某前驱车轮端起步粘滑异响分析与控制

岳川元',杨诚',张军3,杨朝2,沈蜜

(1. 重庆大学汽车工程学院,重庆400044; 2. 重庆大学汽车协同创新中心,重庆400044; 3. 吉利汽车研究院,浙江杭州310000; 4. 重庆长安汽车股份有限公司欧尚汽车研究院,重庆400023)

摘要:某前驱车型在起步过程中驱动轮端出现"咔哒"异响,问题发生频次较高,严重影响整车品质。对异响现象进行分析最终确定是轮毂轴承与驱动半轴接触端面粘滑振动引起,在粘滑过程中接触端面由静摩擦向滑动摩擦转变时接触面间摩擦系数突变产生轴向冲击力诱发异响。通过建立合理的物理模型,分析粘滑运动过程中相关的正压力、滑动摩擦系数、静摩擦系数等参数的影响,利用一种特制减摩垫圈,进而改变传动零部件接触端面的动态摩擦特性,有效解决了该车型驱动轮端起步异响的问题。目前,国内外针对车辆传动系统中粘滑摩擦的研究较少。该研究对新车型传动设计过程中类似的粘滑异响处理有积极的借鉴和参考意义。

关键词:驱动半轴;轮毂轴承;摩擦学;粘滑摩擦

中图分类号: TB53 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2019)-04-0446-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.04.015

Analysis and control of the starting stick-slip noise at vehicle front wheel end

YUE Chuan-yuan¹, YANG Cheng¹, ZHANG Jun³, YANG Zhao², SHEN Mi⁴

(1. School of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

- 2. Automotive Collaborative Innovation Center of Chongqing University, Chongqing 400044, China;
 - 3. Geely Automobile Research Institute, Hangzhou 310000, Zhejiang, China;
 - 4. Chongqing Chang'an Auto Oushang R&D Center, Chongqing 400044, China)

Abstract: In the starting process of a certain front-engine front-drive vehicle, the "click" sound appears and the high occurrence rate of this trouble seriously affects the quality of whole vehicle. Through the investigation and analysis, it is clarified that the phenomenon of abnormal noise is caused by the stick-slip vibration of the contact end face between the wheel-hub bearing and the driving half-shaft. In the stick-slip process, the friction type of the contact end face transfers from static friction to dynamic friction and the axial impact introduced by the changes of friction coefficient generates abnormal noise. A simplified physical model is established, the influences of dynamic and static friction coefficients, positive pressure and contact area on stick-slip motion are analyzed. A special anti-friction washer is added to the contact interface to minimize the change of friction force during the transfer from static friction to dynamic friction, so that the trouble of starting "click" noise is eventually solved. At present, there are few researches on stick-slip friction in vehicle transmission system. The research in this paper has reference significance for the similar stick-slip abnormal noise treatment in the design process of the new vehicle transmission.

Key words: driving half-shaft; wheel hub bearing; tribology; stick-slip friction

0 前言

随着汽车技术的发展,人们对汽车的振动噪声问题更加关注。汽车动力传动系统作为汽车的重要组成部分,由于其结构复杂性导致的振动噪声问题往往是汽车噪声和异响的主要来源之一^[1],这些噪声及异响问题不仅会影响驾驶员以及乘客的乘坐舒适性,甚至会涉及到车辆的安全性能。而在离合

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-02-21

作者简介: 岳川元(1992一), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 研究方向为

智能驾驶车辆横纵向运动控制、汽车 NVH 噪声振动控制。

通讯作者: 岳川元, E-mail: 905398304@qq.com

器以及其他动力传递的机械系统中,接触式旋转体是使用较广泛的一种结构设计。在实际工作状态下,经常由于旋转摩擦而产生粘滑振动及噪声。在特定的条件下,两个接触表面间周期性出现粘滞滑动现象,且二者产生的摩擦力不是一个定值,通常将这种振荡摩擦现象称为粘滑现象。存在于机械传动结构中的粘滑振动现象,会对存在摩擦的工作系统产生很严重的影响,甚至导致破坏,如伸缩花键、雨刮器、高精度机床等都易产生粘滑问题[2-4]。SPENCER等^[2]就利用在花键中添加油脂的工程措施解决了传动系统中的粘滑振动异响问题。对于粘滑摩擦现象通常可采用单自由度质量块-弹簧模型、

