CDCM HD 白皮书

• 什么是 CDCM HD 技术？

CDCM HD（Comprehensive Dynamic Circuit Modeling HD，高解析动态复合电路建模）技术是 Hotone 的研发团队推出的新一代建模技术。

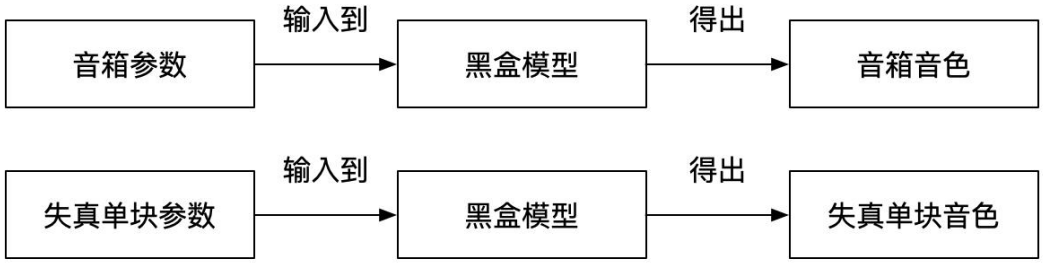
和 Hotone 的上一代 CDCM 建模技术相同，CDCM HD 技术对被建模对象上的每一个元件进行建模，搭建一个会随着乐器输入信号动态变化的模型，力求最大幅度还原被建模对象的声音特点。为了进一步提升建模算法的声音品质、带来更加真实的产品使用体验，Hotone 的研发团队在 XTOMP、Binary、VStomp 等一系列产品技术积累基础上对建模技术和建模方法做了进一步改进和提升，由此 CDCM HD 应运而生。相比起上一代 CDCM 建模技术，CDCM HD 建模技术能够更真实地反映出设备的真实音色特性、元件状态变化带来的声音变化，音色的控制参数也更加精准，带来了更加富有动态、临场感和深度的音色，演奏体验也更加真实、自然，受到海内外玩家的广泛好评。

目前主流的建模技术可以分为两大类：黑盒建模（Black Box Modeling）技术和白盒建模（White Box Modeling）技术。那么，这两种建模技术各有什么优缺点？CDCM HD 建模技术又有什么不同？下面我们将逐一说明。

• 黑盒建模技术和其优缺点

一、定义

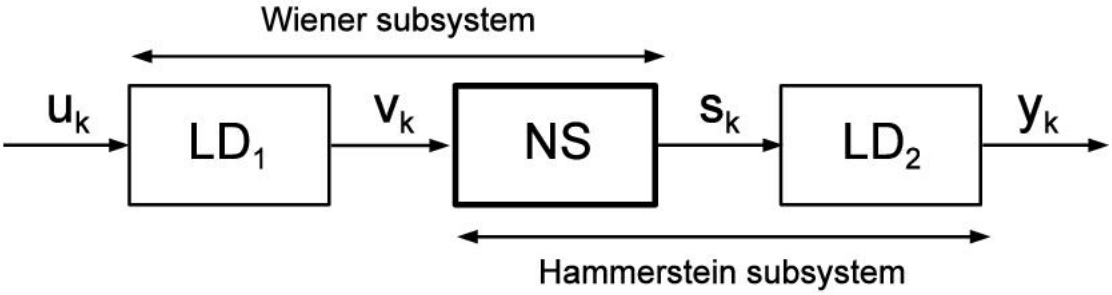
所谓的黑盒建模是指**使用一个公有的模型来表示一类失真电路的建模方法，这个失真电路可以是某一单块，也可以是音箱。**这个公有模型可以针对不同的被建模对象接收不同的参数，通过最优化算法求解出对应的数据，从而实现匹配不同设备音色特点的目的。



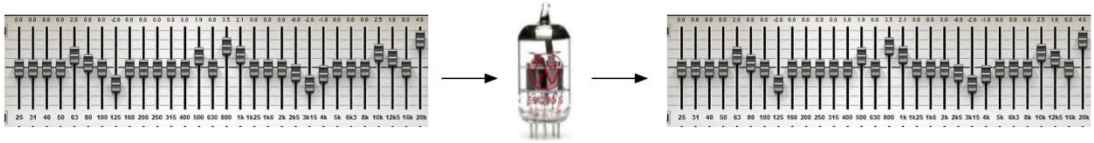
二、模型选取

黑盒建模中最重要的部分是黑盒模型的选取，这一点对最终结果的影响巨大：过于简单的模型将无法尽可能多地匹配不同类型的失真电路；过于复杂的模型将会导致过于复杂的算法和过大的运算量，导致处理器难以负担。因此，在这一过程中要对模型进行取舍。

