

军队“2110工程”建设经费资助项目

# 履带车辆悬挂系统 结构与性能分析

徐国英 等 编著



 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

军队“2110工程”建设经费资助项目

# 履带车辆悬挂系统 结构与性能分析

徐国英 姚新民 王 涛 陈红迁 张炳喜 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

本书以高速履带车辆悬挂系统为研究对象,重点阐述扭力轴式独立悬挂系统布局、刚度阻尼设计需求及悬挂系统的振动特性。主要内容包括:履带车辆悬挂系统结构形式与发展、履带车辆悬挂系统性能的评价方法、扭力轴在车体上的布局分析、履带车辆振动特性的数学模型、阻尼及外部激励对履带车辆振动特性的影响、履带环对履带车辆振动特性的影响、履带车辆行驶对悬挂系统的需求;通过对履带车辆直驶越障、垂直跌落过程的运动学和动力学分析,从平顺性和缓冲可靠性角度论述对悬挂系统的刚度和阻尼的需求;通过对悬挂杆系建模,分析悬挂杆系结构对减振器衰减车辆振动的影响。

本书试图帮助读者理解履带车辆悬挂系统的发展、组成和原理。解决学习和设计过程中存在的疑问,比如平顺性和缓冲可靠性对悬挂刚度的需求是否存在差异?应如何调节两者之间的矛盾?减振器应该消耗哪些能量?消耗多少?什么时候开始消耗等?

本书可作为相关专业师生的参考书,也可供有关科研与工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

履带车辆悬挂系统结构与性能分析/徐国英等编著. —北京:电子工业出版社, 2017.8

ISBN 978-7-121-32359-1

I. ①履… II. ①徐… III. ①履带车—车悬挂装置—系统结构②履带车—车悬挂装置—性能分析  
IV.①U469.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 181916 号

策划编辑:管晓伟

责任编辑:管晓伟

特约编辑:王欢等

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:9.5 字数:304 千字

版 次:2017 年 8 月第 1 版

印 次:2017 年 8 月第 1 次印刷

定 价:50.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式:(010) 88254460; [guanphei@163.com](mailto:guanphei@163.com); 197238283@qq.com。

# P 前言

## REFACE

装甲车辆悬挂装置性能对车辆的机动性能和行进间发扬火力具有重要影响。发达国家的装甲车辆都安装有性能优良的悬挂装置。为提高车辆机动性能，世界各国在大力发展动力传动系统的同时，也在积极探索悬挂系统的结构形式。本书以传统的扭力轴式独立悬挂为研究对象，分别就悬挂布局、车辆振动、悬挂刚度及阻尼需求、杆系的影响等内容通过实例进行了分析。

全书共 6 章，第一章由姚新民编写；第三章由王涛编写；第六章由徐国英、陈红迁、张炳喜编写；第二、四、五章由徐国英编写。全书由徐国英拟定编写大纲并统稿。编写过程中还受到王丹杰教授的指导。研究生陈靖然、王闯、薛大兵等协助完成了仿真、实验和部分插图。

由于编者的经验和水平有限，书中难免有不妥甚至错误之处，恳请读者批评指正。

徐国英

# 目 录

## CONTENTS

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第一章 绪论                    | 1   |
| 第一节 悬挂系统发展历程              | 2   |
| 第二节 悬挂系统结构形式              | 15  |
| 第三节 悬挂系统的评价指标             | 19  |
| 第二章 悬挂系统弹性元件结构布局          | 23  |
| 第一节 主体弹性元件                | 24  |
| 第二节 扭力轴等刚度布局              | 25  |
| 第三节 扭力轴不等刚度布局             | 30  |
| 第四节 弹性元件和阻尼元件混合布局         | 42  |
| 第五节 布局对弹性元件和阻尼元件技术状况变化的影响 | 43  |
| 第三章 悬挂系统振动特性              | 47  |
| 第一节 履带车辆的无阻尼自由振动          | 48  |
| 第二节 履带车辆的有阻尼自由振动          | 54  |
| 第三节 履带车辆的无阻尼强迫振动          | 59  |
| 第四节 履带车辆的有阻尼强迫振动          | 71  |
| 第五节 履带环对车辆角振动的影响          | 87  |
| 第四章 悬挂系统刚度需求              | 107 |
| 第一节 车辆直驶过程中通过障碍时所受冲击力     | 108 |
| 第二节 车辆垂直跌落时所受冲击力          | 111 |
| 第三节 扭力轴刚度对车辆振动和冲击的影响      | 117 |
| 第五章 减振器阻尼需求               | 121 |
| 第一节 车辆振动冲击对阻尼的需求          | 122 |
| 第二节 减振器构造及其阻尼特性           | 123 |
| 第三节 车体振动特性和减振器阻尼特性的匹配     | 128 |



|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第六章 悬挂系统杆系及其分析 .....             | 131 |
| 第一节 悬挂系统杆系 .....                 | 132 |
| 第二节 悬挂系统杆系运动学分析 .....            | 134 |
| 第三节 悬挂系统杆系运动的力学分析 .....          | 136 |
| 第四节 悬挂系统杆系的结构调整和优化 .....         | 138 |
| 第五节 车辆垂直跌落过程中减振器上力和速度特性的变化 ..... | 139 |
| 第六节 悬挂系统杆系技术状况变化后的影响 .....       | 141 |
| 参考文献 .....                       | 144 |

