

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.02.017

基于切换策略的车辆质心侧偏角高性能获取*

陈建锋^{1,2}, 吴强², 葛新元², 赵景波¹

(1. 常州工学院电气信息工程学院, 常州 213032; 2. 江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013)

[摘要] 现有的基于融合策略的车辆质心侧偏角(vehicle sideslip angle, VSA)获取方法需要针对不同的场景、结构或信号进行优化和改进,计算复杂度和系统成本也随之增加。本文提出一种基于切换策略的VSA软测量方法。在传感器量测信号预处理部分,利用贝塞尔滤波器对侧向加速度信号进行时延处理和噪声滤除,设计可靠性检验模块对横摆角速度等信号中的突变实现有效清除。在此基础上,根据现有运动学和动力学方案的优势确定切换策略,尽量缩短运动学方案的连续工作区间以抑制其误差累积,同时将动力学方案限制在线性区工作以避免其性能下降,并在多个工况下进行仿真和硬件在环试验,以验证所提出的VSA获取方法的效果。试验结果表明,相较于采用典型的融合策略的对比方法,本文提出的方法在精度和运行时间方面都具有明显的优势,且二者对路况的变化均具有较强的鲁棒性。

关键词: 车辆质心侧偏角; 切换策略; 运动学方案; 动力学方案; 高性能获取

High-Performance Acquisition for Vehicle Sideslip Angle Based on Switch Strategy

Chen Jianfeng^{1,2}, Wu Qiang², Ge Xinyuan² & Zhao Jingbo¹

1. School of Electrical and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032;

2. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013

[Abstract] For the existing acquisition method of vehicle sideslip angle (VSA) based on fusion strategy, optimization and improvement are required for different scenarios, structures or signals. As a result, the calculation complexity and system cost rise up. A soft-sensing method for the VSA based on switch strategy is proposed in this paper. In the pretreatment part for sensor measurement signals, the Bessel filter is employed to realize the delay processing and noise filtering of lateral acceleration signal, and a reliability test module is designed to effectively eliminate the mutations in the signals of yaw rate, et al. On this basis, the switch strategy is determined based on the advantages of the existing kinematic and dynamic schemes. For the presented strategy, the continuous operating intervals of the kinematic scheme are shortened in a great deal of effort to restrain the error accumulation, and the dynamic one is restricted in linear region to avoid performance degradation. Simulations and hardware-in-loop experiments are implemented in multiple conditions to verify the effect of the proposed method. The experimental results show that the proposed method in this paper has obvious advantages in accuracy and execution time compared to the one utilizing the classical fusion strategy. Moreover, they are both robust to the change of road conditions.

Keywords: vehicle sideslip angle; switch strategy; kinematic scheme; dynamic scheme; high-performance acquisition

* 国家自然科学基金面上项目(52072159)和常州市科技支撑计划(社会发展)项目(CE20225072)资助。

原稿收到日期为2023年08月11日,修改稿收到日期为2023年08月25日。

通信作者:赵景波,教授,博士,E-mail:zhaobjb@czu.cn。

前言

车辆质心侧偏角(vehicle sideslip angle, VSA)对车辆的稳定性控制具有重要意义,VSA过大,轮胎侧向力趋近饱和,车辆极易失稳。在电子稳定程序(electronic stability program, ESP)等主动安全技术中,VSA是主要的控制变量,且须能够准确测量。近年来,随着主动安全技术的广泛应用,车辆的经济性、安全性与驾驶性都得到显著提升^[1]。但是,由于成本原因,量产车上的VSA信息难以利用传感器直接测得^[2]。相比较而言,基于软测量原理的VSA获取方法具有成本低、可移植性好等显著优点^[3-4],已成为学术界研究的重点方向之一。

根据所采用的模型不同,基于软测量原理的VSA获取方案主要可分为运动学和动力学两类^[5]。前者的实现依赖于对惯性器件(包括陀螺仪和加速度计)的量测信号进行积分,其性能不受车辆运动的影响、计算量小且对道路条件的适应性较好^[6-7]。但是,惯性器件的量测信号中存在偏置。这些偏置难以准确估计且会随时间累积,最终严重影响VSA获取的长期性能^[8]。后者的性能主要取决于车辆动力学建模的准确性,特别是轮胎的动力学建模。目前,轮胎力的计算主要依赖观测器或轮胎模型。利用滑模观测器^[9]或未知输入观测器^[10],可以实现轮胎力的有效观测,但存在观测结构复杂以及需要进行稳定性设计等问题。轮胎模型可分为非线性和线性轮胎模型两类^[11]:非线性轮胎模型精度高,但含有较多难以准确获取的时变参数;线性轮胎模型结构简单,但其性能会在非线性区呈现显著下降。Li等^[12]和Liao等^[13]在线性轮胎模型的基础上,分别提出一种基于反馈信息的轮胎侧偏刚度修正方法,以实现轮胎侧偏刚度的自适应。但是,此类做法对系统设计的复杂度要求较高,且需要保证修正信号在任意情况下均可靠。

考虑到运动学和动力学方案各自的优点,有学者提出将两种方案得到的结果进行融合的观点,相关的研究可大致分为两类。第一类需要根据量测信号判定车辆的运动状态,进而确定融合系数。Cheng等^[14]和Jiang等^[15]分别利用侧向车速和侧向加速度量测信号设计融合策略,在部分运动场景下可获得较好的融合效果。但是,上述做法未涉及量测信号(如侧向加速度和横摆角速度等)数值小但变化快的场景。Cheli等^[16]和Villano等^[17]提出基于量测信号