悬臂梁-摩擦盘模型等进行说明[5-9]。

通过对该车型异响发生部位进行排查分析发现,该异响是由轮毂轴承与驱动半轴接触结合面间发生旋转摩擦诱发产生的粘滑振动异响。本文通过建立合理的物理模型,分析粘滑运动过程中相关的正压力、滑动摩擦系数、静摩擦系数等参数的影响,利用一种特制减摩垫圈,进而改变传动零部件接触端面的动态摩擦特性,有效解决了该车型驱动轮端起步异响问题。同时也提出了多种工程化解决措施,通过对该车型起步异响机理的研究,以及相应的解决措施,对以后新车型传动设计过程中类似的粘滑异响处理有借鉴和参考意义。

1 现象阐述

通过特定实验方法对某车型的噪声、振动与不舒适性(Noise、Vibration and Harshness, NVH)性能进行综合评价,在车辆起步的时候,实验过程中明显能感受到一声或两声短暂、尖锐的"咔哒"异响声,主观感受该异响声音来自于驱动轮附近区域,从动轮位置不会发生异响声。分批次抽取多台车辆进行的起步异响评价表明,异响发生频率较高。为了确定异响的产生部位,本文根据图1所示方案,采用以现场实时试验为主,采集实验数据进行离线回放为辅的主观评价方法查找异响来源。根据判断结果,初步判定该异响声音来自驱动轮转向节附近。

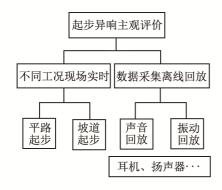


图 1 异响主观评价方法 Fig.1 Subjective evaluation method of "click" noise

采用 B&K 公司的振动噪声测试设备进行数据 采集,在转向节部位布置振动加速度计和近场传声 器,如图 2 所示。并通过控制局域网络(Control Area Network, CAN)总线采集发动机转速、发动机指示 真实扭矩、挡位等信息进行分析。

对异响车辆进行多次起步操作并采集数据,从 如图 3 所示的原车时域振动特性图中,可以看出振



图 2 传感器布置点 Fig.2 Layout of sensors

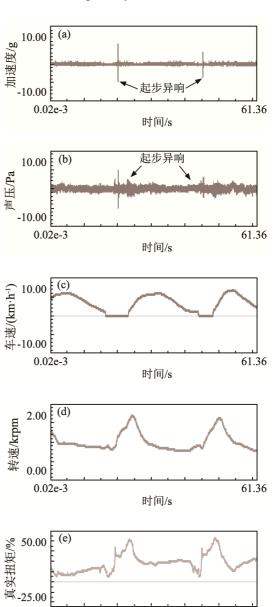


图 3 原车时域振动特性 Fig.3 Time domain characteristics of vehicle vibration

时间/s

61.36

动加速度曲线中存在多次冲击特征,如在第20s时刻,发动机转数为1141rpm、指示扭矩为25%时

0.02e-3

振动幅值出现突变,振动幅值约为 5 g 并伴随"咔哒"异响产生,近场传声器声压曲线中也在同时刻出现幅值突变现象。

2 车轮端起步异响排查

因为根据主观评价结果,判断异响发生在驱动轮部位,因此考虑时与驱动轮相关联的部件进行排查。将驱动半轴拆卸后可见在驱动半轴与轮毂轴承接触面存在明显摩擦痕迹,初步判定异响为该接触面旋转摩擦产生。为进一步确定异响是由驱动半轴与轮毂轴承接触接合面旋转摩擦产生,对驱动半轴锁紧螺栓力矩进行调整(工装状态下锁紧力矩为270 N·m),观察异响变化情况。不同锁紧力矩下异响的变化情况如表 1 所示,根据异响的变化情况,最终确定驱动半轴与轮毂轴承接触面旋转摩擦即为异响源。

表 1 不同锁紧力矩下异响变化情况表

Table 1 Variation of abnormal noise under different locking torques

试验编号	锁紧力矩 $T_{\omega}/(N \cdot m)$ 异响变化情	
1	320	明显
2	270	明显
3	220	明显
4	170	明显
5	120	轻微
6	70	无异响
7	20	无异响

车辆在起步过程中,发动机输出扭矩通过离合器、变速器、传动轴等传动系统部件传递动力至车轮实现起步功能。在起步时,异响可通过空气、结构传递至车内,传递路径如图 4 所示,因此考虑从异响源和传递路径方向进行分析控制。

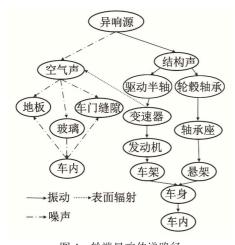
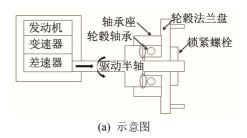