## 第一章

# 绪 论



履带车辆悬挂系统是指将车体和负重轮连接起来的所有零部件的总称。该系统包括弹性元件、减振器、缓冲限制器、导向装置及其他辅助零件。悬挂系统用于弹性连接车身与负重轮，缓和并衰减因路面不平而引起的冲击振动，保证车辆平稳行驶。优良的悬挂特性对履带式装甲车辆的机动性、通过性和乘员舒适性具有重要意义。

悬挂系统的具体功能主要体现在以下两个方面。一是弹性支承车体，缓和行驶装置（履带和负重轮）在路面行驶时产生并传给车体的冲击与振动，改善车内乘员的工作环境，提高工作效能。因地面崎岖而引起的车辆起伏振动，会严重影响车内乘员的观察、瞄准和射击。同时这种振动会使车内乘员很快感到疲劳、恶心、头晕，严重时会造成内脏器官的损伤，极大地削弱战斗力。二是减轻振动对车辆各部件的损伤和破坏，提高可靠性，从而确保坦克装甲车辆在任何路面上都能充分发挥动力传动装置的最大效能，使车辆具有良好的机动性。

## 第一节 悬挂系统发展历程

履带式装甲车辆的悬挂系统从最初的刚性悬挂、半刚性悬挂，发展到弹性悬挂，悬挂性能和可靠性都有了大幅提高。

刚性悬挂不使用弹簧，直接将负重轮固定在车体上。从保护车上机件及驾驶员舒适性的角度出发，采用刚性悬挂车辆的速度不应该超过  $3\sim 4\text{ km/h}$ 。1916 年 9 月 15 日，英国首批 49 辆 I 型坦克在索姆河战场首战告捷，震惊世界，这是世界上第一批用于实战的坦克。如图 1-1 所示，该车外廓呈菱形，采用刚性悬挂，车体两侧履带架上有突出的炮座，两条履带从顶上绕过车体。

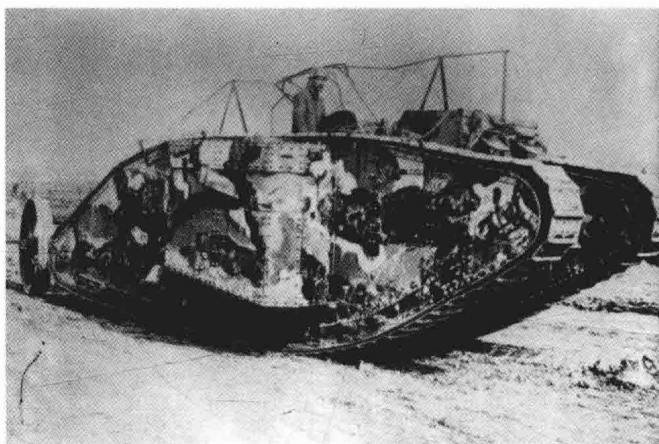


图 1-1 英国的 I 型坦克



半刚性悬挂现在多用于农用拖拉机上。采用这种悬挂的车辆有两个车架（一侧 1 个），行动部分的各种部件都安装在车架内。车架的后半部分与车体铰接，而前半部分则通过弹簧与车体连接。第一次世界大战后期法国生产的“雷诺”FT-17 坦克（见图 1-2）采用的就是这种悬挂。它前后生产了 3000 多辆，是当时生产数量最多、影响最广的坦克，且战后为许多国家效仿。苏联的第一代坦克采用的也是半刚性悬挂。

