



汽车悬架系统新技术

NEW TECHNOLOGIES AND
DEVELOPMENT TRENDS OF
VEHICLE SUSPENSION SYSTEM

林逸 陈潇凯 汤林生 主编

中国汽车工程学会悬架技术分会 组编



汽车悬架系统新技术

NEW TECHNOLOGIES AND
DEVELOPMENT TRENDS OF
VEHICLE SUSPENSION SYSTEM

林逸 陈潇凯 汤林生 主编

中国汽车工程学会悬架技术分会 组编

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是中国汽车工程学会悬架技术分会针对近年来汽车悬架及悬置技术领域的研究热点,有针对性地组织有关专家学者结合各自的研究专长,围绕液压互联悬架、ISD悬架、复合材料板簧、磁流变半主动悬架、载货车型驾驶室全浮悬置系统、橡胶衬套、空气悬架等进行撰稿,理论与工程实践并重。

本书可供汽车悬架技术领域从事科研和产品开发的工作人员参考阅读,也可供车辆专业学生参考使用。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

汽车悬架系统新技术 / 林逸, 陈潇凯, 汤林生主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-5682-4778-8

I. ①汽… II. ①林… ②陈… ③汤… III. ①汽车-车悬架 IV. ①U463.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 207654 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京九州迅驰传媒文化有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 20.75

彩 插 / 6

字 数 / 410 千字

版 次 / 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 66.00 元

责任编辑 / 李秀梅

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

序 言

《汽车悬架系统新技术》是中国汽车工程学会悬架技术分会针对近年来汽车悬架及悬置技术领域研究热点，有针对性地组织有关专家学者结合各自的研究专长，围绕液压互联悬架、ISD悬架、复合材料板簧、磁流变半主动悬架、橡胶衬套等进行撰稿，力求理论研究与工程实践并重。希望本书能够对汽车悬架技术领域科技人员的研究和产品开发工作有所启发和帮助，也使肩负汽车技术振兴重任的车辆专业学生对当前的汽车悬架新技术有所了解，激发其投身下一个汽车新时代的兴趣。也衷心希望本书能够为我国汽车悬架技术的发展带来积极影响，促进更多、更好的新技术、新产品面世，以应对汽车产业结构调整、转型升级、创新驱动的发展挑战，服务于由汽车制造大国向汽车强国的跨越、中国制造 2025 等历史性机遇。

特别要指出的是，在富奥辽宁汽车弹簧有限公司、一汽技术中心、全国弹簧标准化技术委员会等多家企事业单位的大力支持下，由我国主导制定的国际标准《钢板弹簧技术条件（ISO 18137）》已正式发布实施，这是我国汽车技术领域实质性参与 ISO 国际标准制定工作的里程碑式成果，对提高我国汽车行业在国际上的话语权、保障技术贸易利益均具有深远影响。在标准制定过程中，悬架技术分会的陈欣、刘富强、吴晓涛、郝吉向、牟正明、蒋立盛、步一鸣等专家发挥了突出作用，特邀他们就参与 ISO 18137 制定工作进行回顾，以期为后续我国汽车技术专家更广泛深入地参与国际标准化组织相关活动提供参考。

北京理工大学出版社对本书出版给予了大力支持，广州溢滔钱潮减震科技股份有限公司对本书成稿给予了帮助，特在本书出版之际向他们表示诚挚的谢意！

中国汽车工程学会悬架技术分会成立了由林逸、陈潇凯、汤林生、吴晓涛和栗娜组成的编委会，在各撰稿单位和作者的大力支持下，顺利完成了全书的编写，在此谨向各单位和专家表示衷心感谢。由于时间紧，加之对一些最新技术的认识水平还有待进一步深入，本书定还存在不少有待提高的地方，不足之处恳请读者批评指正。

中国汽车工程学会 悬架技术分会

主任委员 林逸

2017年6月

目 录

国际标准 ISO 18137:《钢板弹簧技术要求》制定工作回顾	陈欣 蒋美华 王国军 余方 程鹏/1
液压互联悬架系统的理论与工程应用	张农 郑敏毅/6
惯容-弹簧-阻尼 (ISD) 悬架技术	张孝良 陈龙/50
复合材料板簧研发技术	张亚新 周滨 周洲/114
汽车磁流变半主动悬架系统	郑玲/143
悬架橡胶衬套力学性能与理论计算	丰星星 张云清/217
载货车驾驶室全浮悬置系统设计	李胜 黄德惠 胡金蕊/254
汽车空气弹簧的研究现状与发展趋势 ...	陈俊杰 殷智宏 何江华 李国杰/276
附录	/304

