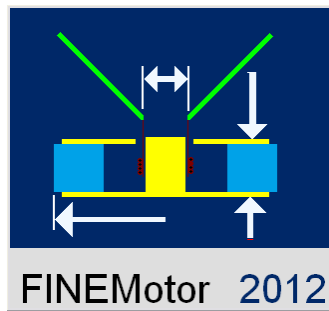
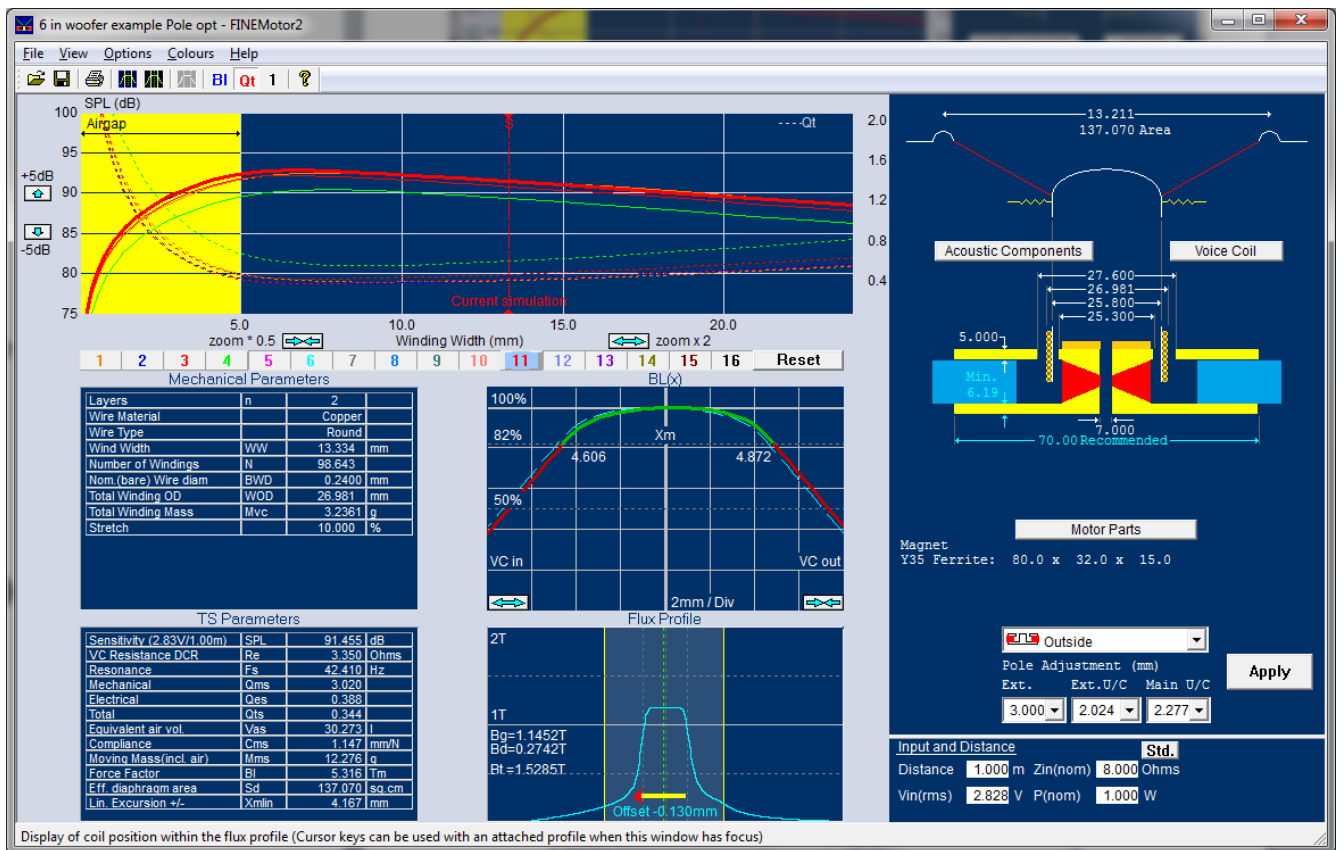


FINEMotor™



扬声器磁路系统及音圈设计程序

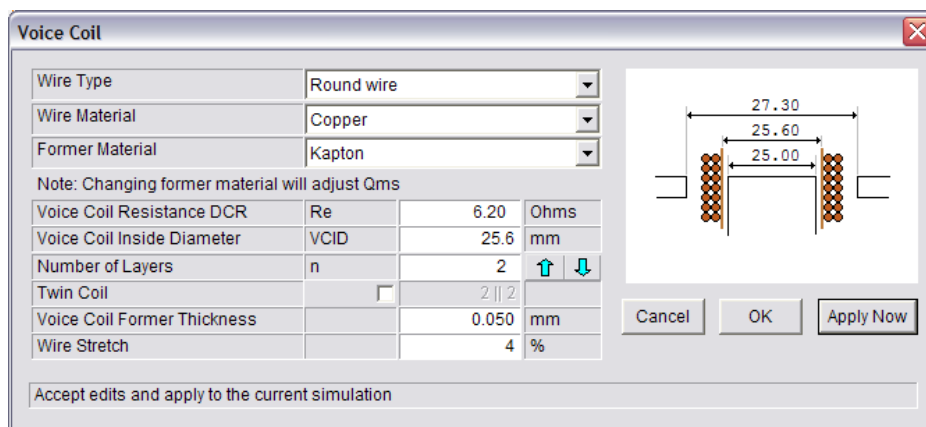
参考手册



FINEMotor 程序是模拟和设计各种喇叭单体的磁路和音圈的理想程序。这些单体不但包括中低音和圆顶扬声器而且还包括手机和耳机等。

6.5 英吋低音扬声器设计

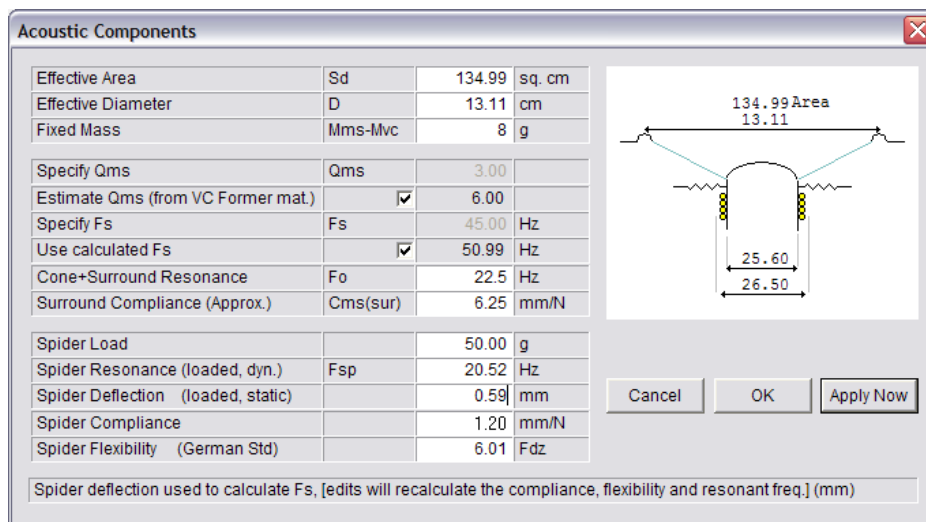
启动 FINEMotor，选择 "NEW"（新建）或打开文件 _Default.fm3。我们先试用一种常用的 9.75 mm 卷宽和 25.60 mm 内径的音圈。其音圈架的材料是 Kapton。按 "Voice Coil"(音圈)按钮，打开一个窗口，如下图:



