

试
验
检
测基于 Kalman 滤波和变时间窗测频的
转速测量 FPGA 实现

管 壮, 颜 光

(株洲南车时代电气股份有限公司 安全装备事业部, 株洲 湖南 412007)



作者简介: 管 壮 (1984-), 男, 工程师, 现从事轨道交通运行控制设备研究。

摘 要: 利用信号与噪声状态模型的 Kalman 滤波, 对频率进行无偏估计, 适合对机车运行速度的精确测量。利用变时间窗采集脉冲信号的方法克服了常规算法中刷新时间和测量精度不稳定的缺点, 同时也保证了对不同频率的测量精度。通过基于 FPGA 平台的算法设计与仿真, 表明了上述方法对机车转速测量的实时有效性和准确性。

关键词: Kalman 滤波; 变时间窗; 测频; FPGA; 转速测量; 速度信号处理

中图分类号: TP274; U260.5+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)06-0041-04

Rotate Speed Measurement Based on Kalman Filter and Time-varying Window Frequency Measurement Using FPGA

ZAN Zhuang, YAN Guang

(Safety Equipment Business Unit, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: With signal and noise state model of Kalman filter, the frequency was unbiasedly estimated, which was suitable for accurate measurement of locomotive speed. Time-varying window was used to capture pulse signals to overcome shortcomings of conventional algorithm such as instable refresh time and measurement accuracy, as well as to ensure the accurate measurement of different frequencies. FPGA-based algorithm design and simulation has demonstrated that with Kalman filter and time-varying window, it was effective and accurate to measure locomotive rotate speed.

Key words: Kalman filtering; time-varying window; frequency measurement; FPGA; rotate speed measurement; speed signal process

0 引言

随着铁路运营速度逐步提高, 对列车运行安全性要求也越高, 进而需要精度更高的速度采集和处理的方法来满足列车运行安全性要求。因此在速度信号的采集上采用了变时间窗测频方法, 在处理上采用了 Kalman 滤波器对速度进行估计、对噪声进行抑制的方法, 保证了速度信号获取的可靠性, 满足高速列车运行安全性要求。

1 转速信号测量和处理的 FPGA 实现

速度信号采集和处理的 FPGA 实现内部框图如图 1 所示: 速度传感器输出的是脉冲信号, 送变时间窗测

频模块处理, 测频模块分别输出变时间窗的基准时钟脉冲数和待测信号的脉冲数, 这 2 个脉冲数经过求平均频率模块后得到转速平均脉冲数, 但含有随机噪声, 需通过 Kalman 滤波器滤除噪声, 得到较准确的待测信号的脉冲数, 即速度信号。本文将分别介绍 Kalman 滤波器和变时间窗测频模块原理和 FPGA 实现。



图 1 速度信号采集和处理的 FPGA 实现内部框图

转速信号的轮滑、空装以及方向判断需要多路脉冲信号比较判断才能得出准确结果, 而本文只对转速

收稿日期: 2011-03-22

信号脉冲采集和单路脉冲信号做处理,但可以为转速信号的轮滑、空装、异常和方向判断提供可靠的数据来源。

2 Kalman 滤波器及其 FPGA 实现

2.1 Kalman 滤波器的优势

经典控制理论只适用于单输入—单输出的线性定常系统,研究方法是基于传递函数的频率法,而频率法要靠各个频率分量来描述信号,因此频率法限制了系统对整个过程在时间域内进行控制的能力,也就是说经典控制理论很难实现实时控制。同时加在系统上的噪声是随机变量,需要一定的策略进行估计,而经典控制理论很难实现最优控制,即很难做到估计值接近真实值,更无法做到无偏估计。

随着科学技术的发展,要求控制高速度、高精度的受控对象,同时要求控制系统能解决多输入多输出、非线性以及最优控制等设计问题,控制系统将更加复杂。因此采用离散线性系统来描述控制系统将使问题变得简单。离散线性系统用如下的线性随机微分方程来描述:

状态方程 $X(k) = A X(k-1) + B U(k) + W(k)$

输出方程 $Z(k) = H X(k) + V(k)$

式中: A 、 B 和 H 均为矩阵; k 是时间系数; $X(k)$ 是 k 时刻的系统状态; $U(k)$ 是 k 时刻对系统的控制量; $Z(k)$ 是 k 时刻的测量值; $W(k)$ 和 $V(k)$ 分别表示过程和测量的噪声,被假设成均值为零的高斯噪声,它们的协方差分别是 Q 、 R , 并且不随系统状态变化而变化。

