

# 橡胶空气弹簧扭摆性能试验装置设计与研究

林达文<sup>1,2</sup>, 彭立群<sup>1,2</sup>, 黄涛<sup>1,2</sup>, 王进<sup>1,2\*</sup>

(1. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007;  
2. 湖南省轨道交通高分子材料及制品质量监督检验中心, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对橡胶空气弹簧扭摆刚度和疲劳试验。分析了空气弹簧结构及标准, 设计了一种新型的空气弹簧扭摆试验装置, 并与现有空气弹簧扭摆试验装置进行分析对比, 重点应用新型试验装置研究了不同水平剪切位移、不同垂向载荷对扭摆性能的影响、不同加载次数对疲劳性能的影响。结果表明: 新型试验设计结构合理, 满足空气弹簧扭摆试验要求, 水平剪切位移增加, 扭摆刚度变小, 垂向载荷对扭摆刚度影响不明显, 研究成果为空气弹簧的研发和试验起指导作用。

**关键词:** 空气弹簧; 扭摆性能; 试验研究

**中图分类号:** TQ330.73

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-797X(2025)07-0069-07

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.07.014

空气弹簧是在橡胶气囊所围成的密封容器中加入压缩空气, 利用空气的可压缩性实现隔振效果的一种非金属减振器。由于其具有重量轻, 内摩擦小, 可调非线性动、静刚度和阻尼特性等特点, 广泛应用于轨道车辆、汽车、工程机械及船舶等领域。随着我国高铁技术的快速发展, 高速动车最快运营已达到 380 km/h, 如此高的车速无疑对车辆减振悬挂装置提出了更高的要求, 目前高速动车组的二系悬挂普遍采用橡胶空气弹簧系统, 这种气动悬挂装置不但具有高度恒定、固有频率恒定、自振频率低等优异的垂向性能, 而且可取消转向架的摇动台结构, 提高车辆的横向动力学特性。

在我国 30% 的线路为曲线, 其中曲线半径  $\leq 600$  m 的占 50%, 空气弹簧作为动车组转向架关键的部件, 为提高车辆的舒适性和安全性发挥了重要的作用, 空气弹簧通过曲线轨道时, 除承受来自垂向车体的静载, 横向会同时承受水平和扭转位移<sup>[1-7]</sup>。而现有空气弹簧二维加载试验机、扭转刚度试验机、机械式扭摆试验机只能对其进行剪切、扭转或定位移的扭摆疲劳试验, 无法进行复合承载条件下的扭剪刚度试验。文章通过研制一种空气弹簧扭剪试验方案, 不仅对空气弹簧进行了扭剪刚度试验, 而且研究了不同加载工况对空气弹簧扭摆性能的影响, 为改善车辆动力学性能提

供理论依据。

## 1 空气弹簧

空气弹簧主要由气囊和辅助弹簧构成, 利用气囊内压缩空气反力作为弹性恢复力, 安装在转向架与车体之间, 起缓冲、减振、隔振及自动调整车体承载面高度的作用, 详见图 1。

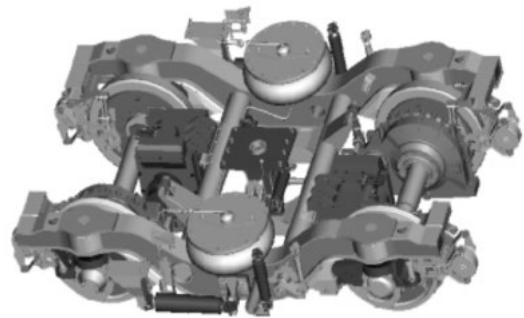


图 1 空气弹簧安装

空气弹簧主要由上盖板、橡胶气囊、辅橡胶弹簧组成, 按橡胶堆结构分为锥形簧、圆柱橡胶堆和内置橡胶堆 3 种, 详见图 2。

**作者简介:** 林达文 (1974-), 硕士, 教授级高工, 长期从事轨道交通减振降噪高分子材料及制品的测试技术工作。

\* 为通讯作者



图2 空气弹簧结构

## 2 试验

### 2.1 试验方案

轨道客车空气弹簧试验主要参照原铁道行业标准 TB/T2841-2010《铁道车辆空气弹簧》、现铁总标准 TJ/CL279-2013《动车组空气弹簧》、欧洲标准 EN13597-2003《铁路用橡胶悬挂元件—空气弹簧用橡胶气囊》，具体试验按《某型动车组空气弹簧试验大纲》执行。