选 2 层圆铜线音圈，然后设定直流电阻 $R_e=6.2$ 欧姆。再选定音圈架材料为 Kapton（这个材料可以用来代替所有绝缘音圈架）。将"Wire Stretch"(音圈线延展率) 设定成 4%，以符合实际使用的线圈。点"Apply Now"按钮。在屏幕左上角的窗口中，用鼠标将表示卷宽的竖线拖拽到 9.75 mm 附近。左下方"Mechanical Parameters"一栏中将显示卷宽"winding width"（缩写 WW）为 9.69 mm。线径为 0.17 mm。

注意: 通常在公称阻抗为 8 欧姆的系统中，直流阻抗 DCR 可以设定为 5.5 欧姆或者更小。这依然可以保证系统最小阻抗为 6.4 欧姆。因为系统最小阻抗 (Z_{min}) 通常要比直流阻抗高出至少 0.5 欧姆，而音圈中的感抗也会提供一个大约 0.3-0.5 欧姆的阻值。例如，一个公称阻抗为 4 欧姆的系统，可以使用直流阻抗为 2.5-3 欧姆，一样可以保证 3.2 欧姆的系统最小阻值。

按 "Acoustic Components"（声学组件）按钮，将会出现如下对话框：

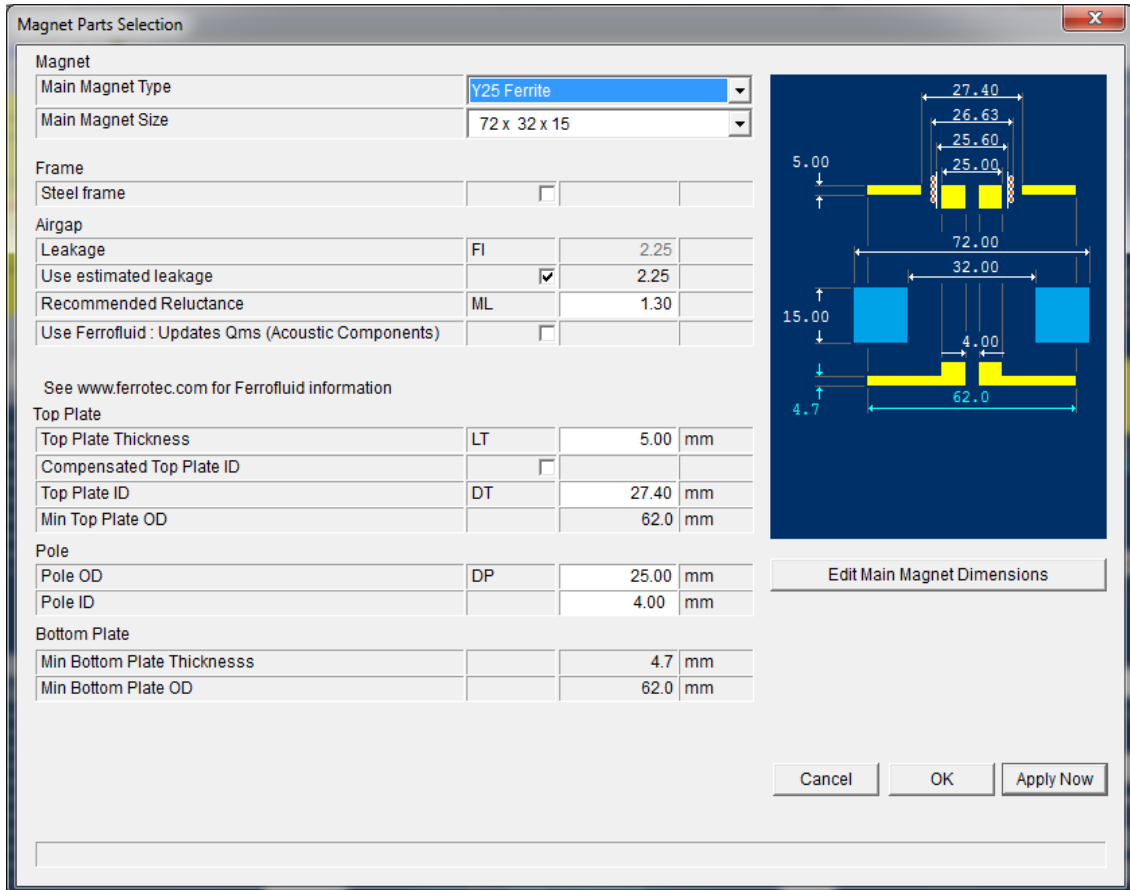


注意: 针对微型扬声器的设计，用户会用到高精度的数值。甚至要求数据显示出 4 位小数。在菜单栏上点"Options"（选项），选择"Display values with extra precision"（显示高精度的数值），即可达到这个要求。

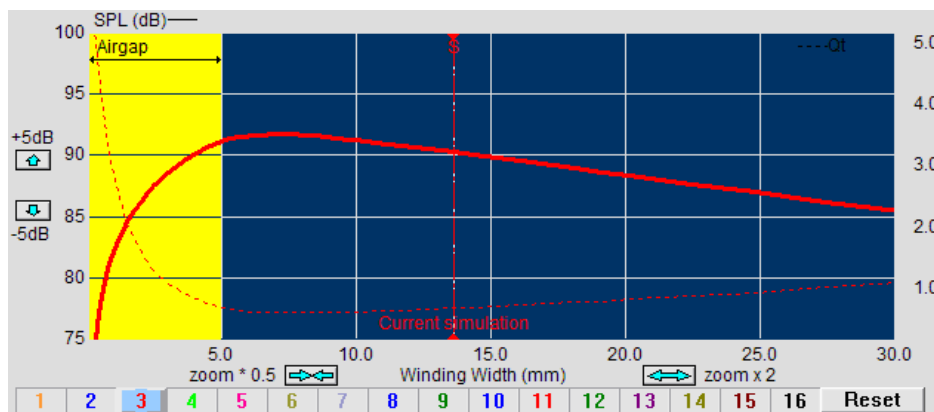
输入有效直径 $D = 13.11$ cm(包括悬边一半)以自动地计算出振动面积 S_d 。接下来，输入振动质量。它是除了音圈线以外的全部振动质量。这等于：一半(会动的)悬边 + 音盆 + 防尘盖 + 音圈（包括音圈架）+ 半个弹波 + 胶 + 空气负荷。我们知道这是 8 克。因为默认 Q 值 3 是针对典型的铝合金音圈架，所以我们使用 Kapton 时估计 Q 值自动更改为 $Q_{ms} = 6$ 。