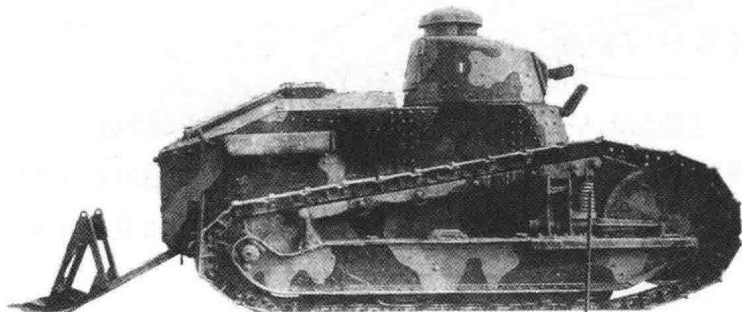


图 1-2 法国的“雷诺”FT-17 坦克

第一次世界大战期间，坦克的主要使命是攻破堑壕、铁丝网等障碍物，消灭敌人的有生力量和机枪火力点。受当时工艺水平和生产技术的制约，这些早期坦克采用的刚性和半刚性悬挂性能较低，行驶颠簸，速度缓慢，机动性差，对战场环境的适应性不强，后来的坦克和其他战斗车辆上并未广泛应用。

两次世界大战之间，坦克装甲车辆战术和技术不断发展，现在坦克的雏形基本形成，弹性悬挂被广泛应用于坦克装甲车辆上。弹性悬挂的坦克装甲车辆，负重轮与车体通过弹性元件连接。根据弹性元件所用材料的不同，悬挂又分为金属悬挂、非金属悬挂和复合悬挂。

在金属悬挂中，弹性元件使用的是能够在弯曲和扭转情况下工作的弹性变形金属弹簧。根据结构特点的不同，金属弹簧又分为扭杆弹簧（单、双扭杆弹簧，束状扭杆弹簧）、螺旋弹簧、碟片弹簧、缓冲弹簧和钢板弹簧。目前，世界各国大多数的坦克均使用单扭杆弹簧悬挂。使用双扭杆悬挂是德国 Pz.V 和 Pz.VI 坦克的特点，而使用束状扭杆悬挂装置，则是苏联 T-10 重型坦克的特点。苏联的 ASU-57 空降自行火炮，美国的 M1 “艾布拉姆斯”坦克、M60A3 坦克、M2 “布雷德利”步兵战车使用扭管-扭杆式双扭杆悬挂。苏联的 BT 快速坦克、T-34 坦克，英国的“酋长”坦克，以色列的“梅卡瓦”坦克均使用螺旋弹簧悬挂。瑞士的 Pz 61、Pz 68 坦克使用碟片弹簧，不占用车内空间，便于维护，但行程比较短。美国的“谢尔曼”和“斯图亚特”轻型坦克使用的是缓冲弹簧。德国的 Pz.II、Pz.IV 及捷克的 LT-38 坦克使用钢板弹簧，结构比较简单，弹簧布置在车外增大了悬挂装置的受损机会，但这种悬挂的优势是可以不用减振

器，因为钢板弹簧之间工作时会产生摩擦力，可以增强悬挂装置的阻尼特性。

非金属弹簧又分为橡胶弹簧（法国的 R-35 坦克）、气体弹簧（俄罗斯的 BMD 空降战车、瑞典的 S 坦克、日本的 74 式坦克）、液压弹簧及油气弹簧。现代坦克使用的是非金属弹簧中的气体弹簧或油气弹簧，即通常所说的油气悬挂装置。

复合悬挂是指油气和扭杆混合式悬挂，日本的 90 式主战坦克使用的就是这种悬挂。

## 一、圆柱螺旋弹簧悬挂装置

这是一种被广泛使用的早期独立式悬挂，被称为“烛”式悬挂或“克里斯蒂”式悬挂，是由美国工程师 J. 克里斯蒂发明的。采用“克里斯蒂”式悬挂的最经典的车辆有美国的 M 1931 式“克里斯蒂”坦克、苏联的 T-34 坦克、英国的“克伦威尔”坦克和波兰的 10 TP 坦克。

