

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.025

# 油气悬挂动力学模型研究综述

史啸天<sup>1</sup>, 尤小梅<sup>1\*</sup>, 柴国英<sup>2</sup>, 杨贵春<sup>2</sup>

(1. 沈阳理工大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 中国北方发动机研究所, 天津 300400)

**摘要:**针对油气悬挂系统内部结构复杂性给分析和设计带来困难的问题, 分析总结了国内外油气悬挂系统动力学建模研究成果, 阐述了油气悬挂模型的研究现状, 提出了具有理论指导意义的综述, 指出了油气悬挂建模的难点在于其各种非线性因素的存在。基于流体力学理论和热力学理论, 推导了油气悬挂缸数学模型, 得到了输出力与位移和速度的关系。总结出了建模在油液压缩性、压力与容积关系、摩擦力与气体溶解性方面尚需解决的关键问题, 并依此探讨了一些改进措施及方法。研究结果表明, 考虑温度影响、气体状态方程修正、理论与实验联合方面的建模是未来潜在的研究热点。

**关键词:** 油气悬挂; 非线性动力学; 动力学模型

中图分类号: U463.33; TH113

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)06-0770-05

## Survey on dynamics model of hydro-pneumatic suspension

SHI Xiao-tian<sup>1</sup>, YOU Xiao-mei<sup>1</sup>, CHAI Guo-ying<sup>2</sup>, YANG Gui-chun<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. China North Engine Research Institute, Tianjin 300400, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that its interior complex structure brought difficulty to its kinetic analysis and design, the analysis and summary on dynamics modeling research achievements of hydro-pneumatic Suspension were listed, the research status of hydro-pneumatic suspension was summarized, then the review of theoretical guidance significance was put forward, and the difficulty of modeling lying in its various nonlinear factors was indicated. Based on the theory of thermodynamics and hydro-mechanics, the numerical model of hydro-pneumatic cylinder was established, then the relationship of force, displacement and velocity were got. In addition, some unresolved problems about compressibility of hydraulic oil, pressure-volume relationship, friction and solubility of gas were outlined. What's more, some improvement measures and methods were discussed. The results above indicate that temperature factor, improving gaseity equation, and combining the theory with practice are the possible focus of future research.

**Key words:** hydro-pneumatic suspension; non-linear dynamics; dynamic model

## 0 引言

悬挂装置是保证车辆行驶在各种复杂路面环境下能提高车体速度, 改善平顺性和操作稳定性的重要部件。典型的悬挂系统结构由弹性元件、减振器和导向机构等组成。油气悬挂的弹性元件是一种惰性气体, 并以油液作为传力介质。油气悬挂缸内部油液往返流

通的通道设有阻尼阀和单向阀起到了减振器的作用。油气悬挂具有质量轻、体积小、储能比大、非线性刚度和非线性阻尼等优点。而且能实现车高及姿态调整和悬挂刚性闭锁等能有效改善车辆通过性能和行驶性能的功能。建立精确实用的油气悬挂缸数学模型是开展油气悬挂各项研究分析的基础。因此全面回顾国内外该方面的研究现状为展开油气悬挂的深入研究打下基

收稿日期: 2015-12-21

作者简介: 史啸天(1990-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事机械设计及理论研究. E-mail: 460987168@qq.com

通信联系人: 尤小梅, 女, 副教授, 硕士生导师. E-mail: prime-queen@163.com

础是一项很有意义的工作。

本研究针对油气悬挂系统内部结构复杂性给分析和设计带来的问题,分析总结国内外油气悬挂系统动力学建模研究成果,阐述油气悬挂模型的研究现状。

## 1 油气悬挂理论发展概括与现状

法国雪铁龙公司于1952年制造出了第一辆应用油气悬挂的汽车<sup>[1]</sup>。1979年Moulton Development Ltd.<sup>[2]</sup>进行了关于油气悬挂工程分析和应用的研究,为开展油气悬挂的研究奠定了理论基础。油气悬挂的理论研究主要集中在怎样建立合理的油气悬挂数学模型上。Worden<sup>[3]</sup>将建立油气悬挂数学模型的方法分为基于物理意义的参数化法和基于实验的非参数化法。参数化法即理论建模法根据油气悬挂内部结构和有关物理定律来建立模型,每个参数都有明确的物理意义。但也是因为存在参数较多,给分析设计带来了困难。非参数化法建模需要大量的试验研究作为基础,而试验数据作为极具商业价值的机密不予公开,因此这类研究的相关文献不多。