因为不知道 F_s （共振频率），我们点选 "Use calculated F_s " 计算出 F_s 。音盆加悬边的共振频率 F_o 为 22.5 Hz。我们看到悬边的顺性已经被计算为 6.25 mm/N。我们想要使用变位为 0.59 mm（对应于 50g 的外力）的弹波，但是我们看见这样得出的共振频率 F_s 为 50.99 Hz。那太高了。改弹波变位为 1 mm 得到可接受的 F_s 为 41.31 Hz。

最后我们看一下磁铁系统。按 "Motor Parts"（磁铁组件）选定 "Use estimated leakage"（用预估磁漏）：



选择 70x32x15 FXD300 铁氧体磁铁，加上 27.20x5 mm 的华司（导磁上板）和现成的 T 铁。还可以通过选取 “Steel frame” 加上铁质盆架的影响。这会因为磁漏的增加而降低磁力 BL。在这里，我们先不选它。然后我们来看主窗口左上方的曲线图，如下：




这是系统主要曲线图。图中显示所有能满足前面我们输入的规格条件的各种可能卷宽的音圈。 竖直的虚线指示现在卷宽的数值。用鼠标向左拉动它，表示卷宽减小；向右表示增加。图中，最大卷宽是 30 mm。黄色区域表示磁隙“air gap”的大小。图中为 5 mm。所以 under-hung VC（卷宽长于磁隙的音圈）在黄色范围内；而 over-hung VC（卷宽短于磁隙的音圈）在黄色范围外。当卷宽随着鼠标拉动而改变的时候，随卷宽变更的喇叭 TS 参数也同步算出。

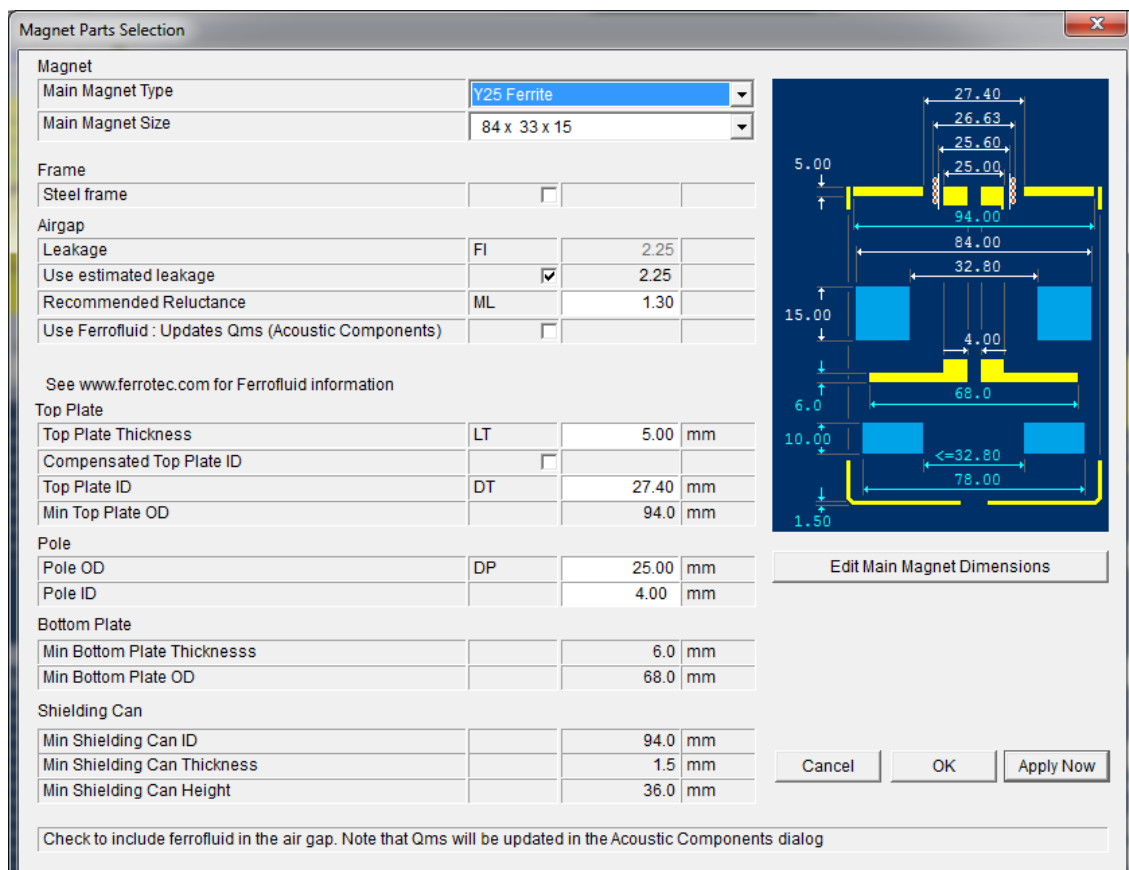
如果选择卷宽为 10 mm，我们得到 Q_{ts} 为 0.45，线性有效振幅 $X_{mas}(X_{mlin})$ 为 2.35 mm。该 Q 值对低音反射音箱来说太高了。针对这样的音箱，Q 值通常应该在 0.30-0.35 范围。让我们试一个比较大的磁铁:在 "Magnet Parts Selection"（选择磁铁尺寸）中，按向下箭头选磁铁为 84x33x15 mm。按“Apply Now”（应用）按钮，使之生效。

现在，磁力 BL 从 5.62 增加到 7.14 Tm，而 Q_{ts} 变为是 0.29。这个值比较理想。我们甚至能用更长的卷宽，如 15.5 mm。它对应的 X_{max} 是 5.28 mm，同时，仍保留低的 Q_{ts} 为 0.33。然后，可以调整音圈的初始位置，以得到对称的 BL 曲线。这在后面的章节中有详细描述。

