

# 惯容器及惯容器-弹簧-阻尼器悬架研究进展

毛明, 王乐, 陈轶杰, 雷强顺, 杜甫

(中国北方车辆研究所, 北京 100072)

**摘要:** 介绍了惯容器和惯容器-弹簧-阻尼器(ISD)悬架的概念、提出背景及特点,总结了惯容器结构形式、动力学特征和非线性特性、频率响应特性和击穿现象。从 ISD 悬架结构形式、性能特点和网络综合理论的应用、ISD 悬架空间布置和一体化设计等方面,系统说明了 ISD 悬架研究进展。归纳总结提出了惯容器及 ISD 悬架未来的 5 大研究方向,包括惯容器的创新设计、惯容器非线性研究、ISD 悬架网络综合、ISD 悬架的应用研究及 ISD 悬架一体化融合设计。

**关键词:** 兵器科学与技术; 惯容器; 惯容器-弹簧-阻尼器; 悬架; 结构形式; 特性; 综述

**中图分类号:** U463.33      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2016)03-0525-10

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.03.019

## Research Progress in Inerter and Inerter-spring-damper Suspension

MAO Ming, WANG Le, CHEN Yi-jie, LEI Qiang-shun, DU Fu

(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

**Abstract:** The appearance of inerter and its device greatly promote the development of electrical and mechanical analogy and inerter-spring-damper (ISD) suspension. The concept, background and characteristics of the inerter and ISD suspension are introduced. The structure types, dynamics, frequency responses, nonlinear characteristics and breakdown phenomena of the existing inerters at home and abroad are described. The research progress of ISD suspension are systematically explained by summarizing its structure types, performance, network synthesis theory and application, layout and integrated design. Five aspects of future application of inerter and ISD suspension, including innovative design of inerter, inerter nonlinear research, ISD suspension network synthesis, application and integrated design of ISD suspension, are presented.

**Key words:** ordnance science and technology; inerter; inerter-spring-damper suspension; structure type; characteristics; overview

## 0 引言

2001 年,英国剑桥大学 Smith 教授在研究机电相似理论时首先提出惯容器的概念,并设计出齿轮齿条式和滚珠丝杠式惯容器样机<sup>[1-3]</sup>。惯容器概念及样机的出现,引起了国内外学者的广泛关注。以

Smith 教授领衔的英国剑桥大学对惯容器及其应用展开了持续而深入的研究,其团队首次将惯容器应用于车辆悬架,在传统的弹簧-阻尼器基础上增加惯容器,构建了几种简单的惯容器-弹簧-阻尼器 (ISD) 悬架结构,首次验证了惯容器具有改进传统弹簧-阻尼器 (SD) 悬架性能的优势<sup>[4-5]</sup>。同年,

收稿日期: 2015-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305410)

作者简介: 毛明(1962—),男,研究员,博士生导师。E-mail: ming\_mao@noveri.com.cn;

王乐(1988—),女,硕士研究生。E-mail: 262612961@qq.com

Smith 教授及团队将惯容器应用于高性能摩托车的操控系统,提升了其稳定性,实现了惯容器的首次应用。2005 年,惯容器现身方程式赛车,不仅提升了赛车抓地力,而且在高速行驶时表现出更好的空气动力学性能。随着研究的深入,Smith 教授及团队对齿轮齿条式惯容器和滚珠丝杠式惯容器进行了台架试验研究,首次提出了机械式惯容器的背隙问题,并分析了其对惯容器及 ISD 悬架的影响<sup>[6-7]</sup>。随后,Smith 教授及团队在 ISD 悬架机械振动网络综合方面展开了一系列研究,提出了含惯容器的被动机械振动网络设计和控制的方法<sup>[8-13]</sup>。2013 年,Smith 教授及团队研制了液力式惯容器样机<sup>[14]</sup>,与机械式惯容器相比,具有结构简单、性能可靠等优点。

2006 年至今,Wang 等<sup>[15-18]</sup>对惯容器及应用展开了广泛的研究,并将惯容器应用于铁路机车悬架,提高了其乘坐舒适性、动力性和稳定性。Wang 等<sup>[19-20]</sup>还将惯容器应用到建筑物隔振系统中,验证了惯容器可有效降低来自地震和交通的振动。2011 年,Wang 等<sup>[21]</sup>设计了一种液压式惯容器,采用液压传动推动涡轮带动飞轮旋转,由此实现对飞轮惯性的封装,试验结果显示该装置具有较好的性能。

在国内,以江苏大学为代表,对惯容器、ISD 悬架设计及应用展开研究。2007 年,江苏大学验证了应用齿轮齿条式惯容器的车辆悬架具有更好的减振性能。2008 年,江苏大学验证了惯容器具有通高频、阻低频的特性<sup>[22]</sup>。随后,其利用惯容器实现了车辆悬架理想天棚和地棚阻尼申请国际 PCT 专利<sup>[23]</sup>,并借鉴电学中的级联滤波思想,构建了两级串联型 ISD 悬挂,性能明显优于传统 SD 悬挂<sup>[24-25]</sup>。在惯容器结构方面,江苏大学也设计了以封装质量惯性为特征的一类惯容器,提出了扭转惯容器的概念及其实现方式,阐明了惯容器的基本设计原理<sup>[26-27]</sup>。在此基础上,设计了摆线钢球式惯容器、液压式惯容器、杠杆式惯性质量蓄能悬架等<sup>[28-32]</sup>。

2013 年,中国北方车辆研究所研究人员开展了惯容器及 ISD 悬架在高机动履带车辆上的应用研究。建立了基于一个惯容器的通用悬架拓扑结构,提出了基于通用动力学模型的 ISD 悬架参数优化方法,创建了 ISD 悬挂在高机动履带车辆上的布置形式,首次建立了包含 ISD 悬挂的军用高机动履带车辆整车动力学模型。通过动力学仿真分析,证明了对于高机动履带车辆,ISD 悬挂的性能优于 SD 悬挂<sup>[33-34]</sup>。

