

汽车发动机悬置系统研究进展

尹志新¹, 梁文博¹, 韦齐峰^{1,2}

1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004

2. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004

摘要 汽车发动机悬置系统对汽车NVH性能的提升起着非常关键的作用。汽车的高速、大功率和轻量化发展对悬置系统的隔振性能提出了更为严格的要求。发动机悬置系统设计与优化是改善汽车乘坐舒适性、行驶平顺性以及整车的NVH性能的重要技术措施之一。本文介绍6种典型汽车发动机悬置系统橡胶元件设计方法的原理和不足,并对悬置系统的发展趋势进行展望,以为汽车发动机悬置系统的设计研究提供理论参考。

关键词 悬置系统;解耦;优化设计;隔振

中图分类号 U461.1;U464.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.18.013

Review on Car Engine Mounting System

YIN Zhixin¹, LIANG Wenbo¹, WEI Qifeng^{1,2}

1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract The car engine mounting system is the key to the improvement of the NVH (Noise, Vibration, Harshness) properties. The development aiming to higher speed, more power and less weight makes the vibration isolation property an important issue. Therefore, the car engine mounting system becomes one of the key factors to achieve the driving comfort, the riding comfort and the good NVH properties of the automobiles. This paper discusses some rubber unit optimal designs of the engine mounting system and their shortcomings. The future direction of the research is pointed out to provide a reference for the car engine mounting system research.

Keywords engine mounting system; uncouple; optimal design; vibration isolation

汽车发动机悬置系统是由发动机动力总成及其悬置元件构成,并通过悬置元件安装在车架上,如图1所示。悬置元件是隔离路面不平的振动和冲击载荷传递到发动机上以及发动机工作激励载荷传递到车架的重要减振元件,其设计参数对悬置系统的隔振乃至整车NVH(Noise, Vibration, Harshness)性能都有重要影响。悬置元件应有足够的刚度以满足发动机的支撑和限位要求,同时应有一定的弹性以起到隔振作用。合理地选择悬置元件的刚度、安装位置和安装角度是实现发动机悬置系统隔振降噪的重要技术措施。本文详细介绍国内外6种典型的悬置系统设计方法,分析了各种设计方法的原理和不足,并对悬置系统的发展趋势进行了展望。

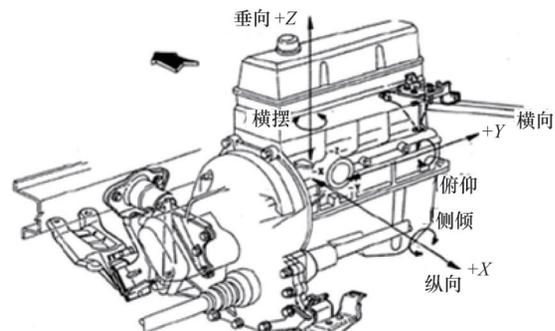


图1 汽车发动机悬置系统

Fig. 1 Car engine mounting system

收稿日期:2014-01-20;修回日期:2014-05-11

作者简介:尹志新,教授,研究方向为机械结构强度与特性分析和超细晶、纳米金属材料的组织与性能,电子信箱:holly@gxu.edu.cn

引用格式:尹志新,梁文博,韦齐峰.汽车发动机悬置系统研究进展[J].科技导报,2014,32(18):79-83.