Kalman 滤波器是基于离散线性系统建立的时域滤波分析方法,采用状态空间来描述系统,以线性最小方差为估计准则,并采用递推估计的算法。Kalman 滤波器的基本思想是:采用信号与噪声的状态空间模型,利用前一时刻的估计值和现时刻的观测值来更新对状态变量的估计,求出现在时刻的估计值。

Kalman 滤波器的最优估计优点:

- ① 无偏性,即估计值的均值等于状态的真值;
- ② 估计的方差最小;
- ③ 数据量小,存储量低,实时性好。

2.2 Kalman 滤波器算法介绍^[1-2]

算法描述如下:假设当前系统时间系数为 k ,根据系统模型,基于系统上一状态而预测出当前状态为

$$X(k|k-1) = A X(k-1|k-1) + B U(k) \quad (1)$$

式中: $X(k|k-1)$ 为利用上一状态预测的结果; $X(k-1|k-1)$ 为上一状态最优的结果; $U(k)$ 为当前状态的控制量,如没有控制量,可去掉。

到现在为止,系统结果已经更新,但对应于 $X(k|k-1)$ 的协方差还没更新。用 P 表示协方差,有

$$P(k|k-1) = A P(k-1|k-1) A^T + Q \quad (2)$$

式中: $P(k|k-1)$ 为 $X(k|k-1)$ 对应的协方差; $P(k-1|k-1)$ 为

$X(k-1|k-1)$ 对应的协方差; A^T 表示 A 的转置矩阵; Q 为系统过程的协方差。

现在有了当前状态的预测结果,再收集当前状态的测量值,结合预测值和测量值,即可得到当前时刻 k 的最优化估算值 $X(k|k)$:

$$X(k|k) = X(k|k-1) + K g(k) (Z(k) - H X(k|k-1)) \quad (3)$$

式中: $K g(k)$ 为卡尔曼增益(Kalman Gain):

$$K g(k) = P(k|k-1) H^T (H P(k|k-1) H^T + R)^{-1} \quad (4)$$

为了使卡尔曼滤波器不断地运行下去直到系统过程结束,还要更新时刻 k 状态下 $X(k|k)$ 的协方差:

$$P(k|k) = (I - K g(k) H) P(k|k-1) \quad (5)$$

式中: I 为 1 的矩阵,对于单模型单测量, $I=1$ 。

当系统进入 $k+1$ 状态时, $P(k|k)$ 就是式(2)中的 $P(k-1|k-1)$, 这样,算法就可以自回归地运算下去。

2.3 速度信号系统建模及基于 Kalman 滤波器的速度信号处理

1) 速度信号系统数学模型^[3]

$$\dot{x}_k = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

式中: x 为距离; $\dot{x}$ 为速度。

同时认为在 $k-1$ 时刻到 k 时刻,对象是以恒定加速度 a_k 运行的(加速度是零均值,方差为 σ_a 的正态分布)。 Δt 为采样时间,系统方程有

$$x_k = F x_{k-1} + G a_k, \text{ 其中 } F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} \\ \Delta t \end{bmatrix}.$$

上式缩写为: $x_k = F x_{k-1} + w_k$, 其中 $w_k \sim N(0, Q)$,

$$Q = G G^T \sigma_a^2 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^4}{4} & \frac{\Delta t^3}{2} \\ \frac{\Delta t^3}{2} & \Delta t^2 \end{bmatrix} \sigma_a^2;$$

观测方程为 $Z_k = H x_k + V_k$

式中: $H = [0 \ 1]$; Z_k 为测量值; V_k 为测量噪声,而且满足 $R = E[V_k V_k^T] = \sigma_v^2$ 。

2) 基于 Kalman 滤波器的速度信号处理

用于速度处理的 Kalman 滤波器零时刻的初始值 $X(0|0) = [0 \ 0]^T$; 初始的误差协方差矩阵 $P(0|0)$ 为 $[8 \ 0; 0 \ 8]$ 。随着卡尔曼滤波器的工作, X 会逐渐地收敛,但对于 P , 一般不要取 0, 因为这样可能会令 Kalman 滤波器完全相信给定的 $X(0|0)$ 是系统最优的,从而使算法不能收敛。在使用 Kalman 滤波器的过程噪声和观测噪声得到目标的最优位置状态估计时,过程噪声和观测噪声对其估计结果有着直接的影响,观测噪声协方差越大,目标跟踪精度就越差,但 Kalman 滤波器的启动收敛时间越短,需根据需求和仿真结果对过程噪声和观测噪声的协方差进行修改。