惯容器概念提出至今的 15 年间,国内外学者已对惯容器及 ISD 悬架进行了深入研究,取得了一系列的成果。随着研究的深入,惯容器的背隙、被击穿和非线性等问题不断被提出,与此同时,新型惯容器结构不断出现,使得惯容器及 ISD 悬架的研究向更深层次和更宽领域拓展。本文将对惯容器及 ISD 悬架的研究进展进行全面的概括和总结,并在此基础上,展望下一步的重点研究方向。

## 1 惯容器

### 1.1 惯容器的概念及特点

第二类机电相似理论中,力与电流、速度与电压以及质量元件与电容元件、阻尼元件与电阻元件、弹簧元件与电感元件分别对应相似,如表 1 所示。

表 1 第二类机电相似理论

Tab. 1 Type II mechanical and electrical analogy theory

元件名称	机械振动网络	元件名称	电路网络
质量	$F = m \frac{d(v_2 - v_1)}{dt}$	电容	$i = C \frac{d(U_2 - U_1)}{dt}$
阻尼	$F = c(v_2 - v_1)$	电阻	$i = \frac{1}{R} (U_2 - U_1)$
弹簧	$\frac{dF}{dt} = k(v_2 - v_1)$	电感	$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (U_2 - U_1)$

然而,根据牛顿第二运动定律的定义,质量元件必须以惯性坐标系为基础,其加速度为绝对加速度。因此,区别于弹簧元件和阻尼元件,质量元件是一个单端点元件(另一个端点为地心),其单端点属性如图 1 所示。与质量元件进行机电相似的电容元件必须作接地处理,这便形成一种不对应关系,造成机械振动网络与电路网络不能完全对应相似,阻碍了机电相似理论的研究和应用。

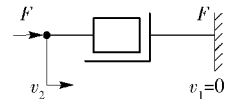


图 1 质量元件单端点特性

Fig. 1 Single terminal characteristic of mass elements

针对这一理论的缺陷,英国剑桥大学 Smith 教授首先提出惯质(也称惯容)的概念,将具有此种动力学特性的装置称为惯容器。在惯容概念基础上,第二类机电相似理论中,质量元件与电容元件的对应关系变为惯容元件与电容元件的对应关系,这种对应关系促进了机电相似理论的发展。惯容器被定义为具有两个相对自由运动的端点,当一对力作用

于两端点时,两端点的相对加速度与力成一定比例,该比例值为常数,称为惯质系数<sup>[1]</sup>。

惯容器的主要特点<sup>[35]</sup>包括:1)具有两个独立、自由运动的端点;2)具有较小的质量和独立的惯质系数;3)不需要附加任何端点在惯性基础上;4)具有有限线性行程,并且服从于整体尺寸的合理约束。

### 1.2 惯容器的结构形式及动力学特征

惯容器概念提出至今,已经出现了多种结构形式的惯容器装置,根据惯容器实现形式的不同,惯容器可以分为机械惯容器和流体惯容器两大类,具体分类如图2所示。

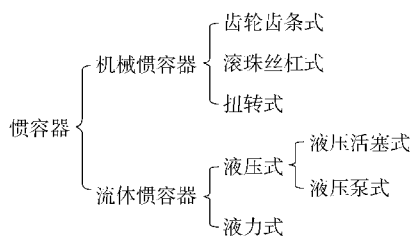


图2 惯容器分类

Fig.2 Classification of inerters

#### 1.2.1 齿轮齿条式惯容器

齿轮齿条式惯容器是最早研发出来的惯容器样机,它是一种采用齿轮齿条运动副作为传动机构的惯容器。其工作原理如图3所示,当等大反向的力 $F$ 作用于齿条两端点时,端点 $b_1$ 相对于端点 $a_1$ 产生位移,通过齿条与小齿轮I及大齿轮与小齿轮II之间的啮合副传动,将两端点的相对直线运动转化为飞轮的旋转运动,由此实现对飞轮惯性的封装<sup>[22]</sup>。

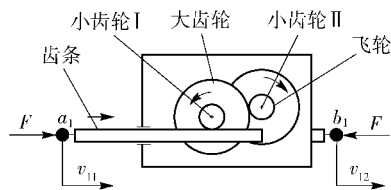


图3 齿轮齿条式惯容器

Fig.3 Rack-and-pinion inerter

齿轮齿条式惯容器的惯质系数为

$$b_1 = I_1 \left( \frac{r}{r_1 r_{II}} \right)^2, \quad (1)$$

式中: $r_1$ 为小齿轮I的节圆半径; $r$ 为大齿轮的节圆半径; $r_{II}$ 为小齿轮II的节圆半径; $I_1$ 为飞轮的转动惯量。

#### 1.2.2 滚珠丝杠式惯容器

滚珠丝杠式惯容器是一种采用滚珠丝杠运动副

作为传动机构的惯容器。滚珠丝杠运动副包括滚珠丝杠和滚珠丝杠螺母,二者均可作为主动件或从动件,可实现互换设计。

如图4(a)所示第一种设计,飞轮和丝杠固结为端点 $b_2$ ,沿轴向直线运动的螺母与行程室固结成为另一端点 $a_2$ ,两个端点的直线运动驱动丝杠和飞轮一起旋转,故称之为丝杠旋转式滚珠丝杠惯容器<sup>[36]</sup>。如图4(b)所示第二种设计,沿轴向直线平动的丝杠作为一个端点 $a'_2$ ,将飞轮与螺母固结,螺母的轴向平动受到飞轮室的限制只能绕轴向旋转,飞轮室成为另一个端点 $b'_2$ ,两个端点的相对直线运动驱动螺母和飞轮做旋转运动,故称之为螺母旋转式滚珠丝杠惯容器<sup>[3]</sup>。