国际标准 ISO 18137: 《钢板弹簧技术要求》制定工作回顾

陈欣¹ 蒋美华¹ 王国军¹ 余方² 程鹏²

(1 军事交通学院; 2 中机生产力促进中心)

2016年4月全国弹簧标准化技术委员会(SAC/TC 235)发布通知:由中国主导制定的国际标准《钢板弹簧技术要求(ISO 18137)》正式发布实施(见附录)。至此,该项目的国际标准起草制定小组圆满完成任务。这是在我国汽车行业快速发展和技术水平不断提高的大背景下,实质性参与国际标准化活动,对提高我国汽车行业在国际上的话语权和技术贸易利益具有重要意义。

从2010年正式提出该国际标准项目的申请到2016年最终完成,该项目所有参与人员都经历了难以忘怀的过程,所取得的每一个进展和成果,都是在应对各种挑战中通过艰苦努力获得的。

以下先通过对项目进程的简要回顾介绍一下各阶段的主要工作。

国际标准的制定工作是严格按照国际标准化组织的规程进行的,具体来说,就是按照国际标准化组织发布的《ISO/IEC DIRECTIVE》(以下称“导则”)实施。在导则中详细规定了标准制定的组织结构、实施方法和规范性文件等,内容十分详细,可以说导则就是标准的标准。对于每一个国际标准,需按照专业方向由ISO下的各个技术委员会组织实施,我们所涉及的标准属于弹簧领域,所以由ISO/TC227(国际标准化组织弹簧技术委员会)组织实施,在中国的对口单位为秘书处设在中国机械科学院中机生产力促进中心的全国弹簧标准化技术委员会(SAC/TC235)。

按照导则的要求,一部国际标准从准备到出版要经历七个阶段,如表1所示。

早在2005年,我国就向国际标准化组织提出承担“钢板弹簧”国际标准的诉求,经过多次努力均未果。之后,印度也提出了要求,并得到英国和美国的支持,情况更加复杂。加上发达国家对中国的能力一直持有怀疑或偏见,如何在国际上的行业专家中赢得认可度是十分关键的因素。在充分分析和调研的基础上,

表 1 国际标准实施阶段

项目阶段	英文名称	字母缩写
预备阶段	Preliminary work item	PWI
提案阶段	New work item proposal	NP
文件起草阶段	Working draft	WD
委员会阶段	Committee draft	CD
质询阶段	Enquiry draft	DIS
批准阶段	Final draft international standard	FDIS
出版阶段	International standard	ISO

2010 年，全国标准化技术委员会决定重新组织项目组，开始申报工作。2010 年 6 月新项目组将新提案提交 ISO/T227。

在 2010 年 11 月大阪会议上，项目组负责人对提案进行了说明，并作出郑重承诺。会上各国专家对是否同意立项进行了表决，投票结果表明，多数成员同意立项，但愿意参加项目共同工作组的只有日本、德国、马来西亚和中国四个国家，离法定数量还少一个国家。因此，会议决定在下次威尼斯会议上进行最终表决。

大阪会议后，项目组不断努力，详细分析了各国相关标准，并与国内外专家进行了多方面的交流和沟通，包括邀请日本专家来华进行技术交流，多次组织国内专家会议，还专程赴法国参加欧洲弹簧联盟的会议进行学术交流等。尤其是通过交流证明我们的实力，打消他们的疑虑。经认真研究，项目组于 2011 年 6 月通过信函再次向 ISO 提交了新的提案，反馈的信息表明，该提案得到国际上大多数专家的认可。

2011 年 11 月 11—12 日，在意大利威尼斯召开第 7 届国际标准化组织 ISO/TC227 年会，会上作出了对我国汽车行业具有历史意义的重要决议：全会一致同意中国提出的《钢板弹簧第 1 部分：技术条件和试验方法》提案，并正式批准立项，项目的共同工作组成员包括中国、日本、美国、德国、韩国、马来西亚、泰国和奥地利八个国家，法国和意大利为观察员。项目从 2011 年 11 月 11 日开始，为期三年。至此项目的预备阶段和提案阶段完成。

