

1 前言

电源变压器的功能是功率传送、电压变换和绝缘隔离，作为一种主要的软磁电磁元件，在电源技术中和电力电子技术中得到广泛的应用。根据传送功率的大小，电源变压器可以分为几档：10 kVA 以上为大功率，10kVA~0.5kVA 为中功率，0.5kVA~25VA 为小功率，25VA 以下为微功率。传送功率不同，电源变压器的设计也不一样，应当是不言而喻的。有人根据它的主要功能是功率传送，把英文名称“PowerTransformers”译成“功率变压器”，在许多文献资料中仍然在使用。究竟是叫“电源变压器”，还是叫“功率变压器”好呢？有待于科技术语方面的权威机构来选择决定。

同一个英文名称“Power

Transformer”，还可译成“电力变压器”。电力变压器主要用于电力输配系统中起功率传送、电压变换和绝缘隔离作用，原边电压为 6kV 以上的高压，功率最小 5kVA，最大超过上万 kVA。电力变压器和电源变压器，虽然工作原理都是基于电磁感应原理，但是电力变压器既强调功率传送大，又强调绝缘隔离电压高，无论在磁芯线圈，还是绝缘结构的设计上，都与功率传送小、绝缘隔离电压低的电源变压器有显著的差别，更不能将电力变压器设计的优化设计条件生搬硬套地应用到电源变压器中去。电力变压器和电源变压器的设计方法不一样，也应当是不言而喻的。

高频电源变压器是工作频率超过中频（10kHz）的电源变压器，主要用于高频开关电源中作高频开关电源变压器，也有用于高频逆变电源和高频逆变焊机中作高频逆变电源变压器的。按工作频率高低，可分为几个档次：10kHz~50kHz、50kHz~100kHz、100kHz~500kHz、500kHz~1MHz、1MHz 以上。传送功率比较大的，工作频率比较低；传送功率比较小的，工作频率比较高。这样，既有工作频率的差别，又有传送功率的差别，工作频率不同档次的电源变压器设计方法不一样，也应当是不言而喻的。

如上所述，作者对高频电源变压器的设计原则、要求和程序不存在错误概念，而是在 2003 年 7 月初，阅读《电源技术应用》2003 年第 6 期特别推荐的 2 篇高频磁性元件设计文章后，产生了疑虑，感到有些问题值得进一步商讨，因此才动笔写本文。正如《电源技术应用》主编寄语所说的那样：“具体地分析具体的情况”，写的目的，是尝试把最难详细说明和选择的磁性元件之一的高频电源变压器的设计问题弄清楚。如有说得不对的地方，敬请几位作者和广大读者指正。

2 高频电源变压器的设计原则

高频电源变压器作为一种产品，自然带有商品的属性，因此高频电源变压器的设计原则和其他商品一样，是在具体使用条件下完成具体的功能中追求性能价格比最好。有时可能偏重性能和效率，有时可能偏重价格和成本。现在，轻、薄、短、小，成为高频电源的发展方向，是强调降低成本。其中成为一大难点的高频电源变压器，更需要在这方面下功夫。所以在高频电源变压器的“设计要点”一文中，只谈性能，不谈成本，不能不说是一大缺憾，如果能认真考虑一下高频电源变压器的设计原则，追求更好的性能价格比，传送不到 10VA 的单片开关电源高频变压器，应当设计出更轻、薄、短、

小的方案来。不谈成本，市场的价值规律是无情的！许多性能好的产品，往往由于价格不能为市场接受而遭冷落和淘汰。往往一种新产品最后被成本否决。一些“节能不节钱”的产品为什么在市场上推广不开值得大家深思。

产品成本，不但包括材料成本，生产成本，还包括研发成本，设计成本。因此，为了节约时间，根据以往的经验，对高频电源变压器的铁损铜损比例、漏感与激磁电感比例、原边和副边绕组损耗比例、电流密度提供一些参考数据，对窗口填充程度，绕组导线和结构推荐一些方案，有什么不好？为什么一定要按部就班地来回进行推算和仿真，才不是概念错误？作者曾在 20 世纪 80 年代中开发高频磁放大器开关电源，以温升最低为条件，对高频电源变压器进行过优化设计。由于热阻难以确定，结果与试制样品相差甚远，不得不再次修正。现在有些公司的磁芯产品说明书中，为了缩短用户设计高频电源变压器的时间，有的列出简化的设计公式，有的用表列出磁芯在某种工作频率下的传送功率。这种既为用户着想，又推广公司产品的双赢行为，是完全符合市场规律的行为，绝不是需要什么辨析的错误概念。问题是提供的参考数据，推荐的方案是否是经验的总结？有没有普遍性？包括“辨析”一文中提出的一些说法，都需要经过实践检验，才能站得住脚。

