

动力总成悬置系统设计与分析软件的开发

潘道远,张青龙,徐 阳

(江苏大学汽车与交通工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:应用多体动力学理论,建立了动力总成悬置系统的力学模型。以动力总成悬置系统六自由度能量解耦为优化目标,以刚度比和固有频率合理配置为约束条件,以悬置刚度、位置和角度为设计变量,构造了动力总成悬置系统的优化模型。在 Windows 平台上利用 Matlab 开发了动力总成悬置系统设计软件。该软件主要实现了汽车动力总成悬置系统的性能分析、力学分析、优化设计和生成设计分析报告。采用该软件对某载重汽车的动力总成悬置系统进行优化设计及性能分析。优化结果表明,解耦率明显提高,固有频率分布更合理。

关键词:动力总成悬置系统;能量解耦;固有频率;优化设计

中图分类号:TP319;TB123;TH113

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)02-0212-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.02.053

Development of Software of Design and Analysis in Powertrain Mounting System

PAN Dao-yuan, ZHANG Qing-long, XU Yang

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Applying the multi-dynamic theory, a dynamic model of the powertrain mounting system of motor vehicles is established. An optimization model for the powertrain mounting system is constructed, in which decoupling efficiency of six freedom vibrations is selected as object function, and stiffness ratio and inherent frequency distribution as constraint conditions, the stiffness, installation positions and angles of the mounts as design variables of optimization. The software of design and analysis in powertrain mounting system is developed by Matlab in Windows platform. The software mainly realizes performance analysis, mechanical analysis, optimal design and generating analysis report of powertrain mounting system. Based on the software, as an example, powertrain mounting system of a truck is designed and analyzed. The optimization results show that the decoupling rate is obviously improved and the inherent frequency distribution more reasonable.

Key words: powertrain mounting system; energy decoupling; inherent frequency; optimal design

0 引言

动力总成悬置系统作为汽车振动系统的一个重要子系统,其振动的传递特性对乘坐舒适性和整车 NVH 性能有很大影响^[1-4]。因此,合理地选取悬置系统的基本参数,尽可能减少发动机振动对整车振动的影响,这对于降低整车振动、提高车辆的综合性能是极其重要的^[5-8]。目前大都应用 ADAMS 软件或自主开发软件进行悬置设计分析,通过优化使悬置系统具有较高的能量解耦率^[9]。针对目前利用通用软件建立模型的过程比较复杂,而自主开发软件的优化模型比较单一,设计者不能选择悬置数目、布置类型、约束条件和

设计变量等问题和不足,有必要根据理论分析开发更灵活的专用设计软件^[10-12]。在此背景下,笔者开发编制了动力总成悬置系统设计软件。应用该软件能够帮助工程师生成设计分析报告,从而快速有效地完成汽车动力总成悬置系统的设计。

1 动力总成悬置系统力学模型

取模型坐标原点 G 位于动力总成质心, X 轴沿发动机曲轴轴线方向,其正方向指向发动机前方; Y 轴平行于车架平面,其正向向左(从发动机后端朝前看); Z 轴由右手原则确定。各悬置元件简化为三向相互垂直

的线性弹簧与粘性阻尼元件,局部坐标系统 $O-uvw$ 分别表示悬置的三条弹性主轴方向。动力总成悬置系统在上述坐标系下的空间六自由度力学模型如图1所示。

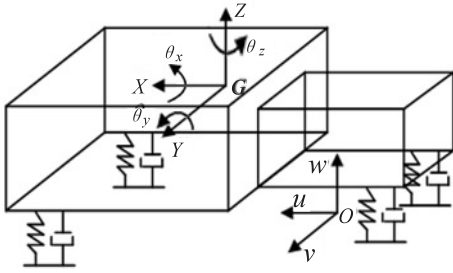


图1 动力总成悬置系统的力学模型

在无外力作用下,空间六自由度振动系统的振动微分方程为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_w & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_w = \text{diag}([m, m, m]) \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_\theta = \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i^T \mathbf{T}_i^T \mathbf{c}_i \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \quad (5)$$

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i^T \mathbf{T}_i^T \mathbf{k}_i \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \quad (6)$$

