•汽车被动安全技术专题•

基于两自由度一阶模型的小偏置碰撞工况整车侧滑分段规划及应用

郭观勇　梅超圣　曾董　蔡娅妮　牛洋洋　徐利国

（比亚迪汽车工业有限公司，深圳 518100）

【摘要】为解决车辆小偏置碰撞工况侧滑运动问题，建立了整车两自由度一阶运动模型，据此提出整车分段侧滑运动规划方法，并开发了小偏置碰撞工况整车侧滑运动规划软件。试验结果表明，所提出的规划方法使车辆侧滑量增大了30%，成功实现侧滑，车辆结构评级由良好（A）提升至优秀（G），提升了小偏置碰撞结构安全性能。

关键词：小偏置碰撞　侧滑策略　结构安全　分段规划方法

中图分类号：U467.1；U461.91　　**文献标志码：**A　　**DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20250119

Segmented Motion Planning and Its Application Based on Two-Degree-of-Freedom First-Order Model in The Small Overlap Frontal Crash

Guo Guanyong, Mei Chaosheng, Zeng Dong, Cai Yani, Niu Yangyang, Xu Liguo

(BYD Auto Industry Company Limited, Shenzhen 518100)

【**Abstract**】The paper focuses on the sideslip problem in the small overlap crash test in the vehicle structural safety field. A two-degree-of-freedom first-order dynamic model of the vehicle is established, based on which a segmented sideslip motion planning method is proposed, and a vehicle sideslip motion planning software for small-overlap crash conditions is developed. The experimental results show that the proposed planning method enhances the vehicle's lateral displacement by 30%, thereby facilitating successful sideslip. This elevates the vehicle structural rating from Acceptable (A) to Good (G) and significantly improves the safety performance in the small-overlap ceashes.

Key words: Small overlap crash, Sideslip strategy, Structural safety, Segmented planning method

【引用格式】郭观勇, 梅超圣, 曾董, 等. 基于两自由度一阶模型的小偏置碰撞工况整车侧滑分段规划及应用[J]. 汽车工程师, 2026(7): 16-22+28.

GUO G Y, MEI C S, ZENG D, et al. Segmented Motion Planning and Its Application Based on Two-Degree-of-Freedom First-Order Model in The Small Overlap Frontal Crash[J]. Automotive Engineer, 2026(7): 16-22+28.

1　前言

正面碰撞是最常见且伤亡率最高的交通事故形式。在25%重叠率偏置碰撞（小偏置碰撞）[1]中，纵梁不参与吸能，吸能构件少，开发难度大。

20世纪末，Hobbs等[2-5]基于事故调查，指出了小偏置碰撞的高发性和危害性。随后，美国国家公路交通安全管理局（National Highway Traffic Safety Administration，NHTSA）和美国公路安全保险协会（Insurance Institute for Highway Safety，IIHS）分别开发了小偏置碰撞工况车辆安全性能测评规程[6]。21世纪初，业界和学界针对小偏置碰撞安全问题展开了系列研究，形成了硬抗[6]和侧滑[1,7-8]2种策略构成的小偏置碰撞车辆结构安全设计框架体系。硬抗策略采用笼式车身（Safety Cage）为乘员提供保护。侧滑策略采用侧向导向结构引导车辆侧向滑移运动，避免壁障冲击A柱。随后，小偏置碰撞相关研究主要关注硬抗或侧滑策略下车辆结构的优化设计，

包括前舱吸能结构、底盘结构以及乘员舱结构。前舱吸能结构相关研究围绕防撞梁总成[8-9]、纵梁[10]、象鼻梁[11-12]、上边梁[13]等吸能构件的耐撞性优化展开；底盘结构方面重点关注悬架[14-15]、车轮[16-19]、副车架[19]、悬置[20]等结构；乘员舱相关研究主要进行A柱[11,21-26]、前围板[27]、门槛[28-31]、铰链[32]等的材料、结构优化。

与传统燃油汽车相比，新能源汽车整备质量通常更大，高压系统存在热失控风险，且铝合金、碳纤维等轻量化材料的应用比例较高，失效和连接性能难以控制，故新能源汽车小偏置碰撞工况安全性能开发难度大、周期长、成本高。

为此，本文针对车辆小偏置碰撞侧滑设计策略，建立小偏置碰撞车辆侧滑运动力学模型，提出侧滑运动规划方法，以期为车辆小偏置碰撞结构安全性能正向开发提供参考。

2 小偏置碰撞工况车辆两自由度一阶运动模型

2.1 运动模型

车辆两自由度一阶运动模型如图1所示，壁障对车辆产生X向作用力F_x和Y向作用力F_y，车辆在X方向和Y方向产生的加速度分别为a_x、a_y，速度分别为v_x、v_y，位移分别为d_x、d_y。