总之，千万记住：高频电源变压器是一种产品（即商品），设计原则是在具体的使用条件下完成具体的功能中追求性能价格比最好。检验设计的唯一标准是设计出的产品能否经受住市场的考验。

3 高频电源变压器的设计要求

以设计原则为出发点，可以对高频电源变压器提出 4 项设计要求：使用条件，完成功能，提高效率，降低成本。

3.1 使用条件

使用条件包括两方面内容：可靠性和电磁兼容性。以前只注意可靠性，现在由于环境保护意识增强，必须注意电磁兼容性。

可靠性是指在具体的使用条件下，高频电源变压器能正常工作到使用寿命为止。一般使用条件对高频电源变压器影响最大的是环境温度。有些软磁材料，居里点比较低，对温度敏感。例如：锰锌软磁铁氧体，居里点只有 215℃，其磁通密度，磁导率和损耗都随温度发生变化，故除正常温度 25℃外，还要给出 60℃，80℃，100℃时的各种参考数据。因此，将锰锌软磁铁氧体磁芯的工作温度限制在 100℃以下，也就是环境温度为 40℃时，温升只允许低于 60℃，相当于 A 级绝缘材料温度。与锰锌软磁铁氧体磁芯相配套的电磁线和绝缘件，一般都采用 E 级和 B 级绝缘材料，采用 H 级绝缘的三重绝缘电磁线和聚酰胺薄膜，是不是大材小用？成本增加多少？是不是因为 H 级绝缘的高频电源变压器优化的设计方案，可以使体积减少 1/2~1/3 的缘故？如果是，请举具体实例数据。作者曾开发 H 级绝缘工频 50Hz，10kVA 干式变压器，与 B 级绝缘工频 50Hz，10kVA 干式变压器相比，体积减小 15%到 20%，已经相当可观了。本来体积就比较小的高频 100kHz10VA 高频电源变压器，如次级绕组采用三重绝缘线，能把体积减小 1/2~1/3，那一定是很宝贵的经验。请有关作者详细介绍优化设计方案，以便广大读者学习。

电磁兼容性是指高频电源变压器既不产生对外界的电磁干扰，又能承受外界电磁干扰。电磁干扰包括可闻的音频噪声和不可闻的高频噪声。高频电源变压器产生电磁干扰的主要原因之一是磁芯的磁致伸缩。磁致伸缩大的软磁材料，产生的电磁干扰大。例如，锰锌软磁铁氧体，磁致伸缩系

数 λS 为 21×10^{-6} , 是取向硅钢的 7 倍以上, 是高磁导坡莫合金和非晶合金的 20 倍以上, 是微晶纳米晶合金的 10 倍以上。因此锰锌软磁铁氧体磁芯产生的电磁干扰大。高频电源变压器产生电磁干扰的主要原因还有磁芯之间的吸力和绕组导线之间的斥力。这些力的变化频率与高频电源变压器的工作频率一致。因此, 工作频率为 100kHz 左右的高频电源变压器, 没有特殊原因是不会产生 20kHz 以下音频噪声的。既然提出 10W 以下单片开关电源的音频噪声频率, 约为 10kHz~20kHz, 一定有其原因。由于没有画出噪声频谱图, 具体原因说不清楚, 但是由高频电源变压器本身产生的可能性不大, 没有必要采用玻璃珠胶合剂粘合磁芯。至于采用这种粘合工艺可将音频噪声降低 5dB, 请给出实例与数据以及对噪声原因的详细说明, 才会令人可信。

屏蔽是防止电磁干扰, 增加高频电源变压器电磁兼容性的好办法。但是为了阻止高频电源变压器的电磁干扰传播, 在设计磁芯结构和设计绕组结构也应当采取相应的措施, 只靠加外屏蔽带并不一定是最佳方案, 因为它只能阻止辐射干扰, 不能阻止传导干扰。

