

运载火箭单惯组多表冗余的故障诊断与重构

张焕鑫^{1,2}, 周涛^{1,2}, 杨雪霖³

(1. 宇航智能控制技术国家级重点实验室, 北京 100854;
2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854; 3. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100039)

摘要: 惯性测量装置冗余是运载火箭中经常采用的一种用来提高其惯性导航系统可靠性的技术, 根据冗余方式的不同, 惯性测量装置冗余技术可分为系统冗余和单表冗余, 分析了现有航天器惯性导航系统采用的冗余技术, 从系统的重量、体积和成本方面比较, 单表冗余具有明显优势; 为此, 从单表冗余角度介绍了一种运载火箭十表冗余的捷联惯性测量组合冗余管理方案, 对冗余配置的陀螺仪和加速度计测量信息进行故障诊断, 将故障定位到具体的某个陀螺仪或加速度计, 在两度故障下, 仍能够进行典型故障诊断, 对故障仪表隔离后进行信息重构, 实现一度故障及部分两度故障情况下导航信息的正常输出, 增强了运载火箭惯导系统对惯组故障的容错能力。

关键词: 单惯组; 多表; 冗余; 故障诊断与决策

Fault Diagnosis and Reconstruction for Launch Vehicle Single SIMU with Meters Redundancy

Zhang Huanxin^{1,2}, Zhou Tao^{1,2}, Yang Xuelin³

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Intelligent Control, Beijing 100854, China;
2. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China;
3. Beijing Institute of Aerospace Control Device, Beijing 100039, China)

Abstract: The inertial measurement unit redundancy technology usually is used to improve the reliability of launch vehicle inertial navigation system. From the perspective of redundancy, it can be divided into system redundancy and single meter redundancy. The redundancy technology adopted by the existing spacecraft inertial navigation system is analyzed. Compared with the weight, volume and cost of the system, single table redundancy has obvious advantages. So from redundancy mode, a kind of strapdown inertial measurement units (SIMUs) redundancy management scheme based on ten meters redundancy is introduced. The program can take fault diagnosis by using redundancy information of gyro and accelerometer. The failure can be targeted to the specific sensitive axis of meter. Even in the case of double faults, some typical faults can be diagnosed. After SIMU with failures insulated, the redundancy information is reconstructed. It realizes SIMU normal output in condition of one or some double failures, and enhances the fault-tolerant ability of launch vehicle inertial navigation system for SIMUs failures.

Keywords: single strapdown inertial measurement unit (IMU); meters; redundancy; fault diagnosis and reconstruction

0 引言

运载火箭大多采用冗余技术来获得高可靠的容错惯性导航系统, 从硬件角度, 通过提高单一惯性器件可靠性的方式来保证运载火箭惯性导航系统的高可靠性, 由于受到生产工艺水平等因素限制, 面临着投入大、周期长、见效慢等问题, 而且可靠性提升空间有限。通过设置冗余(即超过所需数量)惯性器件或可实现惯性导航的惯导部件, 采用冗余管理算法对测量信息进行故障诊断和诊断后的信息重构, 达到运用冗余设计吸收故障或隔离故障的效果, 以此来提高运载火箭惯性导航系统可靠性, 效果显著^[1-3]。

无论是配置冗余惯性器件还是配置冗余惯导部件都能够实现运载器惯性导航系统可靠性的提高。本文主要介绍

一种运载火箭十表配置的单惯组冗余设计方案, 采用单表级的冗余管理策略, 对冗余惯测信息进行故障诊断和诊断后的惯测信息重构, 即对加速度计与陀螺仪输出信息各自进行冗余故障诊断与信息重构, 一度故障下能准确定位故障表, 两度故障下能进行典型故障诊断, 输出准确可用的导航信息, 确保可靠飞行, 而且能根据决策, 选取合理的导航信息, 尽可能减小故障对精度影响。

