



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114046789 A

(43) 申请公布日 2022.02.15

(21) 申请号 202111329971.7

(22) 申请日 2021.11.11

(71) 申请人 宸贝贝

地址 044000 山西省运城市盐湖区五一路
16号

(72) 发明人 宸贝贝

(51) Int. Cl.

G01C 21/16 (2006.01)

G01C 22/00 (2006.01)

G01S 19/47 (2010.01)

G01B 21/30 (2006.01)

B61K 9/08 (2006.01)

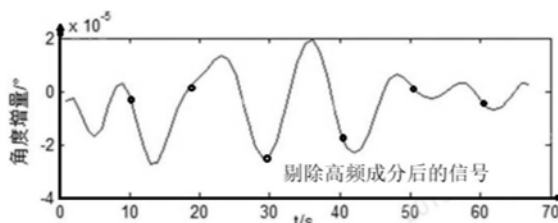
权利要求书5页 说明书13页 附图3页

(54) 发明名称

轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法

(57) 摘要

本申请涉及轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法。本申请将惯性测量系统改进融入地铁轨道检测小车系统中,通过IMU中的陀螺传感器和加速度传感器实时获取轨检设备的姿态和速度信息,对这些信息进行导航解算得到小车的实时位置信息,首先基于地铁轨道检测所需检测的主要几何参数和各个参数的主要检测方法,设计搭载惯导设备的轨检小车,轨检小车在轨道上行进时难免会发生振动,为剔除这一高频振动对惯导测量数据的影响,采用自适应时频先验解析对惯导数据做预处理,从初始数据信号中剔除高频部分,提高初始测量数据的信噪比,然后采用惯导&里程计组合协同轨检小车导航方法,最后对轨检数据进行处理和解算,得到惯导设备的实时姿态及速度信息,铁轨检测效率高和质量好。



1. 轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,其特征在于,将惯性测量系统搭载在轨检小车上,通过IMU中的陀螺传感器和加速度传感器实时获取轨检设备的姿态和速度信息,对这些信息进行导航解算得到小车的实时位置信息;首先基于地铁轨道检测所需的几何参数和各个参数的主要检测方法,设计搭载惯导设备的轨检小车,采用自适应时频先验解析对惯导数据做预处理,包括轨检小车联合IMU数据、轨检小车搭载里程计测量数据、IMU测量自适应时频先验模型、轨检小车IMU测量自适应解析;然后采用惯导&里程计组合协同轨检小车导航方法,包括IMU协同轨检小车粗对准、最优估算滤波精对准、轨检小车航位推算方法;

第一,通过对惯性测量传感器初始数据的自适应时频先验解析,得到初始数据信号序列不同频率本征模态函数,IMU本征模态函数中的高频部分被认定是噪声,低频部分被认定是有用信号,从IMU初始数据信号中剔除高频部分,提高初始测量数据的信噪比;

第二,基于惯导&里程计组合协同轨检小车导航方法,首先采用惯性导航系统静态初始粗对准方法,其次完成粗对准后采用最优估算滤波手段实施精对准,最后给出惯导&里程计组合协同导航的航位推算方法,进行组合协同导航解算;

第三,对轨检数据进行处理和解算,由三维激光扫描仪测得道壁上的标识点坐标,解算出该时间该里程处轨道检测的实际轨道中线在已知地铁坐标系下的具体值,专门将轨检小车在测量前停止一段时间以获取静态惯性测量单元数据,用于最后对准,经过静态数据对准后进行惯导数据解算,得到惯导设备的实时姿态及速度信息。

2. 根据权利要求1所述的轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,其特征在于,轨检小车联合IMU数据:首先将该套设备安装在轨检小车上,接通惯导设备电源安装卫星导航天线,授时完成后将卫星导航天线拆下,再将轨检小车搬到测量区域,从开始授时起惯导设备持续处在工作状态,将轨检小车搬到轨道上停止一段时间,不仅达到惯导系统设备要求的预热时间,也使惯导设备在停止的这一段期间稳定找北,并且通过后期检核测量数据找到具体轨检数据采集时间;

地铁轨道检测采用捷联惯导系统中IMU采集到的数据,解析后输出的数据包括:循环记数、GPS周、GPS秒、X轴陀螺角增量、Y轴陀螺角增量、Z轴陀螺角增量、X轴加表加速度增量、Y轴加表加速度增量、Z轴加表加速度增量、状态位、状态位,坐标框架为前右下的右手坐标系,前、右、下分别对应捷联惯导设备的X轴、Y轴和Z轴正方向;捷联惯导设备在往轨检小车上安装时,惯导设备的X轴方向垂直于轨检小车横轴指向轨检小车前进方向,Y轴和轨检小车横轴平行,绕X轴转动的角为横滚角,绕Y轴转动的角为俯仰角,绕Z轴转动的角为航向角,测量时IMU信号采样时间间隔为0.005秒,在进行IMU数据解算轨检小车姿态时主要用到IMU测量的GPS秒、X轴陀螺角增量、Y轴陀螺角增量、Z轴陀螺角增量、X轴加表加速度增量、Y轴加表加速度增量和Z轴加表加速度增量。

3. 根据权利要求1所述的轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,其特征在于,轨检小车搭载里程计测量数据:轨检小车设备系统把多个传感器数据集成统一输出,便于后期数据处理时可以对同一个数据文件操作,各个传感器采集到的初始数据都是相关传感器的电信号,数据输出格式为:时间、x倾角、y倾角、前滚计数、后滚计数、圈数和里程计本地时间;

里程计数据采集时间间隔为20毫秒,将初始电信号通过传感器给定参数转换成实用数

据,变换后数据输出格式为:时间、里程、x倾角、y倾角、方位角、x坐标、y坐标、高程、单轮测距数据和双轮测距数据;

将里程传感器、倾角传感器、测距传感器的初始电信号变换成实用数据后,X、Y坐标表示在所对应里程处地铁轨道设中线坐标,变换后的时间表示从里程计启动开始采集数据计时时为0,往后里程计每20毫秒采集一次里程信息,计时增加20毫秒,最后根据标记处GPS时间和系统时间的差异,将系统时间变换到对应的GPS时间系统中,将里程计数据所对应时间变换到GPS时间后,通过时间关系找到IMU测量数据对应的里程计数据。

4. 根据权利要求1所述的轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,其特征在于,IMU测量自适应时频先验模型:找到IMU测量非平稳时间序列 $C(t)$ 的所有极大值点,并用三次样条函数对所有极大值点拟合得到一条相对平滑的曲线,为序列 $C(t)$ 的IMU上包络线;用相同的方法找出 $C(t)$ 的所有极小值点,进行三次样条函数拟合得到包括所有极小值点的IMU下包络线;将IMU上包络线和IMU下包络线的均值作为初始序列 $C(t)$ 的平均包络线 $n_1(t)$,将初始序列减去平均IMU包络线就得到一个去掉低频的新序列 $q_1(t)$,如式1所示:

$$q_1(t) = C(t) - n_1(t) \quad \text{式1}$$

将上述解析过程重复 w 次直到所有平均IMU包络线趋于0再停止解析,得到第一个IMU本征模态函数分量 $C(t)$ 如式2所示:

$$q_{1(w-1)}(t) - n_{1w}(t) = q_{1w}(t), S_1(t) = q_{1w}(t) \quad \text{式2}$$

第一个IMU本征模态函数分量代表初始序列 $C(t)$ 中的高频组分,从初始序列中得出 $b_1(t) = C(t) - S_1(t)$,得到的这一新数据序列中已剔除高频组分,继续对 $b_1(t)$ 进行前述解析得到第二个本征模态函数直到所剩序列不能解析为止,此时所得到的不能在解析的序列 $b_m(t)$ 就是原序列的趋势或者均值,如式3所示:

$$q_1(t) - S_2(t) = q_2(t), \dots, q_{m-1}(t) - S_m(t) = q_m(t) \quad \text{式3}$$

经过上述解析之后,IMU初始序列 $C(t)$ 就能用解析得到的本征模态函数和剩余序列 $b_m(t)$ 来表示,如式4所示:

$$C(t) = \sum S_j(t) + q_m(t) \quad \text{式4}$$

自适应时频先验模型解析的最终结果是把初始时间序列解析成多个IMU本征模态函数,不同的本征模态函数代表不同的物理过程,在对IMU序列 $C(t)$ 进行自适应时频先验模型解析之后,进行希尔伯特变换从而得到时频、幅频图,对任意一个本征函数分量做希尔伯特变换,经过解析得到的本征模态函数具有双显著特点:IMU本征模态函数在整个序列上,其极值点个数和0点个数最多相差一个;原序列中的部分区段平均包络线之均值等于0。

5. 根据权利要求1所述的轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,其特征在于,轨检小车IMU测量自适应解析:通过对IMU测量数据进行自适应时频先验模型解析降低数据噪声,保留数据中趋向性组分,以IMU测量得到的陀螺X轴方向角度增量数据进行自适应时频先验模型解析;

陀螺三轴坐标X、Y和Z轴方向分别指向前、右和下的右手坐标系,其中X轴指向轨检小车沿铁轨前进方向,在对一组时间序列做自适应时频先验解析时,如果序列较长在提取本征模态函数时需要迭代的次数太多,对一分钟的数据进行频率稍低的重采样,自适应时频先验解析从初始序列中先分离出高频组分然后逐步解析得到低频部分,解析迭代得到的本征

模态函数频率依次降低,直到解析得到的平均包络线趋于0时停止解析,得到这一序列解析后的所有本征模态函数以及序列余项;

解析得到第一个高频本征模态函数,高频组分是在得到第一个本征模态函数时,计算上包络线和下包络线所用到的极大值点和极小值点相距较近,对初始数据的高频波动组分表现敏感,在进行数据处理时高频数据是干扰噪声;

