

运载火箭多表冗余捷联惯组的故障诊断与决策

李学锋, 张焕鑫

(北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

摘要: 为了提高运载火箭惯导系统的可靠性, 介绍了一种多表冗余捷联惯性测量组合的故障诊断和冗余信息重构技术, 除了对陀螺仪和加速度计信息进行常零值判别、极大值判别之外, 还要采取三取二的冗余诊断的管理策略, 将故障定位到具体惯组的某个敏感轴, 对故障惯组隔离后进行冗余信息重构, 既可实现惯组系统级冗余, 又能够搭配使用非整套惯组陀螺仪和加速度计信息, 实现惯组故障情况下的导航信息的正常输出, 增强了运载火箭对惯组故障的适应能力。

关键词: 捷联惯组; 多表; 冗余; 故障诊断与决策

Fault Diagnosis and Decision-making for Launch Vehicle SIMU with Meters Redundancy

Li Xuefeng, Zhang Huanxin

(Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

Abstract: To improve the reliability of launch vehicle inertial navigation system, a kind of failure diagnosis and redundancy information reconstruction technology based on strapdown inertial measurement units with meters redundancy is introduced. The method can judge usual zero value or maximum value information of gyro and accelerometer and also diagnose failure by using redundancy and diagnosis management strategy. The failure can be targeted to the specific sensitive axis of meter. After SIMU with failures insulated, the redundancy information is reconstructed. The method not only achieves system redundancy and also uses information of gyro and accelerometer from different SIMU. It realizes SIMU normal output in condition of failure, and enhances the adaptability of launch vehicle for SIMUs failures.

Keywords: strapdown inertial measurement unit (IMU); meters; redundancy; fault diagnosis and decision-making

0 引言

惯性测量装置用于敏感运载火箭飞行过程中的姿态角和视加速度信息, 将其送给飞行控制计算机进行导航、制导与控制, 其可靠性直接关系到飞行任务的成败, 因此在高可靠性的运载火箭中, 惯性测量装置均采用冗余设计以提高惯导系统可靠性。

在提高惯导系统可靠性方面, 目前国内民航在 100 多条国际航线上使用的民用惯导系统 LTN51, 就是采用了两套惯导来提高飞行系统的可靠性; “阿波罗 13”宇宙飞船使用捷联系统 LM/ASA 作备份平安地返回地球; 前苏联“东方”号、“联盟”号飞船均利用两套系统冗余, 一套是平台, 另一套是简易的捷联系统; 欧空局“阿里安 V”使用两套激光陀螺捷联惯性测量组合进行导航^[1-3]。

本文主要介绍三捷联惯组多表冗余故障诊断和信息重构方案设计, 对陀螺仪和加速度计信息采取三取二的冗余、诊断的管理策略, 覆盖一度故障状态, 兼顾部分二度故障模式, 既可实现惯组系统级冗余, 又能够搭配使用非整套惯组陀螺仪和加速度计信息, 从而增强了运载火箭对惯组故障的适应能力, 提高运载火箭惯导系统的可靠性。

1 三捷联惯组多表冗余

三捷联惯组采用正交配置, 并列安装于同一支架, 各惯组的各单表敏感轴互相平行, 一套惯组进行瞄准, 另外两套可通过安装位置关系确定方位。图 1 为 3 套捷联惯组的安装示意图。每套惯组采用了六表的配置, 即 3 个加速度表正交安装; 3 个单自由度陀螺正交安装, 可测量的数据包括箭体绕 3 个轴的角速度 ω_x 、 ω_y 、 ω_z 和沿 3 个方向的视加速度 a_x 、 a_y 、 a_z 。

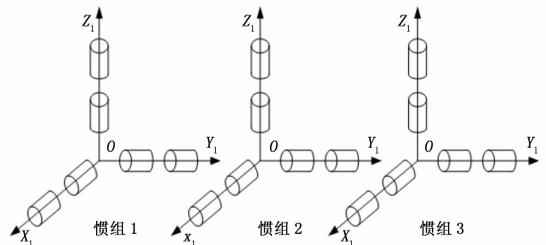


图 1 三套捷联惯组同轴安装示意图

三捷联惯组多表冗余的设计是研究一套集三捷联惯组故障检测、动态阈值选择和重构决策为一体的方案, 其总体框图如图 2 所示。

2 三捷联惯组的冗余管理流程

三捷联惯组冗余是根据获得的三惯组输出量, 从整个控制系统的角度, 进行典型故障阈值的设计, 通过故障的判别和表决, 输出诊断后的正确结果, 计算火箭的姿态角、速度和位置