1 惯性测量装置的冗余技术

从冗余配置方式角度, 运载器惯性导航系统的冗余方案可分为单表冗余和系统冗余^[3], 在捷联惯性导航系统中, 对惯性测量装置中的单个惯性器件进行冗余配置, 工作过程中当某些惯性器件出现故障时, 惯性导航系统仍然可以

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2021-01-11。

作者简介: 张焕鑫(1984-), 男, 山东潍坊人, 博士, 工程师, 主要从事导航、制导与控制, 控制系统综合方向的研究。

引用格式: 张焕鑫, 周涛, 杨雪霖. 运载火箭单惯组多表冗余的故障诊断与重构[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 37-41.

通过其余惯性器件能够正常输出飞行器角速度、加速度导航信息，也即实现了单表冗余技术；系统冗余是指多个实现惯性导航的部件构成的冗余系统，当其中一个部件出现故障时，通过其余的部件可以正常输出飞行器角速度、加速度导航信息。

国内外很多航空航天运载器惯性导航系统大都采用系统冗余设计。文献 [4] 提到的美国“土星”V、前苏联“东方”号、“联盟”号飞船、欧空局“阿里安”V，其惯导系统都采用了系统冗余方式，或者是“惯性平台+捷联惯组”冗余，或者是“捷联惯组+捷联惯组”冗余；国内运载火箭出现最早的冗余惯性导航系统是采用惯性平台为主、挠性陀螺捷联组合为备份的系统冗余方式，在后来运载火箭研制过程中，惯性平台+捷联惯组、双捷联惯组以及 3 套捷联惯组等多种系统冗余方案也都得到研究及应用。

系统冗余容易消除系统内部的单点，可靠性比较高，而且软、硬件结合便于灵活控制，能够实现不同类型信息的综合利用^[3]。但单表冗余除了能够明显提高局部可靠性，在系统的重量、体积和成本方面相比系统冗余更具有明显的优势。

文献 [5] 提出一种捷联惯组的单自由度四陀螺+四加速度表方案，三陀螺+三加速度表正交，陀螺仪和加速度表各有一表斜置，且斜置表与正交三轴夹角相同，那么任一表出现故障，通过故障诊断与信息重构，惯组都可正常工作。

文献 [5] 同时也提出了一种非正交配置的正十二面体捷联惯组方案，即单自由度六陀螺仪和六加速度表的测量轴分别沿正十二面体六个平面法线方向，且测量轴相对载体轴均为斜置。该方案最多可容忍任意 3 个陀螺或加速度表同时故障，沿载体 3 个轴的惯测信息仍可由其余 3 个仪表输出得到。

文献 [5] 以及文献 [6] 都提出了双自由度三陀螺+四加速度表的捷联惯组方案，即 3 个双自由度陀螺按正交配置，3 个载体的角速度均由两个陀螺测量，形成双冗余；3 个加速度表按正交配置，有一表斜置。这样任意一个陀螺或加速度表发生故障，仍可由其余陀螺或加速度表输出得到惯测信息。

文献 [2] 提出了一种 4 个双自由度陀螺仪和 4 个加速度计的半八面体配置方案。4 个测量轴互不垂直，该冗余方案允许任意两个陀螺仪同时故障，允许任一加速度计故障。

文献 [7] 提到一种多惯性仪表（一般大于 4 个）互不垂直的圆锥体结构配置方案，各表沿测量轴均匀放置在一倒圆锥体的圆锥面上，其平面夹角与仪表配置数量有关，各表输入轴沿着圆锥母线方向。若配置 5 个陀螺仪和 5 个加速度计，则允许任意两个陀螺仪故障，也允许任两个加速度计故障。

