

DOI:10.11918/202101055

车辆 IMU 软测量技术精度分析

邬明宇¹, 杜永昌¹, 尹航¹, 吕靖成¹, 牛东杰¹, 张秋华², 危银涛¹

(1.清华大学 车辆与运载学院, 北京 100084; 2.哈尔滨工业大学 航天科学与力学系, 哈尔滨 150090)

摘要: 为节约半主动悬架电气架构和电子控制单元(ECU)的开发流程,提出一种新的半主动悬架传感器布置方案,并给出最佳惯性测量单元(IMU)安装位置。建立通过IMU信号解算4个簧上位置加速度的精确与完备公式,选择合适的角转动次序和参考系来保证解算方法的正确性;利用最优化理论及偏导数方法结合不同的悬架权重研究传感器安装位置对软测量精度的影响,并给出了有约束条件下的最优安装位置。实验结果表明:新提出的传感器布置方案及运动学解算方法可以很好地预测4个簧上位置处的垂向加速度,并具有较高的稳定性,但是安装在不同位置处的解算精度差异较大;通过最优化理论得出的有约束最佳安装理论位置的实验结果与理论符合(均方根误差约为 $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$),相比于其他安装位置,最佳安装位置处的实验结果对不同工况均具有较高的稳定性及测量精度;相比于水平安装位置,IMU的垂向位置对最终的解算结果和精度有较大的影响。采用数形结合思想给出了一个IMU安装位置误差等值椭球面,用该椭球面可以较为清楚直观地对安装位置进行分析。

关键词: 惯性测量单元 IMU; 半主动悬架; 软测量技术; 敏感性分析; 姿态运动学

中图分类号: U461.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)01-0014-08

Accuracy analysis of vehicle IMU soft sensing technology

WU Mingyu¹, DU Yongchang¹, YIN Hang¹, LÜ Jingcheng¹, NIU Dongjie¹, ZHANG Qiuhua², WEI Yintao¹

(1.School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Aerospace Science and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To save the semi-active suspension electrical architecture and ECU development process, a new semi-active suspension sensor layout scheme is proposed, and the optimal IMU installation position is given. An accurate and complete formula for calculating the acceleration of four sprung positions by IMU signal is established. The proper angular rotation order and reference frame are selected to ensure the correctness of the method. The influence of sensor mounting position on soft sensing accuracy is given by using optimization theory and partial derivative method combined with different suspension weights, and the optimal mounting position with constraints is given. The experimental results show that the new sensor arrangement scheme and kinematics solution method can well predict the vertical acceleration of four sprung positions and have high stability, but the solution accuracy of different positions is quite different. The experimental results of the constrained optimal installation position obtained by the optimization theory are consistent with the theory (the root mean square error is about $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Compared with other installation positions, the experimental results of the optimal installation position have higher stability and measurement accuracy for different working conditions. Compared with the horizontal installation position, the vertical position of IMU has a greater impact on the final solution results and accuracy. An equivalent error ellipsoid of IMU installation position is given with combination of quantities and spatial forms, which can analyze the installation position more clearly and intuitively.

Keywords: inertial measurement unit; semi-active suspension; soft sensor technique; sensitivity analysis; attitude kinematic

传统的车辆半主动悬架传感器架构以4个车身加速度传感器和4个高度传感器或4个簧下位置处加速度传感器为主,但这种方案线束复杂,而且成本较高。单车身惯性测量单元(Inertial Measurement

Unit, IMU)与适当的姿态解算算法结合可以替代传统的4加速度计方案^[1],但需要对其解算方法和安装位置进行理论推导和敏感性分析。IMU能够获得其自身定义坐标系下三轴方向的角速度和加速度,从而获得所需要的姿态和位置信息,因此在汽车、医学等领域得到了广泛应用^[2-3]。

IMU在汽车上的应用主要集中在对传感器的信号解析和信号噪声处理上,如对车辆姿态与速度等

收稿日期: 2021-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(52003142)

作者简介: 邬明宇(1996—),男,博士研究生;

危银涛(1971—),男,教授,博士生导师

通信作者: 危银涛, weiyt@tsinghua.edu.cn

信息的估计^[4],设计平滑估计器提高定位精度^[5],利用卡尔曼滤波消除解算误差^[6]及降低传感器噪声^[7]等。针对IMU安装位置及解算方法的研究主要包括Berkane等^[8]提出了一种基于IMU/GPS的加速刚体系统的姿态软测量计算方法,但是其主要针对陀螺等惯性元件进行分析,未给出针对车身姿态估计的一般公式和旋转角次序。Jørgensen等^[9]利用IMU软测量技术进行车身姿态估计并进行实验,比较了不同滤波器的效果,但是未给出针对安装位置的敏感性进行分析。意大利米兰理工Savaresi团队^[1,10]在半主动悬架领域享有盛名,该团队利用机器学习方法比较了不同IMU安装位置对车身姿态解算结果的影响。结果表明,针对不同安装位置的解算方法存在差异和不同程度的误差,但是未给出原因说明及理论推导。马亚平等^[11]对IMU安装位置的误差提出了一种新的正交补偿方误差法,在存在零偏的大角度安装误差的情况下提高了标定效率;对IMU安装角度进行分析和误差补偿,有一定工程意义以及启发作用。目前的研究主要聚焦于传感器的信号解析,缺乏对IMU安装位置的优化及敏感性分析。