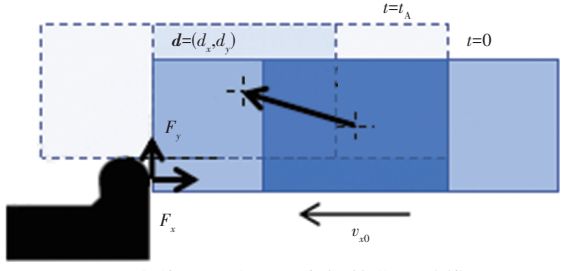


图1 小偏置碰撞工况车辆简化运动模型

车辆的动力学平衡方程为：

$$\begin{cases} Ma_x = F_x \\ Ma_y = F_y \end{cases} \tag{1}$$

式中：M为试验车辆质量。

车辆运动学方程为：

$$\begin{cases} v_x = v_{x0} + \int_t a_x \mathrm{d}t \\ v_y = v_{y0} + \int_t a_y \mathrm{d}t \\ d_x = \int_t v_x \mathrm{d}t \\ d_y = \int_t v_y \mathrm{d}t \end{cases} \tag{2}$$

式中：v_{x0}、v_{y0}分别为车辆X向和Y向的初始速度，根据《中国保险汽车安全指数管理办法》，取v_{x0}=64.4 km/h、v_{y0}=0。

2.2 灵敏度分析

侧滑量对加速度的灵敏度用于表征侧滑量d_y对各点处加速度的敏感性，敏感性越强，提高加速度对侧滑量的提升效果越明显。

侧滑量可表示为加速度和时间的泛函，即$d_y(t,a_x,a_y)$，则在t时刻，d_y对a_x、a_y的灵敏度可表示为：

$$\begin{cases} \delta_x\left(t,a_x,a_y\right) = \lim\limits_{\Delta a_x \to \infty} \dfrac{d_y\left(t,a_x+\Delta a_x,a_y\right) - d_y\left(t,a_x,a_y\right)}{d_y\left(t,a_x,a_y\right)\cdot \Delta a_x} \\ \delta_y\left(t,a_x,a_y\right) = \lim\limits_{\Delta a_y \to \infty} \dfrac{d_y\left(t,a_x,a_y+\Delta a_y\right) - d_y\left(t,a_x,a_y\right)}{d_y\left(t,a_x,a_y\right)\cdot \Delta a_y} \end{cases} \tag{3}$$

式中：Δa_x、Δa_y分别为X方向、Y方向上任意小的变化量。

式(3)亦可表示为：

$$\begin{cases} \delta_x\left(t,a_x,a_y\right) = \dfrac{\partial d_y}{d_y \partial a_x} \\ \delta_y\left(t,a_x,a_y\right) = \dfrac{\partial d_y}{d_y \partial a_y} \end{cases} \tag{4}$$

2.3 分段运动模型

工程应用中，通常将车辆的碰撞运动在X方向上简化为N段匀加速运动，第i段匀加速运动在X方向上的距离为d_{xi}，第i段匀加速运动的加速度可表示为：

$$\begin{cases} a_{xi} = \bar{a}_{xi},\ d_x \in [0, \sum\limits_{j=1}^{i} d_{xj}) \\ a_{yi} = \bar{a}_{yi},\ d_x \in [0, \sum\limits_{j=1}^{i} d_{xj}) \end{cases} \tag{5}$$

式中：$\bar{a}_{xi}$、$\bar{a}_{yi}$分别为第i段匀加速运动在X方向、Y方向的加速度，t_i为第i段匀加速运动时间。

第i段匀加速运动的X方向位移可表示为：

$$D_{xi} = v_{x0}t_i + \sum_{j=1}^{i-1} \bar{a}_{xj}t_j t_i + \frac{1}{2}\bar{a}_{xi}t_i^2 \tag{6}$$

由式(2)可知，第i段匀加速运动的Y方向运动方程可表示为：

$$D_y = \sum_{i=1}^{N}\left(\sum_{j=0}^{i-1} \bar{a}_{yj}t_j t_i\right) + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\left(\bar{a}_{yi}t_i^2\right) \tag{7}$$

2.4 分段运动灵敏度分析

由式(4)可知，分段运动总侧滑量d_y对$\bar{a}_{xi}$与$\bar{a}_{yi}$

的灵敏度分别为：

$$\delta_{xi}=\frac{\partial d_y}{d_y\partial \bar{a}_{xi}} \tag{8}$$

$$\delta_{yi}=\frac{\partial d_y}{d_y\partial \bar{a}_{yi}} \tag{9}$$

由式(7)、式(9)可推导出d_y对$\bar{a}_{yi}$的灵敏度为：

$$\begin{aligned}\delta_{yi}&=\frac{\partial\left(\sum_{n=1}^{N}\left(\sum_{m=0}^{n-1}\bar{a}_{ym}t_m t_n\right)+\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{N}\left(\bar{a}_{yn}t_n^2\right)\right)}{d_y\partial\bar{a}_{yi}}\\&=\frac{1}{d_y}\left(t_i\sum_{n=i+1}^{N}\left(t_n\right)+\frac{1}{2}t_i^2\right)\end{aligned} \tag{10}$$

$\bar{a}_{xi}$的变化会导致各段运动时间发生变化，因此，d_y对$\bar{a}_{xi}$的灵敏度相对更为复杂，不便推导显式表达式，可根据式(8)采用数值(差分代替微分)方法计算。

