

基于试验的车用爪极发电机噪声源识别与分析*

吴双龙¹, 左曙光¹, 邓文哲¹, 钟鸿敏¹, 孙 罕²

(1. 同济大学新能源汽车工程中心 上海, 201804)

(2. 上海汽车工业集团上海法雷奥汽车电器系统有限公司 上海, 201201)

摘要 针对某型车用爪极发电机的噪声问题, 基于试验对其噪声源进行了识别与分析。首先, 测试了该型号 4 台不同结构(是否带风扇)的爪极发电机在空载和负载时的振动噪声; 然后, 利用阶次分析的方法识别了机械噪声、气动噪声和电磁噪声, 并通过流场仿真和电磁场理论解释了气动噪声和电磁噪声产生的机理; 最后, 对各噪声源的贡献量进行了分析。结果表明: 爪极发电机电磁力会产生 $6k(k=1, 2, \dots)$ 阶电磁噪声; 冷却风扇、转子和开槽定子均会产生气动噪声; 电机运行时中低转速以 36 阶电磁噪声为主, 高转速阶段以 8, 10, 12 阶气动噪声为主; 机械噪声由于其幅值较小, 对总体噪声影响不大。本研究对发电机的设计和优化具有一定的指导意义。

关键词 爪极发电机; 噪声测试; 阶次分析; 电磁噪声; 气动噪声

中图分类号 TH183.3; TM341

引 言

爪极发电机由于其具有结构简单、制造成本低廉以及可靠性高的特点在汽车发电机领域得到了广泛的应用^[1-2]。然而爪极发电机也存在效率低、输出特性差和噪声严重等缺点^[3-4]。尤其是作为汽车发电机使用时, 由于内燃机等传统主要噪声源的噪声已经得到了有效的控制, 发电机的噪声便突显出来, 已成为汽车主要噪声源之一。

为了降低电机的噪声, 首先需要识别主要的噪声来源。根据噪声产生的机理, 电机的噪声可以分为三大类^[5]: 机械噪声、气动噪声和电磁噪声。由于爪极发电机是一个复杂的装配体, 结构紧凑, 外形不规则, 仅仅依靠理论和仿真很难得到准确的噪声特性, 所以基于试验对爪极发电机的噪声进行全面分析。

关于电机的噪声试验, 目前国内外已有不少学者进行了相关的工作, 但大多针对的是电动机。Fiedler 等^[6]通过试验识别了开关磁阻电机的主要噪声源, 指出由转子开槽引起的气动噪声是开关磁阻电机的一个重要噪声来源, 并且提出了相应的降噪方法。张承宁等^[7]通过传声器阵列对电动汽车用电机驱动系统在稳态工作时的噪声源进行了识别,

指出低频噪声主要来自冷却风扇, 中频噪声主要来自变速箱, 高频时风扇和变速箱均为主要噪声源。Wang 等^[8]通过对电机振动信号的频谱分析识别了主要的噪声来源。李辉等^[9]采用选择运行法对汽车天窗及其系统进行噪声测试, 指出天窗电机噪声是天窗系统的主要噪声源, 并且对天窗电机的噪声频谱进行了分析。Andrea 等^[10]通过对车用小型无刷直流电机进行噪声测试和分析, 指出齿槽转矩是电机噪声的主要来源。发电机方面, 相关研究目前还比较少, 张亚东等^[11]通过试验对车用爪极发电机的气动噪声进行了试验, 但只分析了散热风扇的噪声, 而没有对转子转动和定子开槽产生的气动噪声进行分析。符为榕等^[12]对爪极发电机的电磁噪声进行了试验, 指出低速阶段以电磁噪声为主, 但没有对电磁噪声产生的机理进行准确分析。

由于爪极发电机的结构和工作原理与普通电动机有较大的不同, 其噪声来源丰富且不同噪声源的噪声阶次相互重叠, 另外其噪声机理也有待研究。所以为了达到降噪的目的, 首先必须对其噪声源进行准确识别和分析, 然后利用阶次分析的方法识别了机械噪声、气动噪声和电磁噪声, 并通过流场仿真和电磁场理论解释了气动噪声和电磁噪声产生的机理。本研究的分析结果为爪极发电机的降噪设计和优化提供了试验支持。

* 国家自然科学基金资助项目(51375343); 国家重大科学仪器开发专项资助项目(2012YQ150256)
收稿日期: 2016-06-16; 修回日期: 2016-08-15