收稿日期: 2015-02-03; 修回日期: 2015-03-20。

作者简介: 李学锋(1966-), 男, 四川成都人, 博士后, 研究员, 主要从事导航、制导与控制方向的研究。

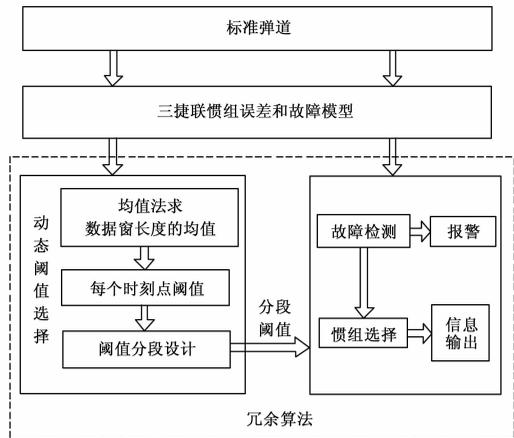


图 2 三捷联惯组冗余总体框图

等导航信息，进行控制率计算，实现火箭的稳定飞行，基本原理如图 3 所示^[4]。

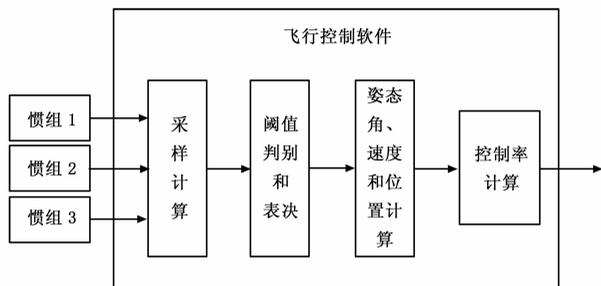


图 3 三惯组冗余示意图

在阈值判别和表决过程中，除了对陀螺仪、加速度计的角速度和视加速度信息的故障诊断考虑常零值判别和极大值判别之外，三捷联惯组冗余信息管理方案还主要采用三取二的冗余管理策略对其进行一致性判别，阈值判别和表决管理流程如图 4 所示。

故障阈值的选择是非常重要的环节，数值必须在合理的范围内。数值不能选择太小，否则会将良好信息切除，出现误判；不能选择太大，否则无法判别出故障，出现漏判。阈值的设计必须根据火箭的飞行时间、过载、机动性、稳定性等要求进行选择，不同飞行段的阈值可能会有所不同^[4]。

3 三捷联惯组冗余故障诊断与决策

3.1 陀螺仪的故障诊断

对陀螺仪的故障诊断有陀螺仪脉冲常零值输出判别、角速度极大值输出判别、角增量一致性判别和角度一致性判别。常零值输出判别是判断陀螺仪脉冲是否零值输出，如果是，则认为该故障模式成立。角速度极大值输出判别是判断角速度极大值输出是否超过门限值，如果是，则认为该故障模式成立。

角增量是指一段时间内的角度增量，角增量一致性判别用于诊断陀螺仪突发性的快速发散的故障；角度则是自起飞起至当前时刻角速度的增量，角度一致性判别主要用于判决陀螺仪慢漂的故障。

在对陀螺仪安装误差补偿之后（为防止故障信息通过安装

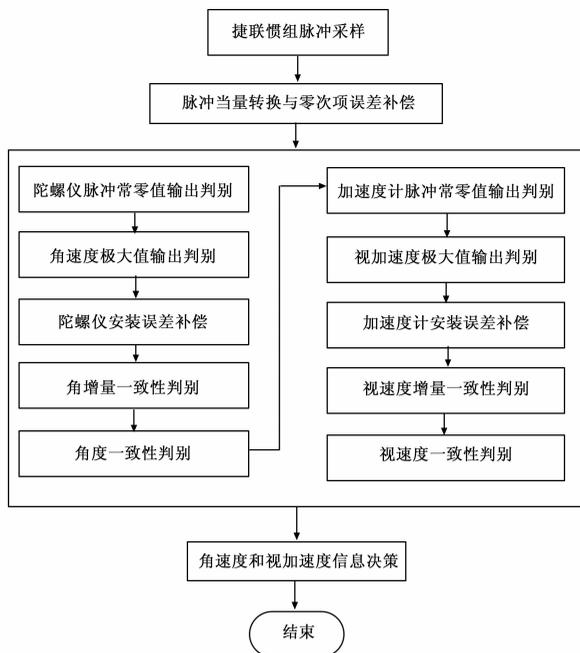


图 4 三捷联惯组冗余管理流程

误差补偿使故障扩散，以无故障轴信息替换已发生故障轴信息进行安装误差的补偿），再进行角增量一致性判别和角度一致性判别。

角增量一致性判别对应的一致性检测方程 $K1_{\alpha} \sim K3_{\alpha}$

$$K1_{\alpha} = \begin{cases} 1 & \left| \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^1 - \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^2 \right| > \epsilon_{GZ_{\alpha}}^{12} \\ 0 & \left| \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^1 - \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^2 \right| \leq \epsilon_{GZ_{\alpha}}^{12} \end{cases} \quad (1)$$

