arXiv:2301.01114v1 [cs.RO] 3 Jan 2023

信息辅助导航：综述

Daniel Engelsman 和 Itzik Klein，*IEEE* 高级会员

摘要——**惯性导航系统的性能在很大程度上取决于外部测量和信息能否稳定输入，以确保滤波器持续更新并抑制惯性解漂移。在不同作业环境中运行的平台可能会在某些时刻无法接收外部测量，从而导致其导航解发生漂移。多年来，研究者提出了各种方法来克服这一不足：利用对系统当前状况的了解，并将其转化为可用的信息源，以更新导航滤波器。本文旨在全面综述信息辅助导航，并将其大致分为直接辅助、间接辅助和模型辅助。本文介绍每种方法的代表性研究、其概念的实现方式、使用案例、相关状态更新及相应的测量模型。通过针对具体场景匹配适当的约束，可以提高导航解的精度，弥补丢失的信息，并揭示某些原本不可观测的内部状态。**

索引词—**惯性导航系统、惯性传感器、扩展卡尔曼滤波器、伪测量、非完整约束、车辆约束、基于模型的导航。**

I. 引言

INERTIAL 导航系统（INS）是最常用的导航系统之一。它们几乎存在于陆地、海洋、空中、太空、地下和水下运行的各种平台中 [1], [2]。INS 也常被人类用于自主导航 [3] ，并安装在动物身上用于研究 [4]。

INS 包含惯性传感器，即加速度计和陀螺仪，能够测量比力和角速度向量。INS 利用这些测量值计算每个历元的位置、速度和方向，如图1所示。其主要优势包括：

- 提供完整的导航解，用于计算位置、速度和方向。
- 可在任何环境中运行，尤其适用于室内、地下或水下等具有挑战性的导航环境。
- 这是一种独立系统，无需依赖外部广播或信息即可运行。
- 提供不同等级、尺寸、性能和价格的产品。

惯性导航系统（INS）的主要缺点是在纯惯性运行情况下会出现解漂移 [5], [6]。惯性传感器的测量值包含噪声和其他误差项，这些误差项会在积分过程中传入导航解。因此，无论惯性导航系统的质量如何，

Daniel Engelsman 和 ItzikKlein 任职于以色列海法大学 Charney海洋科学学院 Hatter海洋技术系。电子邮件： {dengelsm@campus, kitzik@univ}. haifa.ac.il

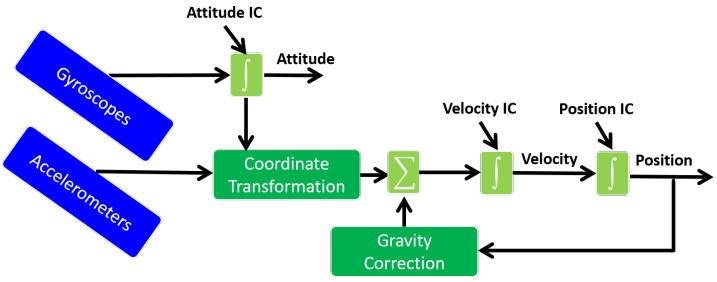


图 1. 惯性导航系统的简化框图。

导航解都会随时间漂移。为减轻这一问题，需要将其与外部传感器或信息进行融合。融合过程通过非线性滤波器实现，通常采用扩展卡尔曼滤波器（EKF） [7], [8]。在这一过程中，外部测量用于估计导航状态和传感器误差残差，如图3所示。通过可观测性分析来探讨此类测量是否确实能够估计导航状态 [9], [10]。其中，车辆动力学和测量类型决定了哪些状态可以被估计 [11]。

按辅助类型，可区分为外部传感器辅助和信息辅助。外部传感器辅助指传感器本身为惯性导航系统提供外部测量。以无线电频率（RF）导航为例，户外可利用全球导航卫星系统的广播，采用基于射频的技术；室内则可利用 Wi-Fi。在 GNSS 拒止环境中，可使用声学导航，尤其是在水下，可采用声呐、基于距离的定位技术、长基线和短基线系统，以及多普勒测速仪（DVL）。

另一种外部感知是地理导航，即利用平台周围环境进行测量，例如星敏感器 [34]–[37], 天文导航 [38]–[40],地球磁场 [41]–[43], 以及近年来出现的视觉辅助导航，其中使用视觉地标来求得导航解 [44]–[47]。与外部传感器不同，信息辅助不需要物理传感器，可在有无外部传感器的情况下用于更新导航状态。与外部传感器辅助相比，信息辅助有两大优势：

- **零成本**：信息辅助不涉及任何实际传感器，只需一次性进行软件修改。
- **持续可用性**：更新率可以方便地设置为惯性导航系统的工作采样率，或任何其他所需的速率。

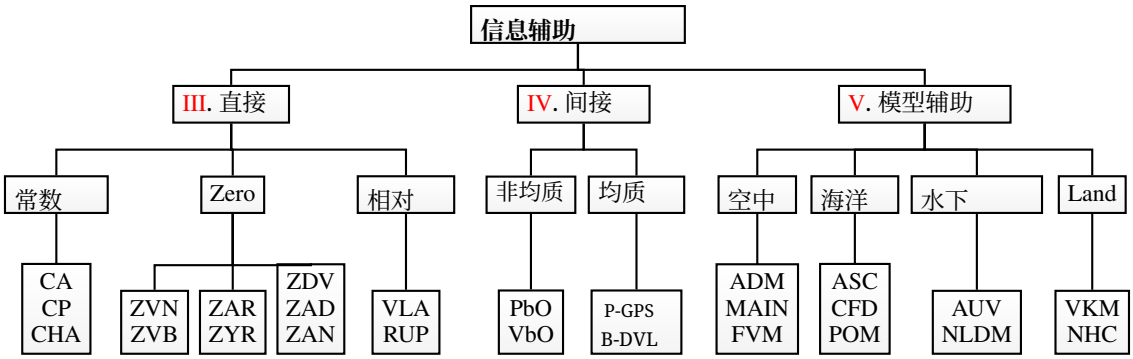


图2. 信息辅助导航分类树。

本文旨在强调信息辅助导航的重要性，并对各种辅助方法、运行场景、假设以及供进一步阅读的参考文献进行最新综述。为此，我们将信息辅助分为以下几类：

- **直接信息辅助**：有关惯性导航系统载体平台或其工作环境的知识，可以直接转化为信息测量，以辅助导航滤波器。
- **间接信息辅助**：在某些场景中，可以从外部传感器提取附加信息，并以间接方式加以利用，从而辅助导航滤波器。
- **基于模型的辅助**：车辆仿真与惯性导航系统模型并行运行，从而能够与导航解同时进行融合，使二者相互反馈，并实现对各自误差的状态估计。

本文详细介绍了上述各类信息辅助。图 2 展示了全部 25 种不同信息辅助类型的分类树。本文其余部分安排如下：第 III 节介绍直接辅助技术，第 IV 节介绍由外部传感器提供支持的间接辅助。第 V 节介绍模型辅助方法，第VI节给出结论。

II. 导航滤波器

由于惯性导航系统运动方程具有非线性特征，将惯性导航系统与外部传感器或数据进行融合需要使用非线性滤波器。通常采用误差状态扩展卡尔曼滤波器，其状态向量为 $\delta\mathbf{x} = \tilde{}\mathbf{x} - \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{15}$。它定义了真实状态向量与滤波器估计值之间的差异，从而得到以下误差项：

$$\tilde{\mathbf{p}}^n = \mathbf{p}^n + \delta\mathbf{p}^n \tag{1}$$
$$\tilde{\mathbf{v}}^n = \mathbf{v}^n + \delta\mathbf{v}^n \tag{2}$$
$$\tilde{\mathbf{T}}_b^n = (\mathbf{I} + [\boldsymbol{\epsilon}^n\times])\mathbf{T}_b^n \tag{3}$$
$$\tilde{\boldsymbol{f}}_{ib}^b = \boldsymbol{f}_{ib}^b + \mathbf{b}_a + \mathbf{w}_a \tag{4}$$
$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ib}^b = \boldsymbol{\omega}_{ib}^b + \mathbf{b}_g + \mathbf{w}_g \tag{5}$$

$\mathbf{I}$ 表示一个 3×3 单位矩阵，$[\times]$ 是向量的反对称形式，而$\mathbf{T}_b^n$ 是从机体坐标系到导航坐标系的变换矩阵。位置误差向量 $\delta\mathbf{p}^n$、速度误差向量 $\delta\mathbf{v}^n$、失准角误差 $\boldsymbol{\epsilon}^n$、加速度计偏置残差 $\delta\boldsymbol{f}_{ib}^b \approx \mathbf{b}_a$和陀螺仪偏置残差 $\delta\boldsymbol{\omega}_{ib}^b \approx \mathbf{b}_g$ [2]，[7]，[8],共同构成误差状态向量：

$$\delta\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta\mathbf{p}^n & \delta\mathbf{v}^n & \epsilon^n & \mathbf{b}_a & \mathbf{b}_g \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

其中，加速度计和陀螺仪的偏置以机体坐标系表示，上标 n 表示以导航坐标系表示的向量。线性化误差状态模型为 [8]

$$\delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}\delta\mathbf{x} + \mathbf{G}\delta\mathbf{w} \tag{7}$$

其中，$\mathbf{F}$ 是系统矩阵，$\mathbf{G}$ 是整形矩阵，$\delta\mathbf{w}$是噪声向量。加速度计和陀螺仪的残差被建模为随机游走过程，不过也可以采用其他合适的模型，例如一阶高斯-马尔可夫过程。系统矩阵为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{pp} & \mathbf{F}_{pv} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} \\ \mathbf{F}_{vp} & \mathbf{F}_{vv} & \mathbf{F}_{v\epsilon} & \mathbf{T}_b^n & \mathbf{0}_{3\times3} \\ \mathbf{F}_{\epsilon p} & \mathbf{F}_{\epsilon v} & \mathbf{F}_{\epsilon\epsilon} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{T}_b^n \\ \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} \\ \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} \end{bmatrix}. \tag{8}$$

F_{ij} 是一个 3×3 子矩阵，由非线性运动方程的线性化得到（有关线性化过程的更多详情，可参阅《导航教材》，例如 [7]，[8]）。整形矩阵为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} \\ \mathbf{T}_b^n & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} \\ \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{T}_b^n & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} \\ \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_{3\times3} \\ \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \tag{9}$$

且噪声向量为

$$\delta\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_a & \mathbf{w}_g & \mathbf{w}_{ab} & \mathbf{w}_{ab} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

其中 $\mathbf{w}_a$ 和 $\mathbf{w}_g$ 分别为加速度计（a）和陀螺仪（g）的过程残差噪声，$\mathbf{w}_{ab}$ 和$\mathbf{w}_{gb}$ 分别为传感器测量噪声。所有噪声均建模为零均值白高斯分布，并假设为常数

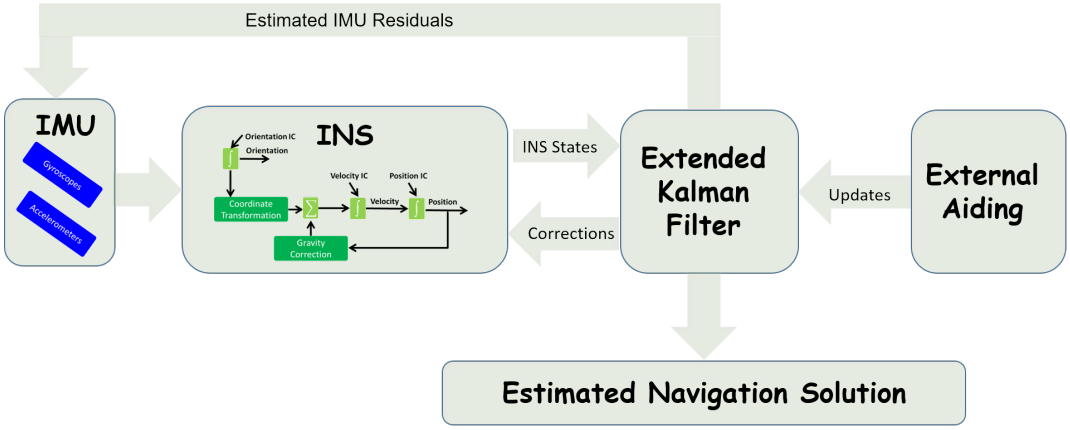


图 3. 带有外部测量的导航滤波器框图。

对于所有样本。根据 [7], EKF 误差状态闭环实现算法,

$$\delta\hat{\mathbf{x}}_k^- = 0 \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{\Phi}_{k-1}\mathbf{P}_{k-1}^+\mathbf{\Phi}_{k-1}^{\mathrm{T}} + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (12)$$

$$\delta\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \mathbf{K}_k\delta\mathbf{z}_k \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_k^+ = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}_k]\mathbf{P}_k^- \quad (14)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^{\mathrm{T}}[\mathbf{H}_k\mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^{\mathrm{T}} + \mathbf{R}_k]^{-1} \quad (15)$$

其中， k 为时间步索引， $\delta\mathbf{x}_k^-$ 为误差状态的先验估计， $\delta\mathbf{x}_k^+$ 为误差状态的后验估计， $\delta\mathbf{z}_k$ 为测量残差向量， $\mathbf{P}_k^-$ 为先验估计误差的协方差， $\mathbf{P}_k^+$ 为后验估计误差的协方差，而$\mathbf{K}_k$ 为卡尔曼增益。$\mathbf{Q}_k$ 为过程噪声协方差， $\mathbf{R}_k$ 为测量噪声协方差，二者均假设对所有样本保持不变； $\mathbf{\Phi}_k$ 为状态转移矩阵。测量矩阵$\mathbf{H}_k$ 包含基向量，用于调整相关惯性导航系统状态，以进行信息辅助更新$\mathbf{z}_k$ ； $\boldsymbol{\nu}_{\mathrm{i}}$表示第 i 种外部辅助类型的均值白高斯测量噪声向量，其中非粗体的 ν_{i} 表示标量。

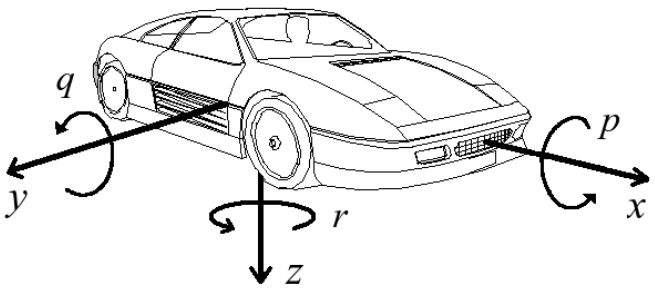


图 4. 机体坐标系。

图 4 展示了机体坐标系，其中标出了 x-y-z 轴的定义，以及绕各轴的相应 p-q-r 角速度。导航坐标系的中心是位于机体质心处，其中 x轴指向大地北， z轴向下并平行于当地垂线， y轴则构成右手正交坐标系。机体坐标系的原点位于质心处，其中 x轴平行于载具的纵向对称轴并朝前， y轴指向右侧，z 轴向下，从而构成右手正交坐标系。

III. 直接信息辅助

本节综述了多种技术，这些技术利用关于平台动力学的先验信息，将其转换为外部测量，并输入导航滤波器。本节对每种信息测量都说明其测量所依据的假设，随后介绍其应用领域、工作原理、测量模型以及文献中的实例。

表I 汇总了全部 12 种辅助类型及其缩写，并提供了指向本节中相应位置的超链接。

表 I 直接辅助类型

章节	缩写	辅助类型
III-A	ZVN	导航坐标系零速度
III-B	ZVB	机体坐标系零速度
III-C	ZAR	机体坐标系中的零角速度
III-D	CA	恒定高度
III-E	ZDV	零向下速度
III-F	ZAD	机体坐标系中向下加速度为零
III-G	ZAN	导航坐标系中加速度为零
III-H	CP	位置恒定
III-I	ZYR	零偏航角速度
III-J	CHA	恒定航向角
III-K	VLA	虚拟力臂
III-L	RUP	相对更新