### 2.2 试验方案

液压式改进前如图3：分为滑动摩擦式和滚动摩擦式2种，其中滑动摩擦式散热慢，疲劳寿命低，适用于静态性能试验。而疲劳试验一般采用滚动摩擦式，试验设计两个液压油缸同时对空气弹簧分别施加垂向和横向载荷进行试验，所述的垂向油缸从垂直方向对空气弹簧施加加载模拟车体载重的垂向载荷，横向油缸通过一种悬浮滑台与耐磨条对磨的摆臂机构对空气弹簧施加弧线位移进行扭摆疲劳试验。这种方式疲劳寿命高、试验数据可采集，不仅可以对空气弹簧进行扭摆疲劳试验，而且还可对进行扭摆刚度试验。

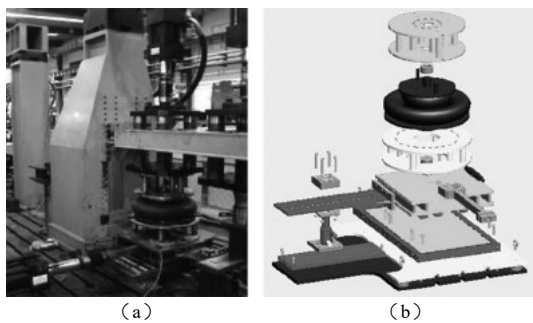


图3 液压加载滚动摩擦式

液压式改进后：设计将空气弹簧安装于一个新型液压式驱动的扭摆试验装置中心（如图4，通过垂直加载装置调节中间移动平台实现空气弹簧工作高度的调节，充入压缩气体使空气弹簧达到工作载荷状态，利用水平油缸推动新型交叉式双层导轨加轴承结构的扭摆工作平台对空气弹簧施加扭摆位移，所述的摆扭位移包括模拟车辆实际工况的横向、纵向和扭转位移，通过力臂调节装置实现转动半径的调节，利用偏置位移调节装置对空气弹簧施加偏置位移，共同实现空气

弹簧在垂向加载工况下的扭摆疲劳试验。



图4 新型扭摆试验装置

### 2.3 试验装置

该试验机主要由控制测量系统、液压油源及管路系统、液压作动油缸、伺服阀、压力传感器、位移传感器、承载试验机架和滑动平台、加载伺服作动器，工装，反力架，伺服泵站及油源管路系统，冷却系统，伺服控制系统及数据采集系统等部分组成（如图5）。考虑到疲劳试验机的特点主要为可靠，使用周期长，为了减少不必要的开销试验前的调整工作我们采用手动的方式来进行，比如说偏转位移的调整，偏转半径的调整等。实际的疲劳试验系统工作中只通过1个加载伺服作动器产生的力来模拟在不同的路况情况下所受到的载荷力及位移变化，从而可以测试空气弹簧的疲劳寿命。因为控制运动部分的油缸进行了简化，结构也较为简单，因此可靠性也大大的得到提高。

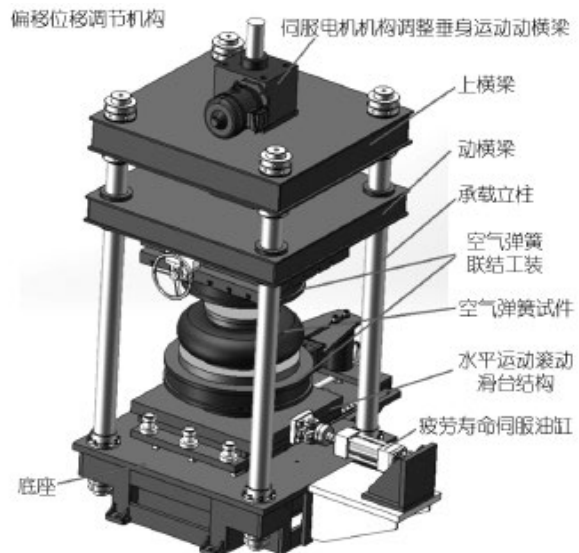


图5 总体结构

上横梁设计尺寸 1 600 mm×1 580 mm×250 mm 设计重量, 1.8 t 加工要求; 立柱联结与中间丝杠联结部分上下表面。动横梁设计尺寸, 1 600 mm×1 580 mm×180 mm, 设计重量, 1.56 t 加工要求。立柱联结与中间丝杠联结部分上下表面, 四周与立柱联结部分镶嵌导向铜套或伺服油缸用的导向套, 如图 6。

