

家用电器、电动工具和类似器具的电磁兼容性处理实例

钱振宇

1 电动工具的电磁骚扰抑制

1.1 电动工具电磁骚扰的产生

在电动工具中广泛使用的串激电动机,在其工作时随着电枢的转动电刷可将相邻的换向片短路,导致参加换向的电枢线圈短路,在回路中流过短路电流。当换向片转到与电刷断开的位置时,电刷和换向片之间产生换向火花,形成电磁骚扰。这种电磁骚扰的频谱较广(从中波到甚高频波段内是连续分布的),对广播电视设备、通讯设备以及其他电子设备在很广的范围内造成干扰。

此外,在电动工具中还有一些非线性的器件(如可控硅、二极管和晶体管等),当这些器件工作时,在导通和截止的瞬间也会产生高频电磁骚扰。

还有,电动机的定子铁芯和转子的开槽设计和线圈上的磁路设计比较饱和,也会产生较大的工频谐波成分,形成电磁骚扰。

上述所有电磁骚扰都会通过与电动机连接的电源线以传导和辐射方式向公共电网和空间传播,直接或间接影响其他设备的正常工作。

1.2 电动工具电磁骚扰的抑制

滤波

在考虑了电动工具的工作特点以及骚扰抑制措施可能要花费的代价后,使用最多的要数滤波措施了。

电动机电刷产生的噪声既有共模、又有差模,解决的手段主要是采用电容、电感和接地等。其中,对待共模噪声,电容器可接在电动机的每根引线和地之间;但对差模噪声,电容器应当跨接在电源引线之间。对于由炭刷产生的噪声,通常都是差模的,是由炭刷与换向器触点断开时产生的。

图1是一种常用的低通滤波电路。接在电动工具电源输入端的滤波器为工频电源提供低阻抗通路,对于频率较高的骚扰信号则产生较大衰减,实现骚扰的抑制,削弱了向电网侧的传导骚扰的输出。其中 C_1 、 C_2 、 C_4 、 C_5 和 L_C 用于抑制共模骚扰; C_3 和 C_6 用于抑制差模骚扰。 C_1 、 C_2 、 C_4 和 C_5 的典型值为 $1000\text{pF} \sim 4700\text{pF}$; C_3 和 C_6 的典型值为 $0.1\ \mu\text{F} \sim 0.47\ \mu\text{F}$; 共模电感 L_C 的典型值为 $0.01\text{mH} \sim 3\text{mH}$ 。实际使用时,根据电动工具产生骚扰的情况,可以采用图1电路的全部或部分,形成C型(纯电容)、L型(一个电感和一个电容)、T型(两个电感和一个电容)和型(一个电感和两个电容)。

倘若电动机产生的差模骚扰较大时,图1中的 L_C 可改用两个相同的差模电感分别串接在相线和中线里,有时也能达到很好的骚扰抑制作用。

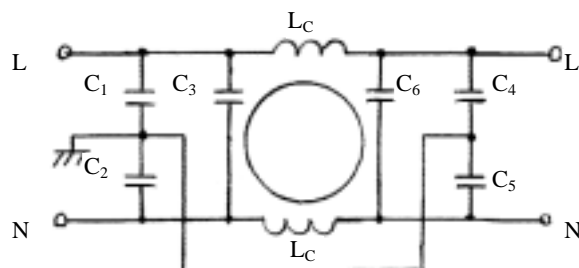


图1 接在电动工具电源输入端的低通滤波器

此外,在电动机电刷两端并接一个 $1000\text{pF} \sim 4700\text{pF}$ 的电容;在电刷和定子激磁线圈间分别串接一个相同的电感。电感的作用是防止炭刷在通过换向器的间隙时使流进炭刷的电流产生突变,电感量大约为 $10 \sim 25\ \mu\text{H}$ 。串联的电感与旁路到地的电容合在一起可以构成一个

低通滤波器，这可以增强单个电感和电容的滤波效果，对抑制传导噪声很有好处，使它有更宽的滤波频带及更大的滤波效果。

若要进一步降低电动机在甚高频下的电磁噪声，除了加电容之外，还可以在电源线上套一个铁氧体的磁环（电源线中的相线和中线共套一个铁氧体磁环），这样还能提高几个 dB 的骚扰抑制效果。