多表冗余的单惯组可以有多种惯性仪表配置方案，但是当惯性仪表数量增加到一定程度后，单惯组可靠度的增加就不再是很明显，而且整个惯导系统的体积、重量和成

本却因为惯性仪表数量增加的同时也相应增加。

近年来，一种十表冗余的单惯组开始在运载火箭上应用，该捷联惯组具有 5 个单自由度陀螺仪和 5 个加速度计，其中 3 个陀螺仪和 3 个加速度计正交安装，两个陀螺仪和两个加速度计斜置安装。十表冗余配置的捷联惯组具有冗余的角速度、视加速度信息，因此也就具备了故障诊断、隔离与重构的基础。故障诊断可将故障定位到具体的惯性仪表，将故障仪表测量信息进行隔离，此时，既可以利用全部冗余器件进行重构，也可以选用部分冗余器件进行重构，因此，故障适应能力明显增强，可以应对二度故障，甚至二度故障下还可以进行典型故障诊断。

2 单惯组十表冗余方案

十表冗余的单惯组配置 5 个单自由度陀螺仪 G_x, G_y, G_z, G_s, G_t 和 5 个加速度计 A_x, A_y, A_z, A_s, A_t ，如图 1 所示，其中 G_x, G_y, G_z 三个陀螺仪成正交安装，分别沿惯测部件测量坐标系 $O-X_s Y_s Z_s$ 的 OX_s, OY_s, OZ_s 轴方向安装，测量轴正向为箭头所指方向； G_s 斜置，沿 OS 轴方向安装，测量轴正向为图中箭头所指方向； G_t 斜置，沿 OT 轴方向安装，测量轴正向为图中箭头所指方向； A_x, A_y, A_z 三个加速度计成正交安装，分别沿 OX_s, OY_s, OZ_s 轴方向安装，测量轴正向为箭头所指方向； A_s 斜置，沿 OS 轴方向安装，测量轴正向为图中箭头所指方向； A_t 斜置，沿 OT 轴方向安装，测量轴正向为图中箭头所指方向。5 个陀螺仪 G_x, G_y, G_z, G_s, G_t 和 5 个加速度计 A_x, A_y, A_z, A_s, A_t 分别敏感 X_s, Y_s, Z_s, S, T 坐标轴向上的角速度和视加速度信号。

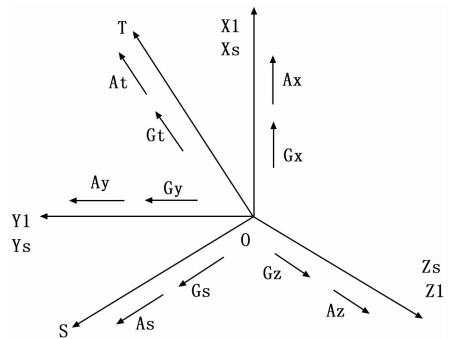


图 1 惯性仪表安装定向示意图

惯测部件采用整体斜置 10° 方式，是为了保证运载火箭在水平或竖直状态下，5 个加速度计均能够敏感到足够的重力加速度分量。惯测部件测量坐标系 $O-X_s Y_s Z_s$ 与箭体坐标系 $O-X1Y1Z1$ (其中 $OX1$ 为纵轴, $OY1$ 为法向轴, $OZ1$ 为横向轴) 的关系如下：

由箭体坐标系 $O-X1Y1Z1$ 至惯测部件测量坐标系 $O-X_s Y_s Z_s$ 的方向余弦矩阵为：

$$C = C_1 \times C_2 = \begin{bmatrix} \cos K_z & \sin K_z & 0 \\ -\sin K_z & \cos K_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos K_y & 0 & -\sin K_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin K_y & 0 & \cos K_y \end{bmatrix}$$

其中: $K_y = 10^\circ, K_z = 10^\circ$ 。

3 冗余管理流程

捷联惯组的故障模式多种多样, 综合来看, 从故障后陀螺仪和加速度计的输出特性分析, 对陀螺仪、加速度计的角速度和视加速度信息的故障诊断主要考虑常零值、极大值和一致性判别(对应惯组无输出、满量程、慢漂等故障模式)。