注意，此时 T 铁厚度会自动从 5 增加到 6.3mm，这在磁铁系统简图中有显示。

现在，我们需要给这个低音加上防磁罩。这在 FINEMotor 中是很简单的事情。只需要点击 **Out. Shld.**  按钮，就可获得一个加防磁罩的磁铁，同时，所有 TS 参数保持不变。在“Motor Parts”里面可以找到相关的数据。而且，在“Motor Parts”里面也可以定义极柱（导磁柱）的中孔的直径（Pole ID）。这个例子中，极柱（导磁柱）中孔直径为 4 mm。如果中孔太大，极柱（导磁柱）会变红，这意味着有磁饱和发生。当磁饱和刚刚超过临界状态的时候，磁场的损失还是可以接受的，因此一般依然可以继续使用该设计。

注：此时“Min Bottom Plate OD” T 铁底层（导磁下板）的外径从 74mm 自动更改为 68mm，以达到最好的防磁效果，和提供最高的 BL。



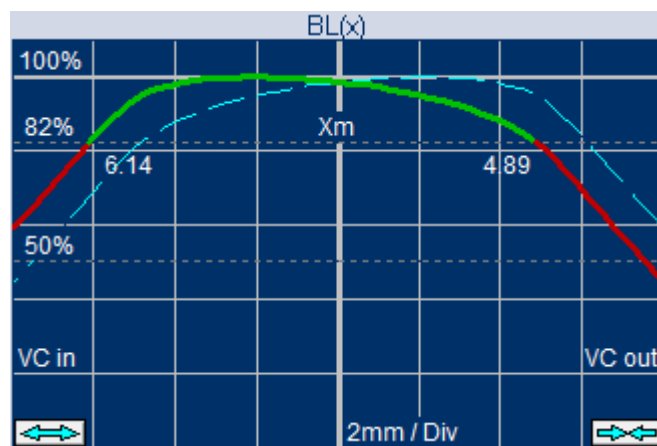
此例存在 6,5wfr1.fm3 文件中。它可以在安装光盘或者如下路径中找到。 C:\Program Files\LoudSoft\FINEMotor20\Examples。

另外一个不同的设计是试用 4 层的音圈而非磁铁变大。再回到“Motor Parts”，选择 72x32x15mm 磁铁。再点开“Voice Coil”，选 4 层的音圈。然而，这将使得音圈更厚，因此我们必须修正磁隙。

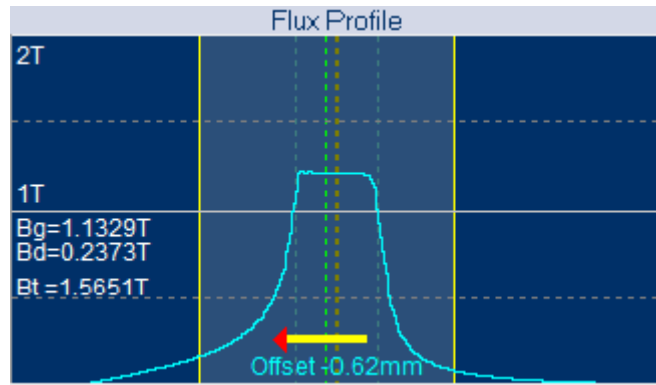
但是，如何控制磁场和 TS 参数呢？我们可以在“Motor Parts”中选取“Compensated Top Plate ID”（自动调整华司（导磁上板）内径）。这样会固定的音圈外径与华司（导磁上板）内径的间隙并重新算出磁隙磁场。输入 0.35 mm 的间隙，然后退出“Motor Parts”，进入“Voice Coil”中选 4-layers（4 层音圈）。按“Apply Now”生效。

在曲线上选择 10 mm 的卷宽，可看到现在 Qts 是 0.29。如果我们选卷宽为 14.5 mm，仍然有足够低的 Qts 值 0.34，且 Xmax 还有 4.78 mm。注意，为了维持预设的间隙，华司（导磁上板）内径 ID 自动增加。因为音圈质量比较大，得到的共振频率 Fs 变低。这个例子保存在 6,5wfr2a.fm3。

FINEMotor 可以将磁力 BL 的非线性变化对应音圈初始位置 (x) 的函数，用曲线表示出来。换句话说，就是随着音圈初始位置的变化，BL 值也不同。下图中显示在音圈初始位置的非对称的 BL 曲线（左右分别对应磁铁内外）。虚线是 BL 曲线的镜像曲线。当虚线与实线重合时，就表示 BL 曲线是左右对称的。

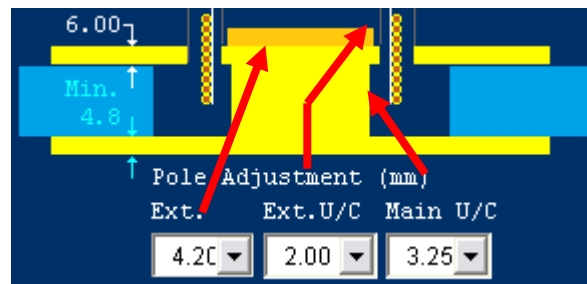


现在回到当初的 2 层音圈。如上图所示，我们可以看到 TS 参数都合适，但是，BL(x) 曲线不对称。当音圈移向磁铁内部的位置时，BL 要高一些。这是由于极柱（导磁柱）跟华丝等高，而导致大量的磁漏。BL 曲线低于 82% 的部分显示为红色，以上的部分为绿色。绿色表示失真在可接受的范围内。同时，可接受的最大位移 Xmas 也显示在图中。上图中显示的 -Xm（内侧最大位移）为 6.14mm，+Xm（外侧最大位移）为 4.89 mm。



大部分类似的非对称都可以通过设置音圈初始位置偏移量来改善。如上图，在磁通量图中，用鼠标左右拉动音圈初始位置，以获得对称的 BL 曲线。此例中，当偏移量为 -0.62 mm 的时候，可获得对称性最好的 BL 曲线。同时，在 BL 曲线图中 $-X_m$ 和 $+X_m$ 都等于 5.52 mm 。这个值高于 over-hung（卷宽长于磁隙）音圈给出的线性位移（ 5.28 mm ）。这个例子存储于 6,5wfr1a.fm3。

但是，BL(x) 曲线依然不是最好的。因为，完美的曲线应该是绿色部分的中心为水平线，而在绿色转为红色的区域是很陡的斜线。所幸，我们还可以通过改变极柱（导磁柱）的设计来调整 BL 曲线。下图显示的就是极柱的剖面图。



极柱的形状和尺寸对 BL 的线性，失真和线性位移都是很重要的。在 FINEMotor 中，我们可以微调极柱的尺寸。超过一万八千个内置的有限元模型可以给用户足够的选择。用户可以用旋转鼠标中键，以选择需要的尺寸。

