

空气悬架客车车身倾斜问题分析及解决方案

陈毅超¹, 张 鹏¹, 武俊超², 王梦楠³

(1. 南京金龙客车制造有限公司, 南京 211215; 2. 上海科曼车辆部件系统股份有限公司, 上海 201800;

3. 武汉孔辉汽车科技有限公司, 武汉 430050)

摘要:针对某款空气悬架纯电动客车在转向后出现车身倾斜无法自动扶正的问题,本文对其供气系统、管路及高度控制系统的布置形式进行分析,提出一种高度控制系统在整车XY平面呈锐角三角形倒置布置的方案,并进行了实车验证,结果表明该方案可有效解决空气悬架客车车身倾斜问题,为类似故障提供了一种可行的解决方法。

关键词:空气悬架; 车身倾斜; 高度控制系统

中图分类号:U463.33

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.06.013

Analysis and Solutions for the Body Tilting Problem of Air-suspended Buses

CHEN Yichao¹, ZHANG Kun¹, WU Junchao², WANG Mengnan³

(1. Nanjing Golden Dragon Bus Co., Ltd., Nanjing 211215, China;

2. Shanghai Komman Vehicle Components System Co., Ltd., Shanghai 201800, China;

3. Wuhan Konghui Automotive Technology Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: Aiming at the issue that the body of a specific type of air suspended pure electric bus fails to automatically return to an upright position after steering, this paper analysis its air supply system, pipeline layout, and height control system, proposes a method the height valves are arranged in an inverted acute-angled triangle in the XY plane of the entire vehicle and carries out the actual vehicle verification. The results demonstrate that the method can effectively address the body-tilting problem, thereby offering a viable approach for dealing with similar malfunctions.

Key words: air suspension; body skew; height valve

空气悬架可有效提升客车的乘坐舒适性和操纵稳定性。在实际应用中,高度控制系统的布置形式对车辆性能,尤其是舒适性和操纵稳定性,有显著影响^[1-5]。针对某款空气悬架纯电动客车在完成转向操作后,出现明显的车身倾斜且无法自动扶正,本文对其供气系统、管路及高度控制系统在XY面的布置形式进行分析,并提出相应解决方案。

1 车身倾斜成因分析

某款空气悬架纯电动客车以25 km/h的速度完成直角转向后,出现明显的车身倾斜(表现为车身左右两侧腰线距地面的高度不相等),且无法自动扶正。该问题在多次试验中均重复出现。车辆左转及右转后,测得车身左右两侧腰线距离地面的高度差见表1。

表1 车身左右两侧腰线距离地面的高度差 mm

状态	高度差		现象
	前轴位置	后轴位置	
初始	5	5	两侧高度相同
左转向后	20~25	25~30	左高右低
右转向后	21~25	26~30	左低右高

通过对测量结果分析可知,转向后车身之所以出现明显倾斜,是因为车身左右两侧腰线距离地面的高度差未能恢复到初始差值。由此可以推断,空气悬架左右两侧气囊的高度未能恢复至原始状态。气囊高度能否恢复,取决于高度控制系统调节(充气、放气)后,左右两侧气囊的气体质量能否恢复至原始状态。本文将根据图1所示的气路原理,对供气系统、管路

收稿日期:2025-07-21。

第一作者:陈毅超(1984—),男,硕士,工程师,主要从事汽车系统动力学研究工作。E-mail:chenyichao002@126.com。

及高度控制系统在 XY 平面的布置形式逐一进行分析^[6-7]。

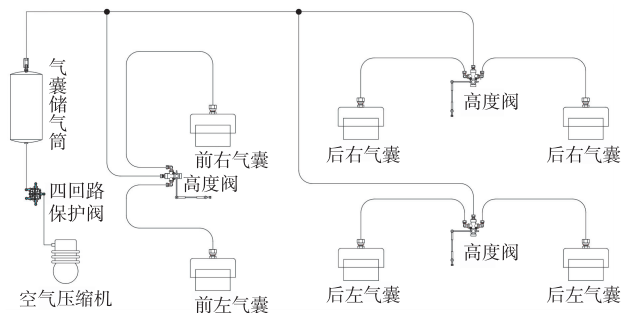


图1 空气悬架气路原理

1.1 供气系统

供气系统的功用是为气囊提供气源,以支撑其所承受的载荷。该系统由空气压缩机、四回路保护阀、储气筒、气管接头和放水阀等部件组成。储气筒内部气压高低、气管接头孔径大小及放水阀工作状态,都会直接影响供气的通畅性。若储气筒内部气压过低,则无法支撑气囊的载荷;若气管接头孔径过小,则会导致供气受限;若放水阀损坏,则可能因内部积水冻结而导致供气受阻。