式(10)表明，对于给定的d_y，前段的Y向加速度的提高对侧滑量的提升作用较后段更大。

3 侧滑运动分段规划方法

本节基于前文理论模型，针对小偏置碰撞工况侧滑运动问题建立整车加速度分段规划方法，如图2所示。对于N段匀加速碰撞过程，分段规划需依次进行1段(整体)、2段、3段……N段规划。分段规划的输入值为总侧滑量D_y、各段X方向的位移量D_{xi}，输出各段X方向、Y方向的平均加速度。

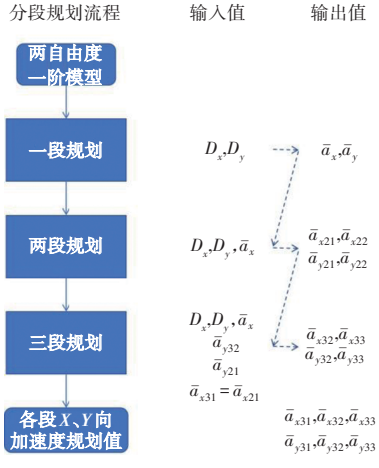


图2 分段规划方法流程

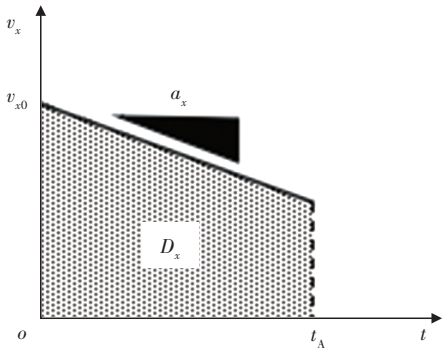
3.1 整体运动规划

对于第1段规划(整体运动规划)，根据前文建立的理论模型，在满足X向位移为D_x、Y向位移(侧滑量)不小于D_y的条件下，计算X方向和Y方向加速度的可行域，规划值可取可行域内任意一点。规划的目的是确定车辆X方向和Y方向整体平均加速度$\bar{a}_x$和$\bar{a}_y$。

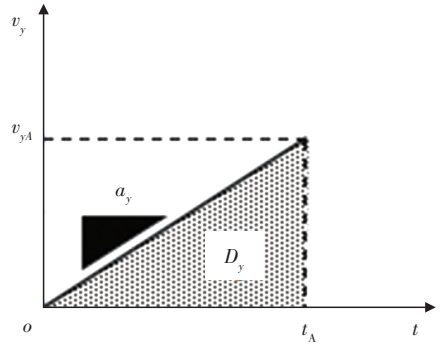
整体运动规划在X方向和Y方向上等效为匀加速运动，即

$$a_x\equiv-\bar{a}_x,\ a_y\equiv\bar{a}_y \tag{11}$$

其中，$\bar{a}_x$、$\bar{a}_y$为常数，如图3所示，图中t_A为车辆A柱在X方向上运动至壁障处的时间，即侧滑时长。



(a)X向速度-时间曲线



(b)Y向速度-时间曲线

图3 整体规划中车辆速度曲线

假设A柱外侧至车辆前端壁障接触点在X方向和Y方向上的距离分别为D_x和D_y，则整个侧滑过程中车辆在X方向上的位移d_x=D_x，若要实现完全侧滑，则Y向位移应满足：

$$d_y\geqslant D_y \tag{12}$$

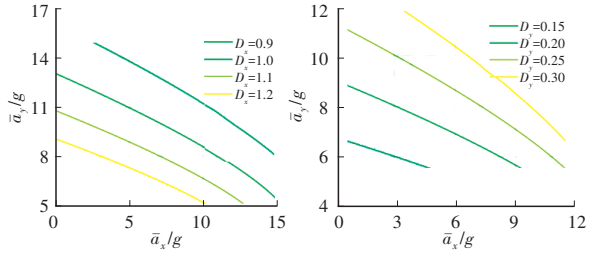
根据式(2)、式(11)和式(12)可知，整体运动规划中，$\bar{a}_x$和$\bar{a}_y$的可行域为：

$$\left(\frac{\bar{a}_y D_x-\bar{a}_x D_y}{v_{x0}}\right)^2-2D_y\bar{a}_y\geqslant 0 \tag{13}$$

式(13)取等号时即为可行域的边界。

根据式(13)可知，整体运动规划中可行域边界取决于D_x和D_y，D_x、D_y不同，可行域及其边界也不同，如图4所示。当D_x增大时，碰撞时间、侧滑时间延长，$\bar{a}_x$或$\bar{a}_y$可对应减小；当D_y增大时，侧滑量目标值

增大，需增大Y向加速度$\bar{a}_y$或延长侧滑时间（增大X向加速度$\bar{a}_x$）。



（a）D_x的影响（D_y=0.2 m）　　（b）D_y的影响（D_x=1.2 m）

图4　整体运动规划加速度可行域

整体运动规划根据D_x和D_y获得可行域边界，然后在可行域内根据实际需求选择$\bar{a}_x$和$\bar{a}_y$。

3.2　分段运动规划

规划后可依次进行二段、三段及多段规划，如图5、图6所示。对于第(i+1)段规划，保持前(i−1)段的X方向和Y方向加速度、速度、位移、运动时间均与第i段规划的前(i−1)段相同，而将第i段规划的第i段拆分成2段，输入2段在X方向上的位移量，在保证侧滑时间足够的前提下，计算X方向加速度的可行域，规划值在可行域内取值，之后可计算满足侧滑量要求的Y方向加速度可行域，规划值在可行域内取值。