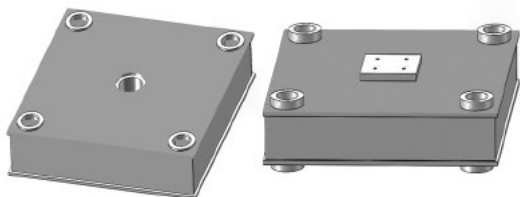


图 6 上横梁、动横梁

底座设计尺寸: 1 600 mm×1 580 mm×420 mm 设计重量: 2.7 t; 加载立柱设计资料: 设计尺寸: 直径 145 mm, 长度: 2 800 mm, 设计重量: 0.36 t (不含螺母) 0.5 t (含螺母) 调制淬火, 表面镀铬。

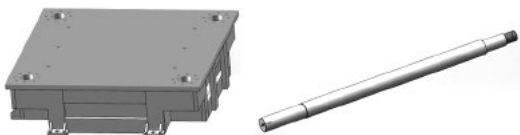


图 7 底座、立柱

滚动装置: 设计尺寸: 1 020 mm×1 020 mm 设计重量: 2.15 t 调制淬火, 表面镀铬对于疲劳寿命试验台来讲 (图 8), 主要的就是运动部件的设计, 包括运动导轨的设计 (图 9) 以及伺服油缸的设计 (图 10, 图 11), 主要为伺服油缸的运动方向的导轨要特殊设计, 垂直于伺服油缸的水平运动由于位移较小可以选择购买标准的直线导轨, 下面为运动滑台的方案介绍: 导轨滑块安装板: 直线运动导轨直接安装到底座上, 因此底座需要精密加工来满足直线导轨的精度要求, 直线运动滑块需要导轨滑块安装板过度一下, 否则不好安装与调整, 螺栓需要在过渡板的上方联结滑块, 然后安装棍棒下板。棍棒下板与棍棒上板: 需要较高的加工精度和硬度, 表面硬度调制淬火后硬度要达到洛氏 55 度以上, 这样从使用寿命及系统精度都有很大的提高。钢棒及框架: 采用轴承钢, 棍子表面镀铬, 表面硬度要达到洛氏 60 度即可满足试验要求。另外对于关键的运动部件—伺服油缸的设计, 活塞杆设计的直径为 100 mm, 这样也大大的提高了油缸的抗侧向能力及使用寿命, 油缸采用特殊设计概念, 详见下面

的伺服油缸设计资料。

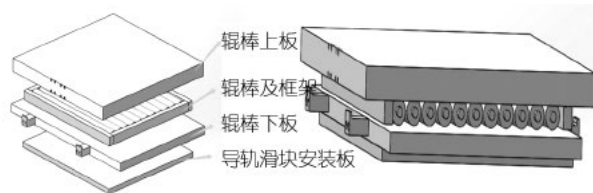


图 8 滑台结构

其它工装及其结构件设计资料: 其它工装由伺服电机, 减速机, 运动丝杠, 10 t 载荷传感器 (4 个), 偏移调整机构, 偏转半径调节装置, T 型槽板, 空气弹簧联结工装, 推力轴承, 压力传感器等组成;