3.2 完成功能

高频电源变压器完成功能有 3 个: 功率传送, 电压变换和绝缘隔离。功率传送有两种方式。第一种是变压器功率的传送方式, 加在原绕组上的电压, 在磁芯中产生磁通变化, 使副绕组感应电压, 从而使电功率从原边传送到副边。在功率传送过程中, 磁芯又分为磁通单方向变化和双方向变化两种工作模式。单方向变化工作模式, 磁通密度从最大值 B_m 变化到剩余磁通密度 B_r , 或者从 B_r 变化到 B_m 。磁通密度变化值 $\Delta B = B_m - B_r$ 。为了提高 ΔB , 希望 B_m 大, B_r 小。双方向变化工作模式磁通度从 $+B_m$ 变化到 $-B_m$, 或者从 $-B_m$ 变化到 $+B_m$ 。磁通密度变化值 $\Delta B = 2B_m$, 为了提高 ΔB , 希望 B_m 大, 但不要求 B_r 小, 不论是单方向变化工作模式还是双方向变化工作模式, 变压器功率传送方式都不直接与磁芯磁导率有关。第二种是电感器功率传送方式, 原绕组输入的电感, 使磁芯激磁, 变为磁能储存起来, 然后通过去磁使副绕组感应电压, 变成电能释放给负载。传送功率决定于电感磁芯储能, 而储能又决定于原绕组的电感。电感与磁芯磁导率有关, 磁导率高, 电感量大, 储能多, 而不直接与磁通密度有关。虽然功率传送方式不同, 要求的磁芯参数不一样, 但是在高频电源变压器设计中, 磁芯的材料和参数的选择仍然是设计的一个主要内容。在电源变压器“设计要点”一文中, 很遗憾缺少这一个主要内容。只是在“交流损耗”一条中, 提出 BAC 典型值为 $0.04 \sim 0.075T$ 。显然, 文中的高频电源变压器是采用电感功率传送方式, 为什么不提磁导率, 而提 BAC 弄不清楚。经查阅, 在《电源技术应用》2003 年 1/2 期, 同一主要作者写的开关电源“设计要点”一文中, 列出了“磁芯的选择”, 也没有提磁导率, 只是提出最大磁通密度 B_m 为 $0.275T$ 。由于没有画磁通密度变化波形, 不清楚前文中的 BAC 和后文中的 B_m 是否一致: 为什么 BAC 和 B_m 相差 6.8~3.7 倍? 更不清楚, 选的是哪一种软磁铁氧体材料? 为什么选这种型号? 两文中都没有一点说明, 只好让读者自己去猜想了。

电压变换通过原边和副边绕组匝数比来完成。不管功率传送是哪一种方式, 原边和副边的电压变换比等于原绕组和副绕组匝数比, 只要不改变匝数比, 就不影响电压变换。但是, 绕组匝数与高频电源变压器的漏感有关。漏感大小与原绕组匝数的平方成正比。有趣的是, 漏感能不能规定一个数值? 《电源技术应用》2003 年第 6 期同时刊登的两篇文章有着不同的说法。“设计要点”一文中说: “对于一符合绝缘及安全标准的高频变压器, 其漏感量应为次级开路时初级电感量的 $1\% \sim 3\%$ ”。“辨析”一文中说: “在很多技术单上, 标注着漏感=1%的磁化电感或漏感<2%的磁化电感等类似的技术要求。其实这种写法或设计标准很不专业。电源设计者应当根据电路正常工作要求, 对所能接受的漏感值作一个数值限制。在制作变压器的过程中, 应在不使变压器的其他参数(如匝间电容等)变差的情况下尽可能减小漏感值, 而非给出漏感与磁化电感的比例关系作为技术要求”。“否则这将表明你不理解漏感知识或并不真正关心实际的漏感值”。虽然两篇文章说法不一样, 但是有一点是共同的, 就是尽可能减小漏感值。因为漏感值大, 储存的能量也大, 在电源开关过程中突然释放, 会产生尖峰电压,

增加开关器件承受的电压峰值，对绝缘不利，也产生附加损耗和电磁干扰。

绝缘隔离通过原边和副边绕组的绝缘结构来完成。为了保证绕组之间的绝缘，必须增加两个绕组之间的距离，从而降低绕组间的耦合程度，使漏感增大。还有，原绕组一般为高压绕组，匝数不能太少，否则，匝间或者层间电压相差大，会引起局部短路。这样，匝数有下限，使漏感也有下限。总之，在高频电源变压器绝缘结构和总体结构设计中，要统筹考虑漏感和绝缘强度问题。