初始数据序列减去解析得到的第一个本征模态函数序列得到一组新的数据序列,记为 $t_1(m)$,基于这一新的数据序列再进行一次解析便得到第二个本征模态函数,第二个本征模态函数的频率明显低于第一个本征模态函数,初始数据序列中的高频波动组分已被分离到第一个本征模态函数中,余下的新数据序列中的高频组分又在第二个本征模态函数中体现,但其波动频率没有初始信号中的高频组分波动频率高;

解析得到的第三个本征模态函数,将 $t_1(m)$ 减去解析得到的第二个本征模态函数得到一个新的数据序列记为 $t_2(m)$,将 $t_2(m)$ 解析便得到第三个本征模态函数,第三个本征模态函数的频率低于得到的前双本征模态函数;

解析得到的第四个和第五个本征模态函数,第五个本征模态函数的波动频率已经很低,并且呈现出一定的趋势性变化,这种低频趋向性信号为真实信号,记 $t_2(m)$ 与解析得到的第三个本征模态函数序列之差为 $t_3(m)$,则第四个本征模态函数是由 $t_3(m)$ 解析得到的;同样记 $t_3(m)$ 与解析得到的第四个本征模态函数之差为 $t_4(m)$,则第五个本征模态函数是对 $t_4(m)$ 解析得到,记 $t_4(m)$ 与第五个本征模态函数之差为 $t_5(m)$,经过五次解析初始数据序列与 $t_4(m)$ 与 $t_5(m)$ 频率十分接近,由此解析过程终止;

在对初始序列做完自适应时频先验解析后,解析得到的高频本征模态函数是噪声,对初始序列解析得到的第一本征模态函数、第二本征模态函数和第三本征模态函数是陀螺传感器X轴方向的噪声数据序列,把这三种信号序列从初始序列中剔除,有效提高陀螺传感器数据信号的信噪比。

6. 根据权利要求1所述的轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,其特征在于,IMU协同轨检小车粗对准:初始对准是在一定时间内计算出一个从载体坐标系到导航坐标系的姿态变换矩阵 S_b^m ,粗对准为后续惯性导航系统的精对准提供初始值,粗对准由重力和地球自转量与IMU测量值之间的关系确定出初始变换矩阵 \bar{S}_b^m ,它与 S_b^m 之间还存在小角度偏差,利用地表重力加速度与地球自转角速度在惯导坐标系中的投影值和它们在载体坐标系中的实际测量值之间的变换关系来确定导航坐标系和载体坐标系之间的姿态变换矩阵;

利用空间不共线的双矢量确定惯导的初始姿态,假设惯性导航系统所处位置的地球自转角速度为 ω_{ie} ,纬度值为L,空间向量在导航坐标系和载体坐标系之间的坐标变换关系如式5所示:

$$d^m = S_b^m d^b \quad \text{式5}$$

式中的 d^m 表示导航坐标系中的坐标值, d^b 表示载体坐标中的坐标值, S_b^m 表示载体和导航系之间的坐标转变关系,同时假设地表重力加速度在导航坐标系中的投影表示为式6:

$$g^m = [0, (0, -g)]^T \quad \text{式6}$$

假设地球自转角速度在导航坐标系中的投影为式7:

$$\omega_{ie}^m = [0, \Omega \cos \varphi, \Omega \sin \varphi]^T \quad \text{式 7}$$

式中 ω_{ie}^m 表示地球自转角速度 ω_{ie} 在惯性导航坐标中的投影值, 记地表重力加速度和地球自转角速度在载体坐标系中的投影值分别为 g^b 和 ω_{ie}^b , 由IMU测量的地表重力加速度和地球自转角速度分别为 $\overline{g^b}$ 和 $\overline{\omega_{ie}^b}$, 运用解析式粗对准时使用测量值的平均值来解算, 粗对准求解一个载体坐标系坐标到导航坐标系坐标的粗略变换矩阵, 解出变换矩阵中的所有元素, 构造新的矢量方程:

计算姿态变换矩阵 $\overline{\omega_{ie}^b}$ 利用 g 、构造矢量 $g \times \omega_{ie}$ 和构造矢量 $(g \times \omega_{ie}) \times g$ 建立方程, 解算出初始姿态矩阵。

7. 根据权利要求1所述的轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法, 其特征在于, 最优估算滤波精对准: 在静基座初始对准状态下静基座状态下速度为0, 完成初始粗对准后由导航解算速度即为速度误差, 根据惯导系统误差方程规律反向推导出失准角误差, 由惯导系统静止特征使惯导对准过程中的惯导解算微分简化, 当惯导系统处在静止状态时进一步简化, 得出失准角对天向速度误差没有任何影响, 使用天向加速度计测量值来估计天向加速度计的0偏值, 分析初始对准失准角时, 忽略天向加速度和加速度计0偏的影响, 再加入陀螺漂移和加速度计0偏参数扩充为状态, 建立对准状态空间模型; 将系统视为随机模型并将状态量中的三个不可观测量直接省略, 建立7维随机系统模型, 构成最优估算滤波精对准模型, 计算获取粗对准后的失准角估计值, 实现惯性导航系统初始对准过程。

8. 根据权利要求1所述的轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法, 其特征在于, 轨检小车航位推算方法: 基于地铁隧道环境的特殊性, 采取里程计辅助惯导设备的测量模式, 假设里程计坐标系各轴和载体坐标系重合, oy_n 轴在轨检小车和轨面解出的平面上, 并指向轨检小车沿轨道前进的方向; oz_n 垂直于轮轨解出平面指向上方; ox_n 轴垂直于另外两轴组成的平面, 并指向轨检小车前进方向的右侧, 里程计坐标系的三条轴组成空间右手直角坐标系, 在上述定义的里程计坐标系中, 正常状态下里程计输出的速度信息表示为式8:

$$v_A^n = [0, v_A, 0]^T \quad \text{式 8}$$

IMU所在的载体坐标系和里程计坐标系各轴重合时, 通过IMU三轴陀螺数据解算得到的从载体坐标系到导航坐标系的姿态变换矩阵把里程计信息变换到导航坐标系下, 记姿态变换矩阵为 S_b^m , 里程计在导航坐标系下的变换信息为 v_A^m , 得式9:

$$v_A^m = S_b^m v_A^n \quad \text{式 9}$$

通过里程计速度 v_A^m 推算航位推算定位解算微分方程, 以里程计速度信息代替IMU中的加速度信息, 以航位推算纬度 L_A 代替IMU解算纬度 L , 得到航位推算姿态矩阵微分方程, 采用里程计的里程增量给出航位推算数值更新方法, 里程计数据采样间隔短, 假设里程计在时间区间 $[t_{j-1}, t_j]$ 内观测到里程增量为 ΔC_j , 短时间内轨检小车在直线上行走, 里程计里程增量在里程计坐标系 n 中表示为:

$$\Delta C_j^n = [0, \Delta C_j, 0]^T \quad \text{式 10}$$

这一时间区间内里程增量在导航坐标系中的变换量表示为: $\Delta C_j^m = S_{b(j-1)}^m \Delta C_j^n, S_{b(j-1)}^m$ 表示

t_{j-1} 时刻从载体坐标系到导航坐标系的姿态变换矩阵,就此推算出离散化后的航位推算位置更新算法,同时得出陀螺计算输出的等效旋转矢量的计算方法。

轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法

技术领域

[0001] 本申请涉及一种轨检小车的铁轨检测方法,特别涉及一种轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,属于铁轨检测方法技术领域。

背景技术

[0002] 地铁是城市交通的重要组成部分,其长时间高负荷连续工作,容易发生变形,为维护地铁安全运行,对地铁轨道进行高频次检测已成为地铁运营的重要环节,但目前对轨道进行检测的主要手段是大型轨检车,大型轨检车周期性对轨道进行检测,轨道日常维护则由轨道检测人员人工完成。现行地铁轨道日常维护检测的主要手段是人工拉线检测,用以检测轨道调整后是否达到维护要求。但由于地铁运营时间长,能留给检测人员的实际作业时间少,全人工拉线检测工作效率低,为此要完成线路的安全检测地铁公司不得不投入大量人力物力,造成地铁运营成本的增加,效果也不尽如人意。

[0003] 铁轨在地铁高负荷反复作用下,主要产生弹性形变和永久性形变,弹性形变可在轨道没有负载的窗口期恢复,而永久性形变在这一时期无法恢复并产生叠加,故永久性形变是影响地铁安全运行的主要因素。地铁轨道永久性形变主要表现在对轨道不平顺性的影响上,铁轨不平顺将直接影响轮轨之间的冲击力,破坏地铁运行的稳定性和乘车舒适感,甚至会造成地铁运行事故。用以描述轨道不平顺的几何参数主要有轨距、超高和轨向等,轨道不平顺按激励方向不同分为垂向、横向和复合不平顺,垂直方向上的不平顺主要指高低波动和轨道轨向的扭曲以及两股轨道轨面不平顺,横向不平顺主要包括轨向不平顺、轨距不平顺等,复合不平顺主要指曲线头尾的几何偏差,不同类型的轨道不平对地铁的具体影响方式存在差异。

[0004] 轨道周期性维护由大型轨检车定期检测,在日常维修中为提高检测精度多使用轨检小车代替传统手工检测方式,轨检小车是现行主要轨道检测设备,在轨道检测中的应用对提高管理效率、检测效率和检测精度都有极大的改进,轨检小车外形一般呈Y字型结构和T字型结构,本申请所搭载惯性辅助测量系统的轨检小车是T字结构型,框架由强度较高合金组成。

[0005] 当前主要轨检小车有四川瑞邦机械公司生产的GJY-T-4(T字结构),该款轨检小车适应在-20℃到50℃的温度环境下工作,工作时行进速度不超过8km/h,可以自动准确实时测量、大密度(采样间隔0.125m)采集轨道的静态几何参数,其中主要包括轨距、水平和超高、轨向(10米弦)、正矢(20米弦)和高低,检测数据是经过温度误差补偿功能修正后的,对采集到的检测数据使用ACCESS和ORACLE进行数据管理,数据库可自由变换。江西日月明厂商生产的GJY-TW-EBJ-3等系列T字结构轨检小车,其基本参数及工作环境与瑞邦公司产品相像。