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_i & -y_i \\ 0 & 1 & 0 & -z_i & 0 & x_i \\ 0 & 0 & 1 & y_i & -x_i & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{ui}) & \cos(\beta_{ui}) & \cos(\gamma_{ui}) \\ \cos(\alpha_{vi}) & \cos(\beta_{vi}) & \cos(\gamma_{vi}) \\ \cos(\alpha_{wi}) & \cos(\beta_{wi}) & \cos(\gamma_{wi}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, \mathbf{M} 为系统惯性矩阵; \mathbf{C} 为系统阻尼矩阵; \mathbf{K} 为系统刚度矩阵; \mathbf{q} 为系统广义位移; m 为质量; \mathbf{M}_θ 为转动惯量和惯性积组成的矩阵。 $\mathbf{k}_i = \text{diag}([k_{ui}, k_{vi}, k_{wi}])$ 为悬置 i 的刚度矩阵, k_{ui} 、 k_{vi} 和 k_{wi} 为主刚度; $\mathbf{c}_i = \text{diag}([c_{ui}, c_{vi}, c_{wi}])$ 为悬置 i 的阻尼矩阵, c_{ui} 、 c_{vi} 和 c_{wi} 为主阻尼; \mathbf{B}_i 为悬置 i 的位置转移矩阵, (x_i, y_i, z_i) 为悬置 i 的坐标。 \mathbf{T}_i 为悬置 i 的坐标系 $O_i - u_i v_i w_i$ 在曲轴坐标系 $G - xyz$ 中的方向余弦矩阵。 $J_{xy} = J_{yx}$, $J_{xz} = J_{zx}$, $J_{yz} = J_{zy}$ 。

根据式(1),利用 Runge-Kutta 算法计算可得动力总成质心处的振动响应,经坐标转换可计算各悬置 i 的受力及位移

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{k}_i \mathbf{T}_i \mathbf{E}_i \mathbf{q} + \mathbf{c}_i \mathbf{T}_i \mathbf{E}_i \dot{\mathbf{q}} \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{T}_i \mathbf{E}_i \mathbf{q} \quad (10)$$

根据振动理论,系统的圆频率 ω^2 为矩阵 $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$ 的特征值,而相应的固有振型 \mathbf{j} 是矩阵 $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$ 的特征向量,然后由 $f = \omega/2\pi$ 计算系统固有频率 f ,由此可以计算出动力总成悬置系统的固有频率和振型。

当系统发生第 i 阶模态振动时,用第 k 个自由度的模态动能占系统总动能的比例来表征发生该阶模态振型时第 k 个自由度的解耦率

$$\text{EP}_{ki} = \frac{e_{ki}}{\boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i} = \frac{\sum_{l=1}^6 \varphi_{ki} m_{kl} \varphi_{li}}{\sum_{k=1}^6 \sum_{l=1}^6 \varphi_{ki} m_{kl} \varphi_{li}} \quad (11)$$

式中, φ_{ki} 、 φ_{li} 分别为第 i 阶振型的第 k 个和第 l 个元素; m_{kl} 为系统质量矩阵的第 k 行、第 l 列元素; $k, l, i = 1, 2, \dots, 6$ 。

2 动力总成悬置系统优化模型

2.1 设计变量

悬置的阻尼仅在振动幅值上影响系统响应,对悬置系统的固有频率影响较小。

因此设计变量 var 为各悬置的刚度 (k_{ui}, k_{vi}, k_{wi}), 安装位置 (x_i, y_i, z_i) 和安装角度 ($\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$), 其中 i 为悬置个数。

2.2 优化目标

以六个自由度上主振动能量的加权和作为优化目标函数

$$\min f_e = \sum_{i=1}^6 c_i (1 - \text{EP}_i) \quad (12)$$

式中, EP_i 为第 i 个振型中最大的解耦率,即振动占优方向所占的振动能量百分比; c_i 为对应于第 i 阶模态的权重。

2.3 约束条件

为使系统不容易产生共振及耦合振动,固有频率应合理分布,有约束方程

$$\left| f_i(\text{var}) - \frac{g_{i\max} + g_{i\min}}{2} \right| \leq \frac{g_{i\max} - g_{i\min}}{2} \quad (13)$$

$$|f_i(\text{var}) - f_j(\text{var})| \geq \text{diff}_{ij}, i \neq j \quad (14)$$