按上图所示，用户可选择如下选项，并用鼠标中键进行微调：

- 极柱延伸(左侧下拉菜单)
- 极柱延伸部分的侧切（中间下拉菜单）
- 极柱下部的侧切（右侧下拉菜单）

除此以外，用户还可以调整极柱的中心孔（见第 5 页）。

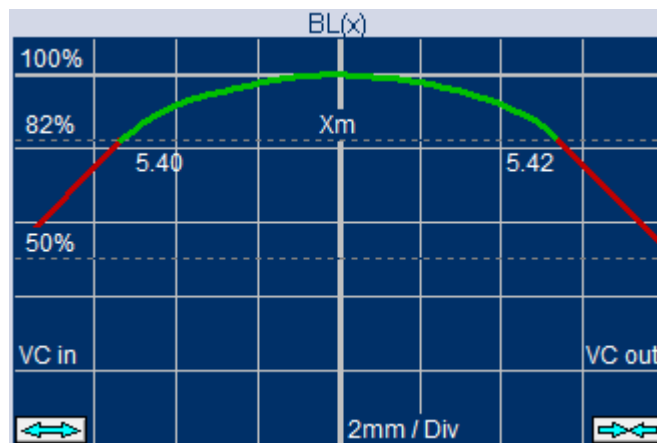
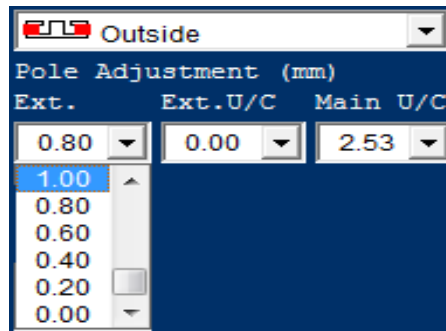
点下面的链接，可以看到如何调整极柱尺寸的动态演示：

[http://loudsoft.com/loudsoft/my%20files/FINEMotor%202012%20Demo CN.wmv](http://loudsoft.com/loudsoft/my%20files/FINEMotor%202012%20Demo%20CN.wmv)

**注意：留意音圈直径过小和极柱中孔过大。因为会有磁饱和和发生。下面的例子显示，极柱（导磁柱）和华司（导磁上板）出现磁饱和（红色暗示磁饱和）。*

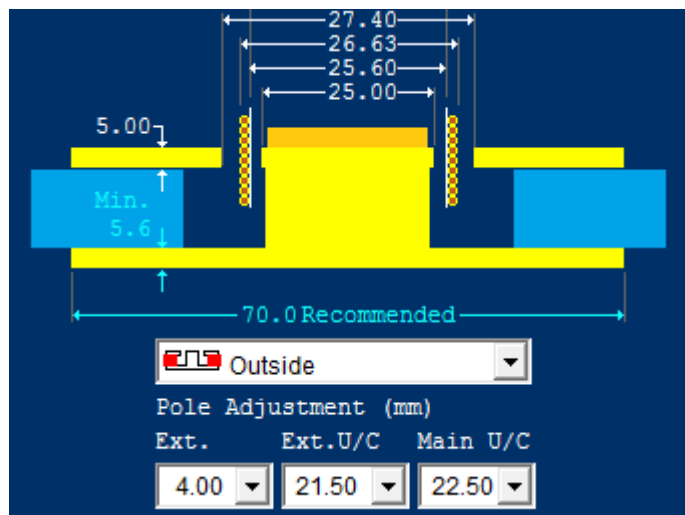


首先，我们试着延长极柱。当用户选择或者用鼠标中键调整延伸尺寸的时候，BL 曲线随之自动更新。

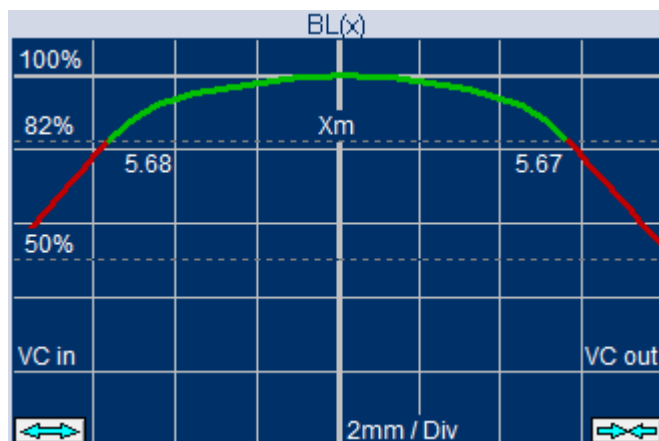


通过调整极柱延伸，我们可以得到一个几乎对称的 BL 曲线。可以看到，左右 X_m 值都是差不多在 5.4 mm。这个例子存在 6,5wfr3a.fm3。这个设计对超重低音来说已经不错了。但是，绿色曲线的中心不平。

用户可以通过修改另外两个选项：Ext. U/C（极柱延伸部分的侧切）和 Main U/C（极柱下部侧切），得到更好的结果。

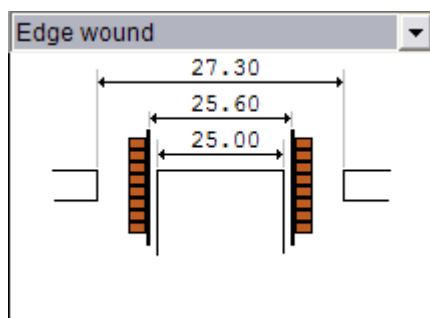


如上图所示，极柱延伸为 4 mm。延伸部分侧切到直径 21.50 mm，而极柱下部侧切到直径 22.50 mm。这个设计得到下图所示的 BL 曲线。跟之前的设计比起来，它将更多的磁力线集中在磁隙。从而，BL 曲线在对称的同时，拥有更平的中心部分（图中的绿色部分）。这样的设计也有副作用。就是 BL 值稍微变低，而 Qts 值升高。这个例子存在 6,5wfr4a.fm3。