图 4 轮端异响传递路径 Fig.4 Transmission path of "click" noise at the wheel end

3 起步异响产生机理分析

根据驱动半轴与轮毂轴承装配结构,可以看出驱动半轴与轮毂轴承之间通过花键连接并配合紧固螺栓固定,且与驱动半轴轴肩相接触,如图 5(a)、5(b)所示。



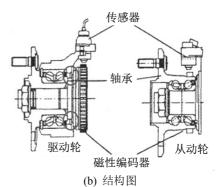


图 5 驱动半轴与轮毂轴承装配示意图 Fig.5 Assembly diagram of driving half shaft and hub bearing assembly

由于驱动半轴上的外花键与轮毂轴承内花键存在配合间隙,且花键在起步扭矩冲击下将产生微小弹性变形,二者误差累积,则驱动半轴轴肩与轮毂轴承端面会产生微小的相对位移。因此,在起步扭矩冲击下有发生粘滑运动风险。由于驱动半轴与轮毂轴承通过紧固螺栓联结,螺栓锁紧力矩与接触面摩擦系数、正压力等存在如下关系:

$$T_{\omega} = \mu F_{n} D \tag{1}$$

其中: T_{o} 是紧固螺栓锁紧力矩,单位为 $N \cdot m$; μ 是摩擦系数; F_{n} 是正压力,单位为 N; D 是锁紧螺栓直径,单位为 mm;

当从原地起步时,若半轴输出扭矩远大于螺栓锁紧力矩,则二者的结合面之间将会发生相对滑动,由静摩擦转变为滑动摩擦。螺栓锁紧力矩 $T_{\rm o}$ 与螺栓直径 D 为常数,则正压力与摩擦系数成反比:

$$F_n \propto \frac{1}{\mu} \tag{2}$$

对于干摩擦表面,不同钢材之间摩擦系数¹⁰¹如表 2 所示,可以看出不同材料组合的静、滑动摩擦系数差别较大。此外,起步时间越短,静摩擦状态下储存应变能释放时间越短,则产生的冲击作用越大。同时,对比在有油脂润滑状态下,静、滑动摩擦系数改变量很小,因此轴向正压力改变量小引起的冲击异响不明显,这也解释了为何润滑剂能够抑制摩擦现象。

表 2 摩擦系数表 Table 2 List of friction coefficients

材料一	材料二	静摩擦系数		滑动摩擦系数	
		干摩擦	油脂润滑	干摩擦	油脂润滑
低碳钢	低碳钢	0.74	-	0.57	0.09~0.19
高碳钢	高碳钢	0.78	$0.05 \sim 0.11$	0.42	0.029~0.12

为了研究的便利,本文将该摩擦模型简化为悬臂梁和旋转体的接触结构模式,如图 6 所示。

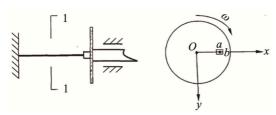


图 6 摩擦模型示意图 Fig.6 Diagram of friction model

此外,本文对该简化模型进行如下假设:

- (1) 悬臂梁整体质量等效悬臂梁端质量块:
- (2) 悬臂梁的运动为微变形。

通过理论分析旋转摩擦诱发质量块粘滑运动规律[II-16],本文仅考虑梁在接触面摩擦力的作用下沿 y 向运动,集中质量块也跟随着做相同的运动,悬臂梁在此时产生的弹性变形形成了一定大小的恢复力,当该恢复力与静摩擦力和重力之和等大反向时,该粘滑运动过程中的初次粘滞期结束,此时满足条件:

$$\begin{cases} ky_{n1} = \mu_s N + mg \\ k = \frac{Eab^3}{4l^3} \end{cases}$$
 (3)

其中,k 代表悬臂梁的刚度值大小; y_{n1} 代表初次粘滞结束时质量块的坐标。

在初次粘滯期结束以后,该集中质量块还具有一定大小的速度值,根据运动学的惯性定理可知,该集中质量块将会顺着 y 轴向下产生一定距离的滑动位移,此时满足条件:

$$my''+ky=\mu_kN+mg$$
 (4) 令 $\omega_n=\sqrt{k/m}$,根据初始条件可解方程得:

$$\begin{cases} y_{n1} = \sqrt{\frac{N^2(\mu_s + \mu_k)^2}{k^2} + \frac{r^2\omega^2}{\omega_n^2}} \cos(\omega_n t - \phi) + \\ \frac{(\mu_k N + mg)}{k} \\ \phi = \arctan(\frac{\omega_n N(\mu_s + \mu_k \sin \omega_n t_{n1}) + kr\omega \cos \omega_n t_{n1}}{\omega_n N(\mu_s + \mu_k \sin \omega_n t_{n1}) - kr\omega \cos \omega_n t_{n1}}) \end{cases}$$
(5)