本文专注于研究车身姿态解算及IMU安装位置对解算结果的影响,提出一种新的IMU布置方案及精确的解算方法,并在此基础上利用最优化理论进行参数敏感性分析及布置优化。最后通过实验验证解算公式和布置方案的合理性,对理论研究及工程布置有一定指导意义。

1 半主动悬架传感器新方案

传统的半主动悬架传感器布置方案如图1(a)所示^[1,12]。一般悬架控制器位于车辆后部,导致高度和加速度传感器与悬架控制器之间的线束连接复杂,布置困难,成本高。本文提出一种基于IMU的半主动悬架软测量技术及IMU传感器布置优化方法(见图1(b)),只需用一个IMU传感器就可以精确计算半主动悬架控制所需要的簧上位置处加速度信息,简化了半主动悬架电气架构和电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)开发流程。IMU与ECU之间仅需要一根电缆连接,节约了开发成本。除此之外只需要4个高度传感器进行悬架高度的闭环控制即可,各传感器通过CAN或其他总线方式与整车网络连接。通过IMU和4个高度传感器就可以用一定的解算方法进行4个悬架簧上位置的高度和加速度的信息识别。相比传统布置方案,新方案可以减少布置难度,节省成本,电器架构简明。但是,只用一个IMU传感器来估算4个悬架位置处的

运动学信息依赖于精确的解算方法。为了使该新方案可行,本文提出了由IMU信号获取4个悬架位置处运动学信号的解算方法。

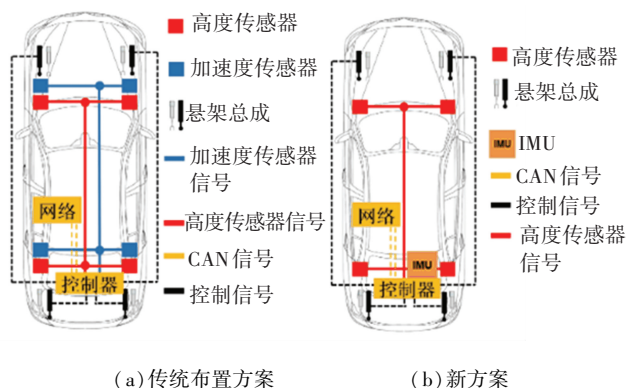


图1 传感器布置方法

Fig.1 Arrangement methods of sensors

2 三维IMU运动学模型与加速度解算方法

为了方便后续运动学公式推导,结合实际物理情况,假设整个车身为刚体。并且为了减小由于粘接产生的误差,IMU以及加速度传感器均使用氰基丙烯酸盐(502胶水)进行粘接^[13]。无约束刚体运动可以通过6个自由度描述,如图2所示。 $OXYZ$ 为与地面固连的绝对坐标系(惯性参考系); $O^iX_mY_mZ_m$ 为原点与IMU安装位置重合、三轴方向与绝对坐标系相同的中间坐标系; $O^iX^iY^iZ^i$ 为与IMU固连的坐标系,其三轴方向为IMU直接测量的加速度方向; P 点为需要测量的点。

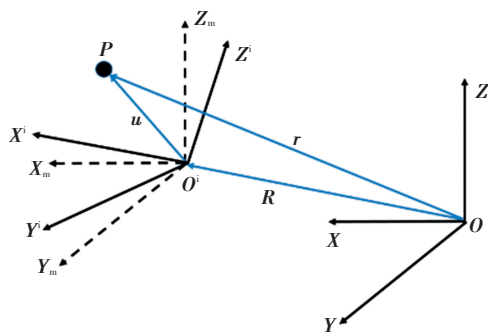


图2 坐标系及矢量定义

Fig.2 Coordinate system and vector definition

由刚体一般运动的欧拉定理^[14-15]可知,绝对坐标系下 P 点的运动可分为随基点的平动位移 R 与绕基点转动的矢量和,即

$$\begin{cases} \mathbf{r} = \mathbf{R} + \mathbf{u} \\ \mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{u}^i, \mathbf{u}^i = [x^i, y^i, z^i]^T \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为旋转坐标矩阵, $\mathbf{u}$ 为在固连坐标系下 P 点

的位置, u^i 为 u 在各坐标轴上的投影。由于车身刚体假设, 故该位置是个确定的值。结合车辆运动学特点, 在进行旋转矩阵 A 的计算时先考虑绕连坐标系下 Z 轴旋转 (横摆角 α), 再绕 Y 轴旋转 (俯仰角 β), 最后绕 X 轴旋转 (侧倾角 γ)。可得旋转矩阵 A 表达式为:

$$A(\alpha, \beta, \gamma) = A_\gamma A_\beta A_\alpha \quad (2)$$

$$\begin{cases} A_\gamma = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ A_\beta = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \\ A_\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

在计算 P 点速度时, 将式 (1) 两侧对时间求导。由于旋转矩阵 A 是正则矩阵, 由线性代数易知其随时间的导数为

$$\dot{A} = \tilde{\omega} A \quad (4)$$

式中 $\tilde{\omega}$ 为反对称阵, 且

$$\tilde{\omega} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

则可得到 P 点速度及加速度表达式为

$$\begin{cases} \dot{r} = \dot{R} + \dot{A} u^i = \dot{R} + \tilde{\omega} A u^i = \\ \quad \dot{R} + \omega \times u = \dot{R} + A(\omega^i \times u^i) \\ \ddot{r} = \ddot{R} + \alpha \times u + \omega \times \omega \times u = \\ \quad \ddot{R} + A(\alpha^i \times u^i + \omega^i \times \omega^i \times u^i) \end{cases} \quad (6)$$