在文件起草阶段，项目组进行了大量的工作，多次召开国内工作组会议。在详细分析国内外相关技术的基础上，对标准草案不断进行修改和完善。如重点分

析日本 JIS B2710、德国 DIN 2094、中国 GB/T 19844、美国 SAE J1123 和印度 IS 1135 等标准，形成了一份各国标准详细对照表。其中遇到的最大困难在于各国的标准内容差异较大，如何提出既合理又能被各个国家接受的条款是我们需要下大力气研究的，因为每个国家都希望采纳自己的标准内容越多越好，德国甚至傲慢地说“我们的意见就是采用我们德国的标准”。在这个过程中，来自国内的各主要钢板弹簧生产单位和研究单位的专家起到了重要作用，包括中国第一汽车股份公司技术中心、富奥辽宁汽车弹簧有限公司、东风汽车悬架弹簧有限公司、山东汽车弹簧厂有限公司、江西远成汽车技术股份有限公司、江西方大长力汽车零部件有限公司、上汽集团南京商用车有限公司、重庆红岩方大汽车弹簧有限公司、青岛帅潮实业有限公司等。同时，项目组还利用中国汽车工程学会悬架技术委员会会议之际，向国内知名专家（如陈耀明、蒋立胜、步一鸣、林逸等）请教，得到了他们热心的指点。在 2012 年 6 月完成标准草案，并提交国际标准化技术委员会 ISO/TC227，随后将该草案和相关技术文件传送至共同工作组的每一位国外专家。三个月后反馈意见陆续回来，共收到 6 个国家的 132 条意见。项目组随后对每条反馈意见进行了细致的研究和处理，采纳了 83 条意见，对不采纳的 31 条给出理由，18 条意见我们希望在会议上讨论，经整理后对各个专家进行了一一回复。同时，也为当年 11 月在西安召开的 ISO/TC227 年会做了充分的准备。西安会议后项目进入委员会阶段。

在标准制定过程中，委员会阶段和质询阶段是最为复杂的工作阶段。国内外专家对该标准进行了大量艰苦细致的工作，尤其是各国之间的技术协调和标准细节的验证和论证等工作。美国、德国和日本依靠其技术优势，从各自国家利益（德国代表欧盟）的角度，以及多年形成的弹簧标准体系，对标准的制定力图施加影响。为此，我们邀请日本的专家到中国来，同时不断与美国专家进行沟通，并专程赴欧洲与德国、法国、意大利等国家和地区进行协调。国内各个相关企业（见附表）也进行了大量的工作，尤其是提供了极为珍贵的产品质量检测数据。这里值得一提的是，全国弹簧标准化技术委员会所在的中机生产力促进中心在国家科委申请到了国际合作项目“钢板弹簧国际标准关键技术研究”，为项目的进行提供了国家的资金支持。

2013 年 11 月，在美国华盛顿召开的 ISO/TC227 年会上对该标准进行全面审议。此次会议是标准制定工作的重要节点，如果获得通过，意味着标准中的实质性内容将获得国际上的认可，后期的质询、文字修改等阶段将不会遇到大的困难和争议。然而，在此次会议上，对一些敏感的技术问题各国之间仍存在较大的争

议，甚至出现了僵持的场面。例如，对于一些结构的尺寸公差中国和日本提的较松，检验方法为抽样检验；而德国提的较严，所有产品均检验。再如，对于刚度特性的检验方法各国也存在较大差异。如果按照中国提出的方法，则各国检测线的数据处理设备需要改变从而增加成本。有些检测方法已经使用多年，如日本和美国在生产线上检测刚度时，一直只利用加载曲线的两点法，而忽略卸载曲线的影响，会导致数据不准的情况，为此，美国在实践中还有锤子敲击的要求，而这一要求的随意性较大。我们提出的方法实际上是对德国标准中4点法的改进，为了让日本和美国专家接受，我们做了大量的解释工作。总之，针对标准中的一些实质性技术条款，还存在一些待解决的问题。华盛顿会议后，项目组又多次开会讨论，并与有关国外专家保持沟通，寻求最佳的解决方案。

2014年10月22—25日，在位于法国巴黎的法国机械与标准化总部召开了国际标准化组织ISO/TC227第十届年会。参加会议的有国际标准化官员、ISO/TC227主席以及各国专家，共计36人。本次会议重点对在研的两个项目进行审议和讨论，其中包括我国牵头的《钢板弹簧技术要求》和日本牵头的《碟形弹簧》两个国际标准。本次会议是我国负责的《钢板弹簧技术要求》由质询阶段进入批准阶段的关键节点。该项目组会议于2014年10月22日举行，由项目负责人主持。经过紧张的会议讨论和交流，最终对标准中所有的技术细节取得了一致意见，会议专家对我们的工作给予了高度评价和肯定，一致同意我国牵头的《钢板弹簧技术要求》国际标准由质询阶段进入批准阶段。这标志着该标准的实质性内容已经完成，进入文字及图形等形式修改阶段。

