



本文阐述了发电机噪声机理及发电机结构与噪声的影响关系，通过对不同加载工况的发电机噪声进行测试，验证了不同负载工况发电机电磁噪声的变化及影响因子；通过对扇叶、定子等结构件进行拆解和改制，验证了结构件对气动噪声的影响和改进方向，为发电机噪声的正向开发打下了坚实的基础。

□ 安徽江淮汽车集团股份有限公司 王国刚 刘龙军

车载发电机 NVH 性能研究

发电机噪声机理

基于发动机声品质能力提升、混合动力总成 NVH 开发需求，建立发电机、电机等与电磁学强相关的关键零部件 NVH 开发能力，已成为当前动力总成 NVH 开发迫在眉睫的事情。

以发电机为例，目前主流车载发电机为双内风扇三相同步交流发电机，主要由壳体、定子（硅钢、绕组）、转子（扇叶、爪极、磁场绕组转子轴、导电环）、整流器、电压调节器和电刷等组成。转子绕组通入直流电产生磁场，定子绕组切割转子磁场感应三相交流电动势，整流电路将三相交流电动势转变成直流脉动电压输入蓄电池。发电机在刚开始发电时，转子绕组由蓄电池供电产生磁场，属于他励；待发电机旋转起来，输出电压高于蓄电池电压时，发电机向磁场绕组供电，励磁方式由他励变为自励，原理如图 1 所示。

根据发电机机械能转换为电能的工作原理和

散热需求，发电机的噪声按照其来源可分为三类：电磁噪声、空气动力噪声和机械噪声。其中电磁噪声和空气动力噪声是发电机的主要声源。电磁噪声与电磁力、发电机结构模态相关；空气动力噪声与发电机转速、空气流场相关，转速越高，气动噪声越大；机械噪声主要与发电机旋转件生产和装配工艺相关，一般在发电机轴承、电刷、转子等损坏时产生较大的机械振动和噪声。

因此，在车载发电机正常发电工况，中低转速段（4000 r/min 以下）发电机噪声以电磁噪声为主，在高转速段（4000 ~ 12000 r/min）以气动噪声为主，如图 2 所示。

发电机电动噪声、电磁噪声与结构的相关关系见表 1。

本文通过发电机单体噪声试验方法，对某款发电机噪声进行研究，对引起发电机电磁噪声、气动噪声的结构件进行整改分析，验证发电机结构对噪声的影响。该发电机额定电压 14 V、额定

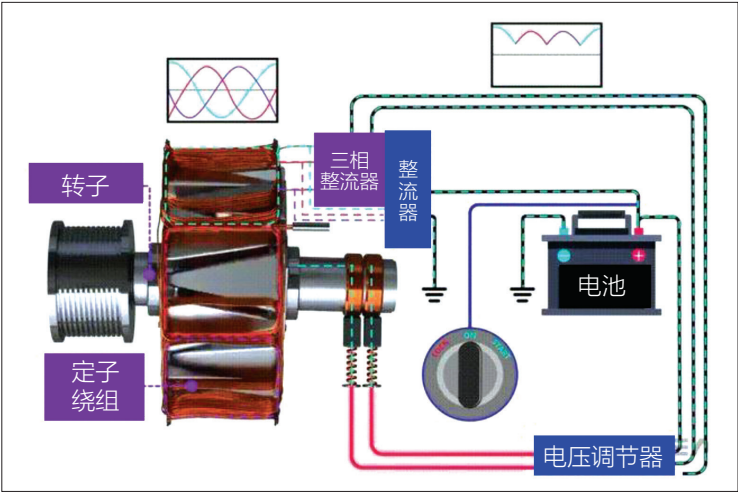


图 1 车载发电机发电原理图

表 1 发电机噪声机理表

发电机噪声机理			
发电机噪声分类	气动噪声	流场声场	风扇 栅格 爪极
			叶片数、叶片角度、叶片布置 栅格倾角 端部倒角
		电磁力	气隙间距 爪极侧向倒角 齿槽配合个数
	电磁噪声	发电机模态	整机模态 爪极模态 定子模态
		结构阻尼	定子与壳体连接