结合物理意义可知, 加速度表达式由基点平移

矢量加速度 ($\ddot{R} = A a^i$)、切向加速度 ($\alpha \times u$) 以及向心加速度 ($\omega \times \omega \times u$) 构成。由于安装在悬架位置处的加速度传感器测量数值为 IMU 固连坐标系下沿着垂直于车身平面 (该平面定义为 4 个簧上位置高度平均值的水平面, 垂直于该平面即为 Z^i 轴) 方向的加速度, 所以需要将通过 IMU 解算的绝对加速度矢量沿着 Z^i 轴投影。将 $z_A^i = [0 \ 0 \ 1]^T$ 转换为绝对坐标系下的矢量表示式为 (下标 A 表示在绝对坐标系下的矢量表达式, 下同)

$$\begin{aligned} z_A = A \times z_A^i &= A \times [0 \ 0 \ 1]^T = \\ &\begin{pmatrix} \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \\ \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

可得到 $|z_A| = |z_A^i| = 1$ 。根据矢量点乘公式, 绝对加速度与 Z^i 轴夹角以及通过 IMU 加速度 (a_1) 解算在 P 处垂直于车身平面的加速度为:

$$\begin{cases} \delta = \arccos \frac{a_A \cdot z_A}{|a_A| |z_A|} = \arccos \frac{a_A \cdot z_A}{|a_A|} \\ a_1 = |a_A| \cdot \cos \delta = \ddot{r} \cdot z_A \end{cases} \quad (8)$$

根据式 (6), 可得

$$\begin{aligned} \ddot{r} &= A \begin{pmatrix} a_x^i \\ a_y^i \\ a_z^i \end{pmatrix} + A \begin{pmatrix} 0 & -\alpha_z^i & \alpha_y^i \\ \alpha_z^i & 0 & -\alpha_x^i \\ -\alpha_y^i & \alpha_x^i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{pmatrix} + \\ &A \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z^i & \omega_y^i \\ \omega_z^i & 0 & -\omega_x^i \\ -\omega_y^i & \omega_x^i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z^i & \omega_y^i \\ \omega_z^i & 0 & -\omega_x^i \\ -\omega_y^i & \omega_x^i & 0 \end{pmatrix} \cdot \\ &\begin{pmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

联立式 (6) ~ (9) 可得 P 处垂直于车身平面的加速度为

$$\begin{aligned} a_1 = \ddot{r} \cdot z_A &= a_z^i + (\alpha_x^i y^i - \alpha_y^i x^i) + [\omega_z^i \omega_x^i x^i - \\ &(\omega_x^{i2} + \omega_y^{i2}) z^i + \omega_z^i \omega_y^i y^i] \end{aligned} \quad (10)$$

在式 (10) 中, 只有俯仰角加速度 α_y^i 以及侧倾角加速度 α_x^i 需要通过数值方法求得, 其他量都可以通过 IMU 读数直接得到。观察式 (10), 加速度由平动加速度、角加速度、向心加速度 3 项组成。定义使得车头向下运动俯仰角速度及角加速度为正方向。且根据垂直轴的定义, 对于 z 轴的向心加速度项取负号是符合物理意义的。但是, 由于传感器安装位置与其本身测量误差会对最终结果产生一定或较大影响, 针对式 (10) 的误差和敏感性分析是必要的, 将在第 4 节中讨论。

3 运动学模型的实验验证

运动学公式 (10) 的精度对软测量技术的精度至关重要。为此本节设计了实车实验, 验证与标定式 (10) 的准确性。本次实验采用整车实验, 并安装 IMU 位于 3 个不同位置的点, 安装车型为大众探歌 280 舒适款。为了检测 IMU 及解算方法的正确性, 在 4 个轮心正上方对应的车身上的点布置了灵敏度为 100 mV/g 的加速度传感器; 并在车顶中心安装有 GPS 定位装置, 用于记录行驶轨迹及车速等信息, 以便明确实验场地工况信息以及不同工况的车速, 便于后续分析。加速度传感器与 IMU 具体安装位置及坐标系见图 3 及表 1。

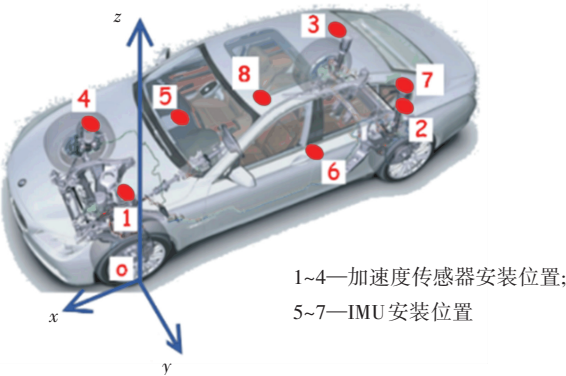


图 3 实验 IMU 安装位置及车身坐标系

Fig.3 Experimental IMU installation positions and vehicle body coordinate system

表 1 加速度传感器及 IMU 安装位置

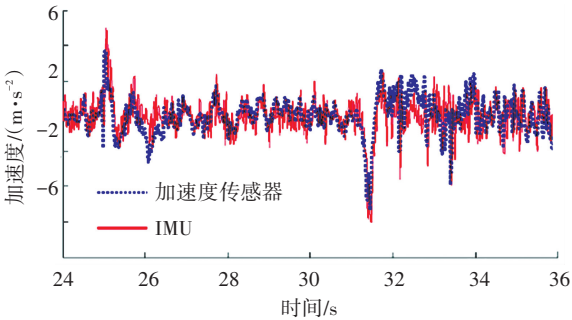
Tab.1 Acceleration sensors and IMU installation positions mm

