

a-PLI新腿型试验性能影响研究

邹利军 王建勋 刘彦博 沙磊

(一汽奔腾轿车有限公司, 长春 130012)

【欢迎引用】邹利军, 王建勋, 刘彦博, 等. a-PLI新腿型试验性能影响研究[J]. 汽车文摘, 2023(3): 50-55.

【Cite this paper】ZOU L J, WANG J X, LIU Y B, et al. Study on the Test Performance of a-PLI Leg [J]. Automotive Digest (Chinese), 2023(3): 50-55.

【摘要】为研究a-PLI新腿型试验表现和开发应对策略,对比了a-PLI腿型与Flex-PLI腿型实车试验结果差异,并对4款车型的a-PLI腿型试验结果进行研究,发现不同的车头结构对腿部支撑效果存在巨大差异,并对a-PLI腿型各项伤害指标有明显影响。通过分析各区域a-PLI腿型伤害值和相应位置支撑结构参数,确认了影响a-PLI腿型伤害指标的关键因素并总结了不同类型车辆应对a-PLI腿型试验的开发策略。

关键词: 行人保护 a-PLI 汽车造型

中图分类号: U461.91

文献标识码: A

DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20220108

Study on the Test Performance of a-PLI Leg

Zou Lijun, Wang Jianxun, Liu Yanbo, Sha Lei

(Faw Car Co.,Ltd., Changchun 1300120)

【Abstract】To study the performance of a-PLI new leg form test and develop coping strategies, this paper compares the test results of a-PLI and Flex-PLI by analyzing the test results of a-PLI leg tests on 4 different types of vehicles. The results show that great differences between different front structures on leg support performance are existed, which seriously affects the a-PLI leg injury value. Then the key influencing factors of a-PLI leg injury indexes are analyzed, which can guide the development of new vehicle project.

Key words: Pedestrian protection, a-PLI, Car styling

1 引言

2021版C-NCAP管理规程对行人保护评价方法做出重大调整,腿型测试方面以带有上体模块的a-PLI新腿型代替原来的Flex-PLI腿型,上体模块与大腿铰接模拟人体髌骨结构,并增加了脚踝模拟部分。a-PLI新腿型与真实人体更加接近^[1],根据中国汽车行人保护研究工作组开展的试验研究发现,a-PLI新腿型各项伤害值相比Flex-PLI腿型均有较大幅度增加^[2],中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司已经对a-PLI新腿型仿真及试验进行了一系列研究,并针对行人保护腿型开发设计提出了建议。

目前,国内研究仍较少在车辆造型初期对影响a-PLI新腿型的造型因素进行要求,本文对不同造型参数的车型a-PLI新腿型试验结果进行归纳研究,期望提出合理的车头造型约束条件及结构优化方向,减少后期行人保护优化工作并降低设计变更

可能性。

2 a-PLI与Flex-PLI的差异分析

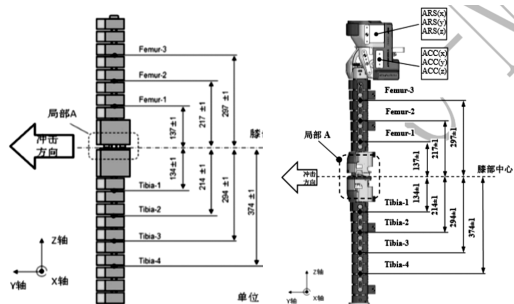
a-PLI腿型与Flex-PLI腿型在结构、尺寸、质量分布、试验表现上均有明显差异。

2.1 a-PLI腿型与Flex-PLI腿型结构、参数差异

图1(a)为Flex-PLI腿型,图1(b)为增加了上体模块的新a-PLI腿型,其上体模块与大腿铰接可以模拟人体髌骨结构。图2展示了2种腿型膝部韧带传感器结构与真实人体膝部的对比。表1中列出了2种腿型各部位质心的高度。结果表明,新a-PLI腿型结构能更真实地模拟人体结构。