1 爪极发电机噪声测试

1.1 爪极发电机结构

图 1 为目前广泛使用的电励磁爪极发电机, 主要由皮带轮、前后端盖、定子和爪极转子等部件组成, 其中定子铁芯通过前后端盖夹紧固定, 转子则通过滚珠轴承支撑在前后端盖上。为了散热需要, 前后端盖上开有通风孔, 此外转子上还有冷却风扇。该型号发电机的定子开有 36 个槽, 用于安放电枢绕组, 转子有 6 对极爪, 前风扇有 11 个叶片, 后风扇有 10 个叶片。

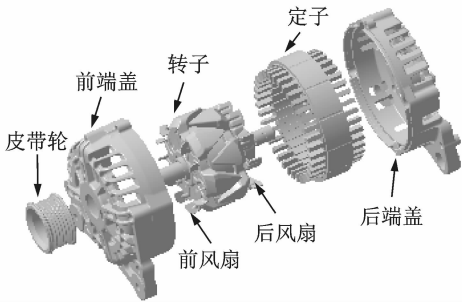


图 1 爪极发电机结构图

Fig. 1 Exploded view of a claw pole alternator

1.2 试 验

为了对爪极发电机的噪声进行全面分析, 选取了同一型号的 4 台样机进行测试: 带前后风扇的 1# 样机; 不带前后风扇的 2# 样机; 只带前风扇的 3# 样机; 只带后风扇的 4# 样机。4 台样机除了风扇的区别外其他部分完全相同, 具体转子结构如图 2 所示。整个试验过程参照国家标准^[13]进行, 具体试验装置如图 3 所示。

将发电机安装在台架上, 通过皮带与驱动电机相连, 用于模拟发电机在汽车上的运行工况。在电机机壳表面布置 1 个加速度传感器, 用于测量径向振动, 在半径为 1 m 的半球面上布置 20 个麦克风, 用于测量总声压级, 然后通过公式(1)和(2)可以得到总声功率级 L_w

$$\bar{L}_p = 10 \lg \left(\frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} 10^{0.1 L_{pi}} \right) \quad (1)$$

$$L_w = \bar{L}_p + 10 \lg \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (2)$$

其中: \bar{L}_p 为平均总声压级; L_{pi} ($i=1, 2, \dots, 20$) 为第 i 个测点的总声压级; S 为麦克风所在半径为 1 m

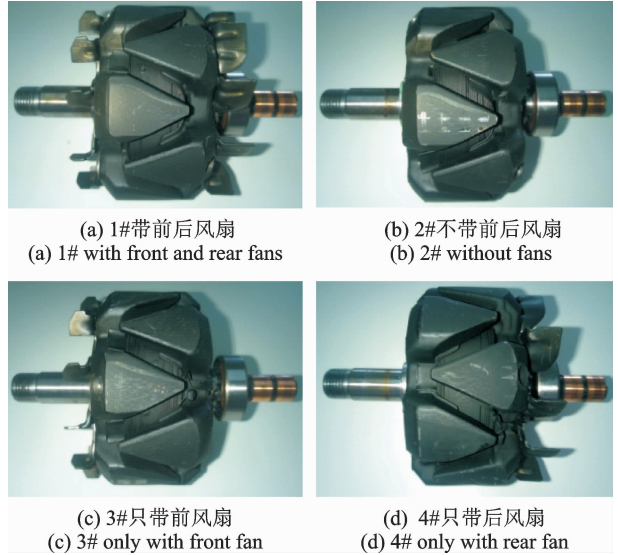


图 2 试验样机转子结构

Fig. 2 Rotor structures of prototypes

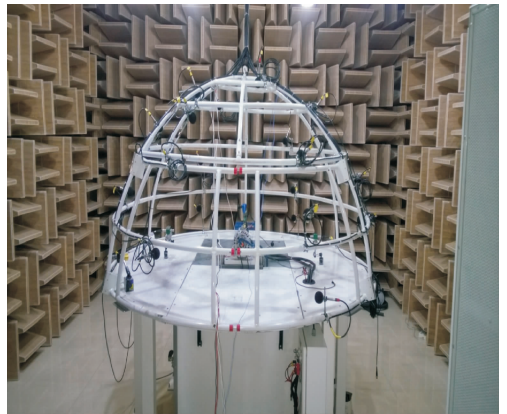


图 3 发电机噪声测试台架

Fig. 3 Alternator noise test bench

的半球面的面积; $S_0 = 1 \text{ m}^2$ 为参考面积。

2 噪声源识别与分析

2.1 机械噪声

爪极发电机正常发电运行时机械噪声、气动噪声和电磁噪声三者同时存在, 为了识别出机械噪声, 需要排除电磁噪声和气动噪声的干扰。空载运行时没有电磁力从而可以排除电磁噪声的影响, 而选用不带风扇的 2# 电机则可以排除风扇产生的气动噪声的影响, 但由转子转动和定子开槽引起的气动噪声却不能排除, 不过可以借助振动信号来加以识别。图 4 为 2# 电机在空载加速工况下测得的振动和噪声信号。