安装位置	x	y	z
1	0	-223	884
2	-2 680	-291	520
3	-2 680	-1 251	520
4	0	-1 319	884
5	-950	-1 117	290
6	-1 598	-416	290
7	-2 580	-391	520

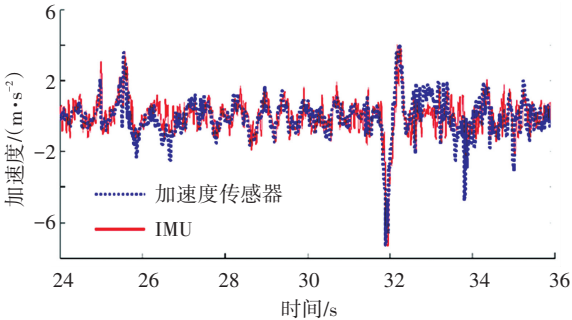
4 个加速度传感器安装位置为 1~4,假设车身为刚体,则该加速度传感器直接反映了簧上位置处的加速度信号;IMU 安装位置共 3 个,为副驾驶地板(5)、驾驶后座地板(6)以及后备箱地板一侧后轴正上方(7)。

为了验证解算方法及误差分析的合理性,根据式(10)及安装位置坐标信息计算出 4 个悬架处的加速度,并和安装在该位置的加速度传感器数值进行比较。试验选取了如上坡、下坡及过减速带等典型工况进行验证。以(5)号安装位置(副驾驶地板)为例,图 4 为上坡工况下的两个悬架位置处(FL 为左前悬架;RR 为右后悬架,下同)加速度传感器数据以及从 IMU 解算之后的数据对比(虚线代表加速度传感器测量的数据,实线代表 IMU 解算的结果)。需要说明的是,此处选取的两个悬架位置处具有代表性,因为本次实验中不考虑各工况下左右侧车轮行驶轨迹的差别。

对 3 个 IMU 安装位置及 3 种工况(上坡、下坡及过减速带)分别进行测量,并将 4 个悬架位置处 IMU 解算与加速度传感器测量值的均方根误差值作为衡量观测值同真值之间偏差离散程度的评价指标。



(a) 左前悬架加速度



(b) 右后悬架加速度

图 4 IMU 安装在(5)号位置上坡时的信号

Fig.4 Signals for IMU mounted on position (5) (uphill)

图 5 给出了 IMU 安装在(5)号位置下坡和过减速带工况下的信号。

加速度传感器与 IMU 均存在安装误差与信号传递过程中的干扰,在本文的实验结果及敏感性分析中将不予考虑。从加速度传感器测量的原始数据、IMU 解算结果及其加速度均方根值误差可以看出;IMU 解算与实际加速度传感器信号吻合度较高,验证了解算理论公式的合理性。综合该解算结论及 IMU 安装较为简单,可靠性高且维修方便的特点,不难发现 IMU 作为车身姿态检测器的潜力,同时此结论为工程实际应用提供了理论基础。即单车身 IMU 方案在不同安装位置处确实可以起到替代 4 加速度计的方案,且可靠性较高。

3 种安装位置的实验及解算结果见图 6。从图 6 可以看出,不同安装位置对解算结果影响较大。如位置 7 处(后备箱地板一侧后轴正上方)测量前轴(FL 和 FR)的均方根误差值最大而且不同工况下均方根误差波动较大,即测量最不精确;5 号位置(副驾驶地板)对右侧前后悬架测量较准,但是对左侧两个悬架测量误差较大;相反,6 号测点(驾驶后座地板)对左侧测量较准,对右侧测量误差较大。这两个点在不同工况下均方根误差变化约为 20%~30%,比 7 号位置有所改善。比较 3 个安装位置的实验数据和几何坐标发现,不同的 IMU 安装位置(水平和垂向)会对解算精度造成不同程度的影响,进而可能导致后续半主动悬架控制所需运动学参数

不准确,造成控制效果变差甚至相反等后果。而观察 3 个不同的安装位置的测量精度发现,应当存在一个收敛的最佳安装位置,下面通过对安装位置的敏感性分析推导最优安装位置并进行实验验证。

