

纯电动轻客动力总成悬置系统的解耦优化及应用

李明, 徐成, 黄勇, 潘从金

(潍柴(扬州)亚星新能源商用车有限公司, 江苏 扬州 225115)

摘要:应用 MATLAB 平台搭建动力学模型基于能量法求解目标值,以悬置主轴刚度为设计变量,采用多目标优化算法优化悬置系统。根据优化结果校核传递率,结果表明隔振性能提升。

关键词:电动轻客; 悬置系统; 解耦优化; 悬置刚度

中图分类号:U469.1; U461.4

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2023)04-0018-04

Decoupling Optimization and Application of Powertrain Suspension System for a Pure Electric Light Bus

LI Ming, XU Cheng, HUANG Yong, PAN Congjin

(Weichai (Yangzhou) Yaxing New Energy Commercial Vehicle Co., Ltd., Yangzhou 225115, China)

Abstract: The authors use the MATLAB platform to build a dynamic model to solve the target value based on the energy method, take the suspension spindle stiffness as the design variable, and optimize the suspension system by the multi-objective optimization algorithm. They check the transfer rate based on the optimization results, which show that the vibration isolation performance is improved.

Key words: electric light bus; suspension system; decoupling optimization; suspension stiffness

对于提升驾驶舒适性,优化动力总成悬置系统的固有模态和解耦率的改善效果最直接明显。多位学者采用多种算法对悬置系统进行了解耦优化的研究^[1-4],但大部分研究都是针对传统的燃油发动机^[5-10],对纯电动客车的研究相对较少^[11]。本文建立了某款纯电动轻型客车悬置系统的六自由度模型,采用 ADMAS 计算前 6 阶刚体模态和解耦率,调用 MATLAB 中的 fgoalattain 函数优化固有频率和悬置主轴刚度,最后计算系统的振动传递率以评价优化效果。

1 仿真模型建立

1.1 数学建模

进行动力总成的振动建模时,将其橡胶悬置视为具有三向刚度的衬套,因车身刚度远大于悬置系统,悬置在车身上的固定点可视作刚性,所以动力总成的

四点悬置模型简化为如图 1 所示的动力总成的振动模型。

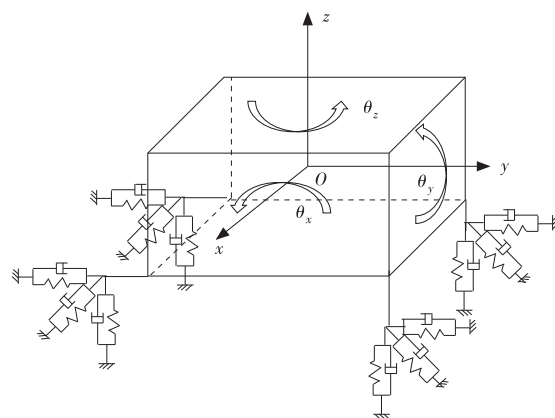


图 1 动力总成四点悬置系统模型

求解动力总成悬置系统的自然模态时,忽略悬置的阻尼,其质心处的无阻尼自由振动方程为^[3]

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = 0 \quad (1)$$

收稿日期:2023-01-12。

第一作者:李明(1989—),男,工程师;主要从事轻型客车底盘系统开发工作。E-mail:liming@asiastarbus.com。

式中: $[M]$ 为悬置系统的质量矩阵; $\{q\}$ 为动力总成的广义位移列矢量; $[K]$ 为悬置系统的刚度矩阵。

根据式(1)可求得动力总成悬置系统各阶模态振动总动能, 则第 j 个广义坐标占第 i 阶振动的解耦率可以表示为^[12]

$$T(j, i) = \frac{\sum_{l=1}^6 (\varphi_i)_j (\varphi_i)_l}{\sum_{k=1}^6 \sum_{l=1}^6 (\varphi_i)_k (\varphi_i)_l} \times 100\% \quad (2)$$

式中: φ_i 为第 i 阶主振型。

表1 电机的质量、质心、惯量参数

质量/kg	质心位置/mm			惯量/kg·mm ²					
	x	y	z	J_{xx}	J_{yy}	J_{zz}	J_{xy}	J_{yz}	J_{zx}
115.3	-93.9	-0.5	320.76	1.47e6	1.698e6	1.654e6	-2 453.7	42 672.6	14 000.2