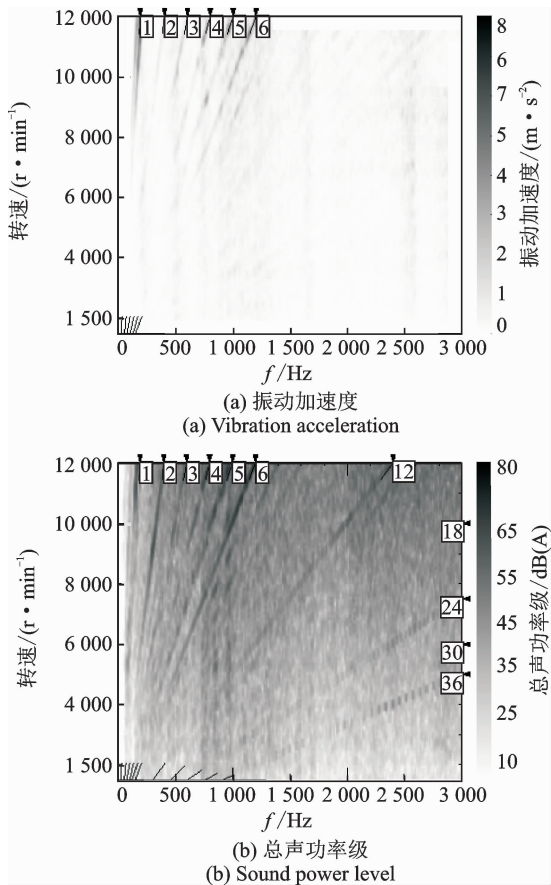


图4 2#样机空载加速时的振动噪声信号

Fig. 4 Vibration and noise of prototype 2# at no-load and acceleration

由图4可知,2#电机在空载加速时的振动主要为1~6阶的低阶振动,同时在噪声信号中也能找到相应阶次的噪声,因此1~6阶振动和噪声主要为机械振动和机械噪声,由电机转子系统不平衡、轴承、碳刷以及传动皮带的振动等因素产生。此外在噪声信号中还发现有 $6k(k=1, 2, \dots)$ 阶噪声,但这些阶次的噪声中除了6阶外并没有与之对应的振动信号,由后文分析可知这些噪声属于气动噪声,由转子旋转和定子开槽引起。