十表冗余的单惯组冗余管理流程如图2所示。首先对惯组陀螺仪和加速度计脉冲数据采样, 接着完成陀螺仪常零值判别, 再进行脉冲当量转换及误差补偿, 极大值判别与角增量一致性判别后, 根据角速度诊断信息进行信息重构并完成角增量计算, 加速度计冗余管理流程同陀螺仪冗余管理流程类似, 经过常零值判别, 脉冲当量转换及误差补偿, 极大值判别及角增量一致性判别后, 根据故障诊断信息进行信息重构并完成视速度增量信息计算, 计算得到的角增量参与四元数计算后, 与视速度增量共同完成导航计算。

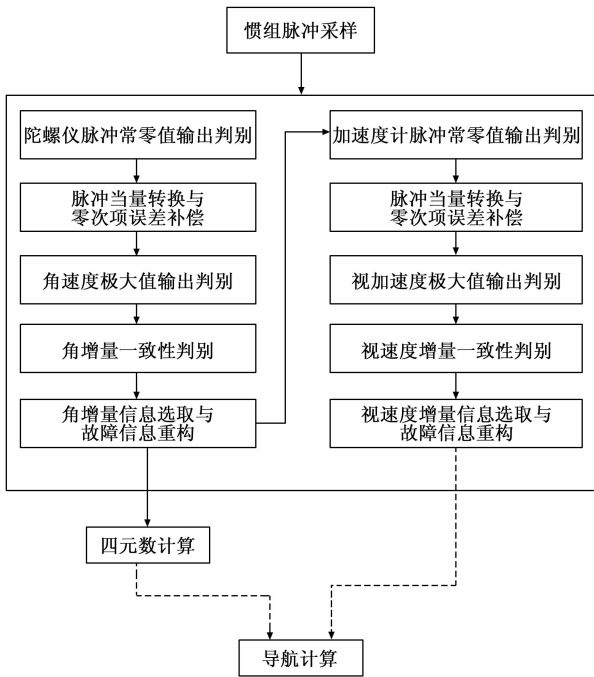


图2 十表冗余的单惯组冗余管理流程

4 冗余故障诊断与信息重构

4.1 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、脉冲增量极大值输出判别以及角增量一致性判别。

陀螺仪冗余诊断流程如图3所示, 具体如下:

1) 判断是否发生两度故障, 如果已发生两度故障, 则直接转入8) 导航信息选取与故障信息重构, 如果没有发生两度故障, 则转入2) 进行极大值与常零值故障诊断与计数;

2) 进行极大值与常零值故障诊断与计数, 然后转入3) 判断是否发生一度及以上故障;

3) 判断是否发生一度及以上故障, 如果已发生一度及以上故障, 则转入8) 导航信息选取与故障信息重构, 如果没有发生两度故障, 则转入4) 短周期故障诊断与计数;

4) 进行短周期故障诊断与计数;

5) 判断是否发生一度故障, 如果发生一度故障, 则转入8) 导航信息选取与故障信息重构, 如果没有发生两度故障, 则转入6) 长周期故障诊断中累积量计算故障数据剔除;

6) 长周期故障诊断中累积量计算故障数据剔除;

7) 进行长周期故障诊断;