这种悬挂都由两个前后连接的圆柱螺旋弹簧组成。前面的为可调水平螺旋弹簧，后面的为垂直螺旋弹簧，其结构如图 1-3 所示。

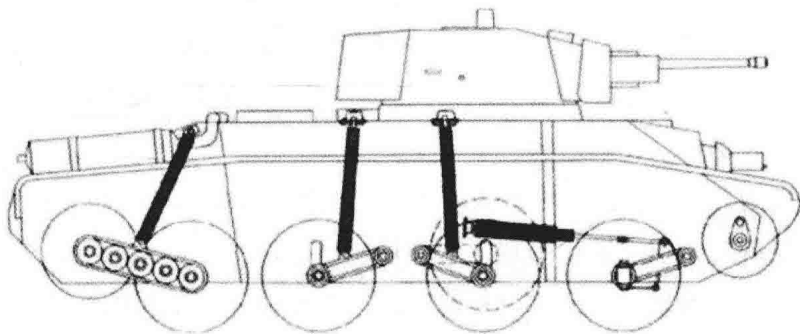


图 1-3 “克里斯蒂”式悬挂

这种悬挂具有很好的柔软性和可靠性，在使用过程中表现出色，其缺点是由于没有减振器而导致振动增大，弹簧室占用车内容积过多。

英国的几种巡洋坦克使用的也是这种悬挂。不过英国人在使用弹簧的同时还安装了筒式液压减振器，克服了“克里斯蒂”悬挂车体振动的问题，极大地提高了行驶平稳性。

英国的 MkIV “邱吉尔”步兵坦克（见图 1-4）使用了另一种结构形式的独立式螺旋弹簧悬挂。“邱吉尔”坦克有 16 个直径 0.254 m 的小尺寸负重轮和 6 个辅助轮。前后的辅助轮可张紧履带，也可在坦克越障时工作，前面第二个轮也是辅助轮。辅助轮的动行程为 0.051 m，无静行程。负重轮的动行程也为 0.051 m，静行程为 0.076 m，相应的总行程为 0.127 m。弹性元件为三层结构，以减小尺寸。中间还有一个很细的弹簧，起限位作用。“丘吉尔”坦克悬挂装置的优点是柔软性令人满意，使用寿命较长。其缺点是结构复杂，弹簧布置在车



外易损坏，弹簧的动行程太小，越野行驶时常常发生刚性碰撞。



图 1-4 “邱吉尔”步兵坦克

“梅卡瓦”主战坦克的悬挂装置，堪称是独立式螺旋弹簧悬挂装置的收官之作。“梅卡瓦”1/2型坦克每侧有6个大直径负重轮，每个悬挂装置包括平衡肘、带有两个可同时工作的弹簧和液压行程限制器。在第1、2、5、6负重轮处安装有筒式液压减振器。奇数负重轮的平衡肘朝向坦克前部，偶数负重轮的平衡肘朝向车尾，可保证大直径（直径0.79 m）负重轮有足够大的动行程（0.21 m）。

经过改进的“梅卡瓦”3型坦克的悬挂装置（见图1-5）更加完善。该坦克仍然使用双弹簧装置，所有平衡肘都朝向车尾，降低了负重轮越过起伏地时的刚性。第1和第6负重轮处安装了液压行程限制器，所有12个悬挂装置均安装有叶片式液压减振器和机械式行程限制器，负重轮总行程达0.604 m，几乎是T-72坦克的两倍，静行程为0.304 m。这种悬挂拥有极高的单位势能，并且具有极高的行驶平稳性，堪称是独立式螺旋弹簧悬挂装置的巅峰之作。

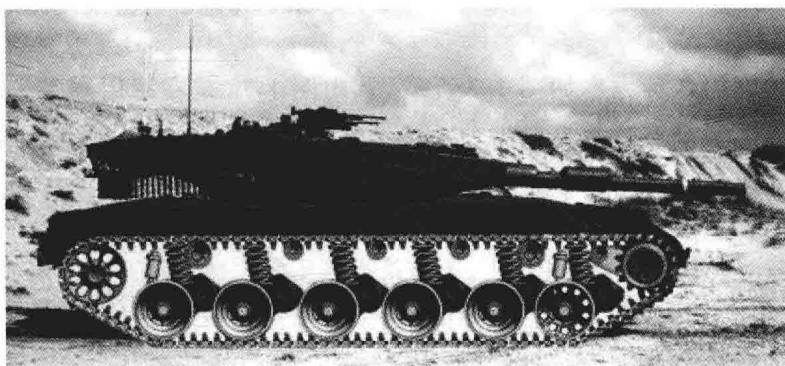


图 1-5 “梅卡瓦”3型坦克的悬挂装置

所有改进型“梅卡瓦”坦克的悬挂装置均安装在车外，不侵占坦克的车内空间，但增大了损伤概率，所以安装屏蔽裙板来进行补偿。“梅卡瓦”的悬挂装置还有一个突出的优点

就是保养比较简单且容易维修。

## 二、扭杆悬挂装置

扭杆弹簧在坦克装甲车辆上也称为扭力轴，其用于车辆的悬挂，始于 20 世纪 20 年代的汽车制造业。1938~1939 年，在诸如雪铁龙、雷诺、阿尔法-罗米欧等一些著名汽车公司批量生产的汽车上，都使用了扭杆弹簧悬挂。

1934 年，瑞典人将独立式扭杆弹簧悬挂应用到 L-100 “兰茨沃克” 轻型坦克上，开创了坦克使用扭杆弹簧悬挂装置的先河。1938 年 10 月，德国人开始将独立式扭杆弹簧悬挂应用到 III E 型中型坦克上。1936 年，苏联人在小型试验坦克上试用了联锁扭杆弹簧悬挂；1939 年，他们开始在批量生产的 T-40 轻型坦克和 KV-1 重型坦克上，大量采用独立式扭杆弹簧悬挂装置，图 1-6 所示为前苏联 T-55 坦克的扭杆式悬挂装置。