表2 优化前悬置的位置

悬置参数	x	y	z
前左悬置	-283.519	-324.668	236.677
前右悬置	-283.519	324.668	236.677
后左悬置	-13.519	-324.668	236.677
后右悬置	-13.519	324.668	236.677

1.3 ADAMS 模型

为对比校核 MATLAB 程序计算的解耦率, 本文额外建立一个 ADAMS 模型, 如图2所示, 用同样的参数求解悬置解耦率, 其结果作为参照。动力总成采用实体建模, 该实体可以输入质量、质心以及转动惯量等信息; 悬置用具有三向刚度的弹簧力等效建立, 该弹簧力一端接动力总成实体, 另一端接地。进行振动分析时, 在动力总成质心位置绕 x 轴方向创建 PSD 激振力输入通道, 在4个悬置弹性中心点创建力输出的通道。

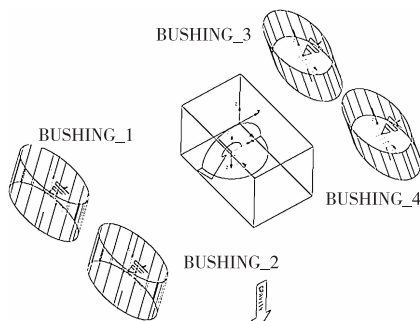


图2 ADAMS 动力总成模型

1.2 初始参数

电机的质量、质心和惯量参数由厂家提供, 具体见表1。动力总成布置4个悬置点, 其弹性中心的位置见表2。悬置3个方向主轴的动刚度 K_u 、 K_v 、 K_w 分别为 71.4 N/mm、74.2 N/mm、728 N/mm。4个软垫的初始刚度一致, 刚度动静比为 1.4。悬置主刚度 w 轴方向指向动力总成, 与整车竖直 z 方向夹角为 15° , 其余方向均为 90° 。

2 结果与优化

2.1 优化前振动分析

根据 1.1 节的理论推导编写 MATLAB 解耦程序, 输入 1.2 节中的初始参数, 求得原悬置系统的固有频率和解耦率见表3。为了验证结果的可靠性, 将 ADAMS 软件及相应模型的仿真结果作比较, 部分数据见表4, 固有频率最大偏差为 7%, 解耦率最大偏差为 8%, 结果一致性较好。

表3 优化前动力总成悬置系统的固有频率和解耦率

固有频率/Hz	解耦率/%					
	x	y	z	R_{xx}	R_{yy}	R_{zz}
7.75	99.52	0	0.1	0	0.38	0
8.68	0	99.04	0	0.54	0	0.42
21.02	0.34	0	73.95	0	25.69	0.02
24.67	0	0.36	0.04	0.38	0	99.22
32.53	0.14	0	25.92	0	73.92	0.02
66.78	0	0.6	0	99.07	0	0.33

表4 MATLAB 和 ADAMS 固有频率及解耦率结果对比

模态振型	固有频率/Hz		解耦率/%	
	MATLAB	ADAMS	MATLAB	ADAMS
x	7.75	7.75	99.52	99.58
y	8.68	8.68	99.04	98.9
z	21.02	21.34	73.95	79.64
R_{xx}	66.78	62.04	99.22	99.15
R_{yy}	32.53	34.4	73.92	79.83
R_{zz}	24.67	24.69	99.07	99.12

由表 3 分析可知,优化前动力总成固有频率分布范围较大,但远小于电驱动总成的激励频率,原因是电驱动总成相比于燃油车发动机的扭矩大,但是波动较小,且主要的激励来源于电磁力和齿轮啮合导致的高频振动。第 1 阶和第 2 阶的固有频率相差小于 1 Hz,两个模态存在耦合振动的风险,此外沿 z 方向的平动和绕 y 方向的转动解耦率只有大约 74%,对于纵置的电驱动总成是不满足要求的。要想得到更好的隔振效果,建议 z 方向和 R_{yy} 方向的解耦率大于 80%^[13]。因此,需对悬置系统进行优化。

