



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110658543 A

(43)申请公布日 2020.01.07

(21)申请号 201810700229.4

(22)申请日 2018.06.29

(71)申请人 北京自动化控制设备研究所

地址 100074 北京市丰台区云岗北区西里1  
号院

(72)发明人 邓继权 郭玉胜 王海军 艾赢涛  
马小艳 张吉先 莫明岗

(74)专利代理机构 核工业专利中心 11007

代理人 刘昕宇

(51)Int.Cl.

G01S 19/47(2010.01)

G01S 19/50(2010.01)

G01S 17/42(2006.01)

权利要求书2页 说明书6页

(54)发明名称

一种基于非接触式测量的高速铁路轨道几何参数检测方法

(57)摘要

本发明属于精密检测技术,具体为一种基于非接触式测量的高速铁路轨道几何参数检测方法,首先通过惯性导航系统与高精度差分卫星定位系统进行组合导航解算,得到惯性测量单元的空间位置及姿态信息,由于激光测距仪与惯性测量单元的安装关系可以通过标定获得,从而可以得到激光测距仪的位置及姿态信息,根据拟合得到的轨道特征点三维坐标,可以计算得到测量过程中任意处轨道特征点相对于起始点的三维位移信息,从而能够实现轨道几何参数高精度、高效率、动态、连续测量。

1. 一种基于非接触式测量的高速铁路轨道几何参数检测方法,其特征在于,该方法包括如下步骤:

步骤1) 惯性/卫星组合导航计算,得到惯性测量单元的位置、速度及姿态信息

步骤2) 激光测量数据处理

2.1) 将惯性测量数据与激光测量数据时间对齐;

2.2) 对不同测量时刻测量得到的轨道特征点坐标有效性进行判断;

2.3) 计算得到有效轨道特征点的三维位置坐标

步骤3) 轨道位置坐标拟合计算

3.1) 根据轨道特征点坐标计算各测量点相对于初始点的位移S

$$S = S + \Delta S$$

$$\Delta S = \sqrt{(\tilde{p}_{x,i+1} - \tilde{p}_{x,i})^2 + (\tilde{p}_{y,i+1} - \tilde{p}_{y,i})^2 + (\tilde{p}_{z,i+1} - \tilde{p}_{z,i})^2}$$

式中,  $(\tilde{p}_{x,i}, \tilde{p}_{y,i}, \tilde{p}_{z,i})$ 、 $(\tilde{p}_{x,i+1}, \tilde{p}_{y,i+1}, \tilde{p}_{z,i+1})$  为相邻两个时刻轨道特征点三维坐标,  $\Delta S$  为相邻两点之间的位移变化量;

3.2) 分段坐标拟合

以0.625m为固定长度进行分段坐标拟合,若 $S > 0.625m$ ,则可以得到拟合后的轨道位置坐标

$$\begin{cases} \tilde{p}'_x = \tilde{p}_{x,i} + (\tilde{p}_{x,i+1} - \tilde{p}_{x,i}) / \Delta S \cdot (0.625 \cdot n - S) \\ \tilde{p}'_y = \tilde{p}_{y,i} + (\tilde{p}_{y,i+1} - \tilde{p}_{y,i}) / \Delta S \cdot (0.625 \cdot n - S) \\ \tilde{p}'_z = \tilde{p}_{z,i} + (\tilde{p}_{z,i+1} - \tilde{p}_{z,i}) / \Delta S \cdot (0.625 \cdot n - S) \end{cases}$$

式中,  $(\tilde{p}'_x, \tilde{p}'_y, \tilde{p}'_z)$  为拟合得到的轨道特征点三维坐标, n 为以0.625m间隔拟合的次数;

步骤4) 利用拟合得到的轨道特征点三维坐标  $(\tilde{p}'_x, \tilde{p}'_y, \tilde{p}'_z)$ , 确定测量过程中任意处轨道特征点相对于起始点的三维位移信息。

