文章编号：1006-1355(2020)06-0182-05

三缸机车型起动振动的分析与控制

金 岩[1,2]，陈景昌[1,2]

（1. 中国汽车工程研究院股份有限公司，重庆 401122；
2. 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室，重庆 401122）

摘 要：针对某三缸机车型起动过程中振动过大问题开展研究。分析三缸机起动过程中受到的主要激励及其从动力总成到车身的传递关系。结果表明：起动过程中燃烧产生的扭矩波动通过悬置系统传递到车身是导致起动振动主要原因。三缸机起动过程中扭矩波动大，且其动力总成悬置系更容易产生模态耦合现象，从而易导致三缸机车型起动振动更为明显。通过优化动力总成悬置系统，降低扭矩波动到车身的传递以及提高电机拖动转速，降低起动初期扭矩波动，起动振动得到明显抑制，使车辆达到标杆车水平。

关键词：振动与波；三缸机；起动振动；悬置；优化

中图分类号：O422.6 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2020.06.031

Analysis and Control of Starting Vibration of the Vehicle Equipped with a 3-cylinder Engine

JIN Yan[1,2], *CHEN Jingchang*[1,2]

（1. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China;
2. State Key Laboratory of Automotive Noise Vibration and Safety Technology, Chongqing 401122, China）

Abstract : The problem of overlarge starting vibration of a car equipped with a 3-cylinder engine was studied. The characteristics of excitation and vibration transfer path from the powertrain to the car body in the starting process of the 3-cylinder car were analyzed. Research results show that the starting vibration is induced by the torque fluctuations of the engine which transfer from mounting system to car body. The large torque fluctuations induced by combustion during starting and the mode couple of the mounting system of the 3-cylindered engine result in overlarge vibration. By reducing the torque fluctuation though starting procedure optimization and minimizing its transfer by mounting system optimization, the starting vibration was effectively abated.

Keywords : vibration and wave; 3-cylinder engine; starting vibration; mounting system; optimization

发动机起动过程中车辆的振动对客户主观感受有重要影响。起动过程中整车的振动过大将引起客户的抱怨。因此国外学者对发动机起动过程的振动现象进行了较为广泛研究。Kuang[1]对动力分流式混合动力汽车起动振动现象开展了研究工作。Thomas等[2]主要通过试验研究了曲轴的停止位置、燃烧爆发压力等因素对起动过程中车辆振动的影响。Fulks等[3]研究了BSG（Belt Start Generator）电机对起动过程中车辆振动的影响。

Li等[4]通过建模研究了离合器扭转减震器特性对起动过程振动的影响。Lee等[5]研究了动力总成刚体模态分布对起动振动的影响，得出了动力总成刚体模态耦合容易使起动振动增大的结论。Hiroshi等[6]研究了采用多体动力学技术进行混合动力汽车起动振动仿真的方法。国内对发动机起动过程中的振动研究较少，吉林大学王炳刚[7-8]用试验手段分析了活塞位置、冷却水温度等因素对发动机振动的影响，研究主要针对发动机本身，没有考虑动力总成悬置系统对车身振动的影响；王博等[9]研究了发动机起动振动对混合动力汽车振动的影响。

以上研究结果多基于四缸发动机，目前对三缸发动机起动过程中振动的研究还少有报道。伴随着日益迫切的能源和环境问题，提高燃油经济性和降

收稿日期：2020-01-13

作者简介：金岩（1978–），男，辽宁省辽阳市人，博士，高级工程师，主要研究方向为汽车、发动机振动噪声控制。
E-mail: jinyan@caeri.com.cn

低污染物排放成为传统动力汽车面临的重大挑战，在这样的背景下三缸机得到了越来越多的应用。

本文针对某三缸发动机车型起动时振动过大的问题，分析了起动过程的主要激励以及动力总成振动与车身振动之间的关系。结果表明：燃烧产生的扭矩波动通过悬置系统传递到车身是引起起动振动的主要原因。通过优化动力总成悬置系统和发动机起动过程，减小该车型起动过程中的振动，使之达到了标杆车水平。

1　起动振动的测试分析

发动机起动过程中转速与时间的变化关系见图1。通电后起动电机的齿轮与飞轮的齿盘啮合，拖动曲轴开始旋转，这个阶段为拖动阶段（图中约0.5 s至1.0 s）；当曲轴转速到达目标转速后，起动过程进入到燃烧阶段。此时气缸内混合气体开始燃烧，曲轴转速在气体力作用下迅速提高，并伴随明显的转速波动（见图1）。该阶段往往也伴随着车辆前后方向（x方向）的振动，如果振动过大，将引驾驶者的抱怨。