接地和电气连接

在电动工具中的接地和电气连接应可靠、牢固，不良的接触会产生数倍于正常工作时的骚扰。

接地是保证相线、中线对地有一个低阻抗回路抑制骚扰的一个重要手段，实际使用时，图 1 中 C_1 、 C_2 、 C_3 常用一个三角形连接的抑制电容来代替，在三根引出线中，中间一根为射频接地，接电动机定子的铁芯，另外两根分别接在开关后面的相线作了中线上。接线时要注意接地良好，而且电容线的引脚也要尽可能地短。电容器的引脚越长，电容器的自谐振频率就低，高频滤波的效果就差。电容器引脚的长和短，在骚扰的抑制效果上可以相差 2dB ~ 5dB。

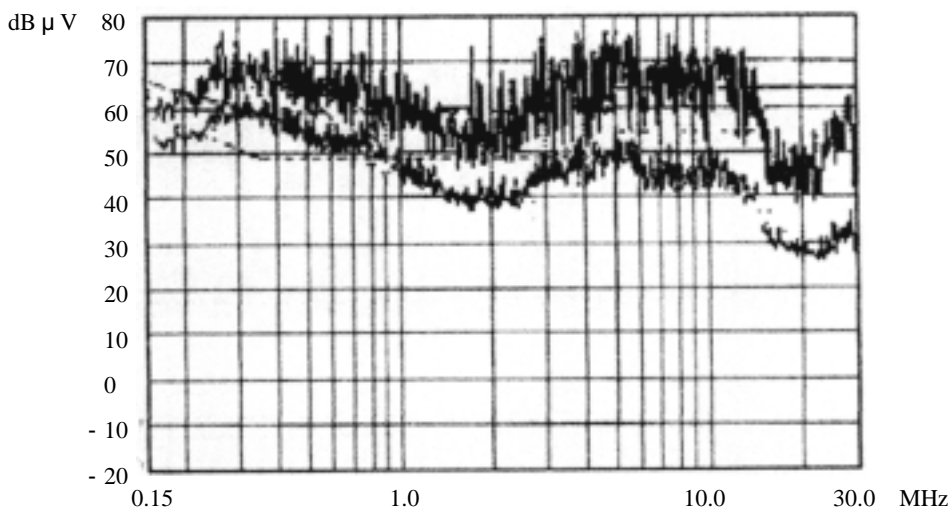
设计和制造工艺

骚扰抑制可以从电动机本身入手，因为接触部分的接触不良、炭刷的不干净都会产生数倍于正常运转时的骚扰情况。为了减小骚扰，要保持接触部分的接触可靠，开、合动作正常，触头的压力要保持均匀；要保持炭刷和换向器的干净，保证炭刷本身的质量（用软一些和品质纯净一些的材料）和换向器的光洁度；另外，要保持炭刷对换向器有适当的压力（压力稍大一些，有利于降低骚扰的值，但过大的压力会缩短炭刷的寿命和产生一些其他问题）。同时，要注意在电动工具内部的走线整洁、清晰，连线要尽可能短，避免形成不必要的环路，以减少线路的辐射。最后，要注意刷握和机座牢固固定，要避免在电动机运转不稳引起刷握跳动而产生高频骚扰。