根据上述分析,检查了储气筒内的气体压力及积水情况。结果显示,储气筒压力为 1 MPa,且当压力低于 0.8 MPa 时,空气压缩机会自动启动,并将压力补充至 1 MPa。此外,在正常承载工况下,测得气囊内压力为 0.4~0.45 MPa,处于合理范围。随后,将气管接头孔径由 6 mm 更改为 10 mm 进行测试,故障现象未见明显改善。打开放水阀也无积水排出。基于以上检查结果,可以排除供气系统压力不足、管路孔径过小及阀门积水冻结这 3 个因素。

1.2 管路

管路作为输送压缩气体的通道,其密封性、通畅性及内径尺寸直接决定气囊在排气后能否及时补气。由图 1 的气路原理可知,前气囊高度阀进气口气压与后左、后右气囊高度阀进气口的气压均等于储气筒气压。为验证这一点,用气压表测量上述各点压力,结果均为 0.98 MPa。

为排查管路气密性与管路是否堵塞,用肥皂水法进行检测,未发现泄漏点;检查管路布局,其走向平顺,无直角折痕。因此,可排除管路泄漏和堵塞的因素。

参考同平台其他车型,其储气筒出气接头和气路管径均为 6 mm,且均满足使用要求^[8]。为进一步验证,更换为内径 10 mm 的管路后试车,车身倾斜现象

依然存在。事实表明,管路内径与故障现象无因果关系,故可排除此因素。

1.3 高度控制系统

问题车辆的气囊及高度控制系统在 XY 平面的布置位置如图 2 所示。气囊采用前 2 后 4 的布局,高度控制系统采用前 1 后 2 的布局。高度控制系统主要由高度阀、控制臂和连杆构成,可以通过充放气来调节车身姿态,保持车辆恒定的高度^[9-10]。其中所有高度阀都安装在车架上,控制臂水平横置与高度阀相连,构成开启高度阀的摇臂;与控制臂连接的连杆竖直安装,连杆下端通过支架与车桥连接,如图 1 中高度阀连接示意。

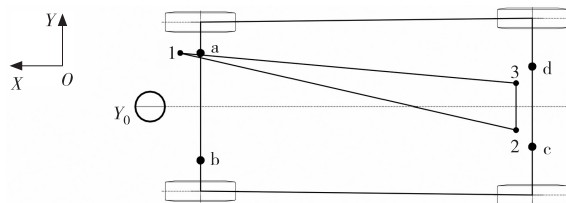


图2 XY 平面气囊和高度阀位置示意图

为便于论述,本文将前悬架 2 个气囊标记为 a 和 b,由高度阀 1 控制;后悬架 4 个气囊作等效处理,其中左侧 2 个气囊标记为 c,右侧 2 个气囊标记为 d,分别由高度阀 2 和 3 控制。

以下几种因素可能在车辆转向后对气囊内气体质量稳定性造成影响,进而影响车身两侧腰线距离地面的高度。

1) 高度阀自身故障。高度阀作为控制气囊充放气的重要部件,若发生故障将直接影响气囊正常工作。更换高度阀后进行实车试验,车身倾斜现象仍然存在,故排除此因素。

2) 高度阀控制系统特性。如前面所述,连杆竖直安装,一端与车桥连接,一端与控制臂连接。车桥上下跳动,带动连杆上下移动,再由连杆推动控制臂绕以高度阀为圆心做摇摆运动,形成一个摆动角度区间。当前使用的机械高度阀存在约 $[-2^\circ, 2^\circ]$ 的角度死区,在此角度区间内高度阀不作响应。角度死区之外,在连杆上下移动高度一定时,高度阀的响应灵敏性直接受控制臂影响,而控制臂的有效长度直接决定了高度阀阀门的开启角度。控制臂越短,推动高度阀开启的角度越大,越容易使高度阀克服角度死区对气囊实施充放气,反之对气囊充气越困难。

经测量,问题车辆高度阀控制臂有效长度为 190

mm, 处于 180~220 mm 的设计要求区间内。为进一步验证控制臂有效长度对高度阀响应特性的影响, 将其长度逐步缩减至 120 mm 进行测试, 车身倾斜现象仍然存在。结果表明, 通过调整控制臂有效长度不能有效解决该问题。

3) 高度阀安装位置。

①安装位置(车辆左右方向)分析。一般而言, 高度阀越靠近车辆纵向中心线, 其响应速度受车轴跳动的影响越小, 动作越慢; 反之, 则动作越快。气囊与高度阀的形位参数见表 2。