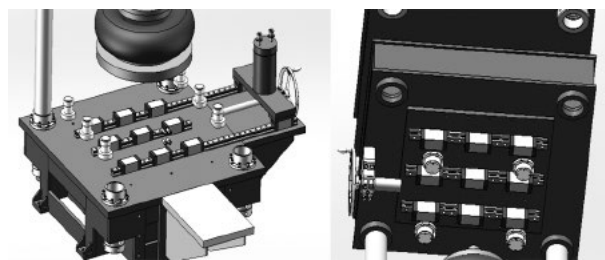


图 9 导轨结构

伺服油缸的设计: 作动器在设计上主要根据系统的总体性能要求来确定作动器的间隙、摩擦、泄漏等诸多参数。在此基础上, 对执行机构的基本结构和确定的各参数进行综合调整, 优化设计, 以获得系统所需的最佳谐振频率及液压固有频率。这样可以改善机构谐振与液压系统的耦合所造成的低频小阻尼综合谐振状态, 提高系统的频响和工作稳定性。此外, 产品还设置了消除间隙固紧装置和可调间隙万向联接装置, 从而可降低高频拉压试验下的冲击噪声, 并且改善试验波形。采用多级柔性支承组合式密封结构, 大大降低了启动摩擦力, 从而获得了优质的低速性能。出于对产品可靠性的考虑, 我们采用自润滑轴承来替代静压轴承, 这便在保证作动器仍能承受高频振动及大侧向力性能要求的同时, 避免了后者因工艺难度大且其节流孔易被堵塞等不利因素, 从而显著地提高了产品的可靠性水平。

FTS 电液伺服作动器由于其独特的设计, 具有良好的密封性能, 在 28 MPa 压力下保证不会有任何泄漏, 这已被广大用户所确认。活塞杆的密封是用户最为关心的问题, 因此设计上采用目前国际上最为先进的组合密封, 并且有多级密封。

第一级为高压密封。其泄漏量与压力已降至很微小泄漏的油液正好用于抗侧向力轴承的润滑。第二级

为低压密封。尺寸及结构与第一级高压密封一致。在两级密封之间设置零回油管，微量的低压油引向油箱，这为第二级的密封提供了极大的裕度。在第二级低压密封外，还设置了防尘圈，FTS 作动器的防尘圈采用双唇口，外唇口有防尘作用，内唇口作为第三级密封。在密封设计方面采取上述措施，保证了活塞杆的零泄漏。

活塞杆的机械加工是属于超精加工，其工艺非常考究。活塞杆上的硬铬电镀层经过磨削与抛光，其粗糙度要求达到  $Ra0.2\mu$ ，活塞杆表面形成镜面，这是保证活塞杆不泄漏的重要条件。

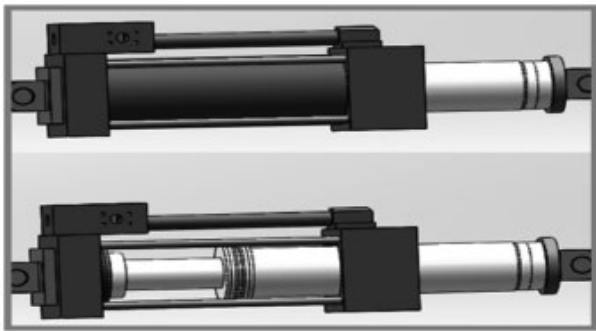


图 10 油缸外部结构

伺服油缸特点：用低摩擦系数、高耐磨性的非金属材料作支承导向环将金属与金属间的摩擦副改成金属与非金属耐磨材料的摩擦副，所以耐磨性好；活塞杆支承长，加上有非金属支承导向环，可承受一定的侧向力；二道新型的组合密封，一道为高压密封，一道为低压密封，二道密封间有抽漏吸管，无外漏，内部串油量近乎零；动压力小  $> 0.3$  MPa，无低速爬行与滞涩现象，运动灵活；积木式结构，结构紧凑，刚性好，便于使用维修，工作稳定可靠；输出端采用无间隙球铰连接，能自动定心，减小铰接中产生的附加侧向力和消除非线性环节，当长期磨损后，关节轴承径向游隙经过调整亦能消除；伺服阀直接装在缸体上，容腔效应小，固有频率高；装传感器有防扭的导向装置，传感铁芯运动不受外来干扰。

伺服油缸的选型：为了减少油缸的长度，油缸需要特殊设计。考虑到以后适合更多的试验内容伺服油缸出力选择为静态最大载荷 50 kN，行程按照  $\pm 150$  mm 来设计，设计工作压力 21 MPa 结构：双出杆（特殊设计），双作用内置位移传感器号：德国 NOVO 伺服阀型号：MOOG 缸径 / 杆 ( $D/d$ ) 115 mm/100 mm 内径 ( $d_1$ ) 56 mm，行程： $\pm 150$  mm 最高工作压力：21 MPa。