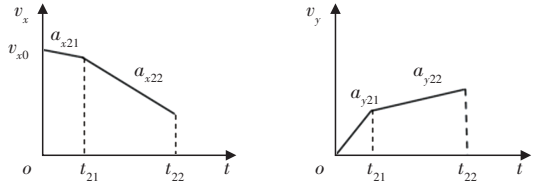


图5　两段规划加速度曲线

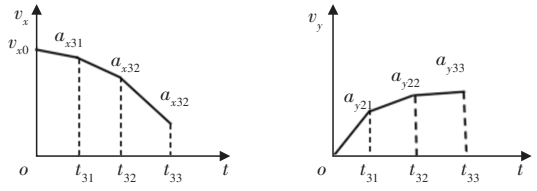


图6　三段规划加速度曲线

对于i(i≥2)段规划，第j段X方向、Y方向平均加速度分别记为a_{xij}和a_{yij}，X向位移记为D_{xij}，则i段规划与(i+1)段规划满足：

$$\begin{cases} D_{x(i+1)j}=D_{xij}, j\leqslant i-1 \\ D_{x(i+1)j}+D_{x(i+1)(j+1)}=D_{xij}, j=i \end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases} a_{x(i+1)j}=a_{xij}, j\leqslant i-1 \\ a_{y(i+1)j}=a_{yij}, j\leqslant i-1 \end{cases} \tag{15}$$

根据式(6)、式(14)、式(15)可推导X方向加速度$\bar{a}_{xi(i-1)}$和$\bar{a}_{xii}$的可行域，在可行域内选定规划值后，可根据式(7)、式(15)确定$\bar{a}_{yi(i-1)}$和$\bar{a}_{yii}$的可行域并选取规划值。

据此，对于两段运动规划，X向加速度可行域的边界为：

$$a_{x21}\left(t_{\mathrm{A}}^2-\left(t_{\mathrm{A}}-t_{21}\right)^2\right)+a_{x22}\left(t_{\mathrm{A}}-t_{21}\right)^2=2\left(D_x-v_{x0}t_{\mathrm{A}}\right) \tag{16}$$

其中，t_{A}可在整体运动规划中计算获得，两段运动中第1段运动的时间为：

$$t_{21}=\frac{-v_{x0}+\sqrt{\left(v_{x0}\right)^2+2a_{x21}D_{x1}}}{a_{x21}} \tag{17}$$

两段规划的Y向加速度可行域边界可表示为：

$$a_{y21}\left(\frac{1}{2}t_{21}^2+t_1\left(t_{\mathrm{A}}-t_{21}\right)\right)+\frac{1}{2}a_{y22}\left(t_{\mathrm{A}}-t_{21}\right)^2=D_y \tag{18}$$

其中，t_{21}需先经过X方向规划获得。

类似地，可进行三段运动规划以及多段运动规划。规划完成后可获得X方向和Y方向的加速度−位移曲线，如图7所示。由图10可知，车辆在X方向上的壁障接触点与A柱的X方向距离为1.2 m，即小偏置碰撞过程中X向位移为1.2 m，碰撞过程被等分为3个阶段，每阶段0.4 m，3个阶段X方向、Y方向上的平均加速度如图7所示。

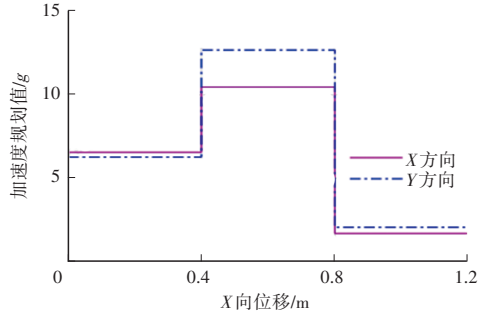


图7　分段运动规划结果

根据本文的分段运动规划方法，开发了相应软件，界面如8所示。软件操作依次进行整体规划、二段规划和三段规划。

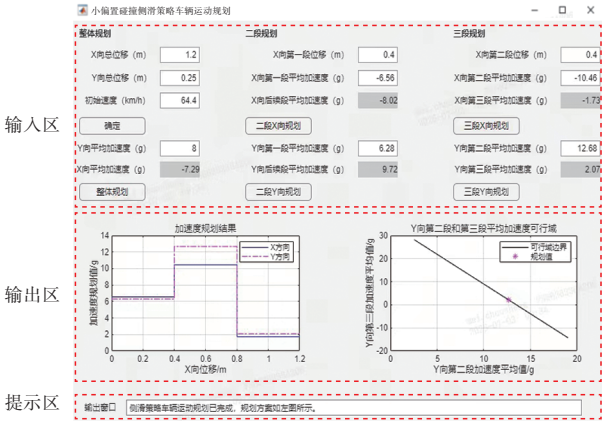


图8　侧滑运动规划软件界面

4 应用实例分析

本节将分段规划方法应用于某车型项目小偏置碰撞试验结果分析与优化，以量化评估优化方案的需求和预期效果。该项目小偏置碰撞结构设计策略为侧滑策略，驾驶员侧小偏置碰撞试验实现了侧滑，而乘员侧小偏置碰撞试验未实现侧滑，现需对乘员侧结构和试验结果进行分析和优化。