1 动力总成悬置系统模型和假设

发动机动力总成由发动机和变速器构成,发动机动力总成本身的固频率(几百赫兹)通常远高于悬置系统的振动频率,因此可将发动机动力总成视为具有一定质量和惯量的空间六自由度刚体;常见的悬置元件通常有橡胶悬置元件和液压悬置元件,一些高级的轿车上可能会采用更为复杂的电流变、磁流变的主动或半主动液压悬置。本文主要讨论目前汽车上最常见的橡胶悬置。通常橡胶悬置内阻尼很小,因此我们一般会将系统简化成2种数学模型:

1) 将发动机动力总成简化为六自由度刚体,车架系统简化为刚性基础,悬置元件简化为3个正交无阻尼弹簧。这种模型在模态优化等设计中比较常见。

2) 动力总成简化成六自由度刚体,车架系统简化为弹性基础,悬置元件简化为3个正交无阻尼弹簧。此模型可用于隔振性能优化中。

另外,对液压悬置元件,因为其自身结构的原因,故一般假定在轴向的刚度和阻尼具有动特性,其余方向均按橡胶元件简化方法。还需将所有的悬置支架均视为刚体,与车架或者车身相连接的部分固接于地面上。与动力总成相连接的部分视为动力总成刚体,如图2所示^[1-3]。

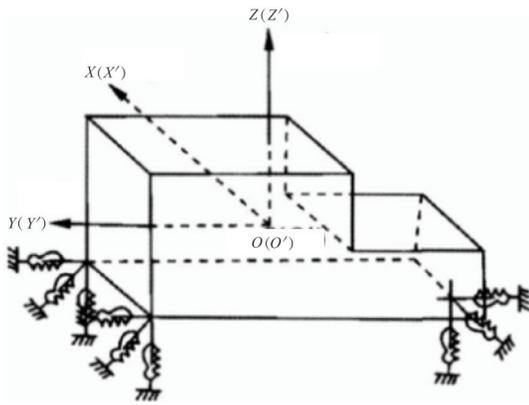


图2 动力总成悬置系统的力学模型

Fig. 2 Mechanical model of powerassembly mounting system

由拉格朗日动力学方程进一步建立动力总成悬置系统的无阻尼自由振动方程:

$$(\mathbf{K}-\omega^2\mathbf{M})\boldsymbol{\phi}=0 \quad (1)$$

其中,质量阵 \mathbf{M} 由动力总成的质量、惯性矩与惯性积构成;刚度阵 \mathbf{K} 由悬置元件位置、弹性主轴方向和各向刚度决定;求解上式的特征值和特征向量,即可得到悬置系统6阶自由振动圆频率 ω 和相应模态振型向量 $\boldsymbol{\phi}$ 。

2 典型的悬置系统设计方法

20世纪30年代,橡胶块和石棉衬垫已被用于减小动力总成和车架之间的振动传递。随着人们对汽车乘坐的舒适性要求越来越高,对悬置系统的设计与优化理论研究也日益

受到重视^[4,5],常见的悬置系统设计方法主要有以下6种。

2.1 基于布置理论优化

基于布置理论优化设计使用较早,分为撞击中心理论和弹性中心理论2种。根据非惯性系下的刚体平衡公式,在撞击中心受冲击不会使转轴过振。而外力矩绕弹性中心主轴作用能使该物体只产生转动而不产生移动。橡胶悬置使用之初,常见的四缸发动机在垂直于曲轴方向有不平衡惯性力。由于动力总成转轴约束特性,Crede^[6]、Timpner^[7]通过将前、后悬置元件布置在共轭点使曲轴减振。为了降低绕曲轴惯性力矩振动耦合,使前、后悬置的弹性中心与动力总成质心重合,可达到完全解耦。由于受整车布置限制,在布置时,如能使前后悬置的弹性中心的连线与曲轴平行,便能达到主运动方向完全解耦^[8,9]。

常见的悬置布置有三、四和五点悬置。三点V型悬置布置根据三点成一稳定面的特性,具有固有频率低,抗扭性能好等特性,使用非常广泛^[10]。四点布置稳定性好,能克服较大的转矩反作用力,常出现在六缸发动机上。五点布置常用在重型汽车上以避免发动机机体后端面与飞轮壳接合面上产生过大的弯矩。由于最早的发动机动力总成布置大多为纵向布置,适合使用布置理论进行优化设计。随着发动机横置前置前驱布置的推广,使用此方法时容易使后支承位置离前支承较远甚至在动力总成之外,因此具有一定的局限性。