$$K2_{\alpha} = \begin{cases} 1 & \left| \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^1 - \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^3 \right| > \epsilon_{GZ_{\alpha}}^{13} \\ 0 & \left| \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^1 - \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^3 \right| \leq \epsilon_{GZ_{\alpha}}^{13} \end{cases} \quad (2)$$

$$K3_{\alpha} = \begin{cases} 1 & \left| \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^2 - \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^3 \right| > \epsilon_{GZ_{\alpha}}^{23} \\ 0 & \left| \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^2 - \sum_{T_g} \delta\theta_{\alpha}^3 \right| \leq \epsilon_{GZ_{\alpha}}^{23} \end{cases} \quad (3)$$

其中， $K1_{\alpha} \sim K3_{\alpha}$ 为一致性标志，0 为正常，1 为故障； $\delta\theta_{\alpha}$ 表示 α 轴的角增量； $\epsilon_{GZ_{\alpha}}^{12}$ ， $\epsilon_{GZ_{\alpha}}^{13}$ ， $\epsilon_{GZ_{\alpha}}^{23}$ 表示陀螺仪角增量一致性故障阈值；上标 ‘1’ 表示第一套惯组，上标 ‘2’ 表示第二套惯组，上标 ‘3’ 表示第三套惯组。利用检测方程对陀螺仪进行故障判别，据此得到角增量一致性判别表，如表 1 所列。

角增量一致性判决采用三取二的冗余判决策略，表 1 中序号 1、序号 2、序号 3 和序号 4 表示无故障的情况，序号 5、序号 6 和序号 7 表示一套惯组陀螺仪 α 轴的故障，对于序号 8，当一致性检测方程均大于角增量故障阈值时，无法确定故障惯组，因此角增量一致性判别不能有效地判别两度故障。

表 1 角增量一致性判别表

序号	一致性标志			判别结果
	$K1_{\alpha}$	$K2_{\alpha}$	$K3_{\alpha}$	
1	0	0	0	无故障
2	1	0	0	
3	0	1	0	
4	0	0	1	
5	1	1	0	惯组 1 陀螺仪 α 轴故障
6	1	0	1	惯组 2 陀螺仪 α 轴故障
7	0	1	1	惯组 3 陀螺仪 α 轴故障
8	1	1	1	其他

角度一致性判别方法同角增量一致性判别, 诊断信息采用角增量累加, 每间隔累加一定周期对角增量累加值进行清零。

3.2 加速度计的故障诊断

对加速度计故障诊断有加速度计脉冲常零值输出判别、视加速度极大值输出判别、视加速度增量一致性判别和视速度一致性判别。

加速度计脉冲常零值输出判别仅对 x 轴加速度计 (纵向加速度计) 常零值输出进行判别, y, z 轴加速度计 (横、法向加速度计) 零值有可能为零, 因此不作判断。判断的方法是在每个采样周期内检查脉冲增量是否为零, 如是, 则认为该故障模式成立。

视加速度极大值输出判别方法同角速度极大值输出判别。

视速度增量一致性判别方法同陀螺仪角增量一致性判别。视速度一致性判别方法同陀螺仪角度一致性判别, 不同的是, 为防止误判, 视速度一致性判别阈值采用变阈值设计, 系数的选取需要紧密结合相应弹道的过载特性设计。

3.3 信息重构决策

针对火箭飞行过程中惯组的常零值、极大值和一致性等不同故障模式, 选择合适的阈值进行判别, 综合姿态角信息和视加速度信息的取值不同, 得到判别结果如表 2 和表 3 所列。

其中, $\delta\alpha$ 表示 α 轴的角增量, 上标 ‘1’ 表示第一套惯组, 上标 ‘2’ 表示第二套惯组, 上标 ‘3’ 表示第三套惯组。

其中, $\delta W_{\alpha i}$ 表示 α 轴的视速度增量, 上标 ‘1’ 表示第一套惯组, 上标 ‘2’ 表示第二套惯组, 上标 ‘3’ 表示第三套惯组。