通过 Matlab 仿真可以看到速度的预测是无偏估计,且能够很好地跟踪速度信号,图 2 是速度估测图。

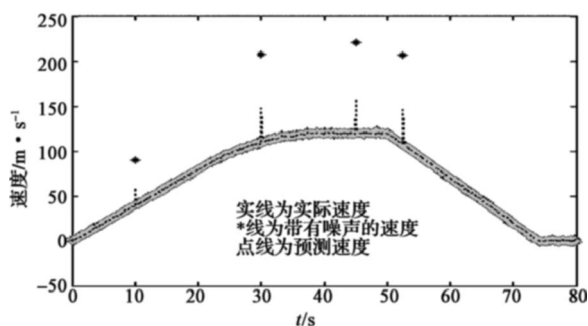


图2 速度估测图

2.4 Kalman 滤波器的 FPGA 实现

Kalman 滤波器有良好的滤波效果, 但由于计算量大, 当采样率高时, 一个采样周期内难以完成计算, 且计算机的字长有限, 使计算中舍入误差和截断误差积累、传递而造成数值不稳定, 因此用 MCU 和 DSP 难以实现。FPGA 可实现并行计算, 可有多个乘法器和加法器并行处理数据, 大大提高滤波速度。

但是利用 Matlab 软件建立 Kalman 滤波器模型为浮点系统, 不适合用 FPGA 器件实现, 需要将浮点模型转换成定点模型。然后将定点模型转换为 VHDL 代码, 再用 Modelsim 和 ise 软件对生成的 VHDL 代码进行仿真、验证及硬件实现。

1) 浮点转定点过程

通过现场应用分析和仿真结果查看, 设置模型相关参数的量化参数, 包含截取模式、溢出模式、字长和小数位。截取模式设为 floor, 溢出模式设为 saturate, 字长设为 12, 小数位长设为 4, 按照这些规则将浮点系统转换成定点系统。

定点 Kalman 滤波器封装成了 kalman_speed 模块, 测试电路如图 3 所示。

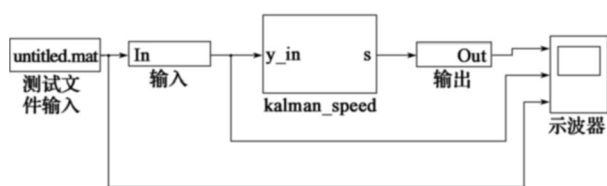


图3 测试电路

定点滤波器仿真波形如图 4 所示, 其中系统输入也应当按照量化参数要求转成定点数再输入系统。* 线表示加了噪声的速度曲线, 实线表示实际速度曲线, 点线表示定点 Kalman 滤波器输出的速度曲线。

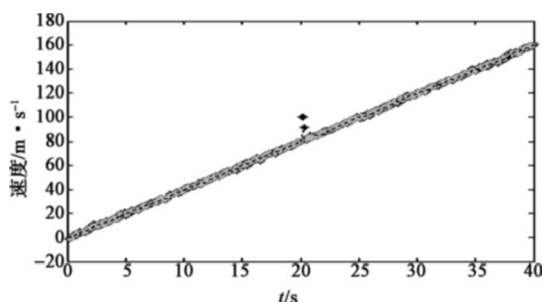


图4 定点仿真图形

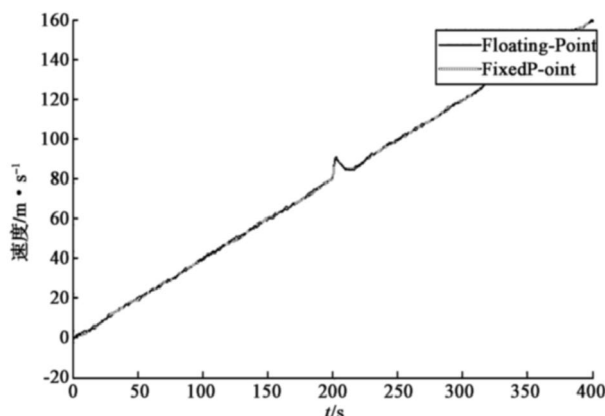


图5 浮点与定点比较

图 4、图 5 为浮点 Kalman 滤波器和定点 Kalman 滤波器输出结果的比较图, 可以看出 Kalman 滤波器转为定点滤波器效果与浮点滤波器的效果非常接近, 满足设计要求。