2.2 优化算法

由于车身空间限制,悬置的安装位置和角度均不可改动,只能对悬置的主轴刚度进行优化,尽量提高模态的解耦率。固有频率应避开悬架跳动频率以及人体对振动的敏感范围,即要求最低固有频率 $f_{\min}$ 大于 5 Hz,同时为了避免相邻的振动模态耦合,间隔频率一般大于 1 Hz。综合以上分析,定义如下的优化模型。

目标函数:

$$\min f = \sum_{i=1}^6 \{1 - \max[T(k, i)]\} \quad (3)$$

其中 $T(k, i)$ 表示第 i 阶第 k 个自由度的解耦率。悬置刚度上下限变动范围为原刚度的 30%:

$$\begin{cases} 0.7K_{ui} \leq K_{ui} \leq 1.3K_{ui} \\ 0.7K_{vi} \leq K_{vi} \leq 1.3K_{vi} \\ 0.7K_{wi} \leq K_{wi} \leq 1.3K_{wi} \end{cases} \quad i=1,2,3,4 \quad (4)$$

非线性约束条件:

$$\begin{cases} f_i \geq f_{i\min} & i=1,2,\dots,6 \\ f_{j+1} - f_j \geq 1 & j=1,2,\dots,5 \end{cases} \quad (5)$$

综合上述分析,调用 MATLAB 中多目标优化函数 fgoalattain 进行计算,具体用法为

$$[x, fval] = \text{fgoalattain}('fun', x_0, goal, weight, A, b, Aeq, beq, lb, ub, ncon)^{[1]} \quad (6)$$

其中 fun 是用 M 文件定义的目标向量函数; x_0 是初始值; $goal$ 是目标值; $weight$ 是权重; A, b 定义不等式约束 $A \cdot x \leq b$; Aeq, beq 定义等式约束 $Aeq \cdot x = beq$; lb, ub 为自变量的上下限; $ncon$ 是用 M 文件定义

的非线性约束 $c(x) \leq 0, ceq(x) = 0$; $fval$ 是返回目标向量函数的值。

2.3 优化后振动分析

采用 MATLAB 编程优化后的悬置动刚度见表 5, 采用 MATLAB 和 ADAMS 计算的固有频率和解耦率见表 6。结果表明,固有频率间隔大于 1 Hz,沿 z 方向的平动和绕 y 方向的转动解耦率达到了 82%,且其他方向的解耦率在 97%以上。此外,根据电机的转速-转矩特性曲线,将其视为恒扭矩输出,因此采用功率谱密度为 1 W/Hz 的单位白噪声作为动力总成的激振力。计算动力总成激励输入通道到悬置输出通道的传递率,分析频率为 0~80 Hz 的隔振性能。振动传递率 G_{ij} 的计算公式为

$$G_{ij} = F_{ij} / F_0 \quad (7)$$

式中: F_{ij} 为第 i 个悬置在 j 方向上的动反力; F_0 表示动力总成的激振力。

表 5 优化后悬置刚度参数

悬置位置	K_u	K_v	K_w
前左/右悬置	75/81	76/96	510/510
后左/右悬置	92/86	96/96	946/946

表 6 优化后动力总成悬置系统的固有频率和解耦率

模态振型	固有频率/Hz		解耦率/%	
	MATLAB	ADAMS	MATLAB	ADAMS
x	8.33	8.33	99.37	99.46
y	9.63	9.63	99.19	99.07
z	23.87	24.07	82.78	91.54
R_{xx}	66.87	62.20	99.45	99.35
R_{yy}	27.57	29.41	82.32	89.72
R_{zz}	26.40	26.34	99.48	97.67

4 个悬置优化前后的传递率对比如图 3~6 所示,可以看出,优化前系统在频率范围内激发出 4~5 个共振模态,优化后前左和前右悬置幅值明显降低,并且悬置系统的共振峰个数减少,说明隔振效果得到改善。