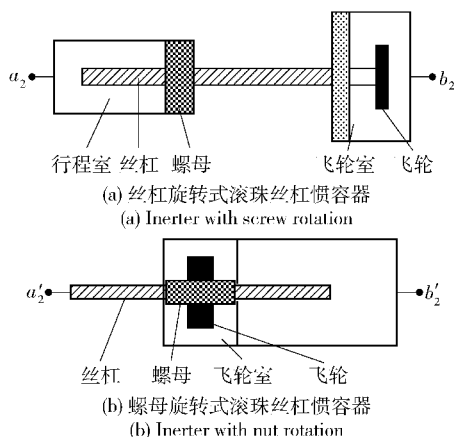


图4 滚珠丝杠惯容器

Fig.4 Ball screw inerters

滚珠丝杠式惯容器惯质系数由(2)式计算:

$$b_2 = I_2 \left( \frac{2\pi}{P} \right)^2, \quad (2)$$

式中: $P$ 为滚珠丝杠螺距; $I_2$ 为飞轮的转动惯量。

#### 1.2.3 扭转式惯容器

扭转式惯容器以具有一定扭转传递效率的扭转机械结构作为传动机构,并以飞轮作为惯性装置。目前出现的扭转式惯容器有少齿差行星齿轮扭转式惯容器和摆线钢球扭转式惯容器<sup>[28]</sup>,如图5和图6所示。

工作原理:当等值反向的转矩分别作用于端点 $a_3(a'_3)$ 和端点 $b_3(b'_3)$ 时,转轴(端点 $a_3/a'_3$ )相对于壳体或中心盘(端点 $b_3/b'_3$ )产生一定的角位移,转轴通过具有一定传递效率的扭转传动机构(少齿差行星齿轮或摆线钢球齿轮机构)将转矩传递给输出轴,并最终驱动飞轮旋转。

扭转式惯容器惯质系数

$$b_3 = I_3 n^2, \quad (3)$$

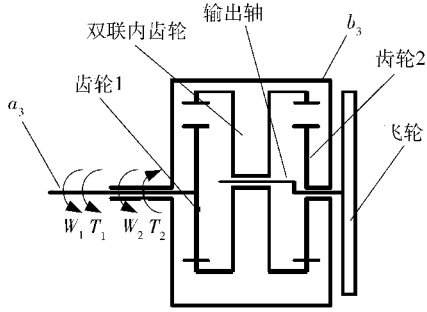


图 5 少齿差行星齿轮扭转式惯容器

Fig. 5 Planetary gear inverter with small tooth difference

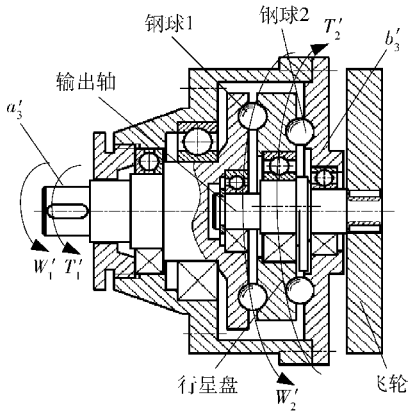


图 6 摆线钢球扭转式惯容器

Fig. 6 Cycloid steel-ball inverter

式中:  $n$  为扭转机构的传动比;  $I_3$  为飞轮的转动惯量。

#### 1.2.4 液压泵式惯容器

液压泵式惯容器是以液压活塞带动液压泵的叶轮轴旋转作为传动机构,原理类似水力发电机,其工作原理图如图 7 所示。它的两个端点分别是活塞杆(端点  $a_4$ )和液压缸(端点  $b_4$ ),在端点  $a_4$  施加向右的推力  $F$  时,活塞相对于液压缸向右移动,压力  $p_2$ 、 $p_3$  升高,压力  $p_1$ 、 $p_4$  降低, $p_3$  与  $p_4$  之间的压力差使液压马达旋转,从而驱动飞轮旋转,由此实现对飞轮惯性的封装<sup>[37]</sup>。

液压泵式惯容器惯质系数

$$b_4 = \frac{A^2 I_4 \eta_v}{K^2 \eta_m}, \quad (4)$$

式中:  $A$  为活塞截面积;  $K$  为液压泵流量与角速度比;  $I_4$  为飞轮的转动惯量;  $\eta_v$  为液压泵的容积效率;  $\eta_m$  为液压泵的机械效率。

#### 1.2.5 液压活塞式惯容器

液压活塞式惯容器也是一种利用液压传动的惯容器,其特点是活塞移动形成液压,再带动另一个活塞运动来作为传动机构,并在此过程中利用两个活

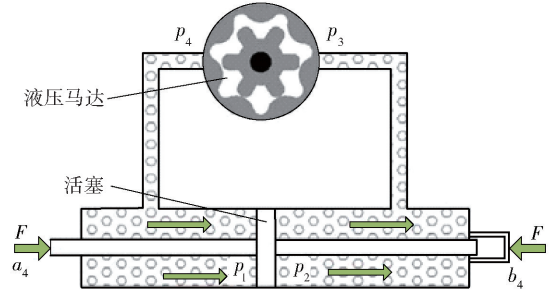


图 7 液压泵式惯容器

Fig. 7 Hydraulic pump inverter

塞横截面积的差异实现惯性的封装。目前出现的液压活塞式惯容器有分体式和一体式两种<sup>[38]</sup>,如图 8 所示。

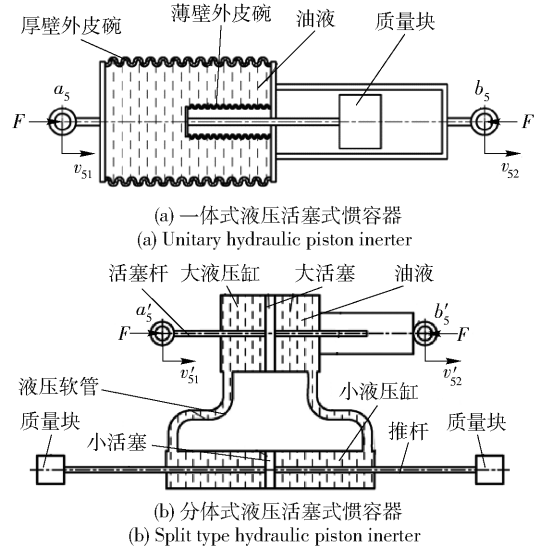


图 8 液压活塞式惯容器

Fig. 8 Hydraulic piston inverter

液液压活塞式惯容器惯质系数

$$b_5 = m_5 \left( \frac{A_b}{A_s} \right)^2, \quad (5)$$

式中:  $m_5$  为质量块的质量;  $A_b$  为大活塞的截面积;  $A_s$  为小活塞的截面积。

#### 1.2.6 液力式惯容器

齿轮齿条、滚珠丝杠式、液压泵式、液压活塞式和扭转式惯容器都是以平动或旋转质量作为惯性机构,通过不同的机械或液压传动机构将两个独立自由端点的直线运动转化为旋转运动,从而驱动飞轮旋转,实现对飞轮惯性的封装。

