

空气弹簧及其控制系统

朱德库 刘晓杰 马 平 著

山东科学技术出版社

内 容 简 介

空气弹簧是利用空气的可压缩性来缓和振动和冲击的一种减振、防振装置。全书共分九章，主要介绍了空气弹簧的发展历史、工作原理及钢弹簧无法比拟的优点；空气弹簧理论公式的推导、计算程序和设计方法；空气弹簧的分类；空气弹簧的控制系统以及空气弹簧的应用；同时介绍了几种高度控制阀的原理、结构和试验方法，简要介绍了空气弹簧的标准以及节流孔的计算等。书中的理论公式部分系综合了国内外的全部公式，加以充实，并提出了新的论点，曾在国内和日本发表，已被日本收入“铁道技术文献抄录”之中。本书内容深入浅出，理论联系实际，论证详细，便于阅读，可供从事空气弹簧理论研究、设计与制造的广大科技人员学习参考，也可作为高等院校机械工程广大师生以及研究生的参考教材。

“泰山科技专著出版基金”顾问、评审
委员会、编辑委员会

顾问 宋木文 伍 杰 苗枫林

评审委员会（以姓氏笔画为序）

卢良恕 吴阶平 杨 乐 何祚庥

罗沛霖 高景德 唐敖庆 蔡景峰

戴念慈

编辑委员会

主任委员 杜秀明 石洪印

副主任委员 梁 衡 邓慧方 王为珍

委 员（以姓氏笔画为序）

邓慧方 王为珍 卢良恕 石洪印

刘韶明 吴阶平 杨 乐 何祚庥

杜秀明 罗沛霖 林凤瑞 唐敖庆

高景德 梁 衡 梁柏龄 蔡景峰

戴念慈

我们的希望(代序)

进行现代化建设必须依靠科学技术。作为科学技术载体的专著，正肩负着这一伟大的历史使命。科技专著面向社会，广泛传播科学技术知识，培养专业人才，推动科学技术进步，对促进我国现代化建设具有重大意义。它所产生的巨大社会效益和潜在的经济效益是难以估量的。

基于这种使命感，自1988年起，山东科学技术出版社设“泰山科技专著出版基金”，成立科技专著评审委员会，在国内广泛征求科技专著，每年补贴出版一批经评选的科技著作。这一创举已在社会上引起了很大反响。

但是，设基金补助科技专著出版毕竟是一件新生事物，也是出版事业的一项改革。它不仅需要在实践中不断总结经验，逐步予以完善；同时，也更需要社会上有关方面的大力扶植，以及学术界和广大读者的热情支持。

我们希望，通过这一工作，高水平的科技专著能够及早问世，充分显示它们的价值，发挥科学技术作为生产力的作用，不断推动社会主义现代化建设的发展。愿“基金”支持出版的著作如泰山一样，耸立于当代学术之林。

泰山科技专著评审委员会

1989年3月

前 言

空气弹簧技术是弹簧技术领域中的一个分支。

国外应用空气弹簧已有近半个世纪的历史，目前在工业发达的国家，空气弹簧已获得普遍的应用。我国从1957年就开始对空气弹簧进行开发，但由于时断时续，未能取得应有的进展，直到1965年，空气弹簧才开始大批量地应用在地铁电动客车上。由于空气弹簧具有钢弹簧无法比拟的优点，目前在许多科研部门、工业部门正在取得广泛的应用。

本书主要以应用在地铁电动客车上的空气弹簧及其控制系统为基础，对空气弹簧的理论研究、计算、结构设计以及各种试验进行了探讨和论证。书中介绍了空气弹簧的发展历史和工作原理，论证了空气弹簧的各种特点；统一了回转体型各种空气弹簧垂直刚度和横向刚度的计算公式，特别是其中的三个系数；并对空气弹簧的分类提出了新的见解和标示方法，总结了空气弹簧的计算和设计程序；同时，着重介绍了控制系统几种高度控制阀的原理、结构和试验方法；简要介绍了国内外仅有的空气弹簧标准及空气弹簧在其他工业部门的应用实例以及节流孔的计算等。