2) Kalman 滤波器 VHDL 代码验证

通过 Accal 软件自动产生 VHDL 语言后, 设置时钟为 50 MHz, 在 Modelsim 环境中应编写测试脚本 TestBench 对该 VHDL 代码进行仿真测试。设置输入输出为模拟形式, 仿真波形如图 6 所示, 输出为 S, 输入为 y_in, 输出相对于输入有 40 个时钟延迟, 但延迟可以通过优化和时序控制进一步降低。

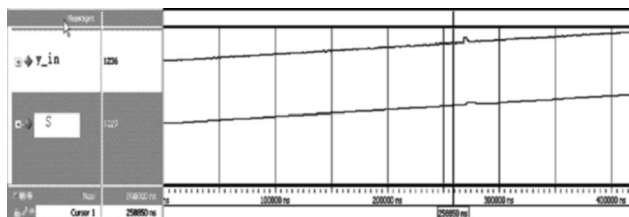


图6 仿真波形

时序仿真如图 7, 其中信号 y_in 为输入, 信号 S 为输出, 信号 clock 为时钟输入, 信号 reset 为复位信号, 信号 ac_inputvalid 为输入信号有效, 信号 ac_outputvalid 为输出信号有效。

3 变时间窗测频及 FPGA 实现

3.1 变时间窗测频方法

传统的测频方法采用了固定基准时间窗 T , 即测量这段时间内待测信号的脉冲数, 最后用脉冲数除以基准时间窗 T 得出信号的频率。缺点是当待测信号频率低时, 误差较大。

而另外一个方法就是测量 N 个周期的待测信号的时间间隔, 再用此时间间隔除以 N 得到周期, 再求出频率。该方法缺点是当待测信号为高频时, 误差较大。

变时间窗测频方法如图 8 所示, 以待测信号的上升沿作为基准时间 T 计数的触发, 同时计数待测信号脉冲数, 当基准时间 T 计数满时, 再接着计数到待测信号的上升沿到来, 此时得到的基准时钟信号脉冲数作为采集时间 t , 测到待测信号的脉冲数为 N , 因此待测信号的频率 $f=1/(t/n)$ [4]。