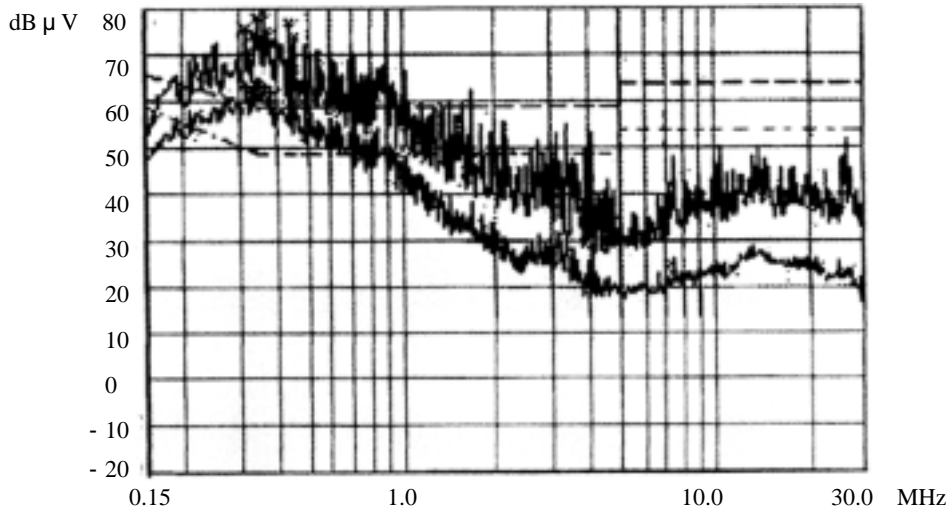
1.3 电动工具电磁骚扰的抑制例

角向磨光机的电磁骚扰抑制例

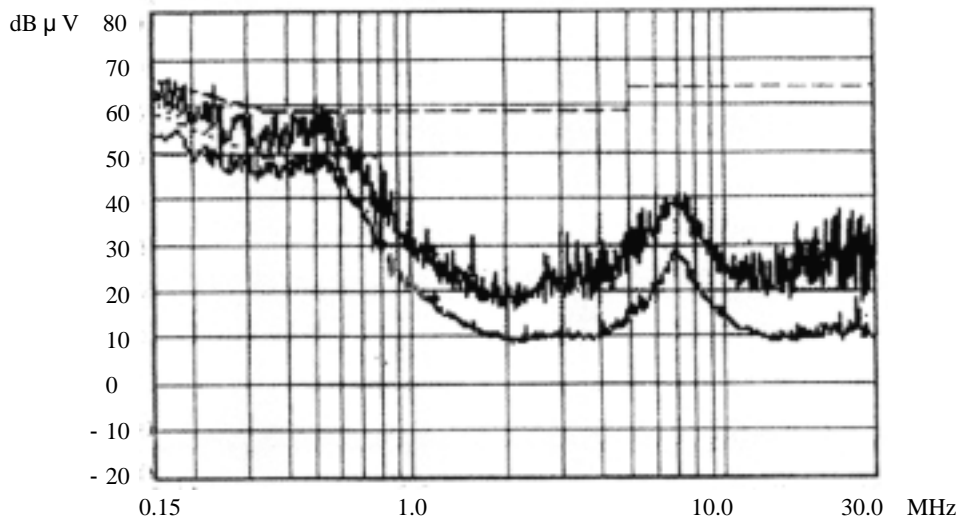
图 2 a 是一台未经处理的角向磨光机传导骚扰测试例。从测试结果的频谱看，应当是既有差模骚扰超标又有共模骚扰超标的情况。为此，先在开关后接入一个 $0.33 \mu F + 2 \times 3300 pF$ 的组合电容器，地线接定子铁芯。在图 2 b 中显示高频端的共模骚扰已被抑制。为了进一步抑制低频段的差模骚扰，在电刷和定子线圈之间分别串一个 $20 \mu H$ 的电感，一开始抑制效果并不明显，继续增大到 $250 \mu H$ ，从图 2 c 中可以看出，已经符合标准要求。一个完整的、经过整改后的角向磨光机电磁骚扰抑制线路见图 3。



a) 整改前的传导骚扰测试结果



b) 第一次整改后的传导骚扰测试结果



c) 最终整改后的传导骚扰测试结果

图2 角向磨光机传导骚扰测试例

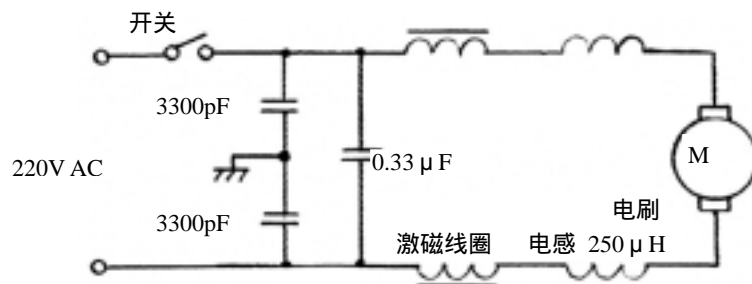
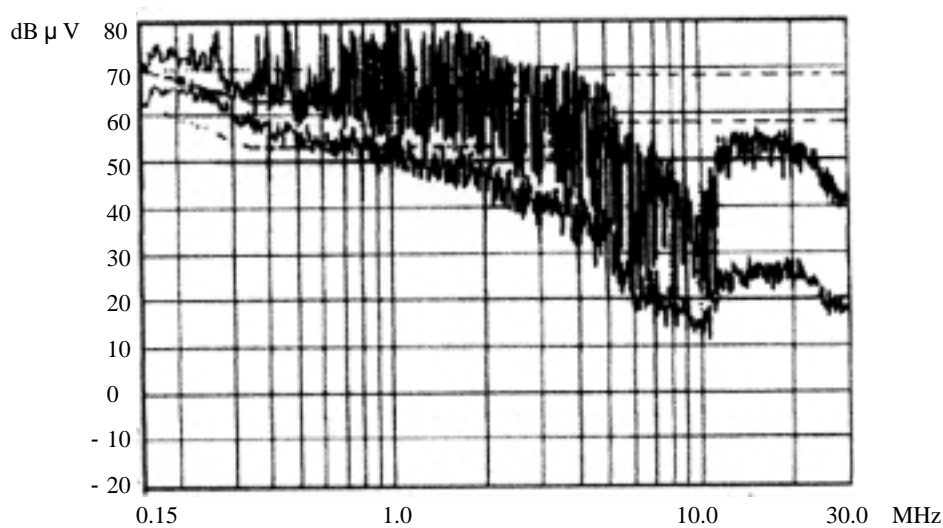