综合表 2 和 3, 实现了故障情况下的惯组输出表决, 既能够选用整套惯组陀螺仪和加速度计信息, 实现惯组系统级冗余, 当三套惯组信息都不完整时, 由于在进行切除时, 是对同一惯组的 3 个陀螺仪或加速度计整体切除, 又能够选择非整套惯组陀螺仪和加速度计搭配使用, 提高了对惯组故障的适应能力。

4 结论

本文主要针对三捷联惯组多表冗余的故障诊断和重构决策技术进行了研究, 通过选取合理的故障阈值进行诊断, 将故障

表 2 角速度信息决策及角增量取值

序号	决策	角增量取值
1	诊断惯组 1 陀螺仪和加速度计均正常	$\delta\theta_x = \delta\theta_x^1, \delta\theta_y = \delta\theta_y^1, \delta\theta_z = \delta\theta_z^1$
2	否则, 诊断惯组 2 陀螺仪和加速度计均正常	$\delta\theta_x = \delta\theta_x^2, \delta\theta_y = \delta\theta_y^2, \delta\theta_z = \delta\theta_z^2$
3	否则, 诊断惯组 3 陀螺仪和加速度计均正常	$\delta\theta_x = \delta\theta_x^3, \delta\theta_y = \delta\theta_y^3, \delta\theta_z = \delta\theta_z^3$
4	否则, 诊断惯组 1 陀螺仪正常	$\delta\theta_x = \delta\theta_x^1, \delta\theta_y = \delta\theta_y^1, \delta\theta_z = \delta\theta_z^1$
5	否则, 诊断惯组 2 陀螺仪正常	$\delta\theta_x = \delta\theta_x^2, \delta\theta_y = \delta\theta_y^2, \delta\theta_z = \delta\theta_z^2$
6	否则, 诊断惯组 3 陀螺仪正常	$\delta\theta_x = \delta\theta_x^3, \delta\theta_y = \delta\theta_y^3, \delta\theta_z = \delta\theta_z^3$
7	否则, 使用上一周期正常惯组陀螺仪	$\delta\theta_x = \delta\theta_x^{n-1}, \delta\theta_y = \delta\theta_y^{n-1}, \delta\theta_z = \delta\theta_z^{n-1}$

表 3 视加速度信息决策及视速度增量取值

序号	决策	视速度增量取值
1	诊断惯组 1 陀螺仪和加速度计均正常	$\delta W_{x1} = \delta W_{x1}^1, \delta W_{y1} = \delta W_{y1}^1, \delta W_{z1} = \delta W_{z1}^1$
2	否则, 诊断惯组 2 陀螺仪和加速度计均正常	$\delta W_{x1} = \delta W_{x1}^2, \delta W_{y1} = \delta W_{y1}^2, \delta W_{z1} = \delta W_{z1}^2$
3	否则, 诊断惯组 3 陀螺仪和加速度计均正常	$\delta W_{x1} = \delta W_{x1}^3, \delta W_{y1} = \delta W_{y1}^3, \delta W_{z1} = \delta W_{z1}^3$
4	否则, 诊断惯组 1 加速度计正常	$\delta W_{x1} = \delta W_{x1}^1, \delta W_{y1} = \delta W_{y1}^1, \delta W_{z1} = \delta W_{z1}^1$
5	否则, 诊断惯组 2 加速度计正常	$\delta W_{x1} = \delta W_{x1}^2, \delta W_{y1} = \delta W_{y1}^2, \delta W_{z1} = \delta W_{z1}^2$
6	否则, 诊断惯组 3 加速度计正常	$\delta W_{x1} = \delta W_{x1}^3, \delta W_{y1} = \delta W_{y1}^3, \delta W_{z1} = \delta W_{z1}^3$
7	否则, 使用上一周期正常惯组加速度计	$\delta W_x = \delta W_x^{n-1}, \delta W_y = \delta W_y^{n-1}, \delta W_z = \delta W_z^{n-1}$

定位到具体惯组的某个敏感轴, 对故障惯组隔离后进行信息重构, 使其能够覆盖一度故障兼顾部分二度故障模式, 实现故障情况下的导航信息的正常输出, 提高运载火箭控制系统的可靠性。

参考文献:

[1] 颜 华, 陈家斌, 刘星桥. 冗余技术提高惯性导航系统可靠性的应用 [J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11 (3): 68-72.
 [2] 王珍熙. 捷联式惯性导航系统惯性元件的设置与可靠性 [J]. 中国惯性技术学报, 1996, 4 (1): 61-65.
 [3] Haran D M, Lorentz R D. 航天系统故障与对策 [M]. 阎 列, 邓宁丰, 舒承东译. 北京: 中国宇航出版社, 2007.
 [4] 李学锋, 王 青, 王 辉, 等. 运载火箭飞行控制系统设计与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.