表 2 气囊与高度阀形位参数统计表 mm

部件	X 轴坐标	Y 轴坐标
气囊 a、b	0	±671
气囊 d、c	4 100	±495
阀 1	-462	630
阀 2	3 705	-320
阀 3	3 705	320

由表 2 可知, 在 XY 平面位置上, 阀 1 与气囊 a 在 Y 轴方向距 Y_0 的距离分别为 630 mm 和 671 mm, 两者比值为 0.93; 同理, 阀 2 与气囊 c、阀 3 与气囊 d 的间距比值为 0.64。车辆左转向时, 整车倾斜, 设同侧两气囊 a 和 d 的高度变化量均为 Δh , 则阀 1 和阀 3 的高度变化量分别为 $0.93\Delta h$ 和 $0.64\Delta h$ 。由此可知, 车轴跳动时, 连接高度阀控制臂的竖杆对气囊高度变化量的传递并非 1:1, 而是按上述杠杆比缩小。其中, 阀 2 和阀 3 对应的垂向高度变化量缩小约 40%, 对气囊垂向高度差变化的响应比阀 1 更迟缓。

②3 个高度阀 XY 平面布置形位分析。问题车辆前悬架左右气囊由阀 1 控制, 且气路连通; 后悬架左右气囊分别由阀 2 和阀 3 独立控制。阀 1、阀 2 和阀 3 的安装点共同决定一个平面。据此分析可知, 车身倾斜的主要原因是车辆转向后气囊 c 和 d 未能恢复原始高度, 导致两侧存在高度差。

由图 2 所示的高度阀布置位置和表 2 中阀体的形位参数可知, 阀 1、2、3 在 XY 平面上呈钝角三角形。其中, 阀 2 和阀 1 在 Y 轴方向距 Y_0 的间距分别为 320 mm 和 630 mm, 比值为 0.51。车辆左转向时, 车身绕倾斜轴线向右倾斜, 簧载质量发生转移。设定此时高度阀处于角度死区, 气囊内部气体不与外界交换, 其影响如下: ①气囊 a 因载荷增加, 高度降低了 Δh_1 。②气囊 b 和 c 的载荷减少, 垂向高度增加。经推算,

气囊 c 的垂向高度增加了 $0.73\Delta h_1$ (假定整个车架为刚体)。阀 2 垂向高度增加 $0.46\Delta h_1$ 。③气囊 d 因载荷增加, 高度降低了 Δh_2 。④气囊 c 与 d 关于车辆中心对称, 气囊 c 同样因载荷减少, 高度增加了 Δh_2 。根据阀 2 与气囊 c 的距离比值为 0.64, 阀 2 高度因此又增加了 $0.64\Delta h_2$ 。由此可知, 阀 2 的高度变化同时受到气囊 a 和气囊 d 高度变化的综合作用。

经分析可知, 车辆转向过程中, 受安装位置影响, 高度阀控制臂无法真实反映气囊的高度变化, 导致高度阀不能及时对气囊进行充放气。转向完成后, 后悬架左右气囊内的气体质量与原始状态差异显著, 产生了高度差, 最终导致车身倾斜。

2 方案改进与验证

上述分析表明, 供气系统及管路并非车身倾斜的影响因素。因此, 本文将基于对空气悬架高度控制系统的分析, 针对该车高度阀在 XY 平面上的布置提出以下改进方案。

2.1 高度阀响应及时性优化方案

由 1.3 节可知, XY 平面 Y 方向上高度阀与气囊的安装位置存在一定间距, 导致车轴跳动时高度阀控制臂未能对气囊高度变化进行 1:1 反映, 而是按一定的杠杆比缩小了该变化。且杠杆比的缩减程度越大, 高度阀的响应就越迟缓, 其中阀 2 和阀 3 的这一问题尤为突出。

为提高阀 2 和阀 3 对气囊高度变化的响应速度, 拟将其分别向车身外侧移动, 以增大其与对应气囊在 Y 轴方向上的距离。但考虑到问题车型后悬架结构的限制, 此方案实施难度较大, 故不予采用。

2.2 高度阀布置形位优化方案

从 1.3 节分析可知, 阀 1、2、3 在 XY 平面上呈钝角三角形分布。长边上的阀 1 和阀 2 在 Y 轴方向距 Y_0 的间距存在一定比值。该比值导致车辆转向车身倾斜时, 阀 2 的控制灵敏性不仅受同侧阀 3 的影响, 还受阀 1 的影响。为降低阀 1 对阀 2 的影响, 对 3 个阀在 XY 平面的布置进行了优化, 如图 3 所示。

