

汽车安全带预收紧装置设计

李 娅 刘依豪 刘佳乐 李尚尚 林立阳 任鹏博
(西安航空学院 陕西西安 710077)

摘 要: 安全带预收紧装置能够在碰撞发生的瞬间收紧安全带,有效控制乘员身体前倾,减小对乘员的伤害。本文首先对预收紧装置的分类和工作原理进行了详细阐述,重点介绍了电子控制式和机械爆燃式两种常见的预收紧装置。在此基础上,文章分析了预收紧装置的设计要求和评价指标,对装置的响应时间、收紧力、可靠性等关键设计参数进行了讨论。文章还通过仿真分析和试验测试,对装置的性能进行了验证,并对设计中的问题提出了改进措施。最后,文章探讨了预收紧装置的未来发展趋势,指出随着电子控制技术和新材料的发展,预收紧装置将向着更加智能化、集成化和轻量化的方向发展。

关键词: 汽车安全带; 预收紧装置; 碰撞安全; 电子控制; 机械爆燃

引言:

汽车安全性能一直是研究热点和难点,被动安全系统在保护乘员安全方面发挥着至关重要的作用。安全带作为最主要和最有效的约束装置,自上世纪 50 年代被引入汽车以来,其设计不断优化改进。然而,在车辆碰撞的瞬间,乘员会在惯性作用下猛烈前冲,如果安全带束缚力不足,极易造成乘员与方向盘、仪表板等部件的二次碰撞,导致严重的头部和胸部伤害。为了进一步提高安全带对乘员的保护作用,预收紧装置应运而生。20 世纪 90 年代,梅赛德斯-奔驰率先在量产车上搭载了机械式预收紧安全带,至 21 世纪初,大多数车企都开始使用电子控制式预收紧安全带。预收紧装置能在极短时间内收紧安全带,消除安全带的间隙,提前对乘员施加约束力,有效抑制乘员前冲,与安全气囊协同工作,显著降低了交通事故的死亡率。据美国公路安全保险协会 (IIHS) 的数据显示,预收紧安全带与普通安全带相比,可使正面碰撞时驾驶员的死亡风险降低 12%,使乘客的死亡风险降低 11%。可见,预收紧装置在提升汽车碰撞安全性能方面具有突出的贡献。

1 预收紧装置的分类与工作原理

1.1 电子控制式预收紧装置

电子控制式预收紧装置主要由电子控制单元 (ECU)、驱动电机、传感器等组成。当车辆发生碰撞时,加速度传感器检测到车辆的快速减速,并将信号传输给 ECU。ECU 经分析判断确认碰撞发生,便立即向驱动电机输出指令,电机带动齿轮传动系统快速拉动安全带,完成预收紧过程。与此同时,ECU 还会向安全气囊控制系统发出点火信号。电子控制式预收紧装置的响应速度快,通常在碰撞发生后 10-20ms 内就能完成收紧,且可以根据碰撞严重程度控制收紧力的大小,实现智能化控制。但其缺点是成本较高,对车辆供电系统要求更高,一旦电路系统出现故障,会导致装置失效。

1.2 机械爆燃式预收紧装置

机械爆燃式预收紧装置主要由 micro gas generator(MGG)和传动机构组成。MGG 内装有炸药,通过电信号引爆。在碰撞发生时,碰撞传感器感应到信号并引爆 MGG,瞬间产生大量高压气体,推动活

塞或钢珠冲击传动机构,带动安全带卷轴快速转动,从而收紧安全带。由于化学能直接转换为机械能,因此收紧速度非常快,一般在 5-10ms 内即可完成。机械爆燃式装置的优点是结构简单可靠,成本较低,即使车辆断电也不影响装置工作。缺点是属于一次性装置,作用后必须全部更换,而且装置引爆时噪音较大,产生的粉尘和残渣可能对人体有害,对环境也造成一定污染。见图 1



图 1 机械爆燃式安全带预收紧装置

2 预收紧装置的设计要求与评价指标

2.1 设计要求

预收紧装置作为汽车被动安全系统的核心部件,其设计必须满足严格的要求。首先是高可靠性,装置必须在碰撞工况下准确、可靠地触发和工作,确保乘员得到有效保护。同时,装置在日常使用中必须能够经受振动、温度、湿度等恶劣环境因素的考验,避免出现误触发导致的安全隐患。其次,装置的动作时间要尽可能短,通常要求在碰撞发生后 10-20ms 内完成收紧动作,以最大限度地减小乘员的前冲位移量。此外,收紧力要足以束缚乘员,减小其冲击能量,但又要避免过大的收紧力对乘员造成挤压伤害。不同体型的乘员所需收紧力不同,因此要进行大量人体模型试验,确定最佳收紧力区间。考虑到维修成本,预收紧装置应尽量实现重复利用。电子控制式预收紧装置在碰撞后只需更换电机和 ECU 等关键部件即可继续使用,但机械爆燃式装置在碰撞后必须整体更换,使用成本较

高。随着环保意识的提高,预收紧装置的设计要充分考虑环保性和可回收性。装置应尽量采用可回收利用的材料,减少有毒有害物质的使用,降低报废后的环境污染。机械爆燃式装置中的炸药可能含有重金属成分,需要进行无害化处理。

