

PEPS 系统中线性与非线性低频驱动器比较

Andrew Luo

引言：在汽车无钥匙系统（PEPS）的设计中，考虑到操作的安全性，在明确智能钥匙是位于车外或车内之后，才能开门或启动引擎，而钥匙位置信息是通过低频（125KHz）磁场强度来判断，通过多根天线的磁场来实现钥匙定位，为了扩大低频磁场的覆盖范围，设计者一般会选用专门的低频放大器来实现数据调制和磁场放大。市面上可选的低频驱动有线性和非线性两种，驱动能力和功能方面基本都能满足 PEPS 系统要求，那具体性能上是否有差异呢？本文从效率和杂散辐射两方面详细的阐述了两者的区别，并提出设计中相应的注意事项。

关键字： PEPS 线性放大器 非线性放大器 辐射杂散 效率

PEPS 系统功能概述

PEPS 系统的全名为 Passive Entry and Passive Start，自问世以来，已经接近 20 年头了。该系统为驾驶员提供了极大的便利，只需随身携带智能钥匙，不需要刻意的掏出钥匙就可以实现开门、锁门和启动车辆。它一般是通过如下系统（图 1）和通信流程来实现，当车主触摸门把手时，低频驱动器通过天线发送 125KHz 唤醒数据和载波信号，如果此时车主随身携带了合法钥匙，该钥匙就会被唤醒，检测各个低频天线磁场大小并通过 UHF（434MHz）反馈给车身模块，随后车身模块通过钥匙提供磁场信息来判断与车身天线的相对距离，如果钥匙此时处于车外，车身模块会继续发送加密信息来认证钥匙的合法性，只有钥匙的位置和合法性都确认之后，车门才能解锁，这样才能保证操作的安全性。

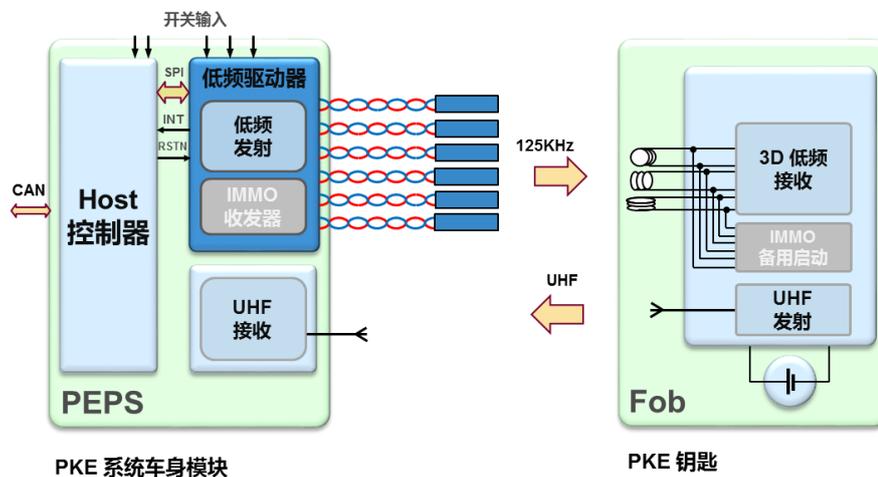


图 1 PEPS 系统组成框图

PEPS 系统对低频驱动器的技术要求

一般情况下，通过车内的 4 根低频天线和两根门把手天线即可实现整车区域的钥匙定位，所以低频驱动器一般都需要支持 6 根天线；为了适应不同车型和低频天线，要求驱动器的输出电流可以灵活配置，最大驱动电流 1000mA，而且电流精度上要求控制在 5%以内，保证钥匙定位的精度，防止误触发；随着系统集成度要求的提高，低频驱动器还需支持 immo

启动功能，实现当钥匙亏电情况下的近距离认证和启动车辆；甚至为了满足迎宾灯的需求，低频驱动还被期待拥有自动定时发射（polling）功能，使主 MCU 能够保持长时间睡眠，降低系统功耗。另外还需满足汽车应用的一些基本要求，比如工作温度范围，丰富的诊断接口，抗干扰及对外的杂散等等。