在批准阶段，主要是按照国际标准化组织的要求进行标准的文字、图形等的多轮修改。最终于2015年6月定稿。

此次实质性参与国际标准的制定工作，为国内各个企业提供了一个绝佳的与国外技术交流的机会。不仅仅是在会上，更多的是在会下和通讯交往，以及参观相关企业中，都学到了许多东西。同时，国外专家也对中国的情况更加了解。这无疑是有利的。例如，项目开始时，一些国外专家对中国的能力表示怀疑，欧洲各国担心中国主持的标准要求可能会较低，从而对成本和要求较高的欧洲企业不利，容易构成产品倾销等。事实证明上述担忧是多余的，不少专家从不愿与我们深谈，到主动与我们交流，加深了各国同行之间的关系。这次活动所取得的经验和收获对提高我国相关行业的技术水平和参与国际竞争具有深远的影响。据悉，国内专家已经开始以通过的国际标准为基础，对我国的钢板弹簧标准（GB/T 19844—2005）进行修订工作。

附表 国际标准《钢板弹簧技术要求》项目组主要参加人员名单

姓名	单 位
刘富强	富奥辽宁汽车弹簧有限公司
王效卿	富奥辽宁汽车弹簧有限公司
吴晓涛	中国第一汽车股份公司技术中心中重型车部
张跃辉	中国第一汽车股份公司技术中心中重型车部底盘试验室
陈卫锋	东风汽车悬架弹簧有限公司
王少菊	山东汽车弹簧厂有限公司
郝吉向	青岛帅潮实业有限公司
牟正明	南京汽车集团有限公司汽车工程研究院
吴辉明	江西方大长力汽车零部件有限公司
李 勇	重庆红岩方大汽车悬架有限公司
陈重琪	重庆红岩方大汽车悬架有限公司
王 军	江西远成汽车技术股份有限公司
陈 欣	军事交通学院汽车工程系
余 方	全国弹簧标准化技术委员会秘书处
程 鹏	全国弹簧标准化技术委员会秘书处
陈耀明	顾问
蒋立盛	顾问
步一鸣	顾问

液压互联悬架系统的理论与工程应用

张农 郑敏毅

(合肥工业大学)

1 引言

1.1 研究背景和意义

近年来,中国已连续多年成为汽车销售量和保有量第一大国。截至2016年年底,全国汽车保有量达到1.94亿辆,其中SUV市场占有率迅速增加,其销售量占乘用车总销售量的比例由2010年的9.6%迅速上升至2016年的37.1%。伴随汽车产业高速发展的负面效应是道路交通事故大幅增加。国内统计数据显示,仅2010年就有148 367起驾驶汽车交通事故,占交通事故总数的67.59%,造成46 878人死亡,占死亡总人数的71.87%。美国国家公路交通安全管理局(NHTSA)统计数据显示,2015年共有35 092人死于汽车交通事故,其中33%的死亡事故由车辆侧翻引起。

车体的运动及车辆行驶安全性和舒适性由悬架的性能决定。悬架抗俯仰性能决定车体俯仰角运动响应和车辆纵向载荷转移率,悬架抗侧倾性能决定车体侧倾角响应和车辆的侧向稳定性。另外,悬架的垂向振动特性直接决定车体的垂向跳动响应和乘坐舒适性,悬架侧倾角刚度/阻尼在前后车轴的分配间接影响车辆的乘坐舒适性。上述悬架的四个性能分别由对应悬架运动模式(Suspension mode)下的模式刚度(Mode stiffness)和模式阻尼(Mode damping)特性共同决定,四种运动模式分别为侧倾运动(Roll)、俯仰运动(Pitch)、垂向跳动(Bounce)和翘曲运动(Warp),如图1所示。

车辆运行时上述四种运动模式相互耦合,传统悬架无法同时实现对这四种模式的独立调节,因此无法同时兼具最佳乘坐舒适性和最优操纵稳定性。理论上,虽然主动、半主动等可控悬架系统完全可以实现对悬架运动的独立控制,以实现最佳悬架性能,但其高昂的附加成本、需要较大的附加安装空间、增加了簧下质量、失效模式复杂等不可避免的缺陷限制了主动悬架在工程上的应用。因此,设计比传统悬架系统更能实现舒适性和操纵性最佳折中性能的新型被动悬架势在必行。