3.3 提高效率

提高效率是对电源和电子设备的普遍要求。虽然从单个高频电源变压器来看，损耗不大。例如，100VA 高频电源变压器，效率为 98% 时，损耗只有 2W，并不多。但是成十万个，成百万个高频电源变压器，总损耗可能达到上 100kW，甚至上 MW。还有，许多高频电源变压器一直长期运行，年总损耗相当可观，有可能达到上 10GW·h。这样，提高高频电源变压器效率，可以节约电力。节约电力后，可以少建发电站。少建发电站后，可以少消耗煤和石油，可以少排放 CO₂，SO₂，NO_x，废气，废水，烟尘和灰渣，减少对环境的污染。既具有节约能源，又具有环境保护的双重社会效益。因此，提高效率是高频电源变压器一个主要的设计要求，一般效率要提高到 95% 以上，损耗要减少到 5% 以下。高频电源变压器损耗包括磁芯损耗（铁损）和绕组损耗（铜损）。有人关心变压器的铁损和铜损的比例。这个比例是随变压器的工作频率发生变化的。如果变压器的外加电压不变，工作频率越低，绕组匝数越多，铜损越大。因此在 50Hz 工频下，铜损远远超过铁损。例如：50Hz，100kVAS 9 型三相油浸式硅钢电力变压器，铜损为铁损的 5 倍左右。50Hz，100kVASH11 型三相油浸式非晶合金电力变压器，铜损为铁损的 20 倍左右。并不存在“辨析”一文中所说那样，工频变压器从热稳定热均匀角度出发，把铜损等于铁损作为经验设计规则。随着工作频率升高，绕组匝数减少，虽然由于趋表效应和邻近效应存在而使绕组损耗增加，但是总的趋势是铜损随着工作频率升高而下降。而铁损包括磁滞损耗和涡流损耗，随着工作频率升高而迅速增大。在某一段工作频率，有可能出现铜损和铁损相等的情况，超过这一段工作频率，铁损就大于铜损。造成铁损不等于铜损的原因，也并不象“辨析”一文中所说那样是由于“高频变压器采用非常细的漆包线作为绕组”。导线粗细的选择，虽然受趋表效应影响，但主要由高频电源变压器的传送功率来决定，与工作频率不存在直接关系。而且，选用非常细的漆包线作为绕组，反而会增加铜损，延缓铜损的下降趋势。说不定在设计选定的工作频率下，还有可能出现铜损等于铁损的情况。根据有的资料介绍，中小功率高频电源变压器的工作频率在 100kHz 左右，铁损已经大于铜损，而成为高频电源变压器损耗的主要部分。

正因为铁损是高频电源变压器损耗的主要部分，因此根据铁损选择磁芯材料是高频电源变压器设计的一个主要内容。铁损也成为评价软磁芯材料的一个主要参数。铁损与磁芯的工作磁通密度工作频率有关，在介绍软磁磁芯材料铁损时，必须说明在什么工作磁通密度下和在什么工作频率下损耗。用符号表示时，也必须标明 PB/f（式中工作磁通密度 B 的单位是 T（特斯拉），工作频率 f 的单位是 Hz（赫芝））。例如，P0.5/400 表示工作磁通密度为 0.5T，工作频率为 400Hz 时的损耗。又例如，P0.1/100k 表示工作磁通密度为 0.1T，工作频率为 100kHz 时的损耗。铁损还与工作温度有关，在介绍软磁磁芯材料铁损时，必须指明它的工作温度，特别是软磁铁氧体材料，对温度变化比较敏感，在产品说明书中都要列出 25℃ 至 100℃ 的铁损。

软磁材料的饱和磁通密度并不完全代表使用的工作磁通密度的上限，常常是铁损限制了工作磁通密度的上限。所以，在新的电源变压器用软磁铁氧体材料分类标准中，把允许的工作磁通密度和工作频率乘积 $B \times f$ ，作为材料的性能因子，并说明在性能因子条件下允许的损耗值。新的分类标准根据性能因子把软磁铁氧体材料分为 PW1，PW2，PW3，PW4，PW5 等 5 类，性能因子越高的，工作频率越高，极限频率也越高。例如，PW3 类软磁铁氧体材料，工作频率为 100kHz，极限频率为 30