液力式惯容器是一种以在细长管中流动的流体取代机械飞轮装置作为惯性机构的惯容器,如图 9 所示。端点  $a_6$  与活塞固结,端点  $b_6$  与液压缸固结,当端点  $a_6$  相对于端点  $b_6$  向右运动时,由于流体不

可压缩,活塞推动流体运动,流体经螺旋细长管从右腔流入左腔。通过流体在螺旋细长管中的流动,实现对流体流动惯性的封装<sup>[14,39]</sup>。

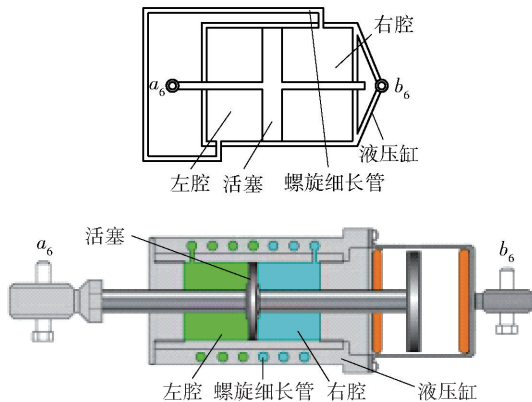


图 9 液力式惯容器  
Fig. 9 Hydraulic inerter

液力式惯容器惯质系数的计算公式为

$$b_0 = \rho l A_1 \left( \frac{A_p}{A_1} \right)^2, \quad (6)$$

式中: $\rho$  为流体密度; $l$  为螺旋细长管的长度; $A_1$  为螺旋细长管的横截面积; $A_p$  为活塞的工作面积。

综上所述,惯容器由传动机构、惯性机构和端点 3 部分组成。惯容器的传动机构实际上是一种力放大机构;惯性主要依靠飞轮的旋转惯性或质量的平动惯性;此外,惯容器须具备两个独立、自由的端点,端点形式主要根据所选用的传动机构和惯性机构进行具体设计。如图 10 所示<sup>[26]</sup>,设计惯容器应遵循具有两个独立、自由的端点,能够放大惯性的基本原理。

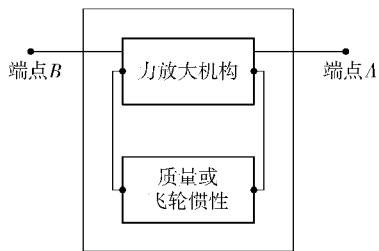


图 10 惯容器设计的基本原理  
Fig. 10 Design principle of inerter

### 1.3 惯容器非线性特性

前已述及,理想惯容器两个端点的相对加速度与施加在两个端点上的力呈正比,即理想惯容器的动力学特性是线性的。然而,理想惯容器忽略了摩擦、弹性效应、背隙和流体粘性等非线性因素且惯容器在加工、装配过程中存在误差,这些因素导致惯容

器存在非线性力学特性。

机械惯容器的典型代表是齿轮齿条式惯容器和滚珠丝杠式惯容器。背隙、弹性效应和摩擦力是机械惯容器产生非线性的主要因素。背隙存在于齿轮副和滚珠丝杠副啮合传动中,在惯容器高速旋转向时会迟滞和冲击现象,使得惯容器的实际力学性能出现非线性。对于滚珠丝杠式惯容器可通过预紧方式尽可能减小背隙,当然,减小背隙也往往导致摩擦力的增加。在惯容器工作时,齿对承受载荷会产生弹性变形引起齿轮对间的接触改变,齿轮对传递的作用力也相应发生变化,这种弹性效应会影响到惯容器的力学特性。机械系统中必然存在摩擦,由于惯容器结构固定、运动传递关系确定,惯容器结构中存在的摩擦力可以考虑为一个常量,其对惯容器性能的影响主要在低频段。液力式惯容器的非线性主要源于:流体介质在管路中随压力、流速变化与管壁产生的迟滞摩擦;液压泵或液压活塞所存在的阻尼特性;流体因可压缩性产生的弹性。

研究表明:在频率比较低时,机械惯容器和液力式惯容器中,摩擦阻尼力起主要作用,惯容特性起次要作用;随着频率的逐渐增大,这两类惯容器的摩擦阻尼力对惯容器的影响逐渐减小,惯容特性对惯容器性能的影响越来越大。在中频和高频时,液力式惯容器的实际性能与理论性能基本一致。在相同频率下,惯质系数越大,摩擦阻尼力对惯容器的影响越小,其实际性能与理想模型更加接近<sup>[40-41]</sup>。

液力式惯容器的典型结构是细长螺旋管式(分外置和内置两种)。影响其非线性的主要因素包括流体在细长管内沿程压力损失造成的阻尼力、细管进出口处的阻尼力和活塞与液压缸壁的摩擦。相对于沿程压力损失造成的迟滞阻尼力,进出口的阻尼力对流体惯容器特性的影响可以忽略。螺旋弯管中,流体高速流动时因离心力作用会产生二次流现象,管内流体沿程压力损失表现出强非线性特点,影响到理想液力式惯容器的线性特性。通过试验与仿真数据对比发现,液力式惯容器中流体的可压缩性,即流体的刚度是随着活塞位置不同而呈非线性变化,这样也同样影响到液力式惯容器的力学性能<sup>[14]</sup>。