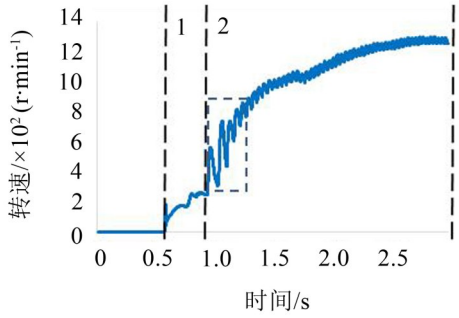


图1　起动过程中曲轴转速随时间的变化关系

图2是某搭载1.2T三缸发动机（横置）车型起动过程中驾驶员座椅位置处测得的加速度，传感器安装在驾驶员座椅内侧的导轨上。从图中可见，车辆座椅位置x方向（整车坐标系的定义：车辆的行驶方向指向车尾为正x，车辆的横向为y，垂直向上的方向为z）振动加速度峰值达到0.92 m/s²，主观评价为不可接受；而同级别四缸机车型座椅振动加速度最大峰值仅为0.65 m/s²。因此必须对起动振动进行优化和控制。

2　起动过程的激励及传递分析

2.1　三缸机起动过程中的受力

因为三缸机曲柄之间的夹角为120°，三个曲柄连杆机构产生1阶和2阶往复惯性力F_i的合力相互抵消即：

$$\sum F_i = 0 \tag{1}$$

同时对该机型采用了一级平衡轴的方案，平衡轴的方式使得往复惯矩M_i之和为零[10]，即：

$$\sum M_i = 0 \tag{2}$$

同时根据曲轴上加平衡重的方案，旋转惯性力和旋转惯性矩理论上均可以被完全平衡掉。

除此此外，起动过程中电机拖动力和气体燃烧力使曲轴发生转动。拖动力和气体力在整个起动过程中的变化相当复杂，但从力的作用效果上看可以等效成曲轴受到的旋转力矩：

$$T = J\ddot{\alpha} \tag{3}$$

其中：

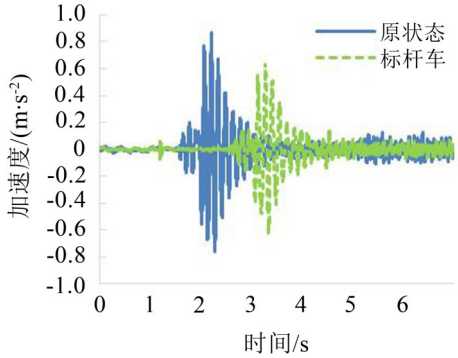
J为曲轴系统的转动惯量；

$\ddot{\alpha}$为曲轴旋转角加速度。

曲轴受到的旋转力矩将反作用在机体上，电机拖动力矩通常较为平顺，而燃烧力具有明显波动性。因此，导致三缸机车型起动振动的最主要激励是燃烧产生的扭矩波动。为了确保发动机的成功起动，起动过程前几个燃烧过程需要较大的燃烧爆发压力，用以克服摩擦以及曲柄连杆的惯性等阻力以达到快速起动的目的。图3是测试得到的该三缸机起动过程中某一气缸压力曲线，起动过程第一次燃烧爆发压力达到250 kPa，是怠速时（自第4个峰值起）缸内最大燃烧爆发压力的4倍以上。



(a) 测点位置



(b) 测试结果

图2　测点位置和测试结果对比

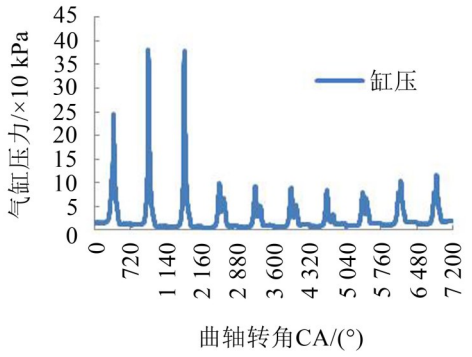


图3 起动过程气缸压力

四缸机的发火间隔对应180°曲轴转角，而三缸机为240°，发火间隔更大。所以三缸机起动过程中扭矩波动将更显著，从而导致排量相当的三缸机比四缸机车型起动过程振动更为明显。

