

文章编号:1006-1355(2015)02-0086-05

乘用车启动电机噪声评价方法

吴小珊¹, 施全¹, 石晓辉¹, 郭栋², 易鹏³

(1. 重庆理工大学 汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室, 重庆 400054;
2. 西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031; 3. 重庆市科学技术研究院, 重庆 401123)

摘要:客观评价乘用车启动电机噪声是否满足要求是乘用车启动电机质量评价重要研究内容之一。针对乘用车启动电机噪声评价问题,本文提出了一种基于噪声主观评价结果,采用阶次分析的乘用车启动电机客观评价方法。以15台该类型电机在匀加速时的噪声样本为评价对象,采用等级评分法进行了主观评价,获得了8台噪声满足80%以上评价主体可接受的电机样本。提取了样本在空载和负载工况下的特征阶次,组成了目标阶次族,依据极值包络法确定了噪声可接受电机的阶次门限值,为乘用车启动电机噪声评价提供了参考,具有重要的工程实践意义。

关键词:声学;电机;噪声;阶次分析;主观评价;极值包络法;

中图分类号:TM301

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2015.02.021

Noise Evaluation Method for Starting Motors of Passenger Cars

WU Xiao-shan¹, SHI Quan¹, SHI Xiao-hui¹, GUO Dong², YI Peng³

(1. Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. Mechanical Engineering College, Southwest Jiao tong University, Chengdu 610031, China;
3. Chongqing Academy of Science & Technology, Chongqing 401123, China)

Abstract : Starting motor noise is an important factor for evaluation of the passenger car's acoustic quality. In this paper, an objective evaluation method with order analysis was proposed based on the subjective assessment results of the motor noise. The subjective evaluation of fifteen sample motors was carried out using the ranking scale method. Testing results showed that eight motors of them were acceptable. The highest orders of the acceptable motors were extracted under idle and load conditions to build the key group of critical orders. Then, by extracting the envelope of the critical orders, the threshold for objective judgment of starting motor noise of the passenger car was established. The proposed method may provide an alternate choice to evaluate motor noise for passenger cars.

Key words : acoustics ; motor ; noise ; order tracking analysis ; subjective evaluation ; extreme envelope method

乘用车启动电机噪声是影响整车NVH(Noise, Vibration & Harshness)性能的重要因素之一。对电机噪声问题国内外学者、技术人员开展了不同类别的研究工作。Jordan探索在电机设计阶段控制电磁噪声,把电机作为球形辐射器计算辐射声功率^[1];代颖,崔淑梅等依据有限元法和模态技术研究了电机

的振动噪声问题^[2];李辉,许良等人提出了天窗电机噪声测试盒测试信号处理方法^[3]。判断电机噪声是否满足驾乘人员的要求,最直接、准确的方法是进行主观评价,主观评价方法是基于主观试验方法对电机声音品质进行评价,目前常用的方法有等级评分法、排序法、语义细分法、幅度调节法和成对比较法^[4]。由于主观评价需要大量的人力、物力才能完成,延长了产品的开发时间,增加了成本。因此,找到一种相对准确、快速的电机噪声客观评价方法成为了电机企业面临的重要课题。

随着阶次跟踪技术的发展,在电机等旋转机械中得到了广泛的应用。丹麦B&K公司采用Vold-Kalman滤波技术成功提取了阶次分量,并且在基于贝叶斯估计算法下成功实现了无转速计信号下对噪

收稿日期:2014-10-24

基金项目:重庆市科技攻关重点项目

(cstc2012gg-yyjsB0216; cstc2011ggB0030)

作者简介:吴小珊(1987-),女,四川内江人,研究生,主要研究方向:电机的振动噪声和汽车变速器、整车的声品质研究。

通讯作者:施全,男,研究生导师。

E-mail: sq7370@163.com

声和振动阶次分量的提取。在国内,阶次分析在汽车振动噪声测试方面的应用也有比较深入的研究,同济大学的周冠嵩应用阶次分析方法对某五档客车自动变速器进行噪声测试,得到了不同档位下相应的车厢声压级情况^[5]。浙江大学的孔庆鹏等针对发电机变速阶段的振动信号,通过Gabor变换以及满足信号时域重构的对偶数双正交条件,采用在时频域进行带通滤波的方法进行了阶次跟踪^[6]。

