

基于惯导/数据链的动态相对定位方法

郝菁, 蔚保国, 何成龙

(卫星导航系统与装备技术国家重点实验室, 石家庄 050081)

摘要: 针对卫星导航定位在复杂环境不可靠情况下如何实现无人机机间相对定位问题, 提出一种基于机载惯性导航系统与机间数据链测距相结合的动态相对定位算法; 该方法利用机载数据链通信测距能力与机载惯性导航系统输出的无人机速度矢量信息结合, 建立机间相对定位模型, 通过最小二乘法对无人机之间的相对位置进行估计, 实现无人机机间的实时相对定位能力; 由于通过最小二乘法解算出的相对定位结果依然存在误差, 针对最小二乘法相对定位误差, 提出秩亏网平差算法对无人机机群间的相对定位误差进行校正; 仿真结果表明: 基于最小二乘法的相对定位方法可以减缓惯性导航系统相对定位误差发散速度并且将惯导相对定位精度提高到3倍左右, 通过秩亏网平差算法校正将最小二乘相对定位精度提高2倍。

关键词: 惯性导航系统; 数据链; 协同定位; 秩亏网平差

Dynamic Relative Positioning Method Based on Inertial Navigation and Data Link

Hao Jing, Yu Baoguo

(Satellite Navigation Systems and Equipment Technology National Key Laboratories,
Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Aiming at the problem of how to realize the relative positioning between unmanned aerial vehicles (UAV) when satellite navigation and positioning are unreliable in complex environment, a dynamic relative positioning algorithm based on the combination of airborne inertial navigation system and data link ranging is proposed. The method using airborne data link communications ranging capacity and output of airborne inertial navigation system of UAV combined with the velocity vector information, relative positioning between the machine model is established, by the least squares method to estimate the relative position between the UAV, realizing the real-time relative positioning between UAV machine capacity. There is still an error in the relative location of the relative location that is calculated from the least squares. Aimed at least squares relative positioning error, the rank-deficit adjustment algorithm is proposed to correct the relative positioning error between UAV groups. Simulation results indicate: The relative positioning method based on the least square method can slow down the divergence of relative positioning error of inertial navigation system and improve relative positioning accuracy of inertial navigation system to about 3 times, the rank-deficit net adjustment algorithm can improve the accuracy of least square relative positioning by 2 times.

Keywords: inertial navigation system; data link; co-location; rank deficit net adjustment

0 引言

无人机通过机间信息交互实现机间信息共享, 进行无人机共同执行任务, 并且增加无人机探索方式, 实现资源优化配置, 从而有效提高无人机工作性能^[1]。无人机协同工作时, 需要互相了解各自的相对位置情况, 因此高精度的无人机相对定位是无人机机间协作的前提^[2]。

目前对于无人机协同工作, 可通过卫星导航系统得到各个无人机间的绝对位置, 从而获得无人机间的相对位置信息, 达到无人机机间相对定位的目的^[3]。但是, 随着现代科技技术的飞速发展, 电子信号干扰技术发展迅速, 而卫星导航系统传输链路脆弱易受欺骗干扰, 在复杂干扰环境下依靠卫星导航系统进行导航定位的无人机协同工作模

式已经不能得到可靠地保障。找到一种复杂环境下可靠的导航定位方法尤为重要。惯性导航系统是一种隐蔽的自主导航系统, 通过无人机自身惯导信息也可以获得无人机间相对位置关系, 但是惯性导航系统存在误差随时间累积的问题, 长时间工作情况下定位精度不能保障^[4]。数据链同样具有很强的抗干扰能力, 并且可以满足复杂环境下的无人机之间的通信与测距功能^[5]。针对上述问题, 将机间测距与惯性导航系统结合使用, 提出一种可以实现复杂环境下适用于高运动状态的机间相对定位算法, 实现复杂环境下可靠的相对定位能力。该方法可在卫星导航系统不可用时作为应急备份导航系统。