[0006] 瑞士安博格生产的GRP1000、GRP3000等系列产品;以及GPR1000VMS轨道快速测量系统,可以通过CP3点将连续的多个测区连接起来,将所有测区数据采集完成后再进行统一数据解算。另外德国生产的GEDO CE轨检小车系统也是一款主流产品,该套系统除配备有精

度较高的轨距超高测量传感器外,还安装有具有磁驱动、自动跟踪全站仪设备。目前已有科研生产单位将组合导航系统搭载在轨检小车上,主要集中在卫星导航系统在轨检小车上中的应用,如广州南方高铁测量技术有限公司正在研发GPS/INS组合导航系统在高度铁路轨道不平顺检测中的应用。也有人提出将近景摄影测量系统搭载到轨检系统上,通过近景摄影测量理论推算出外方位元素,最后由影像计算出轨道内边缘三维坐标,由此获取轨道检测几何参数。

[0007] 但现行地铁轨道日常检修维护主要依靠检测人员拉线作业,耗费人力物力维护运营成本高;并且这种拉线法测量精度有限,要得到高精度检测数据只能采用轨检小车的静态测量方式,传统轨检小车静态测量方式却又存在测量耗时长,效率低的问题。为解决这一问题,本申请拟在轨检小车系统中加入辅助惯性测量系统,该辅助惯性测量系统主要由里程计和IMU组成,在轨检小车中融入辅助惯性测量系统后将无需再做静态观测,轨检小车可处于动态测量状态,可实时得到轨道检测数据,大幅提高地铁轨道检测效率。

[0008] 综上,现有技术的地铁轨道检测方法还存在许多不足,本申请的难点和待解决的问题主要集中在以下方面:

[0009] 第一,地铁运营方需要每隔一段时间对地铁轨道的平顺性进行检测,根据检测结果及时对轨道进行调整,能对地铁轨道做全面高精度检测的设备主要有大型轨检车和静态轨道检测小车,前一种检测设备检测结果精度较好检测效率高,但检测成本太高无法满足日常运维需求;现行地铁轨道日常检修维护主要依靠检测人员拉线作业,耗费人力物力维护运营成本高;并且这种拉线法测量精度有限,要得到高精度检测数据只能采用轨检小车的静态测量方式,传统轨检小车静态测量方式却又存在测量耗时长,准确率低的问题,轨检小车缺少动态测量状态,无法实时得到轨道检测数据,地铁轨道检测效率低下;

[0010] 第二,传统轨检小车把棱镜安装在小车上,将棱镜中心和轨检小车中心严格标定,全站仪测量棱镜从而得到轨检小车中心坐标,得到实测轨道信息,由于需要全站仪辅助测量,故这种方法的测量状态是间歇式的,无法实时得到轨道检测数据;轨检小车在轨道上行进时难免会发生振动,这一高频运动将会给IMU输出信号加入白噪声,现有技术的数据处理方法中,傅里叶变换能在频域内得到较高分辨率,相应的傅里叶变换在时域的分辨率就会降低,但结合轨检小车检测数据只有几分钟,需要在时域有较高分辨率,所以傅里叶变换在此不是最优选择,并且傅里叶变换存在低时域分辨特征,导致在傅里叶变换下造成许多虚假谐波,无法将噪声和信号做最大限度分离,信号准确性差,无法为后续IMU处理提供高质量数据。;

[0011] 第三,传统铁轨检测小车很难提高轨道检测效率,耗费大量人力物力资源,增大地铁运营维护成本,如果将IMU融入轨检设备,连续测量出实际轨道位置,再结合其它传感器数据得到连续轨道检测数据,能计算出实时轨检参数,但单纯IMU测量解算得到的位置估算精度会随时间飘移,引起IMU长时间工作发生漂移的原因主要有初始对准精度、运载体运动轨迹动态特征和惯性敏感器件本身缺陷,通过使用更精确的惯性测量器件在一定程度上可降低这种误差,但这种惯性器件价格高昂,并非一般民用工程可以使用,这一矛盾很难解决,缺少来自导航系统之外的附加导航信息,惯导数据解算精度较低,无法得到惯导设备的实时姿态及速度信息,铁轨检测效率低和质量差。

发明内容

[0012] 针对大型轨检车检测成本太高无法满足日常运维需求,轨检小车检测效率较低,这一实际地铁轨检作业中的矛盾,本申请将惯性测量系统改进融入地铁轨道检测小车系统中,通过IMU中的陀螺传感器和加速度传感器实时获取轨检设备的姿态和速度信息,对这些信息进行导航解算得到小车的实时位置信息,首先基于地铁轨道检测所需检测的主要几何参数和各个参数的主要检测方法,设计搭载惯导设备的轨检小车,轨检小车在轨道上行进时难免会发生振动,为剔除这一高频振动对惯导测量数据的影响,采用自适应时频先验解析对惯导数据做预处理,从初始数据信号中剔除高频部分,提高初始测量数据的信噪比,然后采用惯导&里程计组合协同轨检小车导航方法,最后对轨检数据进行处理和解算,专门将轨检小车在测量前停止一段时间以获取静态惯性测量单元数据,用于最后对准,经过静态数据对准后进行惯导数据解算,得到惯导设备的实时姿态及速度信息,铁轨检测效率高和质量好,对实现铁轨实时准确检测具有重要的现实意义和巨大的运用价值。

[0013] 为实现以上技术效果,本申请所采用的技术方案如下:

[0014] 轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,将惯性测量系统搭载在轨检小车上,通过IMU中的陀螺传感器和加速度传感器实时获取轨检设备的姿态和速度信息,对这些信息进行导航解算得到小车的实时位置信息;首先基于地铁轨道检测所需的几何参数和各个参数的主要检测方法,设计搭载惯导设备的轨检小车,采用自适应时频先验解析对惯导数据做预处理,包括轨检小车联合IMU数据、轨检小车搭载里程计测量数据、IMU测量自适应时频先验模型、轨检小车IMU测量自适应解析;然后采用惯导&里程计组合协同轨检小车导航方法,包括IMU协同轨检小车粗对准、最优估算滤波精对准、轨检小车航位推算方法;

[0015] 第一,通过对惯性测量传感器初始数据的自适应时频先验解析,得到初始数据信号序列不同频率本征模态函数,IMU本征模态函数中的高频部分被认定是噪声,低频部分被认定是有用信号,从IMU初始数据信号中剔除高频部分,提高初始测量数据的信噪比;

[0016] 第二,基于惯导&里程计组合协同轨检小车导航方法,首先采用惯性导航系统静态初始粗对准方法,其次完成粗对准后采用最优估算滤波手段实施精对准,最后给出惯导&里程计组合协同导航的航位推算方法,进行组合协同导航解算;

[0017] 第三,对轨检数据进行处理和解算,由三维激光扫描仪测得道壁上的标识点坐标,解算出该时间该里程处轨道检测的实际轨道中线在已知地铁坐标系下的具体值,专门将轨检小车在测量前停止一段时间以获取静态惯性测量单元数据,用于最后对准,经过静态数据对准后进行惯导数据解算,得到惯导设备的实时姿态及速度信息。

[0018] 轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,进一步的,轨检小车联合IMU数据:首先将该套设备安装在轨检小车上,接通惯导设备电源安装卫星导航天线,授时完成后将卫星导航天线拆下,再将轨检小车搬到测量区域,从开始授时起惯导设备持续处在工作状态,将轨检小车搬到轨道上停止一段时间,不仅达到惯导系统设备要求的预热时间,也使惯导设备在停止的这一段期间稳定找北,并且通过后期检核测量数据找到具体轨检数据采集时间;

[0019] 地铁轨道检测采用捷联惯导系统设备中IMU采集到的数据,解析后输出的数据包括:循环记数、GPS周、GPS秒、X轴陀螺角增量、Y轴陀螺角增量、Z轴陀螺角增量、X轴加表加速度增量、Y轴加表加速度增量、Z轴加表加速度增量、状态位、状态位,坐标框架为前右下的右

手坐标系,前、右、下分别对应捷联惯导设备的X轴、Y轴和Z轴正方向;捷联惯导设备在往轨检小车上安装时,惯导设备的X轴方向垂直于轨检小车横轴指向轨检小车前进方向,Y轴和轨检小车横轴平行,绕X轴转动的角为横滚角,绕Y轴转动的角为俯仰角,绕Z轴转动的角为航向角,测量时IMU信号采样时间间隔为0.005秒,在进行IMU数据解算轨检小车姿态时主要用到IMU测量的GPS秒、X轴陀螺角增量、Y轴陀螺角增量、Z轴陀螺角增量、X轴加表加速度增量、Y轴加表加速度增量和Z轴加表加速度增量。

[0020] 轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,进一步的,轨检小车搭载里程计测量数据:轨检小车设备系统把多个传感器数据集成统一输出,便于后期数据处理时可以对同一个数据文件操作,各个传感器采集到的初始数据都是相关传感器的电信号,数据输出格式为:时间、x倾角、y倾角、前滚计数、后滚计数、圈数和里程计本地时间;

[0021] 里程计数据采样时间间隔为20毫秒,将初始电信号通过传感器给定参数转换成实用数据,变换后数据输出格式为:时间、里程、x倾角、y倾角、方位角、x坐标、y坐标、高程、单轮测距数据和双轮测距数据;

[0022] 将里程传感器、倾角传感器、测距传感器的初始电信号转换成实用数据后,X、Y坐标表示在所对应里程处地铁轨道设中线坐标,变换后的时间表示从里程计启动开始采集数据时计时为0,往后里程计每20毫秒采集一次里程信息,计时增加20毫秒,最后根据标记处GPS时间和系统时间的差异,将系统时间变换到对应的GPS时间系统中,将里程计数据所对应时间变换到GPS时间后,通过时间关系找到IMU测量数据对应的里程计数据。