式中, var 为设计变量向量; $f_i(\text{var})$ 为系统第 i 阶固有频率; $g_{i\min}$ 、 $g_{i\max}$ 为系统第 i 阶固有频率的配置极小值、极大值; diff_{ij} 为第 i 阶和第 j 阶固有频率的间隔最小值。

由于材料本身特性以及生产的可行性,有约束方程

$$\left| \frac{K_n}{K_m} - \frac{r_{k\max} + r_{k\min}}{2} \right| \leq \frac{r_{k\max} - r_{k\min}}{2} \quad (15)$$

$$n, m \in \{x, y, z\}, \text{ and } n \neq m$$

式中, $r_{k\min}$ 、 $r_{k\max}$ 为系统第 k 个悬置三向主刚度比值的配置极小值、极大值。

3 软件开发

根据动力总成悬置系统力学模型和优化模型,在 Windows 平台上利用 Matlab 语言开发了动力总成悬置系统设计软件 JDXZ。该软件功能包括汽车动力总成悬置系统的性能分析、力学分析、优化设计和生成设计分析报告。悬置系统性能分析包括固有频率、解耦率和固有振型的计算;悬置系统力学分析主要分析了静平衡、最大扭矩、转弯、制动和垂直冲击 5 种工况下悬置在局部坐标系和全局坐标系下的受力和位移;优化设计能根据实际情况,对任意角度和位置或者绕 X 轴和 Y 轴对称布置的汽车动力总成悬置系统进行优化设计。动力总成悬置系统设计软件主界面如图 2 所示。

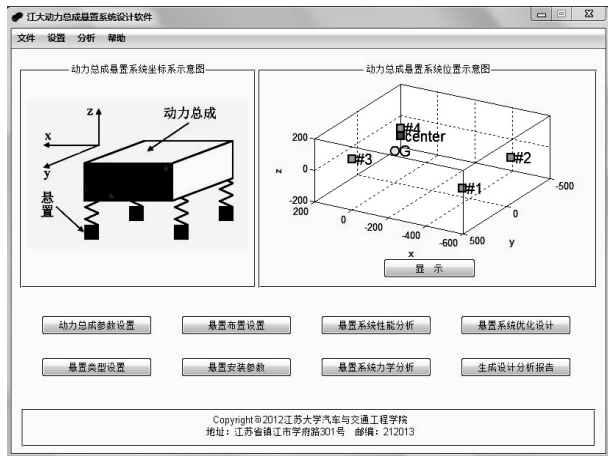


图 2 动力总成悬置系统设计软件主界面

悬置系统优化设计是动力总成悬置系统设计软件的关键部分。在动力总成悬置系统优化模型和内点法的基础上,提出了动力总成悬置系统优化算法。其基本思想是利用罚函数方法将动力总成悬置系统约束优化问题转化为无约束问题,采用内点法求解最优解。

算法 1:动力总成悬置系统优化算法。

输入:动力总成参数,悬置类型参数,悬置数目,悬置对称设置,悬置类型选择,悬置的安装位置及安装角度;

输出:设计变量优化结果。

算法描述:

Step1:输入优化目标函数式(12)中各自由度的模态权重 c_i ;

Step2:选择约束条件,并配置相应约束条件的最小值、最大值;

Step3:选择设计变量,并配置相应设计变量的最小值、最大值;

Step4:调用内点法,根据式(13)、(14)和(15)计算约束条件,如果满足条件,执行 Step5,否则,执行 Step4;

Step5:根据式(12)计算目标函数值,如果内点法

不满足退出条件,执行 Step4,否则,算法结束。

4 实例计算

针对某载重汽车的动力总成悬置系统进行性能分析和优化设计。该系统为四点悬置,采用左右对称布置。动力总成质量为 966 kg,质心坐标为 $(-30.3\text{ mm}, -1.5\text{ mm}, 100.2\text{ mm})$,转动惯量为 $(J_{xx}=68.1\text{ kg}\cdot\text{m}^2, J_{yy}=251.8\text{ kg}\cdot\text{m}^2, J_{zz}=224.1\text{ kg}\cdot\text{m}^2, J_{xy}=0.3\text{ kg}\cdot\text{m}^2, J_{yz}=0, J_{xz}=-22\text{ kg}\cdot\text{m}^2)$;发动机冲程数为 4,缸数为 4,最大扭矩为 $1\ 100\text{ N}\cdot\text{m}$,怠速为 700 rpm;变速器倒挡变速比为 6.777。利用动力总成悬置系统设计软件对原系统进行固有频率和解耦率计算,其结果如表 1 所示。