0kHz, 性能因子 $B \times f$ 为 $10000\text{mT} \times \text{kHz}$, 即在 100mT (0.1T) 和 100kHz 下, 100°C 时损耗 a 级 $\leq 300\text{kW/m}$ (300mW/cm^3), b 级 $\leq 150\text{kW/m}^3$ (150mW/cm^3)。日本 TDK 公司生产的 PC44 型软磁铁氧体材料达到 PW3a 级标准, 达不到 PW3b 级标准。

“设计要点”一文中提出高频变压器使用的铁氧体磁芯在 100kHz 时的损耗应低于 50mW/cm^3 , 没指明是选哪一类软磁铁氧体材料, 也没说明损耗对应的工作磁通密度。读者只好去猜: 损耗对应的工作磁通密度是《电源技术应用》2003 年 6 期“设计要点”一文中的 BAC 典型值 $0.04 \sim 0.075\text{T}$? 还是《电源技术应用》2003 年 1/2 期“设计要点”一文中的 B_m 值 0.237T ? 不管是 0.075T , 还是 0.237T ? 要达到 100kHz 下铁损低于 50mW/cm^3 的铁氧体材料是非常先进的。请介绍一下是哪家公司哪种型号产品, 以便读者也去购买。

在某一段工作频率下, 高频电源变压器的绕组损耗(铜损)与铁损相接近时, 例如, 铜损/铁损 = $100\% \sim 25\%$ 范围内, 铜损也不能忽视, 也应当考虑采取措施来减少铜损。由于原绕组和副绕组承担的功率相近, 往往在设计中取原绕组的铜损等于副绕组的铜损, 以便简化设计计算过程, 这并不象“辨析”一文中所说的那样: “只是工频变压器设计的一种经验规则, ”对一定工作频率下高频电源变压器设计也适用。不能只强调依靠温升来设计高频电源变压器, 由于热阻不容易准确确定, 设计计算相当麻烦。因此, 为了简化计算, 有时根据经验预先推荐一些原则和数据是必要的。同样, 为了简化计算, 对不同工作频率, 不同功率的高频电源变压器推荐不同的绕组电流密度, 也是必要的, 但不限于某一个电流密度值, 例如, $2\text{A/mm}^2 \sim 3\text{A/mm}^2$ 。应当看到: 实现高频电源变压器设计要求的方法并不限于一种, 应当允许进行多种多样的探索。“你走你的阳关道, 我走我的独木桥”。为什么一定要按你指定的道路走, 才不是“错误概念”呢?

3.4 降低成本

降低成本是高频电源变压器的一个主要设计要求, 有时甚至是决定性的要求。高频电源变压器作为一种产品, 和其他商品一样, 都面临着市场竞争。竞争的内容包括性能和成本两个方面, 缺一不可。不注意降低成本, 往往会在竞争中被淘汰。

高频电源变压器的成本包括材料成本, 制造成本和管理成本。设计是高频电源变压器降低成本的主要手段。高频电源变压器所用的材料和零部件的贵贱和数量的多少? 是否方便采购? 是否要备有多少库存量? 磁芯, 线圈和总体结构的加工和装配工艺复杂还是简单? 需要人工占的比例多大(实现生产过程的机械化和自动化, 可以减少人工工时, 更能保证产品的一致性和质量)? 是否需要工模具? 质量控制中需要检测的工序和参数: 哪些参数要在加工过程中检测? 哪些参数要在出厂试验中检测(出厂试验的参数应选择能决定性能的关键参数, 数量不要多, 以便能即时判断产品质量。)? 哪些参数要在型式试验中检测? 要用什么检测仪器和设备, 价格如何? 等等, 都是由设计来决定的。因此, 高频电源变压器的设计者除了要了解高频电源变压器的理论和设计方法而外, 还要了解各种软磁材料和磁芯的性能和价格, 各种电磁线的性能和价格, 各种绝缘材料的性能和价格; 还要了解磁芯加工热处理工艺, 线圈绕制和绝缘处理工艺及变压器组装机工艺; 还要了解实现质量控制的检测参数和仪器设备; 还要了解生产管理的基本知识以及高频电源变压器的市场动态等等。只有知识全面的设计者, 才能设计出性能好, 成本低的高频电源变压器产品。