最常用的黑盒模型就是 Wiener-Hammerstein 模型，如图所示：



Wiener-Hammerstein 模型是由 Wiener 子系统和 Hammerstein 子系统构成的，其中，LD1 和 LD2 表示线性部分，可以将它简单理解成 EQ，它会修改输入信号的频响；NS 表示非线性部分，可以将它理解成非线性器件（例如二极管，电子管），它会改变输入信号波形的形状，从而产生削波失真。



Wiener-Hammerstein 模型能得到广泛应用是因为它可以简单高效表示大部分失真电路的模块功能（虽然不能表示其电路拓补结构）。

三、模型实现

这里继续使用 Wiener-Hammerstein 模型为例说明。

（1）使用数字滤波器实现线性系统（LD1、LD2）的建模；

（2）使用某一手段（如映射函数，Map Function）实现非线性系统（NS）的建模；

对以上模型的参数进行求解，就得到了建模的初步音色。然而，这样的音色还需要进行进一步动态调整，这时候需要：

（3）使用被建模对象做对比。

在反复对比后，得到最优结果，自此建模完成。

四、黑盒建模技术的优缺点

黑盒建模的优点十分明显：

1. 建模过程是完全自动的，只需要测量输入输出信号，通过最优化算法就可以自动匹配合适的参数并还原设备的音色。建模过程中不需要设备的电路图，也不需要相关的模拟电路领域知识。

2. 黑盒建模算法具有一定的泛用性，一套成熟的黑盒算法可以构建不同设备的建模，极大的节省了算法开发和维护成本。

然而，现阶段的黑盒建模也具有一些问题：

1. 模型复杂度和算法复杂度的问题

以常见的 Wiener-Hammerstein 模型为例：它实只能对一部分的电路进行黑盒建模，对于复杂的电路则不能简单用该模型表示（如音箱箱头的电路，其前后级都会产生非线性），如果采用复杂模型，则模型的参数数量、求解最优值时的运算量都会陡增。这样我们就会陷入到开始提出的模型复杂度和算法复杂度取舍的问题中：模型过于简单，建模的效果不理想；模型过于复杂，求解参数的过程将变得十分困难。

2. 可变电路元件的问题

从上文建模过程可以看出，黑盒建模其实只还原了某一设备在某一特定设置下的音色；随着旋钮的调整，被建模对象的状态发生变化，这意味着在同样输入信号的前提下模型也需要发生变化，此时就需要再次求解新的参数，相当于重新建模。这如同我们拿着相机对一个连续的动作拍了一张照片，只捕捉到某一时刻的瞬态，并不能展现整个动作的全貌。

如果测量多个值并进行处理呢？回到拍照的例子当中来：我们可以通过拍摄一系列的照片、使照片按照顺序排列并翻动照片以达到近似还原整个动作的目的，但是这样做要拍很多很多

照片；如果只拍少量照片的话还原结果又会有很大误差。黑盒建模也是如此，如果对旋钮的不同位置做测试，则测量数据会非常庞大（事实上大多数黑盒建模的产品没有这么做）；而且即便如此，最后得到的效果还是会不太理想，只能模拟出旋钮的大致作用，无法精确还原因旋钮变化而导致的频率响应和相位响应的变化。

3. 电路拓扑结构的问题

以音箱上的临场度（Presence）旋钮的机制为例：有的是靠独立的滤波器衰减高频实现（一般写作 Cut 旋钮），有的是与 Tone Stack EQ 部分相互作用，有的是靠调节后级负反馈的量实现（大多数音箱）。黑盒模型由于其模型通用性，无法准确体现电路拓补结构，也就不能够准确体现不同设计下临场度旋钮对音色的影响，结果就是用户会感觉调节起来都差不多，无法准确还原被建模对象的真实特点。