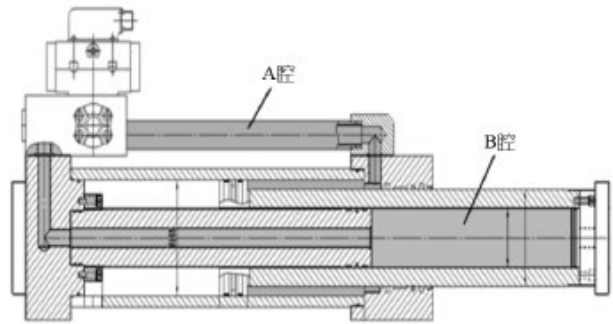


图 11 油缸内部结构

### (1) 最大试验力计算

油缸工作面积：

$$S_{\text{拉腔}} = \frac{\pi(D_2^2 - d_2^2)}{4} = \frac{\pi(11.5^2 - 10^2)}{4} = 25.32 \text{ cm}^2$$

油缸输出最大载荷：（压力设定为 210 kg/cm<sup>2</sup>）

$$P_2 = 210 \text{ kg/cm}^2 \times 25.32 \text{ cm}^2 = 53 \text{ kN} \text{（满足技术要求）}$$

（

$$S_{\text{拉腔}} = \frac{\pi(d_1^2)}{4} = \frac{\pi(5.6^2)}{4} = 24.63 \text{ cm}^2$$

油缸输出最大载荷：（压力设定为 210 kg/cm<sup>2</sup>）

$$P_2 = 210 \text{ kg/cm}^2 \times 26.43 \text{ cm}^2 = 55.5 \text{ kN} \text{（满足技术要求）}$$

）

### (2) 最大行程计算

油缸活塞行程  $L=300$  mm，满足行程  $\pm 150$  mm 要求。

（

### (3) 动态指标的计算

当以正弦波做疲劳加载实验时，按照下列公式来计算频响：

$$Q = 0.377Afy$$

式中：

$A$ — 活塞面积，cm<sup>2</sup>；

$f$ — 频率，Hz；

$y$ — 活塞振幅，cm；

$Q$ — 系统流量，L/min。

按照招标文件要求 1 Hz 时振幅  $\pm 80$  mm（最大速度工况）计算：

$$Q = 0.377Afy$$

$$= 0.377 \times 25.32 \times 1 \times 8 = 76.32 \text{ LPM}$$

伺服阀选择由 609 公司生产的 FF113-150 伺服阀。该阀在 7 MPa 阀压降时可以输出流量 150 LPM，该阀在 2 MPa 阀压降时可以输出流量 80 LPM，因此油缸的动载大大增加，可以按照负载压力 19 MPa 来计算为：46 kN 选择该伺服阀还有一个原因是该伺服阀配有外置的油滤，可以提高伺服阀的抗污染能力，使系统工作更

加可靠，小流量的伺服阀一般情况下更容易堵塞。

## 2.4 结构创新

新型的双层滑台加推力轴承结构的三向拟合扭摆试验装置及方法：现有空气弹簧扭摆疲劳大都是设计在扭摆工作台的下面安装多组滚动轮，通过定长力臂绕转动支点形成固定半径的弧线运动来实现扭摆加载试验。这种方式不仅摩擦力大，而且滚动轮的疲劳寿命无法满足试验要求，需定时维护和保养，试验成本高、耽误试验进度。所述的一种新型的双层导轨加推力轴承结构的三向拟合扭摆试验装置及方法：是指设计一种下层由自润滑功能的直线导轨、上层由滚动滑台组成的双层加载装置，其中上下滑台以交叉 90 度方式安装，同时在上层滚动滑动的中心安装有单向推力轴承，然后整个装置通过转动力臂固定于左端的转动支点，通过下导轨实现小的纵向位移加载、上层滚动滑台实现大的横向位移加载，利用上置单向推力轴承实现扭转角度加载，进而通过力臂装置实现对空气弹簧的横向、纵向和扭转三向拟合加载的扭摆疲劳试验，这种结构最大的创新点是分别利用直线导轨、滚动滑台和推力轴承进行组合，充分发挥各自的优点：纵向小位移产生的摩擦力和磨损小，这种工况由直线导轨承担；横向大位移产生的水平剪切力大，也是试验中最主要的加载方式，同时垂向还承受恒定的压力，这种主要工况设计滚动摩擦的方式承担，进而达到减小磨损提高疲劳寿命和试验精度的目的；同时为了兼顾扭转加载的试验要求，设计上滑台装置中心安装单推力轴承，这种结构不仅能承受压力，同时还可承受扭转角度，进而完美解决空气弹簧横向、纵向和扭转三个方向加载存在的技术难点，最终实现对空气弹簧的扭