降低成本是促进高频电源变压器技术发展的一种推动力。为什么轻、薄、短、小成为高频电源变压器的发展方向? 原因之一是这样既能降低材料成本, 又能降低制造成本。提高工作频率, 可以使高频电源变压器的重量和体积下降。但是, 要克服高频带来的负面影响, 必须采用新的软磁材料和导电材料并增加抑制高频电磁干扰的措施, 因此, 对具体使用条件下的高频电源变压器究竟选用多

高的工作频率？要在综合考虑性能和总体成本后决定。提高效率，降低损耗发生的热量，可以减少高频电源变压器散热的表面积，从而使体积和重量下降。但是，降低损耗必须采用新材料和新工艺。因此，对具体使用条件下的高频电源变压器究竟达到多高的效率？也要在综合考虑性能和总体成本后决定。4

高频电源变压器的设计程序

高频电源变压器的设计程序，包括磁芯材料，磁芯结构，磁芯参数，线圈参数，组装结构和温升校核等内容。下面分别进行讨论。

4.1 磁芯材料

根据高频电源变压器的设计要求，选择软磁材料本来应当是设计程序的第一项。但是，现在一般都认为高频电源变压器应当选择软磁铁氧体，是自然而然的事情。许多有关高频电源变压器的论文，专著和教材，只针对软磁铁氧体进行讨论，而对其他软磁材料有时说明一下，有时只字不提。而且究竟选择哪一类软磁铁氧体，也不加以说明，好象大家都知道。《电源技术应用》2003年第6期中的两篇文章就是一例。

和任何软磁磁芯材料一样，软磁铁氧体有自己的优缺点。软磁铁氧体的优点是电阻率高、交流涡流损耗小，价格便宜，易加工成各种形状的磁芯。缺点是工作磁通密度低，磁导率不高，磁致伸缩大，对温度变化比较敏感。因此，有些高频电源变压器并不适合选择软磁铁氧体。例如，工作频率比较低（50kHz以下），功率比较大的高频电源变压器，如果选择软磁铁氧体，由于工作磁通密度低，用材料多，磁芯体积大，加工困难，易碎，成品率不高，显不出价格便宜的优势。又例如，工作频率高（500kHz以上），功率比较小的高频电源变压器，磁芯重量和体积本来都小，如果选择软磁铁氧体，必须用PW4、PW5类材料，价格也不便宜，与其他软磁材料相比，磁芯价格基本相当，有时反而由于体积大，而处于不利地位。即使在适合于软磁铁氧体的工作频率范围内，也要对选择哪一类软磁铁氧体更能全面满足高频电源变压器的设计要求，进行认真考虑，才可以使设计出来的高频电源变压器达到比较理想的性能价格比。

4.2 磁芯结构

高频电源变压器设计中选择磁芯结构时考虑的因素有：降低漏磁和漏感，增加线圈散热面积，有利于屏蔽，线圈绕线容易，装配接线方便等。

漏磁和漏感与磁芯结构有直接关系。如果磁芯不需要气隙，则尽可能采用封闭的环形和方框型结构磁芯，特别是工作频率高的电源变压器，因为，有一点漏感，就容易产生比较大的漏阻抗。封闭磁芯的磁通基本上集中在磁芯里面，漏磁小。同时，不论外界干扰磁场从哪个方向侵入，都在磁芯中分为两个方向通过，产生的干扰互相抵消。但是，封闭磁芯绕线困难，且环形磁芯散热要通过线圈，而且内层引出线也要穿过线圈引出，故必须加强绝缘。不封闭磁芯绕线容易，磁芯散热面大，可直接散热，引出线也容易。建议装线圈的磁路部分为圆柱形截面，减少平均匝长，降低损耗。矮胖圆柱形磁芯的漏磁和漏感比瘦高圆柱形磁芯大，一个原因是胖，圆柱形大，漏磁辐射面大；另一个原因是矮，上下两磁轭距离近，容易形成漏磁通的路径。不封闭磁芯中的气隙大小和位置与漏磁和漏感有密切关系。在保证完成功能所需的气隙条件下，尽可能减少气隙尺寸。因为，气隙尺寸增大，不但增加漏磁和漏感，还减少等值磁导率，增加激磁功率，对高频电源变压器工作不利。另外，气隙的位置