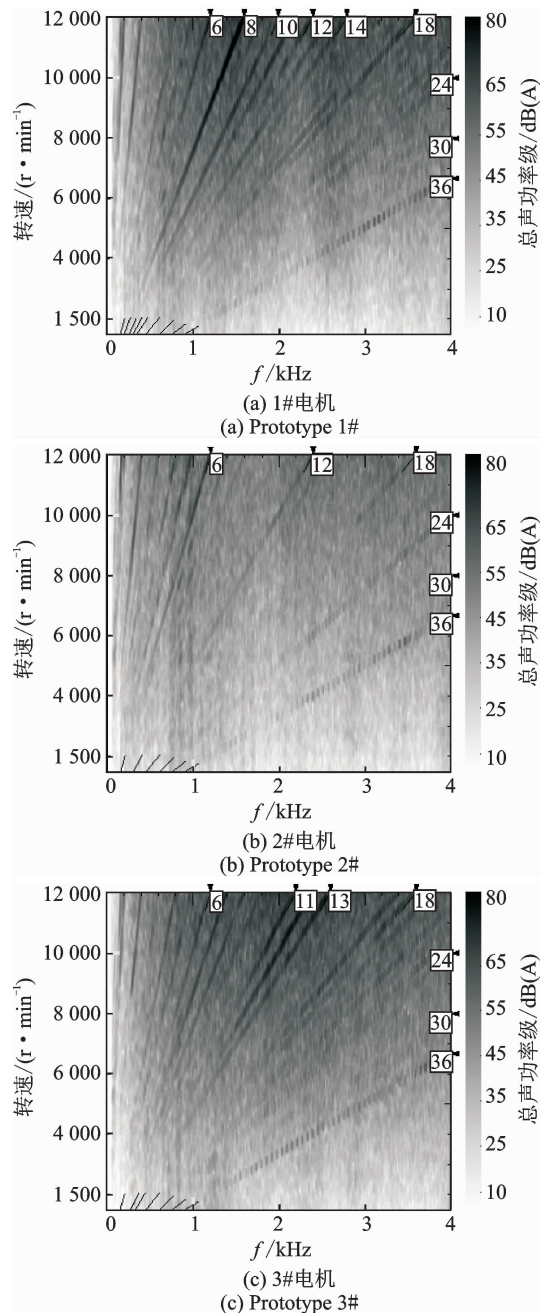
2.2 气动噪声

在识别机械噪声的基础上,接下来对气动噪声进行识别。由于爪极发电机气动噪声来源丰富,为了对不同气动噪声源进行识别,选用了图2所示的4台不同结构的电机(1#, 2#, 3#和4#)进行空载噪声测试,因为空载可以排除电磁噪声的干扰,结果如图5所示。1#电机作为完整的电机(带前后风扇),其空载噪声包含了爪极发电机的所有气动噪声,因此由图5(a)可知爪极发电机的气动噪声主要

包括6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 18, 24, 36等阶次,下面将对这些气动噪声作进一步识别。

由图5(a)和(b)的对比可以看出,1#电机和2#电机的8, 10, 11, 12, 13, 14阶噪声差异比较大,1#电机带风扇而2#电机不带风扇,因此这些阶次主要由前、后风扇产生。进一步对比图5(c)和(d)发现,带前风扇的3#电机11, 12和13阶噪声比较突出,带后风扇的4#电机8, 10, 12, 14阶噪声比较突出,因此11和13阶噪声由前风扇产生,8, 10和14阶主要由后风扇产生,而12阶噪声前、后风扇均会产生。

进一步观察图5可以发现,除了机械噪声和风扇产生的气动噪声外,4台电机均出现 $6k(k=1, 2, \dots)$ 阶气动噪声,推断由转子旋转和定子开槽引起。



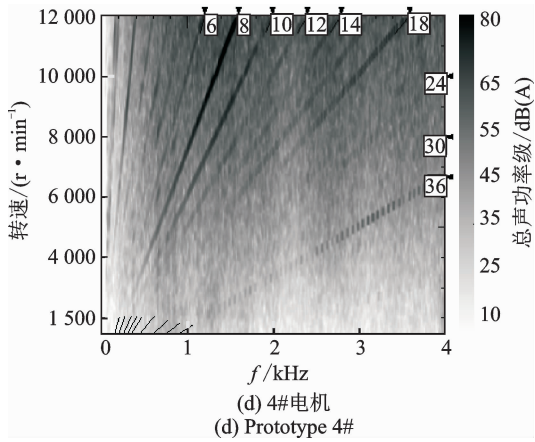


图 5 4 台样机在空载加速时的总声功率级

Fig. 5 Sound power level of four prototypes at no-load and acceleration

根据阶次噪声的矢量合成方法^[14]和流场仿真, 以上各阶次气动噪声均可从电机结构上找到相应的来源依据。如图 6 所示,电机前风扇有 11 个完全不等距分布的叶片,所以将产生 11, 12, 13 等连续阶次的噪声;后风扇有 10 个叶片,且以 5 个叶片为一组呈中心对称分布,所以将产生 8, 10, 12 等偶数阶噪声。同时转子上有 6 对极爪,旋转时将产生 $6k$ ($k=1, 2, \dots$)阶气动噪声,此外定子上开有 36 个槽口,通过仿真可以发现在电机运行时每个槽口附近有明显的回流区域(如图 7 所示),将产生 36 阶噪声。

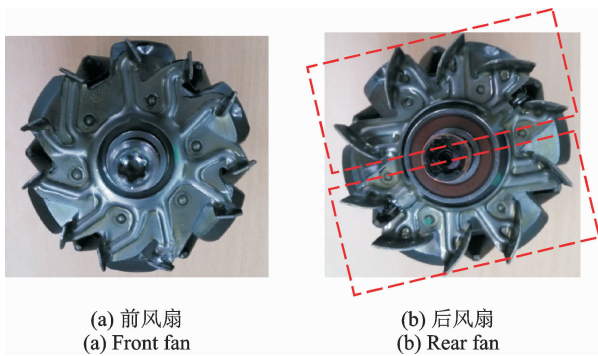


图 6 电机前后风扇结构

Fig. 6 Structures of front and rear fans

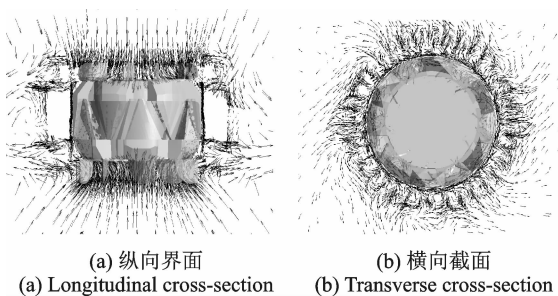


图 7 电机内部气流量

Fig. 7 Flow field in the alternator

2.3 电磁噪声

在识别机械噪声和气动噪声的基础上,接下来对电磁噪声进行识别。电磁噪声由电磁力产生,只有在负载工况才出现,为了尽量排除其他噪声源的干扰,选用不带风扇的 2# 电机进行测试,其振动和噪声结果如图 8 和图 9 所示。