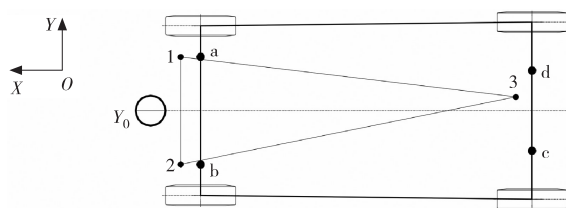


图 3 优化后高度阀位置示意图

优化后的高度阀采用前二后一的布置形式,具体方案如下:①阀1的形位参数保持不变。②将阀2从后悬架移至前悬架,与阀1关于 Y_0 轴对称布置。前悬架左右两侧气囊分别由阀2和阀1单独供气。③将阀3从其现有位置向 Y_0 线方向移动,负责为后悬架的左右两侧气囊供气。在 XY 平面上,阀1、2、3呈锐角三角形分布,旨在尽量减小长边上2个高度阀的相互影响。优化后3个高度阀的 XY 平面形位参数见表3。

表3 优化后高度阀布置参数 mm

部件	X 轴坐标	Y 轴坐标
阀1	-462	630
阀2	-462	-630
阀3	3 705	300

2.3 装车验证

按照优化的高度阀在整车 XY 平面呈锐角三角形倒置布置的方案进行实车验证。车辆从初始状态(车轴上方两侧腰线距地面高度相等)出发,以25 km/h的速度直角转向,转向结束后,车辆能在4~8 s内自行恢复至初始状态。此前转向后车身无法自动扶正的问题得以解决,验证结果达到预期效果。

3 结束语

本文通过分析高度阀响应特性及悬架抗倾斜性

能,提出基于 XY 平面的高度阀锐角三角形倒置布置方案。经实车验证,该方案可有效改善空气悬架客车转向时的车身倾斜现象,对增强车辆操纵稳定性、提升乘坐舒适性具有重要的实际应用意义。

参考文献:

- [1] 王传晓. 四轮转向的半主动空气悬架车辆车身姿态控制研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2021.
- [2] 张小刚. 基于空气悬架"高度阀统一应用模型"的智能空气悬架系统[J]. 汽车实用技术, 2021,46(7):73-75.
- [3] 郭君娥,李殿起. 空气悬架客车的操纵稳定性研究[J]. 机械工程师,2020(11):62-64.
- [4] 赵金龙,童剑铭,曲金亮. 三轴铰接空气悬架客车的倾斜校核[J]. 客车技术与研究,2018,40(2):14-15.
- [5] 黄其柏,王勇,赵明,等. 汽车空气悬架系统的发展概况[J]. 噪声与振动控制,2005,25(3):13-15.
- [6] 齐丹,越文,吴学军. 客车空气悬架安装使用与维护保养要点[J]. 客车技术与研究,2018,40(1):60-62.
- [7] 于菲,闫岩,吴学军. 客车空气悬架使用中常见故障及原因分析[J]. 客车技术与研究, 2017,39(6):58-60.
- [8] 于功臣,越文,何文彪. 空气悬架系统不同气路管径对车辆平顺性的影响[J]. 客车技术,2017(6):11-13.
- [9] 崔晓利. 车辆电子控制空气悬架理论与关键技术研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [10] 杨国库. 客车空气悬架高度控制阀种类及布置[J]. 客车技术与研究,2010,32(5):42-43.

(上接第53页)

参考文献:

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车用动力蓄电池安全要求:GB/T 38031—2025[S]. 北京:中国标准出版社,2025:1-40.
- [2] 秦玉英,曹俊杰. 电池包联合工况振动疲劳仿真分析[J]. 电源技术,2023,47(12):1579-1582.
- [3] 秦玉英,曹俊杰. 新能源动力电池包模态分析及优化设计[J]. 电源技术,2023,47(8):1060-1063.
- [4] 徐婧雨,陈冲,段术林,等. 基于HyperMesh的客车底架后

桥段结构的优化分析[J]. 2024,46(5):34-37.

- [5] 杨权,马小芹,陈志洋,等. 基于路谱载荷的副车架疲劳损伤分析与优化[J]. 汽车实用技术,2024,49(21):83-87.
- [6] 郑凯铭,徐小彬. 基于Adams/ncode整车车架疲劳寿命分析[J]. 内燃机与配件,2024(7):9-11.
- [7] 张烈明,崔震,郭继文,等. 基于台架试验数据的铸件疲劳寿命分析与应用[J]. 汽车工艺与材料,2024(7):49-53.
- [8] 李军,毕朋飞,邓磊,等. 基于有限元仿真的汽车电池包上箱体开裂分析[J]. 科技和产业,2025,25(19):69-75.