本文针对某乘用车启动电机企业电机噪声客观评价问题,在半消声室中,测试了随机抽取的15台电机噪声,通过阶次分析方法确定了该款电机在空载和负载工况下噪声的特征阶次为12阶和36阶。然后对15台电机噪声进行了主观评价试验,找到8台噪声良好的电机。分别在空载和负载工况下,提取了8台电机噪声的特征阶次,组成了目标阶次族,依据极值包络法最终确定了噪声可接受电机的阶次门限值,并对其曲线进行验证,得到合理的包络曲线。运用该客观评价方法到该批电机噪声鉴别中,大大提高检验效率,节约了成本。

1 电机噪声的机理

电机噪声根据其产生机理的不同,可分为三类:电磁噪声、机械噪声和空气动力噪声^[7]。研究发现低转速下电磁噪声是主要的电机噪声源,高转速下空气噪声和机械噪声是主要噪声源^[8]。

1.1 电磁噪声

电磁噪声来源于电磁振动,电磁振动由电机气隙磁场作用于电机铁心产生的电磁力所激发,而电机气隙磁场又决定于定转子绕组磁动势和气隙磁导。气隙磁场产生的电磁力是一个旋转力波,有径向和切向两个分量。

电磁噪声的频率计算公式

$$f = \frac{ZQn}{60} + 2f_0 \text{ (或0)} \quad (1)$$

式中

Z 为齿谐波次数(1或2); Q 为齿数; f_0 为电源频率。

1.2 空气动力噪声

空气动力噪声来源是电机通风系统中气流压力的局部迅速变化和随时间的急剧脉动,以及通风气流与电机风路管道的摩擦。这种噪声通常直接从气流中辐射出去。电机的空气动力噪声主要包括:旋转噪声、涡流噪声、笛声。

空气噪声的特征频率计算公式为

$$f_b = \frac{kZ_b n}{60} \quad (2)$$

空气噪声与转频和风扇的叶片数有关,阶次计算公式

$$O = \frac{60f}{n} \quad (3)$$

式中 O 为阶次; f 为频率; n 为转速。

1.3 机械噪声

机械噪声来源于电机运转部分的摩擦、撞击、不平衡以及结构共振。通常是由轴承和换向引起的。电机轴承在繁重的工作状态下运转时,滚珠和外圈滚道相接处会发生弹性变形。滚道变形随接触处的变化呈周期性变化,产生振动和噪声。轴承装机后,内外圈的配合及轴承游隙对电机噪声也有一定的影响。换向噪声在有滑环和换向器的电机中是不可避免的。

2 阶次分析原理

阶次分析是从受周期载荷作用的机械系统中分离正弦成分的一种信号处理方法,对转速进行跟踪并实现恒角度增量采样是进行阶次分析的关键。为了确定重采样的时间点需先行设定旋转轴的角加速模式。假设机械作匀变速转动,则在短时间内参考轴做匀角加速运动^[9-12]。旋转轴转角 $\theta(t)$ 可以表达为

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (4)$$

其中 a_0 、 a_1 、 a_2 为待定系数, t 为时间。

设 t_1 、 t_2 、 t_3 为三个脉冲依次到达的时间。在阶次分析中,转速脉冲的角度间隔($\Delta\theta$)是不变的,有如下的关系式

$$\theta(t_1) = 0 \quad (5)$$

$$\theta(t_2) = \Delta\Phi \quad (6)$$

$$\theta(t_3) = 2\Delta\Phi \quad (7)$$

将式(5)代入式(4)式求解可得固定角度变化所对应的时间间隔

$$t = \frac{1}{2a_2} \left[\sqrt{4a_2(k\Delta\Phi - a_0) + a_1^2} - a_1 \right] \quad (8)$$

式中 k 为插值系数,由(7)式决定

$$\theta = k\Delta\theta \quad (9)$$

经过重采样后,振动信号则由等时间间隔(Δt)序列 x 变为等角度间隔($\Delta\Phi$)序列 $x(\theta)$ 。同时采样时必须满足香农采样定理,才能使谱分析时不出现频率的混叠与泄漏,即有

$$O_s \geq 2O_{\max} \quad (10)$$

式中 O_s 为采样阶次; O_{\max} 为最大分析阶次。

阶次分析同转速密切相关,且大大减少了计算时间,提高了计算速度和实时分析水平,且从阶次图中可以清楚看到信号的高谐波分量,因而成为旋转机械振动噪声测试的一个重要技术。