8) 导航信息选取与故障信息重构。

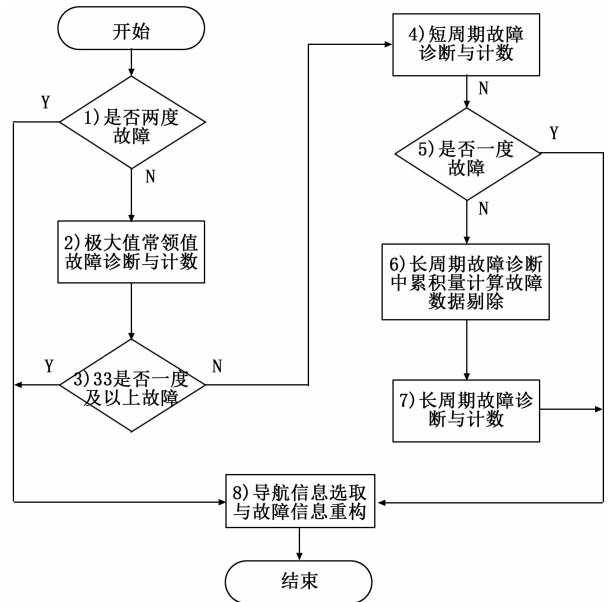


图3 陀螺仪冗余诊断流程

对于一致性判别, 通过各表相互间投影的合理性进行故障判别, 角增量短周期一致性判别对应的一致性检测方程如下:

$$|k_{g11} \cdot \Delta\theta_x + k_{g12} \cdot \Delta\theta_y + k_{g13} \cdot \Delta\theta_z + k_{g14} \cdot \Delta\theta_s| \leq \epsilon_{g1}^{short} \quad (1)$$

$$|k_{g21} \cdot \Delta\theta_x + k_{g22} \cdot \Delta\theta_y + k_{g23} \cdot \Delta\theta_z + k_{g24} \cdot \Delta\theta_t| \leq \epsilon_{g2}^{short} \quad (2)$$

$$|k_{g31} \cdot \Delta\theta_x + k_{g32} \cdot \Delta\theta_y + k_{g33} \cdot \Delta\theta_t + k_{g34} \cdot \Delta\theta_s| \leq \epsilon_{g3}^{short} \quad (3)$$

$$|k_{g41} \cdot \Delta\theta_x + k_{g42} \cdot \Delta\theta_t + k_{g43} \cdot \Delta\theta_z + k_{g44} \cdot \Delta\theta_s| \leq \epsilon_{g4}^{short} \quad (4)$$

$$|k_{g51} \cdot \Delta\theta_t + k_{g52} \cdot \Delta\theta_y + k_{g53} \cdot \Delta\theta_z + k_{g54} \cdot \Delta\theta_s| \leq \epsilon_{g5}^{short} \quad (5)$$

其中, k_{gmn} ($n=1, 2, 3, 4, 5; m=1, 2, 3, 4$) 为惯组加表投影系数; ϵ_{gn}^{short} ($n=1, 2, 3, 4, 5$) 为陀螺短周期一致性门限; $\Delta\theta_\alpha$ ($\alpha=x, y, z, s, t$) 为陀螺 α 当前周期的角增量。

$$|k_{g11} \cdot \Delta\theta_x^{T_c} + k_{g12} \cdot \Delta\theta_y^{T_c} + k_{g13} \cdot \Delta\theta_z^{T_c} + k_{g14} \cdot \Delta\theta_s^{T_c}| \leq \epsilon_{g1}^{long} \quad (6)$$

$$|k_{g21} \cdot \Delta\theta_x + k_{g22} \cdot \Delta\theta_y + k_{g23} \cdot \Delta\theta_z + k_{g24} \cdot \Delta\theta_t| \leq \epsilon_{g2}^{long} \quad (7)$$

$$|k_{g31} \cdot \Delta\theta_x + k_{g32} \cdot \Delta\theta_y + k_{g33} \cdot \Delta\theta_t + k_{g34} \cdot \Delta\theta_s| \leq \epsilon_{g3}^{short} \quad (8)$$

$$|k_{g41} \cdot \Delta\theta_x + k_{g42} \cdot \Delta\theta_t + k_{g43} \cdot \Delta\theta_z + k_{g44} \cdot \Delta\theta_s| \leq \epsilon_{g4}^{short} \quad (9)$$

$$|k_{g51} \cdot \Delta\theta_t + k_{g52} \cdot \Delta\theta_y + k_{g53} \cdot \Delta\theta_z + k_{g54} \cdot \Delta\theta_s| \leq \epsilon_{g5}^{short} \quad (10)$$