图3 整改后的角向磨光机电磁骚扰抑制线路

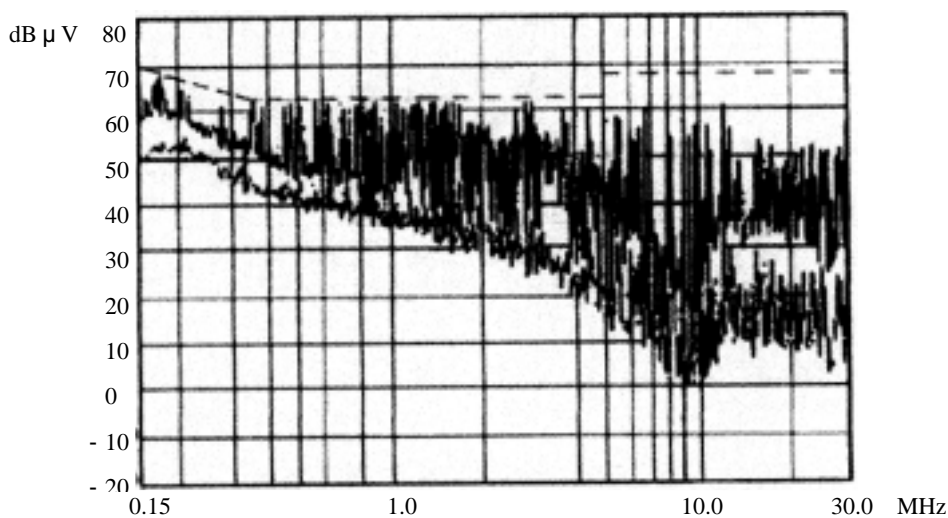
调速电钻的电磁骚扰抑制例

图4 a 是送试的调速电钻传导骚扰测试结果。调速电钻采用可控硅的移相控制来调节电动机的端电压,电动机的传导骚扰就是由于这种调压方式以及电动机在工作时产生的换向火花所引起的。从测试结果的频谱看,主要是差模骚扰。为此在调速电钻的开关后面接入一个 $0.33 \mu\text{F} + 2 \times 3300\text{pF}$ 的组合电容器,在定子和电刷间各接一个 $50 \mu\text{H}$ 的差模电感,测试结果便已满足限值要求(见图4 b 所示)。图5 给出了一个完整的、经过整改后的调速电钻电

磁骚扰抑制线路。



a) 整改前的传导骚扰测试结果



b) 整改后的传导骚扰测试结果

图 4 调速电钻的传导骚扰测试例

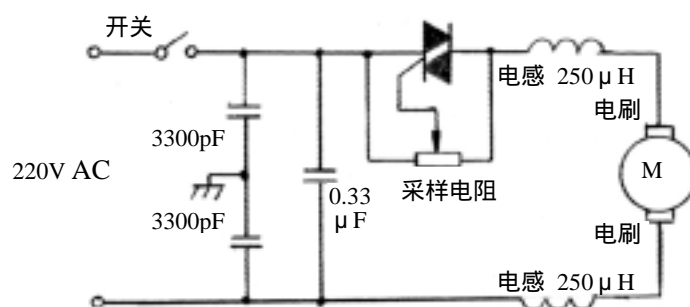
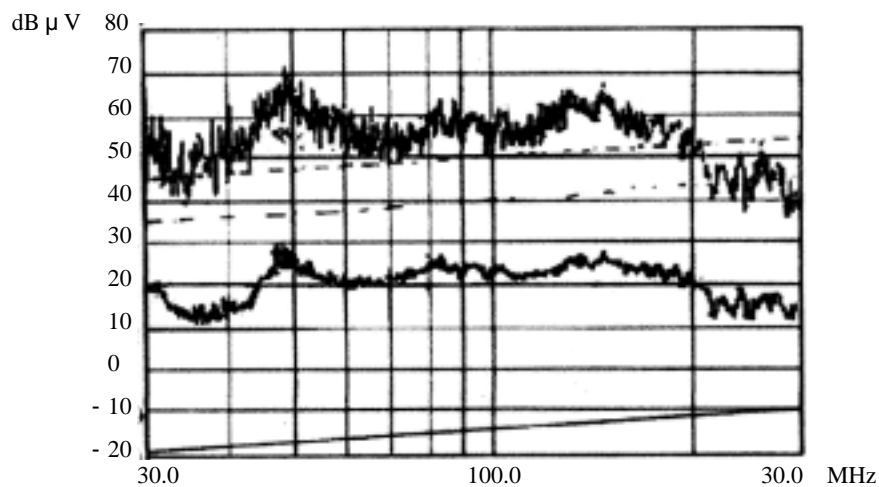