均方误差的车辆运动状态判定方法,以尽可能应对所有场景。但是,计算均方误差会使车辆运动状态的判定结果产生滞后。Piyabongkarn等^[18]和Li等^[12]利用低通和高通滤波原理,从频域角度设计融合策略。类似地,滤波器的引入会使信号的相位发生改变。第二类研究则着眼于利用运动学或动力学方案对另一种方案中的关键参数进行修正。例如,Liao等^[13]提出利用运动学方案求解时变的轮胎侧偏刚度,以实现轮胎侧向力的准确获取。但是,轮胎侧偏刚度的非线性特征仅出现在非线性区,上述做法会产生不必要的运算负担。Hong等^[19]考虑车辆结构参数的时变特性,提出基于双滤波器结构的融合策略,通过迭代修正提升VSA获取的鲁棒性。需要注意的是,该方法仅涉及某些特殊场景下的参数时变问题,其普适性有待进一步验证。此外,Song等^[20]和Liu等^[21]使用卫星信号对车载传感器量测信号进行修正,通过改善动力学方案的信号输入质量来提升动力学方案的VSA获取效果。但是,卫星信号易受环境影响且信号频率低。

总体而言,现有的研究主要集中在车辆运动状态的判定以及融合策略的设计等方面,较少涉及对运动学和动力学方案优点的直接利用。此外,现有的做法需要针对不同的场景、结构或信号进行优化和改进,这些都会增加计算复杂度和系统成本。事实上,对于运动学和动力学方案,合理利用切换系统理论进行设计,可以在显著降低计算负担的同时获得较好的动态性能和抗干扰能力。本文提出一种基于切换策略的VSA高性能获取方法,利用贝塞尔滤波器和可靠性检验模块对传感器量测信号进行预处理,以实现相应的相位调节、噪声滤除以及可靠性判别;在此基础上,利用运动学和动力学方案的优势设计切换策略,根据侧向加速度信号的幅值确定切换时机,通过两种方案的切换来缩短运动学方案的连续工作区间,进而改善VSA获取的效果。

1 VSA获取方法的总体架构

图1为VSA获取方法的总体架构,主要包括传感器量测信号预处理、系统的运动学和动力学建模以及切换策略设计等部分。其中,传感器量测信号预处理部分由贝塞尔滤波器和可靠性检验模块组成。侧向加速度量测信号 a_{ym} 经贝塞尔滤波器处理后分为两路:一路经可靠性检验后作为运动学方案的输入 a_y ,另一路 a_{ym} 直接送至切换策略设计部分。

此外,可靠性检验模块还负责对横摆角速度量测信号 r_m 进行可靠性判别,其结果 r 也作为运动学方案的输入。在系统的运动学和动力学建模部分,分别根据相应的信号实现基于运动学和动力学方案的VSA获取。最后,在切换策略设计部分对 a_{yb} 进行中值滤波,并根据滤波后的结果 a_{yf} 设计具体的切换模块,实现车辆质心侧偏角 β 在运动学方案输出结果 β_k 和动力学方案输出结果 β_d 之间的高效切换。

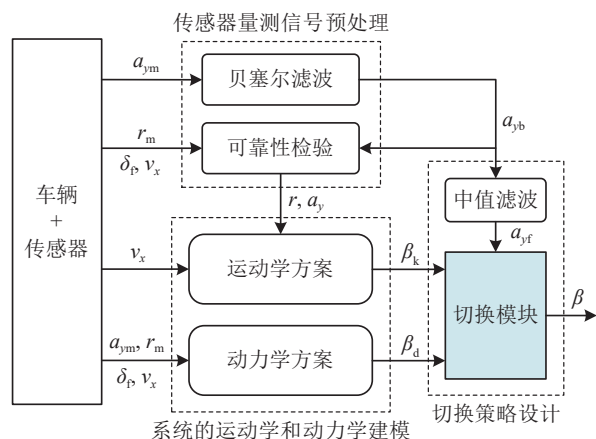


图1 VSA获取方法的总体架构

2 传感器量测信号预处理

2.1 侧向加速度信号的时延滤波

本文中,侧向加速度是运动学和动力学方案之间进行切换的重要依据。考虑到侧向加速度量测信号 a_{ym} 与VSA信号之间存在一定的相位差^[12],可以通过减小此类相位差来提升VSA获取的精度。贝塞尔滤波器具有向其截止频率以下的所有频率提供等量延时的特性,其带通相位响应几乎呈线性,可以保证滤波后信号波形的完整性,相应的传递函数^[22]可表示为

$$H(s) = \frac{\theta(0)}{\theta(s/\omega_0)} \quad (1)$$

式中: $\theta(0)$ 是比例系数; $\theta(s/\omega_0)$ 是贝塞尔多项式, ω_0 是选定的期望截止频率。2阶贝塞尔滤波器结构相对简单,且具有较高的阻带衰减率,可以较快地消除通频带外的高频噪声。本文选用2阶贝塞尔滤波器对侧向加速度量测信号 a_{ym} 进行处理(传递函数为 $H(s) = \frac{10000}{s^2 + 200s + 10000}$,期望截止频率为 $\omega_0 = 100$ Hz),在减小 a_{ym} 与VSA信号之间相位差的同时实

现对相应高频噪声的滤除,以保证信号处理的准确性。

2.2 可靠性检验

实际车辆的运行环境较为复杂,温差、冲击等都会影响车载传感器量测信号(如横摆角速度信号 r_m 等)的可靠性^[23]。因此,有必要在使用之前对此类信号进行可靠性检验^[24]。