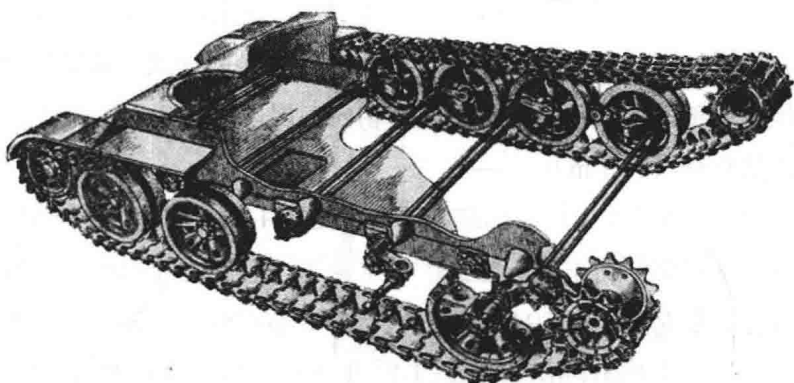


图 1-6 前苏联 T-55 坦克的扭杆式悬挂装置

目前不仅在很多主战坦克上使用，一些履带式自行火炮、履带式装甲输送车上也广泛使用扭杆弹簧悬挂装置。

扭杆悬挂装置的各种方案如图 1-7 所示。其中图 1-7a 是在军用履带车辆上应用最广的扭杆不同轴心布置的单杆悬挂装置。该种布置方案结构最简单，与同轴心布置的扭力轴相比，它可以利用车体的整个宽度做为工作长度，因而能够使悬挂装置具有较小的刚度和剪切应力。

图 1-7b 和图 1-7c 为扭杆同轴心布置方案，其优点是可以减小悬挂装置占用车内的空间，减小坦克装甲车辆直线行驶时的驶偏倾向。但是，这种方案的缺点是难以实现大的悬挂装置行程，且在车辆使用过程中车体底部的受力变形会使花键的工作条件变坏。

图 1-7d 为束状扭杆弹簧方案。该方案以一束细而短的扭杆来保证大的扭转角和相应的负重轮行程，但应力却比较小。束状扭杆的主要缺点是：结构复杂、可靠性相对较差、



外部直径较大，为了将它们安装在车体底部需要较大的车底距地高度。

图 1-7e 使用两根扭杆，相当于增加了扭杆的长度，能降低悬挂装置的等效刚度和扭杆内的应力，且有较大的位能储备，利于提高平稳性。图 1-7 f 是一种更为复杂的复式弹簧，由一根实心扭杆和两根管状扭杆组成，其中一根管状扭杆作为副弹簧来保证非线性特性。这其实是两根扭杆的另一种形式。两根扭杆的方案都有优异的悬挂性能，但缺点也十分突出，那就是结构太过复杂，制造、维修麻烦。

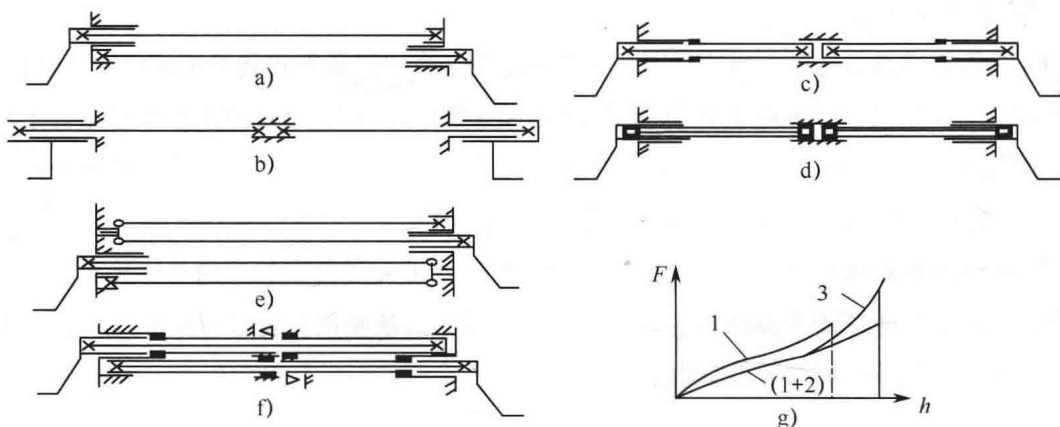


图 1-7 扭杆悬挂装置方案简图

a) 不同轴心布置的单扭杆轴式悬挂装置 b) 同轴心布置的单扭杆轴式悬挂装置 c) 同轴心布置的管-杆式悬挂装置 d) 束状扭杆悬挂装置 e) 有两个实心扭杆轴的悬挂装置 f) 不同轴心布置的管-杆式悬挂装置 g) 按方案“f”制造的悬挂装置的特性