2.2 扭矩轴解耦定理

发动机的外力矩主要是绕曲轴的扭矩。当扰动力矩作用于主惯性轴时,发动机沿此主惯性轴转动。但在动力总成坐标系中,主惯性轴一般不与曲轴重合。而发动机的扭矩一般作用于曲轴上。因此,发动机并不绕其任一主惯性轴,而是绕一根特殊的轴即扭矩轴转动^[11],如图3所示。对于三点无阻尼悬置的扭矩轴来说,当TRA方向与自然模态即刚体转动的方向一致时,可以达到TRA模态完全解耦^[12]。对于四点无阻尼悬置,Jeong和Sigh采用了动态解耦的方法,将扭矩轴坐标系向动力总成坐标系转换,通过满足TRA刚度矩阵和TRA质量矩阵线性相关且系数为特征值来达到解耦目的^[13]。

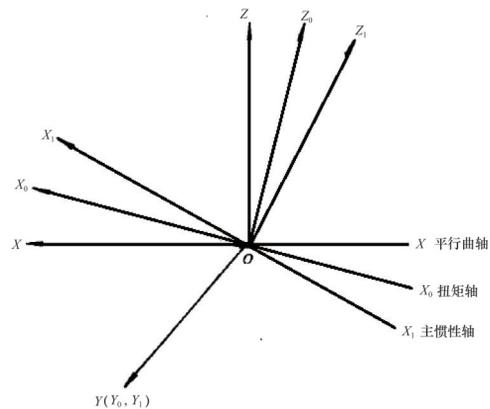


图3 扭矩轴坐标系示意

Fig. 3 Schematic diagram of torque axis coordinate system

随着液压悬置的发展,出现了比例阻尼和非比例阻尼的扭矩轴解耦方法^[14,15]。扭矩轴解耦对于悬置元件布置也有比较严格的要求,要使前后悬置的弹性中心在扭矩去线上,对悬置元件的布置精度要求很高,所以往往优化效果并不理想。

2.3 基于振动方程参数解耦理论

刚度解耦和惯性解耦直接从振动方程入手,相比于布置理论优化公式更简单。所编软件运算速度快、精度高。惯性解耦即使质量矩阵为对角矩阵,刚度解耦则使刚度矩阵为对角矩阵。在主惯性轴坐标系中,如果能使刚度阵和质量阵非对角元素全部为0,即能达到系统完全解耦。实际上在主惯性轴坐标系中,质量矩阵是解耦的,而且6个自由度的解耦也是没有必要的,一般讨论Z等少数几阶主要振型有较高质量的刚度解耦便可^[16,17]。

也有通过先确定模态来反算刚度参数的优化设计,即悬置系统的严格解耦设计。不过此方法对理论计算要求较为苛刻,因此还需要进行改进^[18]。

2.4 基于固有频率配置优化设计

动力总成悬置系统最大的问题是防止共振,即如何避开共振点(图4)。先给出各阶固有频率的期望值,在优化计算过程中,通过调整悬置元件主要参数如悬置元件的刚度、安放角度和位置使系统频率逼近该期望值,以避免共振。Johnson等^[19]、Bernard^[20]用数学优化手段,采用“移频法”合理配置系统固有频率使系统各平动自由度之间的振动耦合大为减小。由于采用手工测数以及经验凑数法,使得结果并不理想。

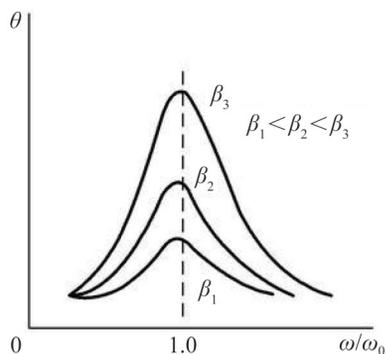


图4 振动频幅曲线

Fig. 4 Amplitude-frequency curve

由于在无阻尼振动方程式(1)中,质量矩阵和刚度矩阵都和悬置系统固有频率直接相关,很多的优化设计都以考虑固有频率配置或者以固有频率范围为约束^[20]。一般适用于悬置系统各阶频率与其他子系统重合引起共振的情况。