2.2 扭矩波动的传递

如将动力总成和车身简化成刚体，则可以将动力总成和车身简化成一个质量（动力总成）-刚度（悬置）-质量（车身）的动力学系统，见图4。

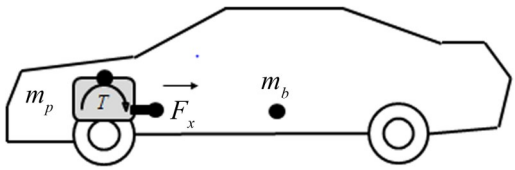


图4 动力总成-车身系统振动模型

考虑到车身的总质量通常为动力总成的7～10倍。则可将动力总成在起动过程中的振动方程简化为

$$\boldsymbol{m}\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{k}\boldsymbol{q} = \boldsymbol{F} \tag{4}$$

$\boldsymbol{m}$为6×6的质量矩阵；由动力总成质量惯量特性决定；$\boldsymbol{c}$为6×6的阻尼矩阵，$\boldsymbol{k}$为6×6的刚度矩阵，由动力总成悬置特性决定；$\boldsymbol{q}$为6×1的广义位移矩阵：

$$\boldsymbol{q} = [\,x, y, z, \alpha, \beta, \gamma\,]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

x、y、z为平动位移，α、β、γ为角位移。$\boldsymbol{F}$为6×1为广义力矩阵。

$$\boldsymbol{F} = [\,0, 0, 0, 0, -T, 0\,]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

由于动力总成在x方向上受到的外力为0，因此

$$m_p\ddot{x} = -c\dot{x} - kx \tag{7}$$

其中：m_p为动力总成的质量；

$-c\dot{x} - kx$为动力总成受到悬置的阻尼力和弹性力。这个力与车身受到的力互为作用力与反作用力，即：

$$F_x = m_b\ddot{x}_b = -m_p\ddot{x}。 \tag{8}$$

m_b为车身的质量。$\ddot{x}_b$为车身x方向加速度，$\ddot{x}_b$与$\ddot{x}$成正比。

由此可见三缸机起动过程中车身x向的振动是由动力总成受到的绕曲轴方向（Ry）的扭矩波动通过悬置系统传递到车身x方向上而引起的。如在绕曲轴方向将动力总成刚体模态与动力总成x方向平动模态完全解耦，则扭矩波动将不会使动力总成质心产生x方向的运动。

动力总成悬置系统的设计必须考虑到怠速工况下的隔振效果，动力总成悬置系统绕曲轴方向的固有频率至少低于激励频率的0.707倍。当怠速转速同为750 r/min时，三缸机的主要激励为1.5阶，主要激励频率为18.75 Hz；而四缸机的主要激励为2阶，频率为25 Hz。为了保证隔振效果，相同怠速转速下，三缸机动力总成悬置系统的固有频率必须比4缸机更低，这必然导致动力总成固有频率分布也更密集，易造成模态耦合[11–12]，从而导致扭矩波动更容易传递到x方向上，导致起动过大。

3 三缸机起动振动的优化

3.1 动力总成悬置的优化

研究结果表明[5]，降低绕曲轴方向（Ry）与x方向平动刚体模态的耦合，有助于减小起动扭矩波动到整车x方向振动的传递，从而减小起动振动。式（8）表明可以用动力总成质心沿整车x方向加速度的大小表征车身x方向振动的大小。

故此可以用动力总成质心沿整车x方向的平动加速度$\ddot{x}_p(\omega)$与绕曲轴方向的扭矩$T(\omega)$的传递函数幅值大小来表征扭矩波动与车身振动之间的传递大小。

$$H(\omega) = \frac{\dot{x}_p(\omega)}{T(\omega)} \tag{9}$$

本案例中动力总成悬置系统采用了三点式方案，采用左右悬置和后拉杆的布局。

动力总成质量惯量参数和悬置系统的动刚度分别见表1和表2。

表1 动力总成悬置的动刚度/(N·mm^{-1})

悬置	方向		
	x	y	z
发动机悬置	140	108	270
变速器悬置	90	205	215
后拉杆	130	14	14

表2 发动机的质量惯量参数

	惯性参数/(kg·m^{-2})					
质量	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	I_{xy}	I_{yz}	I_{zx}
188 kg	10.89	6.78	9.87	−1.58	1.87	−0.28

图5所示为所建立的动力总成悬置系统动力学模型，在动力总成质心上施加绕y轴的单位扭矩，计

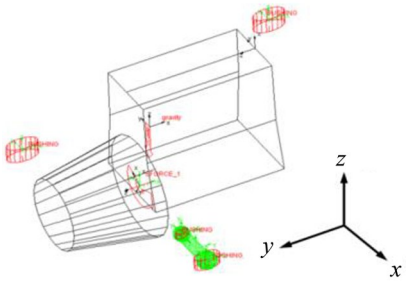


图5 动力总成悬置系统的动力学模型

算$H(\omega)$。

由于本文中车型已经处于开发后期，很难对悬置系统进行全新设计，且后悬置x方向刚度对动力总成绕曲轴方向的模态影响最显著，因此以后悬置x方向刚度作为设计变量对悬置进行优化。