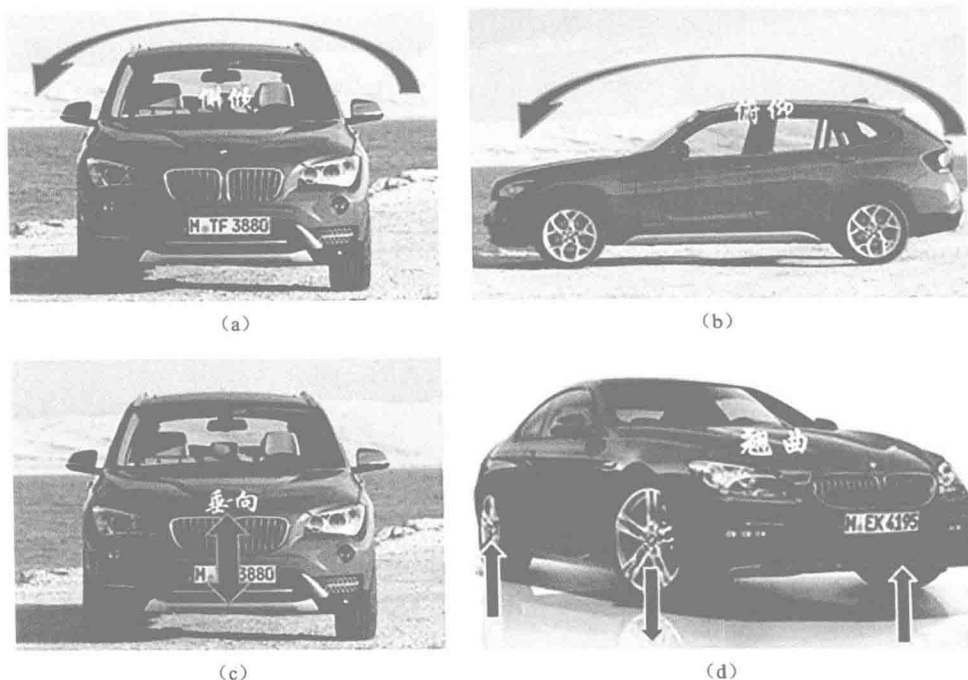


图 1 车辆四种悬架运动

(a) Roll; (b) Pitch; (c) Bounce; (d) Warp

1.2 互联悬架系统简介

互联悬架系统是指单个车轮运动导致其他车轮或车轮组弹簧力发生变化的悬架系统的总称。国内外学者提出了多种悬架结构，根据连接介质不同，可分为机械互联悬架、空气互联悬架和液压互联悬架。现代汽车上常用的横向稳定杆，就是一种最为简单的机械式被动互联悬架。这种稳定杆通过增强悬架系统的侧倾刚度来抑制左右车轮反向运动，但是提高了前轴侧倾刚度，破坏了前后轴侧倾刚度的合理分配，使舒适性降低。2007年，郭孔辉院士使用单侧机械连杆机构，通过平衡臂将左右侧车轮悬架变形耦合起来，以达到消除车身力矩的目的。已有研究发现，机械互联悬架虽然结构简单、应用普遍，但很难实现阻尼的独立配置。

空气互联悬架由安装在轮组处的空气弹簧、空气弹簧间的互联管路及控制气流流向的换向阀组构成，它是利用空气弹簧间的耦联实现力反馈作用的，其特点是力传递介质通过流通的高压气体实现。抗侧倾空气互联悬架能有效降低车体侧

倾角加速度，改善轮组的翘曲性能，提高车辆的越野性能。空气互联悬架的概念和结构最早由美国布鲁克海文国家实验室 William W H 于 1961 年提出并申请专利，其结构主要分为横向互联与纵向互联两种。从 19 世纪 80 年代起，Toyota 公司和 Nissan 公司先后对空气互联悬架系统的控制系统进行开发和实验研究。2007 年，郭孔辉院士提出了一种空气消扭互联悬架系统，该系统采用多轮耦联高度控制单元对各悬架高度进行控制，以达到提高车轮接地性和消除车身扭转的目的。然而，空气互联悬架存在固有的缺陷，悬架中的气体可压缩性大，承载能力有限，不能作为重型机械的主要承载元件。除此之外，空气互联悬架中需要安装维持气囊气压的储气室，而该气室的安装需要较大的空间。

油气互联悬架按照弹性元件的不同，分为早期的 Hydrolastic 悬架和后期的 Hydragas 悬架。单个 Hydragas 悬架主要包含上下两个油腔以及在上油腔内由橡胶膜片隔离形成的球形气室。液压油在上下两腔内通过阻尼孔流动，形成阻尼力。液压油压缩气室内的气体，产生弹簧力。用油管连接多个油气悬架的下油腔形成油气互联悬架。车辆姿态自调节新型油气互联悬架系统由液压缸、蓄能器、液压管和控制单元等元件组成，通过选择适当的液压缸互联方式和系统控制方式来提高车辆的安全性、舒适性和通过性。高速行驶的车辆在急转弯时，该系统可以增加车辆的侧倾刚度，有效抑制车辆侧倾运动趋势。1991 年，美国的 Heyring 提出 Kinetic 交联悬架系统，它是一种具有代表性的液压互联悬架系统，如图 2 所示。