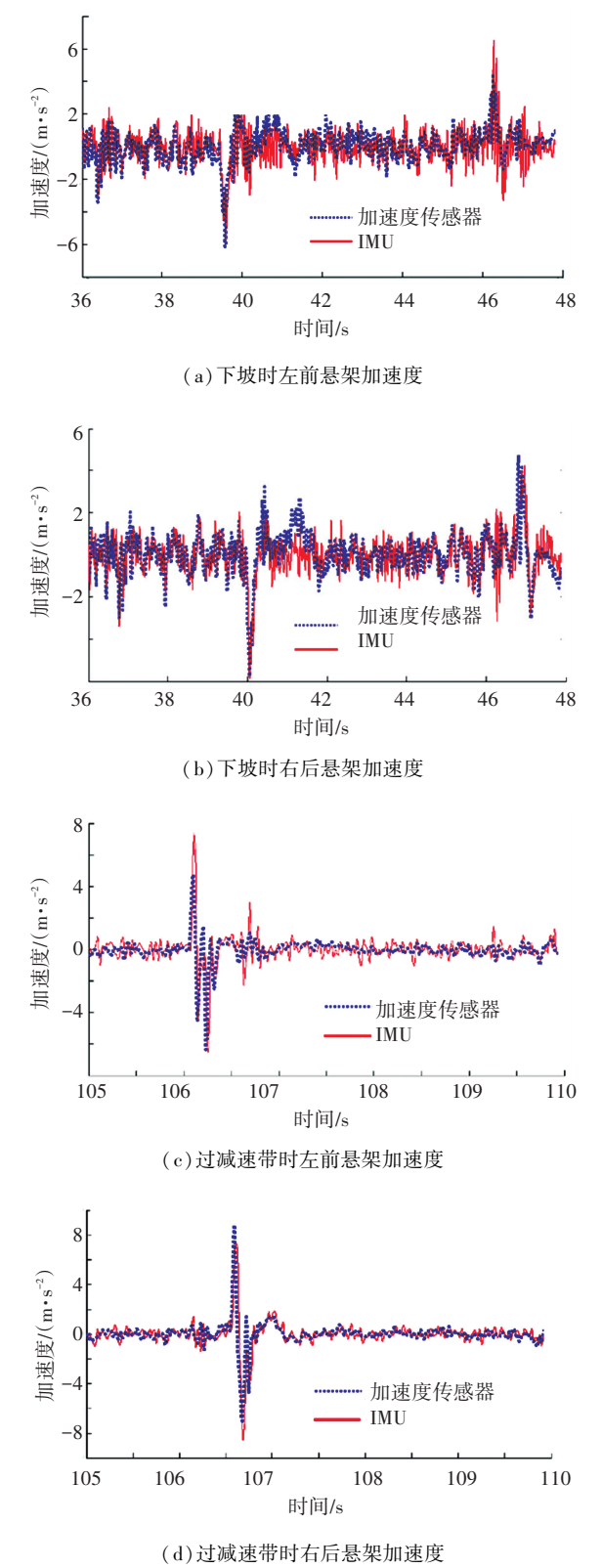


图 5 IMU 安装在 (5) 号位置的信号

Fig.5 Signals for IMU mounted on position (5) (downhill, bump)

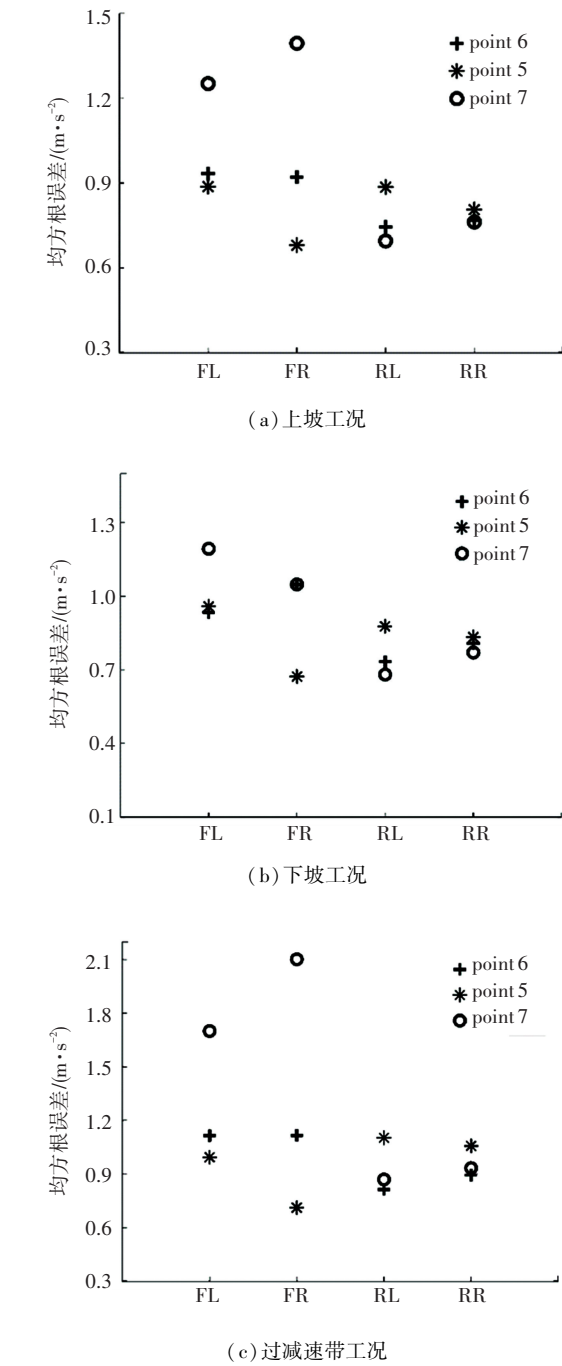


图 6 IMU 安装位置与均方根误差 (3 个观测点)

Fig.6 IMU installation positions and RMSE (3 positions)

4 敏感性分析与位置优化

理论上,IMU 安装在任何位置都可以起到替代 4 个加速度传感器的作用,但是由于安装位置不同所导致的误差可能会放大。故需要综合考虑安装位置和 4 个悬架位置的几何关系,拟定误差指标并进行最优化处理从而得到最佳安置点。除此之外,需要考虑在实际生产安装过程中可能由于其他限制,IMU 不能放置在最佳安置点,或者在一定范围内不能放置。故问题被抽象成有约束最优化问题,下

