

卡尔曼滤波技术在距离保护上的应用

于九祥 山东工业大学 济南 (250014)

【摘要】 本文介绍了利用卡尔曼滤波算法,实施微机距离保护的方法。该设计方案共分五个主要部分:故障检测、故障后电流和电压的估计(滤波)、故障分类、区域计算和故障定位。并着重介绍了在向量信号处理器 TMS320 上完成卡尔曼滤波算法的方法。实验结果表明,该方案的计算精度、收敛速度和计算的工作量俱称满意。

【关键词】 卡尔曼滤波 微机距离保护 向量信号处理器

引言

卡尔曼滤波实质上是一种数据处理方法。它是在数学结构上比较简单的最优线性递推滤波方法,由递推方程随时给出新的状态估计。对计算机来说,卡尔曼滤波的计算量和存储量较其他滤波算法大为减少,从而能较容易地满足实时计算的要求。所以卡尔曼滤波技术在工程实践中,特别是在航空空间技术中迅速得到应用,现在已经扩展到国民经济的许多领域,除通讯、控制这两大领域外,还成功的应用到生物工程、社会经济系统、学习系统和各类识别问题上。

80年代初卡尔曼滤波技术应用到继电保护领域中。传统的继电保护原理是建立在工频电气量的基础上,卡尔曼滤波是从短路的暂态信号中估计出基频相量的一种算法。它是从含有噪声的测量中,通过不断的“预测——修正”运算最优地估计出 50Hz 分量。卡尔曼滤波用在多状态变量的估计上,需要矩阵运算,一般的微型机很难满足速度上的要求,致使卡尔曼滤波在微机距离保护上的应用在较长一段时间里处在理论研究阶段。近年来,由于 VLSI (Very Large - scale Integrated) 技术的飞速发展,出现了高性能向量信号处理器即 TMS320 系列单片计算机。该机器的问世使得一些复杂的保护方案得以有效地实施。

TMS320 系列单片计算机是美 Texas 公司出产的新片子,它的应用日渐广泛,已成为举世瞩目的新型信号处理芯片。该片内部有一个 16×16 Bit 的并行乘法器,于 200ns 内完成 16×16 Bit 的乘法,可以方便的进行矩阵运算,很适合用在卡尔曼滤波算法上。

本文就是介绍利用 TMS320 系列单片计算机执行卡尔曼滤波方法以及完成微机距离保护的实施方案,在仿真实验中得到了满意的结果。

1 卡尔曼滤波器的方程组和流程图

设 n 维动态线性系统和 m 维观测系统分别由以下方程描述:

$$X(k+1) = (k) X(k) + W(k) \quad (1)$$

$$Z(k) = H(k) X(k) + V(k) \quad (2)$$

式中:

$X(k)$ = ($n \times 1$) 维状态向量; (k) = ($n \times n$) 状态转移矩阵

$W(k)$ = n 维不相关的白噪声序列,或称输入噪声; $Z(k)$ = ($m \times 1$) 观测向量

$H(k)$ = ($m \times n$) 观测与 $X(k)$ 之间的无噪声联系矩阵

$V(k)$ = m 维不相关的观测白噪声序列,或称观测噪声

通过 m 维线性观测系统(2)对系统状态变量进行第 k 次观测,得到的估计向量记为 $X(k)$ 。该估计值用来预测第 $(k+1)$ 次状态变量,将预测值记为 $\hat{X}(k+1)$ 。用第 $(k+1)$ 次的观测

和预测形成新的估计向量 $\hat{X}(k+1)$, 从这个估计值又可以建立一个新的预测。依此类推, 卡尔曼滤波的整个过程如下:

$$0, K=0 \quad (3)$$

$$1 \text{ 预测起始估计 } \hat{X}^{\sim}(0) \text{ 和 } P^{\sim}(0) \quad (4)$$

2 计算卡尔曼滤波增益:

$$K(k) = P^{\sim}(k) H(k)^T [H(k) P^{\sim}(k) H(k)^T + R(k)]^{-1} \quad (5)$$

3 确定状态估计:

$$\hat{X}(k) = \hat{X}^{\sim}(k) + K(k) [Z(k) - H(k) \hat{X}^{\sim}(k)] \quad (6)$$

4 计算误差协方差矩阵:

$$P(k) = [I - K(k) H(k)] P^{\sim}(k) \quad (7)$$

5 预测第 $(k+1)$ 次状态变量:

$$\hat{X}^{\sim}(k+1) = \Phi(k) \hat{X}(k) \quad (8)$$

$$P^{\sim}(k) = \Phi(k) P(k) \Phi(k)^T + Q(k) \quad (9)$$

$$6 \quad k = k + 1$$

7 返回到第 2 步

式中:

$\hat{X}(k)$ 是第 k 步的估计向量;

$Q(k)$ 是 $W(k)$ 的协方差矩阵

$P^{\sim}(k)$ 是 $\hat{X}^{\sim}(k)$ 的误差协方差矩阵;

$P(k)$ 是 $\hat{X}(k)$ 的误差协方差矩阵

$R(k)$ 是 $V(k)$ 的协方差矩阵; I 是单位矩阵

卡尔曼滤波的流程图如图 1 所示。

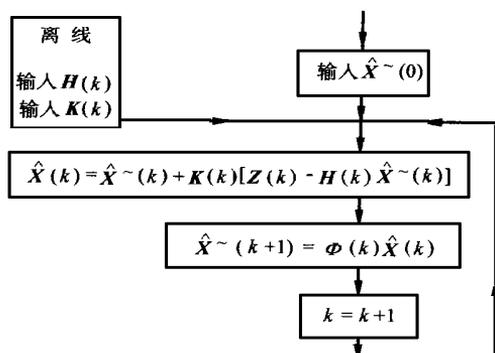


图 1 卡尔曼滤波流程图

为了从被噪声污染的信号中提出基频分量, 必须建立相应的状态空间模型。本文采用带有未知幅值和相角的相量表示基频分量, 并假定相量是静止的, 参数坐标轴以 50Hz 频率旋转。这样, 50Hz 分量的瞬时值为:

$$S(t) = A \cos(\omega t + \theta) = A \cos \theta \cos \omega t - A \sin \theta \sin \omega t = X_1 \cos \omega t - X_2 \sin \omega t \quad (10)$$

在上述假定条件下, X_1 和 X_2 是恒定的, $I(k)$ 是单位矩阵, 即电压模型为

$$X(k+1) = I(k) X(k), \quad I(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

任何瞬间的测量值包括信号 $S(t)$ 加上噪声 $V(k)$, 噪声包括非 50Hz 分量、测量误差和 A/D 变换器产生的误差。这时, 离散的测量值 $Z(k)$ 为:

$$Z(k) = [\cos(kT), -\sin(kT)] \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \end{bmatrix} + V(k) \quad (11)$$

式中: T 是采样周期。

由于电流信号存在较大的衰减直流分量, 为提高估计的精确度, 再增设一个状态变量 $X_3(k)e^{-T}$ 处理直流分量, 这样, 表示故障相电流信号的三状态卡尔曼滤波器为:

$$\text{状态方程: } \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_k$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W(k) \end{bmatrix}$$

观测方程 $Z(k) = [\cos(kT), -\sin(kT), 1]$

$$\begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \\ X_3(k) \end{bmatrix}_k + V(k)$$

2 卡尔曼滤波器对计算机速度和容量的要求

在卡尔曼滤波过程中, 方程式 (5), (7), (9) 可以离线算出, 将结果放在计算机内存中。需要实时计算的量由方程式 (6) 和 (8) 确定。为了选择合适的机型, 对实时计算所需要的时间以及对计算机内存的要求作如下研究。

卡尔曼滤波过程中, 每次递推所需要的乘法和加法次数如表 1 所示。

对计算机存储量的要求如表 2 所示。

表 1

运 算	乘法次数	加法次数
HX	nm	$nm - m$
Z - HX	0	m
K[Z - HX]	nm	$nm - n$
X + K[Z - HX]	0	n
总 计	$2nm$	$2nm$

为方便起见,将方程中的“(K)”标记省略。

卡尔曼滤波用在距离保护上,需要采集 7 个模拟量,其中 3 个电压量,4 个电流量。电压取两状态变量,电流取三状态变量,则每递推运算一次,共需乘法 36 次,加法 36 次。

对于 7 个模拟量可以建立 18 个状态变量,即 $n = 18, m = 7$,需要的存储容量为 1298 (单元)。

就计算速度的要求,采用一般的单片机难以完成,故采用 TMS320 系列向量信号处理器。

表 2

矩阵或向量	维 数	存储量
X	n	n
	$n \times n$	n^2
P	$n \times n$	n^2
Q	$n \times n$	n^2
K	$n \times m$	nm
H	$m \times n$	mn
R	$m \times m$	m^2
Z	m	m
总的存储单元	$3n^2 + (2m + 1)n + m^2 + m$	

3 卡尔曼微机距离保护的实施方案

本方案应用 8098 为主机。TMS32020 为从机,构成主从协处理方式。主机主要进行故障检测,判断故障类型、范围、故障定位等。从机主要完成对故障电压和电流信号滤波,将其滤波结果送给主机处理。图 2 示出了主从协处理方式的工作过程。