随着液压技术和油气悬架技术的发展，液压互联悬架系统以优越的非线性特性和良好的减振性能广泛应用于各种类型的车辆上。

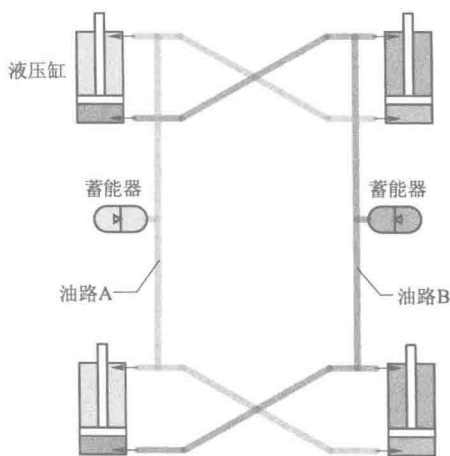


图 2 液压互联悬架系统

1.3 液压互联悬架系统的发展历程

Hawley J B 于 1927 年首次提出油管互联式悬架，并详细阐述了多种互联方式对不同工况的影响。1955 年，Moulton A E 发明了液压连接橡胶弹簧的 Hydrolastic 悬架，分析了其减振性能的优越性，并于 1966 年成功应用于 BMC 公司的 Morris 1100 紧凑型乘用车上。Hydrolastic 悬架的诞生催生了各种油气悬架，其中德国供

应商 Langen AG 的对角互联油气悬架系统是典型的代表。对该悬架系统的改进形成了 Automotive Products 公司的对角液压互联系统——AP 悬架。20 世纪 90 年代，Ortiz M 研发了四轮组机械液压组合系统的互联方式，该互联方式显著改善了悬架性能。Zapletal E 为了降低翘曲模式的刚度，提出了一种机械液压互联方式。随着液压互联悬架的逐步应用和深入研究，Creuat 和 Kinetic 公司将液压互联悬架系统产品化，如图 3 和图 4 所示。

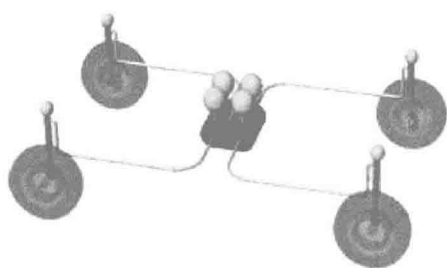


图 3 Creuat 式液压互联悬架

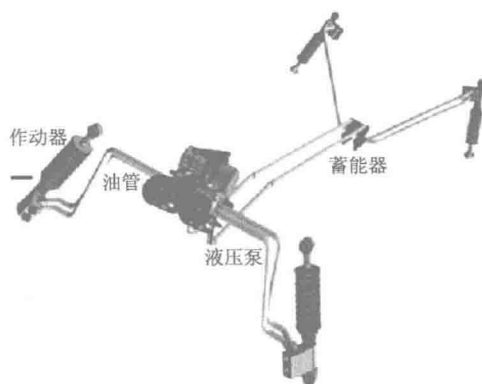


图 4 Kinetic 式液压互联悬架

Kinetic 公司的液压互联悬架用双向作动液压缸取代传统减振器，并且通过液压回路连接各液压缸。悬架系统的刚度和阻尼特性分别由安装于回路中的蓄能器和阻尼阀提供。与其他液压互联悬架相比，Kinetic 公司的液压互联悬架具有结构简单紧凑、成本低、易于实现等优点。

1.4 液压互联悬架的研究现状

国外学者对液压互联悬架系统研究较早，且更深入、全面；国内研究起步较晚，且主要集中在油气互联悬架系统的研究。这里重点对国外学者的相关研究进行综述。

自 20 世纪 20 年代起，两轮或四轮的互联悬架逐步进入学者的视野，抗侧倾和抗俯仰的互联方式及对角互联方式的发明开启了液压互联悬架研究的大门。1949 年，液压互联悬架首次在汽车工业界得到应用，并成功安装在 Citroën 2CV 车型上。AP 悬架系统的问世，催生了对液压互联悬架的大量研究工作，主要集中在悬架系统的试制和相关的性能试验上，而液压互联悬架的参数化建模技术