1 机间惯导/数据链协同定位原理

惯导系统的定位误差呈正态分布, 并且惯导定位误差随时间积累。为每架无人机装备高精度测距数据链, 用来进行无人机间实时相互测距, 并传输无人机之间惯性导航系统输出的信息和无人机之间的测距信息^[6]。通过机间惯

收稿日期: 2018-08-08; 修回日期: 2018-08-28。

作者简介: 郝菁(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事网络 PNT 中无人机集群动态网络相对定位方向的研究。

性导航系统提供的现在时刻和前两个时刻的速度信息与数据链测距信息协同建立最小二乘相对定位方程，估计出无人机间相对位置信息。以数据链测距值与最小二乘相对定位结果的差值作为观测量，通过秩亏网平差算法对相对定位误差进行估计，进一步修正相对定位结果。

1.1 机间协同相对定位原理

在动态条件下无人机相对运动时，可将无人机间相对位置变化看作由无人机相对运动速度引起的伪距变化，无人机运动在足够短时间内将无人机相对速度矢量在机间相对位置矢量上的投影作为无人机相对矢量的变化。因此，进行惯导数据链协同相对定位时，由惯导系统输出的速度信息得到机间近似伪距变化率，将数据链测距值作为机间伪距真值，由此建立惯导速度与数据测距值间的数学关系式。具体推导过程如下。

两无人机位置如图 1 所示，初始时刻位置为 A、B， t_1 时刻数据链测距值为 $\vec{l}_0(t_1) = B - A$ ，惯导系统输出的 A、B 的速度分别为 $\vec{v}_1(t_1)$ 、 $\vec{v}_2(t_1)$ ，数据链测距周期为 Δt ，经过时间间隔 Δt 后，无人机 A、B 的位置到达 A1、B1，两无人机在 t_2 时刻的测距值为 $\vec{l}_1(t_1 + \Delta t) = B1 - A1$ ，根据图 1 可得 $\vec{l}_1(t_1 + \Delta t) = \vec{l}_0(t) + \int_t^{t+\Delta t} d\vec{v}(t_1)$ ， $d\vec{v}(t_1)$ 为 $\vec{v}_1(t_1)$ 、 $\vec{v}_2(t_1)$ 的相对速度^[7]。基本原理可由下式表示：

$$\vec{l}_0(t) + \int_t^{t+\Delta t} \vec{v}_j(t) dt - \int_t^{t+\Delta t} \vec{v}_i(t) dt = \vec{l}_1(t + \Delta t) \quad (1)$$

式中， $\vec{l}_0(t)$ 为初始时刻 i, j 两个节点间的距离，为节点 i 在 t 时刻的速度矢量，为 j 节点在 t 时刻的速度矢量， $\vec{l}_1(t + \Delta t)$ 为经过后 i, j 两个节点间的相对位置矢量。

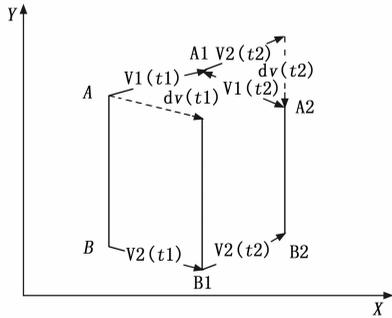


图 1 相对位置关系示意图

设初始 t_1 时刻无人机间相对位置矢量为 $\vec{ds}(t_1)$ ，在足够短的时间内，将两无人机间相对速度在相对位置矢量方向上的投影作为无人机间距离变化率，由 (1) 式可知，在测距周期 Δt 内无人机距离变化率为 $d\vec{l} = \frac{[\vec{l}_1(t + \Delta t) - \vec{l}_0(t)]}{\Delta t}$ ，即：

$$\frac{d\vec{v}(t_1) \cdot \vec{ds}(t_1)}{\|\vec{ds}(t_1)\|} = \frac{\vec{l}_1(t_1 + \Delta t) - \vec{l}_0(t_1)}{\Delta t} \quad (2)$$