### 1.4 惯容器频率响应特性

如表 2 所示,根据新机电相似理论,机械振动网络中的弹簧具有通低频、阻高频的动力学特性,阻尼器具有存阻性,与频率无关的特性。因此,仅由弹簧

和阻尼器并联组成的传统 SD 被动悬架,只能缓冲和衰减来自路面不平引起的高频冲击和振动,而不能滤除其低频部分。然而,惯容器具有通高频、阻低频的动力学特性,可在传统 SD 被动悬架的基础上,串联一个具有通高频、阻低频特性的惯容器,以便实现缓冲和衰减来自路面不平引起的低频冲击和振动。

表 2 机电对应关系及性质

Tab. 2 Electromechanical correspondence and property

机械网络	电路网络	相似性质
惯容器	电容元件	隔直流、通交流;阻低频、通高频
弹簧	电感元件	通直流、隔交流;通低频、阻高频
阻尼器	电阻元件	存阻性,与频率无关

## 1.5 击穿现象

类似于电容元件的击穿现象,惯容器也会被击穿。因为悬架的行程是有限度的,惯容器的行程无法设计成无限大,当惯容器的行程耗尽时,会产生很大的冲击,使得惯容器被击穿,使其近似成为刚性而失去减振效果。图 11 为惯容器被击穿前后的状态。

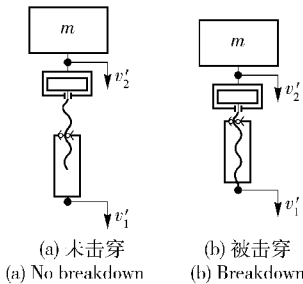


图 11 惯容器击穿状态

Fig. 11 Breakdown phenomenon of inerter

避免惯容器被击穿的措施是,为其并联一个弹簧,使之能够在平衡位置附近工作,从而避免被击穿。但是这种做法改变了与经典 LC 回路(仅由电感和电容组成的无电阻回路)的严格对应关系,从理论上就降低了悬架的隔振滤波效能。

## 2 ISD 悬架

### 2.1 ISD 悬架的概念及特点

惯容器的出现,推动了新机电相似理论的发展,打破了基于经典隔振理论的 SD 结构体系对悬架隔振性能进一步提高的瓶颈制约,ISD 悬架应运而生,为悬架新技术的发展提供了一个崭新的平台。

在传统 SD 基础上增加惯容器设计而成的新型悬架结构,被称为 ISD 悬架。ISD 悬架的主要特点

为:

- 1) 改变了传统 SD 被动悬架结构体系,类似于滤波网络,弹簧、阻尼器和惯容器可组成减振网络,具有丰富的网络特性;
- 2) 悬架基本参数不可变,仍属于被动悬架范畴;
- 3) 不消耗能量,具有无源性;
- 4) 性能较传统 SD 悬架高。

### 2.2 ISD 悬架结构形式

惯容器、弹簧和阻尼器均有多种的结构形式,三者的组合也多种多样。因此,ISD 悬架的结构形式多种多样,已出现的 ISD 悬架通用工程结构如图 12<sup>[33-34]</sup> 所示。

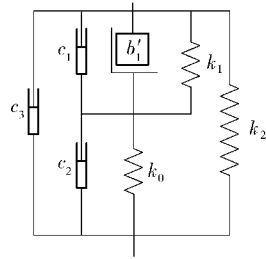


图 12 ISD 悬架通用工程结构

Fig. 12 General engineering structure of suspension

目前,普遍认为适用于车辆的 ISD 悬架结构为两级串联型 ISD 悬架,如图 13 所示。其第一级由弹簧和阻尼器并联构成;第二级由弹簧、阻尼器和惯容器并联构成,两级串联组成 ISD 悬架。

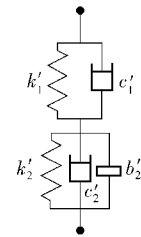


图 13 两级串联型 ISD 悬架

Fig. 13 Two-stage series ISD suspension

### 2.3 ISD 悬架性能分析

如图 14<sup>[42]</sup> 所示,通过分析对比两级串联型 ISD 悬架和传统被动悬架的频域特性可知,ISD 悬架在低频时车身振动加速度功率谱密度(PSD)和轮胎动载荷 PSD 曲线上均无峰值,而高频段的 PSD 曲线基本重合。结果表明:传统 SD 悬架和 ISD 悬架的高频段的性能基本一致;而在低频段,两级串联型 ISD 悬架有效抑制了车身共振,减小了车身跳动,提高了车辆的乘坐舒适性。ISD 悬架的第一级主要影响高

频性能,第二级主要影响低频性能,正是第二级改善了车辆的低频频响特性<sup>[25]</sup>。

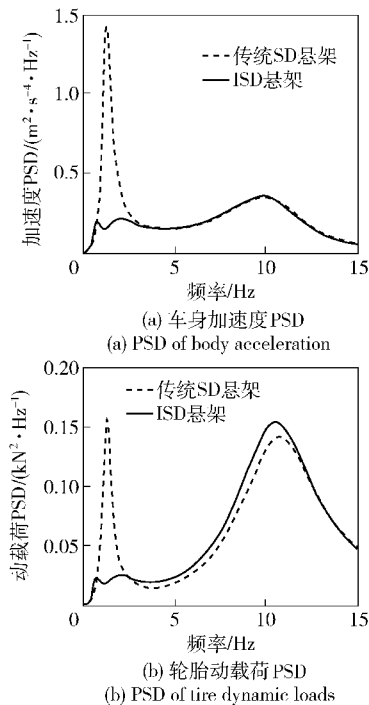


图 14 系统随机响应 PSD 对比

Fig. 14 Comparison of PSD

### 2.4 ISD 悬架网络综合

网络综合也称为网络实现,基本思想是将一个传递函数实现用一个具体的电路系统或机械系统元件串并联结构来实现。图 15 为电路网络综合的过程<sup>[35]</sup>,相类似,ISD 悬架网络综合的基本过程是将悬架系统作为一个机械网络,根据路面输入和期望的车辆性能,先求出悬架的传递函数,再用惯容器、弹簧和阻尼器 3 种基本元件构建实现该传递函数的悬架系统。