国外对于油气悬挂技术的研究比较全面,涉及到的专利达到数千项,占据了这一领域的领先地位。垄断了该技术的关键参数信息。相关文献描述的多是一些简化后的模型。在国内油气悬挂的产品性能与国外相比,存在着较大差距。总体上还处于引进、消化、吸收的阶段。本研究主要依据相关最新文献,来探讨目前油气悬挂缸理论建模的主要问题。

## 2 油气悬挂缸出力模型建立

油气悬挂液压缸在建立数学模型中主要的难点在于如何把具有非线性影响因素如油液、高压空气的压缩膨胀、非线性阻尼、刚度特性合理地表现出来。因此常对建立的模型进行简化假设。一般采用的假设有:忽略沿程压力损失,油液不可压缩,气体弹簧为理想气体,不计活塞与缸筒之间摩擦力等<sup>[4-6]</sup>。以上结构的数学模型可简化为如图1所示的悬挂缸。

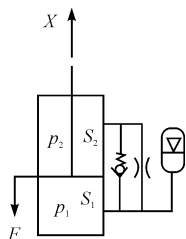


图1 悬挂缸示意图

由流体力学知识,可建立悬挂活塞缸的输出力平衡方程如下:

$$F = P_1 S_1 - P_2 S_2 \quad (1)$$

式中: $F$ —悬挂活塞缸输出力; $P_1, P_2$ —油腔1、2的压力; $S_1, S_2$ —油腔1、2的有效截面积。

$P_1$ 与 $P_2$ 间的关系可用节流孔流量特性表示为:

$$P_{12} = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho \xi \left( \frac{Q}{A} \right)^3 \text{sign}(\dot{X}) \quad (2)$$

式中: $Q$ —小孔流量, $A$ —小孔面积, $\xi$ —局部压力损失系数, $\rho$ —流体密度, $\text{sign}(\dot{X})$ —运动速度方向符号函数。

其中小孔流量 $Q$ 可由与相对速度 $\dot{X}$ 的关系式得出:

$$Q = S_2 \dot{X} \quad (3)$$

由热力学知识可知,气室内气体的状态方程如下:

$$p_0 V_0^n = p_3 V_3^n \quad (4)$$

式中: $p_0$ —气体初始状态下的气体压力, $V_0$ —气体初始状态下的体积, $n$ —多变指数, $p_3$ —气体动态下的气体压力, $V_3$ —气体动态下的体积。

在忽略延迟的情况下可以认为气室压力 $P_3$ 与油腔压力 $P_1$ 相等。气室内气体体积的变化为:

$$\Delta V = (S_1 - S_2) X \quad (5)$$

式中: $X$ —活塞相对于缸筒的位移。

联立式(1)~(5)可得出输出力 $F$ 与相对位移 $X$ 与相对速度 $\dot{X}$ 的复杂非线性表达式:

$$F = \frac{p_0 V_0^n S_1}{[V_0 - (S_1 - S_2) X]^n} - \frac{1}{2} \rho \xi \frac{S_2^3}{A^2} \dot{X} \text{sign}(\dot{X}) \quad (6)$$

## 3 油气悬挂缸建模关键因素

相关文献[7]表明,由式(6)建立起的油气悬挂数学模型与试验数据相比较,仍存在着一定误差。除去实验器材测量误差方面的因素,一般认为导致模型数据误差的主要原因有:忽略了油液的可压缩性、没有反映出摩擦力变化规律、气室内的氮气气体模型过于理想化、未考虑气体的溶解性等。

### 3.1 油液的压缩性

在建立油气悬挂数学模型的研究中多认为油液是不可压缩的,而实际中油液是可压缩的,在系统压力变化较大或研究系统的动态特征时是必须要考虑的。油液可压缩性大小常用液体体积弹性模量 $K_v$ 来表示:

$$K_v = - \frac{\Delta p V}{\Delta V} \quad (7)$$

式中: $V$ —油液初始体积, $\Delta p$ —油液压力变化量, $\Delta V$ —油液体积在压力变化 $\Delta p$ 时变化量。

根据流体理论,油液的瞬时密度 $\rho$ 可表示为:

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 + \frac{1}{K_v} (p - p_0) \right] \quad (8)$$

在可压缩流体中,体积流量 $Q$ 会随着流体密度 $\rho$ 变化,只有质量流量 $\dot{m}$ 保持不变。即:

$$\dot{m} = Q\rho \quad (9)$$

故气室内气体体积的变化为:

$$\Delta V = \int Q dt = \int \frac{\dot{m} K_v}{\rho_0 [K_v + p_3 - p_0]} dt \quad (10)$$