表 1 固有频率和解耦率(1) %

f/Hz	4.27	5.96	6.79	7.65	8.32	10.22
x	6.22	0	0	83.1	10.68	0
y	0	24.28	52.4	0	0.01	23.3
z	8.99	0	0.01	15.49	75.5	0.01
θ_x	0	0.59	36.42	0	0	62.99
θ_y	84.78	0	0	1.41	13.8	0
θ_z	0	75.12	11.17	0	0.01	13.7

动力总成的激励主要是 z 方向的不平衡力和 θ_x 方向的转矩波动,因此,取这两个自由度的模态权重分别为 4 和 3,其他自由度的权重为 1。优化后的前悬置刚度为 $(1\ 142\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}, 724\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}, 964\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1})$,后悬置刚度为 $(444\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}, 479\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}, 463\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1})$,左右前悬置安装角度为 $\pm 7.03\text{ deg}$,左右后悬置为 $\pm 14.03\text{ deg}$,前悬置位置 X 为 170 mm。优化后的固有频率和解耦率如表 2 所示。从中可以看出,优化后的动力总成悬置系统在各自由度上的解耦率有了显著提高,特别是在平动自由度 z 上的解耦率从 75.5% 提高到 99.53%,绕曲轴的转动自由度 θ_x 上的解耦率从 62.99% 上升到 68.7%,明显改善了这两个自由度上振动耦合的情况。

表 2 固有频率和解耦率(2) %

f/Hz	5.14	7.23	7.23	8.65	9.33	10.82
x	6.23	0	0	0.34	93.42	0
y	0	75.46	7.68	0.01	0	16.85
z	0.22	0	0.01	99.53	0.23	0.01
θ_x	0	4.98	26.31	0	0	68.7
θ_y	93.55	0	0	0.11	6.34	0
θ_z	0	19.56	65.99	0.01	0	14.44

用该软件还分析了静平衡、最大扭矩、转弯、制动和垂直冲击 5 种工况下悬置在局部坐标系和全局坐标

系下的受力和位移,如表 3 和表 4 所示。所有这些力是由重力和扭矩产生的合力。力和位移的符号定义为:正号表示受拉,负号表示受压。坐标系统为固定坐

标系统。

表 3 各工况下悬置垂直方向受力 N

悬置	静平衡	最大扭矩	转弯	制动	垂直冲击
前左	-3 291	6 265	-4 381	-2 650	-13 163
前右	-3 325	-12 880	-2 234	-2 684	-13 298
后左	-1 421	3 124	-1 868	-2 062	-5 684
后右	-1 437	-5 982	-990	-2 077	-5 748

表 4 各工况下悬置垂直方向位移 mm

悬置	静平衡	最大扭矩	转弯	制动	垂直冲击
前左	-3.43	6.526	-4.43	-2.76	-13.71
前右	-3.46	-13.41	-2.45	-2.79	-13.85
后左	-3.06	6.73	-4.05	-4.45	-12.25
后右	-3.1	-12.89	-2.11	-4.48	-12.39

5 结束语

对动力总成悬置系统进行了受力分析,建立了动力总成悬置系统六自由度力学模型。并根据性能需求分析,讨论了优化目标函数、约束条件和设计变量,建立了动力总成悬置系统优化模型。在动力总成悬置系统力学模型和优化模型的基础上,开发编制了动力总成悬置系统设计软件。应用该软件对某载重汽车动力总成悬置系统进行了优化计算,优化结果解耦程度较高,优化过程可靠。计算了静平衡、最大扭矩、转弯、制动和垂直冲击 5 种工况下悬置在局部坐标系和全局坐标系下的受力和位移。实例表明,该软件能方便地应用于动力总成悬置系统设计和性能分析评价。

(上接第 211 页)

过全波整流与 7805 稳压成 5 V 直流电压后给 SPCE061A 单片机供电。在整体电路设计完成后,对其焊接并测试,提供了测试电路数据。

参考文献:

[1] 邓亚楠.论唐卡艺术设计的审美和膜拜功能[J].西北师大学报(社会科学版),2011,48(4):72-74.