1— 一根实心扭杆工作 1+2— 实心扭杆和管状扭杆同时工作 3— 副弹簧也工作

目前，通过选用高强度材料和相应的制造工艺对扭杆加以强化，以及选择平衡肘的适当长度等措施以后，采用结构简单、工作可靠的、不同轴心布置的单扭杆式悬挂装置，就可以实现足够大的负重轮行程（0.58 m 以上）。

扭杆悬挂的优点是：

单位体积金属材料吸收功的能力高、尺寸质量比小，占用车内的空间小，结构简单。工艺路线比较成熟，可靠性以及保护好，在使用过程中，基本上免维护。

扭杆悬挂系统的缺点是：

悬挂的动行程小，在越野路面状况恶劣条件下，装甲车辆的平衡肘经常会撞击到限制器，因此导致装甲车辆质心和驾驶员处的颠簸及引起的振动加速度较大，这就限制了越野速度的提高。

20 世纪 60 年代中期，西方主要发达国家对扭杆弹簧的制造工艺进行了改进。一是将热处理工艺中的中温回火改为低温回火，在保持材料具有良好韧性和塑性的情况下，提高

了材料的扭转屈服点  $\tau_s$ ；二是增加了强扭预应力处理工序，提高扭杆弹簧的承载能力，在扭杆的表层产生负的残余应力，提高扭杆弹簧在单向脉动载荷下的疲劳强度。结果使扭杆弹簧的许用剪应力  $\tau_{\max}$  和总扭转角  $\theta_{\max}$  增加约 50%，超过了屈服点  $\tau_s$ 。扭杆弹簧的单位体积吸收的弹性势能增加约 1.3 倍，这大幅度提高了悬挂系统的越野缓冲性能。改进后的扭杆弹簧称为高强度扭杆弹簧。

美国 M 1 系列坦克，德国“豹”式坦克，苏联 T-80 坦克和 BMP-3 步兵战车等都采用了高强度扭杆弹簧。

我国的扭杆弹簧悬挂技术主要是师从于前苏联。第一代履带式装甲车辆产生于 20 世纪 50 年代末 60 年代初，悬挂装置中采用的都是扭杆弹簧。但在当时的生产工艺条件下，扭杆弹簧的设计许用剪应力  $\tau_{\max}$  只有 900 MPa，单位体积吸收的弹性势能小，从而限制了负重轮的动行程，无法满足车辆高速越野行驶对缓冲的要求。

随着经济的发展和对外开放力度的加大，我国通过开展自主的理论和试验研究，逐渐掌握了高强度扭杆弹簧的生产技术和工艺，提高了产品质量的稳定性。高强度扭杆弹簧已经成功应用于我国的多种现役车辆上。

### 三、油气悬挂装置

油气悬挂装置是以惰性气体（氮气）作为弹性介质，以油液作为传力的工作介质，能呈现出很好的非线性特性，同时储能比很大，约为  $330 \text{ kN} \cdot \text{m/kg}$ （以 6.0MPa 氮气充气压力为例）是钢板弹簧的 3500 倍。这种悬挂装置在较好路面行驶时，负重轮行程较小，有较低的悬挂刚性，行驶平稳性良好。在起伏地行驶时，负重轮行程较大，吸振缓冲能力强，允许高速行驶，工作可靠性高。

油气悬挂装置在重型货车上应用相当广泛。在坦克上，瑞典 1967 年研制成功的无炮塔型 S 坦克，率先采用了可调式油气悬挂装置。由于火炮是固连在车体上的，所以，要靠油气悬挂来控制车体前后俯仰，实现火炮的高低瞄准。火炮的高低射界达到  $-10^\circ \sim +12^\circ$ 。为保证发射平台稳定，射击时，油气悬挂装置要实行闭锁。

日本于 1974 年研制成功的 74 式主战坦克，是世界上首次在炮塔式坦克上采用油气悬挂装置的坦克。它采用了部分可调式油气悬挂装置，即前后的第 1、5 组负重轮采用可调式油气悬挂，中间的 6 组负重轮采用不可调式油气悬挂。这样做的优点是可以适当降低油气悬挂装置的昂贵造价。第 1、5 负重轮可以上下调节  $\pm 0.2 \text{ m}$ ，使车底距地高在  $0.2 \sim 0.65 \text{ m}$  的范围内可调。该装置还可以增加坦克的俯仰角度和左右倾斜角度。日本在研制 90 式主战坦克时，又回过头来采用油气悬挂和扭杆悬挂的混合式悬挂装置。第 1、2、5 和第 6 负重