式中， $\vec{ds}(t_1)$ 为代求机间相对位置矢量， $\|\vec{ds}(t_1)\|$ 为数据链测距值，在计算时令 $\|\vec{ds}(t_1)\| = \|\vec{l}_0(t_1)\|$ ， $d\vec{v}(t_1)$ 为由惯导系统输出的速度信息得到的机间相对速度，式 (2)

即为机间相对定位基本原理公式。

1.2 机间测距原理

对于集群飞行器，由于机间数据链信号传播距离短，并且可采用点波束等形式进一步加强接收功率，因此相对于卫星导航信号，在干扰环境下机间数据链具有更高的抗干扰能力，适用于在复杂环境下无人机获取机间观测量信息。通过数据链进行机间测距并利用数据链通信将无人机间的测距信息和惯导系统输出的信息在无人机间进行交互。

机间数据链测距是通过机间发射无线电信号进行测距，无线电测距的实现包括单向单程测距、双向双程测距和双向单程测距。由于单向单程测距方法实现全局同步需要高精度晶振，代价高昂。双向双程测距方法，需要以相应的次序进行无人机机间测距，这种测距方法不能实现高速实时测距能力，并且这种测距方法的设备组成较为复杂。基于上述原因，针对机间测距本文采用一种非相干无线电测距方法——双向单程测距方法^[8]。

采用双向单程测距方法，无人机之间可通过通信获得各无人机间时钟不同步值得方法，实现无人机间时间同步。因此，每个无人机只需要有自己的时钟即可，并且每个无人机在接收其他无人机的测距信号时，同时发送测距信号，这种测距方法，不需要复杂的设备，并且能够进行高速实时的测距，具体测距算法如下。

无人机 i 通过数据链向其他无人机发送测距信号，并且接收其他无人机传送来的测距信号。假设无人机间测得的测距信号传输时间为 t_{ij} ，两无人机之间的时钟差异为 Δt_{ij} ，无人机 i 接收到的测距信号时间为 T_1 ，无人机 j 接收到的测距信号时间为 T_2 ，则可得以下关系式：

$$T_1 = t_{ij} + \Delta t_{ij} \quad (2)$$

$$T_2 = t_{ij} - \Delta t_{ij} \quad (3)$$

则由式 (2) 和 (3) 计算得：

$$t_{ij} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (4)$$

$$\Delta t_{ij} = \frac{T_1 - T_2}{2} \quad (5)$$

通过以上公式可知，机间测距值可通过机间测距信号传播时间乘机间测距信号传输速率得到。由此可以看出，双向单程测距既可以实现机间信息传递，又可以实现机间测距，并解决了机间时钟不统一的问题。

2 机间相对定位模型与算法

机间惯导误差对数据链信号观测的影响表现为由相对速度误差引起的多普勒误差和由相对位置误差引起的伪距误差^[9]。设无人机搭载的惯导系统误差近似一致，利用机间数据链进行测距，并与惯导输出的信息建立机间相对定位方程，估计机间相对定位误差。针对方程的求解，提出最小二乘相对定位算法。

设无人机两个节点分别为 s_1, s_2 ，在 t_i 时刻节点 s_1 速度为 $\vec{v}_1(t_i)$ ，节点 s_2 速度为 $\vec{v}_2(t_i)$ ，两节点间的数据链测距值为 $l(t_i)$ 。两点间相对速度为 $d\vec{v}(t_1) = [\vec{v}_1(t_1) - \vec{v}_2(t_1)]$ ，将两架

无人机相对速度在两无人机相对位置矢量方向上的投影对时间的积分作为无人机相应时刻内机间相对位置变化,由此得到无人机惯导速度信息与机间伪距变化率关系如下式:

$$\frac{d\vec{v}(t_1) \cdot d\vec{s}(t_1)}{\|d\vec{s}(t_1)\|} = \frac{d\|l(t_1)\|}{dt} \quad (6)$$

