Identification of Stationary Model for Accelerometer Based on Data Fusion

PEI Fang-xia[1], *WANG Heng-hui*[2]

(1. *No. 16 Institute, AJIC, Xian* 710100;
2. *Northwestern Polytechnical University. X'ian* 710072, *China*)

Abstract: The Accelerometer Stationary Model equation is set up, then simplified the equation. Aim at Identification of the Accelerometer Stationary Model, a new method is brought up, which exalt parameter accuracy obviously. This method provided the better termed for real-time compensation of control system.

Key words: accelerometer; stationary model; parameter identification data fusion
EEACC: 6140; 7230

基于数据融合的加速度传感器的静态模型辨识

裴纺霞[1], 王恒辉[2]

(1. 航天时代仪器公司第十六研究所, 西安 710100;
2. 西北工业大学, 西安 710072)

摘　要: 建立加速度计静态模型方程并根据工程应用对方程进行简化, 针对加速度计静态模型的参数辨识提出一种新的方法——数据融合, 使模型参数的精度有明显的提高。该方法的提出为控制系统的实时补偿提供了更好的条件。

关键词: 加速度计; 静态模型; 参数辨识; 数据融合

中图分类号: **TP212**　　文献标识码: **A**　　文章编号: **1005-9490(2005)04-0894-03**

在线运动下加速度计的稳态输出与比力之间关系的数学表达式, 称为加速度计的静态数学模型。对于一个理想的加速度计, 它的稳态输出应当与沿输入轴的比力成正比。然而, 这种理想的状态实际上是无法实现的, 在加速度计的稳态输出中, 不仅包含有沿输入轴比力的线性项, 而且还包含有各种干扰因素引起的误差项, 后者将导致比力的测量误差。因此, 加速度计无论用于平台式惯性系统, 还是用于捷联式惯性系统, 都需要建立它的静态数学模型。

加速度计静态模型参数的辨识中, 传统方法是采用算术平均值的办法, 即对多个测量数据 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 从中得到一个近似值来代替真值[2]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1}$$

但是当加速度计工作状态不处于最佳状态时, 信息便无法准确的获得, 从而影响整个系统不能正常的工作。为了尽可能的消除这种影响, 提出一种数据融合方法, 它算法简洁、融合结果误差和方差均较小。

1　加速度计模型方程的建立及简化

对于一个理想的加速度计, 在系统中只希望其敏感输入轴的比力, 且不考虑加速度计的安装误差

收稿日期: 2004-07-27
作者简介: 裴纺霞(1977-), 女, 设计员, 工程师, 研究领域为捷联惯导技术研究, wanghenghui@126.com; wanghenghui@eyou.com.

耦合项, 同时兼顾加速度计的输出轴和摆轴相对于输入轴均有误差, 则加速度计的静态模型为[4]:

$$U = k_o + k_i a_i + k_o a_o + k_p a_p + K_{io} a_i a_o + K_{op} a_o a_p + K_{pi} a_p a_i + K_{ii} a_i^2 + K_{pp} a_p^2 + K_{oo} a_o^2 \quad (2)$$

式中: U 加速度计的输出; k_0 零位误差项(偏值); a 加速度计所感受到的加速度; k_i 加速度计刻度因数; k_o 输出轴灵敏度误差系数; k_p: 摆轴灵敏度误差系数; k_{op}, k_{io}, k_{pi}: 交叉耦合误差系数; a_i, a_p, a_o 分别为沿输入轴, 摆轴, 输出轴的加速度分量; k_{ii}: 二阶非线性误差系数。

在实验室进行加速度计的基本性能测试是在重力场 $\pm 1g_n$ 范围内的试验, 加速度计在测试台上的安装有两种方法: 摆状态和门状态。在本文中采用摆状态测试方式并相对地球取各种不同的固定位置进行翻滚试验。以地球重力加速度 $\bar{g}$ 作为加速度计输入时, 加速度计相对地球没有线运动。因此, 在这种试验条件下, 为了简化实验和数据处理, 其简化的摆状态静态模型为:

$$U = k_0 + k_i a_i + \alpha a_p \quad (3)$$

式中, α 为输入轴相对于输入基准轴绕输出轴的失准角。

2　数据融合方法

设加速度计的输出数据为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 将数据分成 k 批, 每一批测量数据可记为 $x_{p1}, x_{p2}, \cdots, x_{pm}$, $(p = 1, 2, \cdots, k)$。根据分批方法的不同, 各批中的数据可以相等也可以不等, 但一般要求尽可能等量分组。然后分别计算各批测量数据的算术平均值[3], 记为 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_k$ 则

$$\bar{x}_p = \frac{1}{j}\sum_{i=1}^{j} x_{pi},\ p = 1, 2, \cdots, k \quad (4)$$

相应的标准差记为 $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \cdots, \bar{\sigma}_k$, 则

$$\bar{\sigma}_p = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{j}(x_{pi} - \bar{x}_p)^2},\ p = 1, 2, \cdots, k \quad (5)$$