2.2 a-PLI腿型与Flex-PLI腿型质量分布差异

图3为新/旧腿型与真实人体质量分布示意。结果表明,a-PLI腿型膝部以上结构质量占比明显高于Flex-PLI腿型,a-PLI腿型质量分布相比Flex-PLI腿型更接近真实人体腿部的质量分布。



(a)Flex-PLI腿型 (b)a-PLI腿型

图1 C-NCAP管理规程中的腿型示意

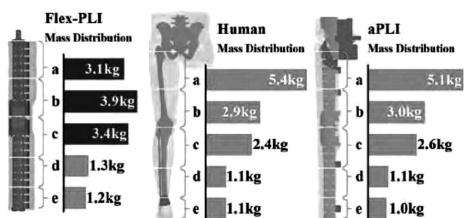


(a)Flex-PLI (b)真实人体 (c)a-PLI

图2 新旧腿型膝部传感器与真实人体膝部韧带示意^[2]

表1 Flex-PLI腿型与a-PLI腿型尺寸参数差异

差异项	Flex-PLI	a-PLI
总长度/mm	928	1 096
下部距地高度/mm	75	25
上体质心距地高度/mm	-	986
大腿质心距地高度/mm	844	900
膝部质心距地高度/mm	572	520
小腿质心距地高度/mm	277	230
弯矩传感器间距/mm	80	80
传感器数量/个	12	14
膝部韧带传感器布置	ACL与PCL交叉	ACL与PCL平行
股骨弯曲刚度		Flex-PLI的1.4倍
膝碰撞接触面外形	平面	弧形
踝关节	无	有



(a)Flex-PLI (b)真实人体 (c)a-PLI

图3 新旧腿型与真实人体质量分布示意^[3]

2.3 Flex-PLI腿型与a-PLI腿型试验结果对比

以中国汽车行人保护研究工作组数据库中一款小型SUV腿型试验为例，L+1位置腿型运动姿态对比见图4(冲击发生后0ms、15ms、30ms、45ms)。

从图4可以发现，a-PLI腿型中部弯曲比Flex-PLI腿型更为明显，且向车头上方滑动量更大。Flex-PLI

腿型与a-PLI腿型试验得分见表2。

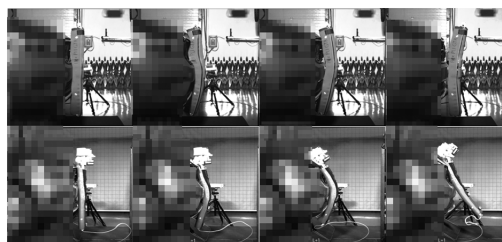


图4 Flex-PLI腿型(上)与a-PLI腿型(下)试验动态对比

表2 Flex-PLI腿型与a-PLI腿型试验得分

腿型	位置	得分/分	得分率/%
Flex-PLI	L+1	1.0	100
	L-3	1.0	
	L+5	1.0	
a-PLI	L+1	0.4	64.9
	L+3	0.675	
	L-5	0.872	

在同一款车型试验中，a-PLI腿型得分率明显低于Flex-PLI腿型，其中a-PLI腿型在L+1位置仅得到0.4分，其中小腿弯矩 T_1 及膝部韧带(Medial Collateral Ligament, MCL)伸长量为主要扣分指标(图5、图6)。