最近几年随着阶次分析研究的深入,许多专家学者对电机噪声的特征阶次做了许多研究。2010年谭喜,董大伟等提出了负载时36阶主要为电磁噪声,并指出了其引起的共振频率^[13];接着刘敏等也确定了负载时交流发电机的主要简谐成分为36阶次,且空载时主要是空气动力噪声^[14];2012年易鹏通过计算和实验数据分析得到了电机在空载和负载工况下噪声的特征阶次为12阶和36阶^[15]。2013年胡文明从对电机噪声振动的幅频特性分析中,确定了36谐次电磁激振力引起的电机内部结构强烈共振产生的噪声是电机在中低速段加载状态下噪声成分的主导成分^[16]。

3 电机噪声试验及分析

3.1 电机噪声实验设备

电机噪声实验在半消声室内进行,测试电机的参数如表1所示。参照《旋转电机噪声测定方法及限值 噪声测定方法》^[17],选择半球面法进行测量。标准规定,对轴中心高或电机高度为180 mm及以下的电机,测量半球面的半径 r 为0.4 m。本次试验的电机轴中心高小于180 mm,故选定测量半球面的半径为0.4 m。半球面法电机噪声测试如图1所示。在前、后、左、右、上的半球面上分别布置了五个麦克风,对电机噪声进行测量。电机的安装平台及驱动系统是课题组为本次研究开发的。

表1 电机参数

极对数	2	定子内径	0.027 m
额定功率	1 260 w	转子外径	0.030 5 m
额定转速	6 000 r/min	额定电压	14 V
定子/转子槽数	36/34	风扇叶片数	12

噪声采集系统选用德国 Head Acoustics 的 HS100-6102,分析系统选用该公司的 Artemis。数据采集参数设置如下:采样频率48 000 Hz,分析频率20 480 Hz;

3.2 电机实验结果及讨论

乘用车启动电机工作转速范围通常在1 000 r/min~13 000 r/min 范围内均匀变化。因此,为了全面测试乘用车启动电机的噪声特性,在该转速范围

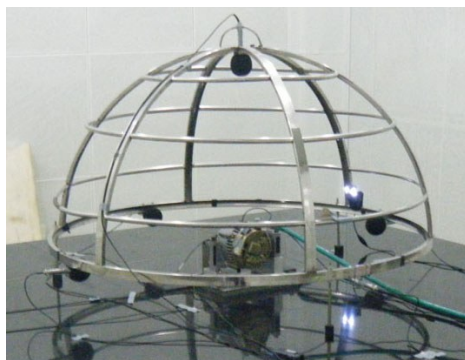


图1 电机噪声测试

内,对该款电机分别进行了空载和负载噪声实验。每种工况组合测量三次,选取重复性较好的数据作为最后的分析数据。部分典型转速下空载和负载电机噪声声压级如表2所示。测试发现,在空载下,随着转速的升高,电机噪声的声压级在不断的增高;在负载工况下,电机噪声的声压级出现波动的情况,但整体趋势是在不断的上升。负载工况下,在4 220 r/min 以前,随着转速的升高,电机噪声明显上升。在5 010 r/min 以后,随着转速的升高,电机噪声的声压级在逐步减低,但始终大于4 220 r/min 以下的转速范围。

表2 特征转速下空载负载声压级

转速/(r/min)	1 400	2 010	3 660	4 220	5 010	8 000
负载声压级/(dB(A))	71	74	89	90	80	87.5
空载声压级/(dB(A))	63	67	75	77	79	88

运用前述阶次分析方法,空载时总声压级和各个阶次的贡献量如图2所示。从图中可知,空载时候,随着转速的升高,电机噪声的声压级在逐步升高。在各个阶次成分中,12阶噪声整体上比其他阶次明显高,且与总体噪声相差很小,是主要的贡献量。由表1可知,电机风扇的叶片数为12片,依据式1-2、1-3 计算得到电机风扇噪声的主要阶次是12阶。