最好处于线圈的中间部位，可以起到减少气隙漏磁通的作用。

窗口面积的大小与线圈发热损耗和散热面积有关。窗口面积大，绕的电磁线截面大，电阻小，损耗小，发热小。同时，线圈外形尺寸大，散热面积也大。“辨析”一文中提出窗口面积利用问题，不能采取完全肯定和完全否定的态度。一般在留足工艺需要的窗口面积以后，希望尽可能把窗口面积绕满。如果不能充分利用窗口面积，将会造成磁芯尺寸和变压器外形尺寸不必要的增大，有可能要增加材料成本。因此，在高频电源变压器磁芯结构设计中，对窗口面积的大小，要综合考虑各种因素后来决定。“辨析”一文中关于填满磁芯窗口主要是受工频磁性元件设计的影响的理由并不成立。工频变压器的铜损比铁损大，为了增加线圈散热面积，磁芯与线圈之间留有足够的气隙，有时原绕组和副绕组之间也留有气隙。而不是“强调铁芯和绕组的整体性，因而不希望铁芯与绕组中间有气隙”。也不是“设计成绕组填满整个窗口，从而保证其机械稳定性”。线圈和磁芯既然不是一个整体，必须分别用夹件固紧，才能保证各自的机械稳定性。同时，为了保证足够的绝缘距离，线圈两端和绕组之间都必须留有气隙，不可能用绕组填满整个窗口。

为了防止高频电源变压器从里向外和从外向里的电磁干扰，有些磁芯结构在窗口外面有封闭和半封闭的外壳。封闭外壳屏蔽电磁干扰作用好，但散热和接线不方便，必须留有接线孔和出气孔。半封闭外壳，封闭的地方起屏蔽电磁干扰作用，不封闭的地方用于接线和散热。窗口完全开放，接线和散热方便，屏蔽电磁干扰作用差。

4.3 磁芯参数

高频电源变压器磁芯参数设计中，要特别注意工作磁通密度不只是受磁化曲线限制，还要受损耗的限制，同时还与功率传送的工作方式有关。

对变压器功率传送方式的磁通单方向变化工作模式， $\Delta B = B_m - B_r$ ，既受饱和磁通密度限制，又更主要地是受损耗限制。但是单方向变化的高频电源变压器工作时，沿局部磁滞回线来回变化，磁芯损耗比双方向变化沿大的磁滞回线来回变化小，只有它的 30%~40%。而材料测试时是按正弦双向激磁条件下变化的 ΔB 为 $2B_m$ 进行的。因此， B_m 可以取材料测试损耗值时，选取的 B 值高一倍以上。 B_r 受材料磁滞回线上的 B_r 限制，可以用开气隙的办法来降低 B_r ，以增大磁通密度变化值 ΔB 。虽然开气隙后，激磁电流有所增加，但增大 ΔB 后可以减少磁芯体积，还是值得的。对变压器功率传送方式磁通双方向变化工作模式， $\Delta B = 2B_m$ ，工作的磁滞回线包围的面积比局部回线大得多，损耗也大得多， B_m 主要受损耗限制，在双方向变化工作模式中，还要注意由于各种原因造成激磁的正负变化的伏秒面积不相等，而出现直流偏磁问题。可以在磁芯磁路中加一个小气隙，或者在电路设计时加隔直流电容，或者采用电流型控制来解决。

对电感器功率传送方式，磁导率是有气隙后的等值磁导率，一般都比磁化曲线测出的磁导率小。可以在确定磁芯结构后，直接测试它。“设计要点”一文中的高频电源变压器采用电感器功率传送方式。不知道为什么不提选用的磁导率，而提 BAC 或者 B_m ？也不提 BAC 或 B_m 与损耗的关系？

4.4 线圈参数

高频电源变压器设计的线圈参数包括：匝数，导线截面（直径），导线形式，绕组排列和绝缘安排。

原绕组匝数根据外加激磁电压或者原绕组激磁电感（储存能量）来决定，匝数不能过多，

也不能过少。如果匝数过多，会增加漏感和绕线工时；如果匝数过少，在外加激磁电压比较高时，有可能使匝间电压降和层间电压降增大，而必须加强绝缘。

副绕组匝数由输出电压决定。高频电源变压器主要用于高频开关电源。开关电源可以对输出电压进行调整，调整上限受允许的开关占空比限制。在从要求的负载电压计算变压器输出电压时，应考虑开关占空比，串联二极管压降和变压器的内阻抗压降。