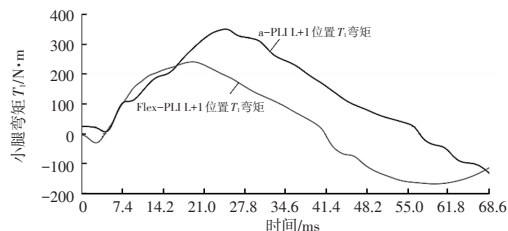


图5 a-PLI与Flex-PLI在L+1位置 T_1 对比

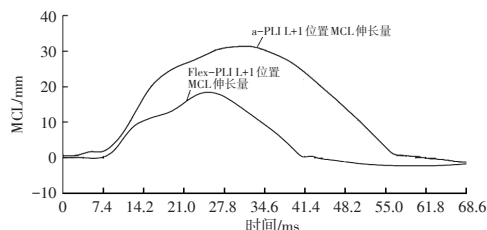


图6 a-PLI与Flex-PLI在L+1位置MCL对比

2.4 新旧腿型差异总结

a-PLI腿型比Flex-PLI腿型小腿质心更低、大腿质心更高，生物学拟真性更好。

由于a-PLI腿型带有上体配重块，碰撞中与车头接触作用时间更长，小腿钻入车头底部趋势明显。a-PLI腿型中部弯曲量比Flex-PLI腿型大，MCL和 T_1 伤害值明显高于Flex-PLI腿型，得分难度大幅提升。

3 a-PLI腿型伤害指标影响研究

针对中国汽车行人保护研究工作组数据库中，4

款车头结构差异明显的车型a-PLI腿型试验进行研究。

3.1 试验车型结构参数统计

将数据库中4款车型影响腿型伤害指标的车头关键结构参数进行统计,主要包括上支撑(发罩前沿或者前部格栅等直接接触腿型上部的高强度结构)、前防撞横梁和下支撑(前保险杠下沿),详见表3。

表3 4款试验车型车头结构参数统计 mm

车型	A级轿车	C级轿车	小型SUV	中型SUV
保险杠角间距	1 446	1 074	1 126	1 278
上支撑高度	701	861	895	1 010
上、下支撑X向距离	Y0	218	121	5
	Y200	242	114	6
	Y400	195	91	7
防撞横梁尺寸	Y	1 407	1 084	1 149
	Z	183	128	150
防撞横梁下沿高度	388	408	470	440
防撞横梁距前蒙皮X向距离	Y0	122	100	78
	Y200	121	-	77
	Y400	116	-	83
防撞横梁距下部支撑X向距离	Y0	59	67	45
	Y200	72	66.5	46
	Y400	35	68.3	47
下支撑高度	183	217	302	300

注:结合表1中列出的膝部质心离地高度数据,4款车型前防撞横梁均能有效覆盖a-PLI腿型膝部质心,这4款车型前防撞横梁参数差异对a-PLI腿型伤害指标的影响小于上、下支撑参数差异。

3.2 a-PLI腿型试验结果

每款试验车型都进行3~4个车头正面区域的a-PLI腿型冲击,基本覆盖车头前表面不同结构区域(图7~图10中字母“L”之后的数字代表距离车辆Y0面100 mm整数倍距离的试验位置,“+”“-”分别代表车辆左/右侧,默认车辆为对称结构)。图7~图10中分别截取了冲击发生后0 ms、15 ms、30 ms、45 ms时刻。

从图7~图10可见不同车型试验中,a-PLI腿型运动姿态有较大区别:

(1)在轿车试验中,a-PLI腿型向车头上方滑动并向车后方倾旋,膝关节在碰撞中有上升趋势;

(2)在SUV试验中,a-PLI腿型小腿部分钻入车底,膝关节在碰撞中无明显上升趋势,腿型整体向车头上方及后方运动的趋势不明显;

(3)2款轿车试验中,a-PLI腿型中部弯曲量明显低于2款SUV车型;

(4)在车头最低矮的A级轿车试验中,模拟人体髌骨结构的上体模块发生旋转的时刻明显晚于其他3款车型;

(5)在同一款车型试验中, $L_{\pm 3}$ 区间内试验中a-PLI腿型中部弯曲量较大, $L_{\pm 4}$ 之外区间a-PLI腿型保持相对笔直状态。



(a)A级轿车L0



(b)A级轿车L+2



(c)A级轿车L-4



(d)A级轿车L+6

图7 A级轿车试验过程



(a)C级轿车L-1



(b)C级轿车L+3



(c)C级轿车L-5

图8 C级轿车试验过程

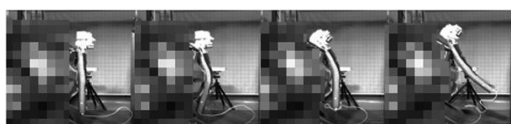
3.3 a-PLI腿型伤害表现

试验中综合得分率从高到低排序为:A级轿车>C级轿车>中型SUV>小型SUV,4款车型a-PLI腿型伤害得分见表4。

根据表4中a-PLI腿型试验得分,得出以下结论:

(1)2款轿车在 $L_{\pm 3}$ 区间内得分率都高于2款SUV车型, $L_{\pm 4}$ 区间之外得分差异较小;

(2)全部4款车型试验中, $L_{\pm 3}$ 区间内得分率偏低, $L_{\pm 4}$ 之外区间得分率较高。



(a)小型SUV L+1



(b)小型SUV L+3



(c)小型SUV L-5

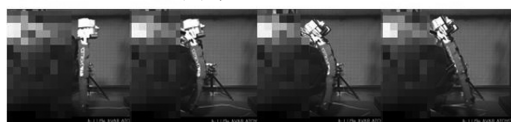
图9 小型SUV试验过程



(a)中型SUV L0



(b)中型SUV L+2



(c)中型SUV L-4



(d)中型SUV L+6

图10 中型SUV试验过程

表4 a-PLI腿型试验得分情况

车型	位置	加速度/g	得分/分	得分率/%
A级轿车	L0	125.8	0.997	89.88
	L+2	124.6	0.89	
	L-4	137.5	0.708	
	L+6	147.2	1.000	
C级轿车	L-1	261.7	0.852	87.73
	L+3	243.8	0.78	
	L-5	189.6	1.000	
小型SUV	L+1	106.9	0.400	64.9
	L+3	186.2	0.675	
	L-5	177.8	0.872	
中型SUV	L0	112.5	0.771	78.78
	L+2	135.3	0.600	
	L-4	114.8	0.78	
	L+6	136.9	1.000	

3.4 a-PLI腿型伤害指标的影响分析

3.4.1 a-PLI腿型大腿伤害指标的影响分析

a-PLI腿型大腿弯矩主要受到上支撑结构影响,A级轿车、C级轿车、小型SUV、中型SUV试验车型上支撑高度有明显差异而且逐渐升高,下文针对a-PLI腿型大腿及膝部伤害指标与车型上支撑参数的关系进行分析。

由于试验车型L±4以外区间a-PLI腿型碰撞后都沿车头向侧面滚动,伤害值偏低且差异性不明显,a-PLI腿型伤害指标的影响分析中不选择L±4以外区间进行数据比对。

A级轿车与C级轿车结构参数及a-PLI腿型伤害值见表5,具体分析如下。

表5 A级、C级轿车结构参数及a-PLI腿型伤害值统计

车型	A级轿车 L0位置	C级轿车 L-1位置	a-PLI参数/mm
上支撑高度/mm	701	861	上体质心高度: 986 大腿质心高度: 900 F ₁ 传感器高度: 817 F ₂ 传感器高度: 737 F ₃ 传感器高度: 657 膝部质心高度: 520
上、下支撑X距离/mm	218	121	
上支撑与防撞横梁X向距离/mm	159	60.4	
防撞横梁上沿高度/mm	571	536	
大腿弯矩F ₁ /N·m	243.2	341.1	
大腿弯矩F ₂ /N·m	251.8	368.9	
大腿弯矩F ₃ /N·m	224.2	371.1	
膝部MCL/mm	16.4	17.6	