[0023] 轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,进一步的,IMU测量自适应时频先验模型:找到IMU测量非平稳时间序列 $C(t)$ 的所有极大值点,并用三次样条函数对所有极大值点拟合得到一条相对平滑的曲线,为序列 $C(t)$ 的IMU上包络线;用相同的方法找出 $C(t)$ 的所有极小值点,进行三次样条函数拟合得到包括所有极小值点的IMU下包络线;将IMU上包络线和IMU下包络线的均值作为初始序列 $C(t)$ 的平均包络线 $n_1(t)$,将初始序列减去平均IMU包络线就得到一个去掉低频的新序列 $q_1(t)$,如式1所示:

$$[0024] \quad q_1(t) = C(t) - n_1(t) \quad \text{式1}$$

[0025] 将上述解析过程重复 w 次直到所有平均IMU包络线趋于0再停止解析,得到第一个IMU本征模态函数分量 $C(t)$ 如式2所示:

$$[0026] \quad q_{1(w-1)}(t) - n_{1w}(t) = q_{1w}(t), S_1(t) = q_{1w}(t) \quad \text{式2}$$

[0027] 第一个IMU本征模态函数分量代表初始序列 $C(t)$ 中的高频组分,从初始序列中得出 $b_1(t) = C(t) - S_1(t)$,得到的这一新数据序列中已剔除高频组分,继续对 $b_1(t)$ 进行前述解析得到第二个本征模态函数直到所剩序列不能解析为止,此时所得到的不能在解析的序列 $b_m(t)$ 就是原序列的趋势或者均值,如式3所示:

$$[0028] \quad q_1(t) - S_2(t) = q_2(t), \dots, q_{m-1}(t) - S_m(t) = q_m(t) \quad \text{式3}$$

[0029] 经过上述解析之后,IMU初始序列 $C(t)$ 就能用解析得到的本征模态函数和剩余序列 $b_m(t)$ 来表示,如式4所示:

$$[0030] \quad C(t) = \sum S_j(t) + q_m(t) \quad \text{式4}$$

[0031] 自适应时频先验模型解析的最终结果是把初始时间序列解析成多个IMU本征模态函数,不同的本征模态函数代表不同的物理过程,在对IMU序列 $C(t)$ 进行自适应时频先验模型解析之后,进行希尔伯特变换从而得到时频、幅频图,对任意一个本征函数分量做希尔伯

特变换,经过解析得到的本征模态函数具有双显著特点:IMU本征模态函数在整个序列上,其极值点个数和0点个数最多相差一个;原序列中的部分区段平均包络线之均值等于0。

[0032] 轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,进一步的,轨检小车IMU测量自适应解析:通过对IMU测量数据进行自适应时频先验模型解析降低数据噪声,保留数据中趋向性组分,以IMU测量得到的陀螺X轴方向角度增量数据进行自适应时频先验模型解析;

[0033] 陀螺三轴坐标X、Y和Z轴方向分别指向前、右和下的右手坐标系,其中X轴指向轨检小车沿铁轨前进方向,在对一组时间序列做自适应时频先验解析时,如果序列较长在提取本征模态函数时需要迭代的次数太多,对一分钟的数据进行频率稍低的重采样,自适应时频先验解析从初始序列中先分离出高频组分然后逐步解析得到低频部分,解析迭代得到的本征模态函数频率依次降低,直到解析得到的平均包络线趋于0时停止解析,得到这一序列解析后的所有本征模函数以及序列余项;

[0034] 解析得到第一个高频本征模态函数,高频组分是在得到第一个本征模态函数时,计算上包络线和下包络线所用到的极大值点和极小值点相距较近,对初始数据的高频波动组分表现敏感,在进行数据处理时高频数据是干扰噪声;

[0035] 初始数据序列减去解析得到的第一个本征模态函数序列得到一组新的数据序列,记为 $t_1(m)$,基于这一新的数据序列再进行一次解析便得到第二个本征模态函数,第二个本征模态函数的频率明显低于第一个本征模态函数,初始数据序列中的高频波动组分已被分离到第一个本征模态函数中,余下的新数据序列中的高频组分又在第二个本征模态函数中体现,但其波动频率没有初始信号中的高频组分波动频率高;

[0036] 解析得到的第三个本征模态函数,将 $t_1(m)$ 减去解析得到的第二个本征模态函数得到一个新的数据序列记为 $t_2(m)$,将 $t_2(m)$ 解析便得到第三个本征模态函数,第三个本征模态函数的频率低于得到的前双本征模态函数;

[0037] 解析得到的第四个和第五个本征模态函数,第五个本征模态函数的波动频率已经很低,并且呈现出一定的趋势性变化,这种低频趋向性信号为真实信号,记 $t_2(m)$ 与解析得到的第三个本征模态函数序列之差为 $t_3(m)$,则第四个本征模态函数是由 $t_3(m)$ 解析得到的;同样记 $t_3(m)$ 与解析得到的第四个本征模态函数之差为 $t_4(m)$,则第五个本征模函数是对 $t_4(m)$ 解析得到,记 $t_4(m)$ 与第五个本征模态函数之差为 $t_5(m)$,经过五次解析初始数据序列与 $t_4(m)$ 与 $t_5(m)$ 频率十分接近,由此解析过程终止;

[0038] 在对初始序列做完自适应时频先验解析后,解析得到的高频本征模态函数是噪声,对初始序列解析得到的第一本征模态函数、第二本征模态函数和第三本征模态函数是陀螺传感器X轴方向的噪声数据序列,把这三种信号序列从初始序列中剔除,有效提高陀螺传感器数据信号的信噪比。

[0039] 轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,进一步的,IMU协同轨检小车粗对准:初始对准是在一定时间内计算出一个从载体坐标系到导航坐标系的姿态变换矩阵 S_b^m ,粗对准为后续惯性导航系统的精对准提供初始值,粗对准由重力和地球自转量与IMU测量值之间的关系确定出初始变换矩阵 \bar{S}_b^m ,它与 S_b^m 之间还存在小角度偏差,利用地表重力加速度与地球自转角速度在惯导坐标系中的投影值和它们在载体坐标系中的实际测量值之间的变换关系来确定导航坐标系和载体坐标系之间的姿态变换矩阵;

[0040] 利用空间不共线的双矢量确定惯导的初始姿态,假设惯性导航系统所处位置的地球自转角速度为 ω_{ie} ,纬度值为L,空间向量在导航坐标系和载体坐标系之间的坐标变换关系如式5所示:

$$[0041] \quad \mathbf{d}^m = \mathbf{S}_b^m \mathbf{d}^b \quad \text{式 5}$$

[0042] 式中的 \mathbf{d}^m 表示导航坐标系中的坐标值, \mathbf{d}^b 表示载体坐标中的坐标值, \mathbf{S}_b^m 表示载体坐标系和导航系之间的坐标转变关系,同时假设地表重力加速度在导航坐标系中的投影表示为式6:

$$[0043] \quad \mathbf{g}^m = [0, 0, -g]^T \quad \text{式 6}$$

[0044] 假设地球自转角速度在导航坐标系中的投影为式7:

$$[0045] \quad \omega_{ie}^m = [0, \Omega \cos \varphi, \Omega \sin \varphi]^T \quad \text{式 7}$$

[0046] 式中 ω_{ie}^m 表示地球自转角速度 ω_{ie} 在惯性导航坐标中的投影值,记地表重力加速度和地球自转角速度在载体坐标系中的投影值分别为 \mathbf{g}^b 和 ω_{ie}^b ,由IMU测量的地表重力加速度和地球自转角速度分别为 $\overline{\mathbf{g}^b}$ 和 $\overline{\omega_{ie}^b}$,运用解析式粗对准时使用测量值的平均值来解算,粗对准求解一个载体坐标系坐标到导航坐标系坐标的粗略变换矩阵,解出变换矩阵中的所有元素,构造新的矢量方程:

[0047] 计算姿态变换矩阵 $\overline{\omega_{ie}^b}$ 利用 \mathbf{g} 、构造矢量 $\mathbf{g} \times \omega_{ie}$ 和构造矢量 $(\mathbf{g} \times \omega_{ie}) \times \mathbf{g}$ 建立方程,解算出初始姿态矩阵。

[0048] 轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,进一步的,最优估算滤波精对准:在静基座初始对准状态下静基座状态下速度为0,完成初始粗对准后由导航解算速度即为速度误差,根据惯导系统误差方程规律反向推导出失准角误差,由惯导系统静止特征使惯导对准过程中的惯导解算微分简化,当惯导系统处在静止状态时进一步简化,得出失准角对天向速度误差没有任何影响,使用天向加速度计测量值来估计天向加速度计的0偏值,分析初始对准失准角时,忽略天向加速度和加速度计0偏的影响,再加入陀螺漂移和加速度计0偏参数扩充为状态,建立对准状态空间模型;将系统视为随机模型并将状态量中的三个不可观测量直接省略,建立7维随机系统模型,构成最优估算滤波精对准模型,计算获取粗对准后的失准角估计值,实现惯性导航系统初始对准过程。