面进行有约束最优化问题的求解。

由 IMU 本身带来的随机误差无法避免, 根据用户手册可以得轴向加速度以及角速度的最大误差绝对值为 δ_a 和 δ_ω 。其中角速度和角速度平方的相对误差定义为

$$\delta_\omega = \frac{\omega_m - \omega_r}{\omega_r} = \frac{\Delta\omega}{\omega_r}, \quad \delta_{\omega^2} = 2\delta_\omega \quad (11)$$

下标 m、r 分别代表测量值和真值。加速度误差需要根据相对误差定义式计算, 设加速度信号最大误差绝对值为

$$\delta_\alpha = m\delta_\omega \quad (12)$$

m 为一常数。则将式 (11)、(12) 代入 (10), 得到最终加速度解算公式的误差为

$$\begin{aligned} \delta_r \leq \delta_a + m\delta_\omega (|y^i| + |x^i|) + (2\delta_\omega |x^i| + 4\delta_\omega |z^i| + 2\delta_\omega |y^i|) = \delta_a + \delta_\omega [(2 + m)|x^i| + (2 + m)|y^i| + 4|z^i|] \end{aligned} \quad (13)$$

由于 δ_a 和 δ_ω 均为确定的正值, 故引入误差定义新变量为

$$\frac{\delta_r - \delta_a}{\delta_\omega} = (2 + m)|x^i| + (2 + m)|y^i| + 4|z^i| \quad (14)$$

该变换对最终误差分析无影响, 但是可以大大简化后续最优性分析。针对具体车辆, L 为前后悬架距离 (轴距), W 为左右悬架距离 (轮距), 车身平面与 IMU 安装位置高度之差为 c , 与左前悬架处沿长度方向 (x 轴方向) 距离为 b , 沿宽度方向 (y 轴方向) 距离为 a 。对 IMU 安装位置与 4 个悬架的几何关系进行分析, 取误差二次项之和为需要优化的指标。根据半主动悬架的实际需求, 对前悬架 (左前右前) 引入加权因子 $k \geq 1$ 。则无约束最优化问题为:

$$\begin{cases} \min J = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\delta_r - \delta_a}{\delta_\omega} \right)_i^2 = A_1(a - a_0)^2 + B_1(b - b_0)^2 + C_1|c|^2 + C_2|c| + \Delta \\ A_1 = B_1 = 2(k + 1)(m + 2)^2 \\ C_1 = 32(k + 1) - \frac{32}{k + 1} \\ C_2 = 8(m + 2) \left[(k + 1)(W + 2L) + \frac{2L - (k - 1)W}{k + 1} \right] \\ a_0 = \frac{W}{2}, b_0 = \frac{L}{k + 1} - \frac{(k - 1)[W(m + 2)^2 + 8c(m + 2)]}{A_1} \\ \Delta = \Delta(L, W, m, k) = \text{const} \end{cases} \quad (15)$$

结合最优化指标 J 与实际物理意义, IMU 安装位置在车身平面的投影应当在 4 个悬架构成的长方

形区域内。如果安装在外部, 则必能在长方形内部找到一个点, 使得该指标小于等于原值。观察式 (15), 由于 C_1 、 C_2 为正值, 故最佳安置处 $c = 0$, 即处于车身平面内。由于左右侧悬架权重相等, 最佳安置位于车辆纵向对称面内。另外, 参数 a 和 b 二次项系数相等, 故不论垂向高度 c 如何取值, 该封闭图形横截面必为圆形, 该物理意义在下文中会详述。应当注意的是, 由于前后悬架权重不等, 故在确定安装位置纵向位置时, 存在 b 和 c 耦合项。由于此为无约束最优化问题, 可先令 $c = 0$, 讨论 k 的取值对结果影响。

1) $k = 1$ 时。此时前后悬架权重相等, 可以得到最佳安置点的坐标为

$$a_0 = \frac{W}{2}, b_0 = \frac{L}{2}, c_0 = 0 \quad (16)$$

与实际物理意义相符, 当 4 个悬架处权重相等, 则最佳安置点应当处于悬架构成封闭长方形的几何中心处。

2) $k \rightarrow \infty$ 时。此时前悬架权值为无穷, 得到的理论位置为

$$a_0 = \frac{W}{2}, b_0 = -\frac{W}{2}, c_0 = 0 \quad (17)$$

但是由前所述, b 应大于 0。出现这个问题的主要原因是此时对参数 b 来说, 其抛物线对称轴位于该区域外, 故此时取 $b = 0$ 即可。

3) $b = 0$ 时。此时最佳安置点位于车身平面与纵向对称面的交线上, 且处于前悬架中点处。此时的权重值为

$$k_{\max} = \frac{2L}{W} + 1 \quad (18)$$

$k_{\max}$ 与 m 无关, 仅与悬架位置有关。此时 IMU 距离前悬架距离最近, 测量误差最小。即当取前悬架权重大于该值时, IMU 最佳安置点不变, 测量误差也不变。 b 的取值随着 k 的增大呈单调下降趋势并存在下限, 这对权重选取以及安装位置有一定指导意义。

前文分析了无约束最优化问题的解以及权重取值对最佳安置点的影响, 在许多新车型或改装车型上往往最佳安置点条件是很难满足的, 需要研究有约束条件下最优化指标及最佳安置点的确定。本文利用方向导数的概念比较直观地给出有约束条件下选取最佳安置点的步骤, 比较适用于工程分析及实际安装。反观式 (15), 求出目标指标 J 对 3 个方向的偏导数