由于各批测数据之间没有任何有关测量的统计信息, 因此, 在此之前测量结果的方差可认为 $\bar{\sigma}_- = \infty$, 即 $(\bar{\sigma}_-)^{-1} = 0$。由分批估计理论[1]可知, 分批估计后得到的数据融合结果为:

$$x^+ = [\bar{\sigma}_+ (\bar{\sigma}_-)^{-1}]x^- + [\bar{\sigma}_+ H^T R^{-1}]x = [\bar{\sigma}_+ H^T R^{-1}]x \quad (6)$$

式中: $\bar{\sigma}_+$ ——分批估计数据融合结果的方差;

H ——测量方程的系数矩阵;

R ——测量噪声的协方差;

x^- ——上次数据融合结果。

若记为算术平均矩阵, 且有:

$$\bar{\sigma}_+ = [(\bar{\sigma}_-)^{-1} + H^T R^{-1} H]^{-1},$$

$$\boldsymbol{H} = [1\ \ 1\ \ \cdots\ \ 1]^T,$$

$$\boldsymbol{X} = [\bar{x}_1\ \ \bar{x}_2\ \ \cdots\ \ \bar{x}_k]^T,$$

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{E}(v\,v^T) = \begin{bmatrix} E[v_1^2] & E[v_1 v_2] & \cdots & E[v_1 v_k] \\ E[v_1 v_2] & E[v_1^2] & \cdots & E[v_1 v_k] \\ \cdots & & \ddots & \cdots \\ E[v_k v_1] & E[v_k k v_2] & \cdots & E[v_k^2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \bar{\sigma}_2^2 & & \cdots \\ \cdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \bar{\sigma}_k^2 \end{bmatrix}$$

于是有:

$$\bar{\sigma}_+ = [(\bar{\sigma}_-)^{-1} + H^T R^{-1} H]^{-1} = \left\{[1\ \ 1\ \ \cdots\ \ 1]\begin{bmatrix} (\bar{\sigma}_1^2)^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & (\bar{\sigma}_2^2)^{-1} & & \cdots \\ \cdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & (\bar{\sigma}_k^2)^{-1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdots \\ 1 \end{bmatrix}\right\} = \frac{\prod_{i=1}^{k}\bar{\sigma}_i^2}{\sum_{i=1}^{k}\bar{\sigma}_i^2}$$

将上式代入(6)式, 可得:

$$x = \frac{\prod_{i=1}^{k}\bar{\sigma}_i^2}{\sum_{i=1}^{k}\bar{\sigma}_i^2}\left\{[1\ \ 1\ \ \cdots\ \ 1]\begin{bmatrix} (\bar{\sigma}_1^2)^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & (\bar{\sigma}_2^2)^{-1} & & \cdots \\ \cdots & & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & (\bar{\sigma}_k^2)^{-1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \cdots \\ \bar{x}_k \end{bmatrix}\right\} = \frac{\prod_{i=1}^{k}\bar{\sigma}_i^2}{\sum_{i=1}^{k}\bar{\sigma}_i^2}\sum_{q=1}^{k}\frac{\bar{x}_q}{\bar{\sigma}_q^2} \quad (7)$$

式(7)即为本文的数据融合算法最终应用公式。实际中可根据分批数的不同, 对式(7)进行化简求值。

3　参数辨识结果

本文采用四位置翻滚试验对加速度计进行测试。每个位置采集六组数据如下表: 把数据代入式(3), 由算术平均值求得的模型系数。

把数据代入式(3), 求得六组模型的系数。将数据分成两批由式(4)、(5)、(7)可以求得数据融合方法的参数值 K_{0y}、K_{1y}、α_y 及用平均值法辨识出的参数值, 如表 2。