轮采用了油气悬挂，第 3、4 负重轮采用了扭杆悬挂。可使车底距地高在 0.2~0.6 m 的范围内可调，还可实现前后俯仰，但不能左右倾斜。

英国的“挑战者”1/2 主战坦克，采用的是不可调式油气悬挂装置。它的特点是结构比较紧凑，可靠性较高。尤其是在“挑战者”2 主战坦克上，改进了油气悬挂装置的密封材料，使其使用寿命达到了 12000 km。采用油气悬挂装置的主战坦克，还有法国的“勒克莱尔”、韩国的 K 1 和印度的“阿琼”等主战坦克。在世界范围内，油气悬挂装置有望成为主战坦克的主流悬挂装置，前景看好。

国内对油气悬挂系统的研究开始于 1959 年，当时的北京工业学院率先制造出了样件，进行了工作台试验，1960 年开始装车试验，获得了国内较早的第一手研究资料。目前，我军现役的两栖突击车、轻型装甲车上均采用了我国自主研发的油气悬挂装置。

油气悬挂装置以液压缸内的油液传递压力，将负重轮和平衡肘系统传来的压力，再传给密闭容器（蓄压器、蓄气筒、气室），蓄压器内具有高压气体作为弹性元件起到缓冲吸收振动的作用。而油液除传递压力外，还具有调节车体高度、衰减车体振动、刚性闭锁悬挂、辅助密封气体、润滑零件以及调节蓄压器容积等多种功能。

### 1. 单筒式油气悬挂

图 1-8 为与车体、平衡肘、负重轮相联系的简单筒式油气悬挂工作原理简图。蓄压器 3（气室）中的浮动活塞 2 的右端通过充气阀 1 充入高压氮气，其左端是油腔，与动力缸（油缸）4 的油腔相通，浮动活塞 2 用来隔离油液与氮气，防止油气混合使气体溶于油中形成乳化。动力缸和蓄压室是油气悬挂装置的主要部件。油气悬挂中的气体压力很高，最高压力甚至达到 80 MPa 以上，一般采用氮气，因为氮气为惰性气体，可防止腐蚀和油液的氧化，工作性能也较稳定。

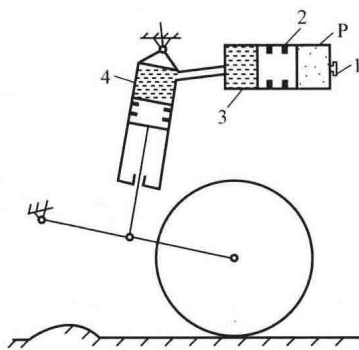


图 1-8 筒式油气悬挂简图

1—充气阀 2—浮动活塞 3—蓄压器 4—动力缸

如果在油液往返的通道上（在动力缸或蓄压器内）设置一个阻尼阀座，在阀上设有常通孔和限压阀，就构成了带阻尼阀的蓄压器。当油液往返通过阻尼阀座时即产生阻尼，其

作用与通常的液压减振器相同。由于气体可压缩，气室可起到补偿作用，可省去通常减振器中的补偿室、吸入阀与排出阀，故可简化结构，因此油气悬挂不需要单独的液压减振器。有阻尼阀的油气悬挂装置一般安装在与首、尾端负重轮连接的平衡肘上，用以衰减车体角振动，中间负重轮处的油气悬挂装置一般不装阻尼阀。

## 2. 双气室油气悬挂

图 1-9 为分置式双气室油气悬挂，它有两个气室：一个为低压气室（在蓄压器上）；另一个为高压气室（在动力缸主活塞之内腔），其初始充气压力大于低压气室压力。当负重轮行程不大时，动力缸顶部油腔油压不大，即低压阶段，此时仅低压气室工作。当负重轮行程增大时，动力缸顶部油腔油压增大，即高压阶段，此时低压气室和高压气室共同工作。这样当承载有较大的变化范围时，其静挠度可控制在较小范围内，从而车辆空载与满载时，车身高度变化不大。同时位能储备亦较大。

## 3. 可调式油气悬挂

可调式油气悬挂原理如图 1-10 所示，高压油泵通过控制阀可将油液注入油缸或自油缸排出油液回油箱。油缸充油时车体被抬起，油缸放油时车体下降。如果将坦克所有负重轮分成前、后、左、右四组，每组分别有一个控制阀，当控制阀以不同组合工作时，就可以实现车体的上下升降、前后俯仰、左右倾斜等多种调整要求。