该车型小偏置碰撞相关结构在X方向可分4个阶段，第0阶段对应行人保护结构件，刚度较小，小偏置碰撞工况可忽略；第1阶段对应防撞梁总成，能提供一定的X方向和Y方向刚度；第3阶段对应象鼻梁，能提供较大的X方向和Y方向刚度；第4阶段对应车轮系统（接触A柱后）、上边梁和座塔，能提供较大的X方向刚度，而Y方向刚度与车轮姿态有关。

乘员侧小偏置碰撞试验中，上仪表板和A柱下铰链侵入量超标，侧滑量约0.14 m，对于该车型，侧滑量需达到0.18 m才能实现侧滑。基于分段规划方法，若前2个阶段X、Y方向加速度不变，欲使侧滑量达0.18 m，第3阶段Y向加速度为2.5 g，如表1所示。对比两侧速度曲线，如图9所示，在第3阶段，左侧车轮脱落，Y方向加速度约为2 g；右侧车轮运动模式异常，车轮卡在壁障与门环系统之间，阻碍侧滑运动，Y方向加速度约为−2 g。若使右侧车轮脱落，预期Y方向加速度提升至2 g，基本可达成规划目标。

表1 某车型侧滑策略优化方案分段运动规划结果

试验与参数		第1阶段	第2阶段	第3阶段
原方案	X向加速度/g	10.0	−0.2	22.5
	Y向加速度/g	2.0	12.0	−2.2
	侧滑量/m	0.14		
优化方案	X向加速度/g	10.0	−0.2	16.5
	Y向加速度/g	2.0	12.0	2.5
	侧滑量/m	0.18		

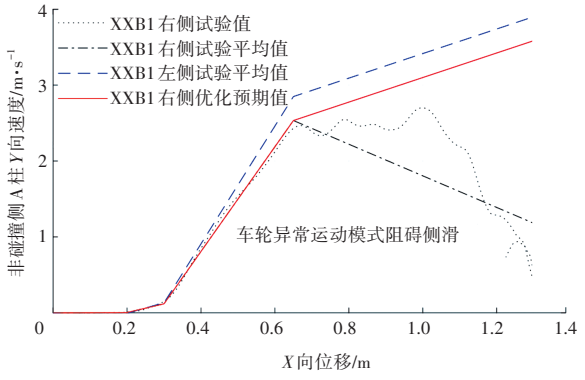


图9 某车型小置偏撞碰速度曲线

车轮运动姿态主要由摆臂失效模式决定，可通过调整摆臂失效模式进行控制。该项目同平台车型小偏置碰撞试验摆臂失效时间如图10所示，该平台车型摆臂存在预期和异常2种失效模式。预期模式下，下前摆臂较下后摆臂提前失效，车轮在壁障推动下绕下后摆臂球铰向外翻转脱落。异常模式下，下后摆臂过早断裂，车轮绕下前摆臂球铰向内转动，卡在壁障与门框系统之间，阻碍侧滑运动。乘员侧小偏置碰撞试验摆臂失效模式异常。

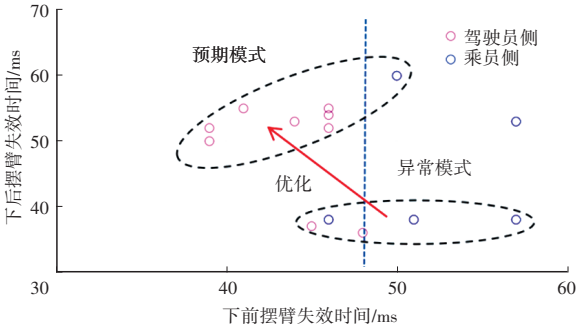


图10 车轮摆臂失效模式分析

优化方案为将当前摆臂失效模式调整至预期。优化策略是将下前摆臂失效时间提前，同时将下后摆臂失效时间延后。具体而言，如图11所示，使下前摆臂失效点弱化，即转向节上摆臂球销安装孔壁厚减小3 mm，强化下后摆臂失效点，即球销直径增加1 mm。