[0049] 轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法,进一步的,轨检小车航位推算方法:基于地铁隧道环境的特殊性,采取里程计辅助惯导设备的测量模式,假设里程计坐标系各轴和载体坐标系重合, oy_n 轴在轨检小车和轨面解出的平面上,并指向轨检小车沿轨道前进的方向; oz_n 垂直于轮轨解出平面向上方; ox_n 轴垂直于另外两轴组成的平面,并指向轨检小车前进方向的右侧,里程计坐标系的三条轴组成空间右手直角坐标系,在上述定义的里程计坐标系中,正常状态下里程计输出的速度信息表示为式8:

$$[0050] \quad \mathbf{v}_A^m = [0, v_A, 0]^T \quad \text{式 8}$$

[0051] IMU所在的载体坐标系和里程计坐标系各轴重合时,通过IMU三轴陀螺数据解算得到的从载体坐标系到导航坐标系的姿态变换矩阵把里程计信息变换到导航坐标系下,记姿态变换矩阵为 \mathbf{S}_b^m ,里程计在导航坐标系下的变换信息为 \mathbf{v}_A^m ,得式9:

$$[0052] \quad v_A^m = S_b^m v_A^n \quad \text{式 9}$$

[0053] 通过里程计速度 v_A^m 推算航位推算定位解算微分方程,以里程计速度信息代替IMU中的加速度信息,以航位推算纬度 L_A 代替IMU解算纬度 L ,得到航位推算姿态矩阵微分方程,采用里程计的里程增量给出航位推算数值更新方法,里程计数据采样间隔短,假设里程计在时间区间 $[t_{j-1}, t_j]$ 内观测到里程增量为 ΔC_j ,短时间内轨检小车在直线上行走,里程计里程增量在里程计坐标系 n 中表示为:

$$[0054] \quad \Delta C_j^n = [0, \Delta C_j, 0]^T \quad \text{式 10}$$

[0055] 这一时间区间内里程增量在导航坐标系中的变换量表示为: $\Delta C_j^m = S_{b(j-1)}^m \Delta C_j^n$, $S_{b(j-1)}^m$ 表示 t_{j-1} 时刻从载体坐标系到导航坐标系的姿态变换矩阵,就此推算出离散化后的航位推算位置更新算法,同时得出陀螺计算输出的等效旋转矢量的计算方法。

[0056] 与现有技术相比,本申请的创新点和优势在于:

[0057] 第一,针对大型轨检车检测成本太高无法满足日常运维需求,轨检小车满足日常轨道维护的成本和精度要求,但检测效率比较低,这一实际地铁轨检作业中的矛盾,本申请将惯性测量系统改进融入地铁轨道检测小车系统中,用以提高传统静态轨道检测小车轨检作业效率,通过IMU中的陀螺传感器和加速度传感器实时获取轨检设备的姿态和速度信息,对这些信息进行导航解算得到小车的实时位置信息,首先基于地铁轨道检测所需检测的主要几何参数和各个参数的主要检测方法,设计搭载惯导设备的轨检小车,轨检小车在轨道上行进时难免会发生振动,为剔除这一高频振动对惯导测量数据的影响,对初始数据序列做信号处理,采用自适应时频先验解析对惯导数据做预处理,从初始数据信号中剔除高频部分,提高初始测量数据的信噪比,然后采用惯导&里程计组合协同轨检小车导航方法,最后对轨检数据进行处理和解算,为提高初始对准效果,专门将轨检小车在测量前停止一段时间以获取静态惯性测量单元数据,用于最后对准,经过静态数据对准后进行惯导数据解算,得到惯导设备的实时姿态及速度信息,铁轨检测效率高和质量好,对实现铁轨实时准确检测具有重要的现实意义和巨大的运用价值;

[0058] 第二,现行地铁轨道日常检修维护主要依靠检测人员拉线作业,耗费人力物力维护运营成本高;并且这种拉线法测量精度有限,要得到高精度检测数据只能采用轨检小车的静态测量方式,却又存在测量耗时长,效率低的问题。为解决这一问题,本申请在轨检小车系统中加入辅助惯性测量系统,该辅助惯性测量系统主要由里程计和IMU组成,在轨检小车中融入辅助惯性测量系统后将无需再做静态观测,轨检小车可处于动态测量状态,可实时得到轨道检测数据,加速度传感器和陀螺传感器输出的测量信号是有用信号和噪声的叠加,本申请数据预处理是将噪声和信号做最大限度分离,提高信号准确性,为后续IMU处理提供高质量数据,将轨检小车搬到轨道上停止一段时间,不仅达到惯导系统设备要求的预热时间,也可以使惯导设备在停止的这段时间稳定找北,并且通过后期检核测量数据找到具体轨检数据采集时间,大幅提高地铁轨道检测效率。;

[0059] 第三,本申请将IMU融入轨检设备,连续测量出实际轨道位置,再结合其它传感器数据得到连续轨道检测数据,进而计算出实时轨检参数。但单纯IMU测量解算得到的位置估

算精度会随时间飘移,引起IMU长时间工作发生漂移的原因主要有初始对准精度、运载体运动轨迹动态特征和惯性敏感器件本身缺陷,通过使用更精确的惯性测量器件在一定程度上可降低这种误差,但这种惯性器件价格高昂,并非一般民用工程可以使用。为解决这一矛盾引入里程计和惯导组合协同导航,采用来自导航系统之外的附加导航信息,提高导航系统的精度;由于仅对惯导做初始粗对准就进行惯导导航解算,解算出的结果将迅速发散,本申请进一步对惯导系统做精对准尽量减小失准角误差不可或缺,并给出惯导&里程计组合协同导航的航位推算方法,进行组合协同导航解算,实现动态测量,实时得到高精度的轨道检测数据。

附图说明

[0060] 图1是轨检小车静止运动中的惯导X轴向陀螺角增量示意图。

[0061] 图2是陀螺传感器X轴向角度增量的重采样数据示意图。

[0062] 图3是陀螺X轴向角度增量做自适应时频先验解析得到的第一个IMF图。

[0063] 图4是陀螺X轴向角度增量做自适应时频先验解析得到的第二个IMF图。

[0064] 图5是陀螺X轴向角度增量做自适应时频先验解析得到的第三个IMF图。

[0065] 图6是陀螺X轴向角度增量做自适应时频先验解析得到的第四五个IMF图。

[0066] 图7是自适应时频先验解析剔除高频成分后的信号示意图。

[0067] 具体实施方法

[0068] 下面结合附图,对本申请提供的轨检小车导航IMU协同测量的铁轨检测方法的技术方案进行进一步的描述,使本领域的技术人员能更好的理解本申请并能予以实施。

[0069] 日益庞大的地铁轨道网络的日常运维是地铁运营方的主要工作内容之一,钢轨在经过一段时间的使用后难免平顺性降低,地铁在不平顺的轨道上行驶将影响行车平稳和安全,因而地铁运营方需要每隔一段时间对地铁轨道的平顺性进行检测,根据检测结果及时对轨道进行调整。能对地铁轨道做全面高精度检测的设备主要有大型轨检车和静态轨道检测小车,前一种检测设备检测结果精度较好检测效率高,但检测成本太高无法满足日常运维需求;后者可以满足日常轨道维护的成本和精度要求,但检测效率比较低。为了解决这一实际地铁轨检作业中的矛盾,本申请探索将惯性测量系统改进融入地铁轨道检测小车系统中,用以提高传统静态轨道检测小车轨检作业效率。

[0070] 传统轨检小车把棱镜安装在小车上,将棱镜中心和轨检小车中心严格标定,全站仪测量棱镜从而得到轨检小车中心坐标,得到实测轨道信息。由于需要全站仪辅助测量,故这种方法的测量状态是间歇式的。将惯性测量系统搭载在轨检小车上,通过IMU中的陀螺传感器和加速度传感器实时获取轨检设备的姿态和速度信息,对这些信息进行导航解算得到小车的实时位置信息,首先基于地铁轨道检测所需检测的主要几何参数和各个参数的主要检测方法,设计搭载惯导设备的轨检小车,轨检小车在轨道上行进时难免会发生振动,这一高频运动将会给IMU输出信号加入白噪声,为剔除这一高频振动对惯导测量数据的影响,需要对初始数据序列做信号处理,为提高测量数据质量本申请采用自适应时频先验解析对惯导数据做预处理,包括轨检小车联合IMU数据、轨检小车搭载里程计测量数据、IMU测量自适应时频先验模型、轨检小车IMU测量自适应解析,自适应时频先验解析数据处理通过解析得到初始数据信号的不同频率本征模态函数,本征模态函数中的高频部分被认定是噪声,低

频部分被认定是有用信号,从初始数据信号中剔除高频部分,提高初始测量数据的信噪比;然后采用惯导&里程计组合协同轨检小车导航方法,包括IMU协同轨检小车粗对准、最优估算滤波精对准、轨检小车航位推算方法;

[0071] 最后对轨检数据进行处理和解算,由三维激光扫描仪测得道壁上的标识点坐标,解算出该时间该里程处轨道检测的实际轨道中线在已知地铁坐标系下的具体值,为提高初始对准效果,专门将轨检小车在测量前停止一段时间以获取静态惯性测量单元数据,用于最后对准,经过静态数据对准后进行惯导数据解算,得到惯导设备的实时姿态及速度信息。

[0072] 一、自适应时频先验解析数据处理

[0073] (一) IMU信号数据

[0074] IMU包括三个相互独立的单轴加速度传感器和三个单轴陀螺,利用这三个加速度传感器检测运载体在载体坐标系中的加速度信号;当载体发生角度改变时陀螺传感器记录输出角度变化信号,并将检测信号每隔一定时间输出。载体在三维空间中的运动在时间空间维度上连续,但传感器只能获取连续参数过程的离散采样记录,传感器能检测到的信号只能以电信号的方式离散输出,得到一个连续过程的离散时间序列。加速度传感器和陀螺传感器输出的测量信号是有用信号和噪声的叠加,数据预处理是将噪声和信号做最大限度分离,提高信号准确性,为后续IMU处理提供高质量数据。

[0075] 现有技术的数据处理方法中,傅里叶变换能在频域内得到较高分辨率,相应的傅里叶变换在时域的分辨率就会降低,但结合轨检小车检测数据只有几分钟,需要在时域有较高分辨率,所以傅里叶变换在此不是最优选择,并且傅里叶变换存在低时域分辨特征,导致在傅里叶变换下造成许多虚假谐波。