作为基础信号,对横摆角速度进行可靠性检验的参考信息较少,故采用图2所示的可靠性判别流程。

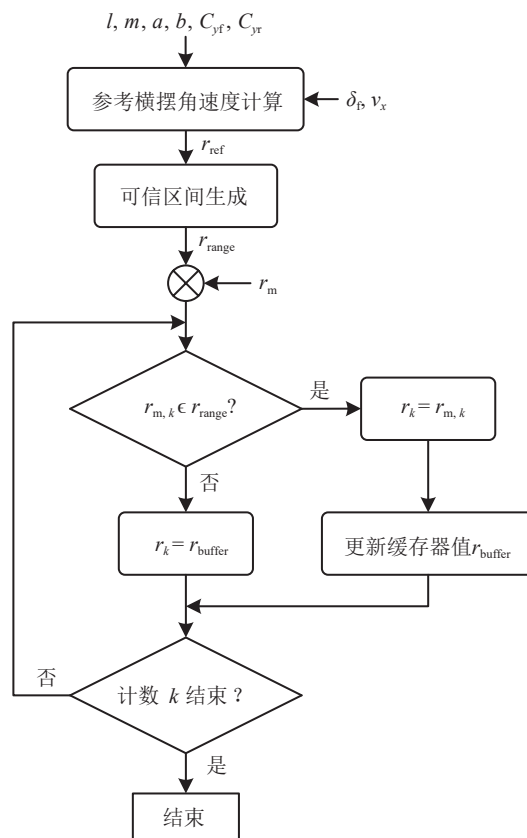


图2 横摆角速度信号的可靠性判别流程

其中,将参考横摆角速度 r_{ref} 沿垂直方向进行平移(具体的平移幅值取决于传感器量测信号的噪声幅值,可以根据其噪声统计特性确定,是一个经验值),得到某一可信区间 r_{range} 。在此基础上,将 k 时刻处于可信区间 r_{range} 内的横摆角速度量测值 $r_{m,k}$ 视为可靠值 r 并存入缓存器,对可信区间 r_{range} 之外的横摆角速度量测值则用缓存器中最新的数据进行替代。此外,可靠性判别过程中的参考横摆角速度 r_{ref} 按下式计算:

$$r_{ref} = \frac{\delta_f v_x}{(1 + K v_x^2) l} \quad (2)$$

式中: δ_f 为前轮转向角; l 为车辆轴距; v_x 为车辆质心处的纵向车速, $v_x = \frac{1}{2}(\omega_3 + \omega_4)R_{eff}$, ω_3, ω_4 分别为后轴

左、右从动轮的转速; K 为稳定性因数, $K = \frac{m}{l^2} \left(\frac{a}{C_{yf}} - \frac{b}{C_{yr}} \right)$, m 为车辆整备质量, a 和 b 分别为车辆质心到前、后轴的距离, C_{yf} 、 C_{yr} 分别为前、后轴总的轮胎侧偏刚度; R_{eff} 为车轮有效半径。

对于经时延滤波处理的侧向加速度信号 a_{yb} ,也可以采用类似的流程进行可靠性检验,获得相应的可靠值 a_y 。

3 系统运动学和动力学建模

3.1 运动学方案

考虑车辆的平面运动,有如下的侧向运动学关系:

$$\dot{v}_y = a_y - rv_x \quad (3)$$

式中 v_y 、 a_y 和 r 分别为车辆质心处的侧向车速、侧向加速度和横摆角速度。对上式进行积分运算,得到运动学方案输出的车辆质心侧偏角 $\beta_k \approx \frac{1}{v_x} \int (a_y - rv_x) dt$ 。

需要注意的是,测量横摆角速度和侧向加速度的车载惯性器件一般为低成本器件,其信号中含有较大的常值偏置。相应地,对此类信号进行积分操作会使误差随时间快速累积。考虑常值偏置的特点,采用合理的建模补偿方法对车载惯性传感器信号进行处理,可以有效减少短时间内积分误差的累积^[8],进而可准确地描述短时间内VSA的变化趋势。其中,常值偏置的数值可根据传感器手册或静态测试得到。本文中涉及的 r_m 和 a_{ym} 信号均默认为已经过合理的传感器误差建模补偿。

3.2 动力学方案

前驱车辆的2自由度模型如图3所示,相应的侧向和横摆运动可表示为

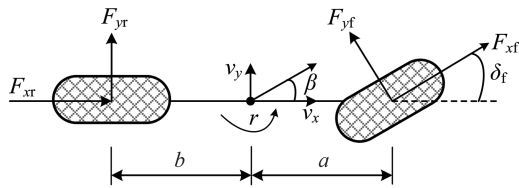


图3 前驱车辆的2自由度模型

$$\begin{cases} ma_y = F_{yf} \cos \delta_f + F_{yr} + F_{xf} \sin \delta_f \\ I_z \dot{r} = (F_{yf} \cos \delta_f + F_{xf} \sin \delta_f) a - F_{yr} b \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_{yf} 、 F_{yr} 分别表示前、后轴的轮胎侧向合力; F_{xf} 为前轴的轮胎纵向合力; I_z 为车辆绕 z 轴的转动惯量。

对于较为平缓的工况,前、后轴的轮胎侧向合力可根据如下的线性轮胎模型得到^[25]:

$$\begin{cases} F_{yf} = C_{yf} \alpha_f \\ F_{yr} = C_{yr} \alpha_r \end{cases} \quad (5)$$

式中:前轮侧偏角 $\alpha_f = \frac{v_y + ra}{v_x} - \delta_f$;后轮侧偏角 $\alpha_r = \frac{v_y - rb}{v_x}$ 。

当前轮转向角 δ_f 很小时,有 $\sin \delta_f \approx 0$ 、 $\cos \delta_f \approx 1$,且车辆的侧向运动满足 $a_y = \dot{v}_y + rv_x$ 。将上述关系及式(5)代入式(4),并考虑系统的过程噪声,可以得到如下的状态方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(t)u + \mathbf{w} \quad (6)$$

式中:状态向量 $\mathbf{x} = [v_y, r]^T$;控制量 $u = \delta_f$; \mathbf{w} 为过程噪声向量; $\mathbf{A}(t)$ 和 $\mathbf{B}(t)$ 见式(7)。

$$\begin{cases} \mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} \frac{C_{yf} + C_{yr}}{mv_x} & \frac{aC_{yf} - bC_{yr} - v_x}{mv_x} \\ \frac{aC_{yf} - bC_{yr}}{I_z v_x} & \frac{a^2 C_{yf} + b^2 C_{yr}}{I_z v_x} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{C_{yf}}{m} \\ -\frac{aC_{yf}}{I_z} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

进一步,在前轮转向角 δ_f 很小时,将 $\sin \delta_f \approx 0$ 、 $\cos \delta_f \approx 1$ 和式(5)代入式(4)的第一部分,同时考虑实际侧向加速度信号和横摆角速度信号的构成,有如下的量测关系式:

$$\mathbf{z} = \mathbf{C}(t)\mathbf{x} + \mathbf{D}(t)u + \mathbf{v} \quad (8)$$

式中:量测向量 $\mathbf{z} = [a_{ym}, r_m]^T$; \mathbf{v} 为量测噪声向量; $\mathbf{C}(t)$ 和 $\mathbf{D}(t)$ 见式(9)。

$$\begin{cases} \mathbf{C}(t) = \begin{bmatrix} \frac{C_{yf} + C_{yr}}{mv_x} & \frac{aC_{yf} - bC_{yr}}{mv_x} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{D}(t) = \begin{bmatrix} -\frac{C_{yf}}{m} \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