式(6)中, $d\vec{s}(t_1)$ 为初始时刻两节点间相对位置矢量。

t_2, t_3 时刻两节点间相对位置分别由两点在空间中的相对速度对时间进行积分可近似为 t_2, t_3 时刻两点间相对位置空间矢量。

由于 $d\vec{s}(t_1) = d\vec{s}(t_3) - \int_{t_1}^{t_2} d\vec{v}_1(t_1)dt - \int_{t_2}^{t_3} d\vec{v}_2(t_2)dt, d\vec{s}(t_2) = d\vec{s}(t_3) - \int_{t_2}^{t_3} d\vec{v}_2(t_2)dt$ 将其代入(6)式得,

$$\left. \begin{aligned} d\vec{v}_1(t_1) \cdot d\vec{s}(t_3) &= \frac{d\|l(t_1)\|}{dt} \times \|d\vec{s}(t_1)\| + \\ d\vec{v}_1(t_1) \cdot \left(\int_{t_1}^{t_2} d\vec{v}_1(t_1)dt + \int_{t_2}^{t_3} d\vec{v}_2(t_2)dt \right) \\ d\vec{v}_2(t_2) \cdot d\vec{s}(t_3) &= \frac{d\|l(t_2)\|}{dt} \times \|d\vec{s}(t_2)\| + \\ d\vec{v}_2(t_2) \cdot \int_{t_2}^{t_3} d\vec{v}_2(t_2)dt \\ d\vec{v}_2(t_3) \cdot d\vec{s}(t_3) &= \frac{d\|l(t_3)\|}{dt} \times \|d\vec{s}(t_3)\| \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

设观察矩阵 $\mathbf{P} = [p_1 \ p_2 \ p_3]$, 速度矩阵为 $\mathbf{G} = [d\vec{v}_1(t_1) \ d\vec{v}_2(t_2) \ d\vec{v}_2(t_3)]^T$, 令:

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{\|l(t_1)\|}{dt} \times \|d\vec{s}(t_1)\| + d\vec{v}_1(t_1) \cdot \left(\int_{t_1}^{t_2} d\vec{v}_1(t_1)dt + \int_{t_2}^{t_3} d\vec{v}_2(t_2)dt \right) \\ p_2 &= \frac{\|l(t_2)\|}{dt} \times \|d\vec{s}(t_2)\| + d\vec{v}_2(t_2) \cdot \int_{t_2}^{t_3} d\vec{v}_2(t_2)dt \\ p_3 &= \frac{\|l(t_3)\|}{dt} \times \|d\vec{s}(t_3)\| \end{aligned}$$

则可得到机间相对定位方程为:

$$\mathbf{GX} = \mathbf{P} \quad (8)$$

式中, 待求参数向量 $\mathbf{X} = [x \ y \ z]^T$ 为机间相对定位结果, 式(8)为两点机间协同相对定位系统数学模型, 利用最小二乘法进行求解。

由 $\|\mathbf{GX} - \mathbf{P}\|^2 = \min$ 解得机间相对定位结果为:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{G}^T\mathbf{G})^{-1}\mathbf{G}^T\mathbf{P} \quad (9)$$

由于最小二乘相对定位算法是基于机间相对速度在机间相对位置矢量上投影的运算, 相对定位运算时间是瞬时而不是周期内伪距变化, 相对定位时间频率越低, 等效于伪距差观测的误差越大, 时间频率越高, 越接近于多普勒变化, 得到的相对定位结果误差越小^[10]。

利用最小二乘法求解出的机间相对定位结果仍然存在一定误差, 通过最小二乘相对定位结果与机间数据链测距值为基础建立秩亏网平差误差方程, 来估计机间相对定位误差, 对最小二乘相对定位结果进行修正, 从而将机间相对定位精度提高到更高水平^[11]。