[0076] (二) 轨检小车联合IMU数据

[0077] IMU测量载体沿载体坐标系的三轴角速度和加速度,测量与载体坐标系固连的角速度和加速度增量信息,首先将该套设备安装在轨检小车上,接通惯导设备电源安装卫星导航天线,授时完成后将卫星导航天线拆下,再将轨检小车搬到测量区域,从开始授时起惯导设备持续处在工作状态,将轨检小车搬到轨道上停止一段时间,不仅达到惯导系统设备要求的预热时间,也可以使惯导设备在停止的这一段期间稳定找北,并且通过后期检核测量数据找到具体轨检数据采集时间。

[0078] 地铁轨道检测采用捷联惯导系统中IMU采集到的数据,解析后输出的数据包括:循环记数、GPS周、GPS秒、X轴陀螺角增量、Y轴陀螺角增量、Z轴陀螺角增量、X轴加表加速度增量、Y轴加表加速度增量、Z轴加表加速度增量、状态位、状态位,坐标框架为前右下的右手坐标系,前、右、下分别对应捷联惯导设备的X轴、Y轴和Z轴正方向;捷联惯导设备在往轨检小车上安装时,惯导设备的X轴方向垂直于轨检小车横轴指向轨检小车前进方向,Y轴和轨检小车横轴平行,绕X轴转动的角为横滚角,绕Y轴转动的角为俯仰角,绕Z轴转动的角为航向角,测量时IMU信号采样时间间隔为0.005秒,在进行IMU数据解算轨检小车姿态时主要用到IMU测量的GPS秒、X轴陀螺角增量、Y轴陀螺角增量、Z轴陀螺角增量、X轴加表加速度增量、Y轴加表加速度增量和Z轴加表加速度增量。

[0079] (三) 轨检小车搭载里程计测量数据

[0080] 轨检小车搭载高精度里程计传感器,里程计传感器通过记录轨检小车车轮转动圈数,再通过小车车轮半径从而计算出小车行走距离,里程计数据辅助IMU数据解算,由于惯

导设备具有随时间漂移的误差特征,单一的长时间没有校准的IMU测量数据发散,无法精确解算出载体的位置信息。里程计传感器输出时间和该时间对应的里程读数,但轨检小车设备系统把多个传感器数据集成统一输出,便于后期数据处理时可以对同一个数据文件操作,各个传感器采集到的初始数据都是相关传感器的电信号,数据输出格式为:时间(制表符)、x倾角、y倾角、前滚计数、后滚计数、圈数和里程计本地时间。

[0081] 里程计数据采样时间间隔为20毫秒,将初始电信号通过传感器给定参数变换成实用数据,变换后数据输出格式为:时间、里程、x倾角、y倾角、方位角、x坐标、y坐标、高程、单轮测距数据和双轮测距数据。

[0082] 将里程传感器、倾角传感器、测距传感器的初始电信号变换成实用数据后,X、Y坐标表示在所对应里程处地铁轨道设中线坐标,变换后的时间表示从里程计启动开始采集数据时计时为0,往后里程计每20毫秒采集一次里程信息,计时增加20毫秒,最后根据标记处GPS时间和系统时间的差异,将系统时间变换到对应的GPS时间系统中,将里程计数据所对应时间变换到GPS时间后,通过时间关系找到IMU测量数据对应的里程计数据。

[0083] (四) IMU测量自适应时频先验模型

[0084] 找到IMU测量非平稳时间序列 $C(t)$ 的所有极大值点,并用三次样条函数对所有极大值点拟合得到一条相对平滑的曲线,为序列 $C(t)$ 的IMU上包络线;用相同的方法找出 $C(t)$ 的所有极小值点,进行三次样条函数拟合得到包括所有极小值点的IMU下包络线;将IMU上包络线和IMU下包络线的均值作为初始序列 $C(t)$ 的平均包络线 $n_1(t)$,将初始序列减去平均IMU包络线就得到一个去掉低频的新序列 $q_1(t)$,如式1所示:

$$[0085] \quad q_1(t) = C(t) - n_1(t) \quad \text{式1}$$

[0086] 将上述解析过程重复 w 次直到所有平均IMU包络线趋于0再停止解析,得到第一个IMU本征模态函数分量 $C(t)$ 如式2所示:

$$[0087] \quad q_{1(w-1)}(t) - n_{1w}(t) = q_{1w}(t), S_1(t) = q_{1w}(t) \quad \text{式2}$$

[0088] 第一个IMU本征模态函数分量代表初始序列 $C(t)$ 中的高频组分,从初始序列中得出 $b_1(t) = C(t) - S_1(t)$,得到的这一新数据序列中已剔除高频组分,继续对 $b_1(t)$ 进行前述解析得到第二个本征模态函数直到所剩序列不能解析为止,此时所得到的不能在解析的序列 $b_m(t)$ 就是原序列的趋势或者均值,如式3所示:

$$[0089] \quad q_1(t) - S_2(t) = q_2(t), \dots, q_{m-1}(t) - S_m(t) = q_m(t) \quad \text{式3}$$

[0090] 经过上述解析之后,IMU初始序列 $C(t)$ 就能用解析得到的本征模态函数和剩余序列 $b_m(t)$ 来表示,如式4所示:

$$[0091] \quad C(t) = \sum S_j(t) + q_m(t) \quad \text{式4}$$

[0092] 自适应时频先验模型解析的最终结果是把初始时间序列解析成多个IMU本征模态函数,不同的本征模态函数代表不同的物理过程,在对IMU序列 $C(t)$ 进行自适应时频先验模型解析之后,进行希尔伯特变换从而得到时频、幅频图,对任意一个本征函数分量做希尔伯特变换,经过解析得到的本征模态函数具有双显著特点:IMU本征模态函数在整个序列上,其极值点个数和0点个数最多相差一个;原序列中的部分区段平均包络线之均值等于0。

[0093] (五) 轨检小车IMU测量自适应解析

[0094] 通过对IMU测量数据进行自适应时频先验模型解析降低数据噪声,保留数据中趋向性组分,以IMU测量得到的陀螺X轴方向角度增量数据为实施例进行自适应时频先验模型

解析,图1表示IMU测量三分钟时的陀螺x轴方向角度增量。

[0095] 陀螺三轴坐标X、Y和Z轴方向分别指向前、右和下的右手坐标系,其中X轴指向轨检小车沿铁轨前进方向,从图1中可以清晰的分辨出搭载IMU轨检小车的运动趋势。图中数据趋于0且较平稳的时间段代表轨检小车处于静止状态,而数据波动幅度较大且数据振幅较大的时间段对应轨检小车处于运动状态,在对一组时间序列做自适应时频先验解析时,如果序列较长在提取本征模态函数时需要迭代的次数太多,对一分钟的数据进行频率稍低的重采样。采样后的数据如图2所示,图2中表示的即IMU处在运动状态时采集到的60秒陀螺传感器X轴向角度增量的重采样数据,从图2中可以看出这一时间段的数据序列,极值点个数多于0点个数,且二者之间个数之差大于2,故可对这一数据序列做自适应时频先验解析。自适应时频先验解析从初始序列中先分离出高频组分然后逐步解析得到低频部分,解析迭代得到的本征模态函数频率依次降低,直到解析得到的平均包络线趋于0时停止解析,得到这一序列解析后的所有本征模函数以及序列余项,图3表示将该60秒陀螺X轴向角度增量数据做自适应时频先验解析得到的第一个高频组分本征模态函数:

[0096] 图3即为解析得到的第一个高频本征模态函数,高频组分是在得到第一个本征模态函数时,计算上包络线和下包络线所用到的极大值点和极小值点相距较近,对初始数据的高频波动组分表现敏感,在进行数据处理时高频数据是干扰噪声。

[0097] 初始数据序列减去解析得到的第一个本征模态函数序列得到一组新的数据序列,记为 $t_1(m)$,基于这一新的数据序列再进行一次解析便得到第二个本征模态函数,如图4所示,第二个本征模态函数的频率明显低于第一个本征模态函数,初始数据序列中的高频波动组分已被分离到第一个本征模态函数中,余下的新数据序列中的高频组分又在第二个本征模态函数中体现,但其波动频率没有初始信号中的高频组分波动频率高。

[0098] 图5表示解析得到的第三个本征模态函数,将 $t_1(m)$ 减去解析得到的第二个本征模态函数得到一个新的数据序列记为 $t_2(m)$,将 $t_2(m)$ 解析便得到第三个本征模态函数,第三个本征模态函数的频率低于得到的前双本征模态函数。

[0099] 图6表示解析得到的第四个和第五个本征模态函数,可以看出第五个本征模态函数的波动频率已经很低,并且呈现出一定的趋势性变化,这种低频趋向性信号为真实信号,记 $t_2(m)$ 与解析得到的第三个本征模态函数序列之差为 $t_3(m)$,则第四个本征模态函数是由 $t_3(m)$ 解析得到的;同样记 $t_3(m)$ 与解析得到的第四个本征模态函数之差为 $t_4(m)$,则第五个本征模函数是对 $t_4(m)$ 解析得到,记 $t_4(m)$ 与第五个本征模态函数之差为 $t_5(m)$,经过五次解析初始数据序列与 $t_4(m)$ 与 $t_5(m)$ 频率十分接近,由此解析过程终止。

[0100] 在对初始序列做完自适应时频先验解析后,解析得到的高频本征模态函数是噪声,对初始序列解析得到的第一本征模态函数、第二本征模态函数和第三本征模态函数是陀螺传感器X轴方向的噪声数据序列,把这三种信号序列从初始序列中剔除,有效提高陀螺传感器数据信号的信噪比。图7即表示剔除三种高频信号后的初始信号数据序列。里程传感器在采集数据过程中,在某一时间段内数据增量均值随时间变化,故里程传感器采集到的数据序列表现为非平稳序列。

[0101] 二、惯导&里程计组合协同轨检小车导航

[0102] 传统铁轨检测小车很难提高轨道检测效率,耗费大量人力物力资源,增大地铁运营维护成本。将IMU融入轨检设备,连续测量出实际轨道位置,再结合其它传感器数据得到