摆疲劳试验。

新型的液压式空气弹簧扭摆加载试验装置及方法：传统的空气弹簧扭摆疲劳试验大都是采用机械传动方式进行试验，主要分偏心轮加载和电动缸加载 2 种，其中偏心轮机构是在电机的作用下通过调节力臂偏移转动中心的位移来实现横向加载，这种方式一方面试验精度低、另一方面存在机械摩擦、疲劳寿命难以满足要求。电机缸是指通过电机带动丝杆正反转来施加横向位移，这种方式由于丝杆长期的正反转，同样存在磨损和摩擦力，疲劳寿命还是难以满足试验要求。所述的一种新型的液压式空气弹簧扭摆加载试验装置及方法：是指设计一种新型的前后端带铰接装置的液压油缸代替偏心轮机构和电动缸，以液压的方式施加横向位移，通过铰接装置来消除侧向摆动位移，这种方式消除了机械磨损，大大提高了疲劳寿命，进而满足疲劳试验要求。

新型的空气弹簧转动力臂长度调节装置及方法：现有空气弹簧转动力臂长度调节需要人为推动工作平台和测量力臂长度进行调节，存在操作难度大、操作不便等缺点。所述的一种新型的空气弹簧转动力臂长度调节装置及方法：是指在力臂、工作平台和转动支点下端安装直线滑动导轨，在力臂侧面设计有长度标尺，同时在转动支点处设计有关节轴承代替原有销孔连接结构。通过转动端面调节手柄促使用平台在支点之间自由滑动，利用长度标尺准确测量调节位移确定力臂的臂长，这种方式操作方便，调节位移更准确。

## 2.5 分析计算

为了验证减振装置的静态性能是否满足要求，现对关键承载件进行分行计算，并与试验结果进行比对。

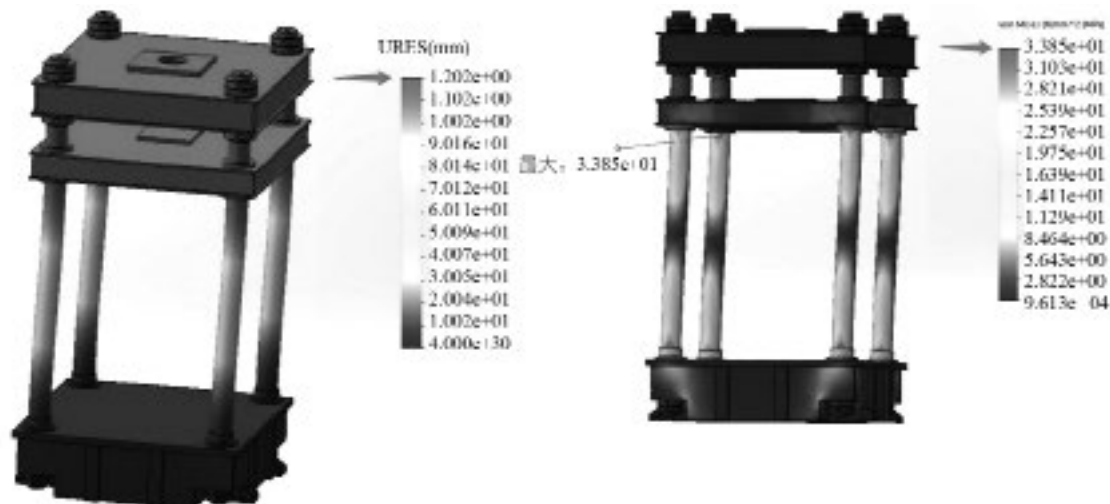


图 12 机架应力 / 变形云图

### 3 结果与讨论

#### 3.1 不同扭摆位移对扭摆刚度的影响

##### 3.1.1 试验方法

空气弹簧扭摆试验原理如图 13 所示, 设计空气弹簧扭转力臂长 1 m, 垂向载荷分别为 62 kN、75 kN, 水平剪切位移分别为  $\pm 10$  mm、 $\pm 20$  mm、 $\pm 30$  mm、 $\pm 50$  mm, 加载频率 0.1 Hz, 连续加载 3 个循环, 记录第 3 个循环载荷与变形曲线。