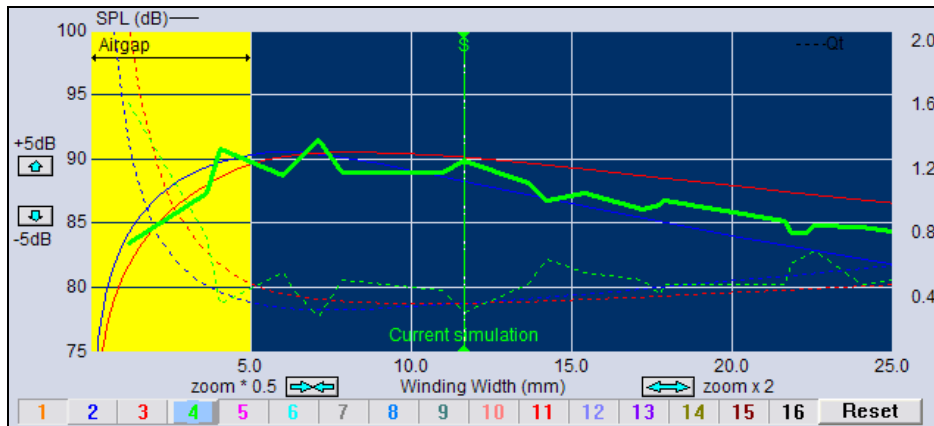


当一个设计完成以后，用户也可以输出 FINEMotor 文件 (*.fm3) 到 FINEBox。这样可以直接模拟出该设计在音箱中的效果。

假设需要设计一个大功率高灵敏度的磁路系统，我们通常会考虑使用扁平绕线的音圈。举个例子，选择音圈层数为 1，并选中“Compensated Top plate ID”，这样华司（导磁上板）内径会自动调整，以适应音圈厚度的变化。



一个 1 层扁平绕线的音圈会比圆形绕线的音圈多若干圈。因为如左图所示，线与线之间没有缝隙。尤其是对照于 4 层圆形绕线音圈，一层扁平绕线音圈将增加 BL 值，减少感抗。另外，由于线与线之间更加紧密，而且 1 层的散热性也好，所以它所承载的功率也会提高。



绿色模拟曲线(4号)具有较高的灵敏度和 BL。这个设计使用小磁铁 70x32x15 FXD300，因此给出一个较低的 Qts 值 0.33。。此例存于 6,5wfr5a.fm3。扁平绕线的音圈通常比较难设计。但 FINEMotor 将结果有序的罗列出来，从而使设计变得简单。虚线显示 Qts 。4 号的设计对应一个很低的 Qts。也可以通过看 BL 曲线来辅助设计。

为什么绿色曲线不平滑？因为绕线的宽/厚比不同。图中显示的卷宽约 12 mm 是一个不错的设计。因为此时的宽/厚比为 0.060x0.65 mm。对应的绕线非常平滑。

注意：图中的 1 号曲线被隐藏了。任何曲线都可以被隐藏，只需要用鼠标右键点击图下方那一排中相应的序号即可。

关于磁漏，我们通常使用默认值“Use Estimated Leakage”（用预估磁漏），因为它能很快做出一个大致正确的模拟。如果要得到精确的结果，需要用磁场有限元素分析软件，如 MagNet, FEMM 或其它程序计算出的磁力线分布特性，并输入到 FINEMotor。可以用 CTRL+V 从 FEA 软件中复制一个磁铁的磁通量数据到 FINEMotor 中；也可以点  按钮从一个文本文件中输入。这样的情况，同样可以更改音圈初始位置的偏移量，但是磁铁尺寸和极柱尺寸都不可更改，因为他们是在 FEA 软件中定义的。

但是，有限元磁场模型也会得到不是很正确的结果。因为实际样品中的材料特性通常跟数据库中的不同。不同的磁铁生产商提供的产品也会略有不同。

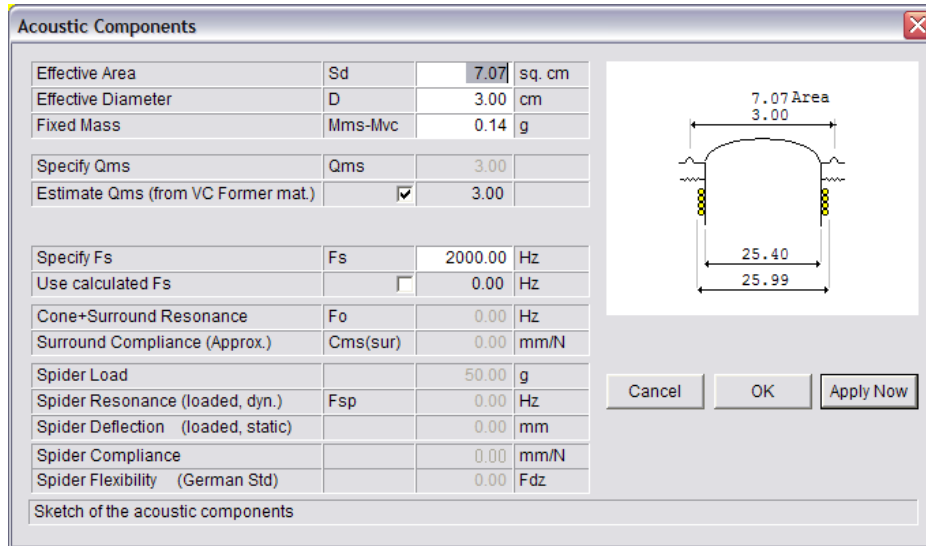
因此，用户应该参考实测的数据来修改模型的数据。例如，当模型的 BL 看上去跟实测的不同时，可以在“Motor parts”选项中，修改磁漏 FL 的数值，使模型更接近实际情况。

注 1：鉴于上述原因，用户通常会发现从磁铁有限元设计软件中得到的磁通量数据比实测的要高一些。现在我们知道，那是因为磁铁实测的结果比标准值偏低。FINEMotor 将这个因素考虑在计算中，并对内置的 FEMM（磁铁有限元模拟免费软件 <http://www.femm.info/wiki/HomePage>）的磁通量数据进行修正。