其中,E 为悬臂梁的弹性模量;A=ab 为悬臂梁的横截面面积;m 为悬臂梁的端部集中质量块质量;N 为沿悬臂梁的轴向作用力; μ_s 为接触面静摩擦系数; μ_k 为接触面滑动摩擦系数; μ_k 为粘滑中初次滑动结束时质量块坐标;r 为集中质量块做圆周运动的运动半径。

从粘滑运动方程中可以总结出不同参数的大小与粘滑运动之间的关系:

- (1) 悬臂梁的刚度 k 以及零部件接触面的面积 A 越大,则发生粘滑振动时的振幅就越小。
- (2) 正压力 N、滑动摩擦系数 μ_k 以及静摩擦系数 μ_s 的值越小,则发生粘滑振动时的振幅就越小。

4 方案可行性验证

为了检验该车轮端的起步粘滑异响是由于驱动半轴与轮毂轴承之间的接触面的摩擦转动导致的,本文在两个部件的接触面之间添加了一种含有减摩涂层的特制垫圈,其结构和尺寸如图 7 所示。



图 7 特制减摩垫圈 Fig.7 Special anti-friction washer

再次采用主观评价法对加装特制垫圈后的车轮端异响进行评价,原始异响消失,利用专业设备 采集加装特制垫圈前后的声音数据,并进行客观分析,结果如图 8 所示。原车状态下在起步过程中振动加速度和传声器幅值都存在突变现象即起步异响现象,而加装特制垫圈后在起步过程中振动加速度和传声器幅值曲线平滑幅值突变现象消失,表明加装垫圈后除了正常的齿轮啮合振动,无振动幅值突变现象,起步异响现象消失。

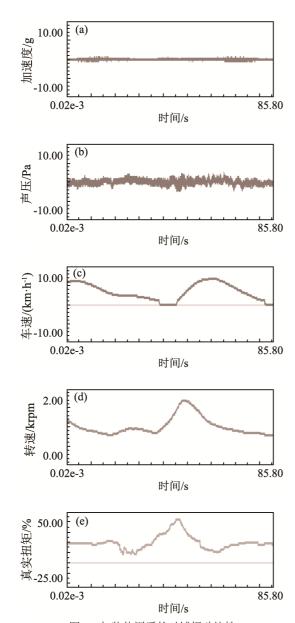


图 8 加装垫圈后的时域振动特性 Fig.8 Time domain characteristics of vehicle vibration after adding the washer

5 起步异响控制工程化因素

根据对粘滑振动理论探讨以及对简化摩擦模型的仿真结果分析,可以明确在影响粘滑运动规律的诸多因素中,传动中的正压力、零部件接触面的设计参数以及动、静摩擦系数变化等影响较大。根据前文分析,针对机械传动系统中类似的粘滑异响控制和优化,可从以下方面进行改进:

- (1) 设计花键时把轴花键形式更改成面花键形式,通过改变配合方式来杜绝粘滑异响;
- (2) 尽可能在设计过程中采用具有较小摩擦力的配合面,较小摩擦力可保证在产生粘滑运动时避

免异响;

- (3) 设计过程中,尽可能减小紧固锁紧力,以 便有效降低粘滑运动过程中的轴向冲击力;
- (4) 尽可能在设计过程中保证更小的花键配合 间隙,以此减小或消除配合面发生粘滑的可能;
- (5) 采用有效方法阻断异响的传递路径,比如 尽可能在设计过程中提高车身的密封性能等。

各种具体措施的改善情况如表 3 所示。

综合考虑不同改善措施的改善效果、所需成本、可靠性以及不同改善方案的工程化实施性,本文最终决定采用特制减摩垫圈,进而改变传动零部件接触端面的动态摩擦特性,以此进行该粘滑异响的控制,简单方便,成本低,可实施性强。

表 3 不同起步异响控制措施的改善效果比较
Table 3 Comparison of improvement effect between different control measures on abnormal starting noise

序号	工程化控制措施	改善结果
1	轴花键设计成面花键(杜绝粘滑异响)	有效
2	在接触面增加减摩垫圈(减小摩擦力)	有效
3	在接触面涂抹减摩材料(减小摩擦力)	有效, 衰减严重
4	减少紧固螺栓扭矩(减小轴向冲击力)	轻微改善
5	内花键表面涂胶(保证更小配合间隙)	部分有效
6	加强车身密封(改善传递路径)	有效
7	将前地毯加厚(改善传递路径)	有效