本书是作者在20余年中对空气弹簧及其控制系统的理论探讨、研究以及实际设计、试验等工作的总结。我们抛砖引玉，将本书奉献给读者，竭诚希望共同深入研究，扩大应用领域，使空气弹簧技术在我国飞速发展，以期早日跻身于世界之

林。

本书第一、二、三、四、八章由朱德库、马平编著，第五、六、七、九章由刘晓杰撰写，并由朱德库负责组织、审核和整理。

由于我们的水平所限，书中的缺点和错误在所难免，敬希读者批评指正。

著 者

1989年3月

目 录

第一章 概述	1
一、空气弹簧的发展概况	1
二、空气弹簧系统工作原理	6
第二章 空气弹簧的特点	9
一、改善车辆振动性能，提高车辆运行品质	9
二、简化转向架结构，降低车辆自重	14
三、车辆运行安全可靠，便于连挂	15
四、空气弹簧内的空气压力直接反应簧上重量	16
五、空气弹簧容易制造，寿命长，应用广泛	17
第三章 空气弹簧的刚度公式	18
一、空气弹簧角度参数的规定	18
二、空气弹簧垂直刚度公式	19
三、空气弹簧的横向刚度公式	42
四、空气弹簧刚度计算公式的比较	49
第四章 空气弹簧的分类	53
一、目前的分类方法	53
二、对空气弹簧分类的建议	55
第五章 空气弹簧的设计	58
一、空气弹簧刚度公式的论证	58
二、空气弹簧的计算程序	75
三、空气弹簧的结构设计	88
四、空气弹簧设计举例	95

第六章 空气弹簧的控制系统	105
一、空气供给系统	105
二、高度控制阀	109
三、安全装置	131
第七章 空气弹簧的标准及试验	138
一、空气弹簧的标准	138
二、空气弹簧试验	146
三、安装空气弹簧的车辆试验	151
四、电磁阀、压差安全阀、压力开关的试验	155
五、机械阀试验台	163
第八章 节流孔直径的计算	165
一、空气弹簧理论概要和假定	165
二、理论公式	168
三、关于稳定状态的解法及空气弹簧刚度与衰减系数	170
四、由钢轨产生的强制变位与舒适度标准	174
五、单自由度空气弹簧的振动	176
六、二自由度空气弹簧的振动	182
七、节流孔直径的计算	189
第九章 空气弹簧在其他方面的应用	199
一、应用情况	199
二、应用示例	200
三、其他应用实例	206

第一章 概 述

一、空气弹簧的发展概况

铁道车辆在运行过程中，应在保证绝对安全的情况下，尽量简化结构，减轻车辆自重，降低车辆重心，提高运行速度。通过改进车辆的弹簧悬挂系统，可以降低车辆的自振频率，改善运行品质。目前，在车辆转向架的中央悬挂部位已越来越普遍地采用空气弹簧。

美国自 1947 年，在普尔曼车上首先采用空气弹簧，后来在意大利、英国、法国等许多欧洲国家对空气弹簧做了大量研究工作，装有空气弹簧的转向架相继出现。1955 年，日本国家铁路技术研究院机车车辆动力试验室，对在车辆上安装空气弹簧进行了系统的研究，为设计空气弹簧提供了宝贵的基本数据；同时，对装有空气弹簧的车辆进行了一系列的试验工作。目前，日本不仅在铁路客车上成功地装用了多种型式的空气弹簧，而且在货车上也予以采用。

在日本，装有空气弹簧的转向架，不仅数量多，而且型式多。空气弹簧绝大多数用于中央悬挂，轴箱弹簧为螺旋钢弹簧。起初只安装三曲囊式空气弹簧，改善车辆的垂直振动性能，横向复原仍采用摇动台。为了取消复杂、笨重的摇动台结构，于是研制出了约束膜式空气弹簧和自由膜式空气弹簧。这类空气弹簧不仅能承受垂直振动，而且可以利用其具有良好的