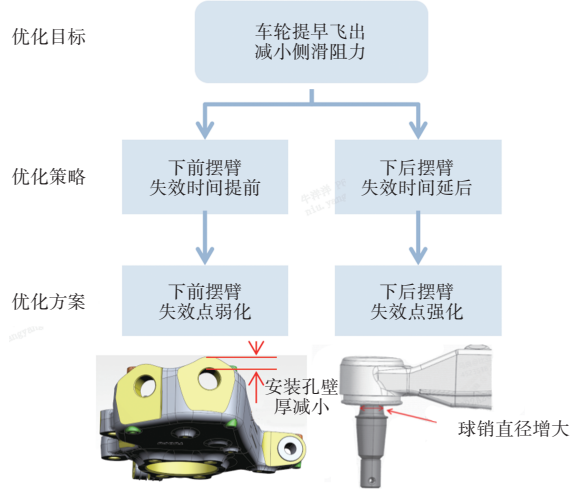


图11 车轮运动姿态优化方案

优化后，侧滑量提升约30%，达到0.18 m，实现侧滑，结构评级优秀，结果如图12、图13所示。第3阶段Y方向加速度由−2.2 g提升至5.6 g，但X方向加速度从22.5 g下降至9.5 g，侧滑时间缩短约7 ms。车轮脱落时间早于预期，对侧滑的阻碍作用更小，同时X方向减速效果减弱。

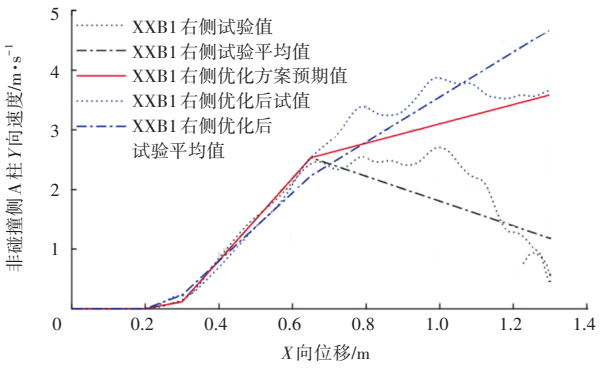
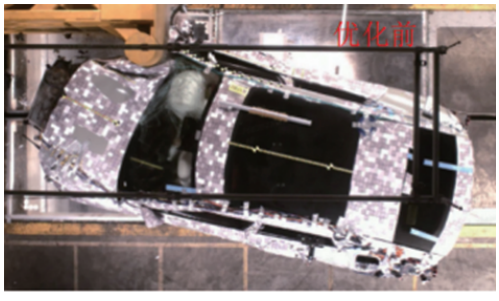
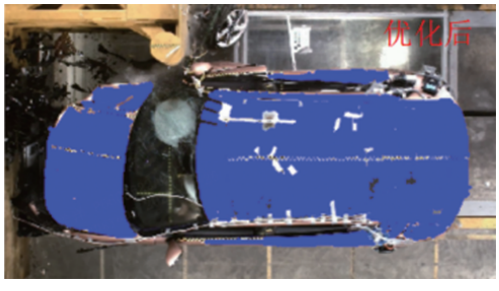


图12　优化后小偏置碰撞试验结果



(a)优化前



(b)优化后

图13　优化前、后小偏置碰撞试验结果

5　结束语

本文对小偏置碰撞工况车辆侧滑运动问题进行了系统研究，针对小偏置碰撞工况整车侧滑运动力学行为，建立了其两自由度一阶运动模型，并提出了侧滑策略分段运动规划方法，开发了车辆分段侧滑运动规划软件。试验分析结果表明，所提出的分段规划方法使车辆侧滑量提升30%，成功实现侧滑，结构评级从良好(A)提升至优秀(G)。

参　考　文　献

[1] BRACH R M, BRACH R M, PONGETTI K. Analysis of High-Speed Sideswipe Collisions Using Data from Small Overlap Tests[J]. SAE International Journal of Transportation Safety, 2014, 2(1): 86-99.

[2] HOBBS C A. The Beed for Improved Structural Integrity in Frontal Car Impacts[C]// International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles. Paris, France: NATO's Committee on the Challenges of Modern Society, 1991.

[3] SCHEUNERT D, JUSTEN R, HERRMANN R, et al. What is a Realistic Frontal-Offset Test Procedure?[J]. Accident Analysis and Prevention, 1994, 26(3): 347-360.

[4] LINDQUIST M, HALL A, BJORNSTIG U. Car Structural Characteristics of Fatal Frontal Crashes in Sweden[J]. International Journal of Crashworthiness, 2004, 9(6): 587-597.

[5] ONEILL B, LUND A K, ZUBY, D S, et al. Offset Frontal Impacts: A Comparison of Real-World Crashes with Laboratory Tests[C]// 14th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Munich, Germany: National Highway Traffic Safety Administration, 1994.

[6] TRID. Small Overlap Front Test Challenges Small Car Restraints and Structure[J]. Status Report, 2013, 48(6).

[7] 肖锋，陈晓锋．IIHS小偏置碰撞位移导向策略与结构评估方法[J]. 汽车安全与节能学报，2013, 4(4): 322-333.
XIAO F, CHEN X F. One Displacement Oriented Strategy and a Structural Assessment Method for IIHS New Small Overlap Crash Tests[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2013, 4(4): 322-333.

[8] BRACH R M, BRACH R M, PONGETTI K. Analysis of High-Speed Sideswipe Collisions Using Data from Small Overlap Tests[J]. SAE International Journal of Transportation Safety, 2014, 2(1): 86-99.