由于惯导定位误差呈现出正态分布, 并且多套惯性导

航系统使用在同一平台, 通过将惯导输出值进行加权平均可以减少惯性导航系统定位误差, 国外在高价值有人机应用中有所研究, 但对于载荷、成本有限的小型化无人机, 搭载多套惯导系统并不现实, 因此将加权平均的思想引用到无人机集群中。由无人机间惯导系统提供的速度信息计算得到的无人机间距离和利用数据链测距得到的测距值之差作为量测量, 结合测绘平差中秩亏自由网平差算法, 来估计计算得到的无人机之间相对位置误差, 实现无人机集群相对定位误差精度的提高。机间相对定位误差模型及秩亏自由网平差校正算法如下。

设两无人机 i, j 真实坐标为 $[X_i \ Y_i \ Z_i]$, $[X_j \ Y_j \ Z_j]$, 通过惯导输出得到的两无人机 i, j 位置坐标分别为 $[X'_i \ Y'_i \ Z'_i]$, $[X'_j \ Y'_j \ Z'_j]$, $\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i, \delta x_j, \delta y_j, \delta z_j$, 分别为两无人机惯导输出的位置误差, 建立真实坐标与惯导输出坐标间的关系为:

$$X_i = X'_i + \delta x_i, Y_i = Y'_i + \delta y_i, Z_i = Z'_i + \delta z_i$$

$$X_j = X'_j + \delta x_j, Y_j = Y'_j + \delta y_j, Z_j = Z'_j + \delta z_j$$

通过无人机 i, j 之间测距得到测距值为 L_{ij} , 由最小二乘相对定位结果获得的两点之间距离估计值为 L'_{ij} , 分别表示为:

$$L_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} + \Delta_{ij} \quad (10)$$

$$L'_{ij} = \sqrt{(X'_i - X'_j)^2 + (Y'_i - Y'_j)^2 + (Z'_i - Z'_j)^2} \quad (11)$$

令 $L = L'_{ij} - L_{ij}$, 并按泰勒级数展开, 得:

$$\frac{X'_{ij}}{d'_{ij}} \delta x_{ij} + \frac{Y'_{ij}}{d'_{ij}} \delta y_{ij} + \frac{Z'_{ij}}{d'_{ij}} \delta z_{ij} + \Delta_{ij} = L \quad (12)$$

式中, $X'_{ij} = X'_i - X'_j, Y'_{ij} = Y'_i - Y'_j, Z'_{ij} = Z'_i - Z'_j$ 分别为最小二乘定位结果三个方向的值, $\delta x_{ij} = \delta x_i - \delta x_j, \delta y_{ij} = \delta y_i - \delta y_j, \delta z_{ij} = \delta z_i - \delta z_j$ 为最小二乘定位结果误差估计值, L 为最小二乘相对定位伪距值与数据链测距值的差值, Δ_{ij} 为测距噪声。

设代求参数向量为 $x = [\delta x_{ij}, \delta y_{ij}, \delta z_{ij}]^T$, 将式(12)写成矩阵形式为:

$$L = \mathbf{B}x + \Delta \quad (13)$$

由于机间相对定位中各个节点坐标均为待定点, 上述方程起算数据不足, 缺乏必要起算点, 并且系数矩阵为秩亏矩阵, 在计算时结合测量平差理论, 利用秩亏网平差算法进行计算。

设代求节点坐标估计值 $\hat{x} = [\hat{\delta x}_{ij}, \hat{\delta y}_{ij}, \hat{\delta z}_{ij}]^T$, 误差方程为:

$$V = \mathbf{B}x - L \quad (14)$$

式中, V 为 Δ 估计值, L 为观测值, \mathbf{B} 为系数矩阵。

由于系数矩阵 \mathbf{B} 为奇异矩阵, 利用最小二乘准则得到法方程为:

$$\mathbf{N}x = \mathbf{W} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{N} = \mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{B}, \mathbf{W} = \mathbf{B}^T\mathbf{P}L$, 由于系数矩阵 \mathbf{B} 为秩亏矩阵, 法方程系数矩阵 \mathbf{N} 也为奇异矩阵, 法方程解不唯一。为了得到相对定位误差参数的唯一解, 由最小二乘最小范数准