横向刚度的优点来承受横向振动；同时，可以与牵引拉杆两端部的弹性原件共同作为横向复原装置。牵引拉杆一端连接摇枕，另一端连接在构架（对心盘支重的转向架）上，或连接在车体（对旁承支重的转向架）上。牵引拉杆两端的弹性元件的横向复原力，对空气弹簧来说，是比较小的。

有摇枕的转向架，几乎全部采用牵引拉杆。牵引拉杆安装在转向架的两侧，与下心盘或中心销成对称布置。牵引拉杆主要传递纵向牵引力，因此，空气弹簧几乎不承受纵向力。

1957年，我国第一机械工业部汽车研究所，对空气弹簧做了大量的试验研究工作，并装在汽车上试用，积累了一些经验。1958年，沈阳机车车辆厂在试制的“东风号”客车上，首先装用空气弹簧，继由天津车辆段和天津橡胶研究所共同研制出一种双曲囊式空气弹簧(图 1—1)，其有效直径为 460 mm 时，高度为 184 mm，最大外径为 520 mm。这种空气弹簧曾先后在天津车辆段、北京车辆段，装在 101 型、201 型和 202 型转向架上，以代替叠板弹簧。实践证明：这种空气弹簧的垂直振动性能具有良好的运行品质。但是，由于没有采用高度控制阀，在列车返段时，只好采用人工充气；同时，泄漏问题也没有得到很好的解决，所以没有继续应用。

1959年，四方机车车辆厂在新造低重心车辆的转向架上，1960年在新造双层客车的转向架上，又安装了双曲囊式空气弹簧。但是由于车辆自重较大，空气弹簧的有效承压面积不够，同时受到列车管压力的限制，支承不了簧上重量，只好与螺旋钢弹簧联合使用(图 1—2、图 1—3)，并设计了机械式高度控制阀，对空气弹簧的高度进行自动控制；同时，在垂直振动性能方面也取得了比只用钢弹簧更好的运行品质，受到旅客好评。