连续轨道检测数据,进而计算出实时轨检参数。但单纯IMU测量解算得到的位置估算精度会随时间飘移,引起IMU长时间工作发生漂移的原因主要有初始对准精度、运载体运动轨迹动态特征和惯性敏感器件本身缺陷,通过使用更精确的惯性测量器件在一定程度上可降低这种误差,但这种惯性器件价格高昂,并非一般民用工程可以使用。为解决这一矛盾引入里程计和惯导组合协同导航,采用来自导航系统之外的附加导航信息,提高导航系统的精度。

[0103] (一) IMU协同轨检小车粗对准

[0104] 初始对准是在一定时间内计算出一个从载体坐标系到导航坐标系的姿态变换矩阵 S_b^m ,粗对准为后续惯性导航系统的精对准提供初始值,粗对准由重力和地球自转量与IMU测量值之间的关系确定出初始变换矩阵 \bar{S}_b^m ,它与 S_b^m 之间还存在小角度偏差,利用地表重力加速度与地球自转角速度在惯导坐标系中的投影值和它们在载体坐标系中的实际测量值之间的变换关系来确定导航坐标系和载体坐标系之间的姿态变换矩阵。

[0105] 利用空间不共线的双矢量确定惯导的初始姿态,假设惯性导航系统所处位置的地球自转角速度为 ω_{ie} ,纬度值为L,空间向量在导航坐标系和载体坐标系之间的坐标变换关系如式5所示:

$$[0106] \quad d^m = S_b^m d^b \quad \text{式 5}$$

[0107] 式中的 d^m 表示导航坐标系中的坐标值, d^b 表示载体坐标中的坐标值, S_b^m 表示载体系和导航系之间的坐标转变关系,同时假设地表重力加速度在导航坐标系中的投影表示为式6:

$$[0108] \quad g^m = [0, 0, -g]^T \quad \text{式 6}$$

[0109] 假设地球自转角速度在导航坐标系中的投影为式7:

$$[0110] \quad \omega_{ie}^m = [0, \Omega \cos \varphi, \Omega \sin \varphi]^T \quad \text{式 7}$$

[0111] 式中 ω_{ie}^m 表示地球自转角速度 ω_{ie} 在惯性导航坐标中的投影值,记地表重力加速度和地球自转角速度在载体坐标系中的投影值分别为 g^b 和 ω_{ie}^b ,由IMU测量的地表重力加速度和地球自转角速度分别为 \bar{g}^b 和 $\bar{\omega}_{ie}^b$,运用解析式粗对准时使用测量值的平均值来解算,粗对准求解一个载体坐标系坐标到导航坐标系坐标的粗略变换矩阵,解出变换矩阵中的所有元素,构造新的矢量方程。

[0112] 计算姿态变换矩阵 $\bar{\omega}_{ie}^b$ 利用 g 、构造矢量 $g \times \omega_{ie}$ 和构造矢量 $(g \times \omega_{ie}) \times g$ 建立方程,解算出初始姿态矩阵。

[0113] (二) 最优估算滤波精对准

[0114] 经过初始粗对准获取捷联惯导粗略的姿态矩阵,即获取粗略的导航坐标系指向,但得到的粗略导航坐标系和真实导航坐标系之间存在偏差,为失准角误差。仅对惯导做初始粗对准就进行惯导导航解算,解算出的结果将迅速发散。故进一步对惯导系统做精对准尽量减小失准角误差不可或缺。

[0115] 在静基座初始对准状态下静基座状态下速度为0,完成初始粗对准后由导航解算速度即为速度误差,根据惯导系统误差方程规律反向推导出失准角误差,由惯导系统静止特征使惯导对准过程中的惯导解算微分简化,当惯导系统处在静止状态时进一步简化,得

出失准角对天向速度误差没有任何影响,使用天向加速度计测量值来估计天向加速度计的0偏值,分析初始对准失准角时,忽略天向加速度和加速度计0偏的影响,再加入陀螺漂移和加速度计0偏参数扩充为状态,建立对准状态空间模型;将系统视为随机模型并将状态量中的三个不可观测量直接省略,建立7维随机系统模型,构成最优估算滤波精对准模型,计算获取粗对准后的失准角估计值,实现惯性导航系统初始对准过程。

[0116] (三) 轨检小车航位推算方法

[0117] 单一惯性导航系统不能长时间精确解算出载体在导航坐标系中的坐标,原因是惯性导航系统中的IMU测量值会随时间发生漂移,所以要获取长时间精确的惯导解算结果,必须借助惯导以外的其它信息辅助惯性测量组件的测量值,基于地铁隧道环境的特殊性,采取里程计辅助惯导设备的测量模式。

[0118] 轨检小车在轨道上正常行走时,里程测量轮和轨面时刻紧密接触,此过程中里程轮没有发生弹跳和打滑,由里程计测得的里程数据再经由改化就可得到轨道中线的里程数。对测量得到的里程数据改化是因为铁轨不是全部平直的,里程轮一侧和轨道中线之间有一段距离,曲线轨道上会造成杆臂差,假设里程计坐标系各轴和载体坐标系重合, oy_n 轴在轨检小车和轨面解出的平面上,并指向轨检小车沿轨道前进的方向; oz_n 垂直于轮轨解出平面指向上方; ox_n 轴垂直于另外两轴组成的平面,并指向轨检小车前进方向的右侧,里程计坐标系的三条轴组成空间右手直角坐标系,在上述定义的里程计坐标系中,正常状态下里程计输出的速度信息表示为式8:

$$[0119] \quad v_A^n = [0, v_A, 0]^T \quad \text{式 8}$$

[0120] IMU所在的载体坐标系和里程计坐标系各轴重合时,通过IMU三轴陀螺数据解算得到的从载体坐标系到导航坐标系的姿态变换矩阵把里程计信息变换到导航坐标系下,记姿态变换矩阵为 S_B^m ,里程计在导航坐标系下的变换信息为 v_A^m ,得式9:

$$[0121] \quad v_A^m = S_B^m v_A^n \quad \text{式 9}$$

[0122] 通过里程计速度 v_A^m 推算航位推算定位解算微分方程,以里程计速度信息代替IMU中的加速度信息,以航位推算纬度 L_A 代替IMU解算纬度 L ,得到航位推算姿态矩阵微分方程,但该航位推算微分方程不含加速度计的相关信息,采用里程计的里程增量给出航位推算数值更新方法,里程计数据采样间隔短,只有0.02秒左右,假设里程计在时间区间 $[t_{j-1}, t_j]$ 内观测到里程增量为 ΔC_j ,短时间内轨检小车在直线上行走,里程计里程增量在里程计坐标系n中表示为:

$$[0123] \quad \Delta C_j^n = [0, \Delta C_j, 0]^T \quad \text{式 10}$$

[0124] 这一时间区间内里程增量在导航坐标系中的变换量表示为: $\Delta C_j^m = S_{b(j-1)}^m \Delta C_j^n$, $S_{b(j-1)}^m$ 表示 t_{j-1} 时刻从载体坐标系到导航坐标系的姿态变换矩阵,就此推算出离散化后的航位推算位置更新算法,同时得出陀螺计算输出的等效旋转矢量的计算方法。