电流 110 A、爪极 6 对、前风扇 8 片、后风扇 10 片、爪极 36 槽。

电磁噪声研究

发电机在工作状态下，定子转子之间气隙磁场产生的径向电磁力作用于发电机结构引起结构振动而辐射的噪声称为电磁噪声，当电磁力的频率成分与发电机固有频率接近时，导致结构共振，电磁辐射噪声加剧。在发电机单体噪声台架上，通过对发电机转子线圈的电流控制、输出负载的负荷控制，使发电机分别处于空载状态（不接任何电路）、励磁状态（转子绕组通电）、半载状态（输出电路连接负载，输出一定功率）、全载状态（输出电路连接负载，输出全部功率），测试不同状态下发电机噪声，验证不同负载、不同电磁场状态下，发电机噪声性能的变化。经测试，噪声曲线和频谱分别如图 3、图 4 所示。

由试验结果可知，发电机电磁噪声与转子励磁状态及负载状态强相关。完全空载状态，即发电机转子线圈不通电，转子不励磁，不产生磁场时，发电机不会产生电磁噪声，此时发电机噪声以气动噪声为主；当转子绕组励磁但不对外发电时，由于转子形成磁场，定子与转子之间产生电磁力，发电机产生轻微电磁噪声；当发电机对外发电时，定子产生反向电动势，感应出定子磁场，会对转子磁场产生破坏，此时定子与转子之间电磁力波形更加趋于非正弦波，电磁力谐波增大，电磁噪声增强，对外输出功率越大，