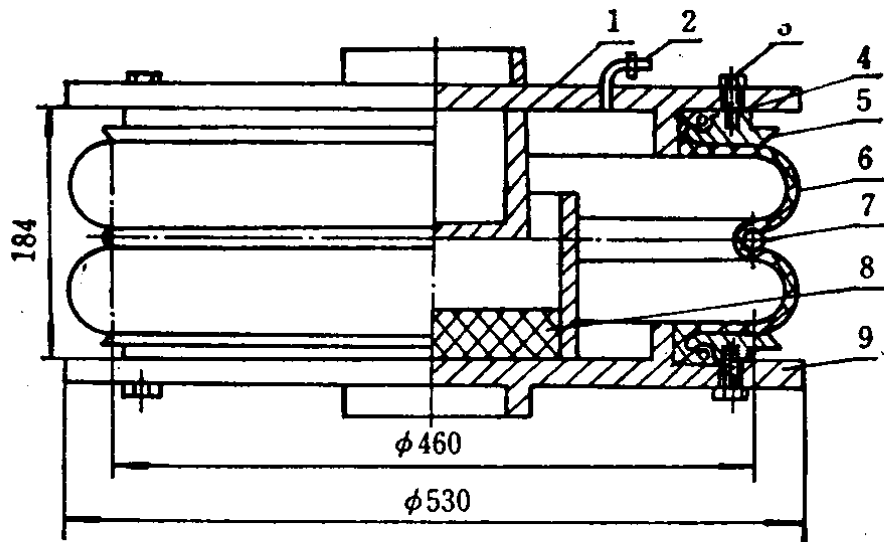


图 1—1 双曲囊式空气弹簧组成

1. 上盖板; 2. 气嘴; 3. 螺钉; 4. 钢丝圈; 5. 压环; 6. 橡胶囊;
7. 中腰环; 8. 橡胶缓冲垫; 9. 下盖板

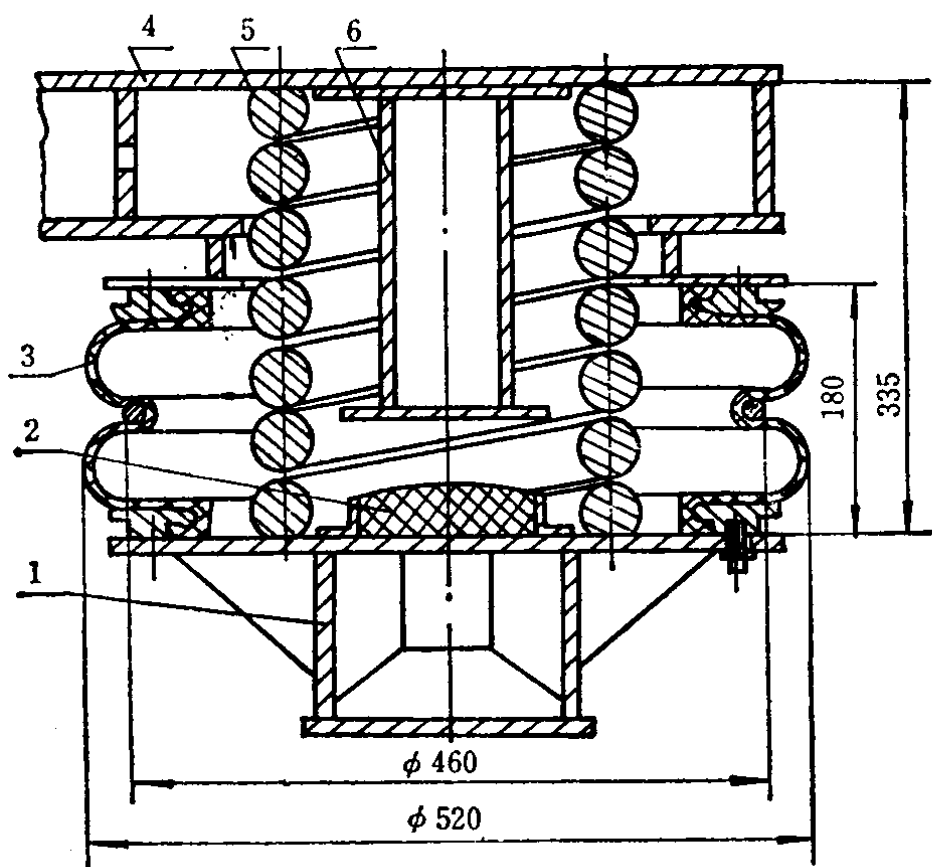


图 1—2 空气弹簧和螺旋钢弹簧在双层客车上联合使用

1. 下承梁; 2. 橡胶缓冲垫; 3. 橡胶囊; 4. 摇枕; 5. 螺旋弹簧;
6. 内导筒

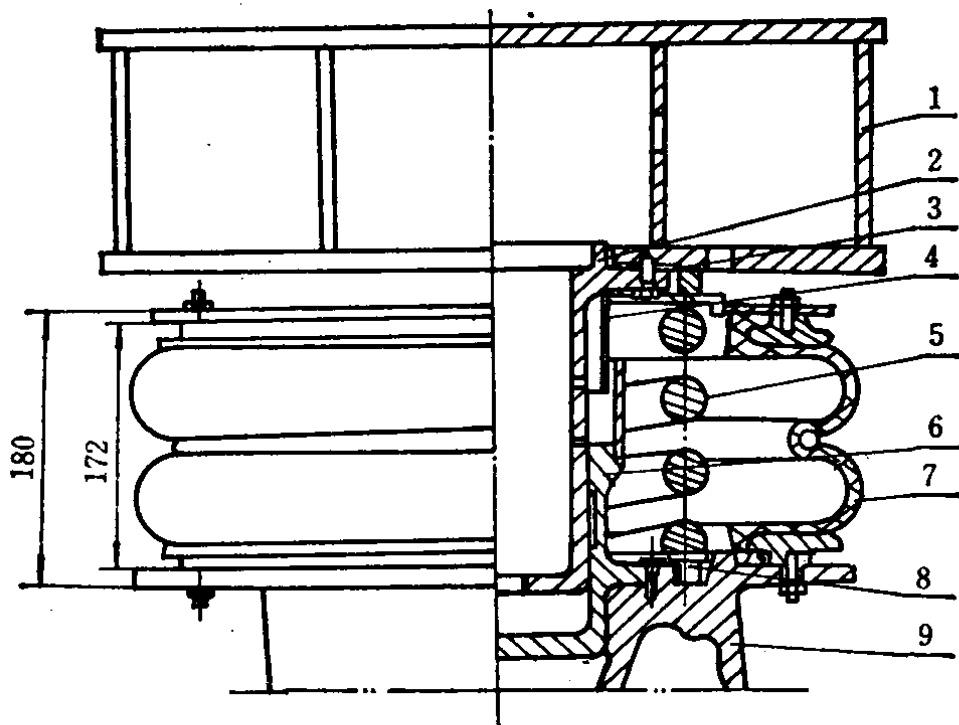


图 1—3 空气弹簧与螺旋钢弹簧在低重心列车上联合使用

1. 车体支承；2. 内导筒；3. 石棉橡胶垫板；4. 上支座；5. 螺旋弹簧；
6. 外导筒；7. 橡胶囊；8. 下支座；9. 转向架上支座

1965年,长春客车厂在试制DK1型转向架时,又对双曲囊式空气弹簧稍加改进,并设计了电磁式高度控制阀,采用无摇动台结构,在摇枕中下部和构架侧梁内侧之间加装横向复原弹簧。经过多次试验,由于地铁电动客车运行速度不超过80 km/h,因此,垂直振动性能很好。但由于采用横向复原螺旋钢弹簧,在车辆进出曲线和通过道岔时侧摆较大,横向振动性能仍不理想,横向复原弹簧安装也很不方便,故未扩大应用。长春客车厂于同年在试制高速列车的CCKZ1型转向架上,安装了外筒锥角为 40° ,内筒为 0° 的约束膜式空气弹簧(图1—4);四方机车车辆厂于同年也在同列高速客车的KZ2型转向架上安装了内外筒皆为 0° 的约束膜式空气弹簧(图1—5),这两种转向架均采用旁承支重的无摇动台结构,用节流孔产生阻尼,代替垂直

油压减振器。经过试验和实际运用证明：安装这种空气弹簧后，车辆无论在垂直振动性能方面，还是在横向振动性能方面，都获得了颇为良好的运行品质。但由于利用列车管作为风源，机车难于供风等原因，这种空气弹簧也没有得到推广。