(1) A级轿车上支撑点高度较C级轿车低161 mm,稍高于F₁传感器位置,且位置靠后,不会对a-PLI腿型大腿形成明显支撑。

(2) A级轿车上支撑点在碰撞中对大腿冲击轻微,大腿弯矩峰值243 N·m,距离大腿伤害限值390 N·m安全冗余较大,同时明显低于C级轿车大腿弯矩。

(3) 2车MCL伸长量峰值均明显低于伤害限值27 mm,结合图7、图8判断原因是下支撑作用明显导致,在3.4.2章节进行详细分析。

C级轿车与小型SUV结构参数及a-PLI腿型伤害值见表6,具体分析如下。

(1) 2车上支撑点高度均接近并略低于大腿质心高度,上支撑点X方向均偏前,这种形式的结构设计导致a-PLI腿型大腿受到较高的冲击能量。

(2) 试验结果显示2车大腿弯矩均处于较高水平,接近伤害限值390 N·m,其中位置较低的F₁传感器读数接近而位置更高的F₂、F₃传感器读数呈现相反趋

势,说明小型SUV上支撑高度在C级轿车基础上的提升,对于降低a-PLI腿型大腿伤害是有利的。

表6 C级轿车与小型SUV结构参数及a-PLI腿型伤害值统计

车型	C级轿车 L-1位置	小型SUV L+1位置	a-PLI参数/mm
上支撑高度/mm	861	895	上体质心高度:986 大腿质心高度:900 F_3 传感器高度:817 F_2 传感器高度:737 F_1 传感器高度:657 膝部质心高度:520
上、下支撑X 距离/mm	121	6	
上支撑与防撞横 梁X向距离/mm	60.4	-40	
防撞横梁上沿 高度/mm	536	620	
大腿弯矩 $F_1/N\cdot m$	341.1	349.9	
大腿弯矩 $F_2/N\cdot m$	368.9	305.4	
大腿弯矩 $F_3/N\cdot m$	371.1	297.6	
膝部MCL/mm	17.6	30.8	

(3)小型SUV膝部MCL伸长量明显高于C级轿车并导致了较多扣分,结合图8、图9判断是下支撑效果差异导致,在3.4.2章节进行详细分析。

小型SUV与中型SUV结构参数及a-PLI腿型伤害值见表7,具体分析如下。

表7 小型SUV与中型SUV结构参数及a-PLI腿型伤害值统计

车型	小型SUV L+3位置	中型SUV L+2位置	a-PLI参数/mm
上支撑高度/mm	895	1 010	上体质心高度: 986 大腿质心高度: 900 F_3 传感器高度: 817 F_2 传感器高度: 737 F_1 传感器高度: 657 膝部质心高度: 520
上、下支撑X 距离/mm	6	179	
上支撑与防撞横 梁X向距离/mm	-42	206	
防撞横梁上沿 高度/mm	620	585	
大腿弯矩 $F_1/N\cdot m$	341.7	275.2	
大腿弯矩 $F_2/N\cdot m$	313.5	222.9	
大腿弯矩 $F_3/N\cdot m$	268.4	170.3	
膝部MCL/mm	30.7	26.1	

注:为了凸显上支撑差异,选择下支撑伤害指标 T_2 、 T_3 、 T_4 相似的小型SUV L+3与中型SUV L+2进行对比。

(1)中型SUV上支撑点高度相比小型SUV提高到1 010 mm,超过上体模块质心高度,因此有效抑制了上体模块向车后方运动,使得大腿弯矩保持在较低状态。

(2)2车MCL伸长量峰值均较高,结合图9、图10判断是下支撑不足导致,在3.4.2章节进行详细分析。

3.4.2 a-PLI腿型小腿及膝部伤害指标的影响分析

a-PLI腿型小腿弯矩和膝部韧带伸长量受下支撑结构参数影响,A级轿车、C级轿车、小型SUV这3款

试验车型下支撑高度有明显差异而且逐渐升高,小型SUV与中型SUV车头结构差异性主要体现在上支撑,因此仅针对A级轿车、C级轿车、小型SUV这3款车型膝部及小腿伤害指标与下支撑参数的关系进行分析。