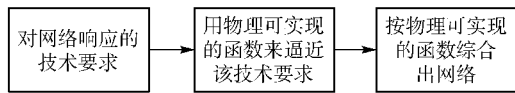


图 15 电路网络综合的过程

Fig. 15 Synthesis process of electrical network

目前,ISD 悬架网络综合的典型做法为:将 ISD 悬架视为一个目标传递函数,以系统两端点综合传递力值不变为目标,通过线性矩阵不等式将目标传递函数的求解转化为一个正实控制器的求解。基于电路网络中的正实函数可被综合为被动电路的方法,将目标传递函数(或正实控制器)等效综合为一个 ISD 结构。

但是,在实际应用过程中,网络综合出的某些机

械振动网络结构,区别于对应的电路结构,在重力作用下会失效。此外,线性矩阵不等式求解正实控制器的过程,是一个单目标控制算法,它以单一的车辆悬架性能指标为控制依据,难以兼顾悬架性能的要求。不仅如此,将目标传递函数网络综合为具体结构时,除非采用凑函数的方法直观综合出具体结构,否则会存在结构不唯一现象,即不同的网络综合方法会综合出不同的结构,而一个传递函数将会对应若干个等效网络结构,有的方法还会导致杠杆的出现。同时,随着传递函数阶数的提高,网络综合所需的元件个数会大幅增加。因此,只有求得的目标传递函数结构清晰,才能直接通过函数的等式变换看出原型结构,否则直接使用网络综合方法,对于高阶(含二阶)传递函数网络综合出来的结构会很复杂而不便于工程应用。

### 2.5 ISD 悬架空间布置

对车辆 ISD 悬架的研究,除保证其具有良好的乘坐舒适性和稳定的轮胎动载荷外,还须保证 ISD 悬架易于布置。即要求所设计的 ISD 悬架结构紧凑,行程控制在悬挂高度允许的范围内。

目前,对车辆 ISD 悬架空间布置问题的研究主要针对两级串联型 ISD 悬架结构而展开。两级串联型 ISD 悬架主要包括车身隔振体和车轮隔振体。车身隔振体由惯容器、弹簧和阻尼器并联组成,车轮隔振体由弹簧和阻尼器并联组成,前者用于抑制车身垂直加速度的低频(车身固有频率)峰值,后者用于抑制轮胎动载荷的高频(车轮固有频率)峰值,从而协调乘坐舒适性和行驶安全性之间的矛盾。但是,这种串联结构的实现形式使得悬架整体高度较大,不易于实车的安装。目前,解决这个问题的主要有两种思路:

1)选择合适的车轮结构或车身结构<sup>[32]</sup>。如图 16 所示,车轮结构采用扭转弹簧和阻尼器的形式,将车轮结构布置于摆臂与悬架横梁的铰链轴上,降低了悬架的高度,使悬架结构紧凑,易于布置。

2)通过两级间连接的特殊设计,将两级结构由常见的垂向串联布置变为沿车辆横向的串联布置。如图 17 所示利用等臂杠杆结构只改变力的方向、不改变力的大小的原理,将两级串联型 ISD 悬架对折,从而达到了降低悬架高度的目的<sup>[31]</sup>。如图 18 所示采用左、右悬架贯通的方式,车身隔振体共享,且两端分别与左上摆臂和右上摆臂的上端铰接,起到了降低悬架整体高度的效果<sup>[43]</sup>。

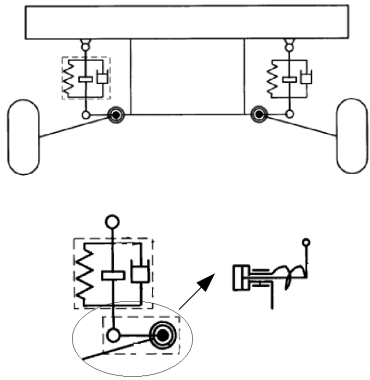


图 16 两级串联式 ISD 悬架的布置

Fig. 16 Layout of two-stage series ISD suspension

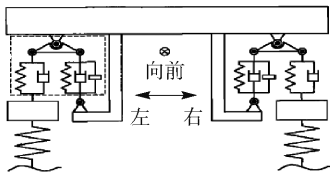


图 17 杠杆式布置

Fig. 17 Layout of lever-type

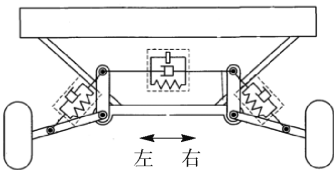


图 18 贯通式布置

Fig. 18 Layout of through-type

## 2.6 ISD 悬架的一体化设计

ISD 悬架一体化设计是进一步解决机械元件空间布置问题的另一个方法。目前形成的 ISD 悬架一体化设计的思路是:在机械系统中,弹簧元件的布置最为灵活,而惯容器和阻尼元件的空间体积较大,在布置空间有限的情况下,可将惯容器和阻尼器从内部结构上进行优化设计,将惯容器和阻尼器设计为一体化的装置,使二者成为一个机械单元。基于以上思路,ISD 悬架一体化设计主要包括惯容器与阻尼器同轴并联一体式惯容减振器设计、惯容器与阻尼器同轴串联一体式惯容减振器设计和惯容器与阻尼器、弹簧同轴并联的一体式惯容油气弹簧装置<sup>[35]</sup>。

## 3 结论与展望

综上所述,惯容器诞生以来的十几年间,国内外学者对其展开了全面而深入的研究。惯容器及机电相似理论逐渐成熟,形成了机械类和流体类两大结构类型。惯容器在车辆悬架领域的应用研究逐渐深

入,前景广阔,但仍有很多研究工作需要科研人员开展。有关惯容器及 ISD 悬架领域还需要进一步研究的方向主要包括:

1) 惯容器的创新设计。随着研究的深入,惯容器的结构类型逐渐增多,形成了较为成熟的方案。但是,如何通过创新设计实现惯容器的小型化、高效率、高精度以及高可靠性等性能,提高其在车辆上安装布置的可能性逐渐成为惯容器发展的重点。

2) 惯容器非线性研究。研究表明,惯容器的非线性因素对惯容器的动力学性能和 ISD 悬架的减振性能都有较大的影响。如何通过对惯容器非线性的研究,减小这种影响,甚至合理利用这种非线性特性,成为惯容器研究的重要内容之一。