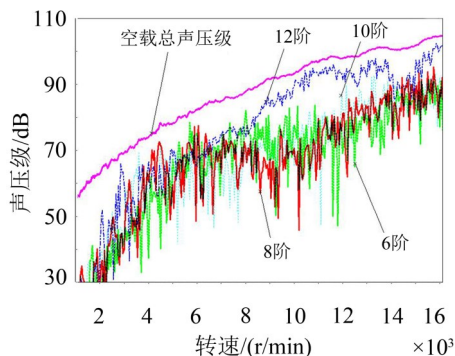


图2 空载特征阶次的声贡献量

因此,空载时12阶空气动力噪声为主要的电机噪声源。

负载时总声压级和各个阶次的贡献量如图3所示。

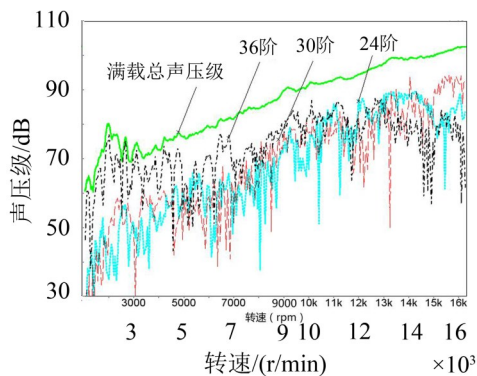


图3 负载特征阶次的声贡献量

从图中可知,在各个阶次成分中,36阶噪声比其他阶次明显突出,且与总体噪声相差很小,是主要的贡献量。结合表1和式1-1计算得到36阶为电机的电磁噪声。因此,负载时36阶电磁噪声为主要的电机噪声源。

通过上面的实验数据分析,发现空载时12阶空气动力噪声为主要的电机噪声源,负载时36阶电磁噪声为主要的电机噪声源。与其他学者研究结论一致。因此,确定电机在空载和负载工况下噪声的特征阶次为12阶和36阶。

4 主观评价试验

4.1 主观评价方法

由于主观评价法直接根据人的主观感受做出评价,具有很高的准确性,故在工程实际应用中,常采用主观评价法对声质量进行评价。常用的声质量的主观评价方法有等级评分法、排序法、语义细分法、幅度调节法和成对比较法等。本文为了区分出电机噪声的可接受声音,对15台该款电机进行电机噪声的主观评价,选择了“不可接受的一可接受的”作为评价准则,采用10等级评价法作为度量指标,评分等级如表3所示。等级1—5反映了该款电机噪声不可接受的程度,等级6—10反映了该款电机噪声可接受的程度。

4.2 评价主体和听音环境

评价主体由在校研究生20人组成,其中男生18人,女生2人,年龄在22岁—30岁。主观评价试验场地选择在安静室内,以铁三角AT-HA60型5通道声功率放大器和森海塞尔HD 600高保真耳机作为声

表3 主观评价等级

等级	描述	等级	描述
1	不可容忍的	6	可以接受
2	令人不安的	7	好
3	非常反感	8	很好
4	令人反感	9	非常好
5	需要改进	10	卓越的
<不可接受>		<可以接受>	

音回放设备。室内温度22℃~24℃,湿度45%~50%,通风良好无异味。

4.3 评价结果

对所测电机中,随机选出15台进行主观评价,经主观评价最终选出3台所有人都可接受的电机噪声和5台80%以上人可接受的电机噪声。主观评价结果如图4所示。

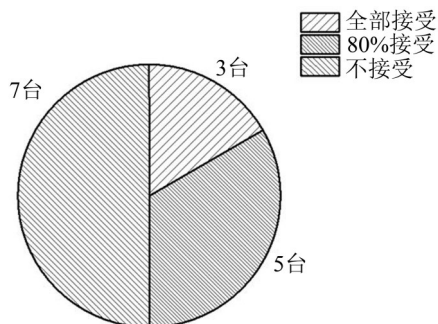


图4 主观评价结果

5 客观评价方法

从该款电机噪声分析结果已知,空载时,12阶空气动力噪声为主要声源;负载时,36阶电磁噪声为主要噪声源。以主观评价实验中三台全部接受的电机和5台80%接受的电机作为噪声可接受电机的样本。分别在空载和负载下,提取了其相应的特征阶次,组成了特征阶次族。通过极值包络法确定不同工况下该款电机噪声的可接受门限值。噪声数据在该极值包络曲线以下,满足噪声要求,在极值包络曲线以上,噪声不满足要求。空载8台样本电机的12阶阶次声压级如图5所示,极值包络如图中粗实线所示。负载8台样本电机的36阶阶次声压级如图6所示,负载工况下该款电机噪声的可接受门限值如图6中粗实线所示。