[9] 李世岳，胡洪林，陈哲伦．薄壁结构在汽车吸能盒中的应用与展望[J]. 汽车文摘，2024(2): 42-49.
LI S Y, HU H L, CHEN Z L. Application and Prospect of Thin-Walled Structure in Vehicle Energy Absorbing Box [J]. Automotive Digest, 2024(2): 42-49.

[10] 李冠君．基于正面25%偏置碰撞的某SUV车身前端结构研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2023.
LI G J. Research on the Front Structure of an SUV Based on Frontal 25% Offset Collision[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.

[11] MUELLER B C, BRETHWAITE A S, ZUBY D S, et al. Structural Design Strategies for Improved Small Overlap Crashworthiness Performance[J]. Stapp Car Crash Journal, 2014, 58: 145-173.

[12] 崔营营，衣本钢，田洪生，等．基于25%小偏置碰撞的车身结构研究[J]. 汽车技术，2021(9): 38-43.
CUI Y Y, YI B G, TIAN H S, et al. A Study of Body Structure Based on 25% Small Offset Collision[J]. Automotive Technology, 2021(9): 38-43.

[13] 张君媛，纪梦雪，王楠，等．汽车正面25%重叠率碰撞车

身前端结构设计[J]. 吉林大学学报（工学版）, 2018, 48(1): 57-64.
ZHANG J Y, JI M X, WANG N, et al. Design of Automotive Body Frontal Structure for 25% Overlap Frontal Collision [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1): 57-64.

[14] 邵金华, 赵美洲, 陈鹏, 等. 球铰强度对小偏置碰撞的影响及仿真精度提升[J]. 汽车技术, 2025(8): 34-40.
SHAO J H, ZHAO M Z, CHEN P, et al. The Influence of Ball Hinge Strength on Small Offset Collisionand the Improvement of Simulation Accuracy[J]. Automotive Technology, 2025(8): 34-40.

[15] 王聪, 杨志刚, 陈伟, 等. 配置多种形式前悬架车型的小偏置碰撞性能开发策略研究[J]. 汽车工程师, 2025(3): 35-41.
WANG C, YANG Z G, CHEN W, et al. Small Offset of Rigid Barrier Crash Strategy Study Based on Diversified Front Suspension of Architecture[J]. Automotive Engineer, 2025(3): 35-41.

[16] CLAUDIA D L T, RAVI T, MICHAEL G, et al. Component Test Fixture to Improve SOI Results[C]// WCX™ 17: SAE World Congress Experience. Detroit, MI, USA: Tech Briefs Media Group, 2017.

[17] ZHANG S A, ZHOU Q, XIA Y. Influence of Wheels on Frontal Crash Response of Small Lightweight Electric Vehicle[C]// ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Houston, Texas, USA: ASME, 2015.

[18] 谭冬冬, 李成, 陈虹吉, 等. 轮辋强度对小偏置碰撞试验影响研究[C]// 2023中国汽车工程学会年会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2023: 386-391.
TAN D D, LI C, CHEN H J, et al. Study on the Effect of the Strength of Rim on the Small Overlap Barrier Crash Test [C]// Proceedings of the 2023 Annual Conference of China Society of Automotive Engineers. Beijing: China Machine Press, 2023: 386-391.

[19] 朱轶平, 束振伟. 框型副车架针对小偏置碰撞性能的设计优化[J]. 上海汽车, 2022(1): 55-62.
ZHU Y P, SHU Z W. Optimization of Side-Impact Performance of Frame-Type Sub-Frame for Small Offset Collision[J]. Shanghai Auto, 2022(1): 55-62.

[20] 胡远志, 梁锐, 刘西, 等. 某轿车小偏置碰撞结构耐撞性优化[J]. 重庆理工大学学报（自然科学）, 2018, 32(2): 1-9.
HU Y Z, LIANG R, LIU X, et al. Body Optimization of a Sedan in Small Overlap Impact[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2018(2): 1-9.

[21] BAVNEET S B. An Alternative Concept for Maintaining Occupant Compartment Integrity During Narrow Overlap Vehicle Crashes[C]// ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Houston, Texas, USA: ASME, 2015.

[22] WANG B H, FAN T Q, WANG F, et al. The Exploring Research of A-Pillar Strengthen Tube Based on the Vehicle's Small Overlap Crashworthiness[C]// The 2nd International Conference on Advanced High Strength Steel and Press Hardening. Changsha, China: World Scientific Publishing Co., Pte. Ltd., 2016.

[23] 李超, 万龙, 张东升, 等. 基于25%偏置碰撞工况下2 000 MPa级热气胀成形A柱的轻量化研究[J]. 汽车工艺与材料, 2023(3): 9-13.
LI C, WAN L, ZHANG D S, et al. Research on Lightweight Design of 2 000 MPa Grade A-Pillar Formed by Thermal Expansion in 25% Offset Collision Condition[J]. Automobile Technology & Material, 2023(3): 9-13.

[24] 蔺昭辉, 柯留洋, 范清林, 等. 基于平台化车身的正面25%偏置碰撞和侧面碰撞性能设计[C]// 2023中国汽车工程学会年会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2023: 210-215.
LIN ZH, KE L Y, FAN Q L, et al. Design of 25% Frontal Offset Collision and Side Impact Performance Based on Platform Body[C]// Proceedings of the 2023 Annual Conference of China Society of Automotive Engineers. Beijing: China Machine Press, 2023: 210-215.