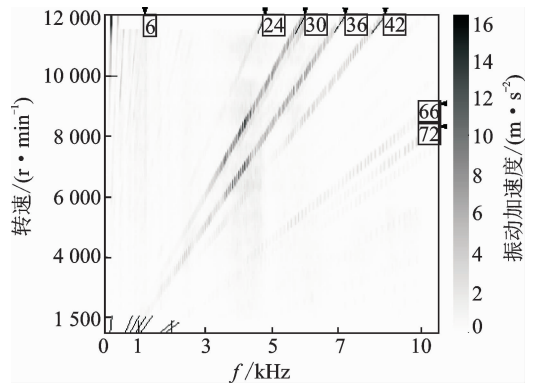


图 8 2# 样机负载加速时的振动信号

Fig. 8 Vibration of prototype 2# at load and acceleration

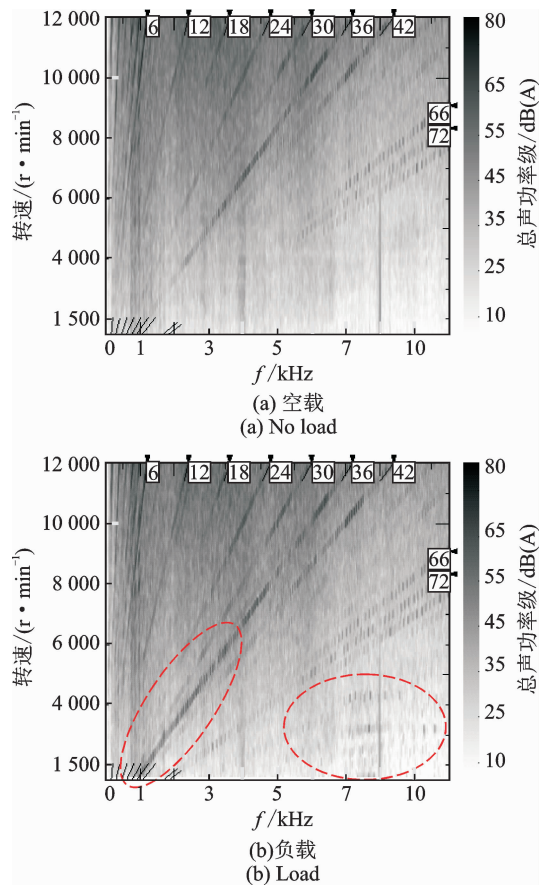


图 9 2# 样机空载和负载时的总声功率级

Fig. 9 Sound power level of prototype 2# at no-load and load

由图8可以看出,负载时电机表面的振动主要以 $6k(k=1,2,\dots)$ 阶为主,由电磁力产生。由图9可知,负载相比空载其噪声并没有增加额外的阶次成分,只是中低转速(6 000 r/min)以下的噪声变得更加突出,尤其是36阶噪声,说明该转速范围内的噪声受负载影响较大,主要为电磁噪声;而中高速阶段空载和负载噪声基本相同,说明此时气动噪声占主导,这也证明即使没有风扇,旋转的转子和开槽的定子同样会产生明显的阶次噪声,对气动噪声有显著的影响。

由于电磁噪声是在电磁力激励下的电机结构振动产生,因此可以通过电磁力的阶次来进一步判断电磁噪声的阶次。由麦克斯韦应力张量法可得作用在电机上引起电磁噪声的径向电磁力为