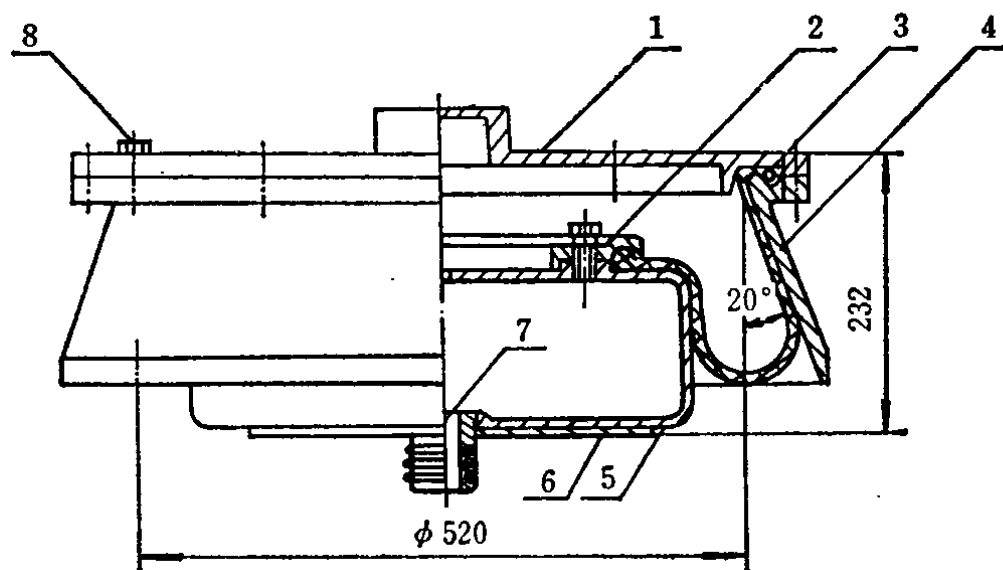


图 1—4 CCKZ1 型转向架上的空气弹簧组成

1. 上盖板；2. 内压环；3. 橡胶囊；4. 外筒；5. 内筒；6. 橡胶垫板；7. 节流孔；8. 螺栓

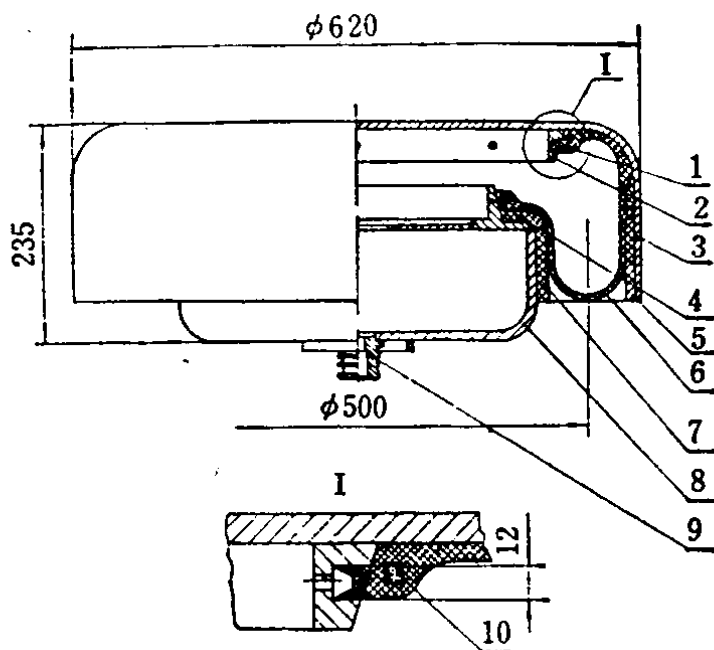


图 1—5 KZ2 型转向架上的空气弹簧组成

1. V型密封圈；2、4. 密封座圈；3. 外筒；5、7. 橡胶衬垫；6. 橡胶囊；8. 内筒；9. 内为节流孔的下凸轴；10. 钢丝圈

1968年，长春客车厂在地铁电动客车的DK2型转向架上安装了自由膜式空气弹簧(图1—6)，取得了颇为理想的垂直振动性能和横向振动性能，并降低了空气弹簧的安装高度。现在，这种空气弹簧已大批量地应用在地铁电动客车上，并逐渐推广应用到其他工业部门。