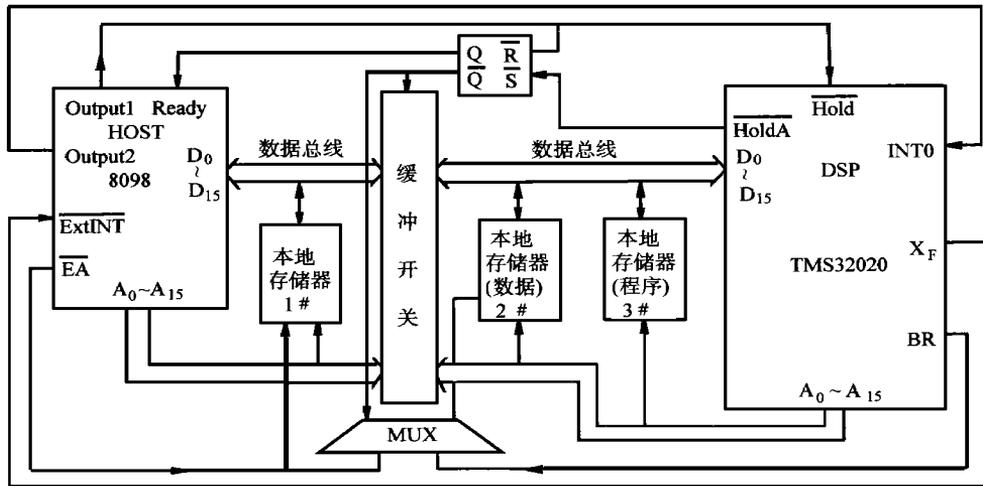


图 2 HOST 与 DSP 的接口

主从协处理方式比较灵活,在主处理器 (HOST)与信号处理(DSP)各自分开时,图中连接两类总线(数据总线、地址总线)的缓冲开关处于断开状态,这时,主处理器系统与 TMS32020 各运行自己的程序,互不干扰。在主处理器系统要求与 TMS32020 通信时,HOST 输出 1 发出有效电位,输入到 HOLD 端, HOLDA 发响应信号,经 RS 触发器接通缓冲开关,

主机接管 DSP 总线,将初始数据送入本地存储器 2#。HOST 的输出 2 发有效电位,输入 DSP 的 INT0, DSP 进行卡尔曼滤波,采用中断服务方式。HOST 释放 DSP 总线,等待 DSP 滤波, DSP 滤波后将数据放入 2# 本地存储器, DSP 发出信号 Xf。HOST 接到外部中断申请响应,取出 2# 存储器存储的数据,通信完毕。

使用卡尔曼滤波实现的距离保护,分以下

几个阶段:故障检测、卡尔曼滤波、判别故障类型、故障区计算和故障定位。整个过程如图3所示。其中每段的运算方法,在《继电器》1990年第四期中有详细介绍,这里不再赘述。

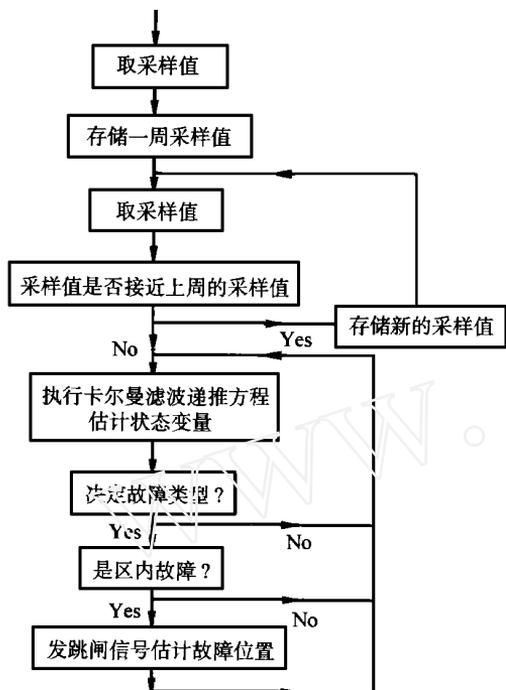


图3 使用卡尔曼滤波算法的保护流程图

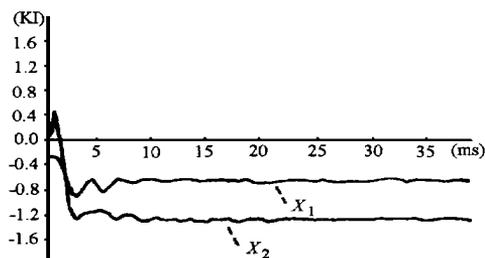


图4 电流卡尔曼滤波状态估计值 X_2 一虚部

4 实验结果

仿真实验是以山东邹县——潍坊 500kV, 376.4km 的输电线路为例,进行了故障暂态仿真运算。采用逼真度极高的 EMTTP 程序,获得故障时的电流和电压数据。