2.5 基于能量解耦的优化设计

能量解耦度理论是考虑发动机在惯性力矩的作用下绕

扭矩轴的转动成为发动机悬置系统的一个模态,利用振型得到系统各阶主振动时的能量分布,通过优化使主要运动方向能量解耦度接近100%。由于脱离了发动机类型和布置形式等具体特点的束缚,可以在原坐标系上进行解耦。适合于任何复杂形状的刚体,尤其是前置前驱动的动力总成,便于计算机优化,操作简单。能量解耦逐渐成为了悬置系统前期开发的主要评价指标,得到广泛的使用。能量解耦度一般方程为

$$T_k^i = \frac{\sum_{l=1}^6 (\phi_{i,l}) (\phi_{i,k}) m_{kl}}{\sum_{l=1}^6 \sum_{k=1}^6 (\phi_{i,l}) (\phi_{i,k}) m_{kl}} \times 100\% \quad (2)$$

其中, $(\phi_{i,l})$ 为第*i*振型的第*l*向位移; $(\phi_{i,k})$ 为第*i*振型的第*k*向位移; m_{kl} 为质量阵 *M* 的第*k*行第*l*列元素。

20世纪80年代,能量解耦开始使用在悬置系统优化设计,当时仅以各阶能量解耦度为目标,主要考虑发动机缸内气体压力波动产生的动力总成倾覆方向和发动机往复惯性力方向解耦^[21-23]。后来发展到将能量解耦度与敏感度、频率、支反力、加速度等参数相结合的综合优化设计。由只考虑动力总成悬置系统发展到考虑整车的能量分布^[24-28]。多目标优化方法虽然综合考虑了多个因素的影响,但由于真实情况的限制并不能取到最优解。加权系数的选定因没有严格标准,使优化造成一定的偏差。

2.6 基于响应参数优化设计

为了提高驾驶员舒适程度,改善隔振性能成为关键。隔振分为防止激振源能量扩散的积极隔振和防止受振设备受到振动干扰的消极隔振。通常以支承处响应参数如响应频率、响应力、响应力矩等为设计变量。如能使这些响应参数最小,则达到了隔振效果。此类方法所取工况一般为振动最明显的怠速工况,主要考虑传递到驾驶室和传递到车架上的动反力或振动幅值最小,也有以综合反力和反力矩为目标的优化设计^[29-32]。由于对行车工况考虑不够充分,如有些颠簸行驶工况等。这样可能出现某些固有频率过低或过高,使得悬置系统隔振效果变差。

为了弥补上述不足,人们以传递率为隔振评价指标,能够更真实的反应隔振程度。传递率主要以力或位移为计算量,即响应力或位移与基础力或位移的比值^[33-35],通常以加速度的比值来表示。如图5所示,通过优化使此比值 $< 1/\sqrt{2}$ 便达到隔振效果。通常以隔振率来表示,隔振率越大,隔振性能越好。一般方程为

$$E = (1 - \eta) \times 100\% \quad (3)$$

其中, *E* 为隔振率, η 为传递率,即加速度的比值。

隔振率优化既能用于忽略阻尼的橡胶元件,也能用于考虑阻尼的液压元件,具有更直接、更稳定、更真实的特点。但对动力总成的仿真建模精度要求比较高,隔振率优化过程较其他优化方法复杂,且计算量大,理论体系并不完整。