2. 如权利要求1所述的一种基于非接触式测量的高速铁路轨道几何参数检测方法,其特征在于,所述的步骤1) 具体为:

1.1) 确定状态方程

$$\dot{X} = AX + w$$

$$\text{状态变量 } X = [\delta V_N \ \delta V_U \ \delta V_E \ \phi_N \ \phi_U \ \phi_E \ \delta L \ \delta h \ \delta \lambda \ \nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z]^T$$

w 为系统噪声, A 为系统状态矩阵

1.2) 确定测量方程

Kalman 滤波量测方程为

$$Z = HX + v$$

式中, Z 表示 Kalman 滤波观测值, H 表示系统观测矩阵, v 为系统量测噪声;

观测量为  $Z = V_{SINS}^n - V_{GPS}^n$ ,  $V_{SINS}^n$  表示惯导解算得到的导航坐标系速度,  $V_{GPS}^n$  表示差分卫星定位输出的导航坐标系速度分量;

观测矩阵 H 为

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0_{3 \times 12} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

1.3) 进行卡尔曼滤波估计,对惯导系统位置误差、速度误差以及姿态误差进行估计;

1.4) 对得到的状态估计值进行误差修正,得到惯性测量单元的位置、速度及姿态信息。

3. 如权利要求1所述的一种基于非接触式测量的高速铁路轨道几何参数检测方法,其特征在于,所述的步骤2.2) 对不同测量时刻测量得到的轨道特征点坐标有效性进行判断,具体为:

设不同时刻激光测量得到的轨道特征点坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ 、 $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 、 $(x_{i+2}, y_{i+2}, z_{i+2})$

若  $|x_{i+1}-x_i| > \zeta$  且  $|x_{i+2}-x_i| < \zeta$ , 则  $x_{i+1}$  为异常坐标值,需要重新对  $x_{i+1}$  进行拟合,  $x_{i+1} = (x_i + x_{i+2}) / 2$ ;

若  $|y_{i+1}-y_i| > \zeta$  且  $|y_{i+2}-y_i| < \zeta$ , 则  $y_{i+1}$  为异常坐标值,需要重新对  $y_{i+1}$  进行拟合,  $y_{i+1} = (y_i + y_{i+2}) / 2$ ;

若  $|z_{i+1}-z_i| > \zeta$  且  $|z_{i+2}-z_i| < \zeta$ , 则  $z_{i+1}$  为异常坐标值,需要重新对  $z_{i+1}$  进行拟合,  $z_{i+1} = (z_i + z_{i+2}) / 2$ ;

其中,  $\zeta$  是常值,为 0.1-0.5。

4. 如权利要求1所述的一种基于非接触式测量的高速铁路轨道几何参数检测方法,其特征在于,所述的步骤2.3) 具体为:

设经过有效性判断后激光测量得到的轨道特征点相对坐标为  $(x, y, z)$ , 根据惯性/卫星组合得到的位置  $(p_x, p_y, p_z)$ , 可以计算得到轨道特征点的三维位置坐标  $(\tilde{p}_x, \tilde{p}_y, \tilde{p}_z)$ 。

$$\begin{bmatrix} \tilde{p}_x \\ \tilde{p}_y \\ \tilde{p}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} + C_b^n \bullet L^b + C_b^n \bullet C_\alpha \bullet \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

式中,  $L^b$  为激光测距仪与惯性测量单元之间的杆臂, 试验前通过标定获得,  $C_\alpha$  为激光测量坐标系到载体坐标系的转换矩阵,  $C_b^n$  为惯导系统载体坐标系到导航坐标系的转换矩阵。

## 一种基于非接触式测量的高速铁路轨道几何参数检测方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于精密检测技术,具体涉及一种基于非接触式测量的高速铁路轨道几何参数检测方法。

### 背景技术

[0002] 为保障轨道交通的运营安全,近年来,轨道精密检测技术得到快速发展,多个国家投入了大量的人力物力来研制和更新各种轨道检测方法,以满足当今铁路高速和重载的要求。由于车载式动态检测方式对正常运营影响小、效率高、速度快,且真实地反映了在列车运行条件下的基础设施状态,已经成为铁路和城轨交通基础设施安全状态的主要检测手段之一。