总结：

- 现阶段的黑盒模型适用于还原固定不变的音色。
- 现阶段的黑盒模型难以精确还原含有可变电路元件的电路。
- 现阶段的黑盒建模难以还原由于不同电路结构差异所造成的音色差异。

• 白盒建模技术和其优缺点

一、定义

白盒建模与黑盒建模正好相反：在黑盒建模中认为系统的内部结构是未知的，所以仅从输入输出信号之间的关系中提取出必要信息；而白盒建模则需要知道系统内部结构的所有信息，包括电路结构、元器件特性等，所以白盒建模也被称为基于电路的仿真技术。

二、模型选取

白盒建模中，模型选取的就是被建模对象的电路本身。通常建模过程就是先对电路结构进行拆分，将一个复杂的系统拆分为多个简单的子系统，分别完成建模后，再按照顺序拼接起来。

三、模型实现

1. 线性部分

白盒建模可以对电路的线性部分（如 Gain、EQ、Master 等旋钮）进行精准的符号分析（Symbolic Analysis），并计算出对应的数字滤波器系数，从而还原电路的频率和相位响应。

而对于非线性部分，则可以采用 DK-method、Wave Digital Filters 等方法对非线性部分进行数值求解。

四、白盒建模的优缺点

白盒建模的优点也十分明显：

1. 可以体现设备差异性。白盒建模完全遵循设备的电路结构，可以最大程度上反映出由于电路结构的差异而导致的不同设备之间的音色差异。

2. 白盒建模结果可自由定制。由于白盒建模本身就是一次对电路的仿真，所以可以在遵循电路原理的基础上，对建模电路进行一定程度的修改（例如自定义电路元器件的值），以达到更好的声音效果。

3. 白盒建模的更加简洁、准确。对于含有可变元件的电路，相比黑盒建模的复杂模型，白盒建模的方法更加简洁，而且对旋钮的频率、相位响应还原更加精准。

同样，现阶段的白盒建模也具有一些问题：

1. 过度依赖电路图

白盒建模必须要知道电路的所有信息，这也导致了这种建模的方法极度依赖电路图纸，如果无法获得被建模设备的完整电路图，得到一个合宜的建模结果也就变得非常困难。

2. 建模过程繁琐

如前文所说，如果无法获得被建模设备的电路图，就需要拆开被建模对象实物并对其电路进行研究，这一过程十分耗时且相当繁琐。其次，由于每个设备的电路结构和元器件都不同，所以没有一套通用的方法完成建模，这意味着每对一个不同的设备进行建模都有相当大的工作量。

3. 非线性部分实时求解困难

白盒模型的非线性部分因为其高计算复杂度和可变计算复杂度的缘故，实时求解是十分困难的，必须要在时间复杂度或空间复杂度上做取舍。有一个解决办法是以查找表的形式预先将

求解近似值存储在 DSP 的内存中，然而这个过程需要大量内存空间，且同样会对整个数字平台造成不小的负担。

总结：

- 白盒建模过程复杂繁琐。
- 白盒建模可以更好地反映不同电路的特点。
- 白盒建模可以精准还原线性电路，但非线性部分计算量过大，很难实时求解。

• CDCM HD 建模技术

简单阐述了传统白盒、黑盒建模技术的优缺点后，我们再来看 CDCM HD 建模技术。
CDCM HD 建模技术是一套白盒建模与黑盒建模相结合的技术：

1. 对于被建模对象电路的线性部分（包括了有可变元器件的部分）使用白盒建模技术，精确还原出电路的响应以及因旋钮变化带来的电路响应变化，让模型最大程度上匹配被建模对象的电路结构和旋钮行为。

2. 对于电路的非线性部分，我们设计了独有的**动态黑盒非线性模型**，在保证匹配设备非线性特征的同时深度优化了模型的计算复杂度，使得该模型尽可能还原被建模对象的非线性系统的特点电路。

3. 最终得到的建模结果与真实设备做对比的过程中，我们使用黑盒建模技术对模型参数做最终微调，以修复建模中存在的误差。

一、使用白盒建模技术还原线性部分

现实中大多数模拟设备的旋钮控制结果都是高度交互的，他们在实现指定功能的同时，还会伴随着意料之中或意料之外的“副作用”，如前文所述，这一点黑盒建模是无法做到的。下面试举几例说明模拟设备的特点来说明，并由此说明 CDCM HD 技术的独特性。