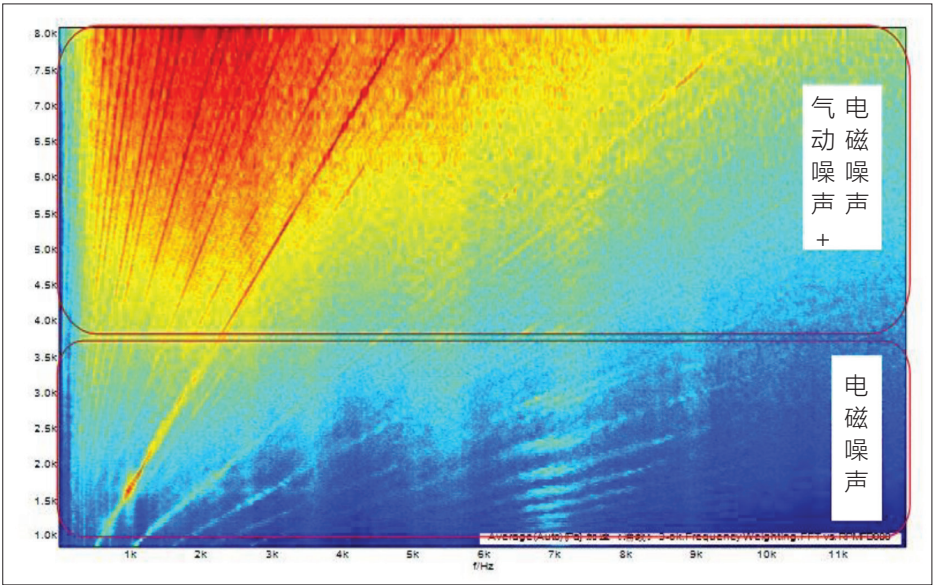


图 2 车载发电机噪声特性

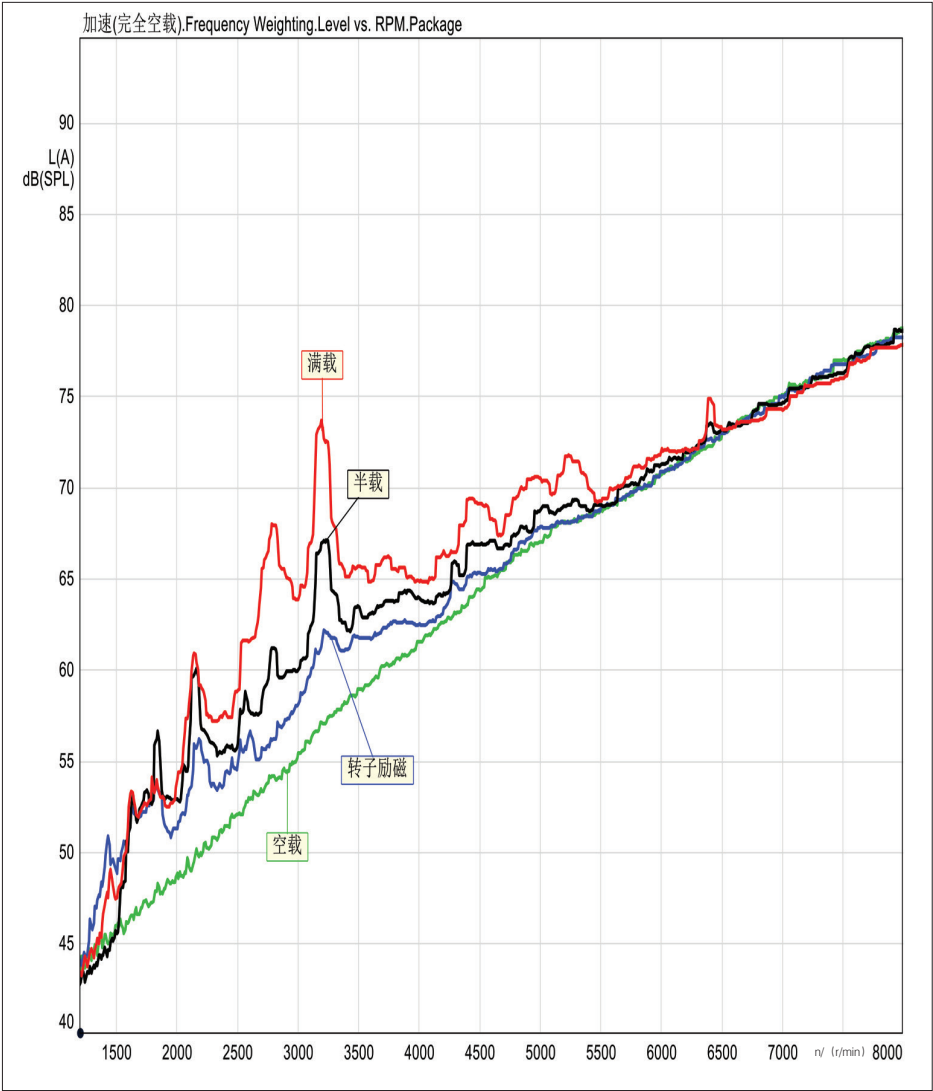


图 3 不同工况下发电机噪声曲线对比

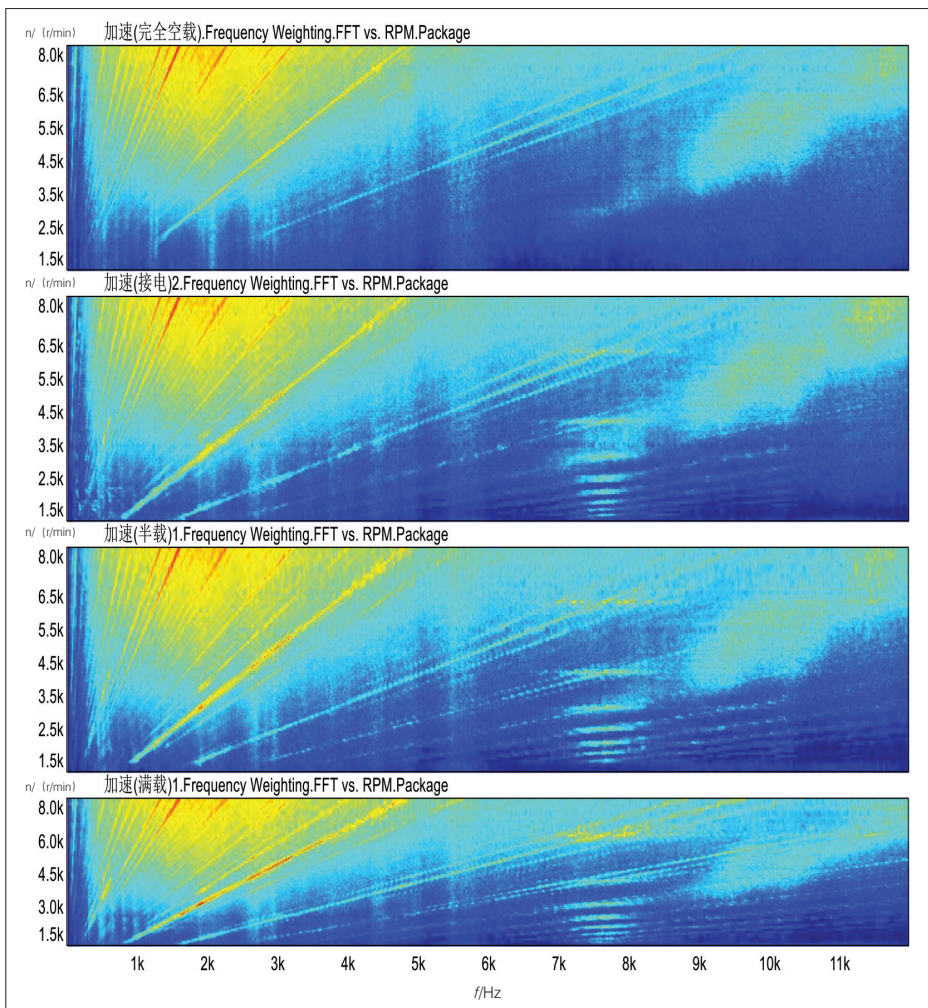


图4 不同电磁场状态下发电机噪声频谱对比

电磁噪声越大,且电磁力易激励起发电机结构件固有频率,产生结构共振,放大噪声。与完全空载状态相比,不同工况下电磁噪声声压级增大约0~16 dB(A),频谱表现为电磁噪声36阶次及其谐波噪声、爪极共振噪声(7000~8000 Hz)逐渐加强。

与气动噪声相比,发电机电磁噪声故障发生转速段更低,频率更高(1000~10000 Hz)时,人耳极易识别到,因此需对电磁噪声进行有效控制,并对其制定限制标准。对21款发电机进行发电工况噪声测试,全负荷发电工况下,电磁噪声

声压级增加值在1.5~16 dB(A)之间,结合实车主观评价,判定车载发电机发电工况,电磁噪声增加值在5~6 dB(A)区间为电磁噪声可接受分界点,即当电磁噪声增加值小于5 dB(A)时,整车可接受此时电磁噪声表现,电磁噪声不会对人产生厌烦干扰;当电磁噪声增加值大于6 dB(A)时,易被人耳识别到,引起客户抱怨。因此在发电机正向开发阶段,需采取相应措施,对电磁噪声进行主动控制。