性能需求	目的
驱动电流达1Ap	低频覆盖范围
驱动通道数，支持4路以上天线	满足整车覆盖
驱动电流误差小于10%	钥匙定位精度
支持immo通信	高集成度，共享天线，降低成本
自动定时唤醒（polling）	降低系统静态功耗
按键唤醒低频发送	缩短系统响应时间及节省MCU IO 数目
各天线间隔离度好	减小钥匙位置的判断误区
天线异常诊断	车载系统诊断基本需求

表格 1 PEPS 系统中低频驱动器的技术要求

线性与开关式驱动器的工作原理

随着 PEPS 系统的普及，用户已经不仅仅满足于原有的开关车门和启动的功能，各车厂为了实现自身品牌的差异性，智能钥匙系统被赋予更多的功能，比如自动落锁，即当 PEPS 控制器检测到车主带着钥匙离开车门超过一定距离后，实现自动关窗锁门；或者迎宾灯功能，即当车主走向车子，在距离 3~5 米时，车身主动亮灯表示欢迎等。

所有这些扩展的功能都需要远距离的低频通信来支持，除了要求钥匙端的有更高的低频接收灵敏度外，还要求驱动器端能够驱动更大的电流，但这增加整车待机功耗高和杂散辐射的风险，所以驱动效率和 EMC 也很重要，这也是设计者首要考虑的两个指标，下面就分别谈谈两种驱动器效率与杂散特性。

就驱动效率而言，以 class AB 为例，为了解决 class B 的交越失真，在驱动管的基极增加了一个很小的预偏置电压，导通角大于 180 度，由于放大管工作在线性区域，可以对正弦波线性放大，失真小，但管子的耗散功率比较大，一般效率只能到 50%~70%左右。

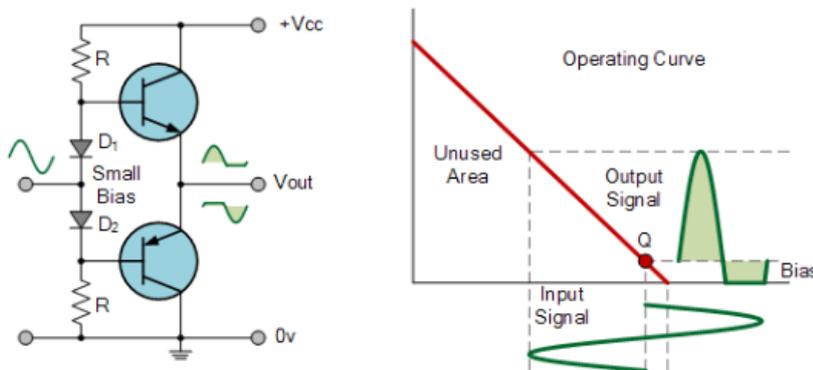


图 2 Class AB 功放原理及工作区示意

以 Class D 为代表的开关式放大器，最普遍的应用是在音频功放领域，音频信号通过 PWM 调制到高频脉冲，再进行开关式功率放大，最后通过低通滤波把原有的音频还原出来，由于

放大部分使用开关式放大，即驱动管在导通期间完全打开，导通电阻一般是毫欧级别，管子耗散功率非常小，因此效率较高，一般可以做到 80% 以上，但输出为脉宽信号，需要通过低通滤波来恢复原有信号。PEPS 的应用是个特例，载波是固定的，调制源本来就是数字的，不需要像音频那样把模拟音频信号调制到高频载波上，可以将调制好的 125K 信号直接放大，而且负载本身就是谐振在 125KHz 的线圈，因此音频系统中的低通滤波器也不再需要。根据 LC 串联谐振基本原理，回路的电流和 Tap 点都为正弦信号，下图中的蓝色部分为谐振电压，绿色为驱动器输出的方波信号。