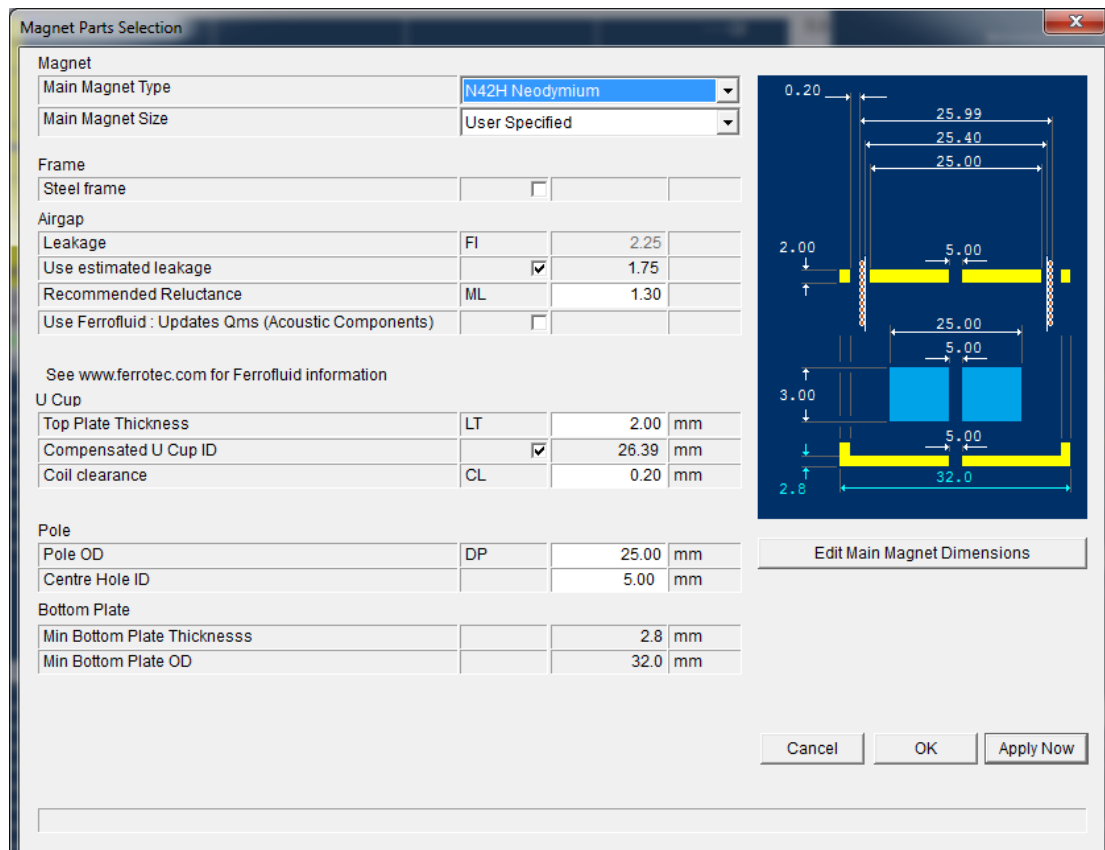
注 2：测量 TS 参数要确保正确！低电压测试或许会由于弹波的非线性而得到错误的结果。尤其在测试微型扬声器单体的时候，共振频率 Fs 也许会比在 2.83V 测试的时候高出 10-30%！（LOUDSOFT 的 FINE QC 品检系统可以在相同电压等级测试声压级和阻抗，以及 TS 参数。见 www.loudsoft.com。）

1 英寸圆顶高音扬声器设计

在 FINEMotor 中，用户也可以设计内磁模式的扬声器单体。在本章中，我们将设计一个钕磁铁 1 英寸圆顶高音。选择“Inside Motor”（内磁模式），然后点“Acoustic components”（声学组件），输入下列资料：

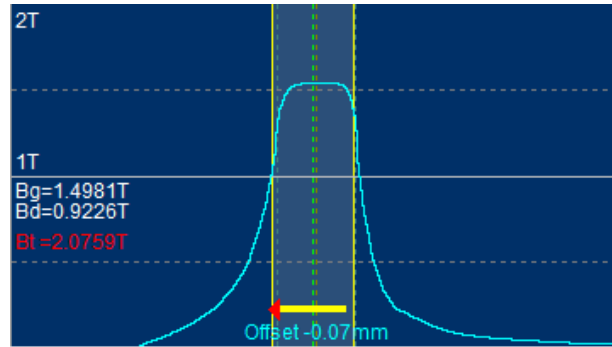


音圈是直流阻抗 (R_e) 为 6.3 ohms 的 2 层铜线。线长延展 4% 将会得到接近实际的 2.1 mm 卷宽。系统预估的 Q_{ms} 值为 3。

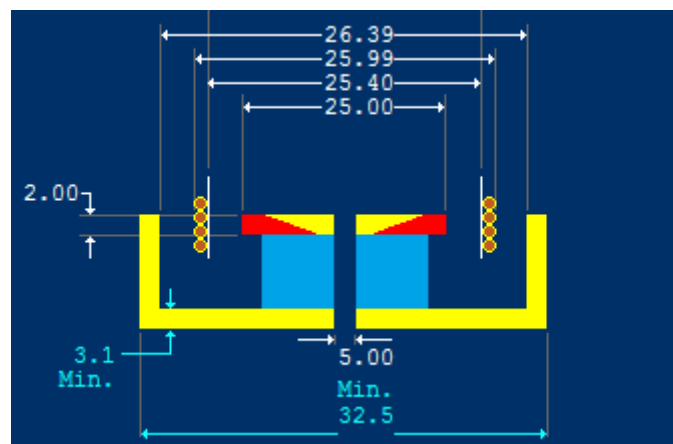


根据图示参数设置磁铁。规格为 $\phi 25 \times \phi 5 \times 3 \text{ mm}$ 的 N42H 钕磁铁可提供 87.34 dB 声压级。这种磁铁是具有耐高温性能的最强力的钕磁铁。此例存于 1in Neo Dome a.fm3。

如果我们还想进一步增加灵敏度，可以增加磁铁厚度，比如增加到 4 mm。这可以在“Edit Magnet Dimensions”（编辑磁铁尺寸）窗口中进行。可以看到声压级变为 88.14 dB，比原来仅仅增加了 0.80 dB。

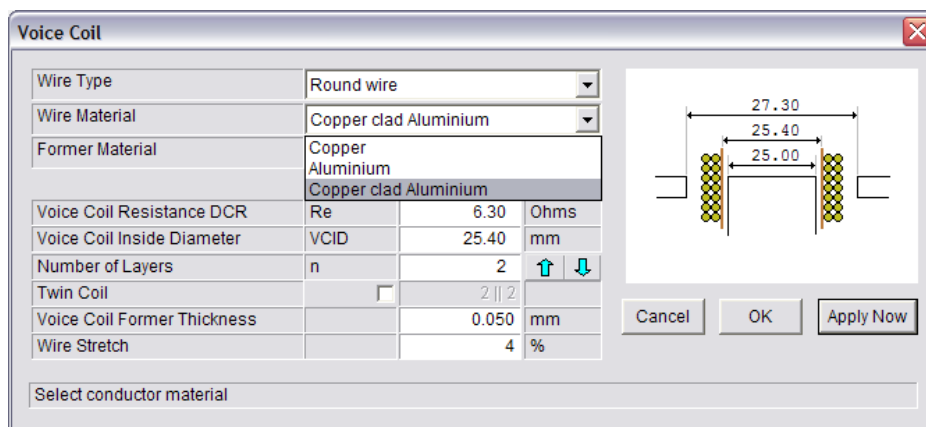


声压级没有随着磁铁厚度的增加而大幅升高的原因有两个。上图显示磁隙中的磁通量，其左侧显示的 $B_g = 1.4981 \text{ T}$ 是磁隙中的平均磁通量； $B_d = 0.9226 \text{ T}$ 表示磁铁的工作点。对于钕材料来讲，这个 B_d 值是很高的。通常应该在 0.5-0.8 T 的范围。因此，即使增加磁铁的厚度，也不可能得到更大的 BL。这是原因其一。




