 7	0.035 6	5.977 7
1 700	29.0	17 535.6	17 761.9	1 038 079.4	0.115 2	0.007 9	3.476 7
2 600	10.3	11 490.7	11 588.2	2 934 462.8	0.071 7	0.065 5	7.498 9
2 600	29.0	11 490.7	11 584.8	992 991.9	0.008 1	0.023 3	4.010 8

5 结语

本文从 FSK 信号测试系统设计角度出发，给出了基于 FPGA 的信号检测的实现方案，对 FSK 信号测量过程中遇到的误差进行分析，对调制频率切换点处产生的畸变数据进行补偿。试验结果表明，该系统的测量精度和速度基本能满足现场检测要求。

参考文献：

[1] Millar A H L A. Developments in track circuit condition monitoring [A] //Computing, Communication, Control, and Management, 2008. CCCM '08. ISECS International Colloquium on. 2008 : 1-6.
[2] 谢丹锋，魏学业. 地铁移频信号检测系统的设计 [J]. 计算

(下转第 82 页)

分析中发现小齿轮轴疲劳源区位置存在裂纹,裂纹深度在0.1~1.5 mm之间;与此对应的电机转轴也发现了裂纹,裂纹深度在0.05~0.1 mm之间。从已发生的小齿轮轴和电机转轴断裂的检测分析看,小齿轮轴(电机转轴)发生裂纹时应该在机车运行早期;裂纹扩展比较慢,大约机车运行40万km左右小齿轮轴(电机转轴)才最终断裂。

由此推断,小齿轮轴和电机转轴在油槽附近断裂的原因如下:

①由于小齿轮轴的表面环形油槽和径向油孔交界处加工粗糙,至使该部位在小齿轮轴与电机转轴为过盈配合时存在较大的应力集中,形成早期裂纹源。

②由于小齿轮轴的表面环形油槽和径向油孔交界处形成了早期裂纹,导致电机转轴的相对对应位置的局部应力发生改变,形成电机转轴的早期裂纹源。

③小齿轮轴的表面环形油槽和径向油孔交界处加工粗糙,应为加工油孔的钻头已磨钝,没有及时修复或更换所至。

④由于大秦线运用条件恶劣,特别是2万吨列车的开行,中部机车运行条件的不确定性和过大冲击载荷,加速了该部位裂纹的产生与扩展。

3 措施

根据以上的分析和故障统计,可以认为小齿轮环形油槽和径向油孔有加工缺陷问题(集中在装有某公司生产的齿轮的大号机车)。机车运行40万km左右故障出现,最初裂纹发生在运用的早期阶段。参照裂纹形成的原理及机务段现场对车轮车轴其他部件裂纹的处理方法^[3-5]制订如下的措施:

①加速更换某公司生产的小齿轮,并对入库机

车进行检查。

②打开齿轮箱上方的观察孔,从观察孔上目视小齿轮轴是否窜出。正常的情况下,小齿轮的外端面距从动齿轮的相应端面大约2 mm。

③新制小齿轮:严格控制小齿轮注油孔及油槽的机加工质量,对油槽、油孔部位进行打磨,避免棱角。

④对HXD1牵引电机齿轮、电机轴加工及组装工艺和质量控制进行彻底全面的检查整改。

⑤对小齿轮、电机轴内锥孔进行渗透探伤,及时发现早期裂纹。

⑥小齿轮安装时,严格控制小齿轮装入量。

4 结语

本文对HXD1型交流传动电力机车的牵引电机转轴与小齿轮轴断裂的故障现象进行了研究分析,分析出断裂原因,提出了自己的观点和预防措施,相信在以后的安全运输生产中会起到积极作用。由于重载技术是一个新课题,各种环境比较复杂,需要在今后的实践中不断摸索和逐步完善。

参考文献:

- [1] 张曙光. HXD1型电力机车[M]. 北京:中国铁道出版社, 2009.
- [2] 张曙光. HXD2型电力机车[M]. 北京:中国铁道出版社, 2009.
- [3] 林吉忠. 金属的缺陷、载荷与疲劳[M]. 北京:中国铁道出版社, 1993.
- [4] 刘 宪. 机车整体辗钢车轮裂损及探伤方法[J]. 机车电传动, 2009(1): 66-69.
- [5] 刘 宪. SS4改进型机车整体车轮车轴疲劳裂纹超声波探伤分析[J]. 机车电传动, 2008(4): 64-66.

(上接第61页)

机测量与控制, 2002(12): 782-783, 791.

[3] 王 鹏, 徐 峰, 王宏宇. 利用FPGA实现移频键控信号的调制[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2002, 42(S1): 68-71.

[4] Ding Y J X Z. A High-accuracy Parameter Estimation Algorithm for Jointless[A]//Computing, Communication, Control, and Management, 2008. CCCM '08. ISECS International Colloquium on. 2008: 750-753.

[5] 孙 杰, 潘继飞. 高精度时间间隔测量方法综述[J]. 计算机测量与控制. 2007, 15(2): 145-148.

[6] 张 延, 黄佩诚. 高精度时间间隔测量技术与方法[J]. 天文学进展. 2006, 24(1): 1-15.

[7] 王宏宇, 徐 峰, 王 鹏. 基于FPGA和单片机技术的FSK信号监测[J]. 仪表技术与传感器, 2001(10): 12-15.

[8] 陈 俊, 周正中. 高速、高精度频率采样中的量化误差分析[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(1): 60-62.

《机车电传动》

欢迎 垂询 订阅 赐稿 刊登广告

跟踪世界科技动态 致力中国轨道交通

- ◆ 轨道牵引动力的主导刊物
- ◆ 荟萃电力与内燃牵引技术成果
- ◆ 涵盖干线铁路与城市轨道交通两大领域

联系地址: 湖南省株洲市时代路株洲电力机车研究所《机车电传动》编辑部 邮政编码: 412001 联系电话: 0731-28498221 28498141 传真: 0731-28498141 E-mail: edl@teg.cn