3) ISD 悬架网络综合研究。ISD 悬架具有纷繁复杂的结构形式,受车辆有限空间的严重制约。因此,如何利用电学网络中成熟的网络综合理论,确定一种或几种有效结构作为车辆悬架的隔振器,是车辆 ISD 悬架研究的必要方向。

4) ISD 悬架的应用研究。在机械系统中,ISD 结构主要用作隔振器。当一个具体的 ISD 结构通过适当的方法确定后,如何将其布置在相应的隔振系统中成为工程难题。弹簧和阻尼器已经形成完整的产品线,尤其是在元件参数配套、匹配要求和空间布置上具有很强的灵活性。但是,惯容器由于在加工工艺、空间体积、元件性能和元件间匹配等问题上有较多问题亟待解决,从而导致一个具体的、理论上有效的 ISD 结构难以应用于隔振系统中。

5) ISD 悬架一体化融合设计。目前,油气弹簧已经形成成熟的产品线,结合液压式惯容器和液力式惯容器的研究,将惯容器融合到油气弹簧结构中去,形成集成化、模块化的 ISD 悬架结构,从而解决 ISD 悬架轻量化、实车布置和可靠性等问题,具有重要的研究价值。

## 参考文献 (References)

- [1] Smith M C. Synthesis of mechanical networks: the inerter[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(10): 1648 - 1662.
- [2] Smith M C. Synthesis of mechanical networks: the inerter[C]// Proceedings of the 41th IEEE Conference on Design and Control. Las Vegas, Nevada, US: IEEE, 2002: 1657 - 1662.
- [3] Smith M C. Force-controlling mechanical device: UK PCT/GB02/03056[P]. 2003 - 01 - 16.
- [4] Smith M C, Wang F C. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters [C] // Proceedings of the 42nd

- IEEE Conference on Design and Control. Hawaii, US: IEEE, 2003: 2258 – 2263.
- [5] Smith M C, Wang F C. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2004, 42(4): 235 – 257.
- [6] Christakis P, Smith M C. Laboratory experimental testing of inerters[C] // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Seville, Spain; IEEE, 2005: 3351 – 3356.
- [7] Christos P, Houghton N E, Smith M C. Experimental testing and analysis of inerter devices[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2009, 131(1): 011001-1 – 011001-11.
- [8] Christakis P, Smith M C. Positive real synthesis using matrix inequalities for mechanical networks: application to vehicle suspension[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2006, 14(3): 423 – 434.
- [9] Chen M Z Q, Smith M C. Restricted complexity network realizations for passive mechanical control [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(10): 2290 – 2301.
- [10] Jiang J Z, Smith M C. Synthesis of positive-real functions with low-complexity series-parallel networks [C] // Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference. Shanghai, China; IEEE, 2009: 7086 – 7091.
- [11] Jiang J Z, Smith M C. On the classification of series-parallel electrical and mechanical networks[C] // Proceedings of 2010 American Control Conference. Baltimore, MD, US: American Automatic Control Council, 2010: 1416 – 1421.
- [12] Jiang J Z, Smith M C. Regular positive-real functions and five-element network synthesis for electrical and mechanical networks [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(6): 1275 – 1290.
- [13] Jiang J Z, Matamoros-Sanchez A Z, Goodall R M, et al. Passive suspensions incorporating inerters for railway vehicle[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2012, 50(S1): 263 – 276.
- [14] Swift S J, Smith M C, Glover A R, et al. Design and modelling of a fluid inerter [J]. *International Journal of Control*, 2013, 86(11): 2035 – 2051.
- [15] Wang F C, Yu C H, Chang M L, et al. The performance improvements of train suspension systems with inerters[C] // Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, CA, US: IEEE Control Systems Society, 2006: 1472 – 1477.
- [16] Wang F C, Liao M K, Liao B H, et al. The performance improvements of train suspension systems with mechanical networks [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2009, 47(7): 805 – 830.
- [17] Wang F C, Liao M K. The lateral stability of train suspension systems employing inerters [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2010, 48(5): 619 – 643.
- [18] Wang F C, Hsieh M R, Chen H J. Stability and performance analysis of a full-train system with inerters[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2012, 50(4): 545 – 571.
- [19] Wang F C, Chen C W, Liao M K, et al. Performance analyses of building suspension control with inerters[C] // Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, Louisiana, US: IEEE, 2007: 3786 – 3791.
- [20] Wang F C, Hong M F, Chen C W. Building suspension with inerters [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2010, 224(8): 1605 – 1616.
- [21] Wang F C, Hong M F, Lin T C. Design and testing a hydraulic inerter[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2011, 225(1): 66 – 72.
- [22] 陈龙, 张孝良, 汪若尘. 应用惯性蓄能器的车辆悬架: 中国, ZL200810123830.8. [P]. 2008-12-24.  
CHEN Long, ZHANG Xiao-liang, WANG Ruo-chen. Vehicle suspension with inertial accumulator: China, ZL200810123830.8. [P]. 2008-12-24. (in Chinese)
- [23] 陈龙, 张孝良, 聂佳梅, 等. 一种被动天棚和地棚阻尼隔振系统: 中国, 102494071A [P]. 2013-12-11.  
CHEN Long, ZHANG Xiao-liang, NIE Jia-mei, et al. A passive skyhook and groundhook damping vibration isolation system; China, 102494071A [P]. 2013-12-11. (in Chinese)
- [24] 陈龙, 张孝良, 聂佳梅, 等. 基于半车模型的两级串联型 ISD 悬架性能分析[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(6): 102 – 108.  
CHEN Long, ZHANG Xiao-liang, NIE Jia-mei, et al. Performance analysis of two-stage series-connected inerter-spring-damper suspension based on half-car model [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(6): 102 – 108. (in Chinese)
- [25] 张孝良, 陈龙, 聂佳梅, 等. 2 级串联型 ISD 悬架频响特性分析与试验[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2012, 33(3): 255 – 258.  
ZHANG Xiao-liang, CHEN Long, NIE Jia-mei, et al. Analysis and experiment of frequency response characteristics of two-stage series-connected ISD suspension [J]. *Journal of Jiangsu University: Nature Science Edition*, 2012, 33(3): 255 – 258. (in Chinese)
- [26] 聂佳梅, 张孝良, 江浩斌, 等. 惯容器模型结构探索[J]. *机械设计与研究*, 2012, 28(1): 29 – 32.  
NIE Jia-mei, ZHANG Xiao-liang, JIANG Hao-bin, et al. Research on the inerter structure [J]. *Machine Design and Research*, 2012, 28(1): 29 – 32. (in Chinese)
- [27] 聂佳梅, 张孝良, 胡贝, 等. 车辆被动悬架技术发展新方向 [J]. *车辆与动力技术*, 2012, 126(2): 59 – 64.  
NIE Jia-mei, ZHANG Xiao-liang, HU Bei, et al. A new approach of vehicle passive suspension techniques [J]. *Vehicle & Power Technology*, 2012, 126(2): 59 – 64. (in Chinese)
- [28] 陈龙, 张孝良, 聂佳梅, 等. 摆线钢球式惯性质量蓄能器: 中国, 101956799A [P]. 2011-01-26.  
CHEN Long, ZHANG Xiao-liang, NIE Jia-mei, et al. Cycloid steel ball type inertial mass accumulator: China, 101956799A [P]. 2011-01-26. (in Chinese)
- [29] 陈龙, 张孝良, 聂佳梅, 等. 液力惯容器装置: 中国, 101975200A [P]. 2011-02-16.