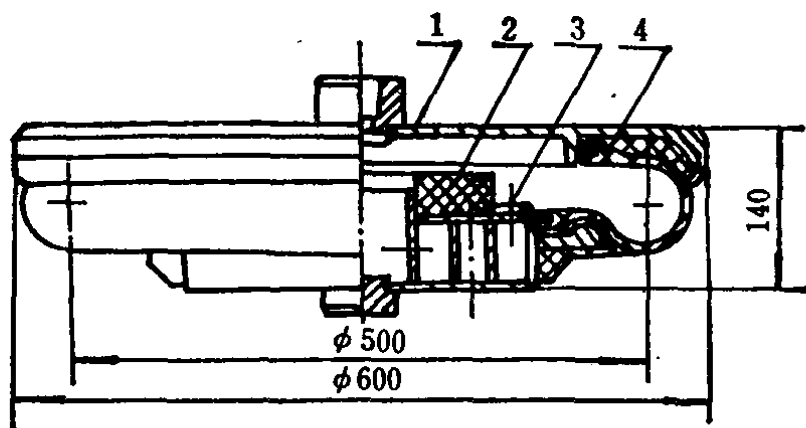


图1—6 地铁车上安装的空气弹簧

1. 上盖；2. 橡胶缓冲垫；3. 下座；4. 橡胶囊

综上所述，我国在铁道车辆上已先后研制出四种型式的空气弹簧。截至目前为止，只有自由膜式空气弹簧成批使用，其余两种约束膜式空气弹簧仍处于试验阶段。囊式空气弹簧，由于横向刚度太差，已被淘汰。今后，我们仍需总结经验，继续研究，以满足飞速发展的车辆工业、船舶工业、矿山工业、机械工业、农业和国防工业等方面的需要。