则, $x^T P_{,x} x = \min$ 得最小范数解:

$$x = N_{pm}^{-1} B^T P L \quad (16)$$

式中, N_{pm} 为 N 的最小范数逆。由上式可以看出, 通过秩亏网平差算法解决了误差方程系数矩阵奇异的问题, 使误差方程得到唯一确定解^[12]。

3 仿真分析

仿真条件设置如下: 两架无人机分别编号为 1、2; 无人机 1 初始位置坐标为 [100, 100, 100], 初始速度为 200 m/s; 无人机 2 初始位置坐标为 [1, 1, 100], 初始速度为 200 m/s; 机载数据链传输无人机间的相互测距值, 机间数据链测距精度为 1 m; 无人机均装载相同精度的惯性导航系统, 陀螺随机常值漂移为 $0.01^\circ/\text{h}$ 。相对定位的计算周期为 1 s。在仿真中认为无人机装备的惯性导航系统均为同精度, 在仿真计算中取等权值, 仿真计算流程如图 2 所示。

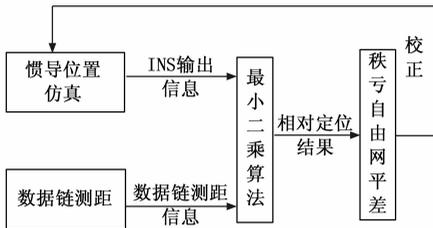


图 2 机间惯导数据链相对定位仿真流程图

仿真结果如图 3 和图 4 所示。图 3 是机间惯导数据链协同相对定位结果。图 4 是机间惯导/数据链相对定位误差结果。

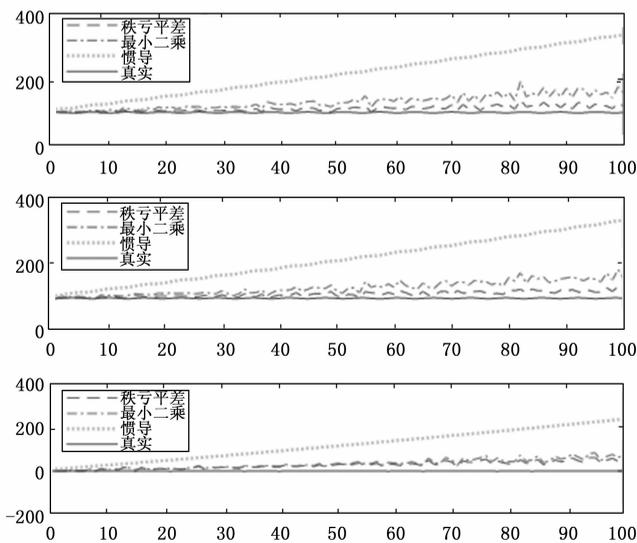


图 3 相对定位结果

图 3 中点虚线表示由惯导系统输出的相对定位结果, 点横线表示由最小二乘相对定位方法得到的相对定位结果, 短虚线表示经过秩亏网平差算法修正后得到相对定位结果, 实线表示无人机之间实际相对定位结果。从图 3 中可以看出, 通过最小二乘相对定位方法将惯性导航系统的相