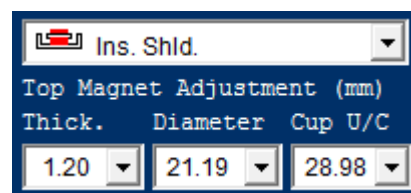
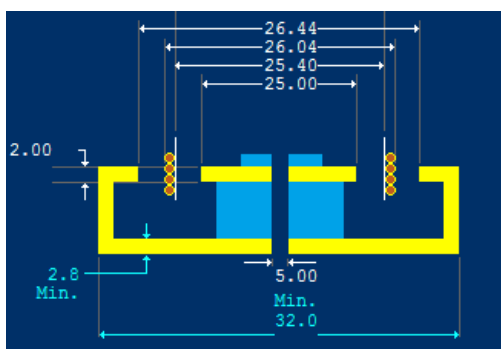
第二个原因是因为华司（导磁上板）的磁饱和。变红的华司，和红色 $B_t = 2.07 \text{ T}$ 都指出有磁饱和发生。 B_t 显示华司中不考虑饱和的磁通量密度最大值。一般的（1010）铁材料在 2.0T 饱和，但是它在 1.8T 时就已经受限制了。此例中，由于铁材料的磁饱和，SPL 丢失了 0.5 分贝。如果 B_t 更高的话，这个损失就更大。因此，设计中要避免使用很薄的华司。

接下来，我们换一种线圈的绕线，看看能否增加灵敏度。改回到先前用的磁铁后，我们在“Voice coil”（音圈按钮）中选择 CCAW（铜包铝）绕线。这种绕线比较轻，而且外层的铜使得焊接更加容易。注：当前仿真模型是 2 号。按“1”回到第一个仿真模型，下一个将会是 3。



使用直径为 0.110 mm 的铜包铝绕线可以将声压级提升 1.6 dB，从而变为 88.91 dB。此例存于 1in Neo Dome CCAWa.fm3。

还有一种办法增加灵敏度。在华丝上安置另一个钕磁铁，可以把磁力线集中起来，从而形成磁屏蔽。与此同时，灵敏度也会增加。可以在磁铁系统类型下拉菜单中，选择  Ins. Shld.来实现这个设计。



然后，在上图三个下拉菜单中选择不同的尺寸。内置的有限元模型会给出相应的 BL（磁力）曲线。这三个下拉菜单分别是：华司（导磁上板）厚度，华司（导磁上板）直径和外圈导磁板的内切。旋转鼠标中键也可以更改尺寸，同时，BL（磁力）曲线同步更新。按图中的尺寸设定以后，SPL 灵敏度达到 90.54 dB。此例存于 1in Neo Dome SHa.fm3。

最后，我们可以将磁液填入磁隙。磁液的主要影响是促进导热，次要影响是增加阻尼。增加阻尼的多少取决于磁液的粘性。点“Motor parts”按钮，选中“Use Ferrofluid: Updates Qms (Acoustic Components)”，会出现新的一行“Ferrofluid Viscosity”。默认值为 1000cPs. (Centipoise)。这是一个相对通用的值。它提供的机械阻尼将减小 Qms。这在“Acoustic Components”（声学组件）窗口中可以看到，如下图。

Acoustic Components			
Effective Area	Sd	7.07	sq. cm
Effective Diameter	D	3.00	cm
Fixed Mass	Mms-Mvc	0.18	g
Specify Qms	Qms	3.00	
Estimate Qms (from VC Former mat.)	<input checked="" type="checkbox"/>	3.00	
Adjust Qms for ferrofluid	<input checked="" type="checkbox"/>	2.51	

此例中，我们使用系统预估的 Q_{ms} ，其值为 3.00。加入 100cPs 磁液，可使 Q_{ms} 下降 2.51 (见“Adjust Qms for Ferrofluid”一栏)。磁液的阻尼使 Q_{ts} 从 0.96 降到 0.91。此例存于 1in Neo Dome CCAW SH FF.fm3。

考虑到高音在共振频率有较大的冲程，这个阻尼将减小冲程，从而可以使高音承载更大的功率。另外，还可以降低音圈外层的压力。

磁液的阻尼作用也可以用来减少分音器的组件。在某些情况，可以用一阶分音器代替二阶分音器。从而在在平行电路中节省至少一个组件。我们建议使用 FINE X-over 设计分音器。在 FINE X-over 中，实际分配到每个组件的功率都可以计算出来。

注：为了避免磁液喷出，通气是很有必要的（就是磁液不要填满，要有缝隙）。如果设计不好，磁液封闭空间，会导致较高的共振频率。LOUDSOFT 提供高音优化的专业咨询。

对于成本要求很苛刻的设计，少用一点磁液也许是个好的选择。例如，100 cPs 的磁液只有很小阻尼，但依然提供有效的热传导。因为磁液的热传导比空气有效的多，所以可以有效的降低音圈的温度。因此，随着承载功率的增加，音圈阻抗增加的比较缓慢。

LOUDSOFT 的 FINEBox 也可以模拟传热的影响和扬声器的单体承载的功率。当用户将 FINEMotor 的模拟结果输入到 FINEBox 的时候，磁液的热传导也会计算进去。

磁液使用的量需要恰到好处。太少则导致低性能（在频率响应曲线上有时会出现共振频率附近出现两个峰值）；太多则增加成本，而且有喷出的危险。当然，FINEMotor 的使用者不用担心这些，因为正确的使用量在 FINEMotor 中已经注明。见下图的最后三行。

Layers	n	2	
Wire Material		CCA	W
Wire Type		Round	
Wind Width	WW	7.03	mm
Number of Windings	N	70.21	
Nom.(bare) Wire diam	BWD	0.170	mm
Total Winding OD	WOD	26.30	mm
Total Winding Mass	Mvc	0.529	g
Stretch		4.00	%
Ferrofluid Volume	FF vol	72.38	uL
Ferrofluid Saturation	FF sat	200 - 100	Gauss
FerroTec recomm. Viscosity		1000.00	Cps

磁液的体积根据 FerroTec 标准计算。FINEMotor 也计算出磁液饱和度。如果应用于长冲程大功率，请使用给定范围内的较高的值。

如需要关于磁液(包括磁化, 材料和粘合的兼容性等)更详细的资料或者专业咨询, 请联系 www.ferrotec.com 。

视频演示:

<http://loudsoft.com/loudsoft/my%20files/FINEMotor%20Demo%20video.wmv>

<http://loudsoft.com/loudsoft/my%20files/FINEMotor%202012%20Demo.wmv>

注:所有的上述例子包括视频演示文件都存于 *FINEMotor* 光盘上。

Peter Larsen

翻译: 栾宇