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial a} = 4(k+1)(m+2)^2\Delta a \\ \frac{\partial J}{\partial b} = 4(k+1)(m+2)^2\Delta b \\ \frac{\partial J}{\partial c} = \left[64(k+1) - \frac{64}{k+1} \right] \Delta c + 8(m+2) \cdot \\ \quad \left[(k+1)(W+2L) + \frac{2L-(k-1)W}{k+1} \right] \end{cases} \quad (19)$$

式中 Δa 、 Δb 、 Δc 为安装点与最佳安装点三轴方向的距离。显然,最终误差指标对安装位置与车身平面的垂向距离十分敏感,应该尽可能保证 IMU 安装在车身平面内。当确定了垂向距离后即可利用式(15)计算出 a_0 、 b_0 , 然后让 IMU 安装位置尽可能接近该点即可。下面仅给出前后悬架权重相等($k=1$)时的结论,其他情况可类推。

根据敏感性分析理论,此时最佳安置点应该位于车身平面上并处于 4 个悬架位置中心。故在原车上增加了一个靠近最佳安置点的位置(前排扶手箱 8)来进行验证,具体位置坐标见表 2。

表 2 IMU 安装位置 8 坐标值

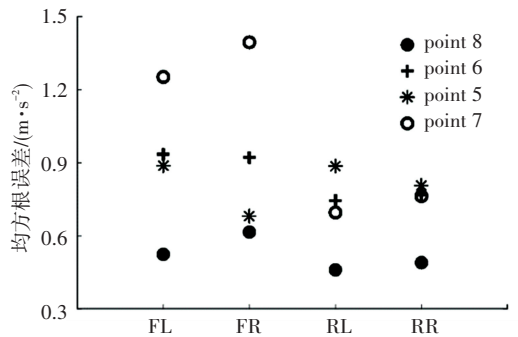
Tab.2 Coordinates of IMU mounted on position 8 mm			
安装位置	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
8	-1 453	-771	740

由上述实验步骤及统计量计算,得出 4 个 IMU 安装位置的加速度均方根误差值并进行整理,结果见图 7。

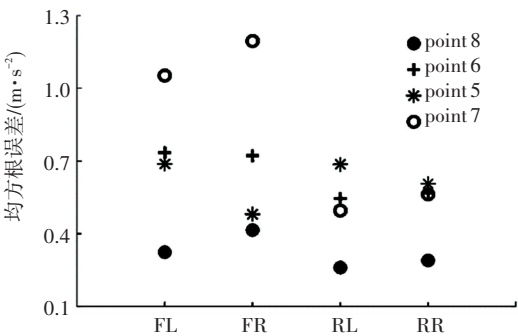
车身姿态的精确检测和解算对于车身姿态的控制有着重要意义,而解算结果的精度高度依赖于 IMU 传感器的安装位置。由图 7 可以看出,测点 8 对 4 个悬架的测量值均方根误差最小,约为 0.5~0.6 且与工况几乎无关,在测量加速度剧烈变化的减速带工况下仍保持此值。结合理论分析,主要是因为该点近似位于车身平面内,根据式(19)可以看出,误差对安装的垂向距离是十分敏感的,实验结果进一步验证了理论的正确性。该测点与 4 个悬架的距离值近似相等,位于最佳测量点附近,故其测量的加速度均方根误差最小,与理论结论相符。

为了给出直观的解释,在确定最优化指标 J (即误差评价指标)、角加速度最大误差系数 m 与前悬架权重比 k 后,得出 3 个坐标之间的等式关系。观察易知,该曲面为空间椭球,该椭球的特点是任意水平截面均为圆形。图 8 为取车身平面为基准, $m=10$ 与 $k=2$ 时的椭球面。图 8 中透明水平面表示车身平面($c=0$),该平面往上即为在车身上误差指标相等的安装位置等值面。由于在理论推导公式中给出的垂向位置是距离车身平面的距离,故整个等值

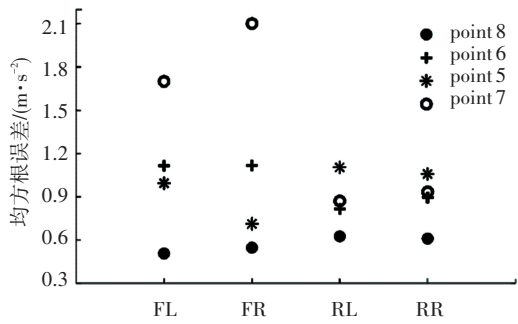
面应该是该椭球位于等值面以上的部分及该部分对车身平面的镜像面。由式(15)可知,该椭球关于 a 轴(图 3 中 y 轴)的旋转角度只与前悬架权重 k 有关。



(a) 上坡工况



(b) 下坡工况



(c) 过减速带工况

图 7 IMU 安装位置与均方根误差(4 个观测点)

Fig.7 IMU installation positions and RMSE(4 positions)

在 $k=1$ 时,最佳理论安置点位于车身平面内与 4 个悬架位置相同的点,可见测点 8 对 4 个悬架的测量值应是最准确的,这也与实验结果相符。对于测点 5 和 6,大约位于同一等值椭球面上,故该两点对前后悬架测量值虽然有不同的侧重,但是整体效果相近。测点 7 处在误差指标较大的椭球等值面上,虽然对后轴测量较好,但是对 4 个悬架的测量值均方根误差总体较大。用该等值椭球面可以清楚直观地看出较优的安装位置。