图 5 说明了直接信息方法如何有效地作为导航滤波器中的辅助信息，从而取代外部传感器。

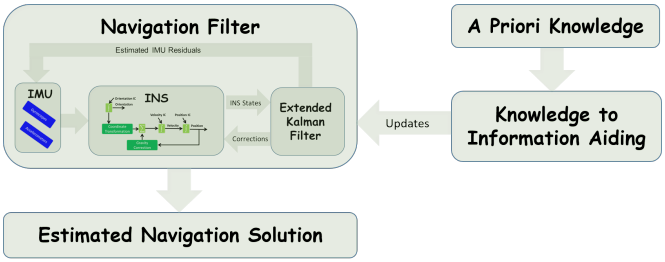


图 5. 信息辅助导航滤波器的框图。

A. 导航坐标系零速度（*ZVN*）

假设：静止条件。
应用领域：陆地车辆、移动机器人、鞋载行人导航和静态精对准。

原理：静止时，假定导航坐标系中表示的速度矢量$\mathbf{v}^n$ 为零。

测量模型：测量残差表示为：

$$\delta\mathbf{z}_{\text{ZVN}} = \mathbf{v}^n_{\text{INS}} - \mathbf{0}_{3\times1} = \mathbf{H}_{\text{ZVN}}\delta\mathbf{x} + \boldsymbol{\nu}_{\text{ZVN}} \tag{16}$$

其中，$\mathbf{v}^n$ 惯性导航系统是计算得到的惯性导航系统速度矢量，$\boldsymbol{\nu}_{\text{ZVN}}$是零均值白高斯测量噪声。相应的测量矩阵定义为：

$$\mathbf{H}_{\text{ZVN}} = \begin{bmatrix}\mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{I}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3}\end{bmatrix}. \tag{17}$$

文献综述：对于陆地车辆，Salychev 在车辆驶近停车标志或停在红灯前时采用了零速更新（也称为 ZUPT） [48] 。此外，还使用了零速更新来应对城市峡谷中的全球定位系统（GPS）信号中断 [49], [50]。Xiaofang [51] 通过三种零速检测器，研究了零速更新对陆地车辆仿真的贡献；Ben[52] 提出了使用独立偏置卡尔曼滤波器的基于零速更新的估计滤波器。使用低成本传感器时，一旦检测到零速度，零速更新也可用于提高姿态精度 [53]–[57]。

在鞋载惯性导航系统中，识别用户静止的支撑期，随后向导航滤波器[58]–[65]进行 ZVN 更新。Fourati [66] 提出了用于行人导航的异构数据融合技术，Tong [67] 提出了基于隐马尔可夫模型（HMM）的行人航位推算导航 ZVN。其他研究提出了基于步态周期 [68]–[72],内参数阈值的 ZVN 更新，用于辅助紧耦合组合 [73] ，以对捷联惯性导航系统对准 [74], 进行可观测性分析；另有研究提出一种用于行人应用的开源脚载模块，并将其与嵌入式软件相结合 [75], [76]。ZVN 也用于静止精对准过程。Bar-Itzhack [77] 从控制理论的角度提出了线性误差模型，使得能够确定惯性导航系统不可观子空间；最近，Silva [78] 利用该模型辅助静止精对准。Suh [79] 纳入了将 ZVN 与视觉辅助导航结合，Noureldin [80] 将其用于石油工业中水平随钻测量（MWD）的实时定位；Li [81] 则将其定义扩展为恒速更新（CUPT），当速度不能假定为零时（例如，站在运行中的电梯或自动扶梯上），该方法可处理支撑期。

B. 机体坐标系零速度（*ZVB*）

假设：在平面上运动且不发生滑动。**应用领域**：陆地车辆和移动机器人。
原理：对于陆地车辆，在满足无滑移条件时，垂直于前进方向的速度分量，即机体 y轴（横向）和机体 z轴（向下）（轴定义见图4 ），假设为零：

$$\mathbf{v}^b_{yz} = \begin{bmatrix}v^b_y\\ v^b_z\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\mathbf{e}_2^{\mathrm{T}}\\ \mathbf{e}_3^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\mathbf{v}^b = \mathbf{0}_{2\times1} \tag{18}$$

其中，$\mathbf{e}_i$ 对于 $1 \le i \le 3$ 是 $\mathbb{R}^3$ 的基，$\mathbf{v}^b$ 是以机体坐标系表示的速度矢量。
测量模型：测量残差为：

$$\delta\mathbf{z}_{\text{ZVB}} = \mathbf{v}^b_{\text{INS},yz} - \mathbf{0}_{2\times1} = \mathbf{H}_{\text{ZVB}}\delta\mathbf{x} + \boldsymbol{\nu}_{\text{ZVB}} \tag{19}$$

其中，$\mathbf{v}^b_{\text{INS},\ yz}$ 是计算得到的惯性导航系统机体速度，$\boldsymbol{\nu}_{\text{ZVB}}$ 是零均值白高斯测量噪声，$\mathbf{H}_{\text{ZVB}}$ 是相应的测量矩阵。

由于机体速度矢量是机体到导航坐标系变换矩阵的函数，因此对（19）进行小误差扰动分析，以得到测量矩阵：

$$\begin{aligned}\delta\mathbf{v}^b &= \tilde{\mathbf{v}}^b - \mathbf{v}^b = (\tilde{\mathbf{T}}^b_n\tilde{\mathbf{v}}^n) - \mathbf{v}^b\\ &= \left(\mathbf{T}^b_n(\mathbf{I} - [\boldsymbol{\epsilon}^n\times])\mathbf{v}^n + \mathbf{T}^b_n\delta\mathbf{v}^n\right) - \mathbf{v}^b\\ &= \mathbf{T}^b_n\delta\mathbf{v}^n - \mathbf{T}^b_n[\mathbf{v}^n\times]\boldsymbol{\epsilon}^n.\end{aligned} \tag{20}$$

最后，根据（20），测量矩阵定义为：

$$\mathbf{H}_{\text{ZVB}} = \begin{bmatrix}\mathbf{e}_2^{\mathrm{T}}\\ \mathbf{e}_3^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{T}^b_n & -\mathbf{T}^b_n[\mathbf{v}^n\times] & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3}\end{bmatrix}. \tag{21}$$

文献回顾：机体坐标系中的零速度可追溯至 2000 年代，当时 Brandt [82], Sukkarieh [83], Collin[84], 以及后来的 Dissanayake [85] 将其用作车辆模型约束。Shin [86], Liu [87], 以及后来的 Falco [88], [89]展示了在采用紧耦合（TC）全球导航卫星系统/惯性导航系统架构时，ZVB 如何在 GPS 信号中断情况下将惯性导航系统误差限制在有界范围内。Godha（2005年） [90] 以及后来的 Chiang [91] 着重研究了其在开阔环境下应对长期 GPS 信号中断的优势；Syed（2008年） [92] 则利用它考察其对失准精度的影响。随后，解析可观测性分析确定了使用 ZVB 时导航滤波器中哪些状态不可观测 [93]。其他方法则将里程计或轮速传感器（WSS）与 ZVB 约束结合，以更新机体速度矢量 [94]——[105],应用于列车 [106]——[111],精准农业 [112]——[115], 室内定位[116],以及地图/惯性导航系统/Wi-Fi 集成系统 [117]。

C. 载体坐标系零角速度（ZAR）

假设：静止条件。
应用领域：陆地车辆、移动机器人、鞋载导航和静态精对准。

原理：静止时，导航坐标系与地心地固坐标系之间的角速度矢量 $\boldsymbol{\omega}_{en}^{n}$ 为零；对于低成本传感器，可忽略地球自转角速度 $\boldsymbol{\omega}_{ie}^{n}$。因此，若陀螺仪输出 $\boldsymbol{\omega}_{ib}^{b}$ 近似为零，则零角速度更新为

$$\boldsymbol{\omega}_{nb}^{b}=\boldsymbol{\omega}_{ib}^{b}-(\boldsymbol{\omega}_{ie}^{b}+\boldsymbol{\omega}_{en}^{b})=\mathbf{0}_{3\times1}. \tag{22}$$

测量模型：测量残差为：

$$\delta\mathbf{z}_{\text{ZAR}}=\boldsymbol{\omega}_{nb,\text{INS}}^{b}-\mathbf{0}_{3\times1}=\mathbf{H}_{\text{ZAR}}\delta\mathbf{x}+\boldsymbol{\nu}_{\text{ZAR}}=\mathbf{b}_{g}+\boldsymbol{\nu}_{\text{ZAR}} \tag{23}$$

其中，$\boldsymbol{\omega}_{nb,\ \text{INS}}^{b}$ 表示计算得到的 INS 机体角速度矢量，$\boldsymbol{\nu}_{\text{ZAR}}$ 表示零均值白高斯测量噪声，$\mathbf{b}_g$ 表示在机体坐标系中表达的陀螺仪偏置矢量，相应的测量矩阵定义为：

$$\mathbf{H}_{\text{ZAR}}=\begin{bmatrix}\mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{I}_{3\times3}\end{bmatrix}. \tag{24}$$

文献综述：零角速度更新（也称为 ZARU）由 Ramanandan 用于可观测性分析，以及跟踪采用静止更新辅助的 INS 的误差状态 [118], [119]。Groves [120] 以及之后的 Klein[57]应用 ZAR，利用低成本传感器改进静态精对准过程。Chen [121] 和 Brossard [122]将其用于自主定位室内移动机器人，Chow 则将其纳入联合传感器自校准方法 [123]。ZAR 还可用于行人航位推算（PDR）应用中的导航滤波器，Jim´enez [124],Bancroft [125],以及之后的 Benzerrouk [126], [127]均采用了这种方法[128] 。Woyano [129],[130] 利用其改进 EKF 性能，Zhang [131] 则将 ZAR 与站立校准方法结合，以改进人体运动角速度的计算；而 Bar-Shalom [131] 指出，采用该方法时应谨慎，因为静止人员的残余角速度明显大于静止航空器的残余角速度。

其他研究还包括将 ZAR 作为长期 GPS 信号中断期间的互补辅助信息，用于城市环境中的导航 [132], [133]、辅助基于 Wi-Fi 的室内定位 [134]–[136]，以及与基于误差的卡尔曼滤波器融合，应用于惯性导航系统/多普勒测速仪 [137]。

D. 恒定高度（CA）

假设：运行期间高度保持不变。
应用领域：陆地车辆、移动机器人、室内导航和船舶。

原理：在平坦表面上移动时，高度保持不变，h_c，这一状态可持续较短时间间隔，也可能贯穿整个轨迹。**测量模型**：测量残差表示为：

$$\delta\mathbf{z}_{\text{CA}}=h_{\text{INS}}-h_{c}=\mathbf{H}_{\text{CA}}\delta\mathbf{x}+\nu_{\text{CA}} \tag{25}$$

其中，h_{INS} 为计算得到的惯性导航系统高度，ν_{CA} 为零均值白高斯测量噪声，测量矩阵定义如下：

$$\mathbf{H}_{\text{CA}}=\begin{bmatrix}\mathbf{e}_{3}^{\mathrm{T}} & \mathbf{0}_{1\times3} & \mathbf{0}_{1\times3} & \mathbf{0}_{1\times3} & \mathbf{0}_{1\times3}\end{bmatrix}. \tag{26}$$

文献综述：恒定高度更新用于车辆城市导航，在这种场景下，周围建筑物常会遮挡全球定位系统信号 [132], [138], [139]。Godha [140]以及后来的 Angrisano 将伪高度观测加入其提出的全球卫星导航系统衍生航向算法中，以改进该算法在使用低成本微机电系统惯性测量单元时的表现 [141], [142]。在室内行人导航系统中，恒定高度利用了室内地面通常平坦这一事实；除非使用楼梯、自动扶梯或电梯，否则高度几乎不会变化 [120], [143]–[147]。Munoz [147] 以及后来的 Refai [148] 基于与步态模式相关的生物力学约束应用恒定高度，而 Weenk [149] 则利用恒定高度来估计相对足部位置的步行状态。
在海洋应用领域中，Ryan [150] 展示了在海况平静时，采用带高度约束的 GPS-格洛纳斯系统的优势。

E. 零向下速度（ZDV）

假设：假设平台在运行期间的向下速度分量为零。

应用领域：陆地车辆、移动机器人、室内导航和船舶。

原理：除第（III-D）节中的恒定高度约束外，在短时间间隔内或整个轨迹中，沿水平表面运动还意味着施加零垂直速度约束。

测量模型：测量残差表示为：

$$\delta z_{\text{ZDV}}=v_{D_{\text{INS}}}-0=\mathbf{H}_{\text{ZDV}}\delta\mathbf{x}+\nu_{\text{ZDV}} \tag{27}$$

其中，$v_{D_{\text{INS}}}$ 为计算得到的惯性导航系统向下速度分量，ν_{ZDV} 为零均值白高斯测量噪声，测量矩阵定义如下：

$$\mathbf{H}_{\text{ZDV}}=\begin{bmatrix}\mathbf{0}_{1\times3} & \mathbf{e}_{3}^{\mathrm{T}} & \mathbf{0}_{1\times3} & \mathbf{0}_{1\times3} & \mathbf{0}_{1\times3}\end{bmatrix}. \tag{28}$$

文献中的应用：零向下速度用于通过紧组合 [133], 组合 [89] 增强城市环境中的车辆惯性导航 [134], [135]，或用于改进基于 Wi-Fi 的室内车辆导航 [121] 。它还应用于用于机器人定位的里程计/陀螺仪无迹卡尔曼滤波器 [137]，以及浅水环境中的惯性导航系统/多普勒测速仪组合导航 [137]。

F. 机体坐标系零向下加速度（ZAD）

假设：在平面上运动。
应用领域：陆地车辆和移动机器人。
原理：以低速行驶并使用低成本传感器，可忽略地球自转角速度和运输角速度。因此，在较短时间内，如果高度和向下速度分量保持常数（恒定加速度和零向下速度），则可假定机体坐标系中的向下加速度为零。
测量模型：测量残差为：

$$\delta z_{\text{ZAD}}=a_{z,\text{INS}}^{n}-0=b_{a_z}=\mathbf{H}_{\text{ZAD}}\delta\mathbf{x}+\nu_{\text{ZAD}} \tag{29}$$

其中 $a_{z,\ \text{INS}}^{n}$ 为计算得到的惯性导航系统向下加速度分量，ν_{ZAD} 为零均值白高斯测量噪声。在导航滤波器设置下，加速度计残差

满足 $\delta \boldsymbol{f}_{ib}^{b} \approx \mathbf{b}_a$，因此测量矩阵定义如下：

$$\mathbf{H}_{\text{ZAD}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1\times 3} & \mathbf{0}_{1\times 3} & \mathbf{0}_{1\times 3} & \mathbf{e}_3^{\mathrm{T}} & \mathbf{0}_{1\times 3} \end{bmatrix}. \tag{30}$$

文献中：作为恒定高度约束（III-D）的扩展，垂直车体速度为零必然意味着机体坐标系中的向下加速度为零。Klein 利用这一车辆约束辅助惯性导航系统在城市环境中进行导航；此类环境的地表通常平坦 [132], [133], [151]。

G. 导航坐标系零加速度（*ZAN*）

假设：静止条件。
应用领域：陆地车辆和静态精对准。
原理：静止时，加速度为零，因此以导航坐标系表示的加速度计测量值为：

$$\boldsymbol{f}^{n} = \mathbf{T}_b^n \boldsymbol{f}_{ib}^{b} = \mathbf{g}^{n}. \tag{31}$$

测量模型：测量残差为：

$$\delta \mathbf{z}_{\text{ZAN}} = \boldsymbol{f}_{\text{INS}}^{n} - \boldsymbol{f}^{n} = \mathbf{H}_{\text{ZAN}} \delta \mathbf{x} + \boldsymbol{\nu}_{\text{ZAN}} \tag{32}$$

其中 $\boldsymbol{f}^{n}{}_{\text{惯性导航系统}}$ 表示在导航坐标系中测得的比力，$\boldsymbol{\nu}_{\text{ZAN}}$ 表示均值为零的白色高斯测量噪声，而$\mathbf{H}_{\text{ZAN}}$ 表示测量矩阵。该矩阵通过对测量残差（32）施加扰动得到。

$$\begin{aligned} \delta \boldsymbol{f}^{n} &= \tilde{\boldsymbol{f}}^{n} - \boldsymbol{f}^{n} = (\tilde{\mathbf{T}}_b^n \tilde{\boldsymbol{f}}^{b}) - \boldsymbol{f}^{n} \\ &= \left(\mathbf{T}_n^b (\mathbf{I} - [\boldsymbol{\epsilon}^{n}\times]) \boldsymbol{f}^{b} + \mathbf{T}_b^n \delta \boldsymbol{f}^{b}\right) - \boldsymbol{f}^{n} \\ &= [\boldsymbol{f}^{n}\times]\boldsymbol{\epsilon}^{n} + \mathbf{T}_n^b \mathbf{b}_a \end{aligned} \tag{33}$$