对式(6)和式(8)进行离散化,并利用卡尔曼滤波器(Kalman filter, KF)进行迭代计算,可以得到侧向车速的估计值 \hat{v}_y 。最后,确定动力学方案输出的车辆质心侧偏角 $\beta_d = \arctan \hat{v}_y / v_x$ 。

4 切换策略设计

4.1 切换的依据

需要注意的是,经时延滤波处理的侧向加速度

信号 a_{yb} 中仍存在噪声尖峰。这会导致切换策略的误触发,进而影响 VSA 获取的效果。中值滤波器可以有效克服偶然因素引起的噪声波动,能在抑制噪声尖峰的同时保护信号的边缘不被模糊^[18]。本文对经时延滤波处理的侧向加速度信号 a_{yb} 再进行中值滤波,不仅可以通过相位调节使侧向加速度信号与 VSA 信号达到近乎同步,而且可以利用非线性的方法对侧向加速度信号中的噪声尖峰部分进行有效平滑。

此外,对于不同的轮胎-路面附着系数(tire-road friction coefficient, TRFC),轮胎侧向力 F_y 与轮胎侧偏角 α 之间存在如下关系(见图4):当 α 较小时, F_y 与 α 基本呈线性关系,可以认为轮胎侧偏刚度 C_y 基本为常值,且 TRFC 对 F_y 的影响较小;随着 α 的逐渐增大(即车辆从较为平缓的工况逐渐进入剧烈工况),上述关系进入非线性区和饱和区, C_y 发生显著变化。此时,式(5)所示的线性轮胎模型已不再适用。相应地,动力学方案的 VSA 获取精度会出现明显的下降。相比较而言,运动学方案适用于各种工况。但是,即使经过合理的传感器误差建模补偿,长时间采用 3.1 节中描述的运动学方案,仍会使 VSA 的获取结果中存在较大的累积误差。

综合考虑以上因素,本文提出如下的切换策略设计思路:在如图4所示的非线性区和饱和区采用运动学方案,在车辆运动较为平缓的线性区则采用动力学方案;同时,利用经中值滤波之后的侧向加速度信号的幅值 $|a_{yT}|$ 表征车辆侧向机动的剧烈程度,通过设置相应的阈值 a_{yT} 实现 VSA 获取在运动学和动力学方案之间的高效切换。

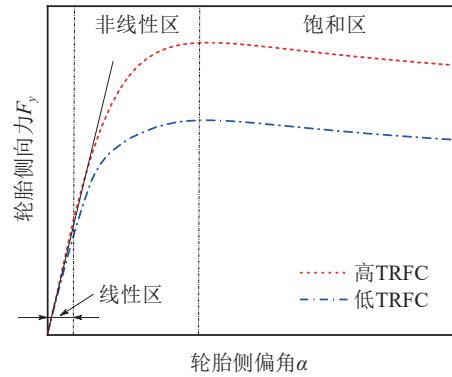


图4 轮胎侧向力与轮胎侧偏角之间的关系

4.2 切换的过程

车辆进行侧向移动时,侧向加速度信号与 VSA 的变化趋势相同。因此,利用易于直接测量的侧向加速度信号的幅值 $|a_{yT}|$ 来表征车辆侧向移动的剧烈程度,是一种较为合理的近似。

当 $|a_{yT}|$ 不超过设定的阈值 a_{yT} 时,可以近似认为轮胎侧向力 F_y 与轮胎侧偏角 α 之间的关系处于图4中的线性区,轮胎侧偏刚度 C_y 基本为常值。此时,采用动力学方案获取 VSA,其精度主要取决于惯性器件的噪声统计特性,VSA 的误差值 $|\Delta\beta|$ 较小(例如图5中的 $[t_1, t_2]$ 区间)。当 $|a_{yT}| > a_{yT}$ 时, F_y 与 α 之间的关系进入非线性区和饱和区, C_y 不再是常值。此时,采用基于线性轮胎模型的动力学方案的 VSA 获取精度出现显著下降,故须及时切换到对车辆运行工况不敏感的运动学方案。进行此类切换时(例如图5中的 t_2 时刻),可以将动力学方案中对状态量 v_y 的估计结果直接作为运动学方案的积分初值。在图5中的

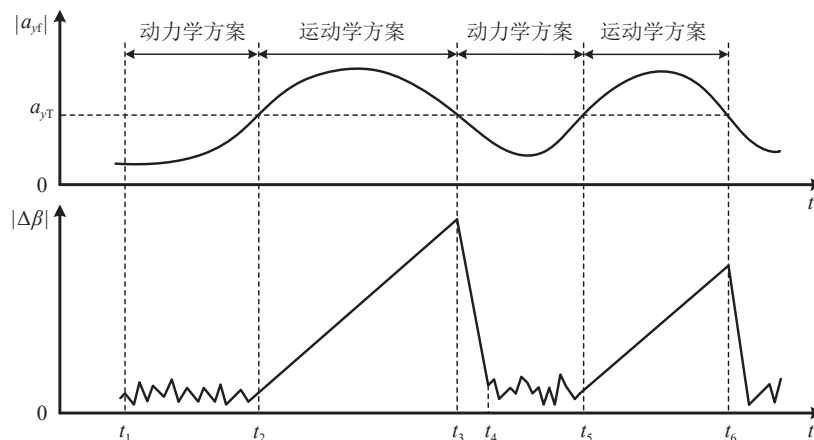


图5 切换的过程及相应的VSA获取效果

$[t_2, t_3]$ 区间,VSA由运动学方案确定,其误差随时间累积,故应尽量缩短运动学方案的工作时间。当再次出现 $|a_{y1}| \leq a_{yT}$ 时(例如图5中的 t_3 时刻), F_y 与 α 之间的关系重新进入线性区, C_y 可视为常值。此时,运动学方案的误差值即为一个切换过程中VSA的最大误差。对于图5中的 $[t_3, t_5]$ 区间,VSA由动力学方案确定,且 t_3 时刻运动学方案中对 v_y 的积分结果也可作为动力学方案中KF的初值。其原因在于KF算法本身对系统状态的初值并不敏感,在模型建立准确的前提下,KF的估计误差能够快速收敛(例如图5中的 $[t_3, t_4]$ 区间)。总体而言, t_3 时刻的切换能够起到类似误差零点重置的作用。当再次出现 $|a_{y1}| > a_{yT}$ 时,按上述过程依次循环切换即可。