$$F = \frac{B_r^2}{2\mu_0} \quad (3)$$

其中: B_r 为径向气隙磁密; μ_0 为真空磁导率。

当忽略饱和时,爪极发电机气隙磁场可以通过磁动势和磁导相乘求得,即

$$F = \frac{1}{2\mu_0} \left\{ \left[\begin{aligned} &\sum_{\nu=1,5,7,\dots,6i\pm 1}^{\infty} A_{\nu} \sin(p\omega_m t - \nu p\theta) + \\ &\sum_{\mu=1}^{\infty} A_{\mu} \cos(\mu p\omega_m t - \mu p\theta) \\ &\sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(kp\omega_m t - kp\theta) \end{aligned} \right]^2 \times \left[\begin{aligned} &\frac{1}{2} \sum_k \sum_{\nu} A_k A_{\nu} \sin[(k \pm 1)p\omega_m t - (k \pm \nu)p\theta] + \\ &\frac{1}{2} \sum_k \sum_{\mu} A_k A_{\mu} \cos[(k \pm \mu)p\omega_m t - (k \pm \mu)p\theta] \end{aligned} \right]^2 = \right. \\ \left. \frac{1}{16\mu_0} \left\{ \begin{aligned} &\sum_{k_1} \sum_{k_2} \sum_{\nu_1} \sum_{\nu_2} A_{k_1 \nu_1} A_{k_2 \nu_2} \left\{ \begin{aligned} &\cos[(k_1 - k_2)p\omega_m t - (k_1 \pm \nu_1 - k_2 \mp \nu_2)p\theta] - \\ &\cos[(k_1 + k_2 \pm 2)p\omega_m t - (k_1 \pm \nu_1 + k_2 \pm \nu_2)p\theta] \end{aligned} \right\} + \\ &\sum_{k_1} \sum_{k_2} \sum_{\mu_1} \sum_{\mu_2} A_{k_1 \mu_1} A_{k_2 \mu_2} \left\{ \begin{aligned} &\cos[(k_1 \pm \mu_1 - k_2 \mp \mu_2)p\omega_m t - (k_1 \pm \mu_1 - k_2 \mp \mu_2)p\theta] + \\ &\cos[(k_1 \pm \mu_1 + k_2 \pm \mu_2)p\omega_m t - (k_1 \pm \mu_1 + k_2 \pm \mu_2)p\theta] \end{aligned} \right\} + \\ &2 \sum_{k_1} \sum_{k_2} \sum_{\nu} \sum_{\mu} A_{k_1 \nu} A_{k_2 \mu} \left\{ \begin{aligned} &\sin[(k_1 \pm 1 + k_2 \pm \mu)p\omega_m t - (k_1 \pm \nu + k_2 \pm \mu)p\theta] + \\ &\sin[(k_1 \pm 1 - k_2 \mp \mu)p\omega_m t - (k_1 \pm \nu - k_2 \mp \mu)p\theta] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \right. \quad (8)$$

由式(8)可知,爪极发电机的电磁力是时间和空间角度的函数,电磁力的频率只与时间项有关,即只与三角函数中 t 前面的系数有关,故由式(8)推得爪极发电机的径向电磁力频率为

$$f = (k_1 \pm k_2 \pm \mu) p f_r \quad (9)$$

其中: k_1 和 k_2 为磁导谐波次数,取正整数; μ 为转子磁动势谐波次数,也取正整数; f_r 为电机旋转频率。

由式(9)可进一步推得爪极发电机的电磁力频率为 $k p f_r(k=1,2,\dots)$,又因为极对数 p 为6,所以电磁力频率为电机转频的 $6k$ 倍,进而产生 $6k(k=1,2,\dots)$ 阶电磁振动和噪声。

通过以上分析,识别了爪极发电机主要噪声的

$$B_r = (F_{\text{stator}} + F_{\text{rotor}}) \Delta \quad (4)$$

其中: F_{stator} 和 F_{rotor} 分别为定子和转子磁动势; Δ 为气隙磁导。

由于爪极发电机转子结构的特殊性,其磁导函数随电机空间位置和时间发生变化,不过磁导函数的空间项不会影响电磁力的频率特征,所以只要考虑带有时间项的那部分磁导。磁动势和气隙磁导可以用傅里叶级数表示为

$$F_{\text{stator}} = \sum_{\nu=1,5,7,\dots,6i\pm 1}^{\infty} A_{\nu} \sin(p\omega_m t - \nu p\theta) \quad (5)$$

$$F_{\text{rotor}} = \sum_{\mu=1}^{\infty} A_{\mu} \cos[\mu p(\omega_m t - \theta)] \quad (6)$$

$$\Delta = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos[kp(\omega_m t - \theta)] \quad (7)$$

其中: A_{ν} , A_{μ} 和 A_k 分别为定、转子磁动势和气隙磁导的幅值; p 为电机极对数; ω_m 为机械角速度; t 为时间; θ 为空间机械角度。

将式(4)~(7)代入式(3),由三角函数积化和差可得

阶次特性及其具体来源,现将其归纳汇总,如表1所示。

表1 爪极发电机主要噪声源汇总
Tab.1 Main noise sources of claw pole alternators

序号	性质	来源	噪声主要阶次
1	机械噪声	转子不平衡、 轴承、碳刷、 皮带振动	1~6
2	气动噪声	定子开槽 转子极爪 前风扇 后风扇	36 $6k(k=1,2,\dots)$ 11,12,13,...(整数阶) 8,10,12,...(偶数阶)
3	电磁噪声	电磁力	$6k(k=1,2,\dots)$