[0003] 轨道几何参数状态检测主要包括轨距、轨向、高低等检测项目,其中轨距是指同一横截面左、右股钢轨工作面下16mm处轨距点之间的距离。常用的测量轨距方法主要有接触式测量和非接触式测量两大类。接触式轨距测量方法是利用线位移传感器实现对轨距的测量,检测过程中通过机械结构保证传感器与待测轨道轨距点时刻接触,测量效率低,且不适用于高速测量。常用的非接触式轨距测量方法是利用摄像机构对轨距内侧断面连续摄像,通过图像重构的方法重现轨道内侧面曲线,计算出轨距值。这种测量方法测量精度高,且不受检测速度影响,但是这种方法易受光线干扰,对使用环境要求苛刻,使用范围受到限制。对轨道轨向、高低的检测方法主要包括弦测法、惯性基准法等,其中弦测法是指采用人工拉线的方法在轨道上真实搭建一条弦线,通过测量轨道轨顶面(轨距点)与该弦线的相对位移,评价轨道高低(轨向)平顺性。弦测法波长与检测弦的长度密切相关,当需要分析多种波长的轨道平顺性时,需要更换检测装置重新测量,或者根据当前检测结果进行“以小推大”的转换,前者增加了检测人员的工作量,工作效率低,后者存在较大误差。惯性基准法是在运用捷联惯性导航技术的基础上,分别用加速度计测量运载体在三个轴向的加速度信息,用陀螺仪测量三个轴向的角速率信息,通过加速度以及角速率信息建立一个惯性参考基准,再利用位移传感器或图像传感器测量轨道相对于基准的相对位置,从而得到钢轨在惯性坐标系内的相对位置。

[0004] 目前,世界大多数国家的铁路轨道检测方法都经历了由弦测法到惯性基准法的转变,尤其在高速铁路检测领域,各个国家都在着力研制基于惯性技术的综合性强、精度高、速度快、高智能且高可靠性的先进轨道检测方法。如美国Ensco公司研制的T10型轨检车就采用了惯性基准测量原理和非接触式测量方法,可以对轨道几何参数,钢轨断面、波浪磨耗等参数进行测量。意大利“阿基米德”号综合检测列车同样采用基于惯性基准法的非接触式测量方案,能够检测包括轨道几何参数、钢轨断面、钢轨波浪磨耗、接触网及受流状态、通信和信号、车体和轴箱加速度以及轮轨作用力在内的119个不同参数。法国MVG综合检测列车,检测速度设计为320km/h,检测参数包括了轨道几何参数、钢轨断面、钢轨表面、通信信号、线路环境数字图像、扣件、枕木和道碴等各项基础设施状态。我国GJ-3型、GJ-4型以及GJ-5型轨道检测车均采用基于惯性技术的轨道检测方法,但对检测车的行驶速度有着严格的要

求,以GJ-5型轨道检测车为例,其最高测量时速仅为180km/h。从国内外的技术发展来看,在高速环境下,基于惯性技术的非接触式测量是普遍采用的方式,主要是通过陀螺角速率信息不断更新姿态矩阵,将加速度信息转换到地理坐标系中,并对转换后的加速度信号进行连续的两级积分,从而获得惯性测量单元的空间运动轨迹,再通过图像重构等方法重现轨道内侧曲面计算,得到轨距、平顺性等轨道几何参数。但是,这种方法对轨道检测车的运行速度有严格的要求,而且很难满足高铁对150米以上长波平顺性的测量需求。本发明提出一种基于惯性/激光测量的轨道几何参数检测方法,对列车运行速度没有严格的要求,可以应用于正常营运的列车,并且可以满足150米、300米等长波平顺性的测量需求。