因此，测量矩阵为：

$$\mathbf{H}_{\text{ZAN}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3\times 3} & \mathbf{0}_{3\times 3} & [\boldsymbol{f}^{n}\times] & \mathbf{T}_b^n & \mathbf{0}_{3\times 3} \end{bmatrix}. \tag{34}$$

文献综述：Farrell 将 ZAN 用于车辆实现，其中以已知的局部重力矢量替代 n 坐标系中的小角度 [152]，Klein 将其作为外部测量用于导航滤波器，以提高静态精对准期间的姿态精度 [57]。

H. 恒定*LLH*位置（*CP*）

假设：在城市环境中短时间段内缓慢运动。

应用领域：陆地车辆和标定。
原理：在某些情况下，可以假设纬度和经度的变化为零。也就是说，在短时间段内且速度相对较低时，位移很小，因此可假设为零。
测量模型：测量残差表示为：

$$\delta \mathbf{z}_{\text{CP}} = \mathbf{p}_{\text{INS}}^{n} - \mathbf{p}_{c}^{n} = \mathbf{H}_{\text{CP}} \delta \mathbf{x} + \boldsymbol{\nu}_{\text{CP}} \tag{35}$$

其中，$\mathbf{p}_{\text{C}}^{n}$ 是最后已知的位置，$\mathbf{p}_{\text{INS}}^{n}$是计算得出的惯性导航系统位置，而 $\boldsymbol{\nu}_{\text{CP}}$ 是零均值白高斯测量噪声。测量矩阵定义如下：

$$\mathbf{H}_{\text{CP}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3\times 3} & \mathbf{0}_{3\times 3} & \mathbf{0}_{3\times 3} & \mathbf{0}_{3\times 3} & \mathbf{0}_{3\times 3} \end{bmatrix}. \tag{36}$$

文献综述：Klein 等人（2010年）将其用于陆地车辆，与其他辅助类型相比，显著降低了估计误差 [132]。Li（2012年） [153]提出了一种快速手动标定方法，以伪位置和伪速度观测值替代缺失的全球定位系统信息。Ilyas（2016年） [154]针对行人航位推算应用提出了一种位置与姿态（P-A）锁定机制。运动检测算法检测到长时间静止后，这两个参数均取为行人运动停止前获得的最后一次测量值。

I. 零偏航角速度（*ZYR*）

假设：运动时偏航角速度为零。
应用领域：陆地车辆、移动机器人和行人导航。

原理：在没有道路横坡或坡度的情况下，直线运动会导致偏航角变化率为零。
测量模型：测量残差定义为：

$$\delta \mathbf{z}_{\text{ZYR}} = \omega_{ib,z\ \text{INS}}^{b} - 0 = \mathbf{H}_{\text{ZYR}} \delta \mathbf{x} + \nu_{\text{ZYR}} \tag{37}$$

其中 $\omega_{ib,\ z\ \text{INS}}^{b}$ 是计算得到的惯性导航系统偏航角速度，ν_{ZYR} 是零均值白高斯测量噪声。测量矩阵定义为：

$$\mathbf{H}_{\text{ZYR}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1\times 3} & \mathbf{0}_{1\times 3} & \mathbf{0}_{1\times 3} & \mathbf{0}_{1\times 3} & \mathbf{e}_3^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}. \tag{38}$$

文献综述：Crasta [155] 从可观测性角度研究了存在洋流时三维自主水下航行器（AUV）的 ZYR。Huttner 使用 ZYR [156] 实时估计纵向和横向加速度偏差。Niu [157] 在低速动力学中使用 ZYR，因为陆地车辆受到转向约束。

J. 恒定航向角（*CHA*）

假设：以恒定航向角运动。
应用领域：陆地车辆、移动机器人和行人导航。

原理：在采用网格状街道布局的城市环境中，短时间间隔内的运动可视为直线运动，即航向角不变，$\psi = \psi_c$。

测量模型：假设航向角较小，测量残差可表示为：

$$\delta z_{\text{CHA}} = \psi_{\text{INS}} - \psi_c = \mathbf{H}_{\text{CHA}} \delta \mathbf{x} + \nu_{\text{CHA}} \tag{39}$$

其中，ψ_{INS} 为计算得到的惯性导航系统航向角，ν_{CHA} 为零均值白高斯测量噪声。测量矩阵定义为：

$$\mathbf{H}_{\text{CHA}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1\times 3} & \mathbf{0}_{1\times 3} & \mathbf{e}_3^{\mathrm{T}} & \mathbf{0}_{1\times 3} & \mathbf{0}_{1\times 3} \end{bmatrix}. \tag{40}$$

文献综述：恒定航向角（也称为零积分航向角速度（ZIHR））由 Shin [158]–[160] 提出，用于在车辆停车时限制航向漂移；Liu [87] 则利用车辆停车前最后存储的航向角确定 CHA。在行人导航应用领域，Abdulrahim [144] 总结了若干约束航向角的经验法则：*i*) 建筑物形状大多为矩形，因此行人通常沿着建筑物的一侧平行行走，

一次只沿着四条边中的一条行走。 ii) 应识别非行走情形，以便在这些情况下抑制航向漂移。iii) 转向幅度较小，信号特征明显，且方向变化较小。Borenstein [161]–[163]以及后来的 Jim´enez [164] 提出了启发式漂移抑制（HDR），利用恒定航向角（CHA）进行更新，因为大多数室内行走都沿直线路径进行。其他研究纳入了生物力学模型 [165], [166] 还有一些研究采用启发式／模糊逻辑方法，通过对支撑期内最近 n 步步伐的航向角取平均值来确定 CHA [154], [167]–[169]。

K. 虚拟杆臂（*VLA*）

假设：平面运动。

应用领域：任何配备惯性导航系统和全球导航卫星系统接收机的平台。**原理**：VLA 测量的基本思想是，杆臂已知到一定精度；然而，这一信息并未直接用于导航滤波器，而主要用于对描述杆臂误差特性的随机过程进行建模。引入 VLA 后，我们可以直接利用这一信息来提升导航性能。为此，首先将杆臂误差状态扩展（6），得到

$$\delta\mathbf{x}_{\text{VLA}} = \begin{bmatrix} \delta\mathbf{x} & \delta\boldsymbol{l}^b \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^{18} \tag{41}$$

其中， $\delta\boldsymbol{l}^b \in \mathbb{R}^3$ 为杆臂误差状态向量。

测量模型：测量残差为：

$$\delta\mathbf{z}_{\text{VLA}} = \mathbf{v}^n_{l,\text{INS}} - \mathbf{v}^n = \mathbf{H}_{\text{VLA}}\delta\mathbf{x}_{\text{VLA}} + \boldsymbol{\nu}_{\text{VLA}} \tag{42}$$

其中 $\mathbf{v}^n_{l,\text{INS}}$ 为计算得到的惯性导航系统速度测量，其中包含杆臂，且 $\boldsymbol{\nu}_{\text{VLA}}$ 为零均值白色高斯测量噪声。杆臂辅助速度项（42）是若干参数的函数，这些参数经过小误差扰动分析后，得到以下测量残差：

$$\begin{aligned}\delta\mathbf{v}^n_l &= \tilde{\mathbf{v}}^n_l - \mathbf{v}^n_l = \delta\mathbf{v}^n + \Big((\mathbf{I}+[\boldsymbol{\epsilon}^n\times])\mathbf{T}^n_b[\boldsymbol{\omega}^b_{ib}\times]\,\boldsymbol{l}^b \\ &\quad -\mathbf{T}^n_b[\boldsymbol{l}^b\times](\boldsymbol{\omega}^b_{ib}+\delta\boldsymbol{\omega}^b_{ib}) + \mathbf{T}^n_b[\boldsymbol{\omega}^b_{ib}\times]\,(\boldsymbol{l}^b+\delta\boldsymbol{l}^b)\Big) - \mathbf{v}^n_l \\ &= \delta\mathbf{v}^n - [\mathbf{T}^n_b(\boldsymbol{\omega}^b_{ib}\times)\boldsymbol{l}^b\times]\boldsymbol{\epsilon}^n - \mathbf{T}^n_b[\boldsymbol{l}^b\times]\mathbf{b}_g + \mathbf{T}^n_b[\boldsymbol{\omega}^b_{ib}\times]\,\delta\boldsymbol{l}^b\end{aligned}$$

表示 $[\boldsymbol{\omega}\times]$=Ω 和 $[\boldsymbol{l}\times]$=$\boldsymbol{L}$，因此测量矩阵为：

$$\mathbf{H}^v_{\text{VLA}} = \begin{bmatrix}\mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{I}_{3\times3} & -(\mathbf{T}^n_b\boldsymbol{\Omega}^b_{ib}\boldsymbol{l}^b\times) & \mathbf{0}_{3\times3} & -\mathbf{T}^n_b\boldsymbol{L}^b & \mathbf{T}^n_b\boldsymbol{\Omega}^b_{ib}\end{bmatrix}. \tag{43}$$

文献综述：Borko 等人（2018年） [170], [171] 将 VLA 测量建模为动态状态变量，从而显著提高了精度并缩短了误差状态收敛时间。Monaco（2018年） [172]指出，当多普勒测速仪安装位置远离自主水下航行器的浮心时，杆臂偏移有助于提高车辆状态的可观测性。Zhang（2020） [173], [174] 研究了杆臂误差对陆地车辆导航中信息辅助测量（非完整约束）贡献的影响。最近，Hwang（2021年） [175] 提出了一种改进的单轨模型，并使用 UKF 将杆臂效应与车辆动态状态解耦。

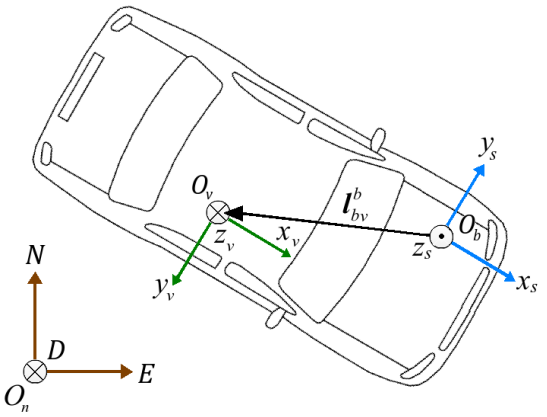


图6. 惯性测量单元与车辆坐标系之间杠杆臂的示意图

L. 相对更新（*RUP*）

假设：多个惯性测量单元之间的杆臂向量是先验已知的。

应用领域：任何配备多个惯性测量单元的平台。**原理**：当多个惯性测量单元进行融合时，每个分块滤波器都会提供自身的位置、速度和姿态估计值：

$$\begin{bmatrix}\delta\dot{\mathbf{x}}^1_{k+1}\\ \vdots \\ \delta\dot{\mathbf{x}}^n_{k+1}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{\Phi}^1_{k,k+1} & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \boldsymbol{\Phi}^n_{k,k+1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta\mathbf{x}^1_k\\ \vdots \\ \delta\mathbf{x}^n_k\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\delta\mathbf{w}^1_k\\ \vdots \\ \delta\mathbf{w}^n_k\end{bmatrix} \tag{44}$$

由于惯性测量单元刚性安装在一起，它们之间的距离向量在机体坐标系中保持不变，因此可以利用相对信息进行更新。

测量模型：测量残差为每两个惯性测量单元之间提供如下相对位置更新：

$$\delta\mathbf{z}^{\text{P}}_{\text{RUP}} = \mathbf{p}^{b,1}_{\text{INS}} - \mathbf{p}^{b,2}_{\text{INS}} - \mathbf{p}^{2,1}_{\text{INS}} = \mathbf{H}^{\text{P}}_{\text{RUP}}\delta\mathbf{x} + \boldsymbol{\nu}^{\text{P}}_{\text{RUP}} \tag{45}$$

其中，$\mathbf{p}^{b,1}_{\text{INS}}$ 是第一个分块滤波器的位置估计，$\mathbf{p}^{2,1}_{\text{INS}}$ 是两个惯性测量单元之间已知的相对距离向量。每个分块滤波器对应的过程噪声由零均值白高斯噪声 $\boldsymbol{\nu}^{\text{P}}_{\text{RUP}}$ 给出，测量矩阵定义如下：

$$\mathbf{H}^{\text{P}}_{\text{RUP}} = \begin{bmatrix}\mathbf{I}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times12} & -\mathbf{I}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times12}\end{bmatrix}. \tag{46}$$

利用第一个惯性测量单元测得的旋转速率向量，相对速度向量 $\mathbf{p}^{2,1}_{\text{INS}} = \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{p}^{2,1}_{\text{INS}}$ 可用于生成相对速度更新，其测量矩阵为：

$$\mathbf{H}^{\text{V}}_{\text{RUP}} = \begin{bmatrix}\mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{I}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times9} & \mathbf{0}_{3\times3} & -\mathbf{I}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times9}\end{bmatrix}. \tag{47}$$

而且，由于固定安装的惯性测量单元之间的相对姿态在运动过程中也保持不变，因此相对姿态更新由以下测量矩阵给出：

$$\mathbf{H}^{\text{A}}_{\text{RUP}} = \begin{bmatrix}\mathbf{0}_{3\times6} & \mathbf{I}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times6} & \mathbf{0}_{3\times6} & -\mathbf{I}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times6}\end{bmatrix}. \tag{48}$$

文献中：Bancroft（2008年） [176]–[178] 提出了几种用于行人惯性导航系统的足部安装架构，将多个微机电系统惯性测量单元集成到一个通用虚拟

框架（VIMU）中，利用人体步态周期的相关信息进行相对更新。Waegli（2008年） [179] 研究了不同几何结构的冗余传感器阵列所获取的测量值如何影响估计精度。Guerrier（2009年） [180] 表明，采用三元配置的惯性测量单元对它们之间的几何方向具有不变性。随后引入了车载实现，通过计算传感器组件与GNSS天线之间杆臂的差值，获得相对距离向量[181]。最近，Hartzer（2020） [182] 提出了一种分布在多个自主车辆上的多惯性测量单元系统，利用其GNSS天线提供的相对位置和姿态更新，构建了协同定位环境。

IV. 间接信息辅助

在第III节中，平台约束和信息被直接用于滤波器更新。在某些情况下，可以从外部传感器中提取更多信息，因此将其称为间接信息辅助。表II 总结了本节回顾的各种间接信息辅助方法，大致可分为两类模式：

表 II 间接信息辅助类型

章节	缩写	辅助类型	信息类型	模态
IV-A	PBO	基于位置	方向	异质-
IV-B	VBO	基于速度		性
IV-C	伪全球导航卫星系统	伪GNSS	传感器	同质
IV-D	伪多普勒测速仪	伪多普勒测速仪		的

i) 异构：来自单一状态变量（由外部传感器提供）的量为另一个状态变量提供新信息，例如，利用位置测量推断平台姿态。ii) 同构：外部传感器获取的相同量之后由基于模型或基于学习的方法进行近似，例如，伪传感器信息使得能够使用外部传感器。

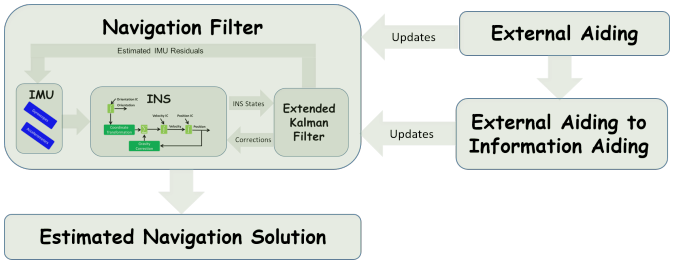


图 7. 间接信息辅助框图。

请注意，直接信息辅助不需要外部传感器，而异构间接信息辅助则需要外部传感器，如图7所示。

A. 基于位置的定向（PBO）

应用领域：任何作业环境中的车辆。
使用案例：低加速度、恒定速度，尤其是静止状态，往往会导致某些误差状态（如失准角或仪器偏差）的可观测性较弱。若没有直接的角度测量，定向误差可能会逐渐增大，并因重力投影误差而加剧导航误差。

原理：车辆随时间变化的运动学轨迹提供了丰富的几何约束和时间约束。利用这些关系不仅能获得与方向相关的信息，还能估计不可观测的误差状态。

文献综述：Cho（2010） [183]和 Maeder（2011） [184] 提出了一种新技术，可为 GPS/INS 组合系统提供额外的姿态信息。Wu（2012） [185]使用级联卡尔曼滤波器对GPS航迹角进行滤波，以辅助估计不可观测的偏航角。通过采用基于加速度的切换机制，水平恒速期间偏航角的发散得以减小。Juang（2014） [186] 采用了一种基于差分的方法，利用先前的位置估计值来近似平面内的速度和航向角。