3 噪声贡献量分析

通过上述对试验数据的分析识别了爪极发电机的三大噪声源,为了实现降噪目的,还需要进一步分析各噪声源的贡献量,以确定不同工况下噪声的主要来源,从而为优化设计提供明确的方向。

由于1#电机带前后风扇,其负载工况下的噪声包含了爪极发电机的所有噪声。图10为1#电机在负载加速工况下总声功率级的主要阶次,从中可以看出:负载时,1阶和6阶(此时的6阶噪声包含机械噪声、气动噪声和电磁噪声)噪声均比较小,所以机械噪声对总体噪声的影响很小;中低转速阶段以36阶噪声为主,由前面的分析可知该36阶噪声为电磁噪声;高转速阶段以8,10,11,12,13阶气动噪声为主,主要由风扇产生,其中又以以后风扇产生的8,10和12阶最为突出。

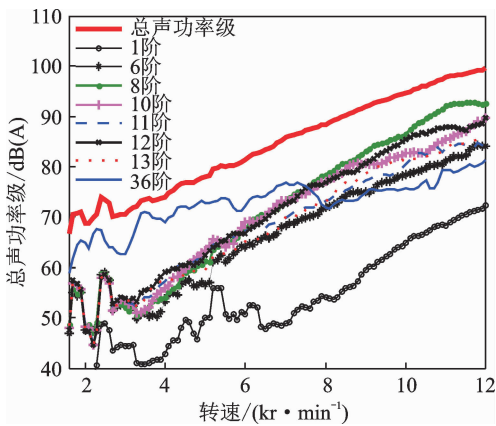


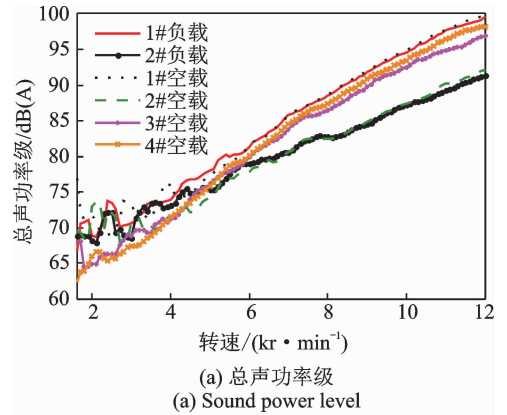
图10 1#样机负载总声功率级主要阶次

Fig. 10 Main orders of sound power level of prototype 1# at load

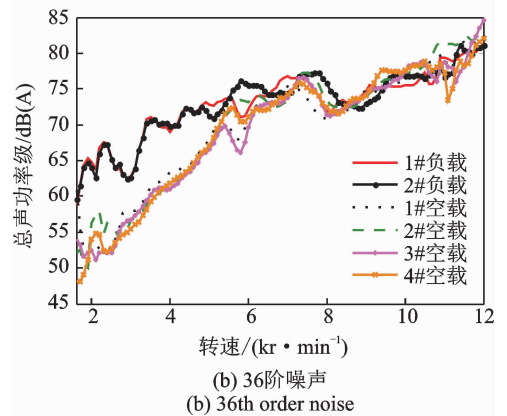
图11为4台样机在空载和负载时的总声功率级以及36阶噪声的对比。由图11(a)可以看出,电磁噪声只在中低转速(6 000 r/min)以下对总体噪声产生影响,中高转速阶段1#电机和2#电机各自的空载和负载曲线基本重合,说明此时气动噪声占主导,而且在高速阶段1#电机总声功率级比2#电机高大约10 dB(A),说明风扇是气动噪声的最主要来源,基本起决定性作用;此外还发现,只带后风扇的4#电机比只带前风扇的3#电机的噪声大,这是因为后风扇扇叶的扫风面积比前风扇的大。

由图11(b)可以看出:空载时,4台样机的36阶噪声基本相同,说明风扇对36阶噪声的影响很小,空载时的36阶噪声主要由转子旋转以及定子开槽

引起;负载时,中低转速(6 000 r/min)以下的36阶噪声比空载时大很多,主要由电磁力产生,而中高转速阶段,空载和负载36阶噪声基本相同,说明此时36阶电磁噪声相比36阶气动噪声小很多,气动噪声占主导,由转子旋转以及定子开槽引起。