## 发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种基于非接触式测量的高速铁路轨道几何参数检测方法。

[0006] 本发明的技术方案如下:

[0007] 一种基于非接触式测量的高速铁路轨道几何参数检测方法,该方法包括如下步骤:

[0008] 步骤1) 惯性/卫星组合导航计算,得到惯性测量单元的位置、速度及姿态信息

[0009] 步骤2) 激光测量数据处理

[0010] 2.1) 将惯性测量数据与激光测量数据时间对齐;

[0011] 2.2) 对不同测量时刻测量得到的轨道特征点坐标有效性进行判断;

[0012] 2.3) 计算得到有效轨道特征点的三维位置坐标

[0013] 步骤3) 轨道位置坐标拟合计算

[0014] 3.1) 根据轨道特征点坐标计算各测量点相对于初始点的位移S

[0015]  $S = S + \Delta S$

[0016] 
$$\Delta S = \sqrt{(\tilde{p}_{x,i+1} - \tilde{p}_{x,i})^2 + (\tilde{p}_{y,i+1} - \tilde{p}_{y,i})^2 + (\tilde{p}_{z,i+1} - \tilde{p}_{z,i})^2}$$

[0017] 式中,  $(\tilde{p}_{x,i}, \tilde{p}_{y,i}, \tilde{p}_{z,i})$ 、 $(\tilde{p}_{x,i+1}, \tilde{p}_{y,i+1}, \tilde{p}_{z,i+1})$  为相邻两个时刻轨道特征点三维坐标,  $\Delta S$  为相邻两点之间的位移变化量;

[0018] 3.2) 分段坐标拟合

[0019] 以0.625m为固定长度进行分段坐标拟合,若  $S > 0.625m$ , 则可以得到拟合后的轨道位置坐标

[0020] 
$$\begin{cases} \tilde{p}'_x = \tilde{p}_{x,i} + (\tilde{p}_{x,i+1} - \tilde{p}_{x,i}) / \Delta S \cdot (0.625 \cdot n - S) \\ \tilde{p}'_y = \tilde{p}_{y,i} + (\tilde{p}_{y,i+1} - \tilde{p}_{y,i}) / \Delta S \cdot (0.625 \cdot n - S) \\ \tilde{p}'_z = \tilde{p}_{z,i} + (\tilde{p}_{z,i+1} - \tilde{p}_{z,i}) / \Delta S \cdot (0.625 \cdot n - S) \end{cases}$$

[0021] 式中,  $(\tilde{p}'_x, \tilde{p}'_y, \tilde{p}'_z)$  为拟合得到的轨道特征点三维坐标, n 为以0.625m间隔拟合的次數;

[0022] 步骤4) 利用拟合得到的轨道特征点三维坐标  $(\tilde{p}'_x, \tilde{p}'_y, \tilde{p}'_z)$ , 确定测量过程中任意处轨道特征点相对于起始点的三维位移信息。

[0023] 所述的步骤1) 具体为:

[0024] 1.1) 确定状态方程

$$[0025] \quad \dot{X} = AX + w$$

[0026] 状态变量  $X = [\delta V_N \delta V_U \delta V_E \phi_N \phi_U \phi_E \delta L \delta h \delta \lambda \nabla_x \nabla_y \nabla_z \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z]^T$

[0027]  $w$ 为系统噪声, $A$ 为系统状态矩阵

[0028] 1.2) 确定测量方程

[0029] Kalman滤波量测方程为

$$[0030] \quad Z = HX + v$$

[0031] 式中, $Z$ 表示Kalman滤波观测量, $H$ 表示系统观测矩阵, $v$ 为系统量测噪声;

[0032] 观测量为  $Z = V_{SINS}^n - V_{GPS}^n$ ,  $V_{SINS}^n$  表示惯导解算得到的导航坐标系速度、 $V_{GPS}^n$  表示差分卫星定位输出的导航坐标系速度分量;