Wierzbicki（2015） [187] 展示了如何将 GPS信号用作赫尔默特变换的输入，从而利用地心参考系中的相对变化确定旋转角。Li（2016） [188]考察了 GPS辅助姿态估计的性能，将直接导航方法与间接误差状态进行比较，结果显示后者具有明显优势。Huang（2018） [189][190]提出了一种 GPS辅助粗对准方法：基于利用卡尔曼滤波器推导出的线性状态空间模型，联合推断初始机体坐标系与当前机体坐标系之间的姿态矩阵。Xu [191]提出了一种利用位置轨迹对捷联惯性导航系统/GPS组合系统进行高效失准估计的方法。Klein（2020） [192] 提出了一种方法，将先前测得的位置更新同时用于导航滤波器，以确定车辆航向。

B. 基于速度的定向（VBO）

应用领域：处于运动中的陆地车辆，以及假设进行协调转弯飞行的空中航空器。
使用案例：某些导航场景可能会因未建模动态干扰运动模型而导致性能不佳。例如，风或海流可能引起非预期的横向速度，使车辆指向方向（即偏航角）与实际行进方向（即航迹角）之间产生侧滑角。

原理：速度坐标系相对于导航坐标系（北东地坐标系）的旋转可用于施加空间约束，从而提供额外的姿态信息。

在文献中：伪姿态的研究可追溯到 20 世纪 90 年代。Cohen [193]和 Kornfeld [194] 展示了如何通过处理速度和加速度矢量的分解来改进角度估计。Shin（2001） [158] 采用了速度匹配对准方法，将全球定位系统测量值与飞行动力学结合起来，从而能够根据

导航坐标系速度。Salycheva（2004） [195] 提出了一种阈值机制，在检测到机动时便会启动。通过结合全球定位系统速度和航向信息来估计方位误差，失准误差被证明可成为可直接测量的分量。Bevly（2006） [196] 提出了一种独特的方法，利用速度测量值确定姿态和侧滑角。Jie（2008）[197] 提出将速度和加速度矢量分解为切向分量和法向分量，从而在水平面和垂直面上形成新的参考矢量，进而提取欧拉角。

Lai（2010年） [198] 提出从飞机速度矢量轴估算伪滚转角，以补偿纵向平面内攻角的影响。Wu和Pan（2013） [199]–[201]提出了一种闭式解，可在机载动力学可能干扰位置/速度输入的场景中提取姿态矩阵。Wang [202]采用低成本微机电系统惯性测量单元融合伪姿态方法，结果表明，与无辅助航位推算相比，精度显著提高。

C. 伪全球导航卫星系统（*P-GNSS*）

应用领域：任何作业环境中的车辆。
使用案例：干扰、欺骗或环境限制导致的信号遮挡，均可能造成GNSS接收不稳定。与紧组合（TC）INS/GNSS组合策略不同，松组合方法无法处理可用卫星少于四颗的场景 [203]。
原理：由于运动学耦合，位置增量与车辆动力学高度相关。为利用这一点，研究者提出了解析模型和基于学习的方法，通过回归生成伪GNSS增量，以替代缺失信号。

在相关文献中：Conley（2006年） [204]提出了一种虚构GPS方法，通过最小精度衰减因子（DOP）获取伪卫星信号，并使用星历数据确定每个初始位置和速度。El（2006年） [205] 和Noureldin（2011年） [206]是最早训练神经网络、利用GPS校正来映射位置和速度误差的研究者之一。Klein（2011年） [207], [208] 提出了一种改进的松耦合（MLC）方法，其中虚拟卫星提供互补的伪距测量值，这些测量值根据INS位置和速度估计值通过数学方法推导得出。

Tan（2015年） [209]表明，机器学习模型与松组合集成方案相结合，在使用与比力和角速度测量值高度相关的GPS增量进行训练后，能够预测位置。Yao、Zhang和Fang（2017） [210]–[213]提出了不同的状态机，在正常运行期间，基于学习的模型使用误差矢量及其对应的位置增量对进行训练。一旦无法再接收到GNSS信号，切换机制便会激活推理模式，此时模型会回归伪GNSS信号。

D. 伪*DVL*（*P-DVL*）

应用领域：海洋环境。
使用案例：在无法接收卫星信号且无需预先安装基础设施的水下环境中，多普勒测速仪（DVL）是一种常见的辅助传感器。由于受到声学环境或与海床距离的影响，部分DVL波束无法反射回来，导致DVL无法维持底跟踪锁定，因而无法估计自主水下航行器的速度。

原理：利用附加信息或传感器测量值来构建并估计缺失的多普勒测速仪波束。将这些波束与已测得的可用波束结合起来，估计航空器的速度矢量。
文献综述：相关研究可分为两类约束，信息即由此得出。

- **几何约束**：利用不同状态变量之间存在的空间关系。
- **时间约束**：利用航空器随时间变化的运动学轨迹，以获取补充信息。

1）几何约束：Zhu（2017） [214] 采用偏最小二乘回归与支持向量回归（SVR）相结合的方法构建混合预测器，将缺失的多普勒测速仪测量值映射到当前和过去的惯性导航系统速度估计值。Eliav（2018年） [215] 也采用了ELC集成方法，将部分多普勒测速仪测量值与先前的导航解结合，形成计算得到的速度估计值，以辅助惯性导航系统。也就是说，将过去的多普勒测速仪速度测量值和惯性传感器读数与部分波束测量值结合起来，估计航空器的速度矢量。

Liu（2018年） [216] 实现了一种紧耦合导航方法，利用压力传感器提供的深度更新，通过几何约束补充有限的多普勒测速仪测量值。类似地，Wang（2019） [217]采用了与压力传感器相结合的紧耦合方法，但使用的是原始波束测量值，并未将其转换为三维速度矢量。Ansari [218]展示了如何在不借助任何辅助传感器信息的情况下，使用进化模糊算法预测缺失的多普勒测速仪数据。Yoo [219] 实现了一种TC集成方案，可通过重新生成故障换能器的测量值来利用部分多普勒测速仪测量值。

Li（2020年） [220], [221] 提出了一种新颖的神经网络型捷联惯导系统/DVL，能够在DVL长时间发生故障期间提供可靠的速度预测。Wang（2021年） [222]采用邓普斯特-谢弗理论与最小二乘支持向量机相结合，合成虚拟DVL信号。近期，Yao（2022） [223] 提出了一种零速更新辅助虚拟波束方案，利用DVL波束与零速度矢量之间的几何关系。Yona以及后来的Cohen（2022） [224]–[226]，采用专门的神经卷积网络来回归缺失波束的速度，适用于传感器故障、波束测量不完整或存在离群值等情况。

2）时间约束：Stanway（2012年） [227]利用在线分箱平均，根据相对于过去观测的加权平均差，估计水面拒止区域（200米以下）的车辆速度。Ivanov（2014年）[228] 利用多面体将时变轨迹建模为三维空间中由顶点构成的凸集。研究表明，一种弹性传感器融合算法不仅利用平台历史进行导航，还能防御传感器攻击或故障。Costanzi（2017） [229]–[231] 提出了不同的协作策略，以应对深水中的DVL底锁范围问题；这些策略利用在线更新的数据库，其中包含多个EKF载体的过去测量值和估计值。

文献集合 [232]–[234] 研究了DVL波束部分和完全中断的情形，采用解析推导的算法来估计速度矢量及其相应的方差。通过以高阶多项式近似取代简单平均，该方法计及了过去估计速度的导数，从而还能够估计DVL加速度和加加速度项。

V. 模型辅助惯性导航系统

车辆动力学模型（VDM）主要采用六自由度（DoF）形式，是对能够生成比力和角速度向量的车辆进行的仿真；这些比力和角速度向量由作用于车辆上的力和力矩所引起。表 III 总结了文献中发现的不同研究，并根据具体作业环境进行了分类。

表 III 基于模型的辅助类型

章节	缩写	作业环境
V-A	AV	空中
V-B	MV	海洋
V-C	UV	水下
V-D	LV	Land

虽然这些误差被归因于平台模型中的误差，例如风模型阻力系数不准确，但测得的惯性读数也包含与惯性硬件和环境条件相关的误差。由于误差来自两个不同的来源（平台建模和惯性硬件），仿真运动模型与导航滤波器并行运行，二者相互馈送，从而避免了惯性导航系统单独运行。

模型辅助惯性导航系统无需外部传感器即可应用，但需要足够的计算能力来在线运行六自由度运动模型。除了作为额外的信息来源外，这一概念还能够提供强大的物理预测，例如传感器阵列无法感知的空气动力学或流体动力学效应；也就是说，惯性读数有助于校正仿真参数。

参数。图 8 展示了VDM模块与惯性导航系统解的连接配置。

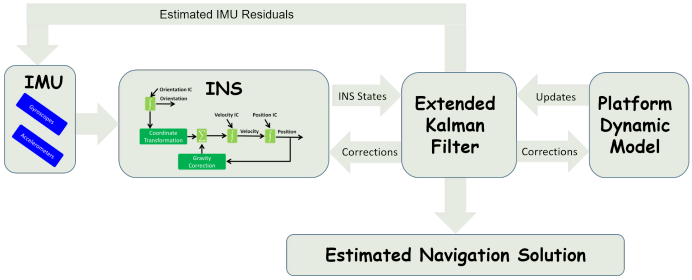


图 8. 模型辅助信息框图。

A. 空中航空器（*AV*）

Koifman 和 Bar-Itzhack（1999年） [235]提出了一种飞机动力学模型（ADM），用于辅助低等级捷联惯性导航系统。在风速恒定的情况下，结果表明，动力学辅助方案的精度显著高于未使用辅助信息的惯性导航系统。Julier（2003年）[236]研究了互补车辆模型所发挥的作用及其对基于传感器的导航系统性能的影响。Bryson（2004年） [237] 采用ADM方法辅助估计无人飞行器（UAV）的位姿。

Cork（2007） [238]使用无迹卡尔曼滤波器（UKF）建立了飞机动力学的在线模型，并进行了传感器故障检测。Vissiere（2008） [239]针对小型直升机运动模型，采用了一个全面的环境模型，考虑了地面效应、致动器引起的滞后、旋翼引起的机身阻力以及柔性响应。Dadkhah[240] 采用微型直升机模型，将运动方程作为辅助信息源，为GPS拒止环境中的姿态和航向参考系统提供辅助。Crocoll（2013）[241]–[243] 将运动学模型与VDM结合起来，构建了最优统一模型，从而实现了优于现有方法的性能。Cork（2014年）[244] 将ADM直接纳入固定翼无人机的导航滤波器，并将作用于无人机的模拟力和力矩用作信息源。Butt（2015）[245] 提出了一种高超声速飞行器建模（FVM）方法，并通过美国国家航空航天局（NASA）的实际飞行试验进行了验证。

Khaghani（2016年） [246], [247] 将详细的风模型与自主水下航行器的过程模型结合使用，显著提升了导航滤波器的性能。Nobahari（2017） [248]提出了模型辅助惯性导航（MAIN），该方法基于六自由度飞行仿真，可在着陆阶段或近地面时为惯性导航系统提供辅助。Mwenegoha（2019） [249] 为固定翼无人机实现了一种基于模型的集成方法，利用由低成本MEMS惯性传感器和全球导航卫星系统测量值辅助的VDM，并进行转动惯量标定。Laupre（2020）[250] 指出，VDM在很大程度上依赖于气动系数的准确确定。Youn [251]–[253] 实时计算气动系数以合成控制信号，从而提高姿态估计，相较于传统

未考虑风模型的方法。同样，Ko以及之后的Xu（2019）[254], [255], 提出了一种实用的VDM重建方法，以在GPS信号中断期间辅助四旋翼飞行器。

B. 海洋航行器（*MV*）

Shi（2009年） [256] 基于对流体动力学的分析，提出了操纵船舶的非线性模型框架，并采用固定区间卡尔曼滤波平滑算法进行预处理。Perera（2010年） [257], [258] 提出了一种基于曲线运动模型的操纵海洋船舶模型，该模型以线性位置模型为基础，可实现精确的轨迹估计。Fossen [259] 介绍了一种海洋运动控制单元，利用卡尔曼滤波器降低速度和位置测量中的波浪诱发振荡运动，并改善航向角。Soda（2011年） [260] 考虑了与船舶动力学相互作用的多种环境因素，例如洋流、波浪和潮汐，并将这些因素作为船舶导航状态的输入。

Vasconcelos [261] 通过推导一种传感器集成方案，利用重力辅助观测并考虑自主水面艇（ASC）的动力学，以准确追踪测量扰动。Araki（2012年） [262]将计算流体力学（CFD）分析纳入运动模型，以更好地预测船舶操纵性。Chen（2013）[263], [264] 基于普林斯顿海洋模型（POM）开展数值模拟，研究波浪、洋流和风如何影响漂移方面的导航性能。Sabet（2017） [265] 通过参数化黏性阻尼、船体升力和控制输入，采用容积法和无迹卡尔曼滤波扩展了六自由度运动模型。Lu（2018年） [266]提出了一种通过动力学推导得到的海洋航行器模型，该模型在仿真引擎中纳入了海洋环境下的非完整约束（NHC）。Taimuri（2020）[267] 介绍了一种推进船舶的数学模型，其中升沉、横摇和纵摇参数先由非线性操纵模型估计，再输入滤波器。

C. 水下航行器（*UV*）

Kinsey（2007年） [268], [269] 介绍了一种用于水下航行器导航的全状态模型观测器的解析方法，该方法利用了对自主水下航行器非线性动力学的了解，并结合李雅普诺夫方法和卡尔曼–雅库波维奇–波波夫引理。Morgado [270], [271]开发了一种航行器动力学辅助技术，可提供刚体三维运动的运动学状态信息。Hegrenæs（2008年）[272]–[274] 提出了多种模型辅助实现方案，不仅考虑了水动力学模型，还对实时海流进行了数学建模。Batista（2009年） [275]利用海流估计值，在闭环设计中计算应答器的速度和位置。Lammas（2010年） [276] 采用基于VD的模型，在声学传感器发生中断时，从自主水下航行器的运动方程中提取运动学状态。

Martinez（2015年） [277] 为水下航行器实现了一个非线性动力学模型（NLDM），并采用三自由度线性动力学模型，以便在导航前和导航过程中在线估计海流参数。Herlambang [278]使用雅可比矩阵对自主水下航行器模型进行线性化，得到一个线性模型，再通过集合卡尔曼滤波器（EnKF）对其进行估计。Dinc，随后是 Khaghani（2015年） [279]–[281], 提出了一种自主水下航行器的水动力运动模型，该模型考虑了作用于航行器的科里奥利力和向心力所产生的动力耦合。Allotta（2016年） [282]提出了一种创新的导航策略，其运动学基于*Typhoon* 自主水下航行器的水动力模型，并通过无迹卡尔曼滤波进行估计。

Zhang [283] 提出了一种基于特殊正交群 SO(3) 几何性质、用于圆柱结构周围的状态估计方案。Tal（2017年）[284] 采用 ELC 积分方案实现了一个六自由度水动力学模型，并根据相应的刚体运动模型模拟自主水下航行器动力学。Rypkema（2018年） [285] 实现了一个基于水动力学模型的定位与导航系统，其中自主水下航行器的线速度由测得的角速度和航行器螺旋桨转速确定。Arnold（2018年） [286] 将基于水动力学的运动模型用于*FlatFish* 自主水下航行器，以便在底锁导致信号中断时辅助多普勒测速仪测量。Peng-Fei 和 Karmozdi（2020）[287]–[289]提出了一种智能速度模型，可提供由三自由度平移运动模型的运动学状态得出的伪多普勒测速仪测量值。

D. 陆地车辆（*LV*）

Ma（2003年） [290]研究了在陆地车辆上安装的低成本捷联惯性导航系统中，车辆运动学模型（VKM）除车体非完整约束外所起的作用。Sheu（2010年） [291]提出了一种结合行为型方案与基于模型的方案的机器人导航混合方法，其中各模块负责不同级别的反应式响应。Salmon（2014年） [292],[293]研究了在紧耦合惯性导航系统/全球定位系统中加入车辆动力学模型（VDM）如何提升地面车辆导航性能。Zhao（2018年）及其后来的Bijjahalli [294], [295],比较了惯性导航系统/全球导航卫星系统/车辆动力学模型配置下不同工作模式的性能，并考察了基于视觉的传感器如何提升解算精度。Zemer（2019） [296] 提出了一种基于陆地车辆动力学的无陀螺仪惯性导航系统模型。因此，在适用于地面机器人导航的三自由度配置中，线加速度和角速度均仅通过 n 加速度计确定。