二、空气弹簧系统工作原理

在一个包括橡胶囊在内的密闭容器中，贮入压力空气，利用空气的可压缩性，实现弹簧的作用，这个容器就称为空气弹簧。

图1—7为空气弹簧系统原理图，主要由空气弹簧1、附加

空气室 2 和高度控制阀 3 组成。

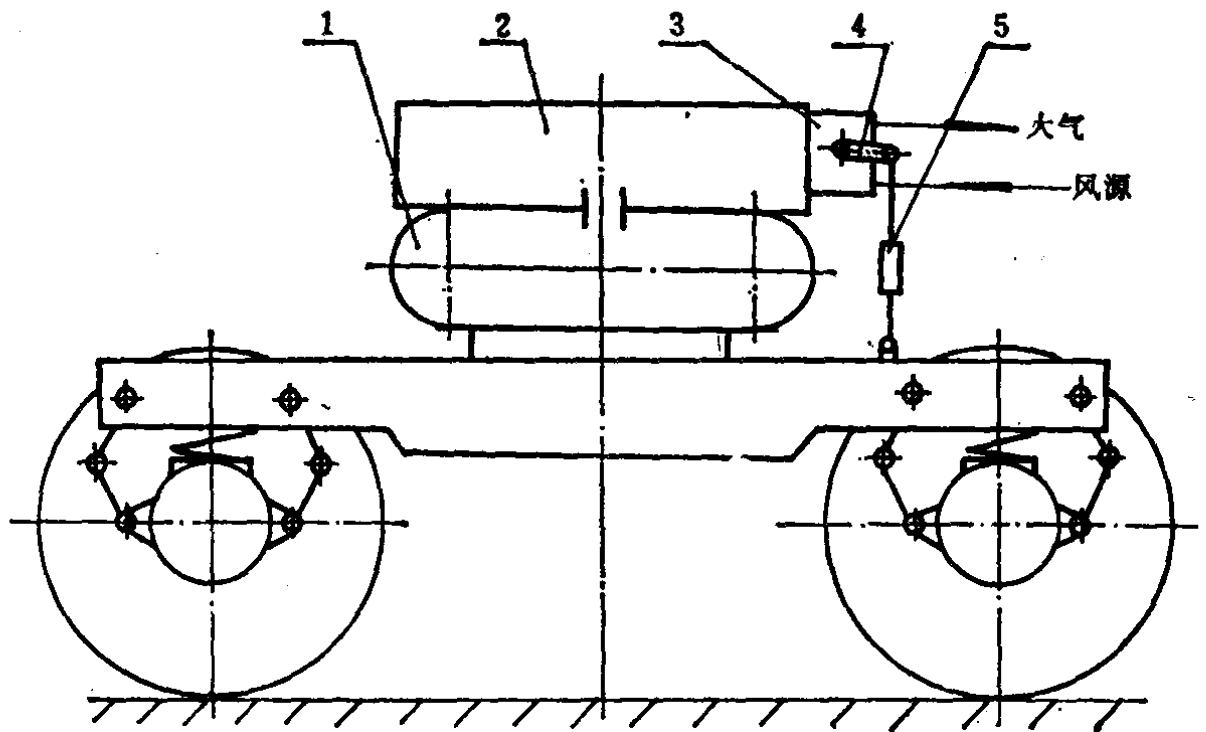


图 1—7 空气弹簧系统原理图

1. 空气弹簧；2. 附加空气室；3. 高度控制阀；4. 回转杆；5. 调节杆

高度控制阀内设有充气阀和排气阀。随着回转杆 4 的转动，打开充气阀，把来自风源的压力空气充入空气弹簧中；或打开排气阀，把空气弹簧内的部分压力空气排向大气。附加空气室和空气弹簧之间有节流孔相连。

当空气弹簧内没有压力空气时，则车体下落。由于调节杆 5 的支承，高度控制阀上的回转杆沿反时针方向向上回转，把充气阀推开，接通风源，压力空气就经过充气阀、附加空气室、节流孔，充入空气弹簧。随着空气弹簧内空气压力的增高，车体徐徐升起，回转杆则慢慢恢复到水平位置，关闭充气阀，切断压力空气通路，充气完毕。此时，空气弹簧已达到设计高度。

车体载荷(或乘客)减少时,空气弹簧内压力空气膨胀,车体向上升起,此时,回转杆沿顺时针方向向下回转,将排气阀打开,空气弹簧内多余的压力空气排向大气,车体下降,直到回转杆恢复到水平位置,关闭排气阀,切断排气通路,排气完毕。此时,空气弹簧又恢复到设计高度。

车辆在运行过程中,由于空气弹簧的振动,回转杆时时处于上下摆动状态,容易使空气弹簧时而充气,时而放气,浪费大量的压缩空气,很不经济,同时,车辆的振动性能和稳定性能也受到影响。为此,必须在高度控制阀内加装一套阻尼装置,用以产生时间滞后作用,使高度控制阀在很小的振幅内,或在静载荷变化很小的情况下,不起作用。这个很小范围,通常称为无感带。无感带的宽度,各种型号的阀规定不一,小者 $\pm 3\text{mm}$,大者 $\pm 15\text{mm}$,应视高度控制阀的结构和车辆的具体情况而异。阻尼装置常用油压和弹簧、空气和弹簧或弹簧和弹簧联合作用的结构。

第二章 空气弹簧的特点

近 30 年来，空气弹簧在许多工业部门得到了广泛的应用，尤其在铁道车辆上应用更广。空气弹簧具有以下特点：

一、改善车辆振动性能，提高车辆运行品质

1. 空气弹簧的自振频率 ν ，在载荷 W 变化的情况下，几乎不变。

螺旋钢弹簧的载荷 W —挠度 f 特性曲线，如图 2—1 所示。它是一条直线，刚度不变。在空车和重车时，自振频率相差很大。由图 2—2 载荷 W —频率 ν 曲线可以看出：自振频率随载荷的增加而降低。即：重车的自振频率低，空车的自振频率高。换言之，如果重车的运行品质好，则空车的运行品质差，二者不可兼顾。

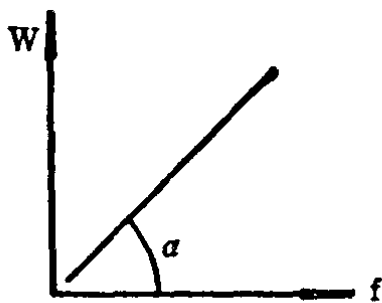


图 2—1 螺旋钢弹簧的载荷—挠度特性

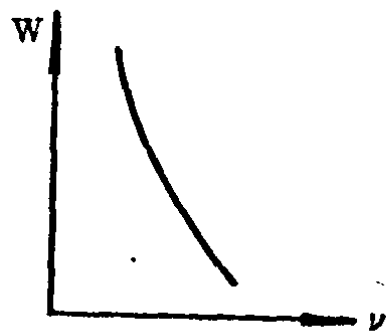


图 2—2 螺旋钢弹簧的载荷—频率曲线