A级轿车与C级轿车结构参数及a-PLI腿型伤害值,见表8。

表8 A级轿车与C级轿车结构参数及a-PLI腿型伤害值统计

车型	A级轿车 L0位置	C级轿车 L-1位置	a-PLI参数/mm
防撞横梁下沿 高度/mm	388	408	膝部质心高度: 520 小腿质心高度: 230 T_1 传感器高度: 386 T_2 传感器高度: 306 T_3 传感器高度: 226 T_4 传感器高度: 146
下支撑高度/mm	183	217	
防撞横梁与下支 撑X向距离/mm	59	60.6	
膝部加速度/g	125.8	261.7	
膝部MCL/mm	16.4	17.6	
小腿弯矩 $T_1/N\cdot m$	275.3	291.7	
小腿弯矩 $T_2/N\cdot m$	268.6	261.1	
小腿弯矩 $T_3/N\cdot m$	242.5	206.8	
小腿弯矩 $T_4/N\cdot m$	116.7	116.6	

注:试验车型防撞横梁到前保蒙皮X向距离与a-PLI腿型得分率正相关;从a-PLI膝部加速度值判断C级轿车中部支撑结构刚度高于其他3款车型,但根据试验数据统计,a-PLI膝部伤害指标MCL和小腿弯矩 T_1 并未受到膝部加速度的直接影响,而是更多受到上、下支撑结构直接影响,因此数据对比中不考虑中部支撑结构刚度和吸能空间差异因素。

(1)2车下支撑高度均位于小腿质心以下,均有效抑制了a-PLI小腿钻入车头底部的趋势;

(2)A级轿车小腿弯矩 T_2 、 T_4 与C级轿车非常接近, T_3 峰值较C级轿车略高,研究发现A级轿车下支撑结构内部通过PP-TD10(料厚为3.4 mm)材料进行2次加强,其强度较高;

(3)根据图7、图8可以看出,A级轿车试验中上体模块倾旋量比C级轿车更大,但腿型中部弯曲量与C级轿车基本一致,且a-PLI腿型小腿弯矩及MCL伸长量与C级轿车基本一致,证明A级轿车低且硬的下支撑对提升a-PLI腿型得分有效。

C级轿车与小型SUV结构参数及a-PLI腿型伤害值见表9,具体分析如下。

(1)C级轿车下支撑位置较小型SUV更低且靠前,且下支撑距离小腿质心高度和 T_3 传感器更近,阻止了a-PLI腿型小腿钻入车头底部,并抑制了腿型中部弯曲,降低了MCL和 T_1 峰值。C级轿车中部支撑刚度偏高导致 T_1 有所增加,但下支撑的有效作用仍使之低于小型SUV T_1 弯矩;

(2)小型SUV下支撑高度高于小腿质心,接近 T_2 传感器,无法抑制a-PLI腿型小腿钻入车头底部,腿型

中部过度弯曲, T_1 和 MCL 峰值非常高。

表9 C级轿车与小型SUV结构参数及a-PLI腿型伤害值统计

车型	C级轿车 L-1位置	小型SUV L+1位置	a-PLI 参数/mm
防撞横梁下沿 高度/mm	408	470	膝部质心高度: 520 小腿质心高度: 230 T_1 传感器高度: 386 T_2 传感器高度: 306 T_3 传感器高度: 226 T_4 传感器高度: 146
下支撑高度/mm	217	302	
防撞横梁与下支 撑X向距离/mm	60.6	46	
膝部加速度/g	261.7	106.9	
膝部MCL/mm	17.6	30.8	
小腿弯矩 $T_1/N \cdot m$	291.7	327.2	
小腿弯矩 $T_2/N \cdot m$	261.1	284.1	
小腿弯矩 $T_3/N \cdot m$	206.8	184.5	
小腿弯矩 $T_4/N \cdot m$	116.6	83.4	

3.5 试验结果总结

(1) 上支撑距地高度影响大腿弯矩并决定了a-PLI腿型碰撞后整体运动姿态

上支撑高度低于大腿 F_2 传感器高度(737 mm)时, 其对大腿及上体质心基本不构成支撑, 随着上支撑高度接近大腿中部(F_2 传感器位置), 会造成明显的大腿弯曲, 即大腿弯矩与上支撑高度为同比关系。