VI. 结论

本文对信息辅助导航技术进行了全面且最新的综述，旨在提供广阔的全景视角，并涵盖现有文献，尤其是近三十年来的研究。鉴于辅助配置的核心地位，本文选择其作为分类依据，将内容归纳为三个主题类别：(i)直接信息辅助(ii)间接信息辅助(iii)基于模型的辅助。

每种辅助方法都通过无需表格的工作示例进行建模和演示，随后分析各个使用案例的典型优缺点。在直接信息辅

助部分中，我们还提供了测量模型，可作为将信息辅助方法纳入现有或新建导航滤波器的范例。正如我们在论文中详细讨论的那样，惯性导航系统解容易受到多种因素影响而产生漂移，从仪器噪声到环境扰动皆是如此，因此防止漂移是系统设计者的首要任务。准确识别工程挑战后，便能够选择合适的互补方法，智能地补偿系统可能遇到的任何障碍。此外，这些信息辅助方法只需进行软件修改。

参考文献

[1] D. Titterton 和 J. L. Weston，《捷联惯性导航技术》。美国航空航天学会和电气工程师学会，2004年。[2] A. Noureldin、T. B. Karamat 和 J. Georgy，《惯性导航、卫星定位及其集成基础》。施普林格，2013。[3] A. J. May、T. Ross、S. H. Bayer 和 M. J. Tarkiainen，“行人导航辅助设备：信息需求与设计启示”，《个人与泛在计算》，第7卷，第6期，第331–338页，2003年。[4] U. Nehmzow，“动物与机器人导航”，载于《智能自主体的生物学与技术》。施普林格，1995年，第258–274页。[5] K. R. Britting，《惯性导航系统分析》。约翰·威立父子出版公司，1971年。[6] C. Jekeli，《具有大地测量应用的惯性导航系统》。Walter de Gruyter，德国柏林，2000年。[7] J. A. Farrell，《高频传感器辅助GPS导航》。McGraw-Hill，2008年。[8] P. D. Groves，《GNSS、惯性及多传感器组合导航系统原理》。Artech House，2013。[9] P. S. Maybeck，《随机模型、估计与控制》。学术出版社，1982年。[10] I. Klein、Y. Bar-Shalom 和 I. Rusnak，“协调转弯机动跟踪的可观测性分析”，载于《2014年IEEE第28届以色列电气与电子工程师大会（IEEEI）》。IEEE，2014年，第1–5页。[11] Y. Li、X. Niu、Q. Zhang、Y. Cheng 和 C. Shi，“陆地车辆导航系统非完整约束的可观测性分析”，载于《美国导航学会卫星分会第25届国际技术会议论文集（ION GNSS 2012）》，2012年，第1521–1529页。[12] J. Wendel、O. Meister、C. Schlaile 和 G. F. Trommer，“用于自主直升机的GPS/MEMS-IMU导航系统”，《航空航天科学与技术》，第10卷，第6期，第527–533页，2006年。[13] A. M. Hasan、K. Samsudin、A. R. Ramli、R. Azmir 和 S. Ismaeel，“导航系统综述（组合与算法）”，《澳大利亚基础与应用科学杂志》，第3卷，959，2009年2，943 no. pp. –。[14] C. Toth 和 G. J´o´zk´ow，“遥感平台与传感器：综述”，《国际摄影测量与遥感杂志》，第115卷，第22–36页，2016年。[15] O. Kubitz、M. O. Berger、M. Perlick 和 R. Dumoulin，“射频识别设备在辅助自主移动机器人导航中的应用”，载于《1997年IEEE第47届车辆技术会议：动态技术》，第1卷。IEEE，1997年，第126–130页。[16] J. Raquet 和 R. K. Martin，“非GNSS射频导航”，载于《2008年IEEE国际声学、语音与信号处理会议》。IEEE，2008年，第5308–5311页。[17] V. Moghtadaiee、A. G. Dempster 和 S. Lim，“使用调频广播信号进行室内定位：一种指纹定位法”，载于《2011年室内定位与室内导航国际会议》。IEEE，2011年，第1–7页。[18] J. Biswas 和 M. Veloso，“自主室内移动机器人的Wi-Fi定位与导航”，载于《2010年IEEE国际机器人与自动化会议》。IEEE，2010年，第4379–4384页。

[19] M. Kotaru、K. Joshi、D. Bharadia 和 S. Katti，“Spotfi：利用Wi-Fi实现分米级定位”，载于2015年ACM数据通信特别兴趣小组会议论文集，2015年，第269–282页。[20] D. Vasisht、S. Kumar 和 D. Katabi，“利用单个Wi-Fi接入点实现分米级定位”，载于第13届 {USENIX} 网络系统设计与实现研讨会（{NSDI} *16*），2016年，第165–178页。[21] A. Elfes，“基于声呐的制图与导航系统”，载于《1986年IEEE国际机器人与自动化会议论文集》，第3卷，1986年，第1151–1156页。[22] ——，“基于声呐的真实环境制图与导航”，《IEEE机器人与自动化期刊》，第3卷，第3期，第249–265页，1987年。[23] J. J. Leonard 和 H. F. Durrant-Whyte，《用于移动机器人导航的定向声呐感知》。施普林格科学与商业媒体，2012年，第175卷。[24] S. D. McPhail 和 M. Pebody，“水面船对深潜自主水下航行器的仅测距定位”，《IEEE海洋工程期刊》，第34卷，第4期，第669–677页，2009年。[25] M. Bayat 和 A. P. Aguiar，“自主水下航行器仅测距定位与制图：观测器设计及实验结果”，载于《2013年欧洲控制会议（ECC）》。IEEE，2013年，第4394–4399页。[26] M. Bayat、N. Crasta、A. P. Aguiar 和 A. M. Pascoal，“存在未知洋流时的水下航行器基于测距定位：理论与实验”，《IEEE控制系统技术汇刊》，第24卷，第1期，第122–139页，2015年。[27] S. M. Smith 和 D. Kronen，“用于自主水下航行器导航的低成本短基线声学定位系统实验结果”，载于《OCEANS’97》。MTS/IEEE会议论文集，第1卷。IEEE，1997年，第714–720页。[28] L. Collin、S. Azou、K. C. Yao 和 G. Burel，“水面长基线定位系统中的空间不确定性”，载于《第五届欧洲水下声学会议（ECUA 2000）》，2000年。[29] M. B. Larsen，“水下航行器的合成长基线导航”，载于《OCEANS 2000 MTS/IEEE会议暨展览。会议论文集（目录号00CH37158）》，第3卷。IEEE，2000年，第2043–2050页。[30] M. V. Jakuba、C. N. Roman、H. Singh、C. Murphy、C. Kunz、C. Willis、T. Sato 和 R. A. Sohn，“用于冰下自主水下航行器作业的长基线声学导航”，《野外机器人学期刊》，第25卷，第11–12期，第861–879页，2008年。[31] J. Snyder，“用于观测级ROV的多普勒测速仪（DVL）导航”，载于《OCEANS 2010 MTS/IEEE西雅图会议》。IEEE，2010年，第1–9页。[32] W. Gao、Y. Zhang 和 J. Wang，“基于容积卡尔曼滤波器的捷联惯性导航系统/北斗/多普勒测速仪组合导航算法”，《传感器》，第14卷，第1期，第1511–1527页，2014年。[33] L. Chang、Y. Li 和 B. Xue，“信息有限条件下多普勒测速仪辅助捷联惯性导航系统的初始对准”，《IEEE/ASME机电一体化汇刊》，第22卷，第1期，第329–338页，2016年。[34] N. Clark 和 P. Furth，“智能星敏感器”，载于《第43届IEEE中西部电路与系统研讨会论文集（目录号CH37144）》，第3卷。IEEE，2000年，第1430–1433页。[35] A. Brown、B. Mathews 和 D. Nguyen，“使用软件定义无线电的GPS/惯性导航系统/星敏感器导航”，载于《第29届年度AAS制导与控制会议论文集》，科罗拉多州布雷肯里奇，2007年。[36] A. M. Rad、J. H. Nobari 和 A. A. Nikkhah，“通过组合惯性导航系统、星敏感器和地平仪实现最优姿态与位置确定”，《IEEE航空航天与电子系统杂志》，第29卷，第4期，第20–33页，2014年。[37] V. Capuano、C. Botteron、Y. Wang、J. Tian、J. Lecl`ere 和 P.-A. Farine，“用于地月转移轨道的GNSS/惯性导航系统/星敏感器组合导航系统”，载于《美国导航学会卫星分会第27届国际技术会议论文集（ION GNSS+ *2014*）》，2014年，第1433–1447页。[38] J. A. Van Allen，“天文导航基本原理”，《美国物理学杂志》，第72卷，第11期，第1418–1424页，2004年。[39] X. Ning 和 J. Fang，“基于无迹卡尔曼滤波器和信息融合的低地球轨道卫星自主天文导航方法”，《航空航天科学与技术》，第11卷，第2–3期，第222–228页，2007年。[40] J. Karl，《GPS时代的天文导航》。Paradise Cay Publications

，2007。

[41] M. J. Caruso，《磁传感器在低成本罗盘系统中的应用》，载于IEEE 2000年定位与导航研讨会（目录号00CH37062）。IEEE，2000年，第177–184页。[42] Y. Yang和J. A. Farrell，《用于先进车辆控制的磁力计与差分载波相位GPS辅助INS》，《IEEE 机器人与自动化汇刊》，第19卷，第2期，第269–282页，2003年。[43] F. Goldenberg，《超越磁罗盘的地磁导航》，载于IEEE/ION PLANS 2006会议论文集，2006年，第684–694页。[44] J. Gaspar、N. Winters和J. Santos-Victor，《利用全向摄像机实现基于视觉的导航与环境表征》，《IEEE 机器人与自动化汇刊》，第16卷，第6期，第890–898页，2000年。[45] B. Sinopoli、M. Micheli、G. Donato和T.-J. Koo，《无人机的基于视觉的导航》，载于2001年ICRA会议论文集：IEEE国际机器人与自动化会议（目录号01CH37164），第2卷。IEEE，2001年，第1757–1764页。[46] R. Madison、G. Andrews、P. DeBitetto、S. Rasmussen和M. Bottkol，《GPS受限环境中小型无人机的视觉辅助导航》，载于AIAA Infotech@ Aerospace 2007会议暨展览会，2007年，第2986页。[47] F. Caballero、L. Merino、J. Ferruz和A. Ollero，《中高空飞行无人机的基于视觉的里程计与同步定位和建图》，智能与机器人系统杂志，第54卷，第1期，第137–161页，2009年。[48] O. S. Salychev，《导航与地球物理学中的惯性系统》。俄罗斯莫斯科鲍曼莫斯科国立技术大学出版社，1998年。[49] D. A. Grejner-Brzezinska、Y. Yi和C. K. Toth，《弥补城市峡谷中的GPS信号间断：零速更新的优势》，《导航》，第48卷，第4期，第216–226页，2001年。[50] D. A. Grejner-Brzezinska、C. K. Toth和Y. Yi，《弥补城市峡谷中的GPS信号间断：零速更新真的有用吗？》，载于导航学会第58届年会和CIGTF第21届制导测试研讨会论文集（2002），2002年，第231–240页。[51] L. Xiaofang、M. Yuliang、X. Ling、C. Jiabin和S. Chunlei，《零速检测器和卡尔曼滤波器在惯性导航系统零速更新中的应用》，载于2014年IEEE中国制导、导航与控制会议论文集。IEEE，2014年，第1760–1763页。[52] Y. Ben、G. Yin、W. Gao和F. Sun，《应用于捷联惯性导航系统零速更新的改进滤波估计方法》，载于2009年机电一体化与自动化国际会议。IEEE，2009年，第3375–3380页。[53] Y. S. Suh，《利用零速区间和惯性传感器进行姿态与位置估计的平滑器》，IEEE传感器期刊，第12卷，第5期，第1255–1262页，2011年。[54] H. T. Duong和Y. S. Suh，《利用惯性传感器进行姿态与位置估计的计算高效次优平滑器》，载于2015年第15届控制、自动化与系统国际会议（ICCAS）。IEEE，2015年，第1410–1412页。[55] K. Saadeddin、M. F. Abdel-Hafez和M. A. Jarrah，《利用GPS/IMU融合与车辆动力学估计车辆状态》，《智能与机器人系统杂志》，第74卷，第1期，第147–172页，2014年。[56] H. T. Duong和Y. S. Suh，《利用惯性传感器进行姿态与位置估计的简单平滑器》，International Journal of Control, Automation and Systems，第14卷，第6期，第1626–1630页，2016年。[57] I. Klein和Y. Bar-Shalom，《低成本陀螺仪的惯性导航系统精对准：适用于不同测量类型的自适应滤波器》，IEEE Access，第9卷，第79 021–79 032页，2021年。[58] E. Foxlin，《利用鞋载惯性传感器进行行人跟踪》，IEEE计算机图形学与应用，第25卷，46，2005 6，38期，第 – 页。[59] I. Skog、P. Handel、J.-O. Nilsson和J. Rantakokko，《零速检测——算法评估》，IEEE生物医学工程汇刊，第57卷，第11期，第2657–2666页，2010年。[60] I. Skog、J.-O. Nilsson和P. H¨andel，《足载惯性导航系统零速检测器评估》，载于2010年室内定位与室内导航国际会议。IEEE，2010年，第1–6页。[61] C. Fischer、P. T. Sukumar和M. Hazas，《教程：使用惯性传感器实现行人跟踪器》，IEEE《普适计算》，第12卷，第2期，第17–27页，2012年。[62] J. Rantakokko、P. Str¨omb¨ack和P. Anderson，《用于消防员定位的足部与膝部安装式惯性导航系统》，载于美国导航学会2014年国际技术会议论文集，2014年，第145–153页。

[63] Y. Zhuang、H. Lan、Y. Li 和 N. El-Sheimy，《基于手持设备的PDR/INS/Wi-Fi集成室内行人导航》，Micromachines，第6卷，第6期，第793–812页，2015年。[64] J. Ruppelt、N. Kronenwett、G. Scholz 和 G. F. Trommer，《基于足部安装惯性传感器的高精度、稳健室内定位》，载于 IEEE/ION PLANS 2016 论文集，2016年，第67–75页。[65] J. W. Song 和 C. G. Park，《采用级联卡尔曼滤波器进行航向角误差估计以增强行人导航》，《传感器》，第18卷，第4期，第1281页，2018年。[66] H. Fourati，《通过足部安装的惯性测量单元和互补滤波器实现行人导航的异构数据融合算法》，IEEE仪器与测量汇刊，第64卷，第1期，第221–229页，2014年。[67] X. Tong、Y. Su、Z. Li、C. Si、G. Han、J. Ning 和 F. Yang，《一种用于采用MEMS传感器进行行人航位推算的双步无迹卡尔曼滤波器和基于隐马尔可夫模型的零速更新》，IEEE工业电子学汇刊，第67卷，第1期，第581–591页，2019年。[68] W. T. Faulkner、R. Alwood、D. W. Taylor 和 J. Bohlin，《使用靴载惯性测量单元跟踪行人时的高度精度》，载于 IEEE/ION定位、位置与导航研讨会。IEEE，2010年，第90–96页。[69] Y. Li 和 J. J. Wang，《一种采用低成本惯性测量单元的稳健行人导航算法》，载于《2012年室内定位与室内导航国际会议（IPIN）》。IEEE，2012年，第1–7页。[70] K. Abdulrahim、T. Moore、C. Hide 和 C. Hill，《理解零速更新在基于MEMS的行人导航中的性能》，International Journal of Advancements in Technology，第5卷，第2期，2014年。[71] M. Ren、K. Pan、Y. Liu、H. Guo、X. Zhang 和 P. Wang，《一种新型足部安装惯性传感器系统行人导航算法》，《传感器》，第16卷，第1期，第139页，2016年。[72] R. Zhang、H. Yang、F. H¨oflinger 和 L. M. Reindl，《基于速度分类的自适应零速更新行人跟踪》，IEEE传感器期刊，第17卷，第7期，第2137–2145页，2017年。[73] W. Sun 和 Y. Yang，《基于非完整约束和零速更新的BDS PPP/INS紧耦合方法》，IEEE Access，第8卷，第128 866–128 876页，2020年。[74] Y. Wu、H. Zhang、M. Wu、X. Hu 和 D. Hu，《捷联惯性导航系统对准的可观测性：全局视角》，IEEE航空航天与电子系统汇刊，第48卷，第1期，第78–102页，2012年。[75] J.-O. Nilsson、I. Skog、P. H¨andel 和 K. Hari，《人人皆可使用的足部安装惯性导航系统——一种开源嵌入式实现》，载于 IEEE/ION PLANS 2012 论文集，2012年，第140–145页。[76] J.-O. Nilsson、A. K. Gupta 和 P. H¨andel，《轻松实现足部安装的惯性导航》，载于《2014年室内定位与室内导航国际会议（IPIN）》。IEEE，2014年，第24–29页。[77] I. Y. Bar-Itzhack 和 N. Berman，《惯性导航系统的控制理论方法》，Journal of Guidance, Control, and Dynamics，第11卷，第3期，第237–245页，1988年。[78] F. O. Silva、E. M. Hemerly 和 W. C. Leite Filho，《关于静基座SINS对准卡尔曼滤波器的测量选择》，《测量》，第130卷，第82–93页，2018年。[79] Y. S. Suh、N. H. Q. Phuong 和 H. J. Kang，《利用惯性传感器和视觉进行距离估计》，International Journal of Control, Automation and Systems，第11卷，第1期，第211–215页，2013年。[80] A. Noureldin、D. Irvine-Halliday 和 M. P. Mintchev，《基于光纤陀螺仪的随钻连续测量水平井测量仪器的精度限制》，IEEE仪器与测量汇刊，第51卷，第6期，第1177–1191页，2002年。[81] Y. Li、J. J. Wang、S. Xiao 和 X. Luo，《采用恒速更新（CUPT）的航位推算导航》，载于《2012年第12届控制、自动化、机器人与视觉国际会议（ICARCV）》。IEEE，2012年，第160–165页。[82] A. Brandit. 和 J. F. Gardner，《用于采用精简传感器组的捷联惯性导航系统的约束导航算法》，载于美国控制会议论文集。施普林格，1998年，第1848–1852页。[83] S. Sukkarieh，《用于自主陆地车辆的低成本、高完整性辅助惯性导航系统》，《GPS解决方案》，2000年。[84] J. Collin、J. Kappi 和 J. Saarinen，《无辅助MEMS惯性导航系统在车辆环境中的应用》，载于导航学会卫星分会第14届国际技术会议（ION GPS 2001）论文集，2001，第 1343 页 – 1348。