其中： ϵ_{gn}^{long} ($n = 1, 2, 3, 4, 5$) 为陀螺长周期一致性门限； $\Delta\theta_\alpha^T$ ($\alpha = x, y, z, s, t$) 为陀螺 α 滚动累加时间 T_G 的角增量。角增量一致性故障判别定位见表 1。

表 1 角增量一致性故障判别定位表

序号	公式 1/6	公式 2/7	公式 3/8	公式 4/9	公式 5/10	判别结果
1	√	√	√	√	√	无故障
2	×	×	×	×	√	G_x 陀螺仪故障
3	×	×	×	√	×	G_y 陀螺仪故障
4	×	×	√	×	×	G_z 陀螺仪故障
5	×	√	×	×	×	G_s 陀螺仪故障
6	√	×	×	×	×	G_t 陀螺仪故障

另外，在两度故障下还可以对陀螺仪输出进行常零值和极大值两种典型故障诊断。

故障诊断过程中，故障门限的设计非常重要。由于捷联惯组测量信息带有测量噪声，惯导系统的故障诊断不可避免有误判或漏判的可能，因此，故障诊断门限对容错惯导系统的性能，尤其是对系统可靠性有着非常大的影响。故障门限设计不合理，就有可能发生故障误判或者故障漏判。为了防止误判，同时也防止漏判，故障门限的设计要充分考虑到弹道特点、惯组器件的精度水平以及故障对入轨精度的影响等多方面因素^[4,7]。

4.2 加速度计的故障诊断

对加速度计的故障诊断同样分为脉冲常零值输出判别、脉冲增量极大值输出判别，还有视速度增量一致性判别。

加速度计冗余诊断流程同图 3 所示的陀螺仪冗余诊断流程类似。

首先判断是否发生两度故障，如是则直接进行加速度计导航信息选取与故障信息重构，否则进行极大值、常零值判别；如果纵向加速度计脉冲是零值输出，则认为常零值故障模式成立，横、法向加速度计不作零值判断。若视速度脉冲增量输出超过门限值，则认为脉冲增量极大值故障模式成立。在极大值与常零值判别过程中，发生一度故障则进行加速度计导航信息选取与故障信息重构，如未发生一度故障，则进入视速度增量一致性判别，视速度增量一致性判别同样分为短周期一致性和长周期一致性判别，与陀螺仪角增量一致性判别类似，不再赘述。

4.3 信息重构

选择合适的故障门限，对惯组中陀螺仪和加速度计测量信息进行常零值、极大值和一致性等故障判别，导航信

息的选取与故障信息重构只针对部分两度及以下故障情况，当在诊断过程中诊断出两度以上故障时，直接采用 3 个正交表的信息进行导航计算，以视速度增量计算为例，即：

$$\begin{bmatrix} \delta W_{x1} \\ \delta W_{y1} \\ \delta W_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{xx} & E_{xy} & E_{xz} \\ E_{yx} & E_{yy} & E_{yz} \\ E_{zx} & E_{zy} & E_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta W_x \\ \Delta W_y \\ \Delta W_z \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中： ΔW_α ($\alpha = x, y, z$) 表示 α 轴当前周期的视速度增量； $E_{xx}, E_{xy}, E_{xz}, E_{yx}, E_{yy}, E_{yz}, E_{zx}, E_{zy}, E_{zz}$ 为加速度计一次项系数； $\delta W_{\alpha 1}$ ($\alpha = x, y, z$) 表示经过误差补偿（零次项和安装误差）后参与导航运算的箭体系 α 轴当前周期的视速度增量。后续不再进行冗余诊断及导航信息选取与故障信息重构。