2.2 评价指标

预收紧装置的性能需要通过一系列客观指标来评估。比如,动作时间是评价装置响应速度的关键指标,要求动作时间越短越好。除了装置本身的设计优化外,信号传输、判断决策的速度也要纳入考量。乘员约束效果是评判预收紧装置最直接的指标。通过对比试验分析乘员约束系统的工作状态,重点考察乘员头部、胸部的冲击加速度,头部旋转角度,以及安全带对胸部的最大压力等数据,全面评估预收紧装置的保护效果。装置的耐久性需要通过加速寿命试验来考核。模拟装置长期工作的老化过程,一般要求装置在正常使用条件下至少能保证10年或15万公里的使用寿命。电子控制式预收紧装置还需要评估其电磁兼容性,确保其在复杂的电磁干扰环境中能够正常工作。此外,预收紧装置必须能适应汽车使用的各种恶劣环境,如高温、严寒、潮湿、振动、灰尘等,通过相关环境试验来考核装置的环境适应性。

3 预收紧装置的设计验证与改进

3.1 虚拟样机仿真

在预收紧装置的设计过程中,可以采用多体动力学与有限元相结合的方法进行虚拟样机仿真分析。在ADAMS等软件中建立装置简化模型,模拟装置的动态响应特性,对设计参数进行优化。利用PAM-CRASH等软件搭建碰撞工况模型,分析预收紧装置与安全带、安全气囊、座椅等的耦合作用效果。通过仿真试验可以大幅缩短开发周期,降低成本,为装置结构设计和性能优化提供有力支持。如通过模拟装置内部传动机构的刚度和间隙设置,优化系统的动态特性;通过改变MGG的尺寸和质量,匹配不同车型的收紧力需求。

3.2 硬件在环试验

在完成设计和初步仿真后,还需要在整车环境下进行预收紧装置的硬件在环(HIL)试验,以考核装置在实际工况下的性能。HIL试验可以用真实的ECU、MGG、传感器等核心部件替代仿真模型,结合仿真模型提供的车辆运动和碰撞信号,在实验室内模拟真实的碰撞过程。通过HIL试验可以有针对性地测试装置的功能安全性,获得装置触发时间、收紧力幅值、部件的应力应变等响应数据。通过分析试验结果,对比设计指标,找出装置存在的问题,并进行针对性的结构改进和参数调整,最终使装置满足设计要求。

3.3 整车碰撞试验

在完成设计验证后,预收紧装置还需要经过实车碰撞试验的考核,以评估其在真实事故中对乘员的保护效果。按照法规要求和标准规程,开展正面、侧面、追尾等典型碰撞工况的整车试验,全面验证预收紧装置的性能。通过对假人传感器数据的采集分析,判断乘员受伤风险是否控制在容许范围内。碰撞试验的结果反映

了整个被动安全系统的综合效能,其中预收紧装置发挥着重要作用。如果出现装置误触发、不触发或触发时序不当等问题,都可能导致乘员约束不利,造成更大伤害。因此必须高度重视碰撞试验结果,查找装置设计和工艺中的缺陷,不断改进提高,以满足整车性能的要求。

4 预收紧装置的发展趋势

4.1 智能化

利用先进传感技术和控制算法,综合多源信息对碰撞工况进行快速判别,可以使预收紧装置更加智能化。通过提前预判碰撞的严重程度,主动调节收紧力大小,匹配不同体型乘员的约束需求,从而实现更精准、更个性化的保护。引入座椅占用传感器,结合安全带使用状态信息,可以准确判断乘员在位情况,避免装置在无人情况下触发,降低误触发风险。

4.2 集成化

目前预收紧装置多是独立设计的,与安全气囊等约束装置协调不够,导致在保护乘员时存在时序和力度不匹配的问题。今后应加强预收紧装置与安全气囊、座椅安全带、儿童安全座椅等的一体化集成设计,建立统一的联动控制策略,实现更协调、更高效的保护作用。

4.3 轻量化

随着节能减排政策的推行,汽车轻量化已经成为必然趋势。因此,预收紧装置也要努力实现小型化、轻量化,在保证性能和可靠性的同时,减小装置的体积和重量。可以通过优化设计减少零部件数量,采用高强度轻质材料替代传统材料,简化传动机构和连接方式等途径,不断提升装置的重量效率。

结束语:

总之,设计一款性能优异、品质可靠的预收紧装置并非易事,需要在机械、电子、材料、工艺等多个学科领域进行深入研究和反复试验。同时还要权衡成本、环保、售后维修等诸多因素。这对汽车安全工程师提出了更高的要求,需要不断学习先进理念,掌握前沿技术,开拓创新思路。只有立足汽车安全系统的整体设计,协调好预收紧装置与其他部件的关系,才能真正实现装置性能的最优化,为保障交通安全和降低事故伤害做出应有贡献。

参考文献:

- [1]何有增,孙俊杰,朱小娇.汽车安全带布置及设计方法[J].时代汽车,2023,(09):111-113.
- [2]王新华,吴海臣,李宁,等.汽车安全带技术研究[J].时代汽车,2023,(02):156-158.
- [3]齐晓明.主动式安全带预紧装置的开发与仿真研究[D].湖南大学,2013.

作者简介:

李娅(1983年9月-),女,汉,陕西榆林,西安航空学院,讲师,硕士研究生,研究方向:汽车主被动安全技术。