式中: $\dot{m}$ —质量流量; $p_3$ —气室压力; $\rho_0$ —油液标准密度; $p_0$ —气室初压力。

该表达式为一复杂积分,因此目前在考虑油液压缩性的油气悬挂模型研究中,为了方便计算考虑多采用下式来描述油液在压力下的体积变化规律<sup>[8-9]</sup>:

$$\Delta V = - \frac{\Delta p V}{K_v} \quad (11)$$

式中: $K_v$ —值视为根据经验取的常量。而在实际中 $K_v$ 受许多因素影响如温度、压力和空气混入等。在热量不断累积的工作情况下,随着温度的升高, $K_v$ 值减小,在一般的工作温度范围内会有5%~25%的变化。 $K_v$ 值与压力值成正比,但这种变化呈非线性关系。在实际的工程环境中,液压不可避免的会混入空气,这会使液压油的体积弹性模量下降,实际计算中通常取值为 $(0.7 - 1.4) \times 10^9$  Pa。将这些因素对 $K_v$ 值的影响合理地表达出来是有待完成的工作。

### 3.2 气室压力与容积关系

目前普遍采用理想气体状态方程来描述蓄能器中压力与容积变化规律如式(4)所示<sup>[10-11]</sup>。但油气弹簧高负载的工作环境与理想气体低压力的适用条件并不符合。因此常对理想气体状态方程进行修正或采用实际气体状态方程。

(1)多变指数 $n$ 的修正。气体多变指数的选取将直接影响到模型的准确性,通常认为缓慢加载时为等温过程 $n$ 取1,快速加载时为绝热过程 $n$ 取1.4。许多试验表明实际状态下气体的多变指数 $n$ 要比理论值大,因此许多研究中都对 $n$ 的取值进行了探讨。有的研究认为多变指数的取值与激励频率有关,并通过实验给出了选取的参考值<sup>[12]</sup>。还有研究则视多变指数 $n$ 为一受气体压缩率和介质热阻影响的函数,并给出函数的具体形式<sup>[13]</sup>:

$$n(\varepsilon) = (k-1) \left( \frac{k}{k-1} - e^{-\frac{\varepsilon}{M}} \right) \quad (12)$$

式中: $k$ —绝热指数, $M$ —常数, $\varepsilon$ —气体压缩速率。

气体压缩速率 $\varepsilon$ 由下式得出;

$$\varepsilon = \frac{Q}{V_0} \quad (13)$$

式中: $Q$ —进入气室内流量, $V_0$ —气室内气体初体积。

但是该表达式中存在一个需要试验确定的系数 $M$ 。表达式的形式也过于复杂。

(2)半经验半理论状态方程。常用的实际气体状态方程主要有基于经验的RWR(Benedict-Webb-Rubin)方程和MH(Martin-Hou)方程与半经验半理论的P-K(Redlich-kwong)方程和P-R(Peng-Robinson)方程等。一般认为P-K方程能较好地反映出氮气在悬挂缸工作中的变化规律<sup>[14-16]</sup>。其具体表达式为:

$$p + \frac{a}{T^{0.5} V_m (V_m + b)} = \frac{RT}{V_m - b} \quad (14)$$

式中: $p$ —气体压力; $V_m$ —气体摩尔体积; $T$ —温度; $R$ —气体常量; $a, b$ —P-K方程常量。

相对于理想气体状态方程多了两个参数 $a$ 和 $b$ ,因此略显复杂。但参数 $a$ 和 $b$ 值可以通过手册或根据临界压力和临界温度计算得出。而且由于该方程考虑了温度和密度对分子间相互作用的影响,更为精确。

(3)多参数经验状态方程。国外P. S. EIs<sup>[17]</sup>曾使用8经验常数的RWR方程对弹性力值进行推算,由于参数过多且方程形式复杂,也不利于工程应用。经验常数多达十几项的多参数方程可以精确地得出计算结果,可参数众多,使得形式不够简洁,给模型的建立带来了不小的难度,因此很少采用。近年来计算机技术的发展为基于多参数方程的模型建立提供了可能。