例一、音箱上的 Gain（增益）旋钮：
一般情况下，音箱会先对吉他信号进行一级放大，然后再进入 Gain 旋钮相关的电路。而 Gain 控制电路往往采用衰减式电路设计（这意味着当 Gain 旋钮在最大位置时，对前一级输入的信号不做什么处理，拧小 Gain 旋钮会对前一级信号进行衰减处理）控制信号的增益幅度，从而控制失真度的大小；但有些设备会在 Gain 电路中添加 Bright Cap 电容，从而实现在改

变增益的同时也改变频响的效果，表现出来的效果是 Gain 越小音色越亮、Gain 越大音色越暗，以使不同类型的吉他得到尽可能相似的音色。后续的一些现代高增益音箱开放了两个增益旋钮（其中一个只控制增益幅度，另一个既控制增益幅度又控制频响）以使音色有更多的丰富性。

在 CDCM HD 建模的环节中，工程师会针对不同音箱上不同的 Gain 电路设计，使用白盒建模技术作出不同的建模，以精确还原出 Gain 调节过程中电路响应变化以及不同品牌音箱的真实设计特点。

例二、音箱上的 EQ 旋钮曲线：

旋钮电位器类型的选用在一定程度上会决定音箱的特点。例如，在同样的 Tone Stack EQ 电路设计下，有人会觉得某一品牌的音箱音色比另一品牌的音箱音色暗，除了元件和箱体、喇叭的搭配之外，电位器也是一个重要影响因素。同样在 12 点位置，线性（Linear）电位器和对数型（Log）电位器的阻值不同，调节得到的结果也不同。

在 CDCM HD 建模的环节中，工程师会针对不同音箱上不同的旋钮电位器类型，逐一定制旋钮曲线映射函数，并对每一个模型的旋钮速率作出手工调整，以最大程度上还原真实音箱上旋钮的行为。

二、使用动态黑盒非线性模型对非线性部分进行匹配

如前文所说，对于非线性部分，黑盒模型不能准确体现被建模设备的动态变化，白盒模型的运算量又过大。CDCM HD 独有的**动态黑盒非线性模型**结合了黑盒和白盒建模的特点，将传统建模技术做了进一步精炼和发扬光大。

一方面，该模型可以根据不同的演奏力度实时、动态调整模型参数，从而还原真实设备电对力度的反馈，同时也不会像传统白盒建模方法一样运算量过大；另外一方面，该模型可以通过调整模型参数以精准匹配真实设备由于非线性产生的谐波分量，使最终的建模结果更加贴近真实的设备。

三、最终微调：频响误差修饰

因为种种原因，最终得出的模型还是和真实设备之间存在一定的偏差。发生这种偏差的原因有很多。
其中一个常见的原因还是受限于电路图。前面曾提到过，极度依赖电路图是白盒建模的缺点之一。很多被建模对象原型机往往都非常难以获得，即便有幸能够找到一台原型机，原型机

的电路也可能因为有保护部分而无法对其电路进行精确研究；另外，也存在原型机元器件被替换的可能性，这样也会导致音色上的误差。

另一个原因就是米勒效应。当两个电压不同的元件彼此靠近时，它们之间的电场会使电荷存储在元件上，这就相当于引入了一个寄生电容，同时也会导致其行为偏离理想电路元件的行为。在音箱中，三极管的栅极（Grid）和阳极（Plate）之间的寄生电容一定程度上会影响到高频。米勒效应在使用 PCB 板布线的箱头中影响较小，但在老式的点对点（Point-to-Point）布线的箱头中会有较大的影响。

还有一种可能跟箱体搭配有关。在不同阻抗的喇叭搭配下，箱头输出信号的频响会喇叭阻抗曲线的变化而变化。这一点虽然很多音箱采用后级负反馈的设计弥补，但这种偏差依然存在；更何况有的音箱并没有设计负反馈电路。

CDCM HD 在建模的过程中的最后阶段，会使用独有的黑盒建模算法，针对上述可能存在的误差做频响上的修正，使最后得出的结果更贴近被建模对象的音色。