以加速度计导航信息选取与故障信息重构为例，流程如图 4 所示，具体如下：

1) 判断是否有正交表故障，如果有，转入 3) 判断是否有两个正交表故障，否则转入 2) 选用正交表测量信息进行导航解算；

2) 选用正交表测量信息按公式 (11) 进行导航解算；

3) 判断是否有两个正交表故障，如果没有，转入 5) 判断是否有斜置表故障，否则转入 4) 选用 3 个正常表的信息进行信息重构；

4) 选用 3 个正常表的信息进行信息重构，以 x 表和 y 表故障为例，按公式 (12) 进行重构：

$$\begin{bmatrix} \delta W_{x1} \\ \delta W_{y1} \\ \delta W_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{zx} & E_{zy} & E_{zz} \\ E_{yx} & E_{yy} & E_{yz} \\ E_{tx} & E_{ty} & E_{tz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta W_z \\ \Delta W_s \\ \Delta W_t \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中： ΔW_α ($\alpha = s, t$) 表示 α 轴当前周期的视速度增量； $E_{zx}, E_{zy}, E_{zz}, E_{yx}, E_{yy}, E_{yz}, E_{tx}, E_{ty}, E_{tz}$ 为加速度计一次项系数；

5) 判断是否有斜置表故障，如果有，转入 7) 选用 3 个正常表的信息进行信息重构，否则转入 6) 选用 4 个正常表的信息进行信息重构；

6) 选用 4 个正常表的信息进行信息重构，以 x 表故障为例，按公式 (13) 进行重构：

$$\begin{bmatrix} \delta W_{x1} \\ \delta W_{y1} \\ \delta W_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{yx} & E_{yy} & E_{yz} & E_{yx} & E_{yy} & E_{yz} \\ E_{zx} & E_{zy} & E_{zz} & E_{zx} & E_{zy} & E_{zz} \\ E_{sx} & E_{sy} & E_{sz} & E_{sx} & E_{sy} & E_{sz} \\ E_{tx} & E_{ty} & E_{tz} & E_{tx} & E_{ty} & E_{tz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E_{yx} & E_{yy} & E_{yz} \\ E_{zx} & E_{zy} & E_{zz} \\ E_{sx} & E_{sy} & E_{sz} \\ E_{tx} & E_{ty} & E_{tz} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta W_y \\ \Delta W_z \\ \Delta W_s \\ \Delta W_t \end{bmatrix} \quad (13)$$

7) 选用 3 个正常表的信息进行信息重构，以 x 表和 s 表故障为例，按公式 (14) 进行重构：

$$\begin{bmatrix} \delta W_{x1} \\ \delta W_{y1} \\ \delta W_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{yx} & E_{yy} & E_{yz} \\ E_{zx} & E_{zy} & E_{zz} \\ E_{tx} & E_{ty} & E_{tz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta W_y \\ \Delta W_z \\ \Delta W_t \end{bmatrix} \quad (14)$$

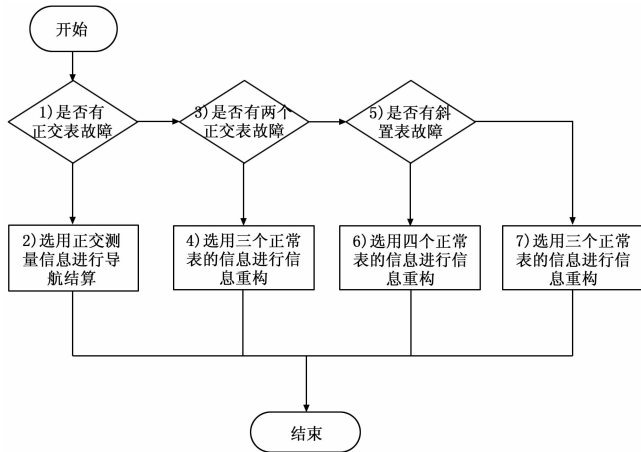


图4 加速度计导航信息选取与故障信息重构流程

从重构策略可以看出, 主要是针对正交仪表发生故障而重构, 因为从成本、体积、重量等方面因素考虑, 一般选用的正交表比斜置表精度高, 所以从尽可能减小故障对导航精度影响角度, 仅有斜置表故障时, 也直接选用正交表测量信息。