[0033] 观测矩阵 $H$ 为

$$[0034] \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \mathbf{0}_{3 \times 12} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0035] 1.3) 进行卡尔曼滤波估计,对惯导系统位置误差、速度误差以及姿态误差进行估计;

[0036] 1.4) 对得到的状态估计值进行误差修正,得到惯性测量单元的位置、速度及姿态信息。

[0037] 所述的步骤2.2) 对不同测量时刻测量得到的轨道特征点坐标有效性进行判断,具体为:

[0038] 设不同时刻激光测量得到的轨道特征点坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ 、 $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 、 $(x_{i+2}, y_{i+2}, z_{i+2})$

[0039] 若  $|x_{i+1} - x_i| > \zeta$  且  $|x_{i+2} - x_i| < \zeta$ , 则  $x_{i+1}$  为异常坐标值,需要重新对  $x_{i+1}$  进行拟合,  $x_{i+1} = (x_i + x_{i+2}) / 2$ ;

[0040] 若  $|y_{i+1} - y_i| > \zeta$  且  $|y_{i+2} - y_i| < \zeta$ , 则  $y_{i+1}$  为异常坐标值,需要重新对  $y_{i+1}$  进行拟合,  $y_{i+1} = (y_i + y_{i+2}) / 2$ ;

[0041] 若  $|z_{i+1} - z_i| > \zeta$  且  $|z_{i+2} - z_i| < \zeta$ , 则  $z_{i+1}$  为异常坐标值,需要重新对  $z_{i+1}$  进行拟合,  $z_{i+1} = (z_i + z_{i+2}) / 2$ ;

[0042] 其中, $\zeta$ 是常值,为0.1-0.5。

[0043] 所述的步骤2.3) 具体为:

[0044] 设经过有效性判断后激光测量得到的轨道特征点相对坐标为  $(x, y, z)$ , 根据惯性/卫星组合得到的位置  $(p_x, p_y, p_z)$ , 可以计算得到轨道特征点的三维位置坐标  $(\tilde{p}_x, \tilde{p}_y, \tilde{p}_z)$ 。

$$[0045] \quad \begin{bmatrix} \tilde{p}_x \\ \tilde{p}_y \\ \tilde{p}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} + C_b^n \cdot L^b + C_b^n \cdot C_\alpha \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

[0046] 式中, $L^b$ 为激光测距仪与惯性测量单元之间的杆臂,试验前通过标定获得, $C_\alpha$ 为激

光测量坐标系到载体坐标系的转换矩阵,  $C_b^n$  为惯导系统载体坐标系到导航坐标系的转换矩阵。

[0047] 本发明的显著效果在于:

[0048] 本方法以惯性测量为基准, 利用惯性测量单元的位置、姿态信息以及激光测量得到的轨道特征点坐标信息, 求得左、右两侧钢轨的平顺性以及左右两轨之间的轨距值。首先通过惯性导航系统与高精度差分卫星定位系统进行组合导航解算, 得到惯性测量单元的空间位置及姿态信息, 由于激光测距仪与惯性测量单元的安装关系可以通过标定获得, 从而可以得到激光测距仪的位置及姿态信息。再结合激光测距仪测得的左、右两侧轨道特征点的坐标值, 可以得到左、右两侧钢轨的位置坐标, 参照TB/T3147-2012中规定的轨距、平顺性计算方法可以实现轨道几何参数的高精度、连续测量。

### 具体实施方式

[0049] 下面结合具体实施例对本发明作进一步详细说明。

[0050] 步骤1惯性/卫星组合导航计算

[0051] 1.1) 确定状态方程

[0052] 首先利用高精度的差分卫星定位 (DGPS) 信息, 采用基于Kalman滤波的组合导航方法, 得到惯性测量单元的位置、速度以及姿态信息。SINS/DGPS组合导航状态变量包括: 北向、天向、东向速度误差  $\delta V_N$ 、 $\delta V_U$ 、 $\delta V_E$ , 北向、天向、东向姿态误差  $\phi_N$ 、 $\phi_U$ 、 $\phi_E$ , 北向、天向、东向位置误差  $\delta\varphi$ 、 $\delta h$ 、 $\delta\lambda$ , 载体系各轴向的陀螺漂移  $\varepsilon_x^b$ 、 $\varepsilon_y^b$ 、 $\varepsilon_z^b$  以及加速度计零偏  $\nabla_x^b$ 、 $\nabla_y^b$ 、 $\nabla_z^b$ 。