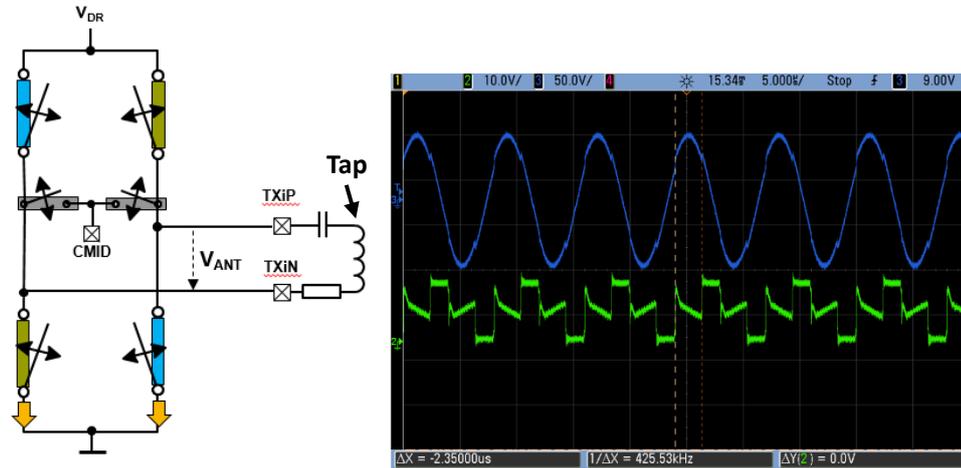


图 3 开关式驱动器示意图及输出波形

线性与非线性驱动器效率比较

经过上面的原理分析，了解到 class D 的效率相对会高些，为了明确实际应用中的具体差异，可以比较两种驱动器在同一个负载同一输出电流情况下的电源输出功率，这里选用 10R 的阻尼电阻加上 345uH 串联谐振天线（ESR=1.2ohm），等效的品质因数 23 左右，输出电流以 100mA 为步进，观察对直流电源的功率消耗情况，具体参考如下图表。



图表 1 线性与非线性驱动器功耗比较

从上表可以看出，随着电流的增加，class D 的效率优势越加明显，在 1A 输出情况，class AB 要比 class D 多消耗 50%（5W）以上的功率，对于 12V 的供电系统来说，电源需要多消耗

400mA 左右电流，这点对于迎宾灯的设计是不利的，因为此时发动机还没启动，供电完全靠汽车电瓶，如果在 polling 过程中消耗过多的电量，可能会导致电瓶亏电而无法启动。

线性与非线性驱动器辐射杂散（RE）比较

在了解两种放大器效率上的差异后，接下来重点讨论非线性放大器的 EMC 性能，这里以杂散辐射为例，讨论两种驱动的杂散辐射性能，因为 class D 驱动器直接输出方波，而 class AB 输出正弦波，所以理论上 class AB 在这点上应该有很大优势

辐射杂散的参考标准

在汽车产品 EME 的验证中，比较权威的国际标准是 CISPR25。其为保护车内接收机不受其它设备的影响，针对所有的车内电子模块，定义了多种类型的干扰测试方法和具体限值，包含传导干扰（CE）和辐射干扰(RE)：传导干扰又分为电流法和电压法，前者针对非供电线束，后者专门测试供电线束的干扰；而在辐射测试中，为了测试不同频段的干扰，分别定义了不同的接收天线和 5 种不同等级的辐射限值：

	频率范围	接收天线类型
1	0.15MHz~30MHz	1 米垂直单极天线 (rod)
2	30MHz~200MHz	双锥形天线 (biconical)
3	200MHz~1000MHz	对数周期天线 (log-periodic)
4	1000MHz ~2500Mhz	喇叭天线或者对数周期天线

在 PKE 的低频应用中，工作主频在 125KHz 左右，备受关注的辐射杂散落在 30MHz 以内，所以测试系统选用棒状天线，另外，在 CISPR 标准中还要搭建一个 60*60 厘米金属平面（图 4 中的 14 部分），主要目的是通过镜像平面达到双极天线的效果，提高天线接收增益。另外值得注意的是：这种单极天线尺寸大，类似车载收音机天线，主要是接收空间的低频电场，磁棒天线（线圈）本身的磁场辐射在接收天线上感应电压比较微弱，模块的线束辐射直接决定了测试结果，而有辐射可能的线束一般都集中在天线线束上。