和理论分析并未得到发展。20世纪80—90年代，主动液压互联悬架的研究工作陆续开展，与此同时流体系统的建模进入研究者的视野。Bhave S Y于1992年研究了抗俯仰的液压互联悬架参数对车辆平顺性的影响，考虑流体损耗因子、空气弹簧体积比及车辆质量分布等因素对车辆的垂向跳动和俯仰运动模态参数影响的灵敏度分析。

20世纪90年代中期，Liu P J等提出了一种增加侧倾刚度的被动式液压互联悬架系统，该系统对车辆侧倾运动有很好的抑制作用，建模过程中考虑了阻尼阀的压力损失及液压缸内的流体压缩性，但忽略了管内的流体损失和压缩性，以及流体的惯性和冲击波效应。随后几年，Cao D等使用类似方法研究了抗俯仰的液压互联悬架操纵稳定性和平顺性，该模型能独立分配和调整俯仰刚度和阻尼，并将其应用于重载商用车的设计中。2000年，法国标致公司的Gay F建立了液压互联悬架系统的线性状态空间描述模型，该模型仅考虑作动缸输出压力与端口流量之间的简单关系，用于实现力跟踪控制下的流量补给。2001年和2003年，Garrott W R和Forkenbrock G提出了H2型悬架结构，并通过实车试验和ADAMS建模方法研究了其动态特性。2002年，Fontdecaba J通过车轮力与刚度和位移之间的定量关系，探讨Creuat悬架在独立运动模式下的刚度和阻尼特性，但忽略了液压系统的动态特性。2006年，Mavroudakis B等在Simpack软件中建立了互联悬架系统，并研究了该悬架对整车操纵性的影响。Zhang N教授课题组针对液压互联悬架做了全面深入的研究，运用液压阻抗法建立机械-流体系统模型，基于半车模型分析液压互联悬架车辆的模态参数，研究液压互联悬架刚度和阻尼对簧上质量垂向、俯仰和侧倾模态的作用，并进行优化和灵敏度分析，基于九自由度车辆模型进行鱼钩试验。结果表明，液压互联悬架能在不损害平顺性的前提下有效提升侧倾刚度，改善了车辆的操纵稳定性；基于七自由度整车模型并运用特征值和特征向量法进行固有频率分析，体现了液压互联悬架的抗侧倾和抗俯仰能力；采用模糊控制方法控制液压互联悬架配置情况，从而能同时提升车辆的乘坐舒适性和操纵稳定性。湖南大学将模态能量法应用到互联悬架车辆中，并提出了一种协调控制多驱动轴货车车体俯仰/垂向耦合振动的新型液压互联悬架系统。湖南大学使用七自由度模型验证了装有抗俯仰液压互联悬架系统的矿车性能。江苏大学提出了一种液压互联消扭悬架系统，并且通过台架试验验证了该悬架的抗侧倾作用。北京理工大学针对多轴越野车提出了一种具有抗侧倾、平衡桥荷和刚性闭锁等多种功能的油气互联悬架系统。在工程应用方面，2010年，日产公司在第六代途乐上使用了液压车身动态控制系统（HBMC），用于改善车辆的乘坐舒适

性和操纵稳定性；2016年，江苏常州万安汽车部件科技有限公司与宇通客车公司在大型客车上采用被动液压互联悬架技术，现正处于小批量生产和客户应用体验阶段。

2 被动液压互联悬架系统的工作原理介绍

2.1 抗侧倾 HIS 系统的工作原理

一般来说，较好的平顺性要求悬架设计得较软，而较好的操纵稳定性要求悬架设计得较硬。为了缓解车辆平顺性和操纵稳定性对悬架设计的矛盾要求，传统悬架采用横向稳定杆增加车辆的侧倾刚度，以提高车辆的操纵稳定性。但是传统的横向稳定杆无法实现悬架的侧倾运动和翘曲运动的解耦，当车辆行驶在凹凸不平的路面上时不仅会降低平顺性，而且对越野性能的影响也很大。为了克服这个问题，被动抗侧倾液压互联悬架（HIS，Hydraulically Interconnected Suspension System）系统技术采用四个双向液压缸、两个蓄能器、若干个阻尼阀和若干个液压管，如图5所示。液压缸固定在车身和车轮之间，左右液压缸的上下腔通过液压管交叉互联，液压系统形成两个液压支路（绿色液压支路和蓝色液压支路）。