图 5 经过整改后的调速电钻电磁骚扰抑制线路

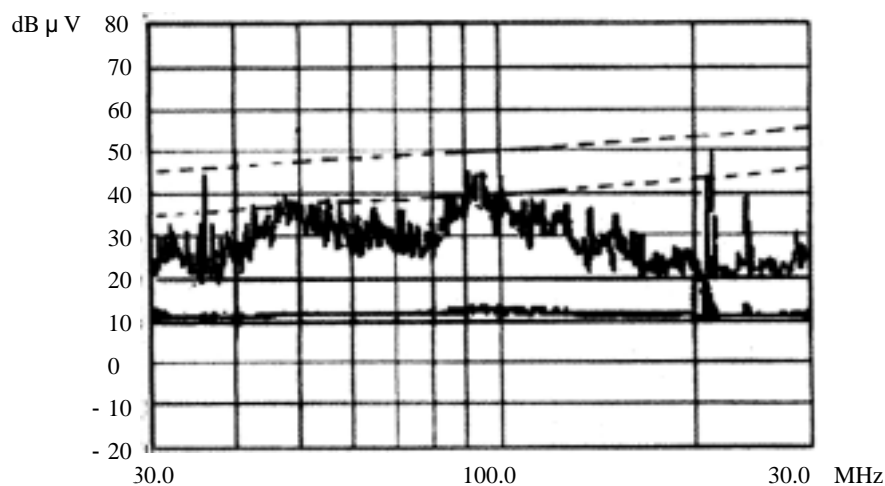
电动螺丝刀的电磁骚扰抑制例

图 6 a 是电动螺丝刀的辐射功率测试结果，它显示出电动螺丝刀的不合格频点主要集中在 45MHz ~ 50MHz 之间。分析电动螺丝刀的控制线路后认为骚扰是由于电源控制端在降压后通过整流二极管整流造成的。解决的思路是在整流输出到直流电动机接入之前再加接两个对接的 0.1 μF/100VDC 电容，电容器的公共端接电动螺丝刀的外壳（地），以形成对地的低

阻抗通路。进一步测试（见图 6 b）表明电动螺丝刀的电磁骚扰已得到明显抑制。若在电源控制变压器的初级再接一个 $0.22\ \mu\text{F} \sim 0.33\ \mu\text{F}$ 的旁路电容，测试结果还能改善（3~6）dB。图 7 给出了一个完整的、经过整改后的电动螺丝刀电磁骚扰抑制线路。



a) 整改前的传导骚扰测试结果



b) 整改后的传导骚扰测试结果

图 6 电动螺丝刀的辐射功率测试例

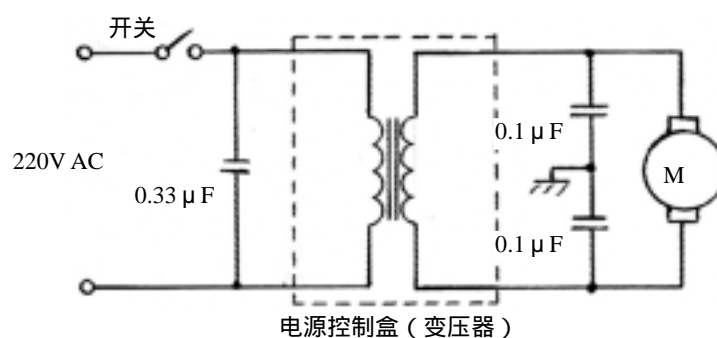


图 7 经过整改后的电动螺丝刀电磁骚扰抑制线路

2 小家电产品电磁骚扰发射情况的改进

2.1 小家电产品中的电磁骚扰发射

在对小家电产品进行 3C 认证的电磁兼容测试时，经常发现有谐波电流和电磁骚扰的发射存在超标问题。下面是一些具体的例子，例如电吹风存在谐波电流、骚扰电压和辐射功率超标；而可以调速的真空吸尘器常存在谐波电流超标；不可调的真空吸尘器常存在骚扰电压