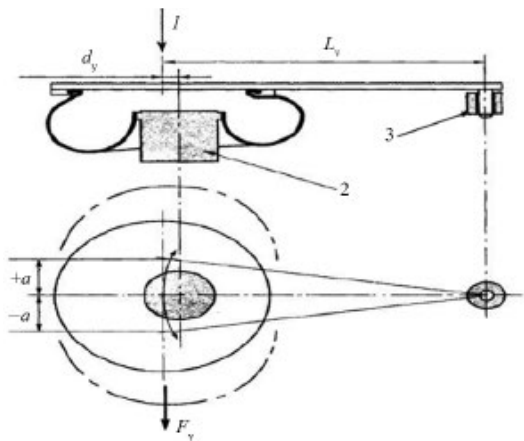


图 13 扭摆试验原理

##### 3.1.2 结果及分析

图 14 是空气弹簧垂向载荷 65 kN, 在相同转动半径, 不同水平剪切位移下的扭摆刚度曲线, 随着剪切位移的增加载荷在递增, 滞回曲线的面积表示空气弹簧在扭摆运动过程中的耗能, 耗能大小与面积成正比, 曲线斜率代表空气弹簧扭摆刚度, 扭摆刚度与曲线斜率成正比, 结果表明: 水平剪切位移增加, 扭摆刚度变小。图 15 是空气弹簧垂向载荷 75 kN, 在相同转动半径, 不同水平剪切位移下的扭摆刚度曲线, 结果表明: 水平剪切位移增加, 扭摆刚度变小。

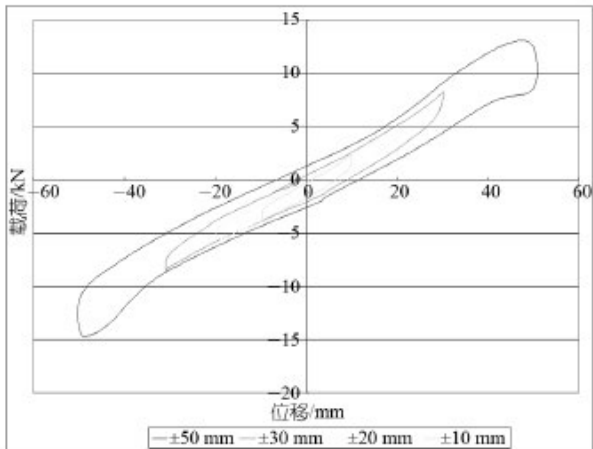


图 14 垂向载荷 62 kN 水平载荷与变形曲线

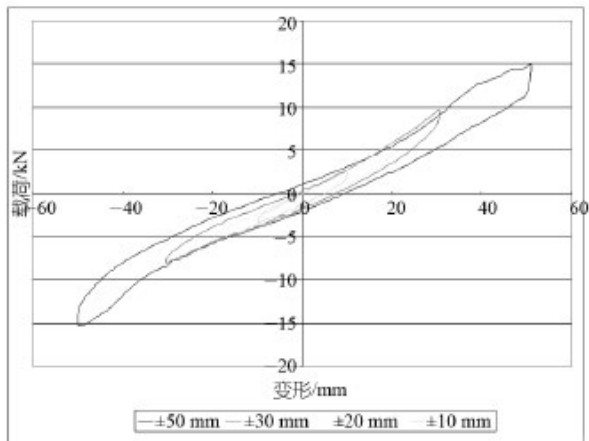


图 15 垂向载荷 75 kN 水平载荷与变形曲线

#### 3.2 不同垂向载荷对扭摆刚度的影响

##### 3.2.1 试验方法

设计空气弹簧扭转力臂长 1m, 垂向载荷分别为 62 kN、75 kN、88 kN、92 kN, 水平剪切位移为  $\pm 10$  mm 加载频率 0.1 Hz, 连续加载 3 个循环, 记录第 3 个循环载荷与变形曲线。