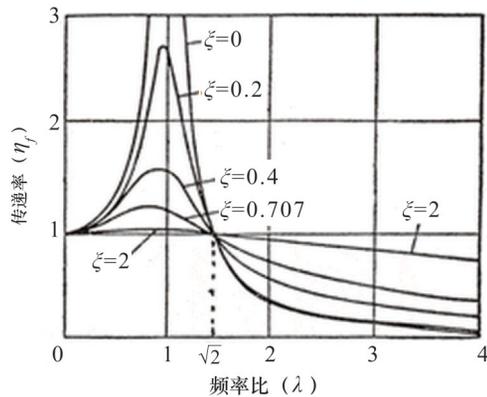


图5 不同阻尼因子(ξ)下的传递率函数

Fig. 5 Transfer ratio of different damping factors

3 结论

汽车发动机悬置系统是隔离发动机的振源振动传至驾驶室和车架,也是提高驾驶室舒适性和NVH的一个非常关键的系统。从20世纪30年代发展至今,橡胶悬置的优化设计方法不断被完善,从布置理论到能量理论,由惯性力到惯性力矩,由单一坐标系到多坐标系。随着动力总成布置的多样性发展以及驾驶舒适度提高,对优化设计要求也越来越严格。对6种优化设计方法做如下总结与展望:

1) 布置理论优化和扭矩轴理论优化都在不同程度上受到动力总成布置形式的影响,布置理论优化在弹性中心的寻找上大多是靠人工实验完成,误差比较大,加之动力总成结构越来越紧凑,使之具有一定的局限性,目前由于发动机横向布置的普及,此优化方法基本不适用。扭矩轴理论优化难以实现在同一坐标系下的垂向运动、俯仰运动和绕扭矩轴的侧倾运动的同时解耦,且不能准确反映悬置系统隔振性能的改善程度。不过基于扭矩轴理论对悬置元件布置精度的高要求,以及发动机主要绕扭矩轴转动的事实,对于扭矩轴理论优化的进一步研究也将具有现实意义。

2) 刚度解耦、惯性解耦和固有频率配置与振动方程主要参数联系更为紧密,但在单个激励力作用下会激起两个方向的振动,解耦不理想。而且就振动方程来看,对于刚度或质量单方面解耦受到方程其他参数变化的影响较大,控制起来也较困难,而且6个自由度完全解耦也是没有必要的。因此这几种优化方法通常用来作为其他优化方法的约束条件。

3) 能量解耦度优化多作为目标函数的一部分或者单独作为目标函数对发动机动力总成进行优化。能量解耦度适用性很强,能与模态分析、灵敏度分析等相结合进行多目标优化,也可以与各类优化算法很好的融合,因此目前使用非常广泛。不过能量解耦度单独作为优化目标时优化力度并不大,而且也不能保证单方向能量解耦度达到100%,因此未来在此方面应做更深一步的研究。

4) 现今人们越来越关注整车的隔振性能以及驾驶舒适程度。作为悬置系统与驾驶室或支承隔振的重要指标,隔振率优化综合考虑了整车各子系统的振动传递,最大程度地提高驾驶员的舒适性和阻止了地面的振动传向动力总成使得工况恶劣。隔振率优化方法在计算方面有待进一步改进。

5) 随着仿真技术的不断成熟和对各类动力总成的不断验证,橡胶元件隔振率优化将具有很大的实用价值和发展空间。随着舒适性要求的不断提高,液阻悬置元件也成为了未来发展的趋势,考虑阻尼的非线性优化设计以及电流变、磁流变、半主动、主动悬置元件的开发也成为主流。

参考文献(References)