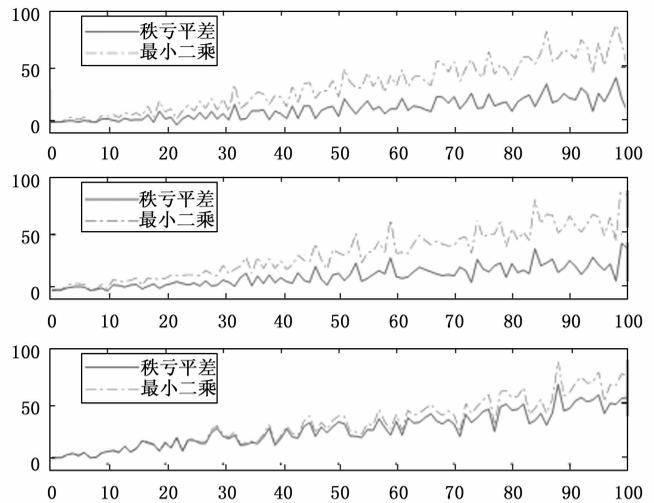


图 4 相对定位误差

对定位发散速度降低, 同时提高了相对定位精度。利用秩亏网平差算法对最小二乘相对定位结果进行校正使相对定位结果发散速度趋于平稳, 使相对定位结果更接近真实情况。

图 4 中虚线为最小二乘相对定位误差曲线, 实线为秩亏网平差校正后相对定位误差曲线。从图中可以看出, 通过秩亏网平差算法降低了最小二乘相对定位误差发散速度, 并提高了相对定位精度。

从表 1 中可以看出, 惯导系统在 100 s 内的相对定位统计误差为 346.87 m, 通过最小二乘算法得到的相对定位结果统计误差为 104.51 m, 将惯导系统相对定位精度提高了 3.32 倍。再经过秩亏网平差算法对相对定位结果的校正, 相对定位统计误差为 43.91 m, 将最小二乘相对定位精度提高了 2.38 倍。综上所述, 通过惯导数据链协同定位算法, 将惯导系统相对定位精度提高了 7.89 倍。

表 1 相对定位统计误差

	惯性导航	最小二乘	秩亏平差
相对定位误差/m	346.87	104.51	43.91

4 结论

针对复杂环境下无人机协同执行任务能力, 提出了通过机间数据相互测距的距离信息与惯导信息结合的无人机机间相对定位系统, 可以实现无人机间两点相对定位, 通过最小二乘定位算法有效延缓了惯导位置误差发散速度, 并且通过秩亏自由网平差算法实现了惯导信息相对位置误差的修正, 将机间动态相对定位精度提高到原来的 7.89 倍。基于惯导/数据链的动态相对定位算法解决了纯惯导条件下的单链路惯导协同相对定位问题。并且基于机间数据链与惯导结合的机间动态相对定位系统, 具有很强的抗干扰能力, 在卫星导航系统不可用时, 可作为应急备份导航系统。

本文提出的基于最小二乘的相对定位算法具有线性误差,使用最小二乘相对定位算法需要无人机间具有很高的相对运动状态,对于运动平稳的情况得到的相对定位结果误差较大。秩亏网平差算法解决了系数矩阵秩亏问题,但是在两点间惯导协同相对定位中具有一定局限性,秩亏网平差算法在有多个节点的网络,具有多个修正参考值,对于相对定位误差修正更加准确,因此本文提出的机间惯导数据链协同相对定位算法,可以应用到无人机集群网络中,通过加权秩亏网平差算法实现无人机集群的相对定位。

参考文献:

- [1] 崔乃刚,王小刚,郭继峰. 基于 INS/GPS 的智能导弹协同作战相对导航定位系统研究 [J]. 战术导弹技术, 2010 (2): 1-5.
- [2] Liu J C, Zhang J J, Tan L F. A new data fusion method for multi-missile cooperative localization [J]. Aeronautical Journal, 2012, 108 (1088): 493-504.
- [3] 林伟,邹俊峰,占明锋. CEC/SINS 组合的相对导航与定位算法 [J]. 海军工程大学学报, 2011 (2).
- [4] Howard A, Mataric M J, Sukhatme G S. Localization for mobile robot teams: a distributed MLE approach [M]. Experimental Robotics VIII. Springer Berlin Heidelberg, 2003: 146-155.