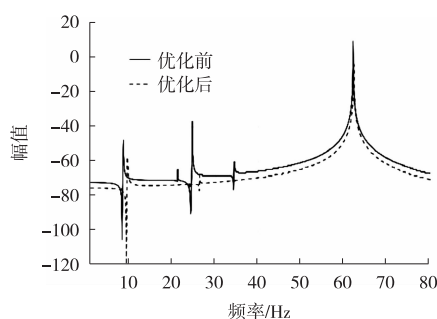


图3 前左悬置优化前后传递率频谱图

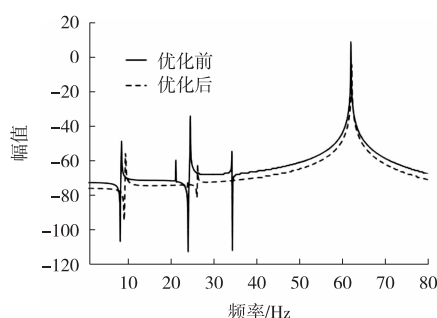


图4 前右悬置优化前后传递率频谱图

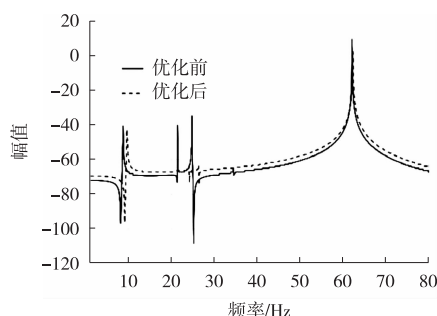


图5 后左悬置优化前后传递率频谱图

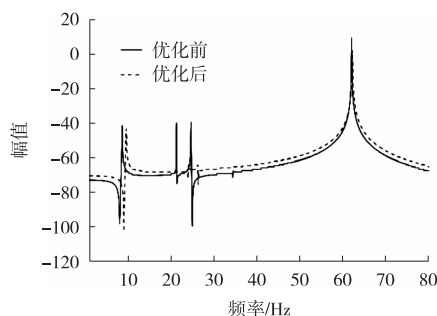


图6 后右悬置优化前后传递率频谱图

3 结束语

整车 NVH 性能改善中,汽车动力总成悬置系统一直是分析较多的部件。通过 MATLAB 平台建立悬

置系统的力学模型求解固有频率和解耦率,再利用 ADAMS 仿真模型验证准确度;进而采用 fgoalattain 优化函数对悬置的主轴刚度进行优化,最后分析系统的传递率评估隔振性能。经验证,优化后的悬置刚度增加了间隔频率差,避免了系统固有模态发生耦合,且有效提高了解耦率,解决了企业在车型研发中遇到的实际问题。

参考文献:

- [1] 薛华,刘志强,刘岩,等.基于 Matlab 的动力总成悬置系统解耦优化[J].噪声与振动控制,2015,35(2):65-68.
- [2] 席智伦,彭宇明,杨明亮,等.某型电动客车悬置系统多目标优化[J].噪声与振动控制,2020,40(1):104-110.
- [3] 韦小田.纯电动汽车动力总成悬置系统的振动分析和优化设计[D].重庆:重庆大学,2015.
- [4] 张健.轻型客车动力总成悬置系统优化设计与研究[D].武汉:武汉科技大学,2013.
- [5] 周梦来,范东祥,周广波.基于 ADAMS 的客车动力总成悬置系统优化设计[J].客车技术与研究,2022,40(3):22-26.
- [6] 张彦斌,周宏涛,贺新峰,等.基于多目标优化设计的客车发动机悬置 NVH 分析[J].客车技术与研究,2017,39(5):5-8.
- [7] 张传谦,孙海强,刘鑫明.客车发动机悬置系统隔振性能研究[J].客车技术与研究,2017,39(2):4-6.
- [8] 张财智,柯馥,揭辉经.基于能量解耦法的客车动力总成悬置隔振性能优化[J].客车技术与研究,2017,39(2):19-21.
- [9] 雷龙,张伟.客车悬架与传动系匹配中的 NVH 问题[J].客车技术与研究,2016,38(2):49-51.
- [10] 李智强.基于频率配置和解耦率的某客车悬置系统优化设计[J].客车技术与研究,2015,37(6):9-12.
- [11] 胡小生,黄详,董泽伟.某纯电动客车横置动力总成悬置设计与刚度优化[J].客车技术与研究,2016,38(5):27-30.
- [12] 吴飞,胡朝辉,成艾国,等.综合考虑解耦率和隔振率的发动机悬置系统多目标优化[J].汽车工程,2013,35(1):18-22.
- [13] 康强,顾鹏云,左曙光.纯电动汽车电驱动总成悬置设计原则研究[J].汽车工程,2019,41(11):1235-1242.