针对垫圈的使用寿命验证,本文使用添加特制垫圈的车辆在专用汽车实验场地进行可靠耐久性能试验,每间隔3000km做一次实验记录,测试里程高达数万公里,测试结束检测显示,异响未再出现,特制垫圈未出现明显破损,其磨损状态在计算安全范围内。

6 结论

汽车性能的不断提升,发动机输出扭矩也在不断增加,尤其是在大力发展新能源的趋势下,相比于传统内燃机电机,新能源发动机的输出扭矩将会更大。因此,在起步过程中因扭矩冲击作用而引发的粘滑摩擦异响问题将会更加突出。本文通过分析,得出以下结论:

- (1) 针对车辆在起步过程中的"咔哒"异响进行主、客观分析,最终确定异响产生源为驱动半轴与轮毂轴承结合端面粘滑摩擦导致。
- (2) 通过建立合理的物理模型,分析粘滑运动过程中相关的正压力、滑动摩擦系数、静摩擦系数等参数的影响,利用一种特制的减摩垫圈,进而改变传动零部件接触端面的动态摩擦特性,稳定控制

了传动过程中的摩擦系数变化量,保证动力可以平 稳过渡,有效抑制粘滑异响,解决了该车型驱动轮 端的起步异响问题。

(3) 针对此类粘滑摩擦所引发的异响问题给出了多种异响控制方案,对以后新车型开发设计过程中动力传动系统中类似粘滑异响问题的规避提供了参考意见。

参 考 文 献

- [1] 吴光强, 栾文博. 汽车传动系相关 NVH 问题的动力学研究论述 [J]. 机械工程学报, 2013, **49**(24): 108-116. WU Guangqiang, LUAN Wenbo. Review of dynamic research for NVH problems related to automotive driveline[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, **49**(24): 108-116.
- [2] SPENCER W, BOUZIT D, PACE J, et al. Study of stick-slip friction between plunging driveline[J]. SAE Technical Paper, 2015. DOI: 10.4271/2015-01-2171.
- [3] HUANG M. Analysis of friction induced itability, bifurcation, chaos, stick-slip vibration and their impacts on wiping effect of automotive wiper system[J]. SAE International Journal of Passenger Cars mechanical Systems, 2014, 7(1): 21-31.
- [4] GAO J W, TAO T, MEI X S. Study on the nature of stick-slip motion for high-precision table[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 226(7): 1751-1764.
- [5] POPP K, STELTER P. Stick-slip vibrations and chaos[J]. Proc. R. Soc. London, 1990, 332(1624): 89-105.
- [6] ZULEEG J. How to measure, prevent, and eliminate stick-slip and noise generation with lubricants[C]//AE Technical Paper Series

- SAE International SAE 2015 Nosie and Vibration Conference and Exhibition, 2015. DOI: 10.4271/2015-01-2259.
- [7] KANG J, KROUSGRILL C M. Oscillation pattern of stick-slip vibrations[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2009, 44(7): 820-828.
- [8] NADIM A E, HAMZEH T. Stick-slip detection through measurement of near field noise[J]. Journal of Mechanical Engineering Research, 2011(3): 96-102.
- [9] TWORZYDLO W W, HAMZEH O N. Friction-induced oscillations of a pin-on-disk slider: analytical and experimental studies[J]. Wear, 1999, 236(1): 9-23.
- [10] OBERG E, FRANKLIN J D , HENRY R H. Machinery's handbook guide 29th Edition[M]. NewYork: Industrial Press, 2012.
- [11] ZHOU Y F, MA J M, WANG Z M. Analysis of the stick-slip vibration induced by rotating friction[J]. Noise and Vibration Control, 2005, 25(5): 10-12.
- [12] LUO A, GEGG B. Stick and non-stick periodic motions inperiodically forced oscillators withdry friction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 291(1-2): 132-168.
- [13] HUNDAL M. Response of abase excited system with coulom band viscous friction[J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 64(3): 371-378.
- [14] SHAW S. On the dynamic response of asystem with dry-friction[J]. Journal of Sound and Vibration, 1986, **108**: 305-325.
- [15] HAGEDORN P. Non-linear oscillations[M]. 2ndEdition, Oxford: Clarendon Press, 1988.
- [16] ROBERTA L, RUBENS S. Parametric analysis of the statistical model of the stick-slip process[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 397: 141-151.