(上接第 190 页)

的仿真结果,验证了该仿真模型能够有效模拟双板交并联运行的工况。如图 5~图 7 所示,本文提出的供能管网仿真模型能够直观反映供能系统的二次侧供水温度、一次侧回水温度和系统压降的变化过程,对于研究供能系统动态特性具有一定意义。此外,本文提出的模型可通过改变参数,包括用户负荷、能源站输出供能情况和阀门控制信号等,以模拟实际供能系统的运行工况、研究供能管网受控下的工作性能,对供能系统的调试运行、控制调节具有一定的指导意义。

4 结语

本文根据管道、换热器、阀门等器件的数学模型,在 Matlab 仿真平台上提出了一种面向用户端的供能管网仿真模型,并进行了仿真实验,仿真结果验证了本系统建模的可行性与有效性,表明该模型可用于实际供能系统的仿真模拟,对供能系统的调试运行、控制调节具有一定的指导意义。调试人员可用该模型调试拟采用的控制方案,并将该模型的调试结果用于指导实际系统,以达到缩短调试周期的目的,解决供能系统调试周期长、调试成本高的问题。此外,该模型不受季节影响,调试人员可根据需要将该模型运行在不同工况下,从而提高系统调试的灵活性。

尽管本文在针对供能系统的建模中取得了一些成果,但在研究过程中遇到的一些问题还需要做进一步的探讨和深入研究:本文提出的模型是面向用户端的,但从供能系

- [5] Tang J, et al. Research on missile remote control data link simulation [A]. 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet) [C]. IEEE, 2012: 523-539.
- [6] 刘俊成,张京娟,冯培德. 基于相互测距信息的机群组网协同定位技术 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38 (4): 541-545.
- [7] Zhan Y G, Dang Y F, Li N. An integrated navigation algorithm based on distributed Kalman filter [A]. 2015 IEEE International Conference on Information and Automation [C]. 2015: 2132-2135.
- [8] Shcheglov K, Smukowski D, Ezal K, Johnson G. The world's first MEMs navigation grade inertial navigation system [A]. Institute of Navigation International Technical Meeting [C]. 2015: 588-592.
- [9] 盛传贞,张京奎,应俊俊. 基于 Kalman 滤波的实时动态相对定位方法 [J]. 无线电工程, 2016, 46 (6): 41-44.
- [10] 田由甲,张冠杰. 基于多普勒频率变化率的固定单站定位算法研究 [J]. 无线电通信技术, 2016, 42 (4): 61-64.
- [11] 王小刚,郭继峰,崔乃刚. 基于数据链的智能导弹协同定位方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17 (3): 319-323.
- [12] 彭锐晖,等. 两弹协同定位的可行性研究 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18 (5): 1118; 1122.

统的全局角度出发,能源站及用户负荷的建模仍然值得深入的研究。

参考文献:

- [1] 江丽霞,金红光,蔡睿贤. 冷热电三联供系统特性分析与设计化研究 [J]. 工程热物理学报, 2002, 23 (s1): 23-26.
- [2] 皇甫艺,吴静怡,黄兴华,等. 冷热电联产 CCHP 综合评价模型研究 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26 (s1): 13-16.
- [3] 郑春元,翟晓强,吴静怡,等. 基于 TRNSYS 的冷热电联供系统建模与蓄能策略分析 [J]. 化工学报, 2015, 66 (s2): 311-317.
- [4] 李凯. 变流量城市集中供热分布式控制系统 [D]. 河北:河北科技大学, 2008.
- [5] 陈烈. 基于神经网络的热力站供热过程预测控制研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- [6] 陈曦,齐腾云,蒋春涛,等. 相变换热系统的能量流模型及其应用 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38 (3): 600-606.
- [7] 周玲玫. 板式换热器换热性能的实验研究 [D]. 浙江:浙江大学, 2008.
- [8] 曾伟平. 板式换热器换热和压降的性能研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [9] 倪平. 阀门流量系数和流阻系数计算式中量单位的分析 [J]. 阀门, 2010 (6): 36-41.
- [10] 邱宣振,周晶. 控制阀流量系数的定义演变及换算推导 [J]. 石油化工自动化, 2009, 45 (6): 57-58.