图6是后悬置x方向动刚度不同时$H(\omega)$的仿真结果。传递函数曲线上有两个峰值。

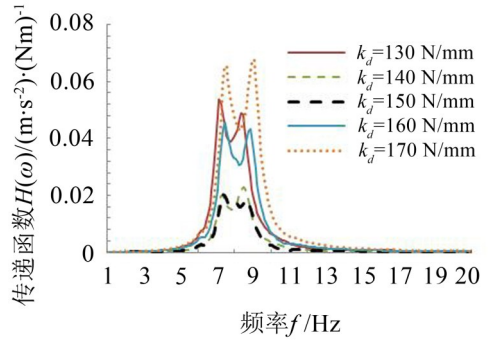


图6 不同后悬置方案的传函$H(\omega)$

表3是动力总成刚体模态的仿真分析结果。动力总成刚体模态分析结果表明这两个峰值分别对应于动力总成绕整车y方向转动(Ry)的模态频率8.4 Hz以及动力总成整车x方向平动的模态频率6.8 Hz。

表3 动力总成刚体模态频率仿真结果/Hz

x	y	z	Rx	Ry	Rz
6.8	6.2	8.1	14.8	8.4	10.5

可见扭矩波动作用下动力总成质心x方向振动加速度响应主要由这两个模态叠加产生，且存在明显的模态耦合。随着刚度增加，这两个峰值频率都有所增加，但动刚度为140 N/mm左右时，$H(\omega)$的幅值最小。意味着发动机的扭矩波动更不容易产生x方向的振动。

因此，后悬置最终采用动刚度为140 N/mm的方案，并试制了新样件。图7、图8分别是新样件和对应的起动振动测试结果。优化悬置后，起动过程中加速度最大峰值降低到0.81 m/s^{2}左右，主观感觉得到明显改善。



图7 优化后动力总成后悬置样件

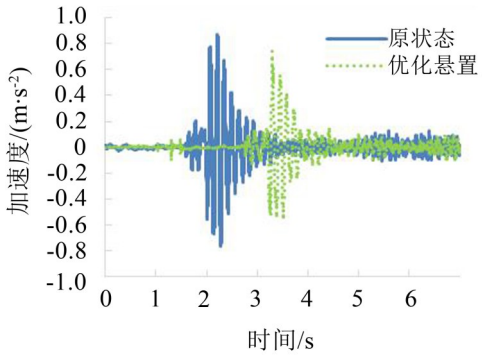


图8 优化悬置前后起动振动的对比

3.2 起动过程的优化

除了进行悬置系统优化之外，减小起动过程的扭矩波动也是改善起动振动的有效途径。减小扭矩波动最直接的措施是降低起动过程的气缸爆发压力，可以采用的措施包括[13–15]：减小起动过程中节气门的开度；减少进气阀的开启时间；减少供油量；调整点火提前角等。

但降低起动过程燃烧力虽然有利于减小起动振动，但也存在在低温等极端环境下使发动机起动失败的风险。因此，工程上通常采用提高起动电机的拖动转速同时结合减小燃烧爆发压力的方法。这种方法充分利用起动电机输出的扭矩波动小的特点，同时避免了减小燃烧爆发压力所导致起动失败的风险。

本文采取的方案是调整起动过程中的发动机标定，将燃烧开始的转速提高到300 r/min；为此需要将原有起动电机的功率由1.1 kW提高到1.3 kW，优化后的起动电机样件见图10。



图10 大功率的起动电机

同时为了满足电机功率提高的要求，蓄电池容量由原来的60 Ah提高到70 Ah。另外适当减小了起动过程的节气门开度和供油量，以减小燃烧爆发压力。图11给出提高拖动转速后起动过程发动机转速随时间变化关系，燃烧开始时的转速由原来230 r/min左右提高到300 r/min左右，燃烧开始后的转速波动明显降低（见图中标志位置）。