通过减小电磁力和改变结构固有频率,可显著优化电磁噪声。电磁力优化措施:

1) 适当加大气隙,降低气

隙磁密。

2) 优化爪极侧向倒角,平衡磁通分布,气隙磁密波形更加正弦,降低谐波磁密幅值。

3) 改变极槽配合,减少电磁力谐波。

结构优化:一般发电机模态频率为800~3000 Hz、定子爪极模态频率为7000 Hz以上,通过壳体直连、定子与壳体间阻尼优化、爪极加强等方法加强发电机结构强度均可有效降低共振噪声。

气动噪声研究

车载交流发电机气动噪声产生的根源是叶片表面气流周期性脉动以及涡流的脱落、产生和破裂。气动噪声的大小与交流发电机冷却风扇结构、交流发电机转速以及内部流场密切相关。

气流流场特性:前风扇扇叶从轴向栅格孔吸入空气从侧面径向栅格排出空气,还有一部分气流作用于高速旋转的爪极、线圈和定子绕组等组件,对其冷却散热。后风扇扇叶从轴向罩盖孔吸入空气,从侧面径向栅格排出空气,对整流器、定子绕组等冷却散热。

气流声场特性:高转速下前扇叶和后扇叶表面声功率最高,为交流发电机的主要噪声源,因此降低发电机气动噪声可重点考虑前后风扇扇叶结构、爪极结构和气流流经通道结构参数。

叶片优化:

1) 根据流量需求选择合理的扇叶数。

2) 采用叶片不等距分布,

合理选择叶片夹角等，通过改变叶片相互之间周期性作用，显著改善噪声频谱，降低谐波分量。

爪极端部倒角优化：爪极端部开倒角，拓宽爪极间隙，有效降低风扇处流速、降低压力脉动。

径向栅格倾角优化：相对后端盖轴向栅格，前端栅格对气流流速影响较大，改善前端盖径向栅格倾斜角度可有效降低气流流速、减小漩涡的形成，改善交流发电机气动噪声。

以某发电机为例，对其整流器、扇叶及定子等进行拆解、改制验证分析，研究结构对气动噪声的影响。部分改制图片如图 5、图 6 所示。

通过结构改制对比试验，得到以下结论：

1) 拆除后端盖（包括整流器、电刷）等，后风扇进风量加大，发电机噪声增大 0 ~ 1.5 dB(A)。

2) 后扇叶 10 片、前扇叶 8 片，后扇叶面积较前扇叶大 50%，拆除全部后扇叶，发电机噪声降低 3 dB(A)，后扇叶是发电机电动噪声的主要声源。

3) 参考竞品发电机，改制发电机前叶片，叶片倾角由 90° 变更为 45°，整机噪声降低 2 dB(A)，扇叶个数、面积及以叶型是影响气流噪声的重要因素。

4) 拆除全部叶片，发电机噪声降低 10 dB(A) 以上，扇叶是影响气流噪声的主要因素，爪极对气动噪声贡献较小。

5) 拆除定子，气动噪声 36 阶次消失；改制定子线槽，由

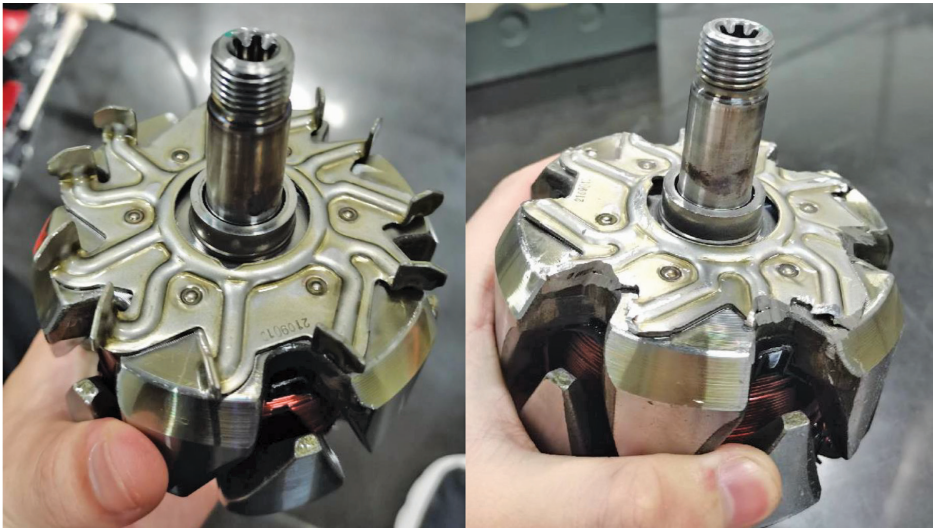


图 5 发电机风扇改制

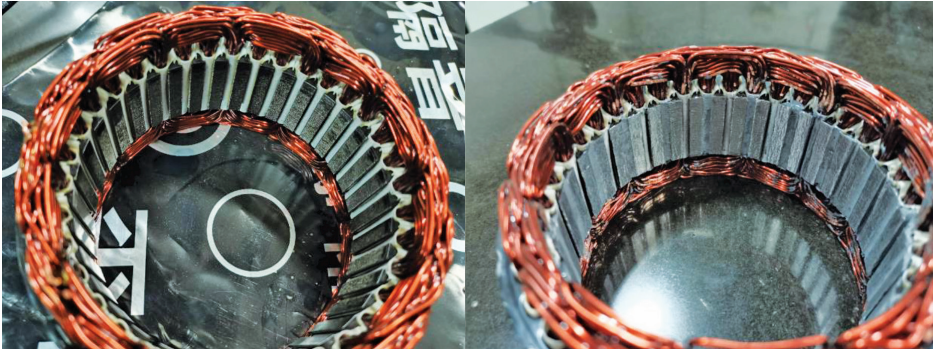


图 6 定子线槽填充

36 槽变更为 18 槽，气动噪声 36 阶次噪声消失，出现 18 阶次，可知气流周期性冲击定子线槽也会产生气动噪声。

总结

发电机噪声主要由电磁噪声和气动噪声组成，电磁噪声在低转速段较为明显，主要表现为电磁力谐波突出、电磁力谐波与发电机结构的共振（爪极、定子等）。经数据库统计，发电机加载后噪声较空载的增加值在 5 ~ 6 dB(A) 为电磁噪声可接受分界点，小于 5 dB(A) 电磁噪声可接受，大于 6 dB(A) 电磁噪声易引起抱怨。

发电机电磁噪声与转子励磁状态及负载状态相关。发电

机转子绕组不励磁，发电机不会产生电磁噪声；转子绕组励磁但不施加负载，发电机产生轻微电磁噪声；发电机施加负载，电磁噪声增强，负载越高，电磁噪声越大。

气动噪声主要表现为风扇扇叶阶次噪声、涡流噪声与定子线槽阶次及其谐波噪声，转速越高，气动噪声越大。

通过拆解、改制发电机叶片、线槽、后端盖等，论证了扇叶是引起气动噪声的主要因素，扇叶的大小、个数和叶型对气动噪声影响较大；同时发现爪极本体产生气动噪声较小，气流冲击定子线槽也会产生气动噪声等，加深了对发电机噪声机理的理解。 AI