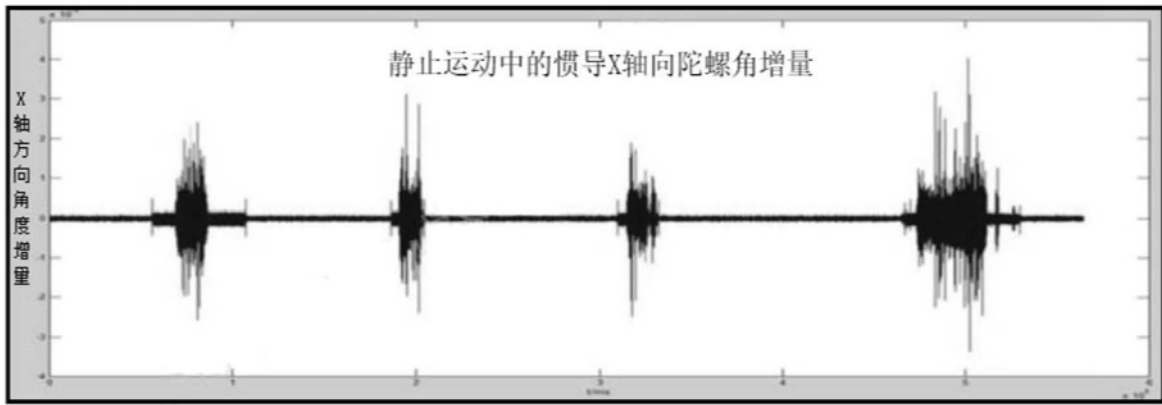


图1

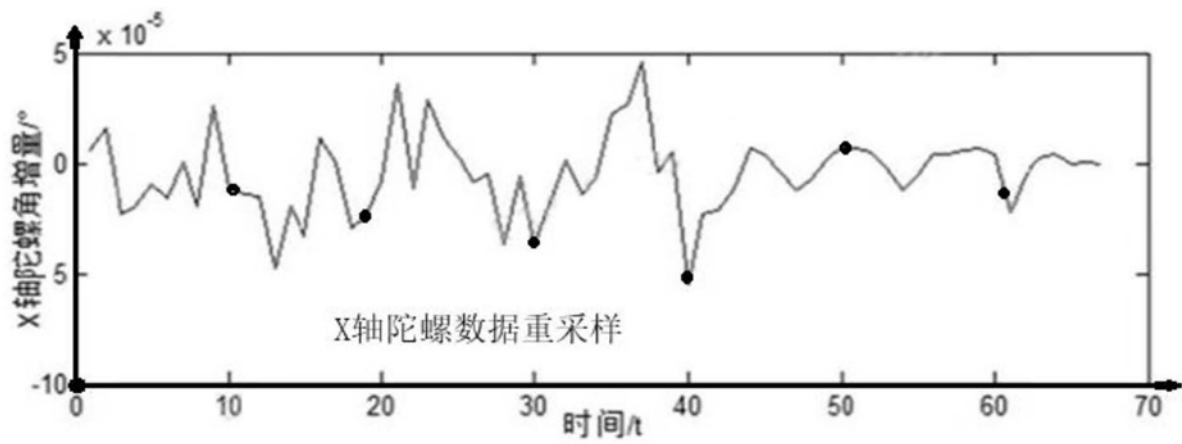


图2

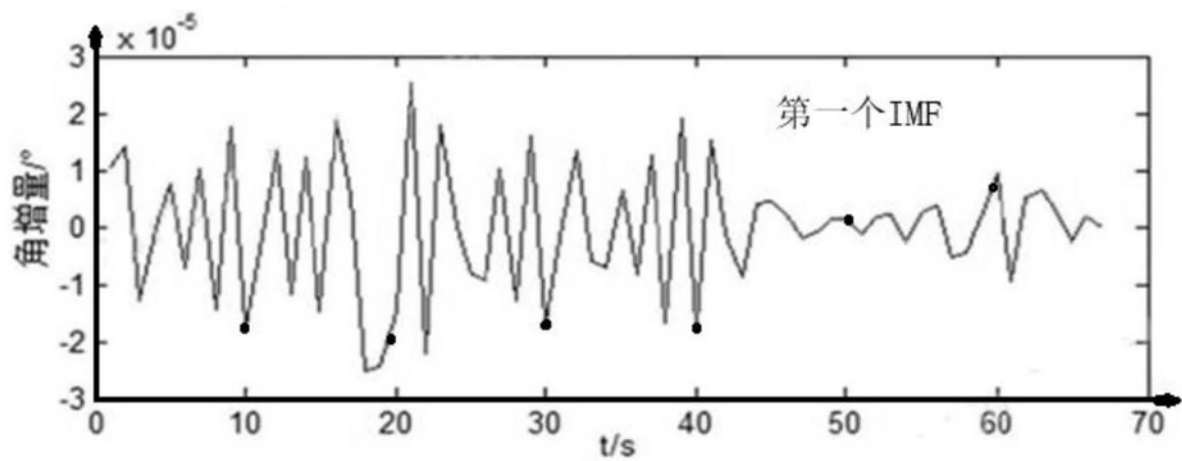


图3

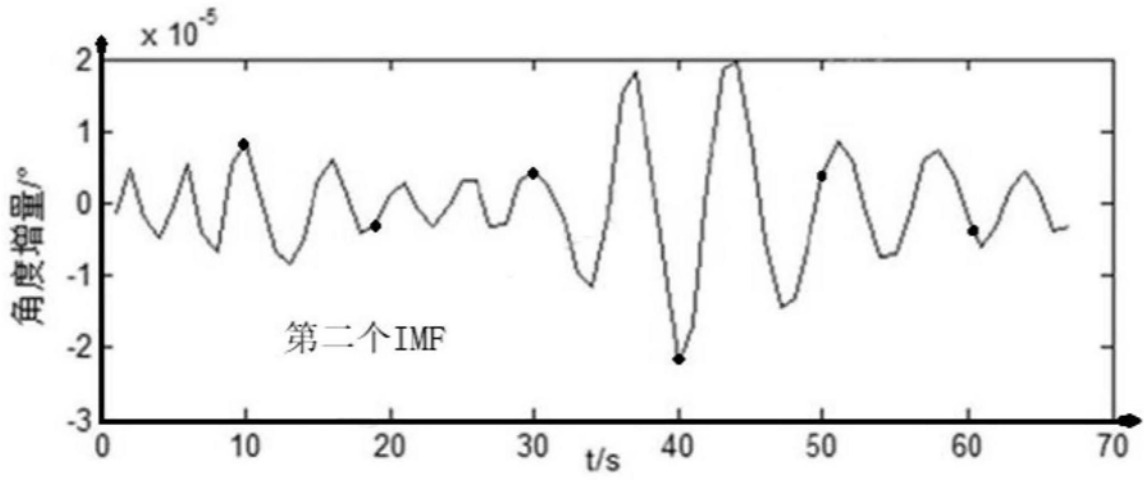


图4

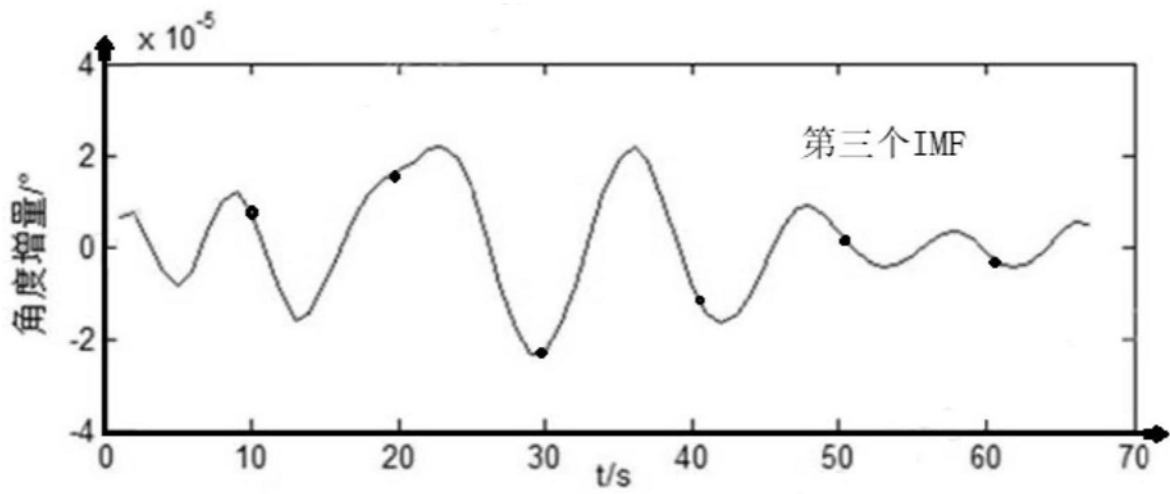


图5

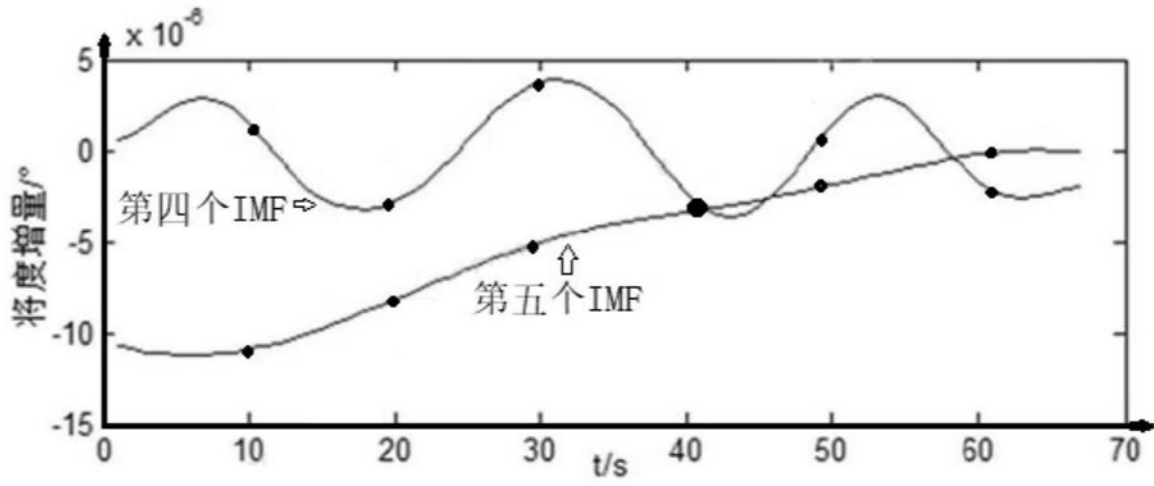


图6

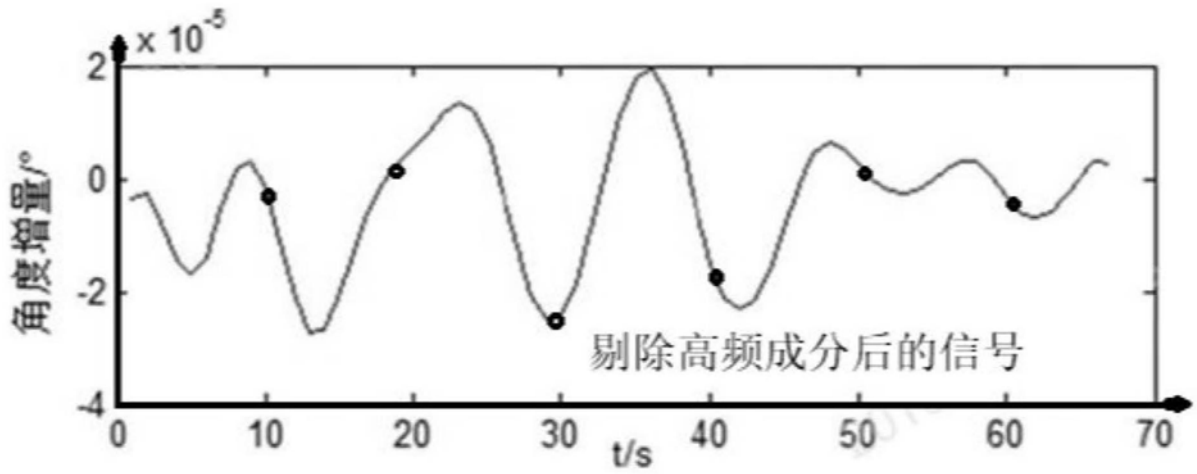


图7