[85] G. Dissanayake、S. Sukkarieh、E. Nebot 和 H. Durrant-Whyte，“面向陆地车辆应用，利用车辆模型约束辅助低成本捷联式惯性测量单元”，*IEEE* 机器人与自动化汇刊，第17卷，第5期，第731–747页，2001年。[86] E.-H. Shin 和 N. El-Sheimy，“提高陆地应用中低成本惯性导航系统/全球定位系统的精度”，载于美国导航学会*2002*年全国技术会议论文集，2002年，第146–157页。[87] C.-Y. Liu、C.-A. Lin、K.-W. Chiang、S.-C. Huang、C.-C. Chang 和 J.-M. Cai，“结合零速更新/零积分航向角速度/NHC的实时微机电系统惯性导航系统/全球定位系统集成在陆地导航中的性能评估”，载于*2012*年第*12*届智能交通系统电信国际会议。IEEE，2012年，第584–588页。[88] G. Falco、M. Pini 和 G. Marucco，“松组合与紧组合全球导航卫星系统/惯性导航系统：在真实城市环境中评估的性能比较”，《传感器》，第17卷，第2期，第255页，2017。[89] G. Falco、G. Marucco、M. Nicola 和 M. Pini，“城市环境与恶劣环境中紧组合全球导航卫星系统/惯性导航系统实时解的优势”，载于美国导航学会*2017*年国际技术会议论文集，2017，第1344–1359页。[90] S. Godha 和 M. Cannon，“将差分全球定位系统与低成本基于微机电系统的惯性测量单元（IMU）集成，用于陆地车辆导航”，载于导航学会卫星分会第*18*届国际技术会议论文集（*ION GNSS 2005*），2005年，第333–345页。[91] K.-W. Chiang、T. T. Duong 和 J.-K. Liao，“通过剔除异常全球定位系统观测值分析实时集成惯性导航系统/全球定位系统车辆导航系统的性能”，《传感器》，第13卷，第8期，第10 599–10 622页，2013。[92] Z. F. Syed、P. Aggarwal、X. Niu 和 N. El-Sheimy，“民用车辆导航：为达到可接受的导航精度，惯性传感器所需的对准”，《*IEEE*车辆技术汇刊》，第57卷，第6期，第3402–3412页，2008年。[93] M. Elsheikh、W. Abdelfatah、A. Wahdan 和 Y. Gao，“用于连续、精确车辆导航的低成本精密单点定位/惯性导航系统集成”，载于导航学会卫星分会第*31*届国际技术会议论文集（*ION GNSS+ 2018*），2018年，第3169–3178页。[94] X. Niu 和 N. El-Sheimy，“利用机体坐标系中的辅助速度更新，为陆地车辆开发低成本微机电系统惯性测量单元/全球定位系统导航系统”，载于导航学会卫星分会第*18*届国际技术会议论文集（*ION GNSS 2005*），2005年，第2003–2012页。[95] J. Gao、M. Petovello 和 M. Cannon，“高精度全球定位系统/惯性导航系统/轮速传感器/横摆角速度传感器集成车辆定位系统的开发”，载于美国导航学会*2006*年全国技术会议论文集，2006年，第780–792页。[96] J. Gao，“全球定位系统/惯性导航系统传感器/横摆角速度传感器/轮速传感器集成车辆定位系统”，载于导航学会卫星分会第*19*届国际技术会议论文集（*ION GNSS 2006*），2006年，第1427–1439页。[97] X. Niu、S. Nassar 和 N. El-Sheimy，“采用三维辅助速度更新的高精度陆地车辆微机电系统惯性测量单元/全球定位系统导航系统”，《导航》，第54卷，第3期，第177–188页，2007。[98] J. Georgy、A. Noureldin、M. J. Korenberg 和 M. M. Bayoumi，“利用混合粒子滤波器实现旋转惯性传感器系统/全球定位系统集成的低成本三维导航解”，《*IEEE*车辆技术汇刊，第59卷，第2期，第599–615页，2009。[99] T. Li、M. G. Petovello、G. Lachapelle 和 C. Basnayake，“用于陆地车辆导航的全球定位系统/车辆传感器超紧组合”，《导航》，第57卷，第4期，第263–274页，2010。[100] ——，“全球定位系统L1/L2C与车辆传感器的实时超紧组合”，载于美国导航学会*2011*年国际技术会议论文集，2011年，第725–736页。[101] ——，“用于陆地车辆导航的全球定位系统/车辆传感器超紧组合性能评估”，载于导航学会卫星分会第*22*届国际技术会议论文集（*ION GNSS 2009*），2009年，第1785–1796页。[102] J. Wang 和 Y. Gao，“陆地车辆动力学辅助惯性导航”，*IEEE*航空航天与电子系统汇刊，第46卷，第4期，第1638–1653页，2010。[103] H. Chen、Z. Zhang、Z. Zhou、P. Liu 和 Q. Guo，“基于机体坐标系位置增量的陆地车辆捷联惯性导航系统/里程计集成导航算法

[104] C. Chen 和 G. Chang，“用于提升陆地车辆性能的低成本GNSS/INS 组合”，《测量科学与技术》，第 31 卷，第 3 期，页码 035009，2019年。[105] K. Zhu、X. Guo、C. Jiang、Y. Xue、Y. Li、L. Han 和 Y. Chen，“北斗信号中断期间采用状态约束进行车辆定位的MIMU/里程计融合：测试与结果”，《传感器》，第 20 卷，第 8 期，页码 2302，2020年。[106] Q. Chen、Q. Zhang 和 Y. Cheng，“通过GNSS/INS 组合测量铁路轨道不平顺”，载于第 26 届导航学会卫星分会国际技术会议（ION GNSS + *2013*）论文集，2013，页码 2180–2194。[107] C. Reimer、F. M¨uller 和 E. Hin¨uber，“铁路应用中的INS/GNSS/里程计数据融合”，载于 2016 年 DGON惯性传感器与系统（ISS）。IEEE，2016，页码 1–14。[108] Q. Chen、X. Niu、L. Zuo、T. Zhang、F. Xiao、Y. Liu 和 J. Liu，“基于辅助INS的铁路轨道几何形状测量小车系统”，《传感器》，第 18 卷，第 2 期，页码 538，2018年。[109] Y. Zhou、Q. Chen 和 X. Niu，“通过 GNSS/INS/里程计组合运动测量铁路轨道中心线位置”，IEEE Access，第 7 卷，页码 157 241–157 253，2019。[110] Q. Zhang、Q. Chen、X. Niu 和 C. Shi，“评估运动约束 GNSS/INS 在短波轨道不平顺测量中的相对空间精度要求”，《传感器》，第 19 卷，第 23 期，页码 5296，2019。[111] Z. Sun、K. Tang、X. Wang、M. Wu 和 Y. Guo，“基于集成 MIMU/ODO/MC 导航的高速列车隧道导航方法”，《应用科学》，第 11 卷，第 8 期，页码 3680，2021年。[112] L. Yang、Y. Li、Y. Wu 和 C. Rizos，“具备故障检测与排除能力的增强型 MEMS-INS/GNSS 集成系统，用于城市区域的陆地车辆导航”，《GPS解决方案》，第 18 卷，第 4 期，页码 593–603，2014年。[113] H. Lan、M. Elsheikh、W. Abdelfatah、A. Wahdan 和 N. El-Sheimy，“用于精准农业的集成 RTK/INS 导航”，载于第 32 届导航学会卫星分会国际技术会议（ION GNSS+ *2019*）论文集，2019，页码 4076–4086。[114] Q. Zhang、S. Li、Z. Xu 和 X. Niu，“面向低动态应用的低端 MEMS IMU/GNSS 基于速度的优化对准（vboba）”，IEEE传感器期刊，第 20 卷，5539，2020 10，5527，第 – 页。[115] Q. Zhang、Q. Chen、Z. Xu、T. Zhang 和 X. Niu，“评估基于低端惯性传感器的多信息融合在精准农业中的导航性能”，《精准农业》，第 22 卷，第 3 期，页码 627–646，2021年。[116] D. Won、J. Ahn、S. Sung、M. Heo、S.-H. Im 和 Y. J. Lee，“利用车辆运动约束和磁力计提升惯性导航系统性能”，《传感器杂志》，第 2015 卷，2015。[117] C. Yu、H. Lan、F. Gu、F. Yu 和 N. El-Sheimy，“用于室内基于位置的服务应用的地图/INS/Wi-Fi 集成系统”，《传感器》，第 17 卷，第 6 期，页码 1272，2017。[118] A. Ramanandan、A. Chen 和 J. A. Farrell，“带静止更新的惯性导航系统可观测性分析”，载于 2011 年美国控制会议论文集。IEEE，2011，页码 5292–5299。[119] ——，“通过静止更新辅助惯性导航”，《智能交通系统汇刊》，第 13 卷，248，2011 1，235，第 – 页。[120] P. D. Groves，“使用惯性传感器进行导航 [教程],”，IEEE航空航天与电子系统杂志，第 30 卷，69，2015 2，42，第 – 页。[121] C. Chen、W. Chai、H. Roth 和 A. Nasir，“在动态约束下借助里程计和 Wi-Fi 实现基于低成本 IMU 的室内移动机器人导航”，载于 IEEE/ION PLANS 2012 论文集，2012，页码 1274–1279。[122] M. Brossard、A. Barrau 和 S. Bonnabel，“RINS-W：轮式鲁棒惯性导航系统”，载于 2019 年 IEEE/RSJ 智能机器人与系统国际会议（IROS）。IEEE，2019，页码 2068–2075。[123] J. C. Chow、J. D. Hol 和 H. Luinge，“加速度计、陀螺仪和磁力计的紧耦合联合用户自校准”，《无人机》，第 2 卷，第 1 期，页码 6，2018年。[124] A. R. Jim´enez、F. Seco、J. C. Prieto 和 J. Guevara，“采用 INS/EKF 框架和足部安装式惯性测量单元进行室内行人导航，以抑制偏航漂移并