此外,对于同样的转向盘输入,工况条件的差异(包括TRFC和纵向车速等因素)可能显著影响车辆的侧向加速度响应曲线,而且侧向加速度峰值的不准确会使两种方案的切换出现少许的超前或滞后。在实际车辆运行工况下,此类超前或滞后不可避免,但量值较小,不会对VSA获取的整体效果产生显著影响。对于本文设计的切换策略而言,在 $|a_{y1}|$ 与阈值 a_{yT} 之间的关系再次出现反转时,可以利用两种方案之间的切换实现前述的“误差零点重置”,由此及时消除此类影响。这也是切换策略的重要优势之一。

5 试验验证

为验证所提出的VSA获取方法的效果,在多个工况下进行仿真和硬件在环试验。试验车辆选择CarSim中的C级车,相关的车辆结构参数和惯性器件性能指标分别见表1和表2。

表1 车辆结构参数

参数	数值
整车质量 m/kg	1412
车辆绕z轴的转动惯量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1964.4
车辆前/后轴到质心的距离 $a/b/\text{m}$	1.015/1.895
车辆轴距 l/m	2.91
车轮有效半径 R_{eff}/m	0.325

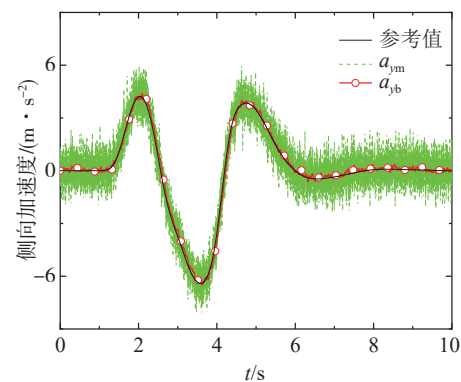
表2 惯性器件性能指标

惯性器件	偏置	噪声(1σ)
陀螺仪	$0.1(^{\circ})/\text{s}$	$1(^{\circ})/\text{s}$
加速度计	0.5 m/s^2	0.3 m/s^2

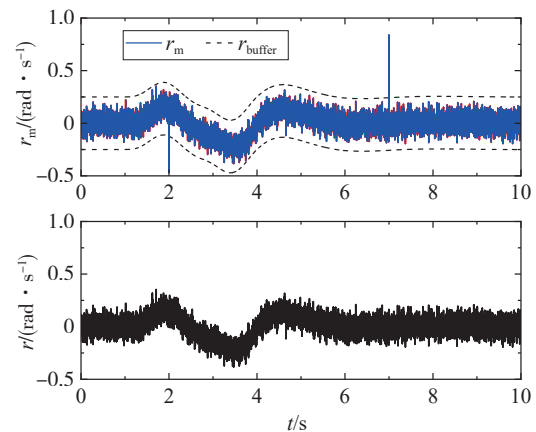
5.1 仿真结果

5.1.1 传感器量测信号的预处理效果

验证工况为双移线(double lane change, DLC)工况,纵向车速为120 km/h,相应的侧向加速度信号的时延滤波结果和横摆角速度信号的可靠性判别结果如图6所示。可以发现,经贝塞尔滤波处理, a_{yb} 信号较参考值有一定的时延,且 a_{yb} 信号较其量测信号 a_{ym} 在噪声滤除方面有明显的提升(见图6(a))。此外,在图6(b)中,除一些异常量测点外(如第2和7s附近,幅值分别约为0.47和0.84 rad/s),横摆角速度量测信号 r_m 均落在可信区间 r_{range} 内;而在经可靠性检验后得到的横摆角速度信号 r 中,这些异常量测点处的突变均已被有效识别并替换。



(a) 侧向加速度信号的时延滤波结果



(b) 横摆角速度信号的可靠性判别结果

图6 传感器量测信号的预处理效果

5.1.2 VSA的获取效果

选取较为典型的连续DLC工况进行验证(见图7)。其中,3个顺序相连的DLC工况的TRFC分别设为0.85、0.5和0.35,以模拟包含积水及冰冻等路面的真实路面,纵向车速为120 km/h。此工况下的

VSA获取结果(包括 β 及其误差值 $|\Delta\beta|$)如图8所示,对于本文提出的基于切换策略的VSA获取方法而言,其中的橙色背景区间为动力学方案工作区域,其余为运动学方案工作区域,切换的阈值 a_{yT} 取 1.5 m/s^2 (下同)。需要注意的是,切换阈值 a_{yT} 是一个经验值,可以通过多次仿真试验确定。为方便比较,同时给出基于典型融合策略的VSA获取方法^[14]的结果(简称对比方法,下同)。

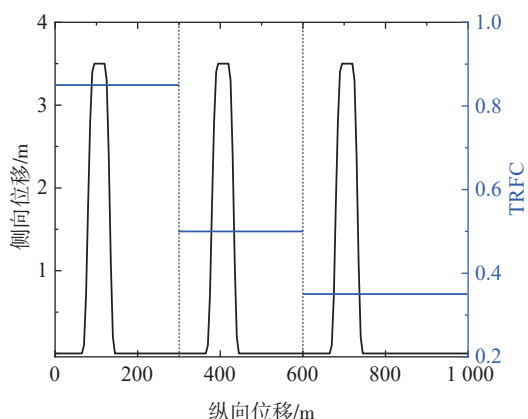


图7 连续DLC工况及对应的TRFC

显然,采用本文提出的方法,在橙色背景区间获得的 β 曲线与参考值吻合得较好;在其他区间存在一定的误差,但总体较为平滑。对误差值曲线而言,采用本文提出的方法,其 $|\Delta\beta|$ 若在之前的运动学方案工作区域快速累积,则会在接下来的橙色背景区