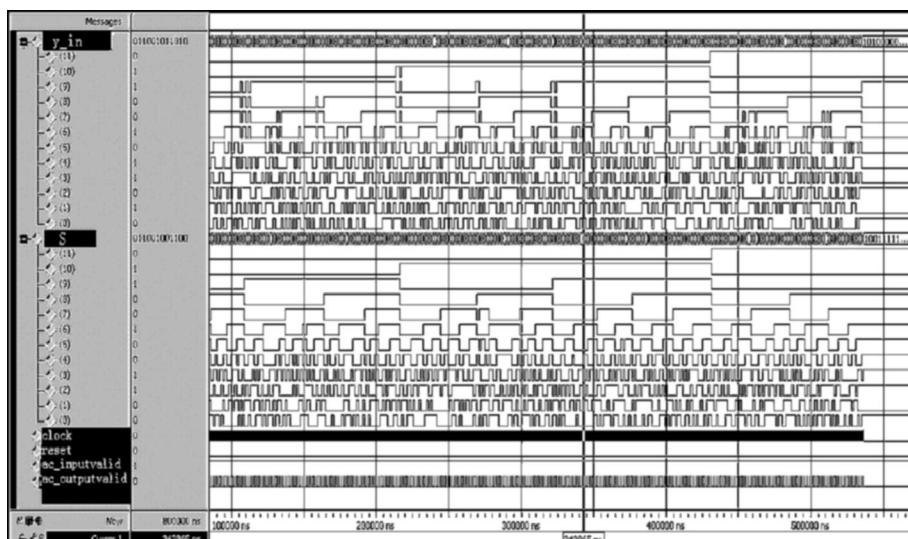


图 7 时序仿真

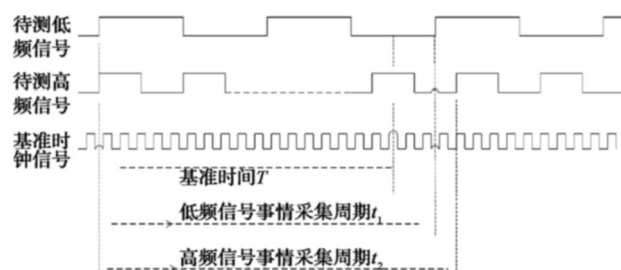


图 8 变时间窗测频示意图

因此,只要时间窗选取的测量精度合适,同时待测信号的捕获较准确,变时间窗测频法就能既保证低频下脉冲测量精度,又能稳定高频下脉冲测量精度。

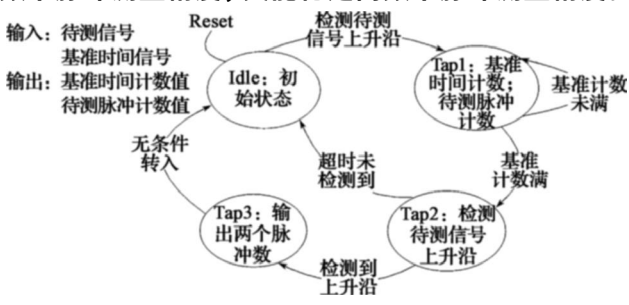


图 9 状态转换图

3.2 变时间窗测频的FPGA实现

变时间窗测频模块被抽象成控制信号序列,即它的运行具有实际的时序逻辑关系,利用状态机实现各个状态之间的转换,状态转换图如图9所示。

而VHDL的结构非常适合编写状态机,采用if_then_else语句设计优先度的编码逻辑,同时该状态机有4个状态,即Idle、Tap1、Tap2和Tap3。当Reset信号为‘1’时,状态机复位到Idle状态,当Reset信号为‘0’时,状态机正常工作。状态机的状态转换关系见图9,具体FPGA实现略。

4 结语

本文详细论述了利用Kalman滤波和变时间窗测频方法进行机车转速测量研究,在Matlab仿真验证和算法优化的基础上,实现了基于FPGA平台的转速信号测量和处理。FPGA仿真结果表明上述方法能快速、准确地获取机车的运行速度,有效地抑制各种干扰,是确保速度计算安全的可靠手段之一。

参考文献:

- [1] Rudolf E Kalman. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems [J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1960, 82:34-45.
- [2] 邓自立. 卡尔曼滤波与维纳滤波—现代时间序列分析方法 [M]. 长春: 东北师范大学出版社, 2001.
- [3] Mobinder S Grewal, Angus P Andrews. Kalman Filtering Theory and Practice Using MATLAB [M]. Canada: John Wiley & Sons inc., 2008.
- [4] 呼秀山, 钱利民, 李迎春. 一种基于PLC开关量输入单元的转速信号测量方法 [J]. 微计算机信息, 2006 (13).

(上接第40页)

即增加了最小割集的阶数,达到降低顶事件发生概率、降低风险的目的。

2 结语

①本文介绍了利用Isograph建立故障树及进行故障树分析的方法,尤其对软件中进行故障率计算和重要度计算的方法进行了解释说明。利用Isograph软件进行故障树分析能大大提高故障树分析的效率,同时也提高了故障树分析的准确性。

②故障树分析简明、图形直观,容易理解其结构,是对列车各系统进行可靠性、安全性、部件重要度分

析的有效数学工具。采用故障树分析进行危害事件风险分析,能够将分析的危害事件风险水平量化,从而提供更科学、更精确的评估结果。

参考文献:

- [1] GJB Z768A—1998, 故障树分析指南 [S].
- [2] FaultTree+11.2故障树中文使用手册 [M]. 北京: 北京世纪坐标科技有限公司, 2009.
- [3] CENELEC. EN50126—1999, 铁路应用—可靠性、可用性、可维护性和安全性技术条件和验证(RAMS) [S].
- [4] 孙红梅, 高齐圣, 朴营国. 关于故障树分析中几种典型重要度的研究 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2007, 25(2): 39-42.