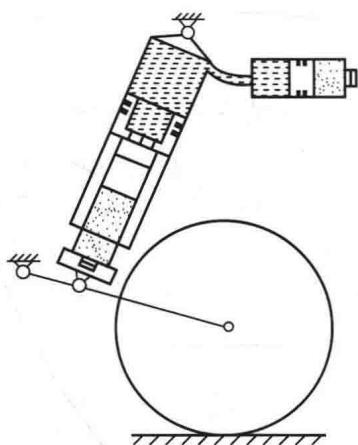


图 1-9 分置式双气室油气悬挂

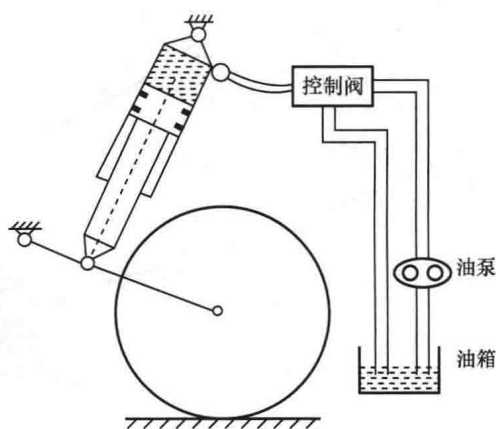


图 1-10 可调式油气悬挂原理

如果在油缸、气室间油液往返的通道上另设一闭锁控制阀，当该阀切断油液的往返通道时，则油缸实现液压闭锁而变成刚性悬挂。

油气悬挂的主要优点有：

1) 刚度非线性。当履带装甲车辆在平坦路面行驶时，由于悬挂动行程较小，气体弹性介质承受瞬时压力所产生的刚度也就小，能够满足一般平顺性的要求；在越野或者战斗状



态下, 装甲车辆在起伏地面行驶时, 悬挂装置的弹性力呈现出非线性变化且幅值增加, 因而可以吸收比较多的冲击能量, 这时候气体弹性介质发挥出单位质量储存能量比大的特点, 有效缓冲振动, 避免能量直接传递到装甲车身上以及避免“悬挂击穿”现象的出现, 从而在一定程度上提高了车辆的越野速度, 改善了越野行驶的机动性。

2) 阻尼非线性。悬挂阻尼和阻尼比均随着车体与负重轮相对速度的变化而变化。

3) 车姿可调整。装甲车辆使用了可调式油气悬挂之后, 可以实现车体的升降、前后的俯仰和左右的倾斜。可以提高坦克、自行火炮等装甲车辆的通过性和扩大火炮的射角范围。安装有可调式油气悬挂的两栖作战车辆, 在涉水时可以将两侧的车轮收起以便减小水流的阻力。可调式油气悬挂基本不需液压千斤顶就可以拆装车轮, 使得车辆行走系统的日常维修变得更加方便。

4) 悬挂可闭锁。油气悬挂闭锁可以使弹性悬挂变成刚性悬挂, 可以消除射击时车体的振动, 提高射击精度, 这对需要连续发射的平台如自行火箭炮来说是很重要的。美国 M 270 自行火箭炮便是在发射时进行液压闭锁来提高发射稳定性的。

油气悬挂装置的缺点:

结构比较复杂, 对核心部件的密封性和加工精度要求极高, 造价昂贵。 $-40^{\circ}\text{C}$  以下低温性能不佳, 设备的可维修性与可靠性不如扭杆悬挂。可调式油气悬挂系统一旦损坏, 在战场上不易修复。一般安装在车外, 防护性稍差。使用中需定期充油、放气等。

## 四、主动悬挂与半主动悬挂

前面提到的各种悬挂装置, 不论是扭杆悬挂还是油气悬挂, 它们都只能存储和消耗振动能量, 其悬挂刚度和阻尼大小均无法在使用中调整, 所以称其为被动悬挂装置。由于被动悬挂的参数不能改变, 所以其刚度和阻尼系数只能根据车辆经常行驶的几种典型路面采用一个折中的方案。当路面处于极端情况时, 车辆平顺性和可靠性不能达到满意效果。被动悬挂系统也有较大的局限性, 它主要限制了车辆通过不平地形时的最大速度。随着电子技术的发展, 以及人们对悬挂系统期望值的增高, 便出现了主动悬挂和半主动悬挂技术。

### 1. 主动悬挂

主动悬挂的概念最早由美国的 Federspiel Labrose 教授在 1955 年提出。相比于被动悬挂, 主动悬挂能够随着路况的改变而实时地调节悬挂系统状态, 大大改善了乘坐舒适性。然而, 主动悬挂需要消耗很大一部分来自于发动机的能量, 并且主动悬挂系统往往都需要很大的布置空间, 因此主动悬挂的发展受到了很大限制。