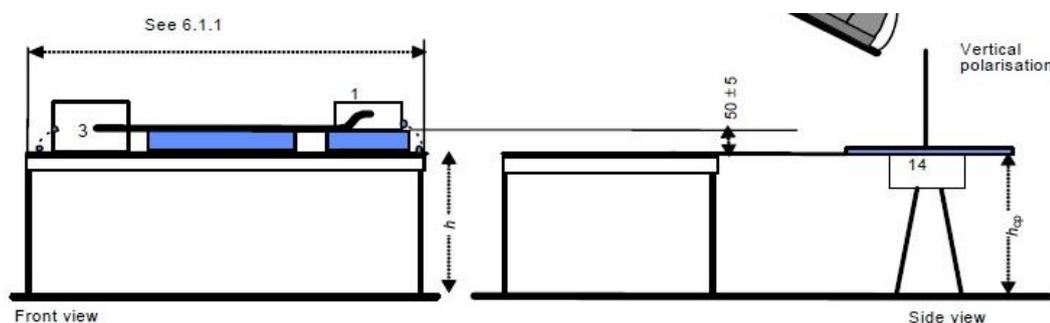


图 4 CISPR25 棒状天线测试环境搭建示意图

影响辐射干扰（RE）的关键因素

如上所述，PEPS 系统的天线线束是电场辐射的关键辐射机构，众所周知，空间辐射取

决于线束的共模电压，即放大器两端输出信号的矢量和，因为差模电压（矢量差）对外的辐射在空间是相互抵消的。这里的辐射源和辐射‘天线’都已经明确，接下来的分析和优化就有针对性了。

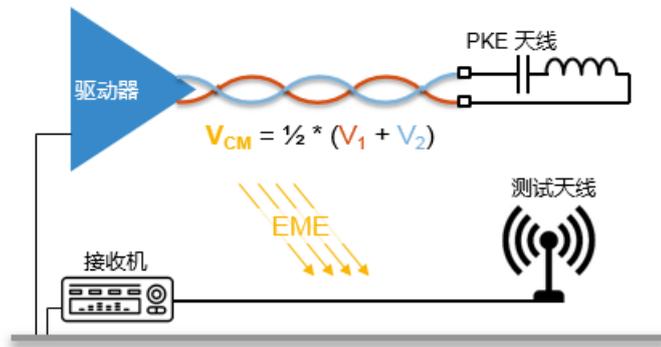


图 5 EME 测试中的辐射源

对于理想的线性放大器，输出是完美的正弦信号，单频，谐波成分为零，不管是差模信号还是共模信号都没有辐射。然而在实际的系统中，由于受到设计条件的限制或者供电系统引入的噪声，振荡器无法产生理想的正弦波，再加上后级放大器不同程度的限幅或者交越失真，都会产生附带的谐波辐射，而且采用半桥输出，线束一端是正弦波，另一端接近零电平，所以输出的共模信号和差模信号是相等的，换句话说，如果正弦波有失真，相应谐波会毫无保留地通过线束辐射出去，因此，控制正弦波的纯度对于 class AB 放大器的杂散辐射来说是至关重要的（图 6）。