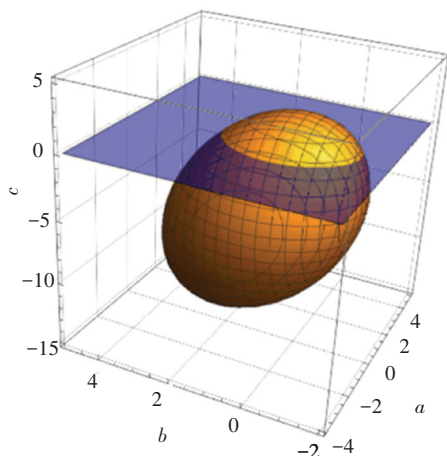


图 8 最优化指标的空间表示

Fig.8 Spatial representation of optimization index

5 结 论

本文基于半主动悬架控制所需传感器架构,提出了一种新的集成式 IMU 软测量布置方案,基于运动学理论提出了一种精确解算方法,并在此基础上利用最优化理论进行参数敏感性分析及布置优化,最后通过实验验证了解算公式和布置方案的合理性,并给出了在不同悬架权重下安装位置的空间图形,具有一定的工程指导意义。得出的主要结论有:

1) IMU 安装位置对最终解算精度影响较大,在同一安装高度下,不同水平安装位置对 IMU 的测量精度有较大影响。

2) 解算结果的精度强依赖于 IMU 传感器的安装位置,且总体误差值对 IMU 与车身平面的垂向距离非常敏感。

3) 利用数形结合思想,给出了一个 IMU 安装位置误差等值椭球面,可以较为清楚直观地对安装位置进行分析。

4) 本文的理论分析与实验表明,所提出的 IMU 软测量方案与加速度传感器测量值吻合程度高,用敏感性分析理论给出的有约束情况下较佳安置点与实验相符,可用于指导实际安装位置的选择。

参考文献

[1] 塞吉奥·马泰奥·萨瓦瑞斯, 查尔斯·普索特瓦萨尔, 克里斯蒂亚诺·斯卑尔特, 等. 车辆半主动悬架控制设计[M]. 危银涛, 彭志召, 译. 北京: 清华大学出版社, 2019: 10
SAVARESI M S, POUSSOT-VASSAL C, SPELTA C, et al. Semi-active suspension control design for vehicles [M]. WEI Yintao, PENG Zhizhao, translate. Beijing: Tsinghua University Press, 2019: 10

[2] 程世超, 高爽, 林铁, 等. 随钻测量用微小型惯性测量单元设计[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(4): 95
CHENG Shichao, GAO Shuang, LIN Tie, et al. Design of miniaturized inertial measurement unit used for measurement-while-drilling

[J]. Sensors and Microsystems, 2015, 34(4): 95. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2015)04-0095-04

[3] 高爽, 焦禹舜, 林铁, 等. 轻小型二位置光纤陀螺测斜仪惯性测量单元设计[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(6): 86
GAO Shuang, JIAO Yushun, LIN Tie, et al. Design of two-position miniaturized inclinometer IMU based on FOG [J]. Sensors and Microsystems, 2014, 33(6): 86. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9787.2014.06.025

[4] SCHOLTE W J, MARCO V R, NIJMEIJER H. Experimental validation of vehicle velocity, attitude and IMU bias estimation[J]. IFAC-Papers On Line, 2019, 52(8): 118. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.08.058

[5] ZHAO Sheng, CHEN Yiming, FARRELL J A. High-precision vehicle navigation in urban environments using an MEMS IMU and single-frequency GPS receiver [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(10): 2854. DOI: 10.1109/TITS.2016.2529000

[6] COLLIN J. MEMS IMU carouseling for ground vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2242. DOI: 10.1109/TVT.2014.2345847

[7] AMIRSADRI A, KIM J, PETERSSON L, et al. Practical considerations in precise calibration of a low-cost MEMS IMU for road-mapping applications [C]// American Control Conference. Piscataway: IEEE, 2012: 101. DOI: 10.1109/ACC.2012.6315131

[8] BERKANE S, TAYEBI A. Attitude and gyro bias estimation using GPS and IMU measurements [C]// 2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/CDC.2017.8264001

[9] JØRGENSEN E K, FOSSEN T I, SCHJØLBERG I, et al. Experimental validation of attitude and rate-sensor bias filter using range-difference measurements [J]. Control Engineering Practice, 2018, 73: 118. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.01.002

[10] GELMINI S, FOUKA M, STRADA S, et al. Self-calibration algorithm for an IMU in two-wheeled vehicles: design and experimental validation [C]// 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Piscataway: IEEE, 2018: 1751. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569762

[11] 马亚平, 魏国, 周庆东. 改进的 IMU 传感器安装误差正交补偿方法[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(9): 9
MA Yaping, WEI Guo, ZHOU Qingdong. An improved method of orthogonal compensation for IMU installation error [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(9): 9. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2016)09-0009-05

[12] 余志生. 汽车理论 [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2009: 103
YU Zhisheng. Automobile theory [M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2009: 103

[13] 于雪莲. 加速度传感器安装方式对灵敏度的影响 [J]. 中国计量, 2017(2): 114
YU Xuelian. Influence of acceleration sensor installation mode on sensitivity [J]. China Metrology, 2017(2): 114

[14] 刘延柱. 高等动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 108
LIU Yanzhu. Advanced dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 108

[15] TIMOSHENKO S, YOUNG D H. Advanced dynamics [M]. New York: MacGraw-Hill, 1948: 13