间出现快速下降。该现象与5.2节中对切换过程的描述相符。此外,在路面附着条件发生突变时(如第9和第18 s),VSA的获取结果不存在明显的变化,这表明本文提出的方法和对比方法对路况的变化均具有较好的鲁棒性。

为进一步比较两种方法的精度,表3中给出了相应的误差值统计结果。可以发现,相较于对比方法,本文提出的方法在最大绝对误差 $|\Delta\beta|_{\max}$ 、平均绝对误差 $|\Delta\beta|_{\text{mean}}$ 以及均方根误差 $|\Delta\beta|_{\text{RMSE}}$ 等方面均具有明显的提升,提升幅度分别为40.7%、22.4%和30.6%。此外,同样执行图7所示的仿真任务(纵向车速 120 km/h ,持续时间 30 s),采用本文提出的方法和对比方法所需的运行时间分别为 15.14 s 和 20.02 s ,节省幅度约为24.4%。其原因在于对比方法在任意时刻都需要同时使用动力学和运动学方案进行计算,而本文提出的方法仅需使用其中的一种。

表3 连续DLC工况下的误差值统计结果

采用的方法	$ \Delta\beta _{\max}$	$ \Delta\beta _{\text{mean}}$	$ \Delta\beta _{\text{RMSE}}$
本文方法	0.274°	0.059°	0.086°
对比方法	0.462°	0.076°	0.124°

5.2 硬件在环试验结果

硬件在环试验平台如图9所示,VSA的获取由Simulink实现,其与受驾驶员操控的CarSim中的车辆模型一起被送入dSPACE中。选择具有代表性的

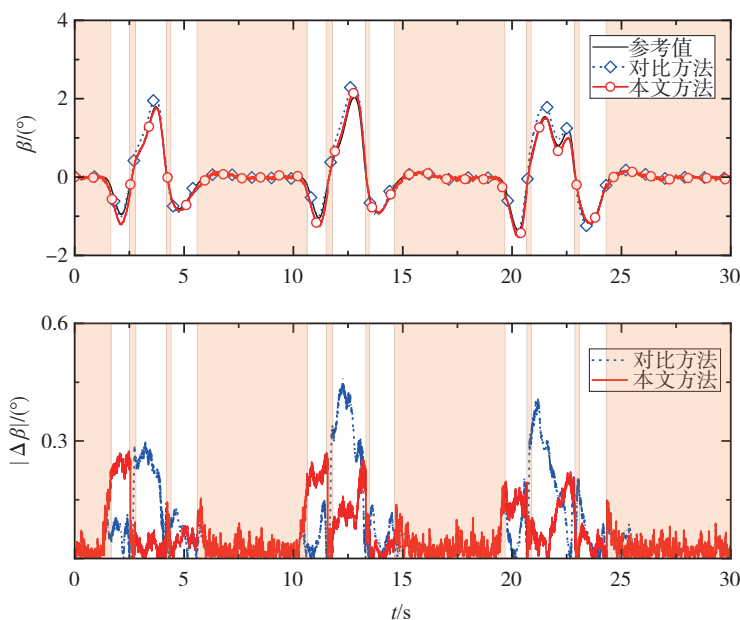


图8 连续DLC工况下的VSA获取结果

低、高附着路面条件进行验证,加速踏板保持固定开度,纵向车速从 12.5 m/s 逐渐提高至中、高速区间,转向盘转角输入为类正弦信号。

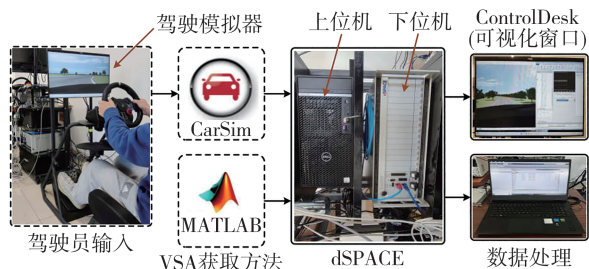
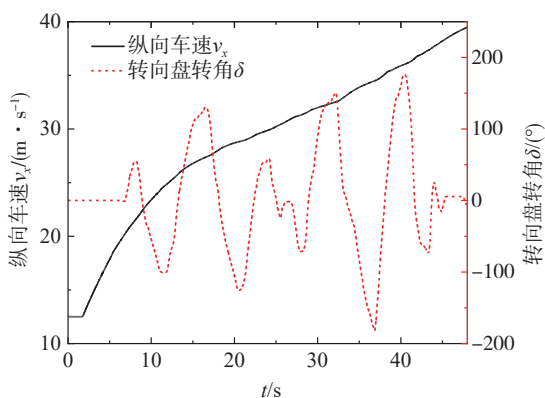
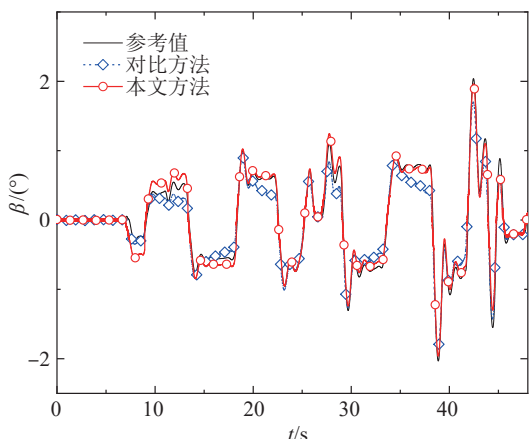


图9 硬件在环试验平台

图 10 为低附着路面条件 (TRFC = 0.35) 下的 VSA 获取结果,同时给出相应的转向盘转角输入和纵向车速曲线。可以发现,采用本文提出的方法仅在初始阶段存在较差的 VSA 获取效果,具体见 [7, 18]s 区间;在第 18 s 之后,采用对比方法的 VSA 误差则明显大于本文提出的方法。