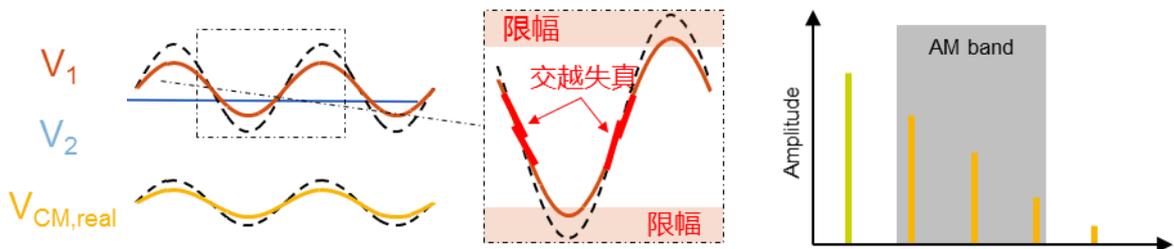


图 6 线性放大器共模信号和辐射示意

对于开关式驱动器，线束上走的是方波信号，如果也采用半桥输出，共模信号及输出方波信号，谐波会毫无保留的通过线束辐射，那结果估计是惨不忍睹的。

如果采用全桥输出，输出两端完全平衡，理论上共模信号为零，理想情况上也是没有对外辐射。但由于实际系统中的一些寄生参数导致的不对称性，输出的方波无法做到绝对的同步（上升沿和下降沿），可能会发现有残留的共模脉冲出现（图 7），这种宽频带的窄脉冲与 class D* 对外辐射的大小是成正比的。所以控制输出信号及走线的平衡和负载的对称性，是设计开关式放大器的要点。

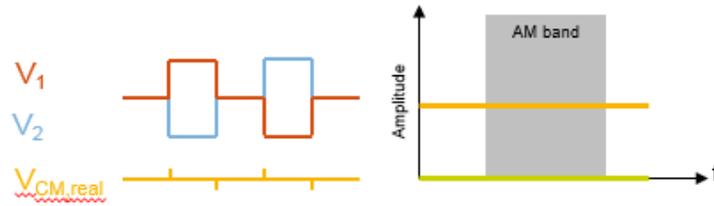


图 7 开关式放大器共模信号和辐射示意

辐射杂散实测数据分析

同效率测试一样，两种驱动器所连接的天线（包括线束）和阻尼电阻都相同，驱动电流都设置到 $1A_p$ ，选用相同的 PKE 调制数据和载波长度，分别测试了线性驱动器半桥模式及非线性驱动的半桥和全桥模式下的杂散辐射情况。注意：这里没有测试线性驱动的全桥模式的原因是如果改成全桥后，可驱天线数量只剩两根，不能满足整车覆盖需求，因此在实际应用中，线性驱动大都采用半桥模式

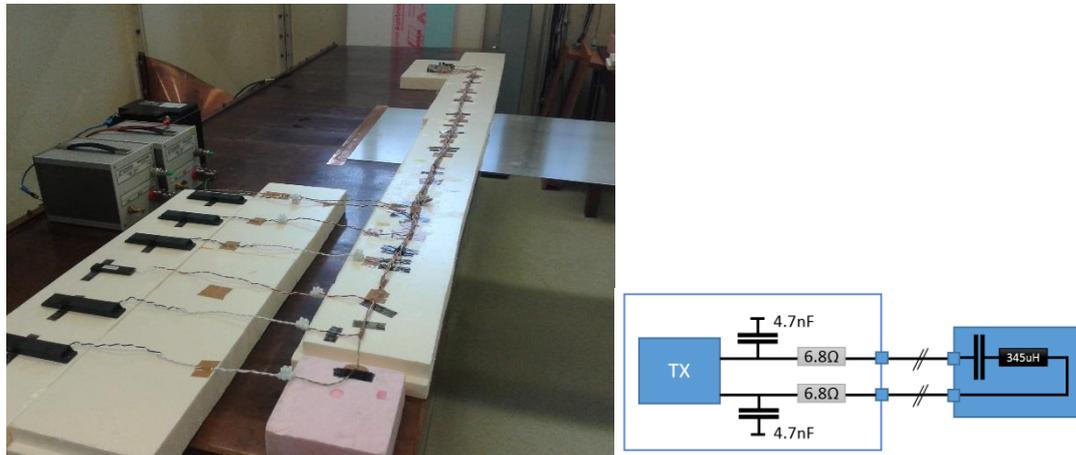


图 8 辐射测试及负载配置示意

下图中测试了非线性驱动半桥的辐射，谐波成分是意料之中的丰富，几乎每隔 $125k$ 的频点都可以看见，最大的 $250KHz$ 达到 $85dBuV/m$ 以上，与主波 $125KHz$ 信号只相差 $10dB$ 左右，相信这种情况的辐射在很多场合是无法满足 EMC 要求的。