5 结束语

本文介绍了一种运载火箭单捷联惯组十表冗余的惯测信息故障诊断和信息重构技术, 通过选取合理的故障阈值进

行诊断, 在一度故障下准确定位故障表, 在二度故障下能进行典型故障诊断, 对故障仪表隔离后进行信息重构, 实现一度故障及部分二度故障情况下导航信息的正常输出, 在工程应用中增强了运载火箭惯导系统对惯组故障的容错能力, 同时也为后续运载火箭惯性测量装置冗余技术提供不同的设计思路。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王社伟, 张洪钺. 冗余配置捷联惯性导航系统可靠性分析 [J]. 航天控制, 1999 (3): 71-77.
- [3] 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.
- [4] 宋征宇. 双捷联惯组单表级的冗余管理及信息融合技术 [J]. 载人航天, 2012, 5 (18): 8-13.
- [5] 朱振乾. 提高控制系统可靠性惯性仪表冗余方案分析 [J]. 航天控制, 1998 (2): 16-23.
- [6] Murugesan S, Goel P S. Autonomous fault-tolerant attitude reference system using DTGs in symmetrically skewed configuration [J]. IEEE Trans. on AES. 1989, 25 (2): 302-307.
- [7] 李学锋, 李超兵, 王青. 轨道转移飞行器导航与制导 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

(上接第36页)

辐射功率) 数值异常或箭上接收链路异常, 可结合地面站的上行信号电平强度快速对接收天线状态和转发器的接收模块做出判断。“功率遥测”参数表征了箭上射频输出信号的功率大小, 当输出射频信号的电平强度下降时该参数也会有所下降; 当射频输出信号强度下降至噪声水平时, “功率遥测”参数下降至0附近, 此时表征箭上下行信号 EIRP (equivalent isotropic radiated power, 等效各向同性辐射功率) 数值异常, 可以将故障初步定为在箭上发射模块、功放模块、供电模块及器件连接不良。正是因为有了关键的遥测数据作支撑, 使得故障定位工作与之前相比变得事半功倍。

5 结束语

从利于故障定位的角度, 提出了航天箭载无线收发设备遥测参数设置建议及原则。阐述了航天主流无线收发机的结构, 在此基础上提出了在接收机中设置“灵敏度遥测”、“锁定指示遥测”参数和在发射机中设置“功率遥测”参数的建议; 对于能够设置更多遥测参数的无线收发机, 可以进一步考虑设置“电压监测”参数和“本振锁定”、“信噪比 SNR”等参数。结合案例分析了某转发器遥测参数设置的不合理性, 对其遥测参数进行重新设计后开展了实验与结果分析, 实验结果表明, 经过遥测参数重新设计后的转发器能对故障定位提供关键的数据支撑。

参考文献:

- [1] Ariel Luzzatto, Gadi Shirazi, Wireless Transceiver Design [M]. John Wiley & Sons, 2007.
- [2] 吴立勋. 外测与安全系统 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1994.
- [3] 陈翔, 陈瑞龙. 星载统一测控载波跟踪环相位噪声分析 [J]. 电讯技术, 2015 (4): 435-440.
- [4] Jesal L. Mehta. 无线 IC 收发机体系结构 (上、下) [J]. 电子产品世界, 2001. 6 (7) B: 40-43.
- [5] 侯剑波. 数字 AGC 电路设计 [J]. 数控技术, 2006 (15): 72-77.
- [6] 赵春晖, 张朝柱. 微波技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [7] Andrei Grebennikov. 射频与微波功率放大器设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [8] David M. Pozar. 微波工程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [9] 杨学志. 通信之道 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [10] Qizheng Gu. 无线通信中的射频收发系统设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [11] 彭成荣. 航天器总体设计 [M]. 北京: 中国科技出版社, 2011.
- [12] 戚秀真. 零中频发射机设计与实现 [J]. 电子科技, 2014, 27 (3): 73-76.