导线截面（直径）决定于绕组的电流密度。绕组损耗（铜损）占总损耗比例比较大时，推荐电流密度取 $2\sim 4\text{A/mm}^2$ ，铜损占总损耗比例比较小时，推荐电流密度取 $8\sim 12\text{A/mm}^2$ ，但是，要经过变压器温升校核后进行必要的调整。还要注意的是导线截面（直径）的大小还与漏感有关。在同样匝数下，导线截面直径增加，内层排列的匝数减少，层数增加。而漏磁场分布靠近磁芯的内层大，外层小，与磁芯距离平方成反比例地衰减。这样，漏磁通大的内层交链的匝数减少从而使漏感下降。

“设计要点”一文中提出的绕组排列形式，是一般用的绕组排列方式：原绕组靠近磁芯，副绕组和反馈绕组逐渐向外排列。这种绕组排列形式并不理想。下面推荐两种绕组排列形式：

1) 如果原绕组电压高（例如 220V），副绕组电压低，可以采用副绕组靠近磁芯，接着绕反馈绕组，原绕组在最外层的绕组排列形式，这样有利于原绕组对磁芯的绝缘安排；

2) 如果要增加原和副绕组之间耦合，可以采用一半原绕组靠近磁芯，接着绕反馈绕组和副绕组，最外层再绕一半原绕组的绕组排列形式，这样有利于减少漏感。

绝缘安排首先要注意使用的电磁线和绝缘件的绝缘材料等级，要与磁芯和绕组允许的工作温度相匹配。等级低，满足不了耐热要求，等级过高，会增加不必要的材料成本。其次，对在圆柱形磁路上绕线的线圈，最好采用线圈骨架，既可以保证绝缘，又可以简化绕线工艺。还有，线圈最外层和最里层，高压和低压绕组之间都要加强绝缘。如果一般绝缘只垫一层绝缘薄膜，加强绝缘应垫 $2\sim 3$ 层绝缘薄膜。

4.5 组装结构

高频电源变压器组装结构分为卧式和立式两种。如果选用平面磁芯、片式磁芯和薄膜磁芯，都采用卧式组装结构，上下表面比较大，有利于散热

或者附加散热器，高度低，有利于安装在印刷电路板上。组装结构中采用的夹件和接线端子等尽量采用标准件，以便于外协加工，降低成本。

4.6 温升校核

温升校核可以通过计算和样品测试来进行。一般通过样品试验进行温升核算的比较多一些。如果样品试验温升不超过允许温升，可以通过。但是试验温升低于允许温升 15°C 以上，要对绕组的电流密度和导线截面进行调整，适当增加电流密度和减少导线截面。如果样品试验温升超过允许温升，则要对绕组的电流密度和导线截面进行调整，适当减少电流密度和增加导线截面。如果增加导线截面，窗口绕不下，要增加磁芯尺寸。如果样品试验磁芯温升超过允许温升，则要增加磁芯的散热面积，加大磁芯。

5 结语

《电源技术应用》2003年第6期主编寄语中说：“科学技术的发展历程犹如登山运动，每攀登一步，便会上升到一个新的台阶，新的台阶自有新的风光”。本文作者对此深表赞同。

高频电源变压器随着工作频率的提高，设计不断发生变化，不断出现新的软磁材料，新的磁芯结构，新的导线材料和绝缘材料，新的线圈结构和组装结构等等，不断出现新的设计方法，就象登山一样，不断攀上新的台阶。

登山要有目标。登山的目标是攀上顶峰。失去目标，登山会迷路。高频电源变压器设计也有目标，设计的目标是实现设计原则，在具体使用条件下完成具体的功能中追求性能价格比最好。失去目标，高频电源变压器设计也会误入歧途。

登山的道路不只一条。不管是从东西南北哪条道路攀登，只要能攀上顶峰，则该条道路就是可行的。同样，高频电源变压器的设计方法也不只一种。不管采用哪一种设计方法，只要能实现设计原则，则该种设计方法就不能说是概念错误的。

攀登山上山，放眼天外天！在登上更高的山后，会看见更大的天地，更好的风光。高频电源变压器设计发展到一个新阶段后，会设计出性能更好成本更低的产品来。让我们共同努力吧！