和辐射功率超标；带机械式定时器的洗衣机也是骚扰电压和辐射功率超标；而 2~3 匹的空气调节器则谐波电流经常不合格。

造成家用电器的谐波电流超标的主要原因是由于电路中存在非线性元器件。这里有两个主要原因： 电路中拥有铁磁饱和特性的变压器、铁心电抗器和空气压缩机等； 设备内部装有采用电力电子器件（二极管、可控硅、VMOS 管和 IGBT 管等）的开关电源和变频器等。

家用电器的骚扰电压和骚扰功率超标则是由于在其内部广泛采用了开关电源、变频器和高速数字电路，这些功率电子部件和高速电子线路工作中所产生的电压和电流瞬变是形成高频电磁骚扰的主要原因。此外，设备内部的继电器、定时器、热断路器的动作，开关触点在断开和接触过程中所产生的电弧也是产生高频电磁骚扰的重要原因。

2.2 小家电产品电磁骚扰发射情况的改进例

调速、调温电吹风的谐波电流抑制例

采用二极管的单相导电性能可以将电吹风中电机和电热丝的工作电流减半，达到电吹风的调速和调温的目的，见图 8。图中 S_1 和 S_2 是开关， $D_1 \sim D_5$ 是二极管， M 是风扇， R_1 是保护电阻， R_2 是电热丝， TH_1 是热断路器。电吹风的额定功率是 1500W。

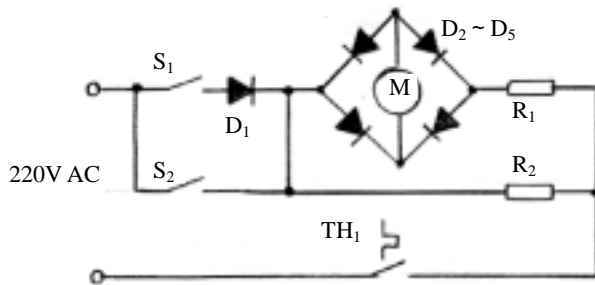


图 8 整改前的调速、调温电吹风控制线路

图 8 中的开关 S_1 和 S_2 的动作见表 1，第一档是空档；第二档是微风、低温档；第三档是强风、高温档。

表 1 未经改进的电吹风工作情况说明

	S_1	S_2	说明
第 1 档	断开	断开	
第 2 档	接通	断开	风扇半波直流供电，电热丝半波直流供电
第 3 档	接通	接通	风扇全波直流供电，电热丝交流直接供电

对于电吹风的第二档，就是利用二极管的单向导电性能使得流过电扇和电热丝的电流减半来实现的（在一个工频周期中，只有一半时间是有电流流过的，见图 9 所示，流过的电流呈脉动形状）。

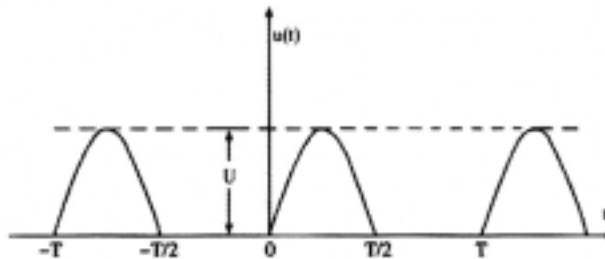


图 9 二极管单向导电性使得流过电扇和电热丝的电流呈脉动状

二极管的这种工作方式，虽然使得流过电吹风的电流依然保持有周期性这一特点，但是电流却是单方向的，即：

$$i(t) = \begin{cases} I \sin t & \text{当 } 0 < t < T/2 \\ 0 & \text{当 } -T/2 < t < 0 \end{cases}$$

由于是周期信号，上述函数可以展开成富里叶级数：

$$i(t) = I [1/2 + (1/2) \cdot I \sin t - (2/3) \cdot \cos 2 t - (2/15) \cdot \cos 4 t - (2/35) \cdot \cos 6 t - \dots]$$

从上式可见，工作在电吹风第二档时，流过电吹风的电流含有直流、基波电流和大量的偶次谐波电流。最终导致了电吹风的谐波电流超标（见 GB17625.1）。

基于电吹风的这种工作情况，有必要对电吹风的控制线路作一些改变，详情参见图 10 所示。二极管只是控制直流电机回路，用以调节风速，而温度的高低是通过电热丝电阻的变化来实现的（电热丝一拆为二，分两种情况工作，但都由交流直接供电），这样就可以避免二极管上流过大电流，从而减少了流过电吹风里的谐波电流。