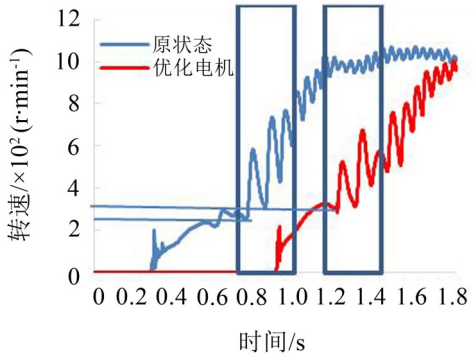


图11 优化前后起动过程转速对比

图12是优化悬置配合同时优化起动过程后座椅振动加速度测试结果。起动过程中加速度最大峰值降低到0.63 m/s²，与标杆车水平相当，主观感觉为可接受。

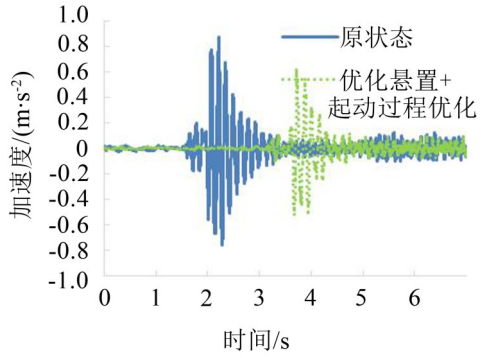


图12 优化起动机前后起动振动对比

4 结 语

本文对某三缸发动机起动过程中振动大的原因进行分析，并通过优化悬置系统和起动过程使起动振动降低到竞品车的水平。得到了以下的结论：

(1) 由于三缸机车型主要激励力为1.5阶，与四缸机车型相比频率更低，动力总成刚体模态频率更密集，动力总成悬置系统绕曲轴方向的模态更容易与其前后方向平动模态产生耦合，从而导致起动振动过大。优化悬置系统，减小扭矩波动向车身的传递是控制起动振动重要途径；

(2) 三缸机发火间隔比四缸机更大，气缸爆发压力波动更显著；提高起动过程中电机拖动转速，降低起动过程前几个工作循环的燃烧爆发压力，对于减小三缸机的起动振动有明显作用。

参考文献：

[1] KUANG MING L. An investigation of engine start-stop NVH in a power split powertrain hybrid electric vehicle [C]. SAE 2006 world Congress and Exhibition. DOI: 10.4271/2006-01-1500.

[2] THOMAS WELLMANN. Influence of automatic engine stop / Start systems on vehicle NVH and launch performance[J]. **SAE International**, DOI: 10.4271 / 2015-01-2183.

[3] FULK GARY. High performance stop-start system with 14 volt belt alternator starter[J]. **SAE International**, DOI: 10.4271/2012-01-1041.

[4] LI LAI HANG, SINGH RAJENDRA. Start-up transient vibration analysis of a vehicle powertrain system equipped with a nonlinear clutch damper[J]. **SAE International**, DOI: 10.4271/2015-01-2179.

[5] LEE YOUNG CHAN. Study on transient vibration response characteristics of front transverse power train at the key on/off[J]. **SAE technical paper**, DOI: 10.4271/2007-01-2283.

[6] HIROSHI SUGIMURA, MASAYA TAKEDA. Development of hev engine start-shock prediction technique combining motor generator system control and multi-body dynamics (mbd) models[J] **SAE International**, DOI: 10.4271/2013-01-2007.

[7] 王炳刚. 汽油机直接起动停止过程平顺性研究[D]. 长春：吉林大学，2009.

[8] 韩立伟，苏岩. 汽油机起动过程的振动[J]. **吉林大学学报**（工学版）2010，40(4)：938-942.

[9] 王博，张继东，余海生，等. 发动机起动引起的混合动力汽车振动分析与控制[J] **汽车工程**，2019，41(2)：184-186.

[10] 周龙保. 内燃机学[M] 北京：机械工业出版社，1999.

[11] 刘晓昂，上官文斌. 三缸发动机悬置系统设计方法的研究[J]. **振动工程学报**，2016，29(5)：805-813.

[12] 金岩，韩鹏. 缸内直喷三缸机整车集成中的振动噪声问题研究[J]. **噪声与振动控制**，2018，38(6)：76-80.

[13] LIU XIAOBING. Extended range cam phasing effects on engine stop/ start quality[J] **SAE International**, DOI: 10.4271/2014-01-1700.

[14] DARRELL ROBINETTE, MICHAEL POWELL. Optimizing 12 Volt start - stop for conventional powertrains[J] **SAE International**, DOI: 10.4271/2011-01-0699.

[15] SHIMODE KENTO, ISHIZAKI KEISUKE. Machine learning based technology for reducing engine starting vibration of hybrid vehicles[J] **SAE International**, DOI: 10.4271/2019-01-1450.