”’《工程中的数学问题》 ，第2018年卷，2018年。

载于2010年第七届定位、导航与通信研讨会。IEEE，2010年，第135–143页。[125] J. B. Bancroft和G. Lachapelle，“估计足载导航中微机电系统陀螺仪的g敏感误差”，载于2012年泛在定位、室内导航与基于位置的服务（UPINLBS）会议。IEEE，2012年，第1–6页。[126] H. Benzerrouk、A. Nebylov、H. Salhi和P. Closas，“基于MEMSDM的无人机姿态/零速更新容积卡尔曼滤波器在行人导航系统中的应用”，载于《传感器与应用国际电子会议论文集》，2014年，第1–7页。[127] H. Benzerrouk和A. Nebylov，“用于室内行人导航的鲁棒惯性测量单元/超宽带集成”，载于2018年圣彼得堡第25届国际集成导航系统会议（ICINS）。IEEE，2018年，第1–5页。[128] F. Woyano、S. Lee和S. Park，“基于足载惯性测量单元的室内惯性导航系统性能分析评估与比较”，载于2016年第18届国际先进通信技术会议（ICACT）。IEEE，2016年，第792–798页。[129] Y. Zhang、X. Yang、X. Xing、Z. Wang和Y. Xiong，“自主行人导航系统微机电系统陀螺仪偏置的站立校准方法”，《导航学报》，第70卷，第3期，第607–617页，2017年。[130] W. Zhang、X. Li、D. Wei、X. Ji和H. Yuan，“基于惯性测量单元/扩展卡尔曼滤波器+隐马尔可夫模型+零速更新+零角速度更新+航向漂移约束+ 罗盘算法的足载行人航位推算系统”，载于2017年国际室内定位与室内导航会议（IPIN）。IEEE，2017年，第1–5页。[131] Y. Bar-Shalom、P. K. Willett和X. Tian，《跟踪与数据融合》。YBS出版社，美国康涅狄格州斯托斯：，2011年，第11卷。[132] I. Klein、S. Filin和T. Toledo，“GPS信号中断期间辅助惯性导航系统的伪测量”，《导航》，《美国导航学会会刊》，第57卷，第1期，第25–34页，2010年。[133] ——，“用于支持城市环境中惯性导航系统导航的车辆约束增强”，《导航》，《美国导航学会会刊》，第58卷，第1期，第7–15页，2011年。[134] W. Chai、C. Chen、E. Edwan、J. Zhang和O. Loffeld，“采用自适应卡尔曼滤波和车辆约束的惯性导航系统/Wi-Fi室内导航”，载于2012年第九届定位、导航与通信研讨会。IEEE，2012年，第36–41页。[135] ——，“增强的惯性导航系统/Wi-Fi室内车辆导航集成”，《通信与计算机杂志》，第9卷，1319，2012年第9期，第1310页。[136] W. Chai，“基于多传感器的室内车辆与行人导航”，《通信与计算机杂志》，2019年。[137] A. Karmozdi、M. Hashemi和H. Salarieh，“惯性导航系统-多普勒测速仪（INS-DVL）导航中运动学约束的设计与实际应用”，《导航》，《美国导航学会会刊》，第65卷，642，2018年第4期，第629页。[138] Y. Zhao，《基于微机电系统的陆地车辆导航GPS/惯性测量单元集成系统》，博士论文，瑞典皇家理工学院，2011年。[139] E. D. Kaplan和C. Hegarty，《了解GPS/全球卫星导航系统：原理与应用》。Artech House，2017年。[140] S. Godha和M. Cannon，“用于城市区域导航的GPS/微机电系统惯性导航集成系统”，《GPS解决方案》，第11卷，203，2007年第3期，第193页。[141] A. Angrisano等，“全球卫星导航系统/惯性导航系统集成方法”，《大地测量与地形科学博士研究论文》，那不勒斯帕特诺普大学，第21卷，2010年。[142] A. Angrisano、M. Petovello和G. Pugliano，“低成本微机电系统惯性测量单元与GPS/格洛纳斯组合用于城市车辆导航的优势”，《传感器》，第12卷，第4期，第5134–5158页，2012年。[143] R. Stirling、K. Fyfe和G. Lachapelle，“使用鞋载传感器评估一种行人航位推算航向估计新方法”，《导航学报》，第58卷，第1期，第31–45页，2005年。[144] K. Abdulrahim、C. Hide、T. Moore和C. Hill，“利用约束进行鞋载室内行人导航”，《导航学报》，第65卷，第1期，第15–28页，2012年。[145] A. Norrdine、Z. Kasmi和J. Blankenbach，“利用足部安装式永磁体进行零速更新辅助惯性行人导航系统的步态检测”，IEEE传感器期刊，第16卷，第17期，第6766–6773页，2016年。[146] P. K. Yoon、S. Zihajehzadeh、B.-S. Kang和E. J. Park，“鲁棒的基于生物力学模型的三维室内定位与跟踪采用UWB和IMU的方法，”《IEEE传感器期刊》，第17卷，第4期，第1084–1096页，2016年。[147] E. Munoz Diaz、S. Kaiser和D. Bousdar Ahmed，“利用足部动力学进行鞋载惯性传感器高度误差校正”，《传感器》，第18卷，第3期，第888页，2018年。[148] M. I. M. Refai、B.-J. F. Van Beijnum、J. H. Buurke和P. H. Veltink，“便携式步态实验室：使用三个惯性测量单元跟踪双足及质心的相对距离”，IEEE神经系统与康复工程汇刊，第28卷，第10期，第2255–2264页，2020。[149] D. Weenk、D. Roetenberg、B.-J. J. van Beijnum、H. J. Hermens和P. H. Veltink，“融合超声波与惯性传感器数据进行双足相对位置的步行状态估计”，IEEE神经系统与康复工程汇刊，第23卷，第5期，第817–826页，2014年。[150] S. Ryan、M. Petovello和G. Lachapelle，“狭窄水道中的船舶导航GPS增强”，载于美国导航学会全国技术会议论文集。Citeseer，1998年，第459–468页。[151] I. Klein，《通过软件解决方案抑制惯性导航系统漂移》。以色列理工学院，土木与环境学院……，2011年。[152] J. Farrell，《辅助导航：采用高频传感器的GPS》。McGraw-Hill, Inc.，2008年。[153] Y. Li、X. Niu、Q. Zhang、H. Zhang和C. Shi，“一种采用伪观测方案的低端惯性测量单元现场手动校准方法”，《测量科学与技术》，第23卷，第10期，第105104页，2012年。[154] M. Ilyas、K. Cho、S.-H. Baeg和S. Park，“利用运动约束和磁场抑制行人导航系统漂移”，《传感器》，第16卷，第9期，第1455页，2016年。[155] N. Crasta、M. Bayat、A. P. Aguiar和A. M. Pascoal，“存在洋流时利用距离和深度测量对三维自主水下航行器配平轨迹进行可观测性分析”，《控制年度评论》，第40卷，第142–156页，2015年。[156] F. Huttner、J. Kalkkuhl和J. Reger，“利用FIR滤波器调制函数对微机电系统惯性测量单元进行在线校准时的偏置和失准估计”，载于2018年IEEE控制技术与应用会议（CCTA）。IEEE，2018年，第1427–1433页。[157] X. Niu、H. Zhang、K.-W. Chiang和N. El-Sheimy，“利用陆地车辆转向约束改进微机电系统全球定位/惯性导航地理配准系统的航向估计”，载于加拿大测绘国际会议论文集，2010年，第1–5页。[158] E. H. Shin，“陆地应用中低成本惯性导航系统/全球定位系统的精度改进”，载于UCGE报告第20156号，卡尔加里大学，卡尔加里，2001年。[159] E.-H. Shin和N. El-Sheimy，“陆地应用中低成本惯性导航系统/全球定位系统的精度改进”，载于美国导航学会2002年全国技术会议论文集，2002年，第146–157页。[160] E.-H. Shin，“低成本惯性导航的估计技术”，UCGE报告，第20219卷，2005年。[161] J. Borenstein、L. Ojeda和S. Kwanmuang，“人员跟踪系统中陀螺仪漂移的启发式抑制”，《导航学报》，第62卷，第1期，第41–58页，2009年。[162] J. Borenstein和L. Ojeda，“基于陀螺仪的车辆跟踪中陀螺仪漂移的启发式抑制”，载于《国土安全与国土防御VIII中的传感器、指挥、控制、通信与情报（C3I）技术》，第7305卷。国际光学与光子学学会，2009年，第730507页。[163] J. Borenstein、A. Borrell、R. Miller和D. Thomas，“增强启发式航位推算（hedr），用于遥控无人地面车辆的精确位置跟踪”，载于《无人系统技术 XII》，第7692卷。国际光学与光子学学会，2010年，第76921R页。[164] A. R. Jim´enez、F. Seco、F. Zampella、J. C. Prieto和J. Guevara，“复杂建筑物中行人导航的改进型启发式漂移消除（iHDE）”，载于2011年室内定位与室内导航国际会议。IEEE，2011年，第1–8页。[165] J. C. Alvarez、D. Alvarez、A. L´opez和R. C. Gonz´alez，“基于腰戴式惯性传感器的行人导航”，《传感器》，第12卷，第8期，第10 536–10 549页，2012年。[166] W. Zhang、D. Wei和H. Yuan，“足载行人航位推算系统的改进约束方法”，IEEE Access，第8卷，31 779，2020年，第31 764–页。[167] D. Bousdar Ahmed和E. Munoz Diaz，“结合自动航向评估的可穿戴式惯性导航系统松组合”，《传感器》，第17卷，第11期，第2534页，2017年。

[168] D. B. Ahmed和K. Metzger，“基于生物力学模型约束的可穿戴式行人惯性导航”，载于2018年IEEE/ION定位、位置与导航研讨会（PLANS）。IEEE，2018年，第118–123页。[169] Z. Deng、Y. Cao、P. Wang和B. Wang，“室内行人定位的改进型启发式漂移消除方法”，《传感器》，第18卷，第6期，第1874页，2018年。[170] A. Borko、I. Klein和G. Even-Tzur，“杆臂辅助惯性导航系统中速度测量的可观测性与性能分析”，载于多学科数字出版研究所论文集，第2卷，3，2017年，138 no. p.。[171] ——，“采用虚拟杆臂测量的GNSS/惯性导航系统融合”，《传感器》，第18卷，第7期，第2228页，2018年。[172] C. D. Monaco、S. N. Brennan和K. A. Hacker，“多普勒测速仪的安装位置对自主水下航行器导航精度的影响”，载于2018年IEEE/OES自主水下航行器研讨会（AUV）。IEEE，2018年，第1–6页。[173] Q. Zhang、Y. Hu和X. Niu，“陆地车辆导航中非完整性约束所需的杆臂精度”，《IEEE车辆技术汇刊》，第69卷，第8期，第8305–8316页，2020。[174] Q. Zhang、Y. Hu、S. Li、T. Zhang和X. Niu，“根据速度矢量观测估计陆地车辆导航的安装参数”，IEEE工业电子学汇刊，第69卷，第4期，第4234–4244页，2021年。[175] Y. Hwang、Y. Jeong、I. Kweon和S. Choi，“任意安装的运动传感器的车辆动力学模型和杆臂识别”，《IEEE传感器期刊》，2021年。[176] J. B. Bancroft、G. Lachapelle、M. E. Cannon和M. G. Petovello，“用于行人导航的双惯性测量单元-HSGPS集成”，载于美国导航学会卫星分会第21届国际技术会议（ION GNSS 2008）论文集，2008年，第1377–1387页。[177] J. B. Bancroft，“用于行人导航的多个惯性测量单元集成”，卡尔加里大学，2010年。[178] J. B. Bancroft和G. Lachapelle，“多个惯性测量单元的数据融合算法”，《传感器》，第11卷，6798，2011年，第7，6771页–。[179] A. Waegli、S. Guerrier和J. Skaloud，“用于体育运动性能评估的冗余微机电系统惯性测量单元与GPS集成”，载于2008年IEEE/ION定位、位置与导航研讨会。IEEE，2008年，第1260–1268页。[180] S. Guerrier，“利用多个传感器提高精度：冗余微机电系统惯性测量单元/全球定位系统配置研究”，载于美国导航学会卫星分会第22届国际技术会议（ION GNSS 2009）论文集，2009年，第3114–3121页。[181] J. B. Bancroft，“用于车辆导航的多个惯性测量单元集成”，载于美国导航学会卫星分会第22届国际技术会议（ION GNSS 2009）论文集，2009年，第1828–1840页。[182] J. M. Hartzer，“使用超宽带测距的分布式协同定位”，博士论文，德克萨斯农工大学，2020年。[183] A. Cho、H. No和C. Kee，“利用基于单天线GPS的姿态改进低成本全球定位系统/惯性导航系统集成系统的性能”，载于美国导航学会卫星分会第23届国际技术会议（ION GNSS 2010）论文集，2010年，第1498–1504页。[184] U. Maeder和M. Morari，“采用部分惯性测量的车辆姿态估计”，《IEEE车辆技术汇刊》，第60卷，第4期，第1496–1504页，2011年。[185] Z. Wu、M. Yao、H. Ma和W. Jia，“利用全球定位系统测量的航迹角提高低成本惯性导航系统/全球定位系统集成的车辆姿态估计精度”，《IEEE智能交通系统汇刊》，第14卷，第2期，第553–564页，2012年。[186] J.-C. Juang和C.-F. Lin，“用于估计车辆速度和航向角的传感器融合方案”，《IEEE车辆技术汇刊》，第64卷，第7期，第2773–2782页，2014年。[187] D. Wierzbicki和K. Krasuski，“基于UX5平台全球定位系统数据的旋转角估计”，《测量、自动化与监控》，第61卷，2015年。[188] K. Li、B. Hu、L. Chang和Y. Li，“捷联惯性导航系统/全球定位系统集成的直接导航模式与间接导航模式比较”，《测量与控制学会汇刊》，第38卷，第1期，第3–13页，2016年。[189] Y. Huang、Y. Zhang和L. Chang，“一种新的快速运动中粗对准方法—用于GPS辅助低成本捷联惯性导航系统的方法》，《IEEE/ASME机电一体化汇刊》，第23卷，第3期，第1303–1313页，2018年。[190] Y. Huang、Z. Zhang、S. Du、Y. Li和Y. Zhang，“一种用于基于微机电系统的捷联惯性导航系统的高精度GPS辅助粗对准方法”，《IEEE仪器与测量汇刊》，第69卷，第10期，第7914–7932页，2020年。[191] X. Xu、D. Xu、T. Zhang和H. Zhao，“利用位置轨迹的捷联惯性导航系统/GPS运动中粗对准方法”，《IEEE传感器期刊》，第19卷，第10期，第3930–3938页，2019年。[192] I. Klein、Y. Lipman和E. Vaknin，“通过压缩位置更新增强陆地车辆辅助INS的估计性能”，《IEEE传感器期刊》，第20卷，第16期，第9385–9393页，2020年。[193] C. E. Cohen和B. W. Parkinson，“基于GPS的姿态确定在航空器上的应用”，载于导航学会卫星分会第5届国际技术会议（ION GPS 1992）论文集，1992年，第775–782页。[194] R. P. Kornfeld、R. J. Hansman和J. J. Deyst，“单天线GPS航空器姿态确定”，《导航》，第45卷，第1期，第51–60页，1998年。[195] A. Salycheva和M. Cannon，“利用GPS速度信息进行INS运动方位角对准”，载于美国导航学会2004年全国技术会议论文集，2004年，第1103–1113页。[196] D. M. Bevly、J. Ryu和J. C. Gerdes，“融合INS传感器与GPS测量值，连续估计车辆侧滑、横摇和轮胎侧偏刚度”，《IEEE智能交通系统汇刊》，第7卷，第4期，第483–493页，2006年。[197] H. Jie、H. Xianlin和W. Guofeng，“单天线GPS/加速度计姿态确定系统的设计与应用”，《系统工程与电子技术》，第19卷，第2期，第220–227页，2008年。[198] Y.-C. Lai和F.-B. Hsiao，“模糊逻辑控制器与伪姿态在无人机自主飞行中的应用”，《中国工程师学会学刊》，第33卷，第3期，第387–396页，2010年。[199] Y. Wu和X. Pan，“面向机载惯性导航系统/GPS应用的优化型飞行中对准”，载于IGNSS研讨会论文集，2011年。[200] ——，“速度/位置积分公式第一部分：飞行中粗对准的应用”，《IEEE航空航天与电子系统汇刊》，第49卷，第2期，第1006–1023页，2013年。[201] ——，“速度/位置积分公式第二部分：在捷联惯性导航计算中的应用”，《IEEE航空航天与电子系统汇刊》，第49卷，第2期，第1024–1034页，2013年。[202] L. Wang、B. Song、X. Han和Y. Hao，“利用智能卡尔曼滤波算法融合单天线GPS与低成本MEMS传感器的姿态确定方法”，《工程中的数学问题》，第2017卷，2017年。[203] M. S. Grewal、L. R. Weill和A. P. Andrews，《全球定位系统、惯性导航与组合》，约翰·威立父子出版公司，2007年。[204] R. Conley，“单机GPS的性能”，载于《理解GPS：原理与应用》，第301–378页，2006年。[205] N. El-Sheimy、K.-W. Chiang和A. Noureldin，“人工神经网络在导航与定位仪器多传感器系统集成中的应用”，《IEEE仪器与测量汇刊》，第55卷，第5期，第1606–1615页，2006年。[206] A. Noureldin、A. El-Shafie和M. Bayoumi，“利用动态神经网络进行GPS/INS组合的车辆导航”，《信息融合》，第12卷，第1期，第48–57页，2011年。[207] I. Klein、S. Filin和T. Toledo，“一种改进的松组合方法”，《应用大地测量学期刊》，第5卷，第87–98页，2011年。[208] I. Klein、T. Toledo和S. Filin，“用于INS/GPS组合的基于里程计的改进松组合方法”，美国交通研究委员会第91届年会，技术报告，2012年。[209] X. Tan、J. Wang、S. Jin和X. Meng，“GPS中断期间基于遗传算法支持向量回归和伪位置辅助的GPS/INS组合”，《导航》，第68卷，第4期，第678–696页，2015年。[210] Y. Yao和X. Xu，“GPS中断期间辅助INS的递归最小二乘支持向量机融合方法”，《传感器》，第17卷，第3期，第432页，2017年。[211] Y. Yao、X. Xu、C. Zhu和C.-Y. Chan，“GPS中断期间GPS/INS组合的混合融合算法”，《测量》，第103卷，第42–51页，2017年。[212] Y. Zhang，“一种用于弥补GPS中断的INS/GPS组合导航系统融合方法”，IEEE Access，第7卷，2019年，第61 296–61 306页。

[213] W. Fang、J. Jiang、S. Lu、Y. Gong、Y. Tao、Y. Tang、P. Yan、H. Luo和J. Liu，“一种在GNSS信号中断期间辅助INS的伪测量值估计长短期记忆网络算法”，《遥感》，第12卷，第2期，第256页，2020年。[214] Y. Zhu、X. Cheng、J. Hu、L. Zhou和J. Fu，“一种处理水下组合导航系统多普勒测速仪故障的新型混合方法”，《应用科学》，第7卷，第8期，第759页，2017年。[215] R. Eliav和I. Klein，“INS与部分多普勒测速仪测量值融合中的相关过程噪声和测量噪声”，载于多学科数字出版研究所论文集，第4卷，第1期，2018年，第34页。[216] P. Liu、B. Wang、Z. Deng和M. Fu，“多普勒测速仪测量值有限条件下的INS/DVL/压力传感器紧耦合水下导航方法”，《IEEE传感器期刊》，第18卷，第7期，第2994–3002页，2018年。[217] D. Wang、X. Xu、Y. Yao、T. Zhang和Y. Zhu，“一种适用于复杂环境的新型捷联惯性导航系统/DVL紧组合导航方法”，《IEEE仪器与测量汇刊》，第69卷，第7期，第5183–5196页，2019年。[218] S. Ansari-Rad、M. Hashemi和H. Salarieh，“利用进化型TS模糊算法为海洋航行器重构伪DVL”，《测量》，第147卷，第106831页，2019年。[219] T.-S. Yoo、M.-H. Kim、S.-I. Yoon和D.-J. Kim，“紧耦合INS/DVL/RPM组合导航系统的设计”，《海洋工程与技术期刊》，第33卷，第5期，第470–478页，2019年。[220] W. Li、M. Chen、C. Zhang、L. Zhang和R. Chen，“一种基于神经网络的新型捷联惯性导航系统/DVL组合导航方法，用于处理水下航行器的DVL故障”，《工程中的数学问题》，第2020卷，2020年。[221] D. Li、J. Xu、H. He和M. Wu，“一种基于深度学习、用于处理DVL故障的水下组合导航算法”，IEEE Access，2021年。[222] D. Wang、X. Xu、Y. Yao和T. Zhang，“一种基于DS-LSSVM算法的组合导航系统虚拟DVL重构方法”，《IEEE仪器与测量汇刊》，第70卷，第1–13页，2021年。[223] Y. Yao、X. Xu、X. Xu和I. Klein，“部分多普勒测速仪测量值条件下基于虚拟波束辅助的捷联惯导系统/DVL紧耦合组合方法”，《IEEE车辆技术汇刊》，2022年。[224] M. Yona和I. Klein，“利用深度学习方法补偿部分多普勒测速仪中断”，载于2021年IEEE机器人与传感器环境国际研讨会（ROSE）。IEEE，2021年，第1–5页。[225] N. Cohen、Z. Yampolsky和I. Klein，“用于自主水下航行器完全DVL失效情形下速度预测的Set-transformer beamsnet”，arXiv预印本，arXiv:2212.11671，2022年。[226] N. Cohen和I. Klein，“Libeamsnet：有限DVL波束测量值情形下的自主水下航行器速度矢量估计”，载于OCEANS 2022，汉普顿锚地。IEEE，2022年，第1–5页。[227] M. J. Stanway，“自动实时水下导航研究”，麻省理工学院应用海洋科学联合项目，技术报告，2012年。[228] R. Ivanov、M. Pajic和I. Lee，“利用测量历史实现稳健的多维传感器融合”，载于第三届高可信网络化系统国际会议论文集，2014年，第1–10页。[229] R. Costanzi、D. Fenucci、S. Giagnoni、A. Munaf`o和A. Caiti，“自主水下航行器深水导航系统评估”，IFAC-PapersOnLine，第50卷，第1期，第13 680–13 685页，2017年。[230] A. Tesei、M. Micheli、A. Vermeij、G. Ferri、M. Mazzi、G. Grenon、L. Morlando、S. Biagini、K. D. LePage、R. Costanzi等，“自主水下航行器在深水中的实时水下定位与导航”，载于2018年OCEANS-MTS/IEEE神户海洋技术大会（OTO）。IEEE，2018年，第1–7页。[231] R. Costanzi、D. Fenucci、A. Caiti、M. Micheli、A. Vermeij、A. Tesei和A. Munaf`o，“深水导航的估计滤波”，IFAC-PapersOnLine，第51卷，第29期，第299–304页，2018年。[232] I. Klein和Y. Lipman，“DVL中断情形下的连续INS/DVL融合”，载于2020年IEEE/OES自主水下航行器研讨会（AUV）。IEEE，2020年，第1–6页。[233] I. Klein，“DVL中断期间的INS漂移抑制”，载于OCEANS 2021：圣迭戈–波尔图。IEEE，2021年，第1–5页。[234] I. Klein、Y. Gutnik和Y. Lipman，“完全波束测量中断情形下的DVL速度估计”，《IEEE传感器期刊》，2022年。