- [1] 陈树勋,尹国保,黄锦成,等.基于等效分析模型的发动机悬置系统优化设计[J].工程力学,2013,30(11):221-226.
Chen Shuxun, Yin Guobao, Huang Jincheng, et al. The optimization of engine mounting system based on an equivalent model[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(11): 221-226.
- [2] 胡金芳.计及弹性基础的动力总成悬置系统特性分析与解耦研究[D].合肥:合肥工业大学,2012.
Hu Jinfang. Characteristics analysis and decoupling study of powertrain mounting system in the presence of a compliant base[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [3] 欧健,庞承强,张勇.基于能量解耦的动力总成悬置系统优化研究[J].机械设计及制造,2011(12):152-154.
Ou Jian, Pang Chengqiang, Zhang Yong. Study on optimization of power-train mounting system based on energy decoupling[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(12): 152-154.
- [4] Yu Y, Naganathan N G, Dukkipati R V. A literature review of automotive vehicle engine mounting systems[J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36(1): 123-142.
- [5] 梁伟.发动机液阻悬置关键技术及设计方法的研究[D].北京:清华大学,2001.
Liang Wei. A study of elemental technologies for design and development of hydro-elastic engine mount[D]. Beijing: Tsinghua University, 2001.
- [6] Crede C E. Vibration and shock isolation[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1979.
- [7] Timpner F F. Design considerations in engine mounting[C]. SAE Technical Paper 650093, 1965. doi: 10.4271/650093.
- [8] Christopherson J, Jazar G N. Dynamic behavior comparison of passive hydraulic engine mounts. Part 2: Finite element analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 290(3): 1071-1090.
- [9] Michael M. Methods for the reduction of noise and vibration in vehicles using an appropriate engine mount system[C]. SAE Technical Paper 942414, 1994. doi: 10.4271/942414.
- [10] 吕振华,范让林,冯振东.汽车动力总成隔振悬置布置的设计思想论析[J].内燃机工程,2004,25(3):38-43.
Lv Zhenhua, Fan Ranglin, Feng Zhendong. A Survey of design methods for automotive engine mounting system[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(3): 38-43.
- [11] 上官文斌.发动机悬置系统的优化设计[J].汽车工程,1992,14(2):103-110.
Shangguan Wenbin. Optimal design of engine mounting system[J]. Automotive Engineering, 1992, 14(2): 103-110.