[25] 孙倬, 宋博. 面向轻量化的某车型正面碰撞安全性研究[J]. 汽车工程师, 2023(6): 45-48.
SUN Z, SONG B. Research on Frontal Collision Safety of New Models for Lightweight[J]. Automotive Engineer, 2023(6): 45-48.

[26] 刘多加, 钱梅林, 陈海琴, 等. 提高车辆小偏置碰撞安全性的A柱结构研究[J]. 汽车工艺与材料, 2024(8): 1-6.
LIU J D, QIAN M L, CHEN H Q, et al. Research on the A-Pillar Structure to Improve the Safety of Automobile Small Offset Collision[J]. Automotive Technology & Material, 2024(8): 1-6.

[27] 吴松. 某车型正面25%重叠碰撞安全性仿真及优化研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
WU S. Summary of 25% Overlapping Collision Safety Simulation and Optimization Study on the Front of a Model [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.

[28] 刘家员, 彭竑维, 辜冠荣. 基于机器学习的汽车门槛梁碰撞仿真优化[J]. 汽车工程师, 2025(6): 41-48.

（下转第28页）

c-ncap.org.cn/cncap-guicheng-detail?id=8.
China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd. (CATARC). C-NCAP Management Regulation (2024 Edition) [S]. (2023-09-28) [2026-01-15]. https://www.c-ncap.org.cn/cncap-guicheng-detail?id=8.

[3] 中保研汽车技术研究试验中心（北京）有限公司. 中国保险汽车安全指数管理办法（2023版2024年修订）: CIASI-GM. MM. RL-C1[S]. (2025-02-28) [2026-01-15]. https://www.ciasi.org.cn/download/list-540.html.
China Insurance Automotive Technology Research and Testing Center (Beijing) Co., Ltd.. China Insurance Automotive Safety Index Management Regulation (2023 Edition Revised in 2024): CIASI-GM.MM.RL-C1[S]. (2025-02-28) [2026-01-15]. https://www.ciasi.org.cn/download/list-540.html.

[4] 李学言, 祁志楠, 崔东, 等. 整车侧碰壁障性能分析与结构耐撞性设计[J]. 汽车实用技术, 2024, 49(11): 86-91.
LI X Y, QI Z N, CUI D, et al. Performance Analysis and Structural Crashworthiness Design of Vehicle Side Barrier[J]. Automobile Applied Technology, 2024, 49(11): 86-91.

[5] 李卓, 陈涛, 王国强, 等. 微型客车与SUV之间的侧面碰撞兼容性[J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(4): 333-340.
LI Z, CHEN T, WANG G Q, et al. Side Impact Compatibility between Minivan and SUV[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2015, 6(4): 333-340.

[6] MALEN D E. Fundamentals of Automobile Body Structure Design[M]. Warrendale: SAE International, 2020.

[7] DU BOIS P, CHOU C C, FILETA B B, et al. Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection[M]. Southfield, Michigan, USA: Automotive Applications Committee, American Iron and Steel Institute, 2004.

[8] 苏成谦, 吕振华, 张群. 轿车车身结构侧向耐撞性的有限元分析[J]. 汽车工程, 2007, 29(11): 964-969.
SU C Q, LÜ Z H, ZHANG Q. Finite Element Analysis on the Lateral Crashworthiness of Car Body Structure[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(11): 964-969.

（责任编辑　南　杉）

修改稿收到日期为2026年2月7日。

（上接第22页）

LIU J Y, PENG H W, CU G R. Crash Simulation Optimization of Automotive Sill Beams Based on Machine Learning[J]. Automotive Engineer, 2025(6): 41-48.

[29] 李仲奎, 李都, 李炽. 纯电动汽车车身设计关键技术综述[J]. 汽车文摘, 2023(3): 21-27.
LI Z K, LI D, LI Z. A Review on the Key Technologies of Pure Electric Vehicle Body Design[J]. Automotive Digest 2023(3): 21-27.

[30] 高伟钊, 邓清源, 杨军, 等. 基于等效静载荷法的挤压铝门槛梁非线性结构优化[J]. 汽车工艺与材料, 2024(1): 1-6.
GAO W Z, DENG Q Y, YANG J, et al. Nonlinear Optimization Design of Extruded Aluminum Sill Based on ESL Method[J]. Automotive Technology & Material, 2024 (1): 1-6.

[31] 毕思刚, 范凯, 唐明理. 基于MPDB和25%偏置碰的白车身设计研究[J]. 汽车文摘, 2023(4): 47-50.
BI S G, FAN K, TANG M L. Research on BIW Design Based on MPDB and 25% Offset Collision[J]. Automotive Di-gest, 2023(4): 47-50

[32] ELLIOTT E S, ROCHE C, REDDY J, et al. Small Overlap Impact Countermeasure-Front Door Hinge Pillar Dual Box [C]// SAE 2016 World Congress and Exhibition. Detroit, MI, USA: SAE International, 2016.

（责任编辑　弦　歌）

修改稿收到日期为2026年1月6日。