[235] M. Koifman 和 Y. Bar-Itzhack，“由飞行动力学辅助的惯性导航系统”，《IEEE控制系统技术汇刊》，第 7 卷，第 4 期，页码 487—-497，1999年。[236] S. J. Julier 和 H. F. Durrant-Whyte，“过程模型在自主陆地车辆导航系统中的作用”，IEEE 机器人与自动化汇刊，第 19 卷，第 1 期，页码 1–14，2003 年。[237] M. Bryson 和 S. Sukkarieh，“ 使用低成本传感器的无人机车辆模型辅助惯性导航”，载于《澳大拉西亚机器人与自动化会议论文集》。Citeseer，2004年，页码 1–9。[238] L. Cork 和 R. Walker，“使用非线性动力学模型和IMM-UKF算法检测无人机的传感器故障”，载于《2007年信息、决策与控制会议》。IEEE，2007，页码 230–235。[239] D. Vissiere、P.-J. Bristeau、A. P. Martin 和 N. Petit，“使用精确动力学模型和低成本传感器实现小型直升机自主飞行实验”，IFAC会议论文集，第 41 卷，第 2 期，页码 14 642–14 650，2008年。[240] N. Dadkhah、B. Mettler 和 D. Gebre-Egziabher，“用于微型飞行器的模型辅助姿态和航向参考系统”，载于《美国导航学会卫星分会第21届国际技术会议（ION GNSS 2008）论文集》，2008年，页码 545–553。[241] P. Crocoll、L. Goercke、G. F. Trommer 和 F. Holzapfel，“车辆动力学模型辅助惯性导航的统一模型技术”，《导航》，《美国导航学会会刊》，第 60 卷，第 3 期，页码 179–193，2013。[242] P. Crocoll、J. Seibold、G. Scholz 和 G. F. Trommer，“四旋翼直升机的模型辅助导航：一种新型导航系统及初步实验结果”，载于《美国导航学会2014年国际技术会议论文集》，2014年，页码 384–406。[243] P. Crocoll 和 G. F. Trommer，“利用飞行中参数估计的车辆动力学模型辅助四旋翼惯性导航”，载于《美国导航学会卫星分会第27届国际技术会议（ION GNSS+ *2014*）论文集》，2014年，页码 1784–1795。[244] L. R. Cork，《无人机的飞行动力学导航》，博士论文，昆士兰科技大学，2014年。[245] W. A. Butt、L. Yan 和 K. Amezquita S，“高超声速飞行器的自适应积分动态面控制”，《国际系统科学杂志》，第 46 卷，第 10 期，页码 1717–1728，2015年。[246] M. Khaghani 和 J. Skaloud，“基于车辆动力学模型的无人机自主导航中风效应的评估”，载于《美国导航学会卫星分会第29届国际技术会议（ION GNSS+ *2016*）论文集》，2016年，页码 1432–1440。[247] ——，“在缺少惯性测量单元数据时基于VDM的无人机姿态确定”，载于《2018年欧洲导航会议（ENC）》。IEEE，2018年，页码 84–90。[248] H. Nobahari 和 H. Mohammadkarimi，“模型辅助惯性导航在近地面无人机精密测高中的应用”，《航空航天科学与技术》，第 69 卷，页码 650–658，2017年。[249] H. Mwenegoha、T. Moore、J. Pinchin 和 M. Jabbal，“具有转动惯量估计的无人机基于模型的自主导航”，《传感器》，第 19 卷，第 11 期，文章编号 2467，2019。[250] G. Laupr´e 和 J. Skaloud，“ 车辆动力学模型导航中气动系数的自校准 ”，《无人机》，第 4 卷，第 3 期，文章编号 32，2020。[251] W. Youn、H. S. Choi、H. Ryu、S. Kim 和 M. B. Rhudy，“采用合成迎角/侧滑角实现高空长航时无人机的模型辅助状态估计，以提供解析冗余”，IEEE传感器期刊，第 20 卷，7940，2020 14，7929 第 页 – 。[252] W. Youn 、 H. Choi 、A. Cho、S. Kim 和 M. B. Rhudy，“气动模型辅助估计高空长航时无人机的姿态、三维风、空速、迎角和侧滑角”，IEEE航空航天与电子系统汇刊，第 56 卷，第 6 期，页码 4300–4314，2020。[253] W. Youn、H. Ryu、D. Jang、C. Lee、Y. Park、D. Lee 和 M. B. Rhudy，“用于解析冗余的无人机模型辅助合成空速估计”，IEEE《机器人与自动化快报》，第 6 卷，第 3 期，页码 5841–5848，2021年。[254] N. Y. Ko、I. H. Choi、G. Song 和 W. Youn，“多旋翼无人机的三维动力学模型辅助导航”，IEEE Access，第 7 卷，页码 170 715–170 732，2019。[255] Y. Xu、Q. Zhang、J. Zhang、X. Wang 和 Z. Yu，“GPS 信号中断期间多旋翼飞行器的车辆模型辅助导航重构方法

,” 《电子学》, 第10卷, 第5期 , 第528页 , 2021年。

[256] C. Shi、D. Zhao、J. Peng 和 C. Shen，“使用扩展卡尔曼滤波器辨识船舶操纵模型”，载于《海洋导航与海上运输安全》。CRC出版社，2009年，第355–360页。[257] L. P. Perera、C. G. Soares 等，“基于扩展卡尔曼滤波器的海洋船舶轨迹估计与预测”，载于第二届自适应与自适应系统及应用国际会议。Citeseer，2010年，第14–20页。[258] L. P. Perera，“基于导航矢量的船舶操纵预测”，《海洋工程》，第138卷，第151–160页，2017。[259] T. I. Fossen 和 T. Perez，“用于船舶和海上钻井平台定位与航向控制的卡尔曼滤波”，《IEEE控制系统杂志》，第29卷，第6期，第32–46页，2009年。[260] T. Soda、S. Shiotani、H. Makino 和 Y. Shimada，“基于天气与海洋仿真的数值船舶导航”，载于国际海洋工程与北极工程会议，第44380卷，2011年，第159–166页。[261] J. Vasconcelos、C. Silvestre 和 P. Oliveira，“利用矢量观测的频率成分辅助INS/GPS，并应用于自主水面艇”，IEEE海洋工程期刊，第36卷，第2期，第347–363页，2011年。[262] M. Araki、H. Sadat-Hosseini、Y. Sanada、K. Tanimoto、N. Umeda 和 F. Stern，“使用实验、基于系统的及计算流体力学自由航行试验数据，通过系统辨识方法估计操纵系数”，《海洋工程》，第51卷，第63–84页，2012年。[263] C. Chen、S. Shiotani 和 K. Sasa，“基于天气与海洋仿真的数值船舶导航”，《海洋工程》，第69卷，第44–53页，2013。[264] ——，“洋流对东海船舶导航的影响”，《海洋工程》，第104卷，第283–293页，2015年。[265] M. T. Sabet、H. M. Daniali、A. Fathi 和 E. Alizadeh，“使用扩展、容积法和变换无迹卡尔曼滤波器辨识自主水下航行器水动力学模型”，IEEE海洋工程期刊，第43卷，第2期，第457–467页，2017。[266] J. Lu 和 L. Xie，“基于动态约束的海洋航行器惯性导航方法”，《导航学报》，第71卷，第6期，第1553–1566页，2018年。[267] G. Taimuri、J. Matusiak、T. Mikkola、P. Kujala 和 S. Hirdaris，“用于快速估计深水与浅水中水动力作用的六自由度操纵模型”，《海洋工程》，第218卷，文章号108103，2020。[268] J. C. Kinsey 和 L. L. Whitcomb，“水下航行器导航的基于模型的非线性观测器：理论与初步实验”，载于《2007年IEEE国际机器人与自动化会议论文集》。IEEE，2007年，第4251–4256页。[269] J. C. Kinsey、Q. Yang 和 J. C. Howland，“用于遥控潜水器水下导航的基于非线性动力学模型的状态估计器”，《IEEE控制系统技术汇刊》，第22卷，第5期，第1845–1854页，2014年。[270] M. Morgado、P. Oliveira、C. Silvestre 和 J. Vasconcelos，“用于USBL/INS水下导航系统的车辆动力学辅助技术”，IFAC会议论文集，第40卷，第17期，第111–116页，2007。[271] M. Morgado、P. Oliveira、C. Silvestre 和 J. F. Vasconcelos，“用于USBL/INS水下导航系统的嵌入式车辆动力学辅助”，《IEEE控制系统技术汇刊》，第22卷，第1期，第322–330页，2013。[272] Ø. Hegrenæs、O. Hallingstad 和 K. Gade，“迈向水下航行器的模型辅助导航”，《建模、辨识与控制》，第28卷，2007年10月。[273] Hegrenæs、E. Berglund 和 O. Hallingstad，“水下航行器的模型辅助惯性导航”，载于IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集，2008年，第1069–1076页。[274] y. Hegrenaes 和 O. Hallingstad，“带海流估计的模型辅助INS：用于鲁棒水下导航”，IEEE海洋工程期刊，第36卷，第2期，第316–337页，2011年。[275] P. Batista、C. Silvestre 和 P. Oliveira，“无人航行器的位置与速度导航系统”，《IEEE控制系统技术汇刊》，第17卷，第3期，第707–715页，2009年。[276] A. Lammas、K. Sammut 和 F. He，“自主水下航行器的六自由度导航系统”，《移动机器人导航》，第457–483页，2010年。[277] A. Martinez、L. Hernandez、H. Sahli、Y. Valeriano-Medina、M. Orozco-Monteagudo 和 D. Garcia-Garcia，“具有海流估计功能的自主水下航行器模型辅助导航先进机器人系统国际期刊，第12卷，103，2015 7，第，页。.[278] T. Herlambang、E. B. Djatmiko 和 H. Nurhadi，“采用线性建模进行轨迹估计的自主水下航行器导航与制导控制系统”，载于*2015*年先进机电一体化、智能制造与工业自动化国际会议（*ICAMIMIA*）。IEEE，2015年，第184–187页。[279] M. Dinc 和 C. Hajiyev，“自主水下航行器导航系统的组合”，《海洋工程与技术杂志》，第14卷，第1期，第32–43页，2015年。[280] M. Khaghani 和 J. Skaloud，“基于车辆动力学模型的小型无人机自主车辆动态模型导航”，《导航：导航学会杂志》，第63卷，第3期，第345–358页，2016年。[281] ——，“基于车辆动态模型的小型无人机自主导航。”《国际摄影测量、遥感与空间信息科学档案》，第40卷，2016年。[282] B. Allotta、A. Caiti、R. Costanzi、F. Fanelli、D. Fenucci、E. Meli 和 A. Ridolfi，“一种利用无迹卡尔曼滤波器的新型自主水下航行器导航系统”，《海洋工程》，第113卷，第121–132页，2016年。[283] T. Zhang、S. Huang、D. Liu、L. Shi、C. Zhou 和 R. Xiong，“圆柱结构周围水下航行器导航的状态估计方法”，载于*2016*年*IEEE*第*11*届工业电子与应用会议。IEEE，2016年，第101–106页。[284] A. Tal、I. Klein 和 R. Katz，“采用部分多普勒测速仪测量值的惯性导航系统/多普勒测速仪（INS/DVL）融合”，《传感器》，第17卷，第2期，第415页，2017年。[285] N. R. Rypkema、E. M. Fischell、A. L. Forrest、M. R. Benjamin、H. Schmidt、等，“面向低成本自主水下航行器舰队的基于水动力模型的导航系统实现”，载于*2018*年*IEEE/OES*自主水下航行器研讨会（*AUV*）。IEEE，2018年，第1–6页。[286] S. Arnold 和 L. Medagoda，“面向自主水下航行器的鲁棒模型辅助惯性定位”，载于*2018*年*IEEE*国际机器人与自动化会议（*ICRA*）。IEEE，2018年，第4889–4896页。[287] A. Karmozdi、M. Hashemi、H. Salarieh 和 A. Alasty，“在水下导航中多普勒测速仪失效时，将平动动力学用于惯性导航系统数据融合的实现”，*IEEE*传感器期刊，第21卷，第5期，第6652–6659页，2020年。[288] P.-F. Lv、B. He、J. Guo、Y. Shen、T.-H. Yan 和 Q.-X. Sha，“基于智能速度模型的标准自主水下航行器水下导航方法”，《海洋工程》，第202卷，第107073页，2020年。[289] A. Karmozdi、M. Hashemi、H. Salarieh 和 A. Alasty，“利用自主水下航行器转动动力学模型改进惯性导航系统-多普勒测速仪导航”，*IEEE*传感器期刊，第20卷，第23期，第14 329–14 336页，2020年。[290] S. S. X. Ma 和 J. Kim，“车辆模型辅助惯性导航”，载于*2003*年*IEEE*智能交通系统国际会议论文集。IEEE，2003年，第1004–1009页。[291] J.-P. Sheu、C.-C. Chang、K.-W. Lo 和 C.-W. Deng，“自主移动机器人导航系统的设计与实现”，《国际特设与泛在计算杂志》，第6卷，第3期，第129–139页，2010年。[292] D. C. Salmon 和 D. M. Bevly，“探索用于地面车辆导航的低成本传感器和车辆模型方案”，载于*2014*年*IEEE/ION*定位与导航研讨会-*PLANS 2014*。IEEE，2014年，第462–471页。[293] D. Salmon，“用于精密地面车辆导航的低成本传感器和车辆模型方案的实验性探索”，博士论文，奥本大学，2015年。[294] Y. Zhao、Z. Yang、C. Song 和 D. Xiong，“基于车辆动力学模型的陆地车辆组合导航系统”，载于*2018*年第*25*届圣彼得堡国际组合导航系统会议（*ICINS*）。IEEE，2018年，第1–4页。[295] S. Bijjahalli 和 R. Sabatini，“面向自主车辆的高完整性低成本导航系统”，《*IEEE*智能交通系统汇刊》，第22卷，第1期，第356–369页，2019年。[296] H. Zemer、R. Sarel 和 I. Klein，“安装于地面机器人的部分无陀螺惯性导航系统可行性研究”，载于*2019*年第*27*届地中海控制与自动化会议（*MED*）。IEEE，2019年，第524–529页。