- [12] Geck P E, Patton R D. Front wheel drive engine mount optimization [C]. SAE Technical Paper 840736, 1984, doi: 10.4271/840736.
- [13] Jeong T, Sigh R. Analytical methods of decoupling the automotive torque roll axis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 234(1): 85-114.
- [14] Park J Y, Sigh R. Effect of non-proportional damping on the torque roll axis decoupling of an engine mounting system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 313(3): 841-857.
- [15] 唐静. 动力总成悬置系统动态解耦方法的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
Tang Jing. A research on dynamic decoupling method for a power train mounting system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [16] 孙蓓蓓, 张启军, 孙庆鸿. 汽车发动机悬置系统解耦方法研究[J]. 振动工程学报, 1994, 3(7): 240-245.
Sun Beibei, Zhang Qijun, Sun Qinghong. Study on decoupled engine mounting system[J]. Journal of Vibration Engineering, 1994, 3(7): 240-245.
- [17] 李伯岳. 客车发动机悬置系统的优化设计[J]. 噪声与振动控制, 2010, 33(4): 33-39.
Li Boyue. Optimal design of bus engine's mounting system[J]. Noise and Vibration Control, 2010, 33(4): 33-39.
- [18] 陈树勋, 李志强, 韦齐峰. 汽车发动机悬置系统的严格解耦与优化设计研究[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 177-183.
Chen Shuxun, Li Zhiqiang, Wei Qifeng. Study on strictly decoupling and optimization design of automotive powertrain mounting system[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 177-183
- [19] Johnson S R, Subhedar J W. Computer optimization of engine mounting systems[C]. SAE Technical Paper 790974, 1979, doi: 10.4271/790974.
- [20] Bernard J E. Engine mount optimization[C]. SAE Technical Paper 830257, 1983, doi: 10.4271/830257.
- [21] 阎红玉, 徐石安. 发动机-悬置系统的能量法解耦及优化设计[J]. 汽车工程, 1993, 15(6): 321-328.
Yan Hongyu, Xu Shian. Energy method of decoupling and computer optimization of engine mounting systems[J]. Automotive Engineering, 1993, 15(6): 321-328.
- [22] 徐石安. 汽车发动机弹性支承隔振的解耦方法[J]. 汽车工程, 1995, 17(4): 198-204.
Xu Shian. Vibration isolation and decoupling technique of engine-mount on vehicles[J]. Automotive Engineering, 1995, 17(4): 198-204.
- [23] 吕振华, 罗捷, 范让林. 汽车动力总成悬置系统隔振设计分析方法[J]. 中国机械工程, 2003,14(3): 265-269.
Lv Zhenhua, Luo Jie, Fan Ranglin. Design and analysis method for improving vibration isolation performance of automotive powertrain mounting systems[J]. Automotive Engineering, 2003, 14(3): 265-269.
- [24] 刘玉波. 某商用车动力总成悬置系统的隔振性能设计[D]. 广东: 华南理工大学, 2011.
Liu Yubo. Vibration isolation design of powertrain mounting system of a commercial vehicle[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [25] 张武, 陈剑, 夏海. 基于灵敏度分析的发动机悬置系统稳健优化设计[J]. 汽车工程, 2009, 31(8): 728-732.
Zhang Wu, Chen Jian, Xia Hai. Robust optimal design of an engine mounting system based on sensitivity analysis[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(8): 728-732.
- [26] 温任林, 颜景平. 汽车发动机悬置系统多目标优化的研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 1996, 24(2): 105-109.
Wen Renlin, Yan Jingping. Study on multi-object optimization of engine mounting system[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 1996, 24(2): 105-109.
- [27] 樊兴华, 陈金玉, 黄席樾. 发动机悬置系统多目标优化设计[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2001, 24(2): 41-44.
Fan Xinghua, Chen Jinyu, Huang Xiyue. Multi-object optimization design of engine mounting system parameters[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2001, 24(2): 41-44.
- [28] 陈树勋, 吴松, 尹国保, 等. 发动机悬置系统模态分析与优化[J]. 科技创新导报, 2010(10): 90-91.
Chen Shuxun, Wu Song, Yin Guobao, et al. Modal analysis and optimization of engine powertrain system[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2010(10): 90-91.
- [29] Demic M A. Contribution to the optimization of the position and the characteristics of passenger car powertrain mounts[J]. International Journal of Vehicle Design, 1990, 11(1): 87-103.
- [30] Kim J H, Jho S G, Yim H J. Influence of chassis flexibility on dynamic behavior of engine mount systems[J]. SAE Technical Paper 942269, 1994, doi: 10.4271/942269.
- [31] Tao J S, Liu G R, Lam K Y. Design optimization of marine engine-mount system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 235(3): 477-494.
- [32] 宋相强. 基于动反力最小的发动机悬置系统的减振优化设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
Song Xiangqiang. Optimization design of the engine mount system in view of the minimum counter-force for reducing vibration[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [33] 庞剑, 谌刚, 何华. 汽车噪声与振动理论与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
Pang Jian, Chen Gang, He Hua. Automotive noise and vibration: Principle and application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [34] 刘付春, 孙锁柱, 杨士钦. 对某车型悬置系统振动传递率分析[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2007, 30(S1): 52-55.
Liu Fuchun, Sun Suozhu, Yang Shiqin. Analysis of vibration transmitting efficiency for a vehicle's mount[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 30(S1): 52-55.
- [35] 王亚楠, 吕振华. 以广义力传递率为目标的动力总成隔振悬置系统优化设计方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 52-58.
Wang Yanan, Lv Zhenhua. Optimal design method of power-train mounting system for generalized force transmissibility reduction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 52-58.

(责任编辑 吴晓丽)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。