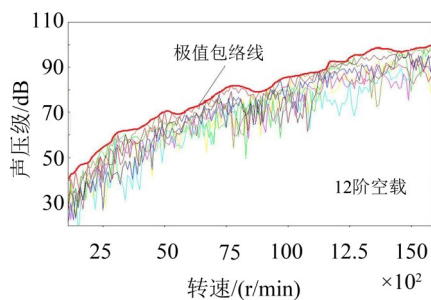


图5 空载12阶阶次声压级

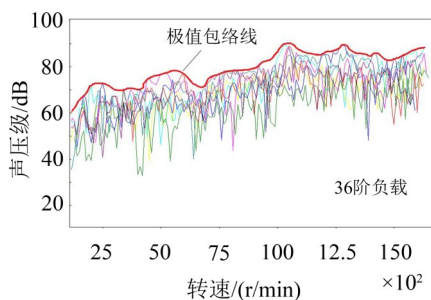


图6 负载36阶阶次声压级

6 结语

提出了一种基于噪声主观评价结果的乘用车启动电机客观评价方法。理论分析了电机的噪声特性,确定电机噪声主要包括电磁噪声、空气动力噪声和机械噪声三部分。试验研究了乘用车启动电机噪声特性。主要研究结果如下:

(1) 在半消声室中测量了15台某款乘用车启动电机的噪声特性,通过阶次分析方法,发现该款电机在空载下空气动力噪声为主要声源,负载下电磁噪声为主要噪声源;

(2) 采用等级评分法作为评价准则,对测得的电机噪声样本进行了主观评价,结果显示8台电机噪声为评价主体可接受;

(3) 建立了8台噪声合格电机的特征阶次族,运用极值包络法,确定了该款电机噪声客观评价的门槛值,为电机噪声客观评价提供了参考。

参考文献:

[1] H Jordan. Approximate calculation of the noise produced by motors[J]. *ENG*, 1949, (10): 22-26.

[2] 代颖,催淑梅,张千帆. 车用异步电机的电磁振动/噪声分析[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(33): 89-97.

[3] 李辉,许良. 天窗电机噪声测试及特征频率提取方法[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(18): 87-92.

[4] 毛东兴,高亚丽,愈悟周. 声品质主观评价的分组成对比较法研究[J]. *声学学报*, 2005, 30(6): 515-520.

[5] 周冠嵩,吴光强. 基于阶次分析的客车变速器噪声试验[J]. *现代制造工程*, 2007, 4(11): 85-88.

[6] 孔庆鹏,宋开臣,陈鹰. 发动机变速阶段振动信号时频分析阶比跟踪研究[J]. *振动工程学报*, 2005, 18(4): 448-451.

[7] Nabil Hammad, Sameh M Metwally, Abou-El-Nour, et al. Abouel-Seoud, Noise generating mechanisms of vehicle alternators[J]. *SAE*, 2005-01-3616, Chicago -Illinois -USA.

[8] Sean F Wu, Eugene Rivin and Michael Disalvo. Noise analysis of automotive alternators[J]. *SAE*, 1999-01-1712, Traverse City-Michigan-USA.

[9] Blough J R. Improving the analysis of operating data on rotating automotive components[D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 1998.

[10] 康海英,栾军英,田燕. 等阶次跟踪在齿轮磨损中的应用[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(4): 112-180.

[11] Qin S R, Guo Y, Tang B P. The order tracking of rotating machinery based on instantaneous frequency estimation [C] Proceedings of SPIE2002, 4827. Ancona: SPIE, 2002: 22-28.

[12] Dusan K, Radoslav S. Order bispectrum: a new tool for reciprocated machine condition monitoring[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2000, 14(6): 871-890.

[13] 谭喜,董大伟. 车用电机噪声振动分析系统开发及应用[J]. *噪声与振动控制*, 2010, (6): 96-100.

[14] 刘敏,董大伟. 车用交流发电机噪声特性及噪声源测试分析[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2010, 24(6): 13-17.

[15] 易鹏. 车用发电机噪声分析及试验研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2012.

[16] 胡文明. 基于阶次分析的车用交流发电机噪声分析与应用[D]. 广州:广东工业大学, 2013.

[17] 旋转电机噪声测定方法及限值 噪声测定方法 GB/T10069. 1-2004.