为了取得基频电流和电压量,利用 TMS32020 对故障暂态信号进行了卡尔曼滤

波,卡尔曼滤波递推一次需要 190 机器周期。TMS32020 使用 20MHz 的外部时钟,机器周期为 50ns,故卡尔曼滤波递推一次可以在 9.5μs 内完成。图4~图5示出了电流滤波结果。全线 50%处 A 相发生接地故障时,故障测距结果如图6所示。

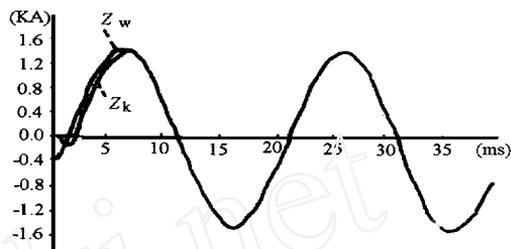


图5 电流卡尔曼滤波后波形 Z_k ,故障后稳态波形 Z_w

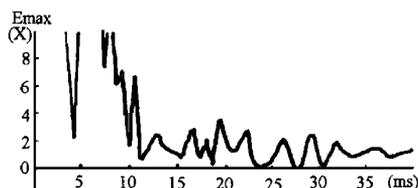
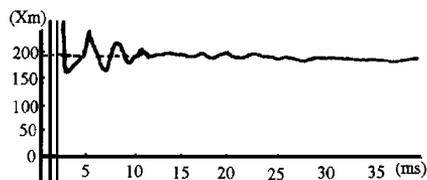
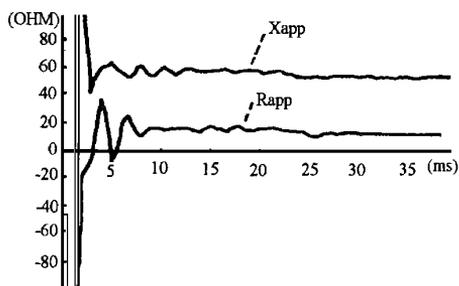


图6 全线 50%处 A 相故障测距结果(188.4km)

5 结论

本文主要介绍使用向量信号处理器完成卡尔曼滤波算法的微机距离保护。在向量信号处

理器上执行卡尔曼滤波算法,三相电压、三相电流和中线电流的状态估计仅用 0.095ms,考虑采样速率为 20 个采样点/周,采样周期为 1ms。因此 90%的采样间隔为主处理器提供识别的故障类型和故障区域计算所需要的时间。向量信号处理器的应用对一些复杂的算法十分有效。

参考文献

- 1 A . 1987(9).
- 2 Application of Kalman filtering in computer relaying. IEEE 1981 ,PAS - 100(7).
- 3 Kalman filtering applied to power system measurements for relaying. IEEE 1985 pas - 104(12).
- 4 Application of adaptive Kalman filtering in fault classification distance protection and fault location using microprocessor. IEEE 1988 pas - 107(1)
- 5 王照林等编. 现代控制理论基础. 国防工业出版社,1981.2
- 6 钟瑚绵编. 最佳控制的数学方法及其应用. 江苏科学技术出版社,1982.6
- 7 Implementation of Kalman and Adaptive Kalman Filtering Algorithms for Digital Distance Protection on A Vector Singal Processor. IEEE Transactions on Power Delivery ,1989 ,4(1)

于九祥,男,1939年生,副教授,主要研究方向为电力系统继电保护。

THE APPLICATION OF KALMAN FILTERING TECHNIQUE IN DISTANCE PROTECTION

Yu Jiuxiang (Shandong University of Technology Jinan ,250014)

Abstract This paper presents a set of micro - computer distance protection scheme using Kalman Filtering algorithms. The scheme can be divided into five major components :fault detection ,postfault current and voltage estimation (filtering) , fault classification ,zone computation ,and fault location. This research focuses on the implementation of filtering algorithms on the Vector Signal Processor (VSP) TMS320. The test results show that the precision ,convergency speed and the quantity of the calculation are all satisfied.

Keywords Kalman filtering Micro - computer distance protection Vector Signal Processor

(上接 19 页)

THE REVERSE COMPENSATION TECHNOLOGY FOR MEASUREMENT OF THE COMPREHENSIVE MONITOR SYSTEM

Zhou Buxian , Ruan Shuhua , Zhao Hongtu (Sichuan Uinon University ,610065 ,Chengdu)

Abstract The reverse compensation technology used the common equipment is presented in this paper. It is based on data requirement of the comprehensive monitor system ,data feature of the typical functions. It can meet the demands of the multifunctions of the comprehensive monitor system. The test results show that It is practical and efficient.

Keywords measurement reverse compensation comprehensive monitor system