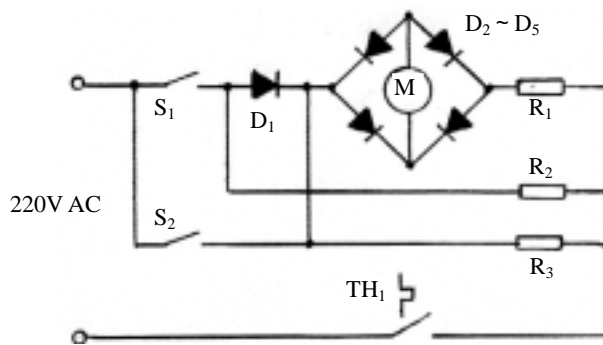


图 10 电吹风控制线路的改进

表 2 是改进后的开关动作情况。

表 2 经过改进后的电吹风工作情况说明

	S ₁	S ₂	说明
第 1 档	断开	断开	
第 2 档	接通	断开	风扇半波直流供电，电热丝 R ₂ 交流直接供电
第 3 档	接通	接通	风扇全波直流供电，电热丝 R ₂ 和 R ₃ 交流直接供电

改进前后的谐波电流频谱对比见图 11 所示。二次谐波电流由 1.398A 减少到 0.137A，同时也减少了所有偶次谐波电流的电流大小。

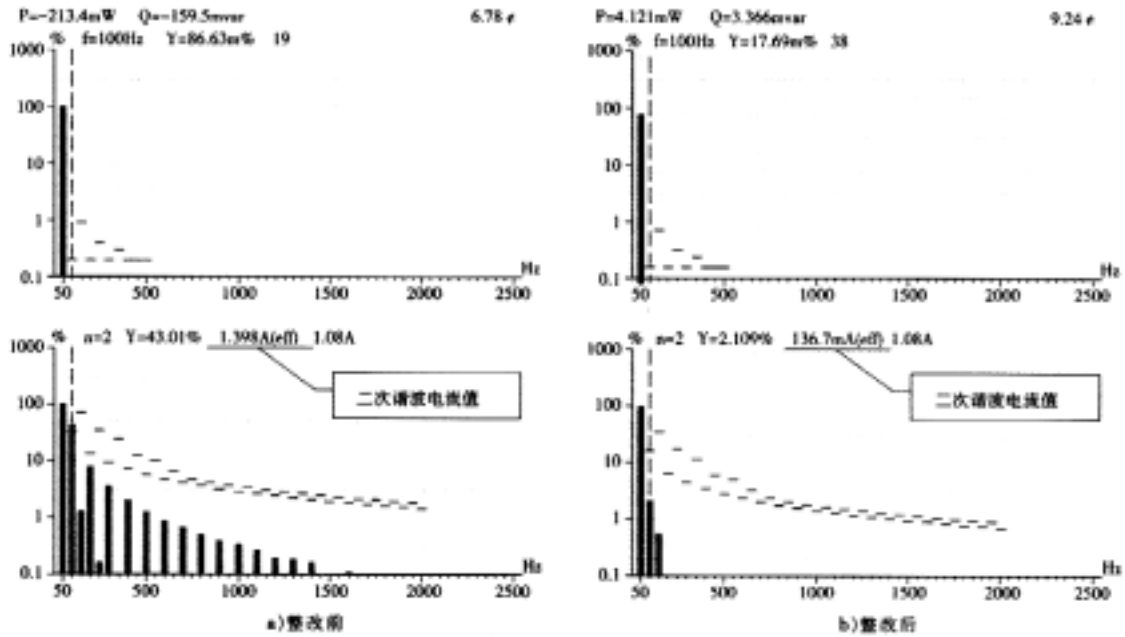


图 11 电吹风控制线路改进前后的谐波电流频谱对比

可见,要想解决一个产品的谐波电流问题,要从分析产品谐波电流超标的主要原因着手,然后制订电路的改进方案,很有可能在电路控制方面只是作了很小的改动,但这一改动却是关键性的,真正解决了产品存在的问题。

带机械开关的洗衣机传导骚扰发射情况改进例

带机械开关的洗衣机的电磁骚扰主要是由于换向定时开关工作所引起的。它在工作时不停地改变内部金属触点的接触位置来达到电动机换向的目的。但是金属触点在接触和分离的过程中会产生电弧,这种电弧就是使洗衣机产生电磁骚扰的主要原因。由电弧放电所引起的电磁骚扰通常具有较宽的频谱,而在 30MHz 以下的传导骚扰发射尤其明显,在测试中经常会发现连续及断续的传导骚扰电压不合格。这类骚扰常常会传导公共电网,使其他电子设备的正常工作受到影响。