表 **1** 摆状态数据

方位			天南东 $U_y^{0°}$			北天东 $U_y^{90°}$			下北东 $U_y^{180°}$			南下东 $U_y^{270°}$		
各轴向加速度分量			a_l	a_p	a_o	a_l	a_p	a_o	a_l	a_p	a_o	a_l	a_p	a_o
			0	1	0	-1	0	0	0	-1	0	1	0	0
测次	1	顺时针	0.005	341	914	1.215	466	211	-0.006	651	019	-1.216	844	286
		逆时针	0.005	679	272	1.215	490	208	-0.006	695	101	-1.216	842	426
		平均值	0.005	510	593	1.215	478	210	-0.006	673	060	-1.216	843	356
	2	顺时针	0.005	635	389	1.215	445	870	-0.006	741	288	-1.216	899	348
		逆时针	0.005	429	061	1.215	544	814	-0.006	793	910	-1.216	945	721
		平均值	0.005	532	225	1.215	495	342	-0.006	767	599	-1.216	922	535
	3	顺时针	0.005	341	190	1.215	387	905	-0.006	789	931	-1.216	899	348
		逆时针	0.005	617	016	1.215	423	734	-0.006	904	237	-1.216	897	403
		平均值	0.005	479	103	1.215	405	820	-0.006	847	084	-1.216	898	376
	4	顺时针	0.005	610	856	1.215	390	972	-0.007	046	662	-1.216	894	860
		逆时针	0.005	723	196	1.215	436	731	-0.006	768	519	-1.216	884	014
		平均值	0.005	667	026	1.215	413	852	0.006	907	591	-1.216	889	437
	5	顺时针	0.005	633	188	1.215	383	792	-0.006	948	315	-1.216	891	345
		逆时针	0.005	733	504	1.215	459	187	-0.006	876	393	-1.216	885	211
		平均值	0.005	683	346	1.215	421	490	-0.006	912	354	-1.216	888	278
	6	顺时针	0.005	637	291	1.215	448	941	-0.006	924	415	-1.216	881	846
		逆时针	0.005	578	692	1.215	404	735	-0.006	958	952	-1.216	885	884
		平均值	0.005	607	992	1.215	4268	38	-0.006	941	683	-1.216	883	865

表 2 两种方法的参数值

参数类别	K_{oy}	K_{1y}	a_y
测 值	$-0.822\ 2\times10^{-3}$	$-1.216\ 171\ 962$	0.006 091 826
	$-0.870\ 9\times10^{-3}$	$-1.216\ 049\ 106$	0.006 149 912
	$-0.870\ 3\times10^{-3}$	$-1.216\ 196\ 948$	0.006 163 094
	$-0.842\ 6\times10^{-3}$	$-1.216\ 195\ 816$	0.006 287 309
	$-0.833\ 9\times10^{-3}$	$-1.216\ 184\ 389$	0.006 297 850
	$-0.854\ 4\times10^{-3}$	$-1.216\ 080\ 200$	0.006 274 837
数据融合	$-0.844\ 9\times10^{-3}$	$-1.216\ 147\ 912$	0.006 273 845
平均值	$-0.849\ 1\times10^{-3}$	$-1.216\ 146\ 404$	0.006 210 805

4 融合算法与传统方法的比较

这样可以由偏差 K_0 和标度因数 K_1 的离散度 σ_{K_0}、σ_{K_1} 来评判两种方法所求系数的精确度, 即:

$$\sigma_{K_1}=\frac{1}{|\overline{K_1}|}\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{6}(\overline{K_1}-K_{1j})^2}{5}} \tag{8}$$

$$\sigma_{K_0}=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{6}(\overline{K_1}-K_{0j})}{5}}$$

式中: $\overline{K_1}$—6 次测试 K_1 的平均值或数据融合后的值; $\overline{K_0}$—6 次测试 K_0 的平均值或数据融合后的值; K_{1j}—第 j 次测试 K_1 的值; K_{0j}——第 j 次测试 K_0 的值。

代入数值可得:

① 算术平均法

$\sigma_{pk0}=1.974\ 7\times10^{-5}$ $\sigma_{pk1}=5.321\ 6\times10^{-5}$

② 数据融合法

$\sigma_{rk0}=1.106\ 4\times10^{-5}$ $\sigma_{rk0}=3.328\ 1\times10^{-6}$

通过两组数值比较可以看出, 数据融合法所求得参数值的离散度要小于平均值法所求的参数值的离散度。所以以数据融合法所求得参数值作为加速度计静态模型的参数值, 即:

$$U=0.844\ 9\times10^{-3}-1.216\ 1\times10^{-4}a_l+0.006\ 2a_p$$

5 结 论

综上所述, 数据融合算法辨识出的参数的精度要优越于平均值法。精确的加速度计静态模型参数的辨识为其在平台、捷联等系统中的误差补偿提供了良好的前提条件。

参考文献:

[1] 刘同明, 夏祖勋, 解洪成. 数据融合技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998

[2] 梅硕基. 惯性仪表测试与数据分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1991.

[3] 陈希孺. 高等数理统计学[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 1999.

[4] 陆元九. 惯性器件(上册)[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.