[0053] 确定系统状态变量

$$[0054] \quad X = [\delta V_N \delta V_U \delta V_E \phi_N \phi_U \phi_E \delta L \delta h \delta \lambda \nabla_x \nabla_y \nabla_z \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z]^T$$

[0055] 确定状态方程

$$[0056] \quad \dot{X} = AX + w$$

[0057] 式中,  $w$  为系统噪声,  $A$  为系统状态矩阵, 根据状态变量, 参照捷联惯导系统误差方程, 可以得到系统状态矩阵中各元素的值。

[0058] 1.2) 确定测量方程

[0059] Kalman滤波量测方程形式如下:

$$[0060] \quad Z = HX + v$$

[0061] 式中,  $Z$  表示Kalman滤波观测量,  $H$  表示系统观测矩阵,  $v$  为系统量测噪声。

[0062] SINS/DGPS组合导航Kalman滤波采用速度匹配模式, 以惯导解算得到的速度和差分卫星定位测得的速度之差值作为Kalman滤波器的观测量。即观测量:

$$[0063] \quad Z = V_{SINS}^n - V_{GPS}^n$$

[0064] 式中,  $V_{SINS}^n$  表示惯导解算得到的导航坐标系速度、 $V_{GPS}^n$  表示差分卫星定位输出的导航坐标系速度分量。

[0065] 根据观测量可以得到对应的量测矩阵  $H$

$$[0066] \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \mathbf{0}_{3 \times 12} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0067] 1.3) 滤波计算

[0068] 根据组合导航系统状态方程和量测方程,选择的初始状态估计值 $X_0$ 、初始估计均方误差阵 $P_0$ 、系统噪声初始方差阵 $Q_0$ 以及量测噪声方差阵 $R_k$ ,参照Kalman滤波计算公式,可以实现对各项误差的准确估计,属于成熟的现有技术不再赘述。

[0069] 1.4) 误差修正

[0070] 利用Kalman滤波计算得到的状态估计值,对惯导系统位置误差、速度误差以及姿态误差进行修正可以得到惯性测量单元的位置、速度及姿态信息。

[0071] 步骤2激光测量数据处理

[0072] 2.1) 时间同步

[0073] 根据惯性测量数据与激光测量数据的时间戳,将两者的测量数据进行时间上的对齐。

[0074] 2.2) 异常数据剔除

[0075] 假设不同时刻激光测量得到的轨道特征点坐标为 $(x_i, y_i, z_i)$ 、 $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 、 $(x_{i+2}, y_{i+2}, z_{i+2})$ ,需要对各时刻测量坐标有效性进行判断。

[0076] 以 $x$ 坐标为例,若 $|x_{i+1}-x_i| > \zeta$ 且 $|x_{i+2}-x_i| < \zeta$ ,则 $x_{i+1}$ 为异常坐标值,需要重新对 $x_{i+1}$ 进行拟合, $x_{i+1} = (x_i + x_{i+2}) / 2$ , $\zeta$ 是常值,为0.1-0.5。

[0077] 采用同样的方法,需要对 $y$ 坐标、 $z$ 坐标进行有效性判断。

[0078] 若 $|y_{i+1}-y_i| > \zeta$ 且 $|y_{i+2}-y_i| < \zeta$ ,则 $y_{i+1}$ 为异常坐标值,需要重新对 $y_{i+1}$ 进行拟合, $y_{i+1} = (y_i + y_{i+2}) / 2$ , $\zeta$ 是常值,为0.1-0.5。