- CHEN Long, ZHANG Xiao-liang, NIE Jia-mei, et al. Hydraulic inerter; China, 101975200A [P]. 2011-02-16. (in Chinese)
- [30] 陈龙, 张孝良, 聂佳梅, 等. 两自由端点式动力吸振器: 中国, 201010281992 [P]. 2010-09-14.
- CHEN Long, ZHANG Xiao-liang, NIE Jia-mei, et al. Two-free end point ynamic vibration absorber; China, 201010281992 [P]. 2010-09-14. (in Chinese)
- [31] 陈龙, 张孝良, 汪若尘, 等. 杠杆式惯性质量蓄能悬架: 中国, 201010281307. 5 [P]. 2010-09-19.
- CHEN Long, ZHANG Xiao-liang, WANG Ruo-chen, et al. Link suspension with inerters; China, 201010281307. 5 [P]. 2010-10-19. (in Chinese)
- [32] 陈龙, 张孝良, 汪若尘, 等. 惯性质量蓄能式车辆悬架: 中国, 201010281331. 9 [P]. 2010-09-14.
- CHEN Long, ZHANG Xiao-liang, WANG Ruo-chen, et al. Inertial mass storage vehicle suspension; China, 201010281331. 9 [P]. 2010-09-14. (in Chinese)
- [33] 杜甫. “惯容-弹簧-阻尼”悬挂结构综合及其在高机动履带车辆上的应用研究 [D]. 北京: 中国北方车辆研究所, 2014.
- DU Fu. Research on synthesis of “inertor-spring-damper” suspension structure and its application in high mobility tracked vehicle [D]. Beijing: China North Vechile Research Institute, 2014. (in Chinese)
- [34] 杜甫, 毛明, 陈轶杰, 等. 基于动力学模型与参数优化的 ISD 悬架结构设计及性能分析 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 59-65.
- DU Fu, MAO Ming, CHEN Yi-jie, et al. Structure design and performance analysis of Inertor-spring-damper suspension based on dynamic model and parameter optimization [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 59-65. (in Chinese)
- [35] 杨晓峰. 基于动力吸振原理的车辆 ISD 悬架动力学特性与实现方法研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
- YANG Xiao-feng. Research on dynamic characteristics and realization method of vehicle inerter-spring-damper suspension based on dynamic vibration aborsbers principle [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- [36] 孙晓强, 陈龙, 张孝良, 等. 基于 ADAMS 的滚珠丝杠式 ISD 悬架平顺性仿真研究 [J]. 车辆与动力技术, 2012, 126(2): 1-4.
- SUN Xiao-qiang, CHEN Long, ZHANG Xiao-liang, et al. Study of ride comfort on ball-screw ISD suspension based on ADAMS [J]. Vehicle & Power Technology, 2012, 126(2): 1-4. (in Chinese)
- [37] 林子谦. 惯质模型的实现 [D]. 台北: 台湾大学, 2007.
- LIN Zi-qian. Implementation of inerter model [D]. Taipei: Taiwan University, 2007. (in Chinese)
- [38] 张孝良. 理想天棚阻尼的被动实现及其在车辆悬架中的应用 [D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- ZHANG Xiao-liang. Passive realization of ideal skyhook damping and its application in vehicle suspension [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- [39] Robin T. Fluid inerter; US, GB2010/000112 [P]. 2011-07-28.
- [40] 张孝良, 聂佳梅. 摩擦力对滚珠丝杠惯容器频响特性的影响 [J]. 机械科学与技术, 2015, 34(5): 770-774.
- ZHANG Xiao-liang, NIE Jia-mei. Influence of the friction force on the frequency response characteristics of ballscrew inerter [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(5): 770-774. (in Chinese)
- [41] 孙泽宇. 液压惯容器设计及其与悬架匹配研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
- SUN Ze-yu. Design and test research of hydraulic inerter suspension [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- [42] 陈国涛, 陈龙, 张孝良, 等. “惯容器-弹簧-阻尼”悬架系统正实综合研究 [J]. 机械设计与制造, 2012(4): 116-118.
- CHEN Guo-tao, CHEN Long, ZHANG Xiao-liang, et al. The PR synthesis research of the ISD suspension system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(4): 116-118. (in Chinese)
- [43] 陈龙, 张孝良, 汪若尘, 等. 贯通式惯性质量蓄能悬架: 中国, 201010281336. 1 [P]. 2010-10-19.
- CHEN Long, ZHANG Xiao-liang, WANG Ruo-chen, et al. Through-type suspension with inerters; China, 201010281336. 1 [P]. 2010-10-19. (in Chinese)