(a) 总声功率级



(b) 36阶噪声

图11 4台样机的总声功率级和36阶噪声

Fig. 11 Sum level and order 36 of sound power level of four prototypes

4 结论

1) 爪极发电机转子系统不平衡、轴承、碳刷以及传动皮带的振动等因素会产生1~6阶的机械噪声,不过幅值较小,对电机整体噪声影响不大。

2) 前、后风扇,转子极爪以及开槽定子均会产生气动噪声,其中前风扇产生11,12,13等整数阶噪声,后风扇产生8,10,12等偶数阶噪声,转子产生 $6k(k=1,2,\dots)$ 阶噪声,定子产生36阶噪声。

3) 负载时爪极发电机的电磁力为 $6k(k=1,2,\dots)$ 阶,从而会产生 $6k$ 阶电磁噪声。

4) 爪极发电机正常运行时,中低转速(6 000 r/min)以下以36阶电磁噪声为主;高转速阶段以8,10,12阶气动噪声为主,且主要由后风扇产生。

参 考 文 献

- [1] Cros J, Viarouge P. New structures of polyphase claw-pole machines [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, 40(1): 113-120.
- [2] Rebhi R, Ibala A, Masmoudi A. An attempt to improve the generating capabilities of a hybrid claw pole machine [C]//*Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems*. Beijing: IEEE, 2011: 1-5.
- [3] Zhang Fengge, Zhang Shifu, Bai Haijun, et al. Magnetic field analysis and performance calculation for new type of claw pole motor with permanent magnet outer rotor [C]//*Proceedings of International Power Electronics and Motion Control Conference*. Shanghai: IEEE, 2006: 1-5.
- [4] Li L, Kedous A, Foggia A, et al. Influence of magnetic materials on claw pole machines behavior [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46 (2): 574-577.
- [5] Gieras J F, Lai J C, Wang C. Noise of polyphase electric motors [M]. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2006: 5-7.
- [6] Fiedler J O, Kasper K A, De Doncker R W. Acoustic noise in switched reluctance drives: an aerodynamic problem [C]//*Proceedings of Electric Machines and Drives 2005*. San Antonio: IEEE, 2005: 1275 - 1280.
- [7] 张承宁,王再宙,宋强. 基于传声器阵列电动汽车用电机系统噪声源识别研究[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(30): 109-112.
Zhang Chengning, Wang Zaiyu, Song Qiang. Research of noise source identification of traction motor system for electric vehicle based on microphone array [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(30): 109-112. (in Chinese)
- [8] Wang Qingnian, Yan Kun, Li Hongyan, et al. Motor noise source identification based on frequency domain analysis [C]//*Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation*. Changchun: IEEE, 2009: 2373-2377.
- [9] 李辉,许良,杨超,等. 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, 30(18): 87-92.
Li Hui, Xu Gen, Yang Chao, et al. Noise testing and characteristic frequency extraction method of sunroof motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 30(18): 87-92. (in Chinese)
- [10] Andrea C, Seyedamin S, Silvio V. Experimental identification and reduction of acoustic noise in small brushed DC motors [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 50(1): 317-326.
- [11] 张亚东,董大伟,华春蓉,等. 车用交流发电机气动噪声试验研究[J]. *噪声与振动控制*, 2014, 34(3): 107-110.
Zhang Yadong, Dong Dawei, Hua Chunrong, et al. Experiment study on aerodynamic noise of an automotive alternator [J]. *Noise and Vibration Control*, 2014, 34(3): 107-110. (in Chinese)
- [12] 符为榕,陆益民,周宗琳,等. 车用交流发电机电磁噪声特性的实验研究[J]. *噪声与振动控制*, 2014, 34(6): 85-89.
Fu Weirong, Lu Yimin, Zhou Zonglin, et al. Experimental research on electromagnetic noise characteristics of automotive alternators [J]. *Noise and Vibration Control*, 2014, 34(6): 85-89. (in Chinese)
- [13] 陈业绍,施庆圆,钟志刚,等. GB/T 10069.1-2006 旋转电机噪声测定方法和限值 第1部分:旋转电机噪声测定方法[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [14] 王媛文,董大伟,闫兵. 汽车发电机冷却风扇旋转噪声预测方法[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(7): 1711-1720.
Wang Yuanwen, Dong Dawei, Yan Bing. Prediction method of vehicle alternator cooling fan rotation noise [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(7): 1711-1720. (in Chinese)



第一作者简介: 吴双龙,男,1990年8月生,博士生。主要研究方向为车用电机的振动与噪声控制。曾发表《Vibro-acoustic prediction and mechanism analysis of claw pole alternators》(《IEEE Transactions on Industrial Electronics》2017, Vol. 64, No. 6)等论文。
E-mail: zymwgl@foxmail.com