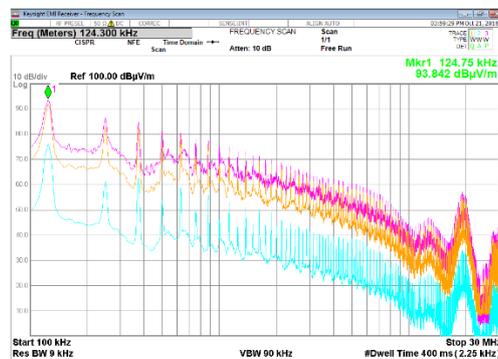


图 9 非线性驱动半桥模式下的杂散辐射

下面两张图分别是开关式驱动全桥模式与线性驱动半桥在同样条件下的测试结果，可以明显的看到，非线性驱动在全桥模式的帮助下，谐波得到很大程度的抑制，在 AM 频段大概有 33dB 的改进，与线性驱动相比还略好 3dB，通过实验比较我们大约可以体会到差模抵消的力量。

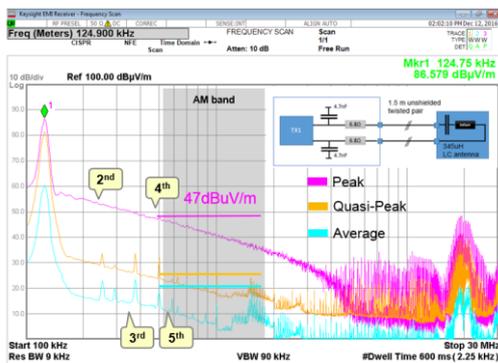


图 10 开关式低频驱动辐射干扰测试数据

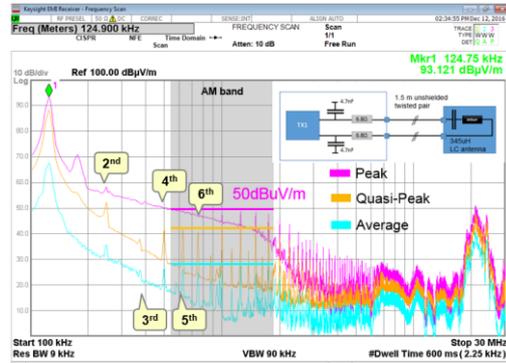


图 11 线性低频驱动辐射干扰测试数据

设计过程中如何优化杂散辐射

对于 PEPS 系统中低频驱动的杂散优化，有几点在设计中可以借鉴的地方，其中对于 RE 最有核心的是平衡的控制，无论是线性还是非线性驱动，控制天线线束上电压的对称性，对降低辐射杂散是很有帮助的。

设计要点	改进程度	原理	负面作用
配置成全桥模式	大 (30dB+)	全桥模式极大程度的抑制了共模辐射	可驱天线变少
屏蔽双绞线	大	电场屏蔽	成本上升
增加双绞密度	中	从30增加到50圈/米可以改进5dB左右	工艺要求提高
驱动输出端对称性设计 (走线, 电容)	中	仅仅对全桥模式有帮助	
降低驱动电压	中	辐射取决于线束上的共模电压	输出电流变小, 磁场覆盖范围小
增加驱动输出接地电容4.7nF	小	只对高频有效, 对AM频段的旁路作用很有限	
提高天线品质因数	小	辐射取决于线束上的共模电压	
降低驱动电流	不一定	降低电流不一定会降低电压, 可能只是改变占比	

结论

通过上述的分析和测试，可以看出开关式低频放大器相对线性放大器的效率更高，芯片工作时表面温度低，散热要求没那么高，由于汽车的工作环境一般都比较恶劣，所以设计者对散热要求都比较重视。从杂散辐射方面来说，线性放大器的表现还是不错的，而非线性驱动器的半桥模式的辐射基本是“惨不能睹”，因此选用非线性驱动建议配置成全桥模式。虽然非线性全桥驱动在本次评测中在 AM 波段附近有若干 dB 的优势，如果考虑测试误差和不确定性，基本可以认为它与线性驱动半桥模式的杂散还是属于同一级别，没有明显差异。