对于传导骚扰的抑制通常会选择用 LC 滤波器来进行滤波,然而要想解决这类由机械开关拉弧引起的电磁骚扰时,效果就显得不明显了。使用电容滤波,在电弧发生的时候,电容器迅速充电,吸收了部分电弧的能量,但由于没有放电回路,使得电容器上始终保持充满电的状态。而电容器的放电要在机械开关重新闭合的瞬间才能进行,由于放电回路没有限流电阻,在放电瞬间的电流幅值可以很大,而放电的持续时间十分短暂,这反过来又对电网形成了冲击,因此使用单独一个电容起不到对这类干扰有比较好的抑制作用。

根据实际情况,使用电容和电阻的组合则是解决这类骚扰的一种比较有效的方案。图 12 是一个实际使用电路。由于电容和电阻的并联构成了一个完整的电容放电回路,电容器吸收了电弧形成瞬间的能量,随即又通过与电容器并联的电阻释放了所吸收的能量,放电的速率由所选择的电容和电阻时间常数决定。等到机械开关重新闭合时,容量上贮存的能量早已释放完毕,不可能再形成幅值大、持续时间短暂的电流瞬变,原先电容放电对电网形成的冲击已不复存在。所以采用电容和电阻并联的组合电路对电磁骚扰的抑制有比较好的作用。使用本方案时要注意电容与电阻组成的滤波吸收电路的引线不能过长,过长的引线会对骚扰抑制带来不利的影响。

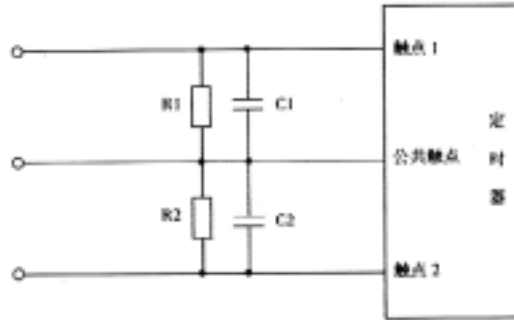


图 12 带机械开关的洗衣机的传导骚扰抑制例

图 13 是一台机械开关式洗衣机整改前后骚扰电压测试对比。可以看出整改前 0.15MHz ~ 30MHz 的整个频段上准峰值测值严重超标。通过以上方法整改后，结果相当理想，低频段的表现也相当稳定，在随后进行的断续干扰测试中也顺利通过。

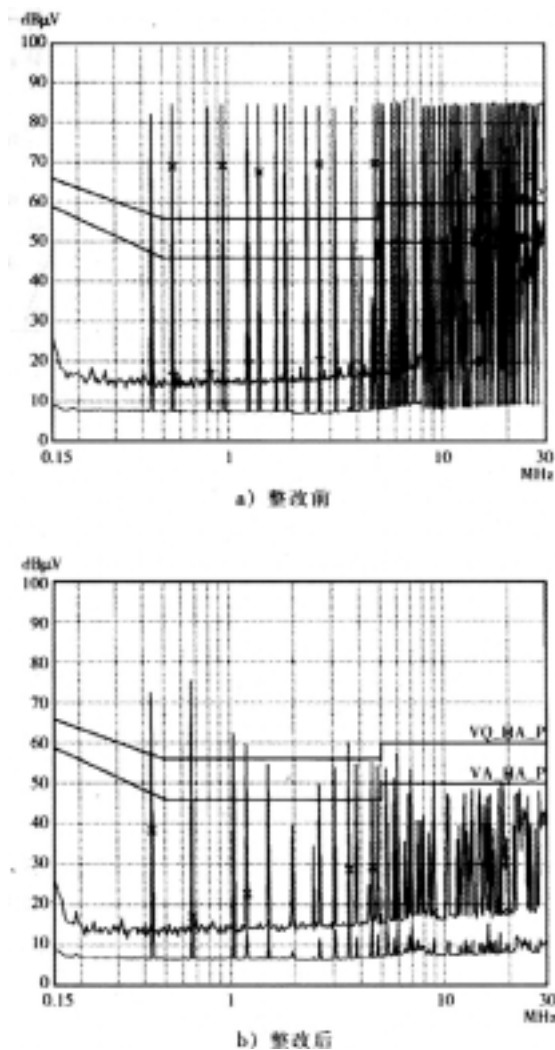


图 13 某机械开关式洗衣机整改前后的传导骚扰测试结果对比

电阻和电容组合是解决机械开关拉弧造成骚扰的一个经济而有效的方案。但在参数的选择上需要进行多次试验，尽量找到一个最佳的抑制方案。