[2] 路秋生.LED 照明与应用[J].灯与照明,2009,33(4):24-28.

[3] 张斌宁.对藏族民间宗教艺术形式-“唐卡”的人类学阐释[J].青海民族研究,2005(3):74-77.

[4] 钟寒梅.凌阳单片机简介[J].国外电子元器件,2002(9):69-72.

[5] 李勇峰,曾林,黄娟,等.转经筒 LED 台灯的设计与实现[J].电子设计工程,2013(4):5-7.

参考文献:

[1] 赵建才,李玺,姚振强,等.车辆动力总成悬置系统的能量法解耦仿真分析[J].上海交通大学学报,2008,42(6):878-881.

[2] 范让林,吕振华.刚体-弹性支承系统振动解耦评价方法分析[J].工程力学,2006,23(7):13-18.

[3] 严济宽.机械振动隔离技术[M].上海:上海科学技术文献出版社,1985.

[4] Wang Ruiping. A study of vibration isolation of engine mount system[D]. Concordia:Concordia University,2005.

[5] Jeong T. Analysis of powertrain mounts with focus on torque roll axis decoupling and frequency dependent properties[D]. Ohio:Ohio State University,2000.

[6] Hafidi A E,Martin B,Loredo A,et al. Vibration reduction on city buses:Determination of optimal position of engine mounts [J]. Mechanical systems and signal processing, 2010, 24: 2198-2209.

[7] 吴杰,周胜男.动力总成悬置系统频率和解耦率的稳健优化方法[J].振动与冲击,2012,31(4):1-7.

[8] 龙岩,史文库,蒋凌山,等.动力总成悬置系统优化方法的对比研究[J].汽车工程,2011,33(10):875-879.

[9] 郑颖,魏朗,郑显锋.基于 ADAMS 软件的发动机悬置系统仿真分析[J].计算机技术与发展,2011,21(4):231-233.

[10] 王波兴,王一波,黄运保.基于模板技术的汽车多体动力学建模研究[J].计算机工程与设计,2012,33(7):2748-2753.

[11] 李波,鲁平,汤林生,等.基于 MATLAB 的悬置系统优化设计及软件开发[J].汽车技术,2011(9):19-23.

[12] 张璐,陈家琪,褚超美.面向汽车变速器设计知识库系统的研究与应用[J].计算机工程与设计,2010,31(12):2861-2864.

[6] 窦林平.国内 LED 照明应用探讨[J].照明工程学报,2011,22(6):51-58.

[7] 王芳,吴谨.基于凌阳 SPCE061A 的红外通信接口设计[J].电子技术,2009(9):16-18.

[8] 陈上挺,谢文彬,游颖敏.基于 STM8 的红外与超声波测距仪设计[J].电子技术应用,2011,37(9):32-34.

[9] 黄辉,郭智江,区永源,等.基于单片机的智能 LED 灯照明系统[J].电子设计工程,2011(18):154-156.

[10] 郭娜娜,侯媛彬,王磊.基于凌阳 SPCE061A 单片机的音控小车的设计[J].信息化纵横,2009(14):74-78.

[11] 曾凡,黄娟,李勇峰,等.基于 Multisim 的高通滤波器的设计与仿真分析[J].电子设计工程,2013,21(2):108-110.

[12] 黄丽贤.基于 Multisim 的直流稳压电源的仿真分析[J].光盘技术,2008(10):38-38.

动力总成悬置系统设计与分析软件的开发

作者：[潘道远](#)，[张青龙](#)，[徐阳](#)，[PAN Dao-yuan](#)，[ZHANG Qing-long](#)，[XU Yang](#)

作者单位：[江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江, 212013](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

ISTIC

年，卷(期)：2014(2)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201402054.aspx