### 3.3 摩擦力

在悬挂缸的工作过程中,配合面与密封件之间会发生相对运动,产生摩擦力。一般油气悬挂建模中常假设摩擦力为常数或忽略不计。而实际工程中摩擦力在3 kN~6 kN之间,这在研究动态响应时会带来较大误差。在考虑摩擦力影响的情况下,式(1)的表达式可修正为下式:

$$F = p_1 S_1 - p_2 S_2 + f \quad (15)$$

悬挂缸中摩擦力的表达形式还不够成熟,目前有以下几种描述方法。

(1)流体动力润滑法。根据油膜摩擦机理可推得摩擦力为与配合面直径、密封宽度、相对运动速度及压力梯度有关的函数<sup>[18]</sup>:

$$f = \pi D \int_0^B \tau dx \quad (16)$$

式中: $B$ —密封面接触宽度, $D$ —缸体的内径, $\tau$ —密封面上的剪切应力。

剪切应力  $\tau$  由下式得出:

$$\tau = \frac{\mu u}{h} + \frac{h}{2} \frac{dp}{dx} \quad (17)$$

式中:  $\mu$ —油液动力粘度,  $u$ —油液速度,  $h$ —油膜厚度,  $p$ —油膜压力。

联立式(15)与式(16)即可得到基于流体润滑理论的摩擦力表达式,但该方程式一个复杂非线性积分,表达复杂不适于工程应用。因为配合面直径与密封宽度均由结构决定,而油膜很薄压力梯度可忽略不计,因此可将摩擦力视为一个与相对速度相关的函数,并将寻找一个合理的数学表达式作为下一步研究的重点。

(2)动摩擦法。采用动摩擦力与静摩擦力同速度变化关系的方式来描述悬挂缸所受的阻力:

$$f = \left[ 1 - u_D \frac{\min(|\dot{x}|, x_t)}{x_t} \right] f_s \quad (18)$$

式中:  $u_D$ —动静摩擦力差值与静摩擦力之比,  $f_s$ —静摩擦力,  $v_t$ —完全达到动摩擦的速度。

该方程可以较为简洁地反映出摩擦力与滑动速度之间的关系,但是该方程与实际工作中液压缸经常处于颤振状态之间的吻合程度有待于进一步探讨。

(3)基于密封件摩擦原理的修正系数法。文献[19]同样是根据密封件与配合面的摩擦机理来反映摩擦力的规律,并且使用修正系数避免了复杂的积分形式<sup>[20-21]</sup>。表达式如下:

$$f = 2\mu\pi\Delta p(Db_Dk_D + db_dk_d) \quad (19)$$

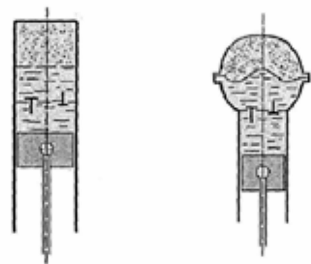
式中:  $\mu$ —密封圈摩擦因数;  $\Delta p$ —密封圈两侧压力差;  $D$ —液压缸缸筒内径;  $d$ —活塞杆外径;  $b_D, b_d$ —活塞、活塞杆密封圈宽度;  $k_D, k_d$ —密封圈摩擦修正系数。

该表达式反映了摩擦力与接触面压力之间的关系,形式比较简单,且物理意义明确,但实际中液压缸缸体与活塞之间的摩擦力与油膜的性质密切相关。而油膜的形成又受温度、表面速度等复杂因素所影响。该方程无法反映出这些因素与摩擦力之间的内在联系。

### 3.4 气体溶解性

根据结构的不同可将油气悬挂分为油气不分离式和油气分离式,分离式油气悬挂气室与油缸之间都由一个浮动活塞相隔离,而油气不分离式则利用气体不易溶于油液的特性来实现气室与油缸的隔离如图2所示。

本研究在分析油气悬挂系统时常忽略泄露将其视为一个封闭系统。但对于油气不分离式悬挂由于气体的溶解性将会导致气室内气体的量发生改变。有研究通过试验表明气体溶解性对油气悬挂模型准确性的影



(a) 油气不分离式

(b) 油气分离式

图2 油气悬挂缸的两种结构

响甚至大于油液压缩性的影响<sup>[22]</sup>,并建立了基于亨利定律和理想气体状态方程的油气悬挂数学模型。并将模型仿真与试验结果相比对,发现在气体溶解度3%模型下的压力-时间曲线与实际情况相吻合。但一般气体在矿物油中的饱和度为10%,其作者认为是因为气体在液体中扩散率不高未能完全饱和所致,因此考虑油液扩散的梯度模型将会是下一步研究的问题。

## 4 结束语

目前油气悬挂建模研究存在的问题,决定了其未来的研究方向和发展趋势:

(1)考虑实际工作环境中的温度的影响。悬挂系统中热量的主要来源是小孔阻尼和密封件的摩擦,主要内容是通过试验或原理分析研究温度对液体粘性 & 热膨胀性等影响。

(2)探究形式简单、参数较少但又能精确描述气室内氮气特性的方程。采用实际气体状态方程可以得到较为准确的计算结果。但是复杂的方程形式给计算和应用带来了诸多不便,可以考虑采用压缩因法来对理想气体状态方程进行修正,以期得到较为简单和准确的模型。