上支撑高于大腿 F_3 传感器高度(817 mm)时, 其对大腿及上体质心支撑效果随高度增加而提升, 此时大腿弯曲程度随上支撑高度增加而降低, 即大腿弯矩与上支撑高度为反比关系。

上支撑偏前会增加大腿弯矩, 偏后可降低大腿弯矩, 但上支撑过于偏后时无法有效支撑大腿可能导致腿型中部弯曲量增大。上支撑越高越偏前, a-PLI腿型越不容易向车后方倾旋。

(2) 下支撑高度影响小腿弯矩并决定了a-PLI腿型中部最大弯曲量

下支撑高于小腿质心时, 小腿很容易钻入车头底部, 小腿弯矩 T_1 、 T_2 偏高, 腿型中部弯曲量较大。下支撑低于小腿质心时, 小腿不容易钻入车头底部, 此时接近下支撑点的小腿弯矩传感器(通常为 T_3) 读数会高于 T_1 、 T_2 , 但腿型中部弯曲量较小。

下支撑偏前通常会增加小腿弯矩, 下支撑偏后则无法有效支撑小腿, 可能导致小腿弯矩 T_1 和腿型中部弯曲量增大。下支撑越高越偏后, a-PLI腿型小腿越容易钻入车头底部, 导致腿型中部弯曲量增大。

(3) 膝部韧带伤害与a-PLI腿型中部弯曲量正相关

当下支撑高度低于小腿质心且X向超出上、中支撑时, 可以有效抑制a-PLI腿型中部弯曲, 并降低MCL值。

4 总结与建议

本文对比了不同车头结构在a-PLI腿型试验伤害指标上的差别, 详细分析了差异原因, 针对不同类型车型给出以下设计建议。

4.1 上支撑高度低于大腿 F_2 传感器高度 737 mm 的轿车、跑车

(1) 其上支撑结构不足以抑制a-PLI腿型向车后方倾旋, 应允许a-PLI腿型在碰撞中向车上方滑动及后方倾旋从而降低a-PLI腿型中部弯曲量。

(2) 需设计下支撑高度低于小腿质心(230 mm)并保证下支撑点有足够的刚度, 视情况将下支撑点X向前伸出中部支撑外表面来阻止a-PLI腿型小腿进入车头底部。

(3) 如果上、中支撑结构阻碍a-PLI腿型向车后方倾旋, 应弱化相关结构并将上支撑点后退。

(4) 支撑点刚度调整方向为: 弱化上、中部支撑刚度, 强化下部支撑刚度。

4.2 上支撑高度高于大腿 F_3 传感器高度 817 mm 的SUV、MPV、CROSSOVER等车型

(1) 下支撑点高度应在接近角满足设计目标前提下尽量降低。

(2) 如果下支撑点高于小腿质心, 上支撑结构设计应在保证大腿弯矩不超伤害限值的原则上抑制a-PLI腿型碰撞后倾旋运动, 可以在保证驾驶视野和风阻系数的前提下尽量提升发罩前沿基准线高度。

(3) 支撑点刚度调整方向为: 弱化中部支撑刚度, 上、下支撑刚度根据伤害指标调整。

参 考 文 献

- [1] 李梦琦, 李璐江, 卜晓兵. 基于FLEX-PLI和aPLI腿型的行人保护仿真分析[C]//第十六届国际汽车交通安全学术会议. 长沙: 湖南大学, 2019: 6.
- [2] 吕福权, 谭冬冬, 周澄靖, 等. 基于aPLI新腿型的轿车前端X向距离造型参数研究[C]//2020中国汽车工程学会年会论文集, 2020.
- [3] 谭冬冬, 万银辉, 周澄靖, 等. 基于某SUV的aPLI腿型行人保护试验研究[C]//2020中国汽车工程学会年会论文集, 2020.