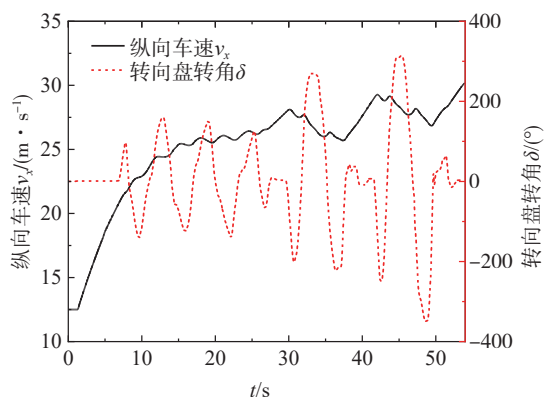
(a) 转向盘转角输入和纵向车速曲线



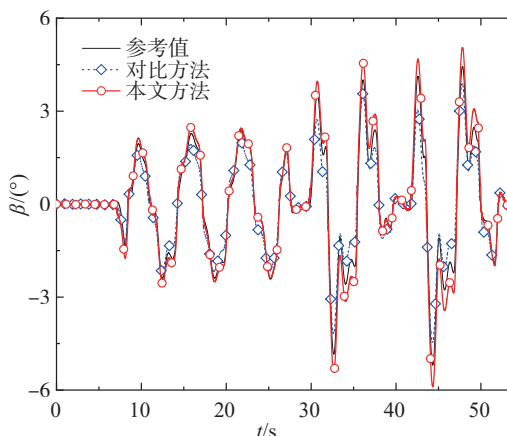
(b) VSA获取结果

图 10 低附着路面条件 (TRFC = 0.35)

高附着路面条件 (TRFC = 0.85) 下的相关曲线和结果如图 11 所示。在 [0, 30]s 区间,采用本文提出的方法可以得到与参考值一致性较高的 VSA 获取结果,且该结果明显优于对比方法;在此之后,该优势则出现相对下降。



(a) 转向盘转角输入和纵向车速曲线



(b) VSA获取结果

图 11 高附着路面条件 (TRFC = 0.85)

表 4 为低、高附着路面条件下的硬件在环试验误差值统计结果。其中,高附着路面条件下的各项指标提升较为有限,分别为 9.9%、16.1% 和 11.7%。总体而言,本文提出的方法在各项误差值统计指标方面均优于对比方法。

5.3 分析与讨论

仿真及硬件在环试验结果表明:(1)本文提出的

表 4 硬件在环试验的误差值统计结果

采用的方法	TRFC = 0.35			TRFC = 0.85		
	$ \Delta\beta _{\max}$	$ \Delta\beta _{\text{mean}}$	$ \Delta\beta _{\text{RMSE}}$	$ \Delta\beta _{\max}$	$ \Delta\beta _{\text{mean}}$	$ \Delta\beta _{\text{RMSE}}$
本文方法	0.416°	0.073°	0.100°	1.074°	0.240°	0.338°
对比方法	0.567°	0.109°	0.146°	1.192°	0.286°	0.383°

传感器量测信号预处理方法,可有效实现对侧向加速度信号的时延处理和噪声滤除,对横摆角速度等信号中异常量测点处的突变也可有效清除;(2)利用本文设计的切换策略,可以较短的运行时间实现对VSA的高精度获取,且该方法对路况的变化具有较强的鲁棒性。

需要注意的是,对本文设计的切换策略而言,运动学方案不宜长时间连续工作。其原因在于运动学方案所依赖的车载惯性器件中存在无法避免的误差分量,对其进行长时间积分会导致较大的累积误差。此外,本文将切换阈值 a_{yT} 设为定值。对图4中的高、低TRFC情况而言,该设置导致 $F_y-\alpha$ 关系在虚线所示的临界点附近与其真实关系之间存在较大偏差,即高、低TRFC对应的 C_y 不应简单视为相等。这也是图11中本文提出的方法在第30s后的精度优势出现相对下降的根本原因,即第30s后,车辆侧向运动加剧(转向盘转角输入的幅度增加),运动学方案持续工作,相应的累积误差无法及时通过与动力学方案的切换而得到消除,具体可见图12所示的误差值 $|\Delta\beta|$ 曲线。后续可针对不同的附着路面条件研究切换阈值 a_{yT} 的确定问题,以进一步缩短运动学方案的连续工作区间。

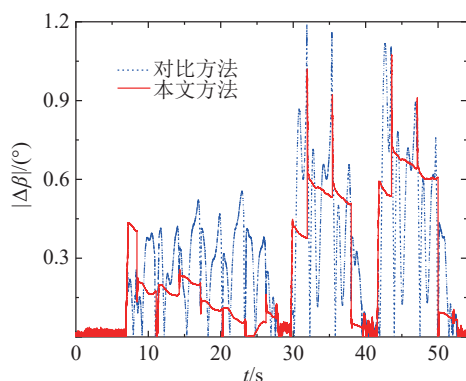


图12 高附着路面条件(TRFC = 0.85)下的误差值曲线

6 结论

本文提出了一种基于切换策略的VSA高性能获取方法。在传感器量测信号预处理阶段,利用贝塞尔滤波器的近似线性时延特性,调节侧向加速度量测信号的相位并滤除其中的高频噪声;采用可靠性检验模块清除横摆角速度等信号中的异常突变点。在切换策略设计部分,利用平滑后的侧向加速

度信号幅值表征车辆侧向移动的剧烈程度,通过设置恒定的阈值实现VSA获取在运动学和动力学方案之间的高效切换。

试验结果表明,相较于采用典型融合策略的对比方法,本文提出的方法在精度方面至少有约10%的提升,同时可以节省约24.4%的运行时间。此外,二者对路况的变化均具有较强的鲁棒性。后续将搭建实车试验平台,进一步验证本文提出的方法的有效性;也可考虑针对切换阈值的设置进行优化,例如研究其对不同附着路面条件的自适应等,以充分发挥切换策略的优势。