(3)理论建模与实验建模联合。目前对油气悬挂的内部结构和性能还存在未能了解和认识的部分,虽然其数学模型可以被导出,但模型中的某些参数有待于用试验的方法来确定。油气悬挂联合建模主要思想是用实测试验数据来代替计算复杂的部分,其它部分采用基于物理原理的模型。因此积累和增加试验数据是需要持续进行的工作。

(4)模型修正准则制定。本研究中所提到的油气悬挂建模关键因素,在特定的结构或工况中通常是可以简化处理的。因此如何保证建立的数学模型能代表不同工况中悬挂缸的真实运动状态,适用条件又是怎样,量化的标准是多少。这些问题在目前的研究领域中还没有很好的解答。

## 参考文献 (References):

- [1] 周长城. 车辆悬架设计及理论[M]. 北京:北京大学出版社,2011.
- [2] MOULTON A E, BEST A. Hysgragas suspension [M]. Warrendale: Scoiety of Automotive Engineers,1979.
- [3] WORDEN K, TOMLINSON G R V, SURACE C. An improved nonlinear model for an automotive shock absorbers [J]. **Nolinear Dynamics**,1992,3(6):413-429.
- [4] 蔡言龙,张 洪,刘利宝,等. 单气室油气悬架系统的建模与仿真研究[J]. 液压气动与密封,2014,34(4):18-21.
- [5] 李传才. 履带式装甲车辆悬挂性能研究与仿真[D]. 太原:中北大学机电工程学院,2013.
- [6] CHO J R, LEE H W, YOO W S, et al. Study on damping characteristics of hydropneumatic suspension unit of tracked vehicle[J]. **KSME Internationl Journal**,2004,18(2):262-271.
- [7] 蔡 杨. 基于平顺性的重型矿用自卸车油气悬架系统分析及优化[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院,2013.
- [8] 李桂康. 军用车辆油气悬架系统仿真及参数优化设计[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2013.
- [9] 田 勇,田文朋. 油气悬架在全液压底盘上的应用与建模[J]. 液压气动与密封,2014,34(2):52-55.
- [10] SOLOMON U, PADMANABHAN C. Hydro-gas suspension system for a tracked vehicle: Modeling and analysis[J]. **Journal of Terramechanics**,2011,48(2):125-137.
- [11] SOLOMON U, PADMANABHAN C. Semiactive hydro-gas suspension system for a tracked vehicle[J]. **Journal of Terramechanics**,2011,48(3):225-239.
- [12] 封士彩. 气囊式蓄能器气体多变指数理论值和实际值的确定[J]. 液压与气动,2002,25(5):3-5.
- [13] 王德伟. 蓄能器充压过程中气体多变指数的确定[J]. 液压与气动,2007,30(9):78-79.
- [14] 刘志强. 车辆油气悬挂系统动力学研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学机电工程学院,2011.
- [15] 吕宝占. 非公路车辆前轴油气悬架系统动力学特性研究[D]. 南京:南京农业大学工学院,2008.
- [16] 宋光伟,王凯平,殷盛福,等. 考虑热物特性的油气悬挂缸理论模型研究[J]. 合肥工业大学学报,2014,37(4):394-397.
- [17] ELS P S, GROBBELAAR B. Heat transfer effects on hydropneumatic suspension systems[J]. **Journal of Terramechanics**,1999,36(4):197-205.
- [18] 刘帮才,范华志,尹立松,等. 简析液压缸摩擦力的特性及其改善措施[J]. 液压气动与密封,2013,33(12):74-77.
- [19] 金 纯,孙会来,张文明,等. 工程车辆油气悬架分数阶建模与特性分析[J]. 农业机械学报,2014,45(5):16-20.
- [20] 田 勇,田文朋. 油气悬架在全液压底盘上的应用与建模[J]. 液压气动与密封,2014,34(2):52-55.
- [21] 蔡言龙,张 洪,刘利宝,等. 单气室油气悬架系统的建模与仿真研究[J]. 液压气动与密封,2014,34(4):18-21.
- [22] 黄夏旭,杨 珏,申焱华,等. 基于气体溶解与油液可压缩性的油气悬架性能研究[J]. 农业机械学报,2013,44(6):16-18.

[编辑:周昱晨]

## 本文引用格式:

史啸天,尤小梅,柴国英,等. 油气悬挂动力学模型研究综述[J]. 机电工程,2016,33(6):770-774.

SHI Xiao-tian, YOU Xiao-mei, CHAI Guo-ying, et al. Survey on dynamics model of hydro-pneumatic suspension[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(6):770-774.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>