[0079] 若 $|z_{i+1}-z_i| > \zeta$ 且 $|z_{i+2}-z_i| < \zeta$ ,则 $z_{i+1}$ 为异常坐标值,需要重新对 $z_{i+1}$ 进行拟合, $z_{i+1} = (z_i + z_{i+2}) / 2$ , $\zeta$ 是常值,为0.1-0.5。

[0080] 2.3) 空间坐标转换

[0081] 设经过有效性判断后激光测量得到的轨道特征点相对坐标为 $(x, y, z)$ ,根据惯性/卫星组合得到的位置 $(p_x, p_y, p_z)$ ,可以计算得到轨道特征点的三维位置坐标 $(\tilde{p}_x, \tilde{p}_y, \tilde{p}_z)$ 。

$$[0082] \quad \begin{bmatrix} \tilde{p}_x \\ \tilde{p}_y \\ \tilde{p}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} + C_b^n \cdot L^b + C_b^n \cdot C_\alpha \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

[0083] 式中, $L^b$ 为激光测距仪与惯性测量单元之间的杆臂,试验前通过标定获得, $C_\alpha$ 为激光测量坐标系到载体坐标系的转换矩阵,试验前通过标定获得, $C_b^n$ 为惯导系统载体坐标系到导航坐标系的转换矩阵。

[0084] 步骤3轨道位置坐标拟合计算

[0085] 由于高速铁路行驶速度快,需要在各采样点之间进行坐标拟合计算。

[0086] 3.1) 根据轨道特征点坐标计算各测量点相对于初始点的位移 $S$

[0087]  $S = S + \Delta S$



$$[0088] \quad \Delta S = \sqrt{(\tilde{p}_{x,i+1} - \tilde{p}_{x,i})^2 + (\tilde{p}_{y,i+1} - \tilde{p}_{y,i})^2 + (\tilde{p}_{z,i+1} - \tilde{p}_{z,i})^2}$$

[0089] 式中,  $(\tilde{p}_{x,i}, \tilde{p}_{y,i}, \tilde{p}_{z,i})$ 、 $(\tilde{p}_{x,i+1}, \tilde{p}_{y,i+1}, \tilde{p}_{z,i+1})$  为相邻两个时刻轨道特征点三维坐标,  $\Delta S$  为相邻两点之间的位移变化量。

[0090] 3.2) 分段坐标拟合

[0091] 以 0.625m 为固定长度进行分段坐标拟合, 若  $S > 0.625m$ , 则可以得到拟合后的轨道位置坐标

$$[0092] \quad \begin{cases} \tilde{p}'_x = \tilde{p}_{x,i} + (\tilde{p}_{x,i+1} - \tilde{p}_{x,i}) / \Delta S \cdot (0.625 \cdot n - S) \\ \tilde{p}'_y = \tilde{p}_{y,i} + (\tilde{p}_{y,i+1} - \tilde{p}_{y,i}) / \Delta S \cdot (0.625 \cdot n - S) \\ \tilde{p}'_z = \tilde{p}_{z,i} + (\tilde{p}_{z,i+1} - \tilde{p}_{z,i}) / \Delta S \cdot (0.625 \cdot n - S) \end{cases}$$

[0093] 式中,  $(\tilde{p}'_x, \tilde{p}'_y, \tilde{p}'_z)$  为拟合得到的轨道特征点三维坐标,  $n$  为以 0.625m 间隔拟合的次數。

[0094] 步骤 4 轨道几何参数计算

[0095] 根据拟合得到的轨道特征点三维坐标  $(\tilde{p}'_x, \tilde{p}'_y, \tilde{p}'_z)$ , 可以计算得到测量过程中任意处轨道特征点相对于起始点的三维位移信息, 参照 TB/T3147-2012 中规定的轨距、平顺性计算方法可以得到所需的几何参数, 实现了轨道几何参数的高精度、连续测量。