参考文献

- [1] HAJILOO R, ABROSHAN M, KHAJEPOUR A, et al. Integrated steering and differential braking for emergency collision avoidance in autonomous vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(5): 3167-3178.
- [2] SINGH K B, ARAT M A, TAHERI S. Literature review and fundamental approaches for vehicle and tire state estimation[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2019, 57(11): 1643-1665.
- [3] 周卫琪, 齐翔, 陈龙, 等. 基于无迹卡尔曼滤波与遗传算法相结合的车辆状态估计[J]. *汽车工程*, 2019, 41(2): 198-205. ZHOU W Q, QI X, CHEN L, et al. Vehicle state estimation based on the combination of unscented Kalman filtering and genetic algorithm [J]. *Automotive Engineering*, 2019, 41 (2): 198-205.
- [4] 高振海, 温文昊, 唐明弘, 等. 基于混合神经网络的汽车运动状态估计[J]. *汽车工程*, 2022, 44(10): 1527-1536. GAO Z H, WEN W H, TANG M H, et al. Estimation of vehicle motion state based on hybrid neural network[J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(10): 1527-1536.
- [5] XIA X, HANG P, XU N, et al. Advancing estimation accuracy of sideslip angle by fusing vehicle kinematics and dynamics information with fuzzy logic[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(7): 6577-6590.
- [6] SELMANAJ D, CORNO M, PANZANI G, et al. Vehicle sideslip estimation: a kinematic based approach[J]. *Control Engineering Practice*, 2017, 67: 1-12.
- [7] BASCETTA L, BAUR M, FERRETTI G. A simple and reliable technique to design kinematic-based sideslip estimators[J]. *Control Engineering Practice*, 2020, 96: 104317.
- [8] BEVLY D M. Global positioning system (GPS): a low-cost velocity sensor for correcting inertial sensor errors on ground vehicles [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2004, 126(2): 255-264.
- [9] REGOLIN E, ALATORRE A, ZAMBELLI M, et al. A sliding-mode virtual sensor for wheel forces estimation with accuracy enhancement via EKF[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4): 3457-3471.

- [10] NGUYEN A, GUERRA T, SENTOUH C, et al. Unknown input observers for simultaneous estimation of vehicle dynamics and driver torque: theoretical design and hardware experiments [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(6): 2508–2518.
- [11] DOUMIATI M, VICTORINO A C, CHARARA A, et al. Onboard real-time estimation of vehicle lateral tire-road forces and sideslip angle [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(4): 601–614.
- [12] LI X, XU N, LI Q, et al. A fusion methodology for sideslip angle estimation on the basis of kinematics-based and model-based approaches [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2019, 234(7): 1930–1943.
- [13] LIAO Y, BORRELLI F. An adaptive approach to real-time estimation of vehicle sideslip, road bank angles, and sensor bias [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 7443–7454.
- [14] CHENG S, LI L, CHEN J. Fusion algorithm design based on adaptive SCKF and integral correction for side-slip angle observation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(7): 5754–5763.
- [15] JIANG G, LIU L, GUO C, et al. A novel fusion algorithm for estimation of the side-slip angle and the roll angle of a vehicle with optimized key parameters [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2016, 231(2): 161–174.
- [16] CHELI F, SABBIONI E, PESCE M, et al. A methodology for vehicle sideslip angle identification: comparison with experimental data [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2007, 45(6): 549–563.
- [17] VILLANO E, LENZO B, SAKHNEVYCH A. Cross-combined UKF for vehicle sideslip angle estimation with a modified dugoff tire model: design and experimental results [J]. *Meccanica*, 2021, 56(11): 2653–2668.
- [18] PIYABONGKARN D N, RAJAMANI R, GROGG J A, et al. Development and experimental evaluation of a slip angle estimator for vehicle stability control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(1): 78–88.
- [19] HONG S, LEE C, BORRELLI F, et al. A novel approach for vehicle inertial parameter identification using a dual Kalman filter [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(1): 151–161.
- [20] SONG R, FANG Y. Vehicle state estimation for INS/GPS aided by sensors fusion and SCKF-based algorithm [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 150: 107315.
- [21] LIU W, XIA X, XIONG L, et al. Automated vehicle sideslip angle estimation considering signal measurement characteristic [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(19): 21675–21687.
- [22] JOHNSON J, JOHNSON D, BOUDRA P, et al. Filters using Bessel-type polynomials [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1976, 23(2): 96–99.
- [23] FANG H, HAILE M A, WANG Y. Robust extended Kalman filtering for systems with measurement outliers [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2022, 30(2): 795–802.
- [24] CHEN J, HU S, YE Y, et al. A cascaded scheme for high-performance estimation of vehicle states [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2021, 235(8): 2101–2113.
- [25] BERNTORP K, CAIRANO S D. Tire-stiffness and vehicle-state estimation based on noise-adaptive particle filtering [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(3): 1100–1114.

(上接第309页)

- [20] YILDIZ H, CENK M, ONUR E. PLGAKD: a PUF-based lightweight group authentication and key distribution protocol [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 8(7): 5682–5696.
- [21] SHAWKY M A, JABBAR A, USMAN M, et al. Efficient blockchain-based group key distribution for secure authentication in VANETs [J]. *IEEE Networking Letters*, 2023, 74.
- [22] KAMIL I A, OGUNDOYIN S O. A lightweight certificateless authentication scheme and group key agreement with dynamic updating mechanism for LTE-V-based internet of vehicles in smart cities [J]. *Journal of Information Security and Applications*, 2021, 63: 102994.
- [23] CREMERS C. Scyther: semantics and verification of security protocols [J]. *Technische Universittndhoven*, 2006.
- [24] 薛庆水, 卢子譔, 杨谨瑜. 基于Shamir的动态强前向安全签名方案 [J]. *计算机应用研究*, 2023, 40(5): 1522–1527, 1534.
XUE Q S, LU Z X, YANG J Y. Dynamic strong forward secure signature scheme based on shamir [J]. *Application Research of Computers*, 2023, 40(5): 1522–1527, 1534.
- [25] 向新银. 格上基于身份的前向安全签名方案 [J]. *计算机工程*, 2015, 41(9): 155–158.
XIANG X Y. Identity-based forward secure signature scheme from lattices [J]. *Computer Engineering*, 2015, 41(9): 155–158.