抗侧倾 HIS 系统的工作原理：当车身发生顺时针侧倾时，如图6（a）所示，红色液压支路中液压缸中的液压油被挤进蓄能器，造成这个液压支路的压力迅速升高；相反，蓝色液压支路蓄能器中的液压油补给到连接的液压缸，造成这个液压支路压力迅速减小；两个液压支路的压力差作用给车身一个逆时针的抗侧倾力偶，以阻碍车辆车身的侧倾，从而有效地减少车辆的侧翻事故，提高车辆的操纵稳定性。当悬架发生俯仰运动时，如图6（b）所示，红色液压支路中前悬架左侧液压缸上腔的液压油大部分补给给右侧液压缸的下腔，部分少量的液压油补给给后悬架的液压缸，后悬架右侧液压缸下腔的液压油补给给左侧液压缸的上腔；蓝色液压支路的情况与此类似。因此，在俯仰运动中两个液压支路蓄能器的液压油体积没有发生变化，抗侧倾 HIS 系统不会增加

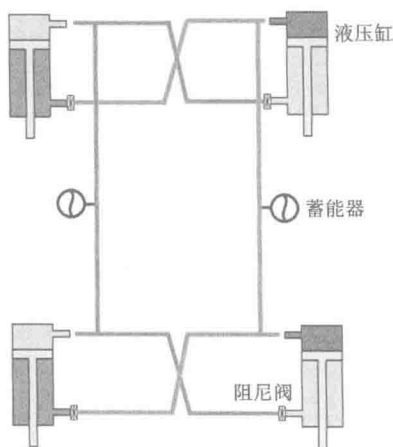


图5 抗侧倾液压互联悬架结构（见彩插）

车辆的俯仰刚度。当悬架发生垂向运动时，如图 6 (c) 所示，仅仅由于活塞杆的存在，液压缸上下腔产生流量差，同一液压支路中液压缸的流量差将流入/流出蓄能器，造成液压支路的压力微小变化，由于面积差引起的流量差很小，因此抗侧倾 HIS 系统基本上不会影响车辆的垂向刚度。当悬架发生翘曲运动时，如图 6 (d) 所示，红色液压支路中后悬架液压缸的液压油被挤到液压管路，而前悬架液压管中的液压油流入液压缸，前后悬架液压缸的液压油互联补给，蓄能器中的液压油体积没有变化，因此抗侧倾 HIS 系统不会增加车辆悬架的翘曲刚度。与传统悬架相比，HIS 系统可以提供非线性的侧倾刚度，如图 7 所示，在侧倾角较小时，HIS 系统提供较小的侧倾刚度以保证车辆的平顺性；在侧倾角较大时，HIS 系统提供较大的侧倾刚度以保证车辆的操纵稳定性。HIS 系统可以更好地兼顾车辆的平顺性和操纵稳定性。

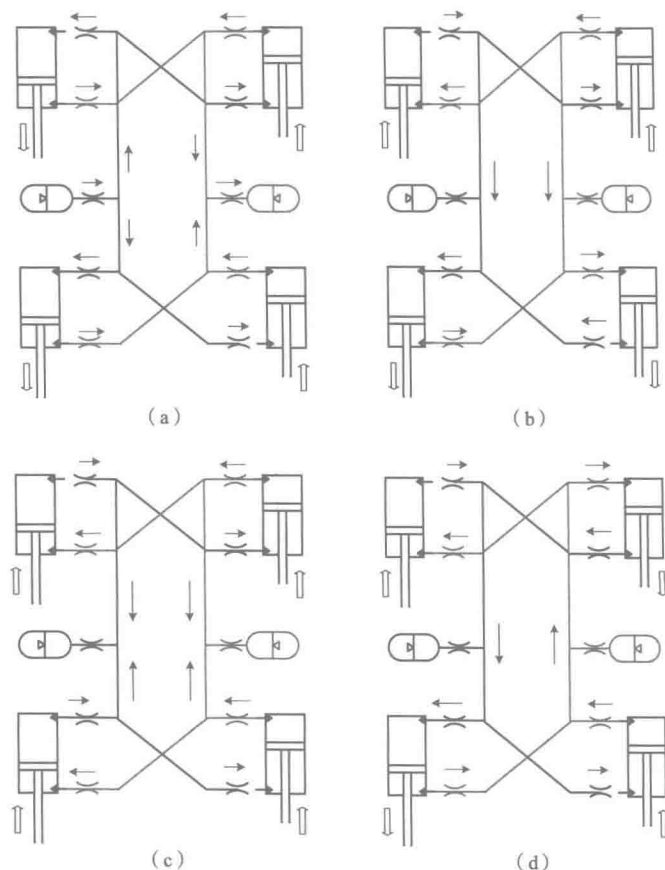


图 6 抗侧倾液压互联悬架工作原理 (见彩插)
(a) 侧倾运动；(b) 俯仰运动；(c) 垂向运动；(d) 翘曲运动