##### 3.2.2 结果及分析

图 16 是空气弹簧相同水平剪切位移, 相同转动半径, 不同垂向载荷下的扭摆刚度曲线, 结果表明: 空气弹簧垂向载荷增加,

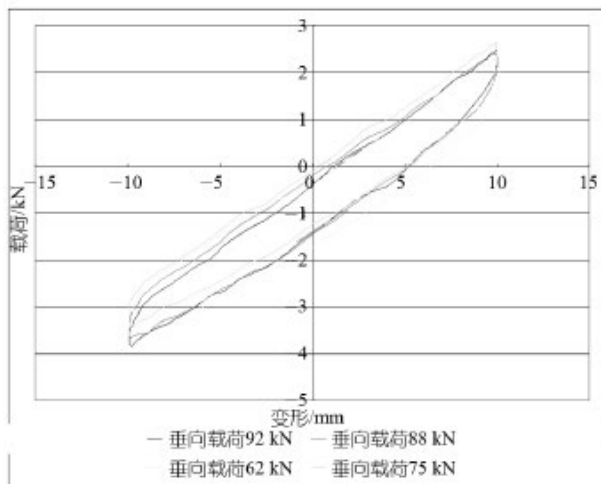


图 16 不同垂载荷水平载荷与变形曲线

扭摆刚度变大, 但垂向载荷对扭摆刚度的影响不明显。

#### 3.3 扭摆疲劳试验

##### 3.3.1 试验方法

设计空气弹簧扭转力臂长 1 m, 垂向载荷分别为 75 kN 水平剪切位移为  $\pm 50$  mm 加载频率 1 Hz, 连续

加载 100 万个循环，试验过程中观察空气弹簧泄漏情况、橡胶止口磨损情况。

### 3.3.2 结果及分析

100 万次疲劳试验后空气弹簧未出现漏气现象，橡胶止口无磨损，试验过程中试验机无异常和振动现象，试验结果一方面表明空气弹簧具有较好的扭摆疲劳性能，另一方面表试验机结构设计合理，满足空气弹簧扭摆刚度和疲劳试验要求。

## 4 结束语

(1) 分析了空气弹簧结构及标准，设计了一种新型的空气弹簧扭摆试验装置，并与现有空气弹簧扭摆试验装置进行分析比对，试验设计为空气弹簧的研发和试验起指导作用。

(2) 结果表明：新型试验设计结构合理，满足空

气弹簧扭摆试验要求，水平剪切位移增加，扭摆刚度变小，垂向载荷对扭摆刚度影响不明显。

### 参考文献：

- [1] 林达文，王进，轨道车辆橡胶弹性元件可靠性试验台，机车电传动，2012 年第 3 期：74-76.
- [2] 林达文，彭立群，隔震橡胶支座力学性能试验研究，铁道建筑，2014 年第 2 期：30-32.
- [3] 林达文，彭立群，轨道客车空气弹簧振动试验台的设计及应用研究，机车电传动，2015 年第 3 期：86-89.
- [4] 林达文，彭立群，轨道客车空气弹簧扭转试验台的设计及应用研究，机车电传动，2016 年第 4 期：96-98.
- [5] 林达文，彭立群，风机齿轮箱弹性支撑试验台的研制及应用，特种橡胶制品，2017 (4)：45-49.
- [6] 林达文，彭立群，高铁桥梁液阻阻尼器性能试验研究，铁道技术监督，2021 年第 6 期：27-31.
- [7] 王进，谭帅霞，林达文，轨道交通橡胶弹性元件配方分析和性能试验技术 [M]. 北京：中国铁道出版社，2013.

## Design and research of rubber air spring torsion performance test device

Lin Dawen<sup>1,2</sup>, Peng Liqun<sup>1,2</sup>, Huang Tao<sup>1,2</sup>, Wang Jin<sup>1,2\*</sup>

(1. Zhuzhou Times New Material Technology Co. LTD., Zhuzhou 412007, Hunan, China;  
2. Hunan Rail Transit Polymer Materials and Products Quality Supervision and Inspection Center, Zhuzhou 412007, Hunan, China)

**Abstract:** This article studies the torsional stiffness and fatigue characteristics of rubber air springs. Firstly, an in-depth analysis was conducted on the structure and related standards of air springs. On this basis, a new type of air spring torsion pendulum test device is designed and compared with the existing test device. Through a new experimental device, the influence of different horizontal shear displacements and vertical loads on torsional performance, as well as the influence of different loading cycles on fatigue performance, were mainly explored. The research results indicate that the structural design of the new experimental device is reasonable and fully meets the requirements of the air spring torsion pendulum test. As the horizontal shear displacement increases, the torsional stiffness shows a decreasing trend, while the effect of vertical load on torsional stiffness is not significant. This research provides theoretical guidance for the development and testing